# Fleuves et rivières de Madagascar



Pierre Chaperon
Joël Danloux
Luc Ferry

ORSTOM Editions
DMH
CNRE

Ony sy renirano eto Madagasikara

# Fleuves et rivières de Madagascar

*Ony sy renirano eto Madagasikara*

# Monographies hydrologiques

## Déjà parues

1 - *Le bassin du fleuve Sénégal* - C. Rochette - 441 p., 3 cartes annexes (ISBN 2-7099-0344-X)

2 - *Le bassin du fleuve Chari* - B. Billon, J. Guiscafre, J. Herbaud, G. Oberlin - 450 p., 5 cartes annexes (ISBN 2-7099-0329-6)

3 - *Le bassin de la rivière Sanaga* - P. Dubreuil, J. Guiscafre, J.-F. Nouvelot, J.-C. Olivry - 350 p., 4 cartes annexes (ISBN 2-7099-0361-X)

4 - *Les ressources en eau de surface de la Martinique* - J. Guiscafre, J.-C. Klein, F. Moniod - 392 p., 9 cartes annexes (ISBN 2-7099-0392-X)

5 - *Le bassin du fleuve Volta* - F. Moniod, B. Pouyaud, P. Séchet - 514 p., 4 cartes annexes, 6 microfiches (ISBN 2-7099-0469-1)

6 - *Le bassin de la Mejerdah* - J. A. Rodier, J. Colombani, J. Claude, R. Kallel - 452 p., 7 cartes annexes, 4 microfiches (ISBN 2-7099-0595-7)

7 - *Les ressources en eau de surface de la Guadeloupe* - P. Chaperon, Y. L'Hôte, G. Vuillaume - 2 t. : 834 p., 3 cartes annexes (noir et blanc), 1 carte (couleurs), 4 microfiches (ISBN 2-7099-0761-5)

8 - *Monographie hydrologique du fleuve Niger* - Y. Brunet-Moret, P. Chaperon, J.-P. Lauragat, M. Molinier - 2 t. : 396 p. + 506 p., 13 cartes (ISBN 2-7099-0790-9 et 2-7099-0792-5)

9 - *Fleuves et rivières du Cameroun* - J.-C. Olivry - 736 p., 2 cartes annexes (dont 1 couleurs) (ISBN 2-7099-0804-2)

**Points de vente**

*Orstom Éditions-Diffusion*
72, route d'Aulnay - 93143 Bondy cedex - Tél. (1) 48 02 55 00

*Librairie Orstom-Cedid*
213, rue La Fayette - 75480 Paris cedex 10 - Tél. (1) 48 03 75 62

*Librairie Orstom Montpellier*
911, avenue Agropolis - BP 5045 - 34032 Montpellier cedex 1 - Tél. 67 61 74 00

# Fleuves et rivières de Madagascar

Monographie hydrologique 10

## *Ony sy renirano eto Madagasikara*

Pierre Chaperon
Joël Danloux
Luc Ferry

**Éditions de l'Orstom**
INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

**Ministère de la Recherche scientifique**
CENTRE NATIONAL DE RECHERCHE SUR L'ENVIRONNEMENT

**Ministère des Transports et de la Météorologie**
DIRECTION DE LA MÉTÉOROLOGIE ET DE L'HYDROLOGIE

Paris 1993

*Maquette de couverture* : Michelle Saint-Léger
*Photo de couverture et planches photos* : Jean-Marc Élouard
*Cartes et figures* : Jean-Pierre Debuiche, Marc Suavin et M. Rakotondramanana
*Fabrication et coordination* : Catherine Guedj

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1er de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

© Orstom 1993

ISSN 0335-6906
ISBN 2-7099-1126-4

# AVERTISSEMENT

Il est souvent fait référence, dans cet ouvrage, à des études anciennes dans lesquelles la toponymie française en usage jusque vers les années soixante a été utilisée.

Afin de faciliter la localisation des stations ou observatoires les plus souvent cités, nous donnons ci-dessous une liste sommaire des équivalences.

| *En malgache* | *en français* |
|---|---|
| Ambohitra | Montagne d'Ambre |
| Antananarivo | Tananarive |
| Antsiranana | Diego-Suarez |
| Mahajanga | Majunga |
| Toamasina | Tamatave |
| Tôlanaro | Fort-Dauphin |
| Toliara | Tulear |

# PRÉFACE

Face à de prestigieuses opérations de développement aux résultats souvent incertains, une meilleure gestion de l'eau s'impose. Autant doit-on apprécier le climat et son évolution ainsi que l'état des ressources en eau et leur variabilité spatio-temporelle, autant doit-on avoir une politique d'ensemble adaptée aux contraintes locales et aux besoins de la population.

L'ouvrage *Fleuves et rivières de Madagascar*, qui est le fruit d'une coopération scientifique entre le CNRE, l'Orstom et la Direction de la météorologie et de l'hydrologie, constitue la première étape d'une réflexion sur l'interaction entre la gestion de l'eau et le développement, et sur la manière de concevoir des politiques et programmes de développement viables pour Madagascar.

Le ministre de la Recherche scientifique
Andrianantenaina Pierre

# AVANT-PROPOS

Dans le cadre de la Conférence des Nations unies pour l'environnement et le développement, nous ne pouvons que saluer la parution de Fleuves et rivières de Madagascar pour laquelle nous remercions les auteurs.

Dire que la connaissance et la gestion des ressources en eau est indispensable au développement d'un pays relève de l'évidence. Cependant, elles nécessitent de très nombreuses observations en vue d'établir les bases indispensables pour la caractérisation des régimes hydrologiques.

Cet ouvrage, première synthèse des connaissances sur les fleuves et rivières de la Grande Ile, constitue donc un outil précieux pour les aménageurs et les utilisateurs intéressés par la gestion et la surveillance des ressources en eaux.

Nous nous félicitons de voir *Fleuves et rivières de Madagascar* édité sous le couvert de l'Orstom, du Centre national de recherche sur l'environnement et de la Direction de la météorologie et de l'hydrologie. Ce livre est le produit d'une réelle coopération entre trois organismes œuvrant dans la recherche pour le développement.

Nous espérons une suite prochaine à ce travail sur l'eau aussi minutieux que de premier ordre.

Professeur Lala Henriette Rakotovao

# Sommaire

Préface ..... 6
Avant-propos ..... 7
Sommaire ..... 8

Introduction 9

Facteurs conditionnels des régimes 13

Première partie

Chapitre 1 : FACTEURS GÉOGRAPHIQUES ..... 14
Chapitre 2 : FACTEURS CLIMATOLOGIQUES ..... 66

Analyse des données hydrologiques 153

Deuxième partie

Chapitre 3 : PRÉSENTATION DE L'ANALYSE ..... 154
Chapitre 4 : NORD DE MADAGASCAR ..... 161
Chapitre 5 : LE VERSANT ORIENTAL ..... 210
Chapitre 6 : LE SUD ..... 380
Chapitre 7 : LE VERSANT OCCIDENTAL ..... 444

Synthèse régionale des régimes hydrologiques 707

Troisième partie

Chapitre 8 : LES APPORTS ANNUELS ET LEURS DISTRIBUTIONS MENSUELLES ..... 710
Chapitre 9 : LES CRUES ..... 739
Chapitre 10 : LES BASSES EAUX ..... 783
Chapitre 11 : GRANDES UNITÉS NATURELLES HYDROLOGIQUES ..... 797

Conclusion 809

Bibliographie 813

Annexes 823

Table des matières 855

# Introduction

*"Salut ! terre royale où mes aïeux reposent,*
*Grands tombeaux écroulés sous l'injure du temps,*
*Et vous coteaux fleuris que les fleuves arrosent,*
*Avec leurs ondes d'or aux reflets éclatants,*
*Salut ! village rouge aux tuiles primitives,*
*Sur lesquelles, parfois, bondit le beau levant,*
*Vieux murs que, le matin, de leurs chansons plaintives,*
*Les filles de l'Imerne animent en rêvant."*

Joseph Rabearivelo

Les observations et mesures hydrométriques à Madagascar sont anciennes et le plus souvent associées à des études d'aménagements (usine d'Antelomita sur l'IKOPA supérieure - 1909, SAMBIRANO, compagnie Nosybeene - 1925, hydraulique agricole sur la MAEVARANO - 1935, aménagement hydro-électrique de la VOHITRA à ROGEZ - 1928, 1934, retenue de MANTASOA sur la VARAHINA du nord - 1938, etc.). Mais ce n'est qu'à partir de 1947-48 qu'à été mis en place un premier réseau de stations hydrométriques permanentes dont la gestion a été assurée jusqu'en 1973 par des équipes d'hydrologues de l'EDF, puis de l'ORSTOM sous la direction des ingénieurs et chercheurs O. CAMUS, H. PELLERAY, Y. BRESSON, M. ALDEGHERI, P. POURRUT, A. CHOURET, B. BILLON, J. DANLOUX, R. GOUYET, D. IBIZA, D. BAUDUIN et L. FERRY assistés de nombreux techniciens malgaches et français. A partir de 1973, la gestion des réseaux a été assurée par les services techniques malgaches de la METEOROLOGIE NATIONALE et de L'AGRICULTURE.

En dépit de l'étendue du territoire et de la dimension modeste des équipes d'hydrologues, une quarantaine de stations de base réparties sur toutes l'île, ont pu être suivie pendant plus de trente ans et de très nombreuses études de terrain ponctuelles effectuées pour des projets d'aménagement, le suivi des événements cycloniques etc. Sur la base des milliers d'observations journalières et mesures, de nombreuses études ont été réalisées dont une liste sommaire est données en Bibliographie (la liste exhaustive des études hydropluviométriques est fournie dans la "Bibliographie pouvant intéresser les recherches hydrologiques et climatologiques et les aménagements hydrauliques à MADAGASCAR". L. FERRY, 1987, ORSTOM, Tananarive).

Reprenant, complétant et précisant ces études partielles dans le cadre d'une synthèse globale, le présent ouvrage se présente sous une forme classique.

Dans la première partie sont décrits les facteurs conditionnels des régimes hydrologiques : situation de l'île, facteurs physiographiques déterminants (géologie et géomorphologie des grands versants, sols et couverture

végétale, réseau hydrographique) et facteurs climatologiques (mécanismes généraux du climat dans le sud-ouest de l'Océan Indien, vents, températures et humidité relative, évaporation et évapotranspiration, insolation et rayonnement solaire, précipitations et régions climatiques).

Cet exposé s'appuie sur de nombreux ouvrages de géographie générale ou spécialisée dont nous avons retenu les éléments les plus directement liés à la caractérisation des régimes hydroclimatologiques.

La seconde partie est consacrée à l'analyse des données hydrologiques. Après une brève présentation de la méthodologie utilisée, les éléments statistiques (après critique des données, extension et complètement des échantillons et application des principales lois de distribution) des principales caractéristiques hydrologiques (apports annuels et saisonniers, crues et basses eaux), sont présentés région par région, bassin par bassin. Pour la plupart des stations de base, l'analyse permet de dégager, à partir des corrélations hydro-pluviométriques et d'une modélisation sommaire à l'échelle mensuelle, les principales relations entre les influences respectives des facteurs conditionnels de chaque bassin et la transformation du "signal d'entrée" (histogramme des précipitations) en "signal de sortie" décrit par les caractéristiques des différents régimes étudiés.

Afin de ne pas surcharger cet ouvrage de matériel documentaire, seuls les débits mensuels observés (éventuellement complétés ou corrigés) sont présentés sous forme de tableaux. Les données de base complètes (historique des stations, limnimétrie, jaugeages, courbes d'étalonnage, débits ponctuels et journaliers...) sont accessibles dans les fichiers informatisés de la banque de donnée de la Direction de la Météorologie et de l'Hydrologie (ANTANANARIVO - Madagascar). Ces fichiers sont en cours de complètement dans le cadre d'un projet financé par le FAC.

La troisième partie est la synthèse géographique à l'échelle de l'île des différents régimes hydrologiques de Madagascar. L'extension régionale des caractéristiques de ces régimes s'appuie sur les relations établies sur les bassins de référence entre ces caractéristiques et les facteurs qui les déterminent ainsi que sur la cartographie des différents facteurs conditionnels (cartes climatologiques, géomorphologiques, pédologiques, de végétation...). L'objet de cette synthèse est donc d'identifier et délimiter les grandes unités naturelles hydrologiques avec leurs caractéristiques moyennes.

Cet ouvrage de synthèse s'appuie sur l'importance "Contribution à l'étude des régimes hydrologiques malgaches" réalisée en 1983 par Marius ALDEGHERI dont nous avons repris l'étude des facteurs conditionnels des régimes. M. ALDEGHERI, aidé par R. GOUYET, avait également réalisé l'essentiel du fichier opérationnel des débits dont la critique lui fût facilitées par la très solide expérience du terrain acquise au cours de nombreuses années passées à MADAGASCAR. Ce fichier a pu être réactualisé, à partir des données plus récentes, par L. FERRY et J. DANLOUX, qui a revu en particulier l'étalonnage des plus hautes eaux.

Luc FERRY a revu entièrement l'étude de la pluviométrie annuelle et dressé la carte des isohyètes interannuelles. Joël DANLOUX, bénéficiant de son expérience des événements cycloniques, a réalisé l'étude des crues et des débits maximaux annuels. P. CHAPERON a assuré la direction de l'ouvrage.

Les auteurs remercient Monsieur Bernard POUYAUD, directeur délégué du département "Eaux Continentales" de l'ORSTOM, de l'intérêt et des encouragements qu'il a bien voulu apporter à la réalisation de cet ouvrage.

Cette monographie a été réalisée dans le cadre du grand programme EQUERRE (Etude de la QUalité, de l'ERosion et du Régimes de Eaux) de l'unité de recherche "Géodynamique de l'Hydrosphère Continentale". Les auteurs remercient son responsable, Monsieur Jean-Claude OLIVRY de l'appui et des conseils qu'il leur a apporté. Leurs remerciements vont également à Monsieur Frédéric MONIOD, vice-président de la Commission Scientifique Hydrologie-Pédologie de l'ORSTOM.

A différents titres, de nombreux collègues et collaborateurs français et malgaches ont apportés aux auteurs de cet ouvrage, contributions et renseignements complémentaires. Nous ne pouvons les citer tous mais qu'ils soient ici remerciés, en pensant particulièrement à Jean-Marc ELOUARD, chercheur de l'ORSTOM, pour la réalisation des photographies qui illustrent ce livre et à Laurent ROBISON, chercheur au Centre National de Recherche sur l'Environnement - Madagascar - qui a contribué à l'étude des précipitations annuelles.

La réalisation technique de cet ouvrage n'aurait pu être menée à bien sans l'appui du Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM à Montpellier. Nos remerciements vont à son responsable, Monsieur Gilbert JACCON et ses collaborateurs, messieurs Michel GAUTIER et Michel TRAVAGLIO.

Les auteurs remercient Messieurs Jean-Pierre DEBUICHE, Marc SUAVIN, dessinateurs au Laboratoire d'Hydrologique à Montpellier et Monsieur RAKOTONDRAMANANA M., dessinateur à Antananarivo, pour leur contribution décisive dans la réalisation des dessins et surtout la réalisation des planches couleurs.

Enfin, toujours à Montpellier, nos remerciements vont également à Mesdames Brigitte JEANNY, Nadine MUTHER et Claudine DIEULIN-PICART qui ont assuré la saisie de cette monographie.

Qu'il soit enfin permis aux auteurs de cette étude de la dédier à la mémoire de leur camarade Daniel BAUDUIN, hydrologue de l'ORSTOM.

# Facteurs conditionnels des régimes

Première partie

# Facteurs géographiques

Chapitre 1

## 1. SITUATION

L'île de Madagascar est située au sud-ouest de l'Océan Indien, à proximité de l'Afrique orientale, dont elle n'est séparée que par un bras de mer de 400 km de large environ, le canal de Mozambique.

Suivant une orientation générale N.N.E.- S.S.W elle s'étend sur une longueur de 1 600 km, du Cap d'Ambre au Cap Sainte-Marie, entre 11°57' et 25°39' de latitude sud. Dans sa plus grande largeur, Madagascar mesure 570 km environ. Le méridien 47° est de Greenwich partage l'île en deux parties à peu près égales.

Sa superficie est voisine de 590 000 km², soit la surface de la France, la Belgique et les Pays-Bas réunis.

ANTANANARIVO, la capitale, se trouve à environ 2 000 km de l'équateur et à 8 000 km du pôle sud. Les petites îles "limitrophes" du continent antarctique (îles Crozet, Kerguelen, etc.) se trouvent à 4 000 km plus au sud.

L'île est traversée par le tropique du Capricorne, un peu au-dessous de la latitude de Toliara, c'est-à-dire que sa partie méridionale se trouve à la hauteur des déserts africains de l'hémisphère sud. Ceci entraîne dans cette région une certaine aridité du climat modérée, cependant, par le voisinage de la mer.

Madagascar est donc presque entièrement située dans la zone tropicale (voir figure 1.1.). Mais l'influence du relief, de la latitude, de l'exposition crée une très grande diversité du climat entraînant une complexité extrême des régimes hydrologiques.

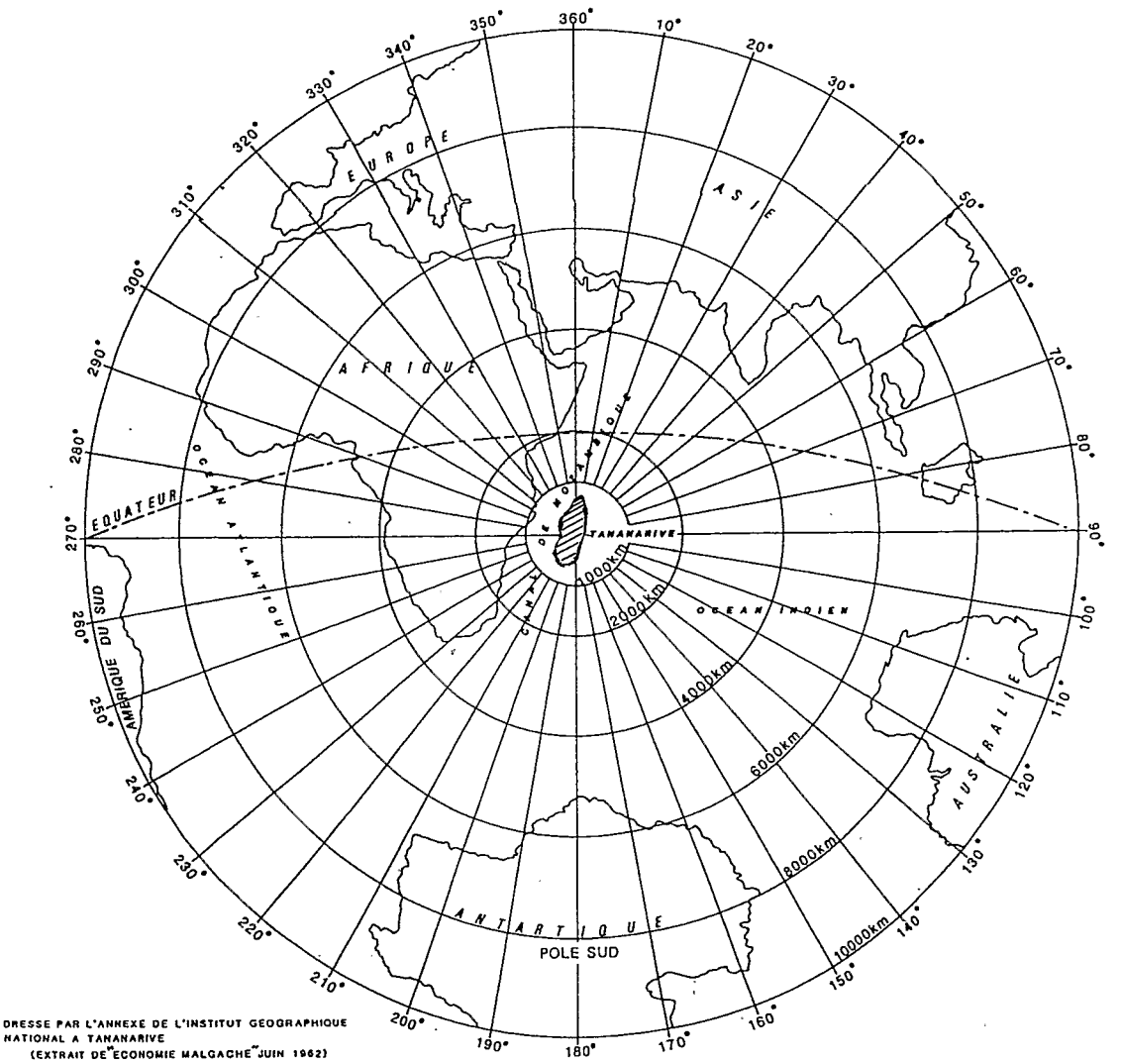
## 2. APERÇU GÉOLOGIQUE

Les géologues, par leur formation et la finalité des recherches qu'ils avaient entreprises, se sont intéressés avant tout à l'origine et la stratigraphie des roches constituant le sous-sol malgache.

Des études très complètes menées par d'éminents spécialistes (H. BESAIRIE, 1946) depuis plus de soixante-dix ans ont contribué à bien faire connaître l'histoire géologique de Madagascar et ont établi de façon précise

figure 1.1.

Carte de situation
de Madagascar




DRESSE PAR L'ANNEXE DE L'INSTITUT GEOGRAPHIQUE
NATIONAL A TANANARIVE
(EXTRAIT DE "ECONOMIE MALGACHE" JUIN 1962)

la chronologie des systèmes métamorphiques précambriens avec le détail des principaux faciès des roches du socle ancien ainsi que la stratigraphie de la couverture sédimentaire.

Notre propos ne sera pas de reprendre dans ces études des listes de type de roches dont l'énumération serait à la longue fastidieuse et de peu d'intérêt pour l'hydrologue car, à notre avis, l'importance des couches d'altération fait passer au second plan l'influence de la nature pétrographique des roches mères : les granites migmatiques, les charnockites non altérés et autres constituants sont, sauf quelques cas isolés et relativement peu étendus, profondément enfouis sous de plus ou moins grandes épaisseurs d'argile latéritique, ce qui peut laisser supposer que les différences de structure, de composition chimique des roches composant le socle n'ont que peu d'incidence sur les caractéristiques hydrologiques des grandes rivières malgaches.

Nous pensons que dans l'ensemble la géologie influence le régime des rivières malgaches surtout par l'intermédiaire du relief dont la configuration actuelle est déterminée par la nature des roches, liée aux mouvements tectoniques et à l'évolution morphologique par suite des phénomènes d'érosion.

D'autre part, l'essentiel du débit des rivières provient du ruissellement de surface, complété par le drainage des couches d'altération. La proportion du débit provenant des nappes profondes est, sauf cas particuliers de plateaux calcaires très fissurés et de zones volcaniques perméables, généralement assez faible.

Ceci étant, nous résumerons, à partir des travaux de divers auteurs (H. BESAIRIE, Ch. ROBEQUAIN et R. BATTISTINI) l'histoire géologique de Madagascar en notant que le socle cristallin malgache qui couvre à peu près les deux tiers de l'île est le résultat de la métamorphisation de formations sédimentaires primitives déposées dans une aire géosynclinale à la suite d'une orogenèse majeure datée de 2 600 millions d'années (H. BESAIRIE, carte géologique de l'Atlas de Madagascar 1969). On a stratigraphiquement ou zonéographiquement distingué quatre grands systèmes ; les deux plus anciens sont le système Androyen et le système d'Antongil, puis le système du graphite et enfin le système du Vohibory.

Ces formations présentent une disposition stratifiée et plus ou moins violemment plissée à la suite de plusieurs reprises métamorphiques et tectoniques dont la plus récente semble dater de 500 millions d'années. Ces mouvements ont, d'une part, métamorphosé les sédiments précambriens, ont été accompagnés de migmatisations et de granitisations et ont entraîné d'autre part des cassures du socle provoquant des invasions marines et des dépôts de sédiments calcaires et sableux. Ces sédiments repris par des soulèvements régionaux ont été métamorphisés et ont donné la série schisto-quartzo-calcaire placée dans la stratigraphie entre les systèmes du graphite et du Vohibory. Ils sont localisés dans le centre de l'île et comprennent surtout des schistes, des quartzites et des cipolins.

H. BESAIRIE, dans l'ouvrage déjà cité, met à part l'ensemble des granites et migmatites des tampoketsa (affectés par une forte granitisation oblitérant les caractères originels). Ils constituent l'ossature des grands axes anticlinaux et peuvent renfermer des enclaves appartenant aux systèmes du graphite et du Vohibory, comme le montre la carte géologique de la figure 1.2.

En résumé, le vieux socle est constitué :

- d'abord par des terrains métamorphiques stratifiés (gneiss, leptinites, granites stratoïdes, etc.) sur lesquels reposent parfois en discordance des terrains où le métamorphisme est moins poussé et dans lesquels on reconnait encore le faciès du sédiment originel (cipolins, calcaires, schistes, et quartzites, ces derniers dont l'épaisseur peut atteindre 300 m, étant les témoins de l'érosion des hautes chaînes cristallines) ;
- puis par des intrusions d'âges divers (granites andringitréens entre autres), les plus récentes correspondant aux grandes dislocations du crétacé supérieur et au volcanisme de la fin du tertiaire début du quaternaire : venues acides (granites, microgranites, rhyolites) et basiques (gabbros, basaltes).

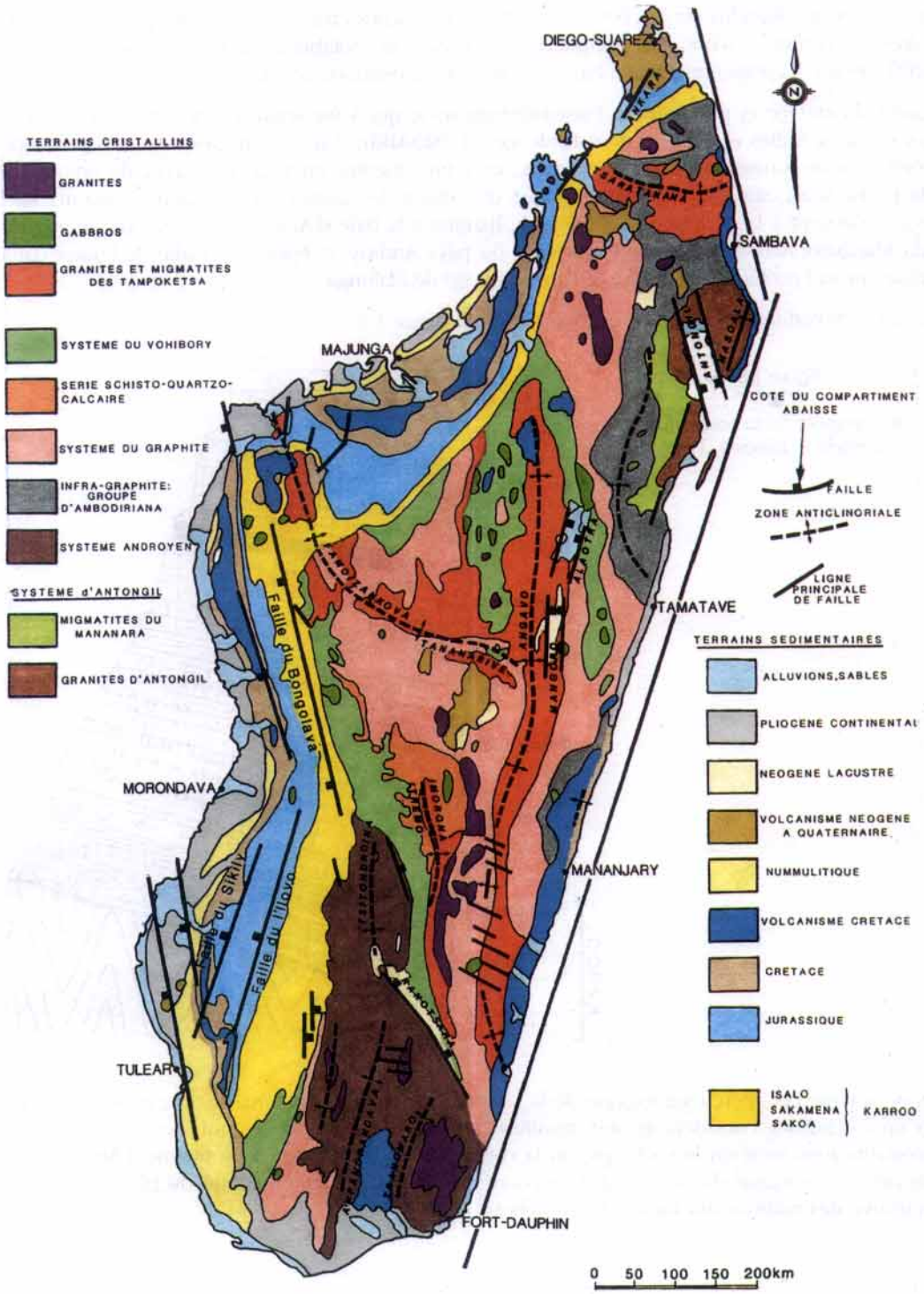



figure 1.2.

Carte géologique et tectonique de Madagascar (d'après l'atlas de Madagascar par L. Brenon)

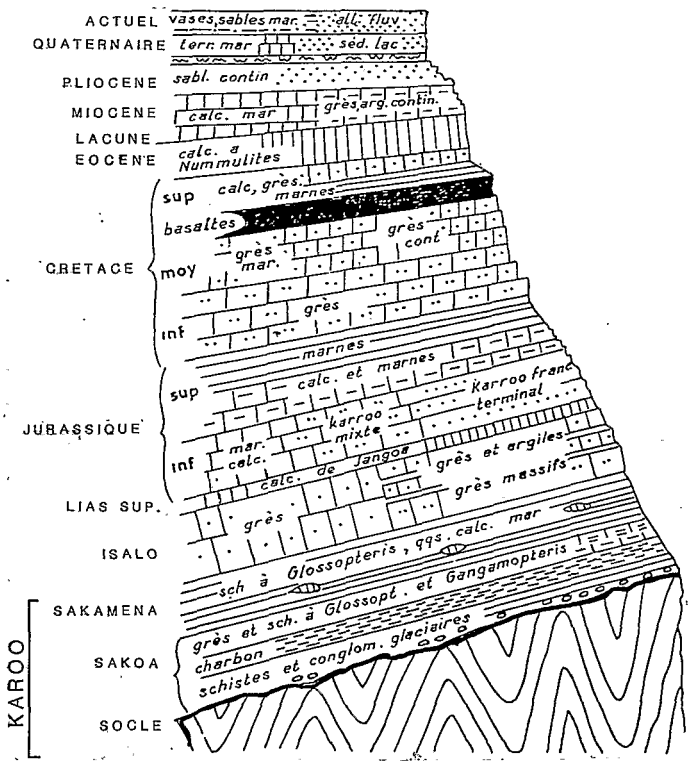
Les terrains sédimentaires forment une large bande sur la côte ouest de l'île mais on en rencontre aussi quelques lambeaux très peu étendus sur la côte est. Alors que les roches cristallines sont très plissées, les terrains sédimentaires, au contraire, n'ont subi aucune action orogénique notable et se sont déposés régulièrement (H. BESAIRIE, 1946). Ils présentent actuellement un très faible pendage vers la mer.

Cependant, à partir du crétacé et par suite de l'instabilité du socle qui a été soumis à des effondrements et soulèvements locaux avec failles et flexures de subsidence (H. BESAIRIE, 1965), transgressions et régressions marines se succèdent avec formation de dépôts continentaux puis marins, en alternance avec de nombreux changements de faciès. C'est également de cette époque que datent les grands épanchements fissuraux surtout basaltiques qui s'étalent à la périphérie du socle, de Iharana à la baie d'Antongil, sur 450 km au sud de l'embouchure du Mangoro, massif de basalte et cryolites du pays Androy, nappes de basalte de l'ouest dans la région de Tuléar, au sud du Cap Saint-André et dans le bassin de Majunga.

La stratigraphie de la couverture sédimentaire est donnée sur la figure 1.3.

figure 1.3.

Stratigraphie de la couverture
(d'après H. Besairie, 1946)




Nous ajouterons pour clore cet aperçu géologique de la Grande Ile que la fin du tertiaire et le quaternaire ont été marqués par un volcanisme considérable, aux manifestations et émissions variées qui a construit des édifices parfois importants aussi bien sur le socle que sur la couverture sédimentaire : la Montagne d'Ambre dans le nord, diverses parties du massif du Tsaratana, l'imposant massif de l'Ankaratra, datant du plio-quaternaire et l'Itasy où l'on trouve des édifices aux formes très fraîches.

Ces manifestations volcaniques ont profondément perturbé le système hydrographique préexistant, créant des barrages derrière lesquels se sont formés de vastes ensembles lacustres aujourd'hui en grande partie asséchés (G. DONQUE, 1965). Ce volcanisme est venu modeler le relief de l'île qui, dans ses grandes lignes, a été façonné par les divers mouvements tectoniques de surrection et de dislocation suivis par des phases d'érosion et de remblaiements. Les nombreuses failles qui apparaissent nettement un peu partout dans l'Ile n'ont, probablement, pas eu un rôle considérable dans l'élaboration du relief malgache (ROBEQUAIN, 1958) ; leur influence est plus nette en certaines régions, notamment côté sud-est, sur le tracé du réseau hydrographique qui présente des coudes à angle droit très caractéristiques.

Cependant, il faut noter que certaines dépressions telles celles de l'Alaotra et du Mangoro, dans le centre est, celle de Ranotsara dans le centre sud, sont interprétées, par plusieurs auteurs, comme des fossés tectoniques récents.

Enfin, le relief caractéristique de l'ouest malgache s'explique par un phénomène de basculement vers l'ouest du socle sur lequel se sont déposées les couches sédimentaires qui, de ce fait, plongent plus ou moins lentement vers le canal du Mozambique.

# 3. GÉOMORPHOLOGIE

## 3.1. Caractères d'ensemble

Ce qui frappe immédiatement lorsqu'on examine une carte physique de Madagascar, c'est la dissymétrie de l'île normalement à son grand axe (figures 1.4. et 1.5.). Le versant occidental s'étale doucement vers le canal de Mozambique, tandis que la pente du versant oriental est toujours très forte, la ligne de partage des eaux étant toujours à moins de 100 km en moyenne de l'Océan Indien.

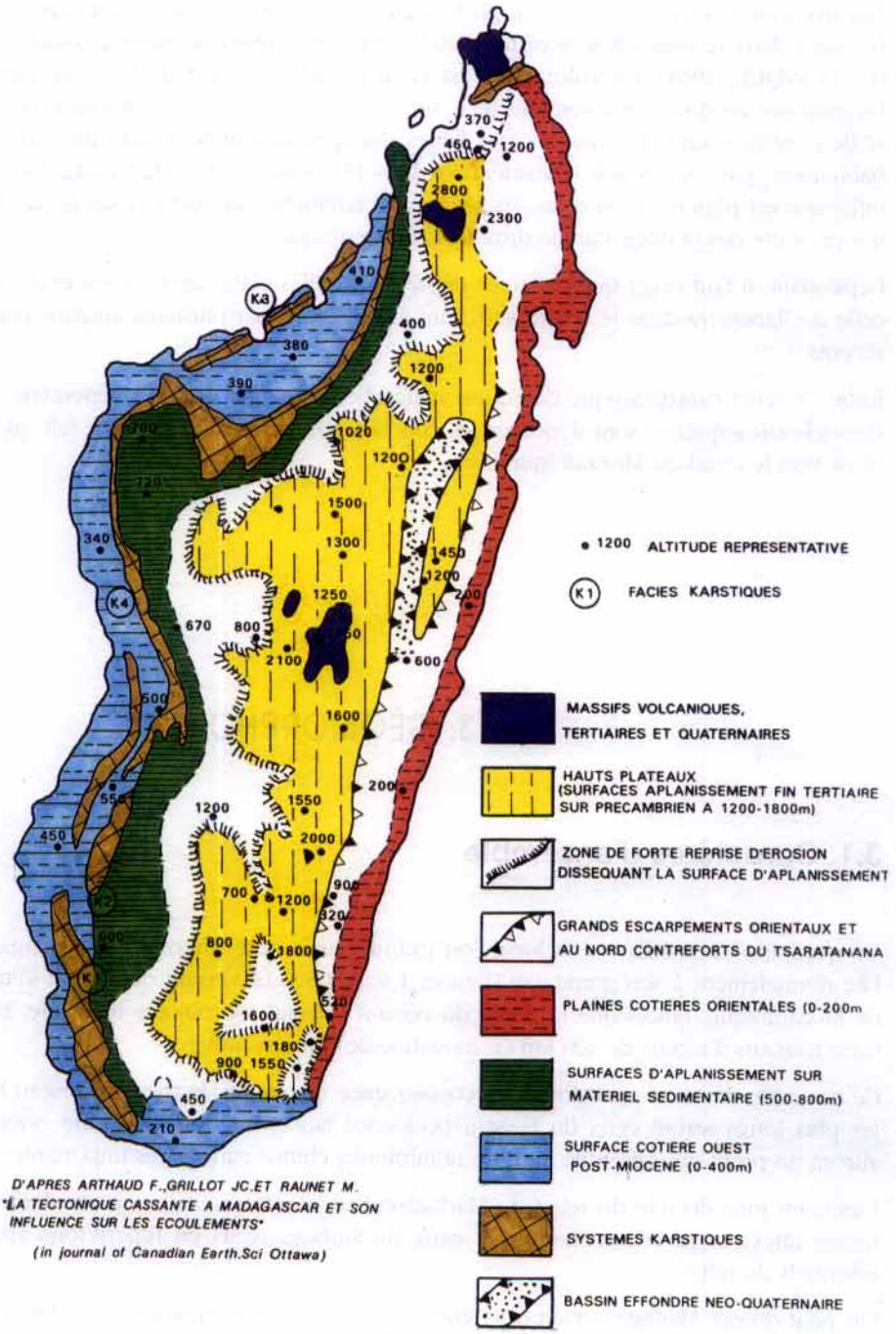
Ce caractère du relief aura donc une conséquence directe sur le tracé du réseau hydrographique : les fleuves les plus longs seront ceux du versant occidental tandis que sur le versant oriental, les fleuves plus courts, auront un profil très accentué avec de nombreuses chutes parfois très importantes.

L'examen plus détaillé du relief de Madagascar va montrer certaines particularités qui influenceront plus ou moins directement l'écoulement des eaux de surface. Nous en reparlerons après avoir examiné les traits essentiels du relief.

On peut diviser Madagascar en trois grands ensembles orographiques : les hautes terres centrales, le versant oriental, la zone sédimentaire du nord-ouest, de l'ouest et du sud.

figure 1.4.

Schéma géomorphologique




*D'APRES ARTHAUD F.,GRILLOT JC.ET RAUNET M.*
*"LA TECTONIQUE CASSANTE A MADAGASCAR ET SON INFLUENCE SUR LES ECOULEMENTS"*
*(in journal of Canadian Earth.Sci Ottawa)*

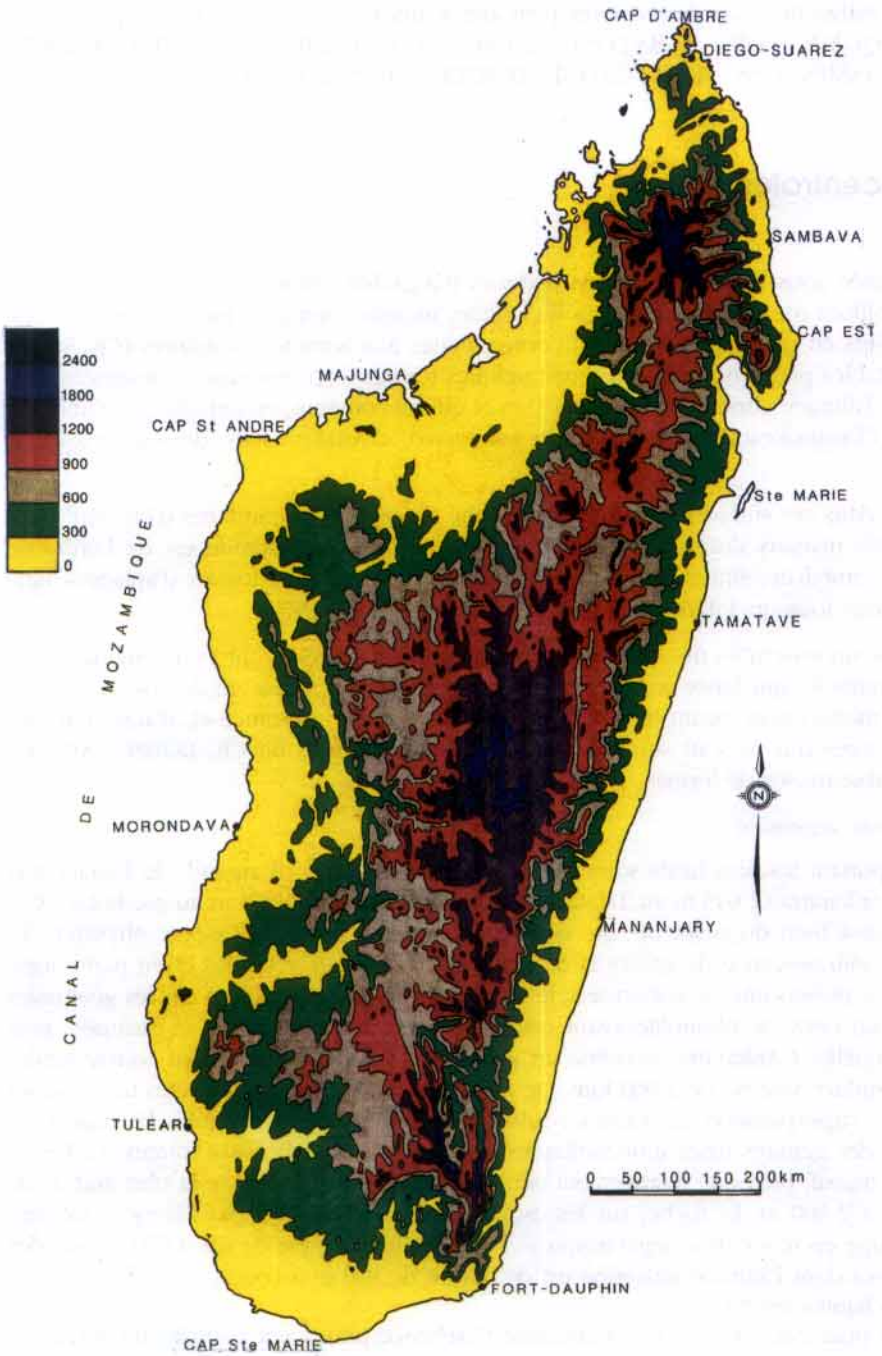



figure 1.5.

Carte du relief
(esquisse réalisée à partir
de la carte relief de
l'atlas de Madagascar)

Pour la description du relief malgache, nous ferons largement appel aux travaux remarquables qui existent déjà sur ce sujet (Ch. ROBEQUAIN, 1958 - R. BATTISTINI, 1967 - A. GUILCHER, R. BATTISTINI, 1967 - G. DONQUE, 1965 - H. DESCHAMPS, 1968 - R. BATTISTINI - LEBOURDIEC P. et F., 1969).

## 3.2. Les hautes terres centrales

Cette région, longtemps désignée sous le terme de hauts plateaux malgaches, présente un relief très varié : "hautes plaines d'alluvions, collines monotones empâtées de latérite, massifs compacts, grands dômes isolés, crêtes aiguës et dentelées, reliefs en pain de sucre ou en cornes, buttes aux sommets tabulaires (Ch. ROBEQUAIN, 1958). En fait de véritables plateaux, il n'existe que quelques formes d'aplanissement, désignées sous le terme de Tampoketsa, dont l'altitude varie de 1 000 à 1 850 m et qui ne couvrent, en définitive, qu'une surface relativement restreinte (Tampokesta d'Ankazobe, de Fenoarivo, d'Analamaitso, du Kamoro et de Beveromay).

Certains auteurs ont distingué dans ces surfaces sub-horizontales une succession de "Surfaces d'érosion" où il est possible de répertorier trois niveaux distincts : une surface supérieure dont l'altitude est de l'ordre de 1 600-1 650 m, une surface intermédiaire située à 1 350-1 450 m et enfin des niveaux locaux d'aplanissement situés à une altitude variable mais toujours inférieure à 1 350 m. (F. BOURGEAT, 1972).

Les hautes terres forment donc un ensemble très complexe dont les formes de relief ont pour origine, d'une part, le jeu de l'érosion différentielle qui laisse les granites et les quartzites en saillie au-dessus des roches encaissantes, les gneiss et les micaschistes jouant le rôle de matériaux de faible résistance et, d'autre part, les constructions volcaniques récentes qui se sont surimposées au socle. Comme le dit Ch. ROBEQUAIN, les hautes terres offrent un admirable musée de formes.

Nous distinguerons dans ce vaste ensemble :

- les trois grands massifs comportant les plus hauts sommets de l'île, ce sont du nord au sud : le Tsaratanana (2 875 m au Maromokotro), l'Ankaratra (2 643 m au Tsiafajavona) et l'Andringitra (2 658 m au pic Boby). Ces trois massifs sont différents aussi bien du point de vue géologique que du point de l'aspect physique. Le Tsaratanana est une puissante intumescence de gneiss et de granites profondément érodés et en partie masqués par les produits d'éruption pléistocènes et subactuels, le Maromokotro étant considéré par les géologues (H. BESAIRIE, *et al.*) comme un neck de phonolite ayant emprunté une cheminée étroite et escarpée, puis mis à nu par l'érosion différentielle. L'Ankaratra constitue un imposant massif volcanique qui couvre totalement le socle ancien sur une surface voisine de 4 000 km². On peut y distinguer de vieux dômes trachytiques et ryolitiques pliocènes avec superposition de vastes coulées basaltiques plus récentes. Le massif de l'Andringitra est constitué par des granites roses monzonitiques qui donnent un relief aux formes hardies et souvent impressionnantes. Ce massif, bien que relativement peu étendu, possède la surface la plus grande de l'île à une altitude supérieure à 2 000 m. La roche, sur les escarpements, est creusée, par l'érosion, de profondes canelures qui "la découpe en monolithes gigantesques". L'Andringitra domine de ses 2 000 m, par des versants très abrupts, des vallées dont l'altitude moyenne est de l'ordre de 800 m à l'ouest et de 700 m environ à l'est (rebord oriental des hautes terres) ;
- les surfaces sub-horizontales dont nous avons déjà mentionné l'existence pourraient être des fragments de vieilles pénéplaines protégées par des carapaces latéritiques : ce sont des régions tabulaires, monotones et entaillées de vallées plus ou moins profondes : Tampoketsa au nord et plateau de l'Horombe dans le centre sud. Ces surfaces correspondent au niveau supérieur arasé par l'érosion ; on peut y trouver quelques lourds reliefs portés par de puissantes lames de granites stratoïdes à faible pendage surplombant d'une centaine de

mètres le niveau aplani. Ces hauts plateaux, à l'aspect massif, dominent l'ensemble régional par de véritables abrupts de 200 à 300 m de dénivelée. En certains points de ces pénéplaines, on rencontre parfois des cuvettes circulaires fermées, faiblement encaissées (2 à 6 m) ; leurs bordures, à pentes relativement douces, sont irrégulièrement cuirassées (F. BOURGEAT, 1972). Selon des interprétations plus récentes (ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M., 1989), ces surfaces sub-horizontales, de niveaux d'altitude différents, seraient dues à une morphodynamique d'origine tectonique, encore active. Des mouvements, verticaux du socle entraîneraient des réajustements de l'équilibre hydrodynamique et la formation successive de surfaces sub-horizontales par fluage de convexisation, glissements étagés, "lavakisation", etc. ;
- des reliefs parallèles et rectilignes, de direction grossièrement nord-sud (mais quelquefois est-ouest) qui sont les racines des vieux plis isoclinaux dégagés par l'érosion et qui rappellent les reliefs du type pseudo-appalachien. D'après F. BOURGEAT, ces hauts sommets situés légèrement en contrebas des "Tampoketsa" permettent de reconstituer l'ancienne extension du niveau d'érosion ;
- des chaos de croupes arrondies gneissiques, à ondulations relativement molles, collines basses aux pentes recouvertes d'herbes et désignées sous le terme de "Tanety". Les versants sont très souvent encombrés de boules de granites ou entaillés par des phénomènes d'érosion accélérée de profondes escavations à parois abruptes, plus ou moins digitées, les "Lavaka" (trou, en malgache) dont l'aspect est souvent très spectaculaire ;
- de grands dômes isolés, rocheux et dénudés, à parois abruptes, et formes souvent convexes évoluant par desquamation, striés par des canelures dues au ruissellement. L'altération par desquamation, comparée très souvent aux pelures d'un oignon, est très fréquente. Le dégagement de masses arrondies, après entraînement des sols de décomposition et des arènes, forment des traînées de blocs qui peuvent s'allonger sur plusieurs kilomètres dans les directions structurales ;
- des zones déprimées qui sont, soit d'origine tectonique (plaine du Betsimitatra, bassin d'Antsirabe, plaine de l'Ankaizina), soit dues à des barrages mis en place par les éruptions volcaniques et qui ont créé des lacs dont la vidange incomplète laisse des zones plates à fond marécageux et à hydrographie indécise (marais d'Ifanjy, dans l'Itasy) ;
- un réseau hydrographique dont les vallées parfois encaissées et à fonds plats occupées très fréquemment par des rizières ont un profil longitudinal irrégulier avec rapides importants comportant même des chutes relativement élevées et des biefs calmes. Dans les plaines ou les zones déprimées marécageuses, les méandres sont nombreux.

En résumé, le relief des hautes terres centrales est très accidenté et aussi très varié dans ses formes. Tout ceci donne finalement à ce relief un caractère assez montueux ne ressemblant à des hauts plateaux que sur des surfaces relativement peu étendues.

## 3.3. Les bordures des hautes terres centrales

Vers l'ouest, les hautes terres centrales sont limitées par un escarpement d'aspect très varié dans le détail et dont l'altitude dépasse parfois 1 000 m. Le Bongolava, ou longue montagne, n'est en fait bien marqué qu'entre Ambatomainty et Malaimbandy soit sur 250 km environ.

C'est au niveau de cet escarpement que les grands fleuves de l'ouest malgache : Mangoky, Tsiribihina, présentent dans leur profil en long la dernière et brusque rupture de pente avec parfois des rapides assez importants mais sans chute notable : le potentiel hydroélectrique du Bongolava est relativement faible.

Sur le versant nord-ouest à la limite du bassin de Mahajanga, le socle ancien s'enfonce doucement sous les dépôts de la cuvette du Boina : les Tampoketsa s'abaissent graduellement pour former à la limite du sédimentaire une zone de collines dont l'altitude ne dépasse jamais 500 ou 600 m. C'est là que la Beztsiboka et

l'Ikopa présentent quelques sites intéressants du point de vue aménagements hydroélectriques mais qui ne sont pas les meilleurs parmi ceux que l'on trouve sur l'ensemble de leurs cours.

Vers le nord, le massif du Tsaratanana plonge très rapidement vers la mer, ce qui donne aux rivières un profil en long très accentué avec des pentes très fortes et des chutes importantes.

Au sud du 20e parallèle, le Bongolava perd peu à peu de son importance et se décompose en gradins plus ou moins horizontaux recouverts parfois de dépôts sédimentaires.

Vers le 24e degré de latitude sud, le plateau de l'Horombe tombe par des pentes plus ou moins escarpées constituant le "rebord manambien" de H. BESAIRIE et qui est, en fait, la limite sud des Hautes Terres Centrales. Cet accident du socle est remarquable par sa forme semi-circulaire épousant à distance le contour du massif volcanique de l'Androy. Dans ce massif, constitué par un empilement de coulées basaltiques et rhyolithiques et dont la structure est caractérisée par un effondrement central en chaudron, on ne retrouve plus rien des formes volcaniques originelles et seules apparaissent les formes mises en valeur par l'érosion différentielle, telle l'imposante "mesa" rhyolitique du Vohitsiombe (904 m) (R. Battistini, 1967).

Le socle ancien s'étend encore vers le sud, et le sud-ouest, jusque vers Ampanithy et Antanimora par les pénéplaines Mahafaly et de l'Androy parsemées d'inselbergs et de quelques hauts sommets (Vohibory, Vohipotsy, Vohimanga, Vohipary, Vohimena, Iantsisitra, etc.) et va finalement s'enfoncer, vers 200 m d'altitude, sous les sables roux de l'Androy et, à l'ouest, sous les calcaires éocènes du pays Mahafaly. (Ch. ROBEQUAIN, 1958).

La bordure orientale des hautes terres a souvent été qualifiée de grande falaise ou de grand escarpement oriental. Cette qualification un peu schématique n'est, en fait, valable que sur une portion relativement restreinte de la bordure des Hautes Terres, entre le 18è et le 20è parallèle sud, désignée sous l'appellation d'"Escarpement de l'Angavo" et encore cette falaise est constituée par une série de chaînons dont la largeur s'étend sur plusieurs kilomètres. Cependant, lorsqu'on arrive de Toamasina, on a bien de loin, par suite de la couverture forestière, l'impression d'une muraille verticale qui barre l'horizon.

Au nord, le massif du Tsaratanana descend régulièrement vers la mer. Le versant oriental de ce massif présente une série de dépressions fermées, dont l'altitude moyenne se situe vers 1 000 m (plaine de Doany, Ankaibe, etc.). Entre ces deux pénéplaines, culmine le puissant massif du Marozezy à 2 133 m et à moins de 50 km de la mer. Vers le sud, de la latitude de Maroantsetra, au nord du lac Alaotra, il n'y a pas de limite bien nette entre les hautes terres et la plaine orientale. On trouve une succession de plateaux et de Tampoketsa avec des zones relativement basses facilitant (théoriquement) les communications entre est et ouest : seuil de l'Androna ou de Mandritsara.

Le couloir de l'Alaotra-Mangoro, considéré par tous les auteurs, comme un accident tectonique est un palier intermédiaire entre les hautes terres et les collines de la bande littorale.

La falaise de l'Angavo se prolonge vers le nord, jusqu'à Andilamena, bordant la dépression de l'Alaotra , à l'ouest, par un gradin assez accentué dont les sommets ne dépassent jamais 1 300 m. Au sud du Mangoro, l'escarpement de l'Angavo perd de son altitude pour atteindre au sud du massif de l'Andringitra le fossé lacustre de Ranotsara-Itomampy, autre dépression tectonique récente qui, par le seuil de Soakimbany permet un passage facile entre l'Océan indien et le Canal de Mozambique. Dans l'extrême sud, les hautes terres sont limitées par les chaînes Anosyennes dont le massif du Beampingaratra, culminant à 1 957 m au Trafonaomby, constitue finalement la chaîne de montagnes la mieux différenciée de la bordure orientale des hautes terres.

## 3.4. Le versant oriental

Entre Tôlanaro et la baie d'Antongil, le versant oriental peut, au point de vue relief, être divisé en trois régions d'importance inégale.

- De Tôlanaro à la rivière Isandra (24° latitude sud), on trouve une zone relativement étroite, l'Anozy, présentant des dépressions et des vallées assez larges séparées par une chaîne montagneuse parallèle à la côte dont les sommets (Isakatelo, Vohimena) culminant aux alentours de 1 200, 1 300 m. On atteint rapidement l'Océan Indien par une étroite zone de collines latéritiques faiblement ondulées.

- Entre la rivière Isandra et l'embouchure du Mangoro existe une vaste pénéplaine adossée à l'escarpement oriental, témoin d'une ancienne surface d'érosion plus ou moins attaquée par un nouveau cycle (H. BESAIRIE, 1954). La forme du chevelu hydrographique présente une orientation tectonique rectangulaire ou contournée particulièrement frappante : directions parallèles ouest-est à la descente de la falaise.

Au nord de l'embouchure du Mangoro, le relief du versant oriental devient plus complexe. A partir de l'escarpement de l'Angavo et en se dirigeant vers l'est, on distingue tout d'abord la zone déprimée du haut Mangoro (couloir très étroit au sud de Moramanga, plaine de l'Ankay au nord) et de l'Alaotra (vaste dépression à la côte 750 environ, reste d'un lac en voie d'assèchement dont le lac Alaotra actuel occupe le centre sur 400 km² environ). Le seuil d'Andaingo sépare la plaine de l'Ankay de la cuvette de l'Alaotra. Certains auteurs (H. BESAIRIE, carte tectonique A.M. 1969) ont comparé cet accident tectonique aux fosses (RiftValley) de l'Afrique Australe et Orientale.

Plus à l'est, on trouve un plateau au relief jeune et accidenté d'altitude moyenne 1200 m culminant à 1 484 m au Mangerivola et présentant, à l'est, une falaise très abrupte appelée fréquemment deuxième falaise ou falaise Betimisaraka. On retrouve ensuite les collines Betsimisaraka dont l'altitude moyenne est de 400 m au pied de la seconde falaise. Ces collines s'étendent jusqu'à quelques kilomètres de la cote en un relief vallonné, couvert de végétation arbustive dense ayant pris la place de la forêt primaire.

Au nord de la baie d'Antogil, les contreforts du Tsaratanana s'approchent très près de la mer, ne laissant la place qu'à des plaines alluviales étroites et peu étendues interrompues par des épanchements basaltiques.

Du nord au sud, le long du littoral, il existe une série de petites dépressions marécageuses isolées les unes des autres par un relief de basses collines. Les rivières aboutissent dans un système de lagunes parallèles à la côte dont les seuils de séparation ont été creusés pour créer le Canal des Pangalanes.

## 3.5. Le relief de la couverture sédimentaire du nord-ouest, de l'ouest et du sud

Un survol rapide des régions de l'ouest permet de distinguer : tout d'abord, les deux vastes bassins sédimentaires, largement ouverts sur la mer, situés de part et d'autre de l'Ambongo, ligne de crête constituée de dômes anciens volcaniques (Ambérény) et flanqué au nord-est et au sud-ouest de plateaux calcaires ou de grés bitumeux (Kelifely, Ankara, Ikahavo) qui se prolonge en mer par le Cap Saint-André. Ces deux bassins sédimentaires sont le Boina ou bassin de Majunga au nord et le Ménabé ou bassin de Morondava au sud.

Ensuite, la couverture sédimentaire se termine au sud de l'Onilahy par le Mahafaly, calcaire et karstique pratiquement dépourvu de réseau hydrographique.

Du nord au sud, les terrains sédimentaires sont séparés des Hautes Terres par une dépression plus ou moins large et bien développée, empruntée à plusieurs reprises par quelques cours d'eau (Ménavava, Manabolomaty, Sakeny, Imaloto), dépression désignée très souvent sous le terme de dépression Permotriasique, qualificatif un peu restrictif car cette vallée se trouve dans les permotrias argilo schisteux au nord, dans les grés de l'Isalo, dans le bassin de Majunga et le nord du Ménabé, les schistes de la Sakamena au droit de Ranohira. C'est pour ces raisons que certains auteurs préfèrent le terme de dépression périphérique (R. BATTISTINI, 1967).

Bordant à l'ouest cette dépression, une zone calcaire d'une largeur variable est affectée de phénomènes karstiques plus ou moins accentués sous l'emprise de la tectonique récente et de la pluviométrie :

- avec des pluviométries faibles (inférieures à 400 mm par an) et une activité tectonique actuelle peu prononcée, la karstification est peu évolutive (phénomène d'autocolmatage). C'est le cas des calcaires éocènes du sud-ouest (cf. zone k1 de la figure 1.4.) ;

- avec une activité tectonique plus intense mais sous pluviométrie faible, les calcaires sont plus diaclasés mais la karstification reste peu évolutive (plateau jurassique du 23e parallèle, k2) ;

-avec une activité tectonique réduite mais des précipitations supérieures à 1 000 mm/an, la karstification ancienne reste en l'état (dilutions et concrétionnement) : ce faciès se retrouve dans le bassin éocène de Mahajanga-Narinda (k3) ;

- lorsque la tectonique est active et les précipitations conséquentes avec un fort potentiel en acide carbonique et humique, les phénomènes karstiques sont très prononcés et évolutifs : séries jurassiques du Bemaraha (k4).

Dans le détail, le relief de la couverture sédimentaire apparait comme un relief de cuestas résultant de l'alternance de couches dures et de couches tendres présentant un pendage généralement faible vers la mer (R. BATTISTINI, 1967).

Les "cuestas" sont très nombreuses et plus ou moins vigoureuses. Leur succession, leur nombre et leur nature sont très variables du nord au sud : cuestas des grés de l'Isalo, des calcaires du Jurassique moyen, des basaltes crétacés, des grés et des calcaires fin crétacés. Nous citerons aussi, du nord au sud, les cuestas de l'Andavakoera, de l'Analamerana, du Bemaraha qui dominent de quelques 500 m la dépression isalienne périphérique, de l'Ankarana, du Kelifely, de l'Ankarafantsika et de l'Analavelona qui culmine à plus de 1 000 m au-dessus des vallées de l'Ilovo et de la Sakamavaka.

Entre Morondava et Toliara, on peut distinguer une dernière petite cuesta façonnée dans les calcaires marins tertiaires (R. BATTISTINI, 1967). Seule, cette côte est encore visible dans l'extrême sud en bordure de l'Océan. Là, le plateau calcaire Mahafaly couvre la plus grande partie de la zone sédimentaire. Il est profondément découpé par quelques rivières allogènes (Linta, Ménarandra) ainsi que par deux vallées fossiles : le couloir d'Itambono emprunté par l'ancienne voie ferrée de la Sakoa et le couloir de Sorombe, large vallée sèche rejoignant la vallée de la Linta. Sur ce plateau, il n'existe pas de réseau hydrographique mais un grand nombre d'avens, trous calcaires (Vovo, en malgache) plus ou moins profonds (jusqu'à 400 m au trou d'Andranomanoetsa I) qui peuvent présenter une nappe pérenne au fond, utilisée comme abreuvoir pour les bœufs lorsqu'il a été possible de créer un sentier d'accès le long des parois (H. BESAIRIE, 1954). A l'ouest,

non loin de la mer, le lac Tsimanampetsotsa étend sur 28 km², au pied de la falaise limitant le plateau calcaire, des eaux saumâtres titrant environ 30 g de Na Cl par litre.

Dans tout l'ouest, du nord au sud, l'ordonnancement de la couverture sédimentaire a été localement perturbée par des intrusions éruptives crétacées donnant des structures de type particulier : massif du Manongarivo, de l'Ampasimbitika, de l'Ambereny, du Fonjay et de l'Analavelona.

Du point de vue hydrographique, on peut distinguer sur la couverture sédimentaire de l'ouest, deux types de bassins fluviaux.

D'abord, les grands cours d'eau prenant leurs sources sur les Hautes Terres et qui, à la traversée des diverses cuestas, ont un tracé cataclynal, présentant des vallées relativement étroites et parfois très encaissées (Tsiribihina, Manambolo, Mangoky, Onilahy) avec, en amont, des lignes de relief, des affluents suivant des directions monoclinales dans l'axe, par exemple, de la grande dépression périphérique.

Puis, des petits bassins limités à l'est par les lignes des cuestas, avec des sources vers 500 à 800 m et drainant, suivant le pendage, le revers de la "cuesta" : bassin du Sambao, du Manambaho, de la Namela, de la Demoka, de la Morondova et aussi, mais moins nettement, du Fiherenana.

En conclusion, par suite d'une évolution géomorphologique complexe, le relief de Madagascar comporte une très grande variété d'aspects qui auront une influence certaine, mais non prépondérante, sur les régimes hydrologiques.

En effet, le relief intervient principalement sur les paramètres de forme, de dimensions et de pente des différents bassins versants. Il est bien évident que les caractéristiques hydrologiques seront essentiellement façonnées par le climat, les régimes pluviométriques et, dans une moindre mesure, par les sols et la végétation.

# 4. LES SOLS, L'EAU ET L'ÉROSION

## 4.1. Les sols : généralités

De nombreuses études pédologiques ont été réalisées depuis 1946 par les géologues d'abord, par les pédologues de l'ORSTOM ensuite, et toutes donnent des descriptions très détaillées des types de sols, de leurs structures et de leurs propriétés chimiques. Malheureusement, il n'existe pas d'études dans lesquelles il soit question de perméabilité des sols et de vitesse d'infiltration, paramètres qui sont d'un très grand intérêt en hydrologie.

Les analyses de sols effectuées par les pédologues caractérisent la porosité du sol (par l'examen de la structure et de l'enracinement) à l'aide d'adjectifs assez vagues tels que forte, moyenne, plutôt faible, élevée, etc. qui

ne permettent pas de savoir dans quelle mesure cette porosité conditionne la perméabilité, la vitesse d'infiltration, la saturation du sol et la vitesse de filtration.

Les pédologues fondent généralement leur classification sur les conditions et les processus d'évolution des sols : degré d'évolution, développement du profil, mode d'altération des minéraux, répartition de la matière organique, etc.. Comme le constate P. DUBREUIL (1967) : "il est à craindre que la classification morphogénique des sols ne soit pas suffisante pour présenter un rangement de valeur des divers paramètres à rôle hydrologique ; peut-être même cette classification n'aurait-elle qu'un rôle secondaire. L'idéal pour l'hydrologue serait une classification des sols d'après leurs propriétés hydriques".

Notre étude des sols sera assez succincte et nous nous contenterons de donner quelques indications générales déduites des observations faites directement sur le terrain.

Il existe à Madagascar une très grande variété de sols. Dans la classification utilisée par la section pédologique de l'ORSTOM, on a reconnu à Madagascar, d'après J. HERVIEU (1966), vingt cinq groupes de sols sur les cinquante-quatre que comprend cette liste. Toujours selon J. HERVIEU, les sols malgaches, d'après la carte d'Afrique au 1/5 000 000e (J. D'HOORE, 1964) se répartissent dans les grandes catégories suivantes :

tableau 1.1.

| | Pourcentage de la surface de l'île | 103 km² |
|---|---|---|
| Sols minéraux bruts et peu évolués | 26 | 158 |
| Sols calcimorphes | 1,5 | 9 |
| Vertisols et similaires | 1,3 | 8 |
| Sols bruns eutrophes | 0,1 | 1 |
| Sols rouges méditerranéens | 1,3 | 8 |
| Sols ferrugineux tropicaux | 27,5 | 166 |
| Sols ferrallitiques (*sensu lato*) | 40 | 243 |
| Sols halomorphes | 1 | 6 |

Il y a donc trois catégories principales : les sols minéraux bruts et peu évolués, les sols ferru-gineux tropicaux et les sols ferrallitiques. .

C'est à partir de cette constatation que nous avons établi une carte pédologique simplifiée tirée de la carte des sols publiée par P. ROEDERER et F. BOURGEAT dans l'ATLAS de MADAGASCAR (fig. 1.6.).

Nous citerons J. HERVIEU (*op. cit.*) pour une brève description des différents groupes de sols :

"Les lithosols et les sols peu évolués d'érosion sont plus fréquents sur les hauts plateaux, le versant occidental, et surtout dans l'extrême sud.

Dans les sols d'apport (sols alluviaux), les modalités de dépôt du matériau original jouent un grand rôle. Ces sols diffèrent en particulier par la nature minéralogique des matériaux fournis par les bassins versants et par le degré de saturation du complexe absorbant. Ils sont beaucoup plus étendus dans l'ouest de l'île.

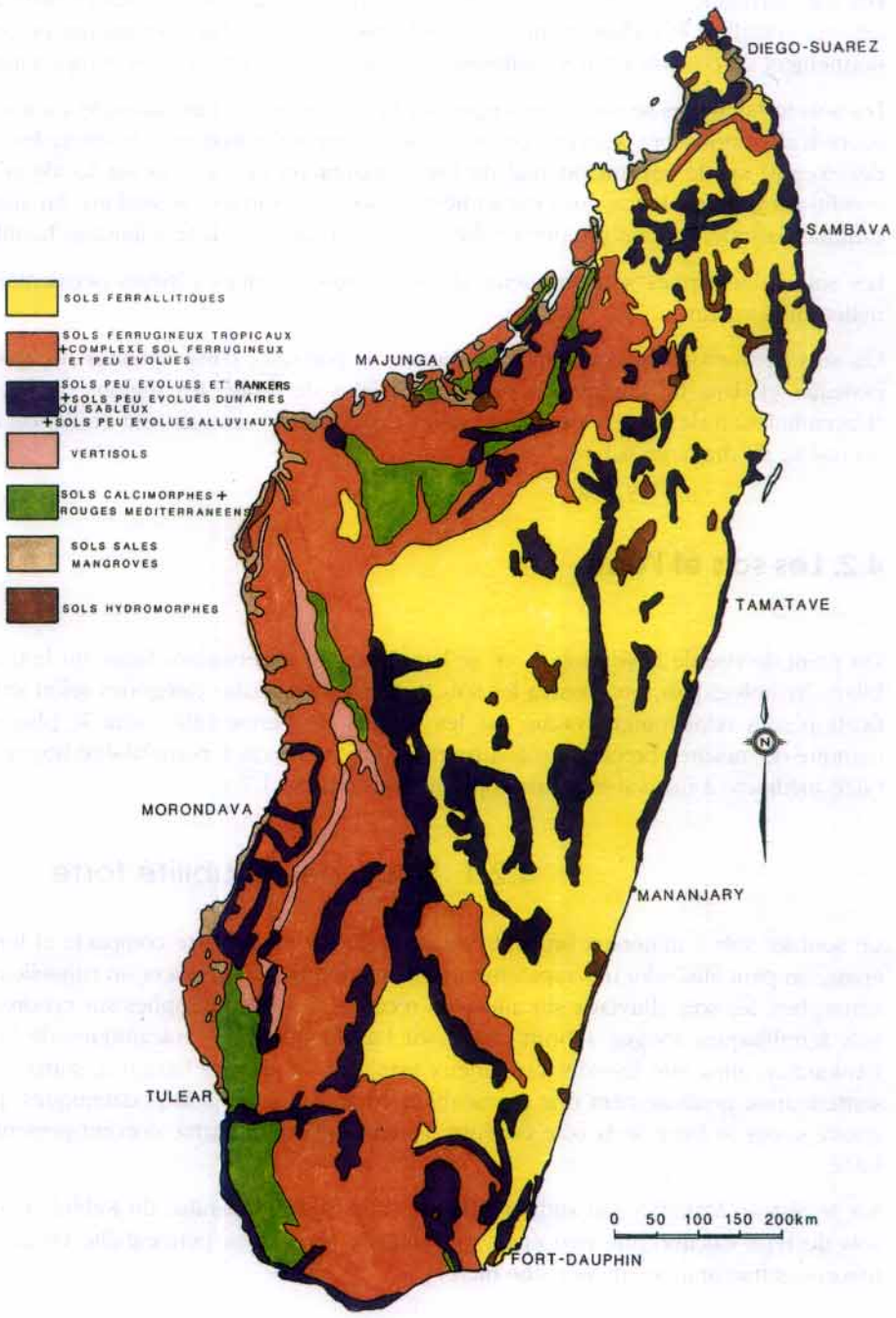
Les sols rendziniformes sont peu étendus et souvent à tendance squelettique (séries développées sur les calcaires sédimentaires).

La formation de sols à caractères vertiques (vertisols) est favorisée localement, par le climat à saison sèche marquée (versant occidental et basses plaines côtières) et, par la nature marneuse de certains matériaux origi-

nels ou par les teneurs élevées en argile montmorillonitique de certains dépôts alluviaux, dans des zones à drainage déficient. Les caractères de salure sont fréquents.

figure 1.6.

Esquisse pédologique (d'après la carte pédologique de l'atlas de Madagascar par P. Roederer et F. Bourgeat)



Les sols bruns eutrophes sont très localisés et se forment essentiellement sur cendres volcaniques basiques.

Les sols à caractères podzoliques sont peu fréquents (versant oriental), et se forment uniquement sur roche-mère sableuse et quartzeuse très pauvre.

Les sols ferrugineux tropicaux sont beaucoup plus étendus sur roches et matériaux sédimentaires que sur schistes cristallins et roches éruptives ou volcaniques. De ce fait, leur texture est souvent sableuse. Le concrétionnement de ces sols est fréquemment en relation avec l'action d'une nappe temporaire.

Les sols ferrallitiques se sont développés sur la plus grande partie du socle ancien métamorphique. Les épaisseurs d'altération sont souvent considérables. L'individualisation d'hydroxydes d'alumine est surtout bien développée sur le versant oriental de l'île. L'induration de ces sols est locale et liée le plus souvent à des conditions géomorphologiques particulières (anciennes surfaces d'érosion). En altitude et sur roche mère volcanique basique, on observe une évolution caractéristique (sols ferrallitiques humifères et andosols).

Les sols halomorphes sont fréquents dans les basses plaines côtières occidentales et liés généralement au milieu fluviomarin.

Les sols hydromorphes occupent des surfaces importantes dans certaines dépressions tectoniques des hauts plateaux et dans la plupart des plaines alluviales de toutes les régions de l'île, sauf dans l'Extrême sud. "L'accumulation de matière organique et les caractères de ces sols sont en liaison étroite avec la morphologie du réseau de drainage naturel."

## 4.2. Les sols et l'eau

Du point de vue de l'hydrologue, en se basant sur les observations faites sur le terrrain et sur les résultats des bilans hydrologiques, on classera les sols malgaches en quatre catégories selon leur perméabilité. Cette classification sera relativement vague car les critères de perméabilité sont le plus souvent très subjectifs par manque de mesures précises : sols à perméabilité forte, sols à perméabilité bonne à moyenne, sols à perméabilité médiocre à mauvaise et sols imperméables (cf. fig. 1.7.).

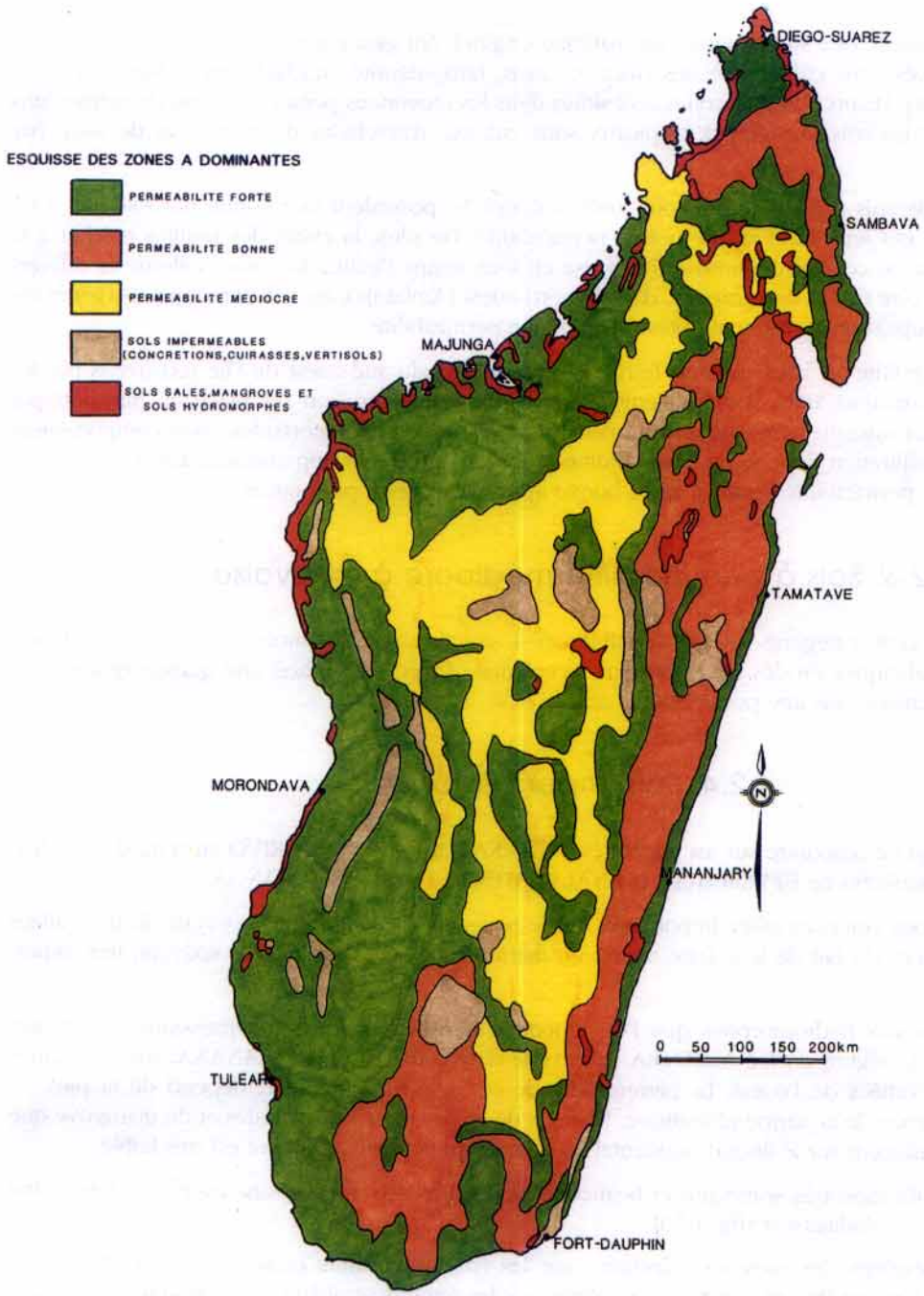
### 4.2.1. Sols à perméabilité forte

Ce sont les sols à minéraux bruts et peu évolués. Sur roche mère compacte et imperméable avec un sol peu épais, on peut atteindre très rapidement la saturation qui provoquera un ruissellement important. Les sols calcimorphes, les sols alluviaux sur alluvions récentes, les sols eutrophes sur cendres volcaniques poreuses. Les sols ferrallitiques rouges à brun rouge sur basaltes (régions volcaniques de la montagne d'Ambre et de l'Ankaratra) ainsi que les sols ferrugineux tropicaux sur roches basiques, surtout lorsqu'ils sont cultivés, présentent aussi généralement une perméabilité forte. Enfin, les sols podzolitiques, présents sur une bande très étroite située le long de la côte est entre Fenerive et Farafangana, doivent présenter une très bonne perméabilité.

Sur le plateau Mahafaly (au sud) et dans les causses du Bemaraha, du Kelifely et de l'Ankara dans l'ouest, les sols du type calcimorphe peu épais présentent souvent une perméabilité en grand due principalement aux fissures et fracturations de la roche mère.

figure 1.7.

Perméabilité des sols



### 4.2.2. Sols à perméabilité bonne à moyenne

Les sols ferrallitiques, quelle que soit la nature du matériau originel, ont généralement une bonne perméabilité lorsqu'ils sont cultivés sous cultures sèches (manioc, maïs, taro, aleurite, arachide, etc.). Sur les Hautes Terres, ce sont les "Tany Mainty" ou sols colluviaux situés dans les moyennes pentes. Il en est de même dans l'ouest et le sud pour les sols ferrugineux tropicaux sous cultures d'arachides de manioc et de sisal, par exemple.

Les sols ferralitiques rajeunis de la côte est, sous forêt ombrophile, possèdent une bonne porosité liée à un enracinement profond qui leur confère une bonne perméabilité. De plus, la chute des feuilles produit à la surface du sol une épaisse couche d'humus qui favorise en tous temps l'infiltration. Sous culture de caféiers ou de girofliers, sur la côte est, et de cacaoiers, dans le nord-ouest (Ambanja), les sols ferrallitiques (généralement jaune/rouge à rouge) sont également dotés d'une bonne perméabilité.

Une remarque doit être faite au sujet des sols ferrugineux tropicaux du sud-ouest de l'île recouverts par les "sables roux". Cette formation, dont l'origine semble encore incertaine (érosion sur place ou transport par érosion éolienne ou par ruissellement), peut présenter des épaisseurs assez importantes ; son comportement du point de vue de l'infiltration dépend de l'état d'humectation : relativement imperméable après une longue période de sécheresse, perméabilité bonne à assez bonne après des averses prolongées.

### 4.2.3. Sols à perméabilité médiocre à mauvaise

On peut classer dans cette catégorie les sols ferrallitiques à structure plus ou moins dégradée des Hautes Terres et les sols ferrallitiques érodés de la bordure occidentale (avec en surface une grande quantité de quartz anguleux) présentant tous une perméabilité faible.

### 4.2.4. Sols imperméables

Ce sont les cuirasses qu'on rencontre sur les tampoketsa d'ANKAZOBE, de FENDARIVO au nord d'ANTANANARIVO et sur les tampoketsa de BEVEROMAY et ANALAMAITSO à l'est de MAHAJANGA.

On trouve également des cuirasses assez importantes sur le plateau de l'HOROMBE. Les vertisols des vallées et dépressions de l'ouest, du fait de leur forte teneur en marnes et argiles, sont le plus souvent, très imperméables.

On classera à part les sols hydromorphes que l'on rencontre dans les plaines et dépressions des Hautes Terres ainsi que dans la région du lac ALAOTRA, la cuvette d'ANDAPA et de BEALANANA, sur les plaines côtières et les basses vallées de l'ouest. La perméabilité de ces sols est variable et dépend de la plus ou moins grande permanence de la nappe phréatique. Il en est de même pour les sols salés et de mangrove que l'on rencontre principalement sur le littoral occidental. La surface totale qu'ils occupent est très faible.

A partir de cette classification très sommaire et beaucoup trop subjective, nous avons essayé de tracer une carte de la perméabilité à Madagascar (fig. 1.7.).

Si l'on examine les résultats des mesures effectuées sur les bassins versants exploités par l'ORSTOM en diverses régions de la Grande Ile, on constate que, même sur les terrains semblant imperméables à première vue, les coefficients de ruissellement ne sont que rarement supérieurs à 60 %. Sur cent vingt crues observées sur le bassin de l'Ankaboka amont, (ALDEGHERI - OBERLIN, 1965) dans la région de Maevatanana sur sols

ferrugineux tropicaux fortement érodés, recouverts de touffes espacées d'Aristida Sp, on note seulement deux crues dont le ruissellement a été supérieur à 60 % et une seule pour lequel on a obtenu 97 %, encore ce chiffre est-il probablement dû à une saturation préalable importante des sols.

Dans la même région, sur le bassin aval, quatorze crues ont un coefficient de ruissellement supérieur à 60 %. On observe fréquemment sur les deux bassins des valeurs de Krt de l'ordre de 15 à 25 %.

Sur les Hautes Terres, dans la région de ANTANANARIVO (M. ALDEGHERI - P. POURRUT, 1968 ; P. POURRUT, 1976) de 1962 à 1671, sur deux cent soixante-quinze crues observées, on ne trouve que six crues présentant un coefficient de ruissellement supérieur ou égal à 60 %, treize crues ayant ruisselé plus de 40 %, alors que cent quarante quatre crues ont ruisselé moins de 10 %.

Dans le sud, le bassin de Tranoroa (M. ALDEGHERI, 1970) sur formation de gneiss à graphite avec des sols squelettiques, peu épais, du type ferrugineux tropicaux et peu évolués, on a observé vingt averses en 1967-68 dont quatre seulement ont ordonné un écoulement à l'exutoire, les coefficients de ruissellement variant de 1,1 % à 31 %. Ce coefficient augmente d'ailleurs très rapidement avec la saturation du terrain.

Sur les formations de sables roux de l'ouest, le bassin représentatif du Banian, a enregistré de 1960 à 1692, quatre-vingt dix-sept averses qui n'ont donné que dix-neuf crues à l'exutoire dont le coefficient de ruissellement total est presque toujours inférieur à 1 %. On a constaté que toutes les pluies inférieures à 25 mm ne donnent pas lieu à ruissellement.

Ces exemples montrent donc que, malgré leur apparence parfois très compacte, les sols malgaches ont presque toujours une capacité d'infiltration importante. Sur la cote est, malgré la très forte pluviométrie et un taux de saturation toujours élevé des sols, on observe des coefficients de ruissellement faibles du fait de la couverture forestière et de la forte perméabilité des sols ferrallitiques limoneux rajeunis.

## 4.3. L'érosion

Ces terrains, assez perméables dans l'ensemble, meubles sur une grande épaisseur (sur les hautes terres, les sols ferrallitiques peuvent atteindre très fréquemment de dix à trente mètres d'épaisseur), mal protégés par la végétation, soumis à des précipitations violentes, situés sur des reliefs très accentués, sont le siège d'une érosion très forte qui laisse des traces impression-nantes en toute région de l'île mais, plus particulièrement sur les hautes terres.

Cependant, les formes que prend l'érosion varient très largement d'une région à l'autre par suite de la diversité du relief, des variations climatiques et de la couverture végétale. L'érosion accélérée se présente sous deux types, à savoir, l'érosion superficielle que l'on rencontre à peu près partout sur la grande île et l'érosion à évolution très rapide, sous forme d'excavations profondes à parois verticales, les "lavaka" principalement dans les régions des hautes terres où la couche du sol est très épaisse (P. LE BOURDIEC, 1972).

L'érosion superficielle est dite en nappe ou linéaire suivant son mode d'action à la surface du sol.

L'érosion en nappe se manifeste en toute région sauf sous la forêt primaire de la côte est. Sur les pentes latéritiques sous prairie, les horizons superficiels du sol sont déplacés et il reste entre les maigres touffes d'herbes de nombreux morceaux de quartz, témoins des quantités de sols emportés par le ruissellement. Dans le sud et sur la zone sédimentaire de l'ouest, les eaux de pluie charrient des quantités importantes de sable qui comblent progressivement toutes les dépressions.

L'érosion linéaire active, surtout dans les formations sédimentaires de l'ouest, donne des échancrures et des ravines plus ou moins profondes parallèles aux lignes de plus grande pente. Ces ravines se développent toujours de l'aval vers l'amont par érosion régressive et peuvent dans certaines régions être une des causes de formation des "lavaka".

Le "lavaka" est la forme la plus spectaculaire de l'érosion accélérée à Madagascar. De nombreux auteurs (LAPLAINE - LAUTEL, TBG n° 54) en ont parlé et nous ne nous étendrons pas sur la description de ce phénomène.

Les hypothèses émises au sujet des causes et des modalités de formation de ces "lavaka" sont souvent différentes et parfois même totalement opposées. On sait maintenant que les "Lavaka" existaient à Madagascar bien avant la présence de l'homme (F. BOURGEAT - M. PETIT, 1965 et M. PETIT - F. BOURGEAT, 1965).

Certains auteurs pensent que la formation des "lavaka" est uniquement due à l'action de la nappe phréatique qui sape les horizons inférieurs (au-dessus de la roche mère en place) et agit par solifluxion amenant un affaissement des couches supérieures, dont les pentes peuvent par la suite, être reprises par l'érosion superficielle entrainant la formation d'une cavité plus ou moins digitée à parois verticales. D'autres, cherchent uniquement l'origine des "lavaka" dans le ruissellement superficiel qui, à la faveur de rigoles, reprend les matériaux meubles de la zone d'altération et provoque des éboulements et creusements par érosion régressive.

Personnellement, nous pensons que les deux phénomènes peuvent intervenir pour créer ces énormes cavités dont certaines atteignent des volumes souvent supérieurs à la centaine de milliers de mètres cubes. P. BRENON cite même des volumes de l'ordre de 500 000 mètres cubes.

Les zones les plus touchées par ce phénomène d'érosion accélérée sont les bassins de la Betsiboka et de l'Ikopa, la région du lac Alaotra ainsi que les régions du Moyen ouest et de l'Ankaizina.

L'effet immédiat de ces mécanismes d'érosion est le décapage profond des sols et des altérites et le transport vers la mer de quantités considérables de matières solides. A partir des mesures en suspension faites en 1960 et 1961 sur la Betsiboka et l'Ikopa, nous avons calculé l'érosion moyenne annuelle sur le bassin de la Betsiboka qui est légèrement supérieure à 1 mm par an. Cette valeur est un ordre de grandeur par défaut, les mesures ne tenant pas compte des transports sur le fond mais uniquement des matériaux en suspension (M. ROCHE - M. ALDEGHERI, 1964). Ch. ROBEQUAIN donne pour la Betsiboka à l'embouchure, un débit solide de 100 000 m3/an, ce qui représente environ 2 mm d'érosion sur l'ensemble du bassin (Ch. ROBEQUAIN, 1958).

## 5. LA COUVERTURE VÉGÉTALE

L'étude de la végétation et de la flore malgache ne sera envisagée ici que sous l'aspect couverture du sol et influence sur le ruissellement. Nous n'entrons pas dans le détail des différentes espèces botaniques composant la flore malgache : de nombreux ouvrages existent sur ce sujet (H. HUMBERT, G. COURS DARNE, 1965 -

H. HUMBERT, 1928 - H. HUMBERT, 1936 - H. PERRIER de la BATHIE, 1921 - H. PERRIER de la BATHIE, 1936 - H. PERRIER de la BATHIE, 1954 - J. BOSSER, 1954 - J. BOSSER, 1963 - P. MORAT, 1964 - P. MORAT, 1969).

Du point de vue hydrologique, la végétation joue un rôle modérateur sur le ruissellement et assure, par suite, la protection du sol contre l'érosion. Ces effets dépendent, évidemment, des formes de la végétation.

Les formations végétales rencontrées à Madagascar peuvent se classer en cinq grandes catégories :

- la forêt dense ombrophile du versant Oriental, du versant sud du Tsaratanana et de la région du Sambirano ;

- la végétation modifiée ou "SAVOKA" également sur le versant Oriental ;

- la forêt décidue sèche de l'ouest ;

- la forêt xérophile du sud ;

- les prairies ou savanes désignées parfois sous le terme de pseudo-steppes - F. BOURGEAT (1972) - des Hautes Terres et du moyen ouest, du nord et sur une étroite bande de la côte est entre Tôlanaro et Mananjary.

Ces différentes formations ont été divisées par les botanistes en "domaines" en fonction de la situation géographique et du climat. On distingue ainsi le domaine de l'est et du Sambirano, le domaine du centre, le domaine de l'ouest et le domaine du sud (P. KOECHLIN, carte Végétation A.M. 1969).

Dans ces divers domaines, les caractéristiques principales des formations diffèrent peu et dans la carte schématique que nous donnons ci-après, nous n'avons pas séparé les formations de même type dans les domaines différents (fig. 1.8.).

- La forêt ombrophile de l'est et du Sambirano est caractérisée par des arbres à feuilles persistantes, toujours vertes, généralement à fût assez hauts (20 à 30 m) constituant la strate supérieure. Au-dessous, on trouve une strate moyenne composée de palmiers et de fougères arborescentes et, enfin, un sous-bois, parfois très épais, entremêlé de lianes. La hauteur des grands arbres diminue sensiblement quand on se déplace de l'est vers l'ouest, au passage du domaine de l'est au domaine du centre de moyenne altitude. En altitude, dans l'étage monta-gnard du domaine du centre ou dans le domaine des hautes montagnes, la forêt s'étire le long de l'escarpement oriental en une bande de largeur variable parfois très morcelée. La surface la plus importante se rencontre autour de la baie d'Antongil et sur la presqu'île de Masoala. La montagne d'Ambre, au nord de l'île, conserve un tout petit lambeau de forêt à feuilles persistantes.

*Cette formation fournit au sol une masse importante de matières végétales constituant une épaisse couche d'humus qui, en liaison avec l'enracinement, favorise l'infiltration.*

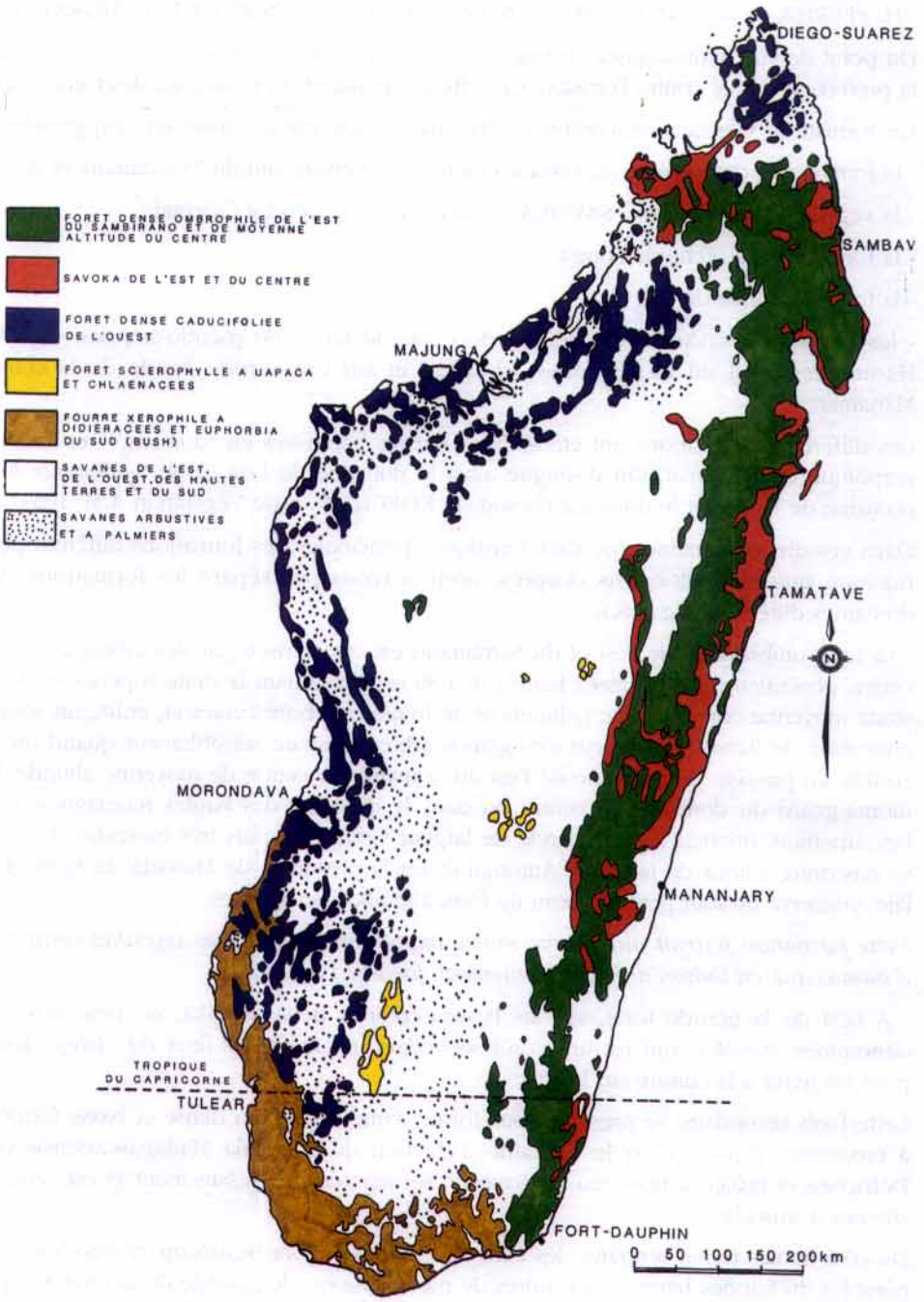
- A l'est de la grande forêt, sur les basses collines Betsimisaraka, on rencontre une formation dégradée dénommée "Savoka" qui est une forêt secondaire résultant des feux ou "Tavy" destinés à libérer les terres pour les livrer à la culture sur brûlis.

Cette forêt secondaire se présente sous forme d'une végétation dense et basse formée d'essences héliophiles à croissance rapide. C'est le domaine d'élection du Ravenala Madagascariensis ou "arbre du voyageur". Défrichée et brûlée à nouveau la "Savoka" se dégrade progressivement et est remplacée par les savanes et steppes à Aristida.

Du côté hautes terres centrales, les zones de "Savoka", sont beaucoup moins étendues et beaucoup plus vulnérables du fait des hauteurs moindres de précipitations : le passage de la forêt à la pseudo-steppe se fait par l'intermédiaire d'une brousse éricoïde à Philipppia, Helicrysum et fougères, qui est très facilement et très rapidement détruite par les feux de brousse.

figure 1.8.

Couverture végétale (d'après la carte "formations végétales" de l'atlas de Madagascar par J. Koechlin)



*Vis-vis de l'aptitude au ruissellement, on peut dire que cette forêt secondaire constitue une couverture à peine moins efficace que la forêt ombrophile dense et, de ce fait, dans une large mesure, elle freine le ruissellement et augmente l'infiltration.*

-Sur toute la côte ouest, du Tropique du Capricorne au Cap d'Ambre, on trouve quelques reliques peu étendues et très dispersées de la forêt tropicale sèche, dense, caducifoliées. L'aspect de cette forêt est très différent de celui de la forêt ombrophile de l'est : elle se présente sous forme d'une futaie claire, peu élevée, ne protégeant que très médiocrement le sol. On y rencontre des espèces à tendance xérophytique, arbres ou lianes à troncs renflés (Andansonia, Adenia, etc.) arbres à tiges charnues, dépourvues de feuilles (Euphorbia) et, par endroits, de très belles familles de baobabs.

*Cette forêt sèche de l'ouest offre donc une maigre protection du sol par suite de la faible densité des frondaisons et des quantités peu importantes d'humus et de mulch au pied des arbres. Il s'ensuit que la capacité d'infiltration ne dépend que de la porosité et des voies de pénétration créées par l'enracinement.*

-Dans la région sèche du sud, le "bush" xérophytique se compose de petits arbres aux formes bizarres, souvent rabougries, de la famille des didiéracées, espèces charnues ou épineuses du genre Euphorbia et des plantes ligneuses, épineuses à feuillage réduit tels les fameux "Fantsilotratra".

*Entre les plantes, le sol est le plus souvent à nu, la protection par les végétaux est très faible et la capacité d'infiltration du sol n'est fonction que de la porosité de ce dernier.*

-Sur toute la surface des hautes terres et la plus grande partie du versant occidental, la formation végétale typique est la prairie, la savane, désignée sous le terme plus général de pseudo steppe à graminées. Ces vastes étendues réservées à l'élevage sont fréquemment mises à feu afin d'obtenir de jeunes pousses vertes pour l'alimentation du bétail. On se trouve donc devant des formations très dégradées, constituées d'espèces résistant aux feux de brousse (Aristida, Ctenium, Loudetia, etc.) se présentant sous forme de touffes clairsemées et dures "(Bozaka)" entre lesquelles apparaît le sol nu, profondément décapé et lessivé.

Plus à l'ouest, entre les lambeaux de la forêt tropicale sèche, on trouve une savane arbustive peuplée de quelques espèces dérivées de la flore des forêts sèches et de quelques palmiers "Satrana" (Medémia nobilis et Hyphaenéh Satans, ...). Les graminés les plus répandues sont de la famille de l'Hétéropogon qui constitue la base des pâturages.

*Cette végétation ne joue pratiquement aucun rôle d'écran et n'intervient pas ou presque pas dans le freinage du ruissellement.*

Sur ces prairies et savanes des hautes terres et de l'ouest, de vastes reboisements de mimosas et surtout d'eucalyptus ont modifié agréablement le paysage.

D'une manière tout à fait subjective et donc approximative, le classement relatif des formations végétales vis-à-vis de la protection du sol et de l'amélioration de la capacité d'infiltration est le suivant dans l'ordre décroissant de l'efficacité du couvert végétal :

-forêt dense ombrophile et Savoka de l'est et du centre où l'interception importante par les feuilles, le rôle d'éponge joué par le "mulch" et les débris végétaux ainsi que les nombreuses voies de pénétration créées par les racines réduisent sensiblement le coefficient de ruissellement ;
-forêt décidue sèche de l'ouest où la protection est nettement moins efficace par suite de la densité moindre du couvert végétal et de la couche d'humus peu épaisse ;
-les prairies et savanes des Hautes Terres et de l'ouest ainsi que la forêt xérophile du sud couvrent très mal un sol nu et fortement érodé. Dans ces régions, la capacité d'infiltration est liée à peu près uniquement à la perméabilité du sol.

Les surfaces couvertes par ces formations végétales ont été estimées par divers auteurs, les chiffres avancés sont un peu différents les uns des autres. Nous retiendrons ceux de A. CHEVALLIER cités par R. BATTISTINI.

- Forêts (est et ouest) : 70 000 km² (y compris la forêt xérophytique)
- Savoka : 30 à 40 000 km²
- Prairies et savanes arbustives : 420 à 450 000 km²
- Cultures : 15 000 km²
- Jachères : 30 à 50 000 km²

En plus de ces types de végétation, il existe des formes propres aux régions marécageuses (Lac Alaotra, Ankaisina, plaine de Tananarive, etc.) et aux rivages (Mangrove) surtout dans l'ouest par suite des marées assez fortes et de la présence de deltas ou estuaires importants. Ces deux formes de végétation ne couvrent qu'une surface extrêmement réduite.

Les chiffres donnés ci-dessus montrent donc que la forme la plus répandue de la végétation malgache est la prairie qui couvre environ les trois-quarts de l'île. Cette forme de végétation, sous l'effet de l'action de l'Homme, a tendance à s'éteindre peu à peu et à remplacer la forêt originelle.

Enfin, outre les formations végétales naturelles ou anthropisées décrites ci-dessus, il convient de souligner la présence, importante dans les hautes terres centrales, de surfaces rizicoles.

Les terrains rizicoles représentent environ 13 000 km² (dont 9 000 km² pour les hauts plateaux dont la superficie globale est de 120 000 km²). En terme de paysage, on distingue sur les hauts plateaux trois ensembles de rizières aquatiques repiquées :

- Les rizières de vallées (environ 6 000 km²).
- Les rizières de plaines (environ 2 000 km²) dont les plus importantes sont situées dans la région de Antananarivo et dans celle du lac Alaotra.
- Les rizières en terrasses (environ 1 000 km²) surtout présentes sur les versants de la moitié sud des hautes terres.

Ces rizières, dans les régions concernées, jouent certainement un rôle important (cf. M. RAUNET, 1989) et complexe dans la modification des cycles hydrologiques naturels en favorisant l'écoulement par imperméabilisation "naturelle" (plans d'eau) mais en jouant un rôle de stockage et retardement des petites crues (laminage) et en favorisant la reprise par évapotranspiration (l'évapotranspiration potentielle étant évidemment entièrement satisfaite).

# 6. LE RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

## 6.1. Généralités

Les formes du réseau hydrographique malgache présentent une très grande variété par suite du contexte géomorphologique de la Grande Ile dont les traits essentiels sont les suivants.

- Mise en saillie des roches les plus résistantes et des lignes structurales par érosion différen-tielle prolongée sur le vieux socle constitué de roches métamorphiques et de veines volcani-ques recoupantes.
- Présence d'un relief polycyclique avec d'anciennes surfaces d'aplanissement, les Tampoketsa, actuellement modelées par des reprises d'érosion récentes.
-Sur les Hautes Terres Centrales, manteau d'altération souvent très épais, profondément attaqué par les formes d'érosion accélérées (Lavaka) et dont la présence atténue parfois, dans une large mesure, les influences structurales.
- Bassin sédimentaire de l'ouest présentant un pendage faible vers la mer et dont les séries de couches concordantes reprises par l'érosion différentielle ont donné un relief de "cuestas" caractéristiques.
-Dépression périphérique continue, à l'ouest du socle, due à l'érosion des couches discor-dantes de la couverture sédimentaire ou parfois, également, à des failles.
- Enfin, dissymétrie géologique et géomorphologique fondamentale perpendiculairement au grand axe de l'île, visible immédiatement sur les cartes physiques.

## 6.2. Les caractères du tracé du réseau hydrographique

### 6.2.1. Sur le socle ancien

D'une manière générale, il semble que les influences structurales soient prédominantes dans le tracé du réseau hydrologique du socle ancien. Le dessin du réseau en plan est extrêmement complexe : nombreux méandres dans les hautes plaines alluviales ainsi que dans les vallées larges à fond plat, tracés en "baïonnette" dans les régions plissées, tracés tectoniques rectangulaires ou orthogonaux particulièrement sur la bordure orientale, réseau secondaire ramifié ou dentritique sur les surfaces d'aplanissement plus ou moins anciennes couvertes d'un épais manteau d'altération.

Les profils en long présentent alternativement des biefs pratiquement horizontaux dans les hautes plaines marécageuses, des sections à pente modérée dans le sens de pendage du socle et des sections à pente plus forte en cas de tracé discordant, avec rapides et seuils créant souvent de fort belles chutes. A la limite du socle, avant de pénétrer dans les couches sédimentaires, les rivières présentent toujours une rupture de pente nette avec chutes et rapides plus ou moins importants.

Les sections transversales présentent soit des formes en V très encaissées lorsque les vallées sont parallèles aux plis ou suivent les lignes de failles, soit des formes très évasées avec versants convexes et fonds plats plus ou moins bien drainés particulièrement sur les Tampoketsa.

Le drainage du socle ancien s'effectue vers l'Océan Indien et vers le Canal de Mozambique suivant une ligne de partage des eaux plus ou moins rectiligne. Certains auteurs (LENOBLE, LAPLAINE in TBG, A. GUILCHER, R. BATTISTINI, 1967) ont vu dans ce tracé festonné des témoins de capture des rivières du versant ouest par les rivières du versant est. A part un point de rebroussement particulièrement spectaculaire dans la plaine de Ranotsara, les captures n'intéressent que des bassins versants de faible superficie et ne sont décelables que sur des cartes à très grande échelle.

### 6.2.2. Sur la couverture sédimentaire

#### 6.2.2.1. L'ouest

La couverture sédimentaire de l'ouest est caractérisée du point de vue tracé du réseau hydrographique par la présence :

- d'un réseau surimposé comprenant les fleuves allogènes qui prennent leur source sur les Hautes Terres et dont les bassins sont les plus importante de l'île ;

- d'un réseau secondaire prenant naissance sur le revers des "cuestas" et ayant un écoulement non permanent par suite d'une alimentation insuffisante en saison sèche liée à la faible super-ficie des bassins versants ;

- de la dépression périphérique, en bordure du massif ancien, empruntée pendant un trajet plus ou moins long, par les grands axes fluviaux (Mangoky, Mahavavy du sud, Ikopa) et surtout par les affluents de ces rivières qui ont alors un tracé orthoclinal : Menava, Mahakamba, Manambolomaty, Mananoaza, Sakeny dont le cours occupe la dépression sur 150 km environ entre Mandronarivo au sud et le confluent avec la Tsiribihina ;

- du relief de "cuesta" qui oblige les rivières dont le lit suit le pendage général des couches, à creuser le front des côtes en gorges parfois très resserrées et impressionnantes (gorges du Manamboko). Le réseau fleuves occupent des positions cataclynales alors que leurs affluents, coulant au pied des cuestas, ont un tracé orthoclinal. On peut avoir en certaines régions des rivières anaclynales coulant en sens inverse du pendage et drainant le front des cuestas comme dans le Betsiriry, sur la bordure orientale du plateau du Bemaraha.
Du point de vue du profil en long, les pentes longitudinales dans la zone sédimentaire de l'ouest sont moins importantes que sur les Hautes Terres. La diminution de pente liée à un charriage de matières en suspension amène parfois un remblaiement des lits et la formation de deltas qui gagnent progressivement sur la mer : Mangoky, Tsiribihina, ou un envasement des estuaires souvent spectaculaire comme à l'embouchure de la Betsiboka où l'on a vu en quelques années le port en eau profonde de Majunga complètement remblayé par les alluvions transportées par le fleuve.

Le remblaiement des lits semble être la cause du phénomène de capture de la Mahajamba par le Kamoro. En réalité, ce n'est pas à proprement parler une capture mais un phénomène de déver-sement dû à la constitution d'un barrage alluvionnaire, sorte de delta intérieur qui dévie une partie des eaux vers le Kamoro tandis qu'un écoulement variable, selon les années et l'amplitude des marnages, continue à se diriger vers le nord.

Cet alluvionnement a également contribué a créer des lacs importants tout au long de la côte entre Morondava et l'estuaire de la Sofia et dont l'exemple le plus typique est le lac Kinkony au sud du delta de la Mahavavy.

### 6.2.2.2. L'est

La couverture sédimentaire du versant oriental se limite, comme nous l'avons déjà vu, à une étroite bande littorale et il n'existe pratiquement pas de réseau hydrographique propre à cette couverture. L'élément particulier de l'hydrographie du littoral oriental de Madagascar est constitué par le bourrelet dunaire gênant l'écoulement des eaux, et à l'arrière duquel se sont installées des lagunes d'eau saumâtre allongées parallèlement à la côte et séparées les unes des autres par des seuils sableux, les "pangalanes" (du malgache "Fangalana", le lieu où l'on porte les pirogues entre deux lagons navigables) qui ont été creusés et dragués afin de créer un chenal navigable entre Tamatave et les villes côtières du sud.

Pendant la saison sèche, il arrive que les petites rivières au sud de Manakara soient isolées de la mer par une langue de sable fermant l'embouchure et créant ainsi une lagune. L'écoulement du débit d'étiage se faisant par infiltration après mise en charge du cordon sableux.

On observe donc une légère élévation du plan d'eau (de l'ordre de 1 m) qui dure jusqu'à la rupture du barrage sous l'effet d'une crue ou le plus souvent d'actions humaines pour éviter la submersion des cultures situées en bordure de "Vinany". A partir de cet instant, le plan d'eau baisse très rapidement et l'influence de la marée se fait à nouveau sentir loin à l'intérieur des Terres.

#### 6.2.2.3. Le sud

C'est la région où le réseau hydrographique est le plus dégradé par suite de l'aridité du climat. On peut distinguer :

- les quatre grands fleuves allogènes : Mandrare, Manambovo, Menarandra et Linta qui descendent du socle ancien et sont pratiquement sans eau pendant la saison sèche dès leur sortie des terrains métamorphiques ;

- les régions endoréïques, sur les dunes grésifiées ou en arrière du bourrelet littoral : cuvette d'Ampamalora, bassin d'Ambovombe, cuvette de Beloha alimentés uniquement lors des orages par des oueds intermittents créant des mares temporaires servant d'abreuvoirs pour les animaux ;

- la zone aréïque du plateau Mahafaly où il n'existe aucun écoulement superficiel, les eaux de pluie s'infiltrent sur place et alimentent une circulation souterraine, plus ou moins importante, accessible par un certain nombre d'avens situés sur la bordure occidentale du plateau : Mitoho, Andrano Manoetsa I, (95 m de long, 70 m de large et 40 m de profondeur).

### 6.2.3. Les versants naturels

Le relief malgache divise naturellement le réseau hydrographique en cinq ensembles d'importance très inégale (fig. 1.9.) :

- les versants de la montagne d'Ambre

- les versants du Tsaratanana

- le versant est

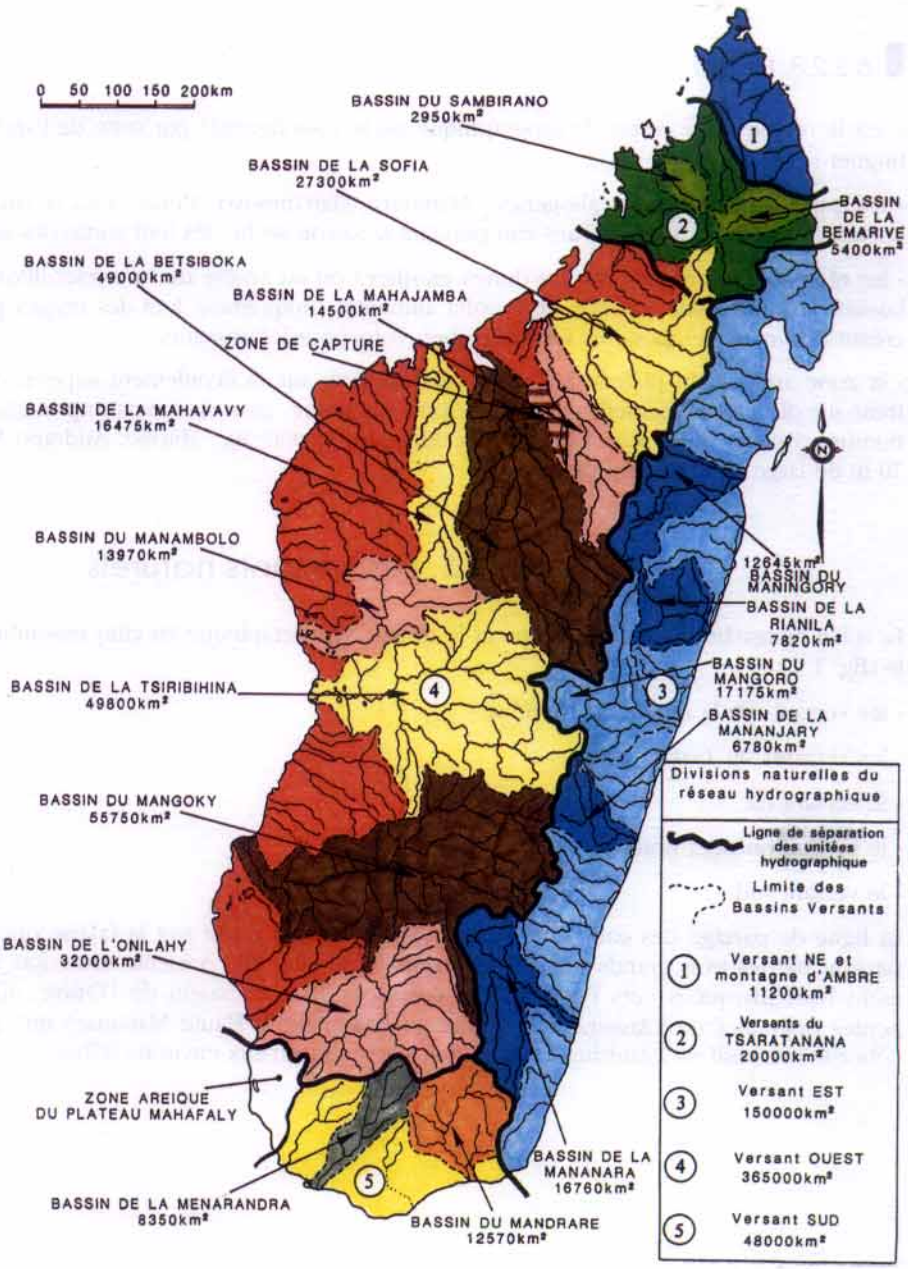
- le versant ouest et nord-ouest

- le versant sud.

La ligne de partage des eaux entre versant est et versant ouest suit la falaise orientale des Hautes Terres en passant par les trois grands massifs montagneux de l'île. Elle présente toute-fois deux avancées particulièrement bien marquées vers l'ouest, l'une correspondant au bassin de l'Onive, affluent du Mangoro sur les pentes orientales de l'Ankaratra et l'autre au bassin de la Haute Mananara qui, par la trouée de Ranotsara déborde le massif de l'Andringitra au sud et s'étend jusqu'aux environs d'Ihosy.

figure 1.9.

Réseau hydrographique et principaux bassins fluviaux malgaches



## 6.3. Description sommaire des versants malgaches et de quelques rivières importantes

On se réfèrera à la carte hydrographique jointe en hors texte.

### 6.3.1. Les versants de la Montagne d'Ambre

Ce massif volcanique est drainé par de petits torrents peu développés, coulant dans des lits encombrés de blocs de basalte. Les bassins sont très étroits et allongés ; il n'y a pas d'affluent notable.

Les principales rivières sont l'Irodo, la Saharenana et la Besokatra dont les eaux sont utilisées pour l'alimentation de la ville d'Antsiranana.

Ces versants n'intéressent que 11 200 km² environ, soit à peine 1,8 % de la surface de Madagascar.

### 6.3.2. Les versants du Tsaratanana

Le massif du Tsaratanana, par son relief très accidenté et sa situation à égale distance de l'Océan Indien et du canal de Mozambique, donne naissance à des rivières à profil en long très caractéristiques, avec de très fortes pentes (30 à 40 m/km) dans la partie supérieure et des pentes de quelques m/km à la traversée des plaines littorales aussi bien sur le versant occidental que sur le versant oriental (cf. fig. 1.10). Ce fait nous a amené à considérer les versants du Tsaratanana qui s'étendent sur un peu plus de 20 000 km² (3,3 % de la surface de l'île) comme une unité géographique particulière.

Les principales rivières des versants du Tsaratanana sont les suivantes :

- la Mahavavy du nord qui prend naissance à l'est de la dorsale centrale du Tsaratanana près de l'Andohanisambirano (2 501 m) vers 2 200 m d'altitude. Son cours est d'abord dirigé vers le nord jusqu'à la chute d'Andrannomafana (100 m sur 4 km environ). Au pied de la chute, la Mahavavy se trouve à 200 m d'altitude, ce qui représente une descente de 1 900 m en 60 km, soit une pente de plus de 30 m/km.
Le cours s'infléchit ensuite vers le nord/nord-ouest et la pente diminue. Jusqu'à la mer, elle n'est plus en moyenne que de 2 m/km. Le lit est large, coupé par quelques rapides jusqu'à une cinquantaine de kilomètres au sud d'Ambilobe. La Mahavavy se termine par un immense delta sur lequel sont installées les plantations de la Sosumav.

Un seul affluent important en rive droite, l'Antsiatsia (longueur : 60 km).

De sa source à la mer, la Mahavavy du nord mesure 160 km. Le bassin versant couvre une surface de 3 270 km².

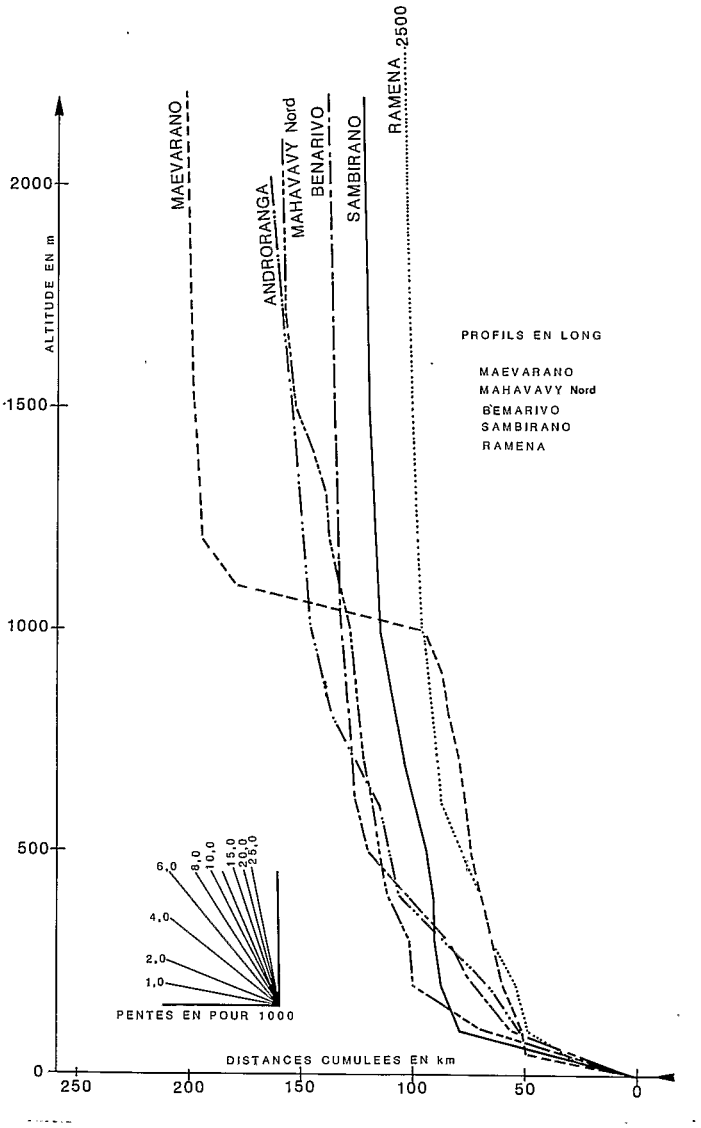
- Le Sambirano nait sur la face occidentale de l'Andohanisambirano vers 2 200 m d'altitude. Il descend en direction du nord-ouest avec une pente de 46 m/km sur 45 km. Il rentre ensuite dans une vallée large, à fond plat, où il s'étale dans un lit sablonneux, bordé de rizières importantes. Sa pente n'est plus que de 1,3 m/km.

A Ambanja, le Sambirano bifurque vers l'ouest et il se jette dans la baie d'Ampasindava par un delta.

A 28 km de l'embouchure, il reçoit la Ramena qui descend du Maromokotra, point culminant du Tsaratanana, à travers une zone très boisée. La direction de son cours est sud-est/nord-ouest jusqu'à Antseva, avec une pente moyenne de 40 m/km.

figure 1.10.

Cours d'eau du Tsaratanana




A Antseva, la Ramena se dirige vers le sud-ouest et conflue avec le Sambirano un peu en aval d'Ambodimanga après avoir parcouru 78 km.

La longueur totale du Sambirano est égale à 124 km. Il couvre un bassin versant de 2 950 km² dont 1 115 km² pour la Ramena.

-Le Maevarano prend sa source au sud de l'Andohanisambirano, non loin des sources de la Mahavavy du nord et du Sambirano, vers 2 200 m d'altitude. Jusqu'à Mangindrano, sa pente est très forte (48 m/km envi-

ron) et sa direction nord-sud. Il traverse ensuite la cuvette marécageuse de l'Ankaizina. La pente est de l'ordre de 1 m/km et le cours d'eau présente, au sud de Bealalana, un tracé très sinueux.

Il sort de l'Ankaizina à l'altitude 1 000 m environ et se dirige vers l'ouest. Sa pente est de l'ordre de 20 m/km jusqu'à la cote 50. Il est alors à 50 km de la mer et traverse la plaine littorale dans un lit très large formant de nombreux méandres. Il se jette dans la baie de la LOZA, par un petit delta, après avoir coulé sur 203 km. A la cote 200 environ, il reçoit en rive droite, la Sandrakota qui descend de l'Ambondrona (2 262 m).

La superficie du bassin versant est égale à 5 360 km².

- La Bemarivo coule sur le versant oriental du Tsaratanana. Sur 70 km environ, la rivière descend de 2 100 m, soit une pente moyenne de 30 m/km.

La Bemarivo mesure 140 km de long et draine 5 400 km². Son principal affluent rive droite est l'Androranga.

- La Lokoho, qui draine la cuvette cultivée de l'Ankaibe, et après avoir longé le flanc sud du Massif du Marojezy, rejoint l'Océan Indien au sud de Farahalana.

## 6.3.3. Le versant est

Avec 150 000 km2 environ, il couvre 25,2 % de la surface de Madagascar. Il s'étend sur plus de 1 200 km, de Tôlanaro à Antalaha. Sa largeur moyenne, de la ligne de crête à la mer, est égale à 100 km environ, avec un maximum de 190 km au droit de l'Ankaratra.

Les parties les plus étroites se trouvent à la latitude de Fort-Carnot (60 à 70 km) et le long de Beampingaratra, au nord de Tôlanaro, où les sommets montagneux ne sont, en ligne droite, qu'à une cinquantaine de km de la côte.

Dans ce rectangle, étroit et très allongé, les cours d'eau ont des longueurs assez faibles avec un profil très accentué, présentant parfois quelques biefs calmes, peu développés, séparés par des rapides et des chutes (fig. 1.11.). Le versant est possède de ce fait un potentiel énergétique considérable.

Par suite du relief constitué de chaînons parallèles à la côte limitant des vallées assez profondes communiquant entre elles par des cassures transversales, perpendiculaires à l'axe des gradins, il arrive que certaines rivières ont des longueurs de trois à dix fois plus grandes que la distance séparant, à vol d'oiseau, leur source de la côte est.

Dans l'étroite plaine côtière, les rivières divaguent et présentent de nombreux méandres. Elles alimentent le chapelet de lagunes séparées de la mer par un cordon dunaire constituant le canal des "PANGALANES".

Le réseau hydrographique de ce versant est très complexe et présente un chevelu très dense. Les principales rivières sont : le Maningory, la Rianila, le Mangoro, la Mananjary et la Mananara.

### 6.3.3.1. Le Maningory et le bassin du lac Alaotra

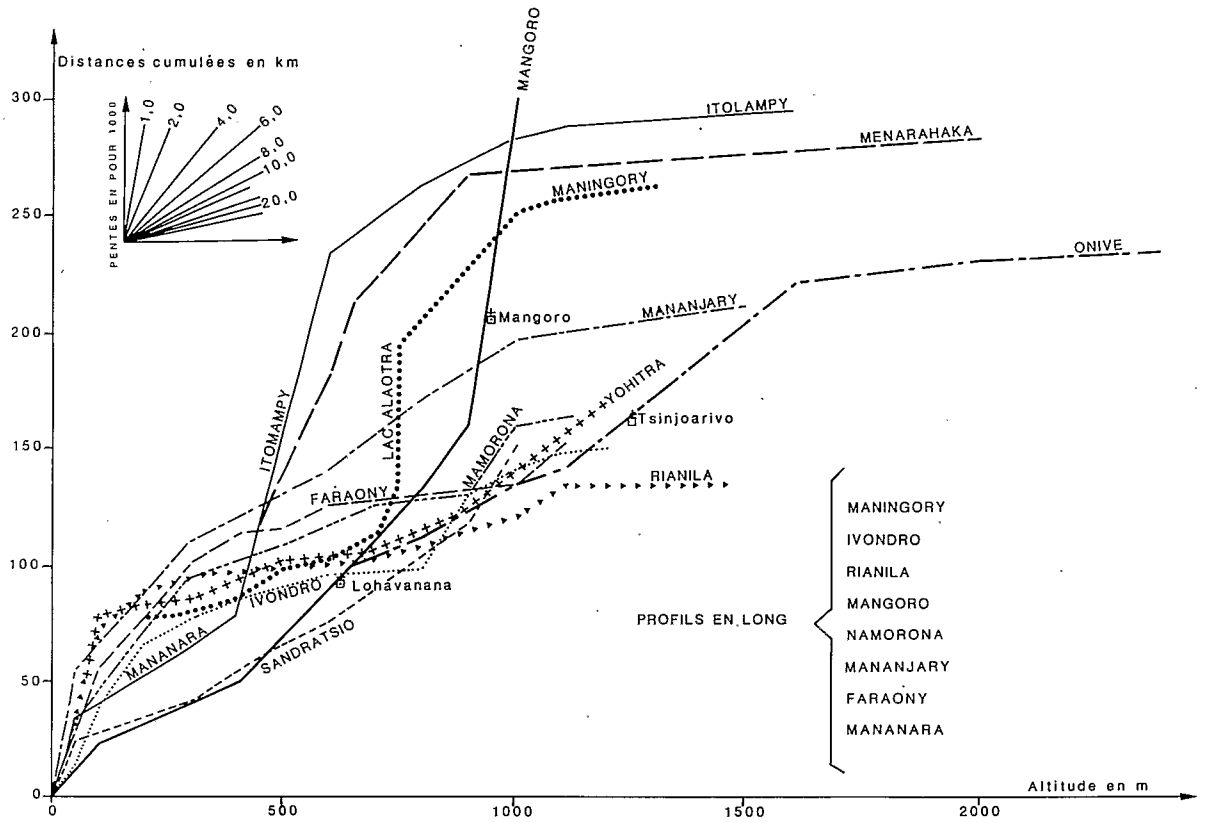
Ce bassin présente la particularité de posséder deux zones déprimées à fond pratiquement horizontal, d'importance d'ailleurs très inégale : le grand bassin lacustre de l'ALAOTRA et la cuvette marécageuse d'ANDILAMENA.

Le niveau moyen du lac ALAOTRA se situe vers la cote 750, celui de la cuvette d'ANDILAMENA vers 900 m d'altitude. La surface de la nappe d'eau libre du lac ALAOTRA est d'environ 200 km², s'étendant sur 30 à

35 km de long de 5 à 7 km de large. La zone marécageuse entourant le lac, peuplée de "ZOZORO" (Cyperus Emyrnensis), couvre un peu plus de 800 km². En bordure de ces marécages, se trouvent les plus belles étendues de rizières de la grande Ile, alimentées en eau par des barrages créés sur les principaux tributaires du lac : SASOMANGANA et SAHABE au sud, SAHAMALOTO et ANONY au nord.

figure 1.11.

Cours d'eau de versant ouest




Ces rivières sont courtes et drainent, le plus souvent, des zones marécageuses à faible pente. Leurs sources se situent vers 1 000 m d'altitude sauf celle de la SAHABE qui naît, au sud, vers 1 300 m. Sur tout le pourtour du lac, l'érosion est très intense, ce qui pose de très gros problèmes pour les aménagements hydro-agricoles. Chaque rivière se termine par un cône de déjection formant delta aux eaux divagantes.

L'exutoire du lac ALAOTRA est constitué par le MANINGORY. Le niveau de base du lac est fixé par les seuils rocheux d'AMBATOMAFANA. A partir d'AMBATOMAFANA, le MANINGORY suit une direction est-ouest et descend de 14 m/km environ à travers le système montagneux de l'est, jusqu'à la cote 200.

Après ANJAHANIBE, le MANINGORY prend une direction sud-ouest/nord-est jusqu'au confluent avec la SANDRATSIO, son principal affluent rive gauche. Le fleuve se dirige alors vers l'est, jusqu'à la mer qu'il atteint avec une pente de 1 m/km.

La SANDRATSIO prend naissance à l'ouest de la cuvette d'ANDILAMENA.

Le MANINGORY et les affluents supérieurs du lac ALAOTRA drainent un bassin de 12 645 km². La longueur totale du fleuve, depuis la source de la SAHABE, est de : 260 km. La SANDRATSIO mesure, de sa source jusqu'au confluent, 125 km.

### 6.3.3.2. L'Ivondro

L'IVONDRO ou l'IVONDRONA prend sa source à l'ouest de la plaine marécageuse de DIDY. Son cours se dirige vers l'est et la pente s'accentue jusqu'à l'aval de l'usine de VOLOBE qui alimente TAMATAVE en énergie électrique. La pente diminue, ensuite, jusqu'à la mer qu'il rejoint un peu au sud de TAMATAVE.

Sa longueur totale est de 150 km. Il draine un bassin de 3 300 km².

### 6.3.3.3. La Rianila

Elle prend sa source en bordure des hauteurs BETSIMISARAKA, dans le massif du FAHONA (1 510 m), vers 1 450 m d'altitude. Elle coule en direction générale ouest-est, avec quelques parcours nord-sud, correspondant à la direction structurale du relief. La rivière descend de 1 450 m à 200 m en 46 km, soit une pente moyenne de 26 m/km.

A FETRAOMBY, la RIANILA traverse les dernières chutes de son cours. Elle est ensuite navigable jusqu'à son embouchure, au voisinage d'ANDEVORANTO. L'influence de la marée se fait sentir assez loin en amont de BRICKAVILLE.

Les principaux affluents sont en rive droite : la VOHITRA qui prend sa source dans la plaine de l'ANKAY, au sud d'ANDAINGO, à 1 200 m d'altitude. Elle traverse d'abord en direction du sud dans la région de FIERENANA, une zone marécageuse. Dans la deuxième falaise, la pente s'accentue et on rencontre quelques sites favorables à la création de barrages.

Après le confluent avec la SAHATANDRA, en amont de ROGEZ, la VOHITRA coule vers l'est. Une chute importante, à l'aval de ROGEZ, a fait l'objet d'études pour l'implantation d'une usine hydro-électrique. La VOHITRA se jette dans la RIANILA près d'ANIVORANO.

L'IAROKA est le second affluent important qui descend des hauteurs situées au sud de Perinet et qui, après un parcours pratiquement ouest-est, se jette dans la RIANILA près de MORAMANDIA, à quelques kilomètres de la mer.

En rive gauche, le seul affluent notable est la RONGARONGA.

La RIANILA draine un bassin de 7 820 km², dont 2 540 km² pour la VOHITRA en amont du confluent et 1 263 km² pour l'IAROKA au bac d'AMPITABE. La longueur totale de la RIANILA est de 134 km. Elle serait plus longue en prenant la VOHITRA comme branche-mère : 170 km.

### 6.3.3.4. Le Mangoro

Il prend naissance au nord-est d'ANJOZOROBE, vers 1 100 m d'altitude et coule dans la dépression, ou plaine de l'ANKAY, comprise entre la falaise de l'ANGAVO et le plateau montagneux appelé aussi falaise BETSIMISARAKA. La direction est d'abord nord-sud, à travers des zones très marécageuses. Jusqu'à AMBODIMANGA, la pente moyenne du lit est de 70 cm/km. Ensuite, le MANGORO continue sa course vers le sud.

La pente devient plus forte, avec de nombreuses chutes dont l'aménagement, du point de vue hydro-électrique a été étudié. Avec ces pentes faibles dans la partie supérieure de son cours, le MANGORO présente le type parfait du profil jeune encore très loin de l'équilibre, dû probablement à un rajeunissement assez récent du relief.

A 200 km de sa source, il reçoit en rive droite l'ONIVE, son plus grand affluent qui descend du massif de l'ANKARATRA. La pente de cette rivière est très forte et, entre TSINJOARIVO et le confluent, les possibilités d'aménagements hydro-électriques sont très nombreuses.

Le confluent MANGORO-ONIVE présente une forme très curieuse : les deux rivières coulent dans la même vallée, exactement en sens inverse, pendant quelques dizaines de kilomètres. Ensuite le MANGORO bifurque vers l'est à travers des gorges encaissées avec des pentes de plus de 10 m/km. A 25 km de l'embouchure, la pente diminue un peu, le lit s'élargit mais reste encore coupé de rapides. Le NOSIVOLO qui prend naissance à l'est de FANDRIANA est le second affluent important de la rive droite.

La longueur totale du MANGORO est de 300 km. Il draine un bassin versant de 17 175 km². Le bassin de l'ONIVE, en amont du confluent, couvre 4 860 km².

Le MANGORO, par la surface de son bassin et les volumes d'eau écoulés, est le plus grand fleuve du versant oriental.

### 6.3.3.5. La Mananjary

Elle prend naissance dans le même massif que le NOSIVOLO, affluent du MANGORO, à l'est - sud-est de FANDRIANA, vers 1 500 m d'altitude. Elle coule suivant une direction générale sensiblement nord-sud, parallèle à la schistosité des roches cristallines qu'elle traverse. Quelques parties de son cours présentent une direction nord-ouest - sud-est correspondant au réseau de failles parallèles que l'on retrouve jusqu'à la latitude de VOHIPENO et qui caractérise le tracé du réseau hydrographique de la région. Les affluents rive droite de la MANANJARY ont des cours pratiquement parallèles et orientés suivant la direction générale nord-ouest - sud-est.

A hauteur d'IFANADIANA, la MANANJARY bifurque vers l'est. Sa pente longitudinale diminue et est de l'ordre de 1 m/km jusqu'à la mer qu'elle atteint à quelques kilomètres au sud de MANANJARY.

Le profil en long de la MANANJARY est assez régulier pour une rivière du versant est. On rencontre quelques chutes dans la région d'AMBODIMANGA. Celle d'ANTSINDRA avait été retenue en vue d'un aménagement hydro-électrique. Même sur les affluents, les possibilités énergétiques sont importantes : la chute de l'IVOANANA à FATIHITA est celle qui présente le plus d'intérêt ; elle a déjà été étudiée en vue de l'exploitation de mines de nickel.

La MANANJARY, qui naît à 100 km environ de la côte, parcourt 212 km avant d'atteindre la mer.

La surface de son bassin versant est égale à 6 780 km².

### 6.3.3.6. Le Namorana

Il présente un bassin versant étroit et allongé de 2 150 km² orienté ouest-est. Cette rivière à un profil en long très accentué, dans la traversée de la falaise, où une chute de 250 m a été reconnue pour l'installation d'une centrale électrique. La longueur du NAMORONA est de 103 km.

### 6.3.3.7. Le Faraony

Il prend sa source dans la falaise orientale, à l'est de FIANARANTSOA et coule suivant des directions qui sont alternativement nord-ouest/sud-est et nord-sud. Il draine un bassin de 2 695 km² avec une longueur totale de 150 km.

### 6.3.3.8. La Matitanana

Cette rivière de VOHIPENO est caractéristique par le tracé de son réseau hydrographique dans lequel les différentes rivières découpent, en plan, des parallélogrammes parfaitement réguliers. Son bassin versant s'étend sur 4 395 km².

### 6.3.3.9. La Manampatrana

Cette rivière de FARAFANGANA prend sa source sur le versant est de l'ANDRINGITRA. Elle draine un bassin de 4 050 km².

### 6.3.3.10. La Mananara

Elle est formée par la jonction, en amont du seuil de Soakibany, des trois rivières Menarahaka, Itomampy et Ionaivo.

Les longueurs respectives depuis les sources de l'Ionaivo, de l'Itomampy, de la Menarahaka sont les suivantes : 418 km, 295 km et 284 km. Ceci donnerait donc l'Ionaivo comme branche-mère de la Mananara. En prenant le Sahambano, la longueur est de 323 km.

Si on considère que les sources des différentes rivières constituant le Manarana se trouvent toutes à environ 50 km du littoral, on voit ici l'influence énorme du relief sur le tracé du réseau hydrographique. Le bassin de la Mananara est certainement le plus caractéristique à ce point de vue : les rivières parcourent des distances 8 fois supérieures à celles qui séparent leurs sources de la mer.

Il y a, peut-être, en capture de l'ITOMAMPY et de l'IONAIVO, jadis affluents de l'IHOSY, par les rivières du versant est, mais ceci n'est pas prouvé avec précision.

L'IONAIVO prend naissance sur les contreforts nord du massif de BEAMPINGARATRA, sur les pentes nord du TRAFONAOMBY (1 957 m), vers 1 500 m d'altitude. Il coule en direction générale sud-nord jusqu'à RANOTSARA.

Après une dizaine de kilomètres parcourus, entre RANOTSARA et RANOTSARABE, en direction nord-est, l'IONAIVO fait un nouveau coude à 90° qui le fait couler, dans la plaine de RANOTSARA, vers le sud-est

jusqu'au confluent avec l'ITOMAMPY. De ce point, jusqu'à sa rencontre avec la MENARAHAKA, l'IONAIVO coule vers le nord.

L'ITOMAMPY prend sa source près de l'IONAIVO à 40 km de la mer, près du massif du VOHILAFY (1 812 m) à 1 600 m d'altitude. Elle se dirige vers le nord jusqu'à la rencontre avec l'IONAIVO. Son cours présente une pente assez forte jusqu'à 60 km de la source. La pente diminue ensuite et est de l'ordre de 1,30 m par km jusqu'au seuil de SOAKIBANY.

La MENARAHAKA prend sa source dans le massif de l'ANDRINGITRA, vers 2 000 m d'altitude. Elle longe la bordure sud de ce massif et se dirige carrément vers l'ouest jusqu'à SAKALALINA.

De SAKALALINA au confluent avec le SAHAMBANO, elle coule vers le sud-ouest, puis sa direction devient nord-est/sud-est dans la plaine de RANOTSARA. Avant de rejoindre l'IONAIVO, la MENARAHAKA coule sur une dizaine de km vers le sud, dans la même vallée que l'IONAIVO, mais en sens inverse.

La Mananara s'échappe vers l'est en direction du seuil de SOAKIBANY et vers la mer qu'elle atteint dans la région de V ANGAINDRANO. Après SOAKIBANY, la pente est de l'ordre de 10 m/km jusqu'à 36 km de l'embouchure. La surface du bassin versant drainé par la MANANARA est égale à 16 760 km². En amont du seuil de SOAKIBANY, elle est de 14 160 km².

#### 6.3.3.11. La Manampaniry

Dans le sud, nous trouvons la MANAMPANIRY qui coule, le long des chaînes Anosyennes en direction sud-ouest/nord-est.

### 6.3.4. Le versant ouest

C'est l'ensemble le plus étendu. Il couvre près de 365 000 km² soit 61,3 % de la surface de MADAGASCAR.On y distingue deux séries de bassins :

- les grands fleuves qui débordent largement sur les hauts plateaux. Les bassins versants présentent grossièrement la forme de triangles dont le sommet s'appuie sur le littoral ;
- les fleuves côtiers qui s'imbriquent dans les espaces compris entre les bassins des grands fleuves et dont les sources se situent sur la bordure occidentale des hauts plateaux.

Les profils en long (figures 1.12. à 1.15.) des grands fleuves se caractérisent par une rupture de pente importante à la sortie du socle cristallin tandis que les petites rivières de la couverture sédimentaire ont un profil plus régulier.

Une caractéristique des fleuves de la côte ouest réside dans le fait que, très souvent, et principalement au sud de la TSIRIBIHINA, les débits d'étiage décroîssent de l'amont vers l'aval. Les petites rivières dont les bassins sont inférieurs à un millier de km2 sont à sec du mois d'avril au mois de novembre.

#### 6.3.4.1. Les grands fleuves

Du nord au sud, les principaux fleuves sont :

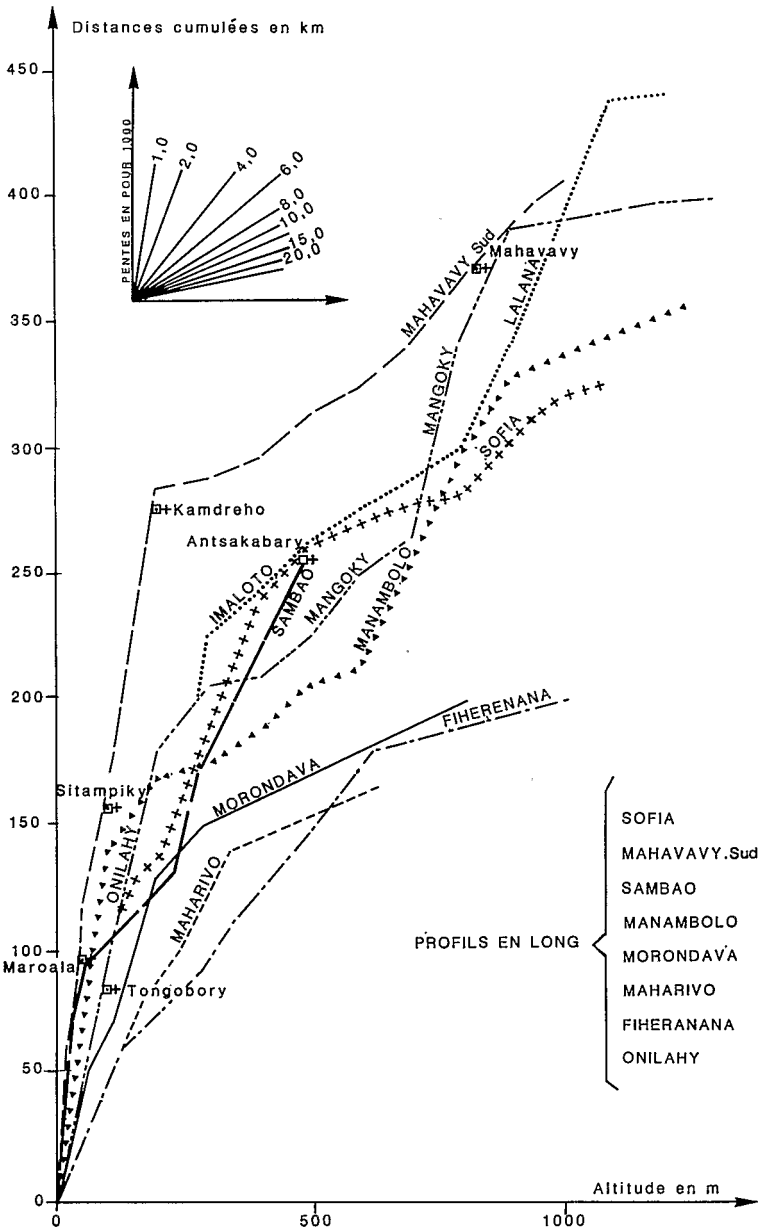
### *6.3.4.1.1. La Sofia (fig. 1.12.)*

Elle prend sa source au sud de l'ANKAIZINA vers 1 100 m d'altitude. Sa direction est d'abord nord-sud jusqu'au confluent avec la MANGARAHARA, rivière qui descend du seuil de MANDRITSARA. Elle se dirige ensuite vers l'ouest. Le profil en long présente une première partie à forte pente jusqu'à ANTSAKALAY (10 m/km environ), puis un tronçon à pente plus faible d'ANTSAKALAY à la cote 200, à l'entrée du bas plateau de l'ANDRONA.

La traversée de ce plateau est marquée par des rapides et des chutes dont la plus importante, à 10 km en amont de MAROAKA, présente une dénivelée de 60 m environ sur une distance de 4 km.

figure 1.12.

Cours d'eau de versant ouest




P. Chaperon, J. Danloux, L. Ferry

La direction générale se maintient est-ouest et la SOFIA se jette dans la Baie de la MAHAJAMBA par un delta de 20 km de long et d'une dizaine de kilomètres de large.

Le bassin versant, qui couvre une surface de 27 315 km² est très peu étendu vers le nord : les affluents rive droite sont peu importants et très courts (de l'ordre de 20 à 50 km). Par contre, vers le sud, le bassin s'étend très loin jusqu'au plateau d'ANALAROMASO, non loin de la cuvette d'ANDILAMENA.

Les principaux affluents de la rive gauche sont :

- la MANGARAHARA qui descend, vers le sud, du plateau de MAHAKIRA, arrose MANDRITSARA et remonte ensuite vers le nord jusqu'à sa jonction avec la SOFIA ;
-l'ANJOBONY qui prend naissance près de l'AMPARIRIMBARATRA (1 201 m) et qui, jusqu'à son confluent, conserve une direction générale sud-est/nord-ouest ;
- la BEMARIVO, qui se jette dans l'ANJOBONY à quelques kilomètres avant son confluent avec la SOFIA, prend sa source au mont ANTOLANA (1 199 m), à l'ouest d'ANDILAMENA. De la source à MIARINARIVO, la BEMARIVO porte le nom d'ANKOBAKA. Elle se dirige vers le nord. Après MIARINARIVO, la pente diminue notablement et la rivière présente de grands méandres, suivant une direction générale parallèle à celle de l'ANJOBONY. Un peu au nord-est de MAMPIKONY, la BEMARIVO entre dans la dépression permotriasique et suit une direction sud-nord jusqu'à la SOFIA.
Toutes ces rivières ont, dans la partie inférieure de leur cours, un lit très large encombré de bancs de sable à l'étiage, avec de part et d'autre de très importantes plaines d'inondation.

La longueur totale de la SOFIA est de 328 km. L'ANJOBONY mesure 200 km et la BEMARIVO, 265 km. Le bassin versant de la BEMARIVO a une superficie de 15 270 km², soit plus de la moitié du bassin de la SOFIA.

### *6.3.4.1.2. L'ensemble Betsiboka-Mahajamba (fig. 1.13.)*

Par suite de la "capture" de la MAHAJAMBA par le KAMORO dans la région de MORAFENO à l'est de TSARAMANDROSO, et bien qu'une partie des débits de la MAHAJAMBA s'écoule encore vers le canal du MOZAMBIQUE, il est difficile de séparer les deux bassins de la BETSIBOKA et de la MAHAJAMBA. Nous sommes ainsi en présence du plus grand bassin fluvial de MADAGASCAR puisqu'il couvre 63 450 km². Dans cet ensemble, le fleuve le plus important est la BETSIBOKA.

Dans son cours supérieur, la BETSIBOKA est constituée par la réunion du JABO et de l'AMPARIHIBE. Ces deux rivières prennent leur source au nord de TANANARIVE : le JABO, dans le massif de l'IANGANA, à 1 550 m d'altitude et l'AMPARIHIBE qui, à sa naissance se nomme LELOSY, dans le massif de l'ANKIRANJAY. Le réseau hydrographique, très dense, rend difficile la détermination de la rivière principale.

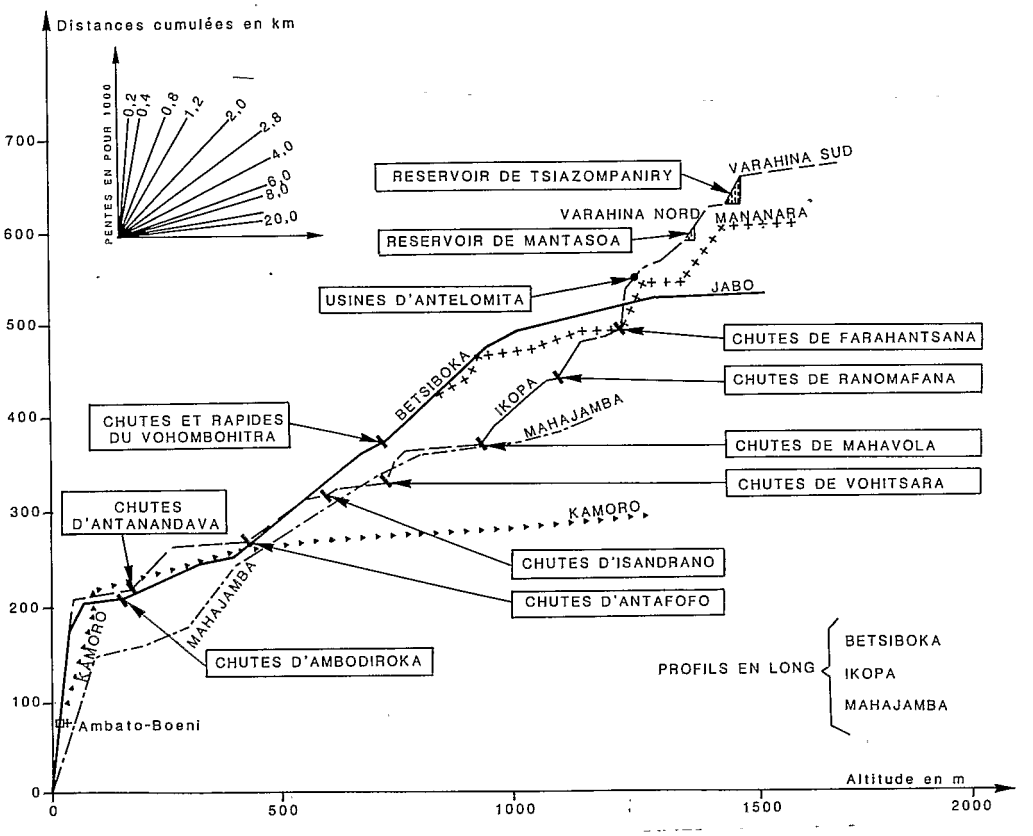
Leur direction générale est sud-nord avec une pente très forte de l'ordre de 10 m/km. Le confluent se situe à la sortie de la plaine d'ANTANETIBE à la cote 938 et à 471 km de la mer.

A partir de là, la rivière prend le nom de BETSIBOKA. C'est déjà une rivière importante qui reçoit plusieurs affluents dont, en rive droite, la MANANARA qui, par sa longueur et l'altitude de sa source, pourrait constituer la branche-mère de la BETSIBOKA (au confluent 186 km pour la MANANARA, 112 pour la BETSIBOKA). La MANANARA traverse trois grandes plaines (ALAKAMISY, ANJOZOROBE, ANDAKANA) séparées par des seuils et des chutes importants.

Grossie par la MANANARA, la BETSIBOKA se dirige toujours vers le nord en direction du massif du VOHOMBOHITRA. Après avoir brusquement obliqué vers l'ouest, elle contourne ce massif sur sa bordure ouest, dans des gorges assez encaissées, pendant 16 km. La pente est assez forte et il a été envisagé de créer à cet endroit, un barrage de régularisation. Le bassin versant, en amont du VOHOMBOHITRA, a une superficie de 6 315 km².

figure 1.13.

Cours d'eau du versant ouest




Après le VOHOMBOHITRA, la direction est encore sud-nord, puis sud-est/nord-ouest. La BETSIBOKA traverse une série de chaînes montagneuses par des rapides et des chutes dont les plus importantes se trouvent au droit du pont de la R.N.4.

Ces chutes présentent une dénivelée de 78 m sur 4 km et leur équipement du point de vue hydro-électrique a été étudié (production annuelle possible trois milliards de M/h).

Le bassin versant à cet endroit couvre une surface de 11 800 km².

En amont des chutes, la BETSIBOKA reçoit, en rive droite l'ISINKO qui descend du TAMPOKETSA KAMOREEN et, en rive gauche, l'ANDRIANTOANY.

A la sortie des chutes, la BETSIBOKA coule vers le nord dans un lit large de 200 à 250 m avec une pente moyenne de 78 cm/km.

A 179 km de MAHAJANGA, la BETSIBOKA reçoit, en rive gauche, l'IKOPA son plus grand affluent.

L'IKOPA est formée par la réunion de la VARAHINA-sud et de la VARAHINA-nord. Sur ces deux rivières, ont été aménagés les barrages de TSIAZOMPANTRY en 1956 et de MANTASOA en 1938, destinés à la régularisation des débits d'étiage. Le barrage de MANTASOA, depuis 1956, alimente, par la digue d'AMPASIMPOTSY, la

centrale hydro-électrique de la MANDRAKA. Les eaux de ce bassin sont ainsi utilisées sous 250 m de chute au lieu de 36 m aux usines d'ANTELOMITA sur l'IKOPA.

Le confluent des deux VARAHINA se situe à 6 km en amont de la chute d'ANTELOMITA qui est équipée depuis 1909 et 1918 de deux centrales hydro-électriques alimentant ANTANANARIVO en énergie électrique.

A partir du confluent, la rivière devient l'IKOPA. Elle coule en direction est-ouest, dans un lit relativement encaissé, avec une pente moyenne de 2 m/km jusqu'à AMBOHIMANAMBOLA. L'IKOPA entre alors dans la plaine de TANANARIVE. Son cours est endigué pratiquement jusqu'à BEVOMANGA sur une distance de 45 km. La pente moyenne est très faible, de l'ordre de 25 cm/km, pouvant atteindre 13 cm/km en amont du confluent de l'ANDROMBA.

Dans la plaine de TANANARIVE, l'IKOPA reçoit la SISAONY et l'ANDROMBA grossie de la KATSAOKA en rive gauche et la MAMBA en rive droite.

Le niveau de base de la plaine de BETSIMITATATRA est constitué par le seuil de BEVOMANGA-FARAHANTSANA que l'IKOPA traverse par une série de chutes et rapides dont la plus importante, celle de FARAHANTSANA, mesure 37 m de dénivelée.

A FARAHANTSANA, le bassin versant de l'IKOPA est de 4 498 km².

Après les chutes de FARAHANTSANA et jusqu'à l'aval des chutes d'ANTANANDAVA, à la sortie du socle cristallin, nous nous trouvons devant une nouvelle rivière, avec un profil très jeune et des chutes importantes.

A 259 km en amont du confluent BETSIBOKA et à 44 km en aval de FARAHANTSANA, la chute de RANOMAFANA constitue la première chute importante (40 m) de la deuxième partie du cours de l'IKOPA. A 14 km à l'aval de la station de FIADANANA, à la traversée du massif d'AMBILOBE, la chute de MAHAVOLA présente 160 m de dénivelée sur 6 km. L'IKOPA franchit ensuite, 32 km plus loin, les chutes de VOHITSARA (100 m sur 5 km) puis les chutes ISANDRANO à 9 km des précédentes (environ 50 m sur 4 km) et à 44 km plus bas, les chutes d'ANTAFOFO qui, sur 10 km, font perdre 180 m d'altitude au lit de l'IKOPA. A cet endroit, la surface du bassin versant est de l'ordre de 19 000 km².

Les dernières chutes importantes sont celles d'ANTANANDAVA qui, sur 10 km, présentent une dénivelée totale de 135 m. Au pied des chutes, à l'entrée de la dépression périphérique, nous sommes à 50 m d'altitude et il reste 31 km à parcourir jusqu'au confluent avec la BETSIBOKA. L'IKOPA coule alors, en direction du nord-est, dans un lit très large bordé de grandes plaines d'inondation atteignant par endroits 3 km. La pente n'est plus que de 26 cm/km.

Les principaux affluents de l'IKOPA sont la KOTORATSY, l'ISANDRANO et la MENAVANA en rive gauche, la MANANKAZO, l'ANDRANOBE et le NAMOKOMTTA en rive droite.

En amont du confluent, l'IKOPA et la BETSIBOKA ont des profils en long très accentués, avec des caractéristiques nettement différentes de l'amont vers l'aval.

La BETSIBOKA présente une concavité régulière assez nette de la source du JABO jusqu'au massif de VOHOMBOHITRA.

Dans cette zone, la rivière semble avoir atteint sont profil d'équilibre. Elle se trouve même par endroits (confluent JABO-AMPARTHIBE) en-dessous de ce profil, ce qui cause un alluvionnement important au détriment des rizières. A l'aval du VOHOMBOHITRA, le profil est coupé de chutes et de rapides et présente une très forte pente difficilement utilisable du point de vue hydro-électrique, du fait du manque de chutes verticales importantes et de la configuration du lit souvent large avec des berges assez basses.

Dans tout le cours moyen, bien que les charges solides transportées en suspension soient très importantes, il ne se produit aucun remblaiement, la pente donnant à la rivière une grande puissance de transport.

De sa source jusqu'à son embouchure, l'IKOPA montre trois profils distincts et très différents :

- jusqu'au seuil de FARAHANTSANA, nous avons le profil d'équilibre très régulier d'une rivière ayant atteint sa maturité, et se trouvant parfois même à la limite de la sous-adaptation (plaine de TANANARIVE) ;

- en aval, le profil présente de très forte variation de pente, due aux conditions géologiques locales et la pente moyenne est très grande (4,40 m/km) puisqu'on passe de la cote 1 150 à la cote 50 en 196 km ;

- le troisième tronçon, en aval d'ANTANANDAVA, est nettement en-dessous de son profil d'équilibre. Sa pente moyenne est de 50 cm/km environ.Sur les vingt derniers kilomètres, la pente est égale à 26 cm/km. Elle est donc trois fois plus faible que celle de la BETSIBOKA sur la même distance en amont.

Les caractéristiques topographiques et géologiques font que l'IKOPA possède les plus grandes ressources hydro-électriques de la grande Ile, évaluées à une quinzaine de milliards de KWH par an.

Le confluent IKOPA-BETSIBOKA se situe dans une zone marécageuse dans laquelle les lits se déplacent fréquemment. La distance jusqu'à la mer est égale à 179 km. Entre le confluent et AMBATO-BOENI, la pente est de 40 cm/km. Elle n'est plus que de 10 cm/km entre AMBATO-BOENI et MAHAJANGA. A AMBATO-BOENI, la BETSIBOKA reçoit, en rive droite, le KAMORO.

A MAROVOAY, à 61 km de MAHAJANGA, la BETSIBOKA forme un delta important à travers une forêt dense de palétuviers. En amont de MAHAJANGA, un resserrement, à la pointe ANTANANDAVA, transforme le delta en estuaire qui prend le nom de BOMBETOKA.

La longueur totale de la BETSIBOKA est de 531 km de la source du JABO à la mer et de 605 km si l'on part de la source de la MANANARA. L'IKOPA, de la source de la VARAHINA-sud au confluent avec la BETSIBOKA, parcourt 485 km et 664 km jusqu'à la mer. Le bassin de la BETSIBOKA s'étend sur 49 000 km² (ce chiffre ne tient pas compte de la haute MAHAJAMBA).

La MAHAJAMBA qui, "captée" par le KAMORO apporte la presque totalité de son débit au bassin de la BETSIBOKA, prend naissance sur les hauts plateaux de l'ANJAFY, dans le lac AMPARTHINANDRIAMBAVY, vers 1 100 m d'altitude. La direction du cours est grossièrement sud-nord avec une pente assez forte sur les soixante premiers kilomètres (8 m/km). Cette pente diminue un peu jusqu'à TSARATANANA pour augmenter à nouveau à la traversée du rebord occidental des hauts plateaux (sur 26 km, la dénivelée est de 200 m environ, soit 7,6 m/km).

Au contact avec la couverture sédimentaire, la pente diminue (70 cm/km). La "capture" de la MAHAJAMBA par le KAMORO a probablement pour origine cette brusque rupture de pente.

La MAHAJAMBA a un transport solide important et, par suite de la diminution de pente, la capacité de transport baisse brutalement d'où un alluvionnement intense qui a obligé la MAHAJAMBA à se frayer, en crue, un chemin vers l'ouest. A l'étiage, la totalité des eaux de la MAHAJAMBA va vers le KAMORO et le lit, jusqu'à la mer, n'est alimenté que par les eaux des petites rivières telles que l'ANDRANOLAVA et le KIMANGORO.

Depuis 1903, la "capture" semble stable. Mais il se peut que la MAHAJAMBA reprenne son ancien cours lorsque le lit du KAMORO aura été suffisamment exhaussé.

Ce qui reste de la MAHAJAMBA atteint la mer par un delta.

De "la zone de capture" à la mer, il y a 145 km. La MAHAJAMBA en amont de la capture, coule sur 153 km et draine un bassin de 9 750 km². De sa source à AMBATO-BOENI, le KAMORO a parcouru 145 km.

### 6.3.4.1.3. La Mahavavy du sud

Elle prend sa source dans le massif d'ANDRANOFOTSIBE vers 1 000 m d'altitude. En rive droite, elle reçoit la KIRANOMENA et la MANAMIDONA qui descendent du FAMOIZANKOVA.

La direction générale du cours est sud-nord. La pente est très forte jusqu'à hauteur de KANDREHO, à 125 km de la source (environ 7 m/km). La MAHAVAVY pénètre alors dans la dépression périphérique et reçoit, en rive gauche, la MAHAKAMBANA qui descend du seuil de MANERINERINA et coule entièrement dans la dépression. La rupture de pente brutale modifie très nettement l'allure de la rivière. Elle devient plus large avec des méandres bien marqués. La MAHAVAVY traverse ensuite les causses de l'ANKARA et du KELIFELY par des gorges assez profondes.

En aval de SITAMPIKY, à 280 km de la source, la pente n'est plus que de 40 cm/km. La rivière est bordée de grands lacs et de marécages (KINKONY, KATONDRO) qui, lors des crues, sont remplis par les eaux de la MAHAVAVY.

La MAHAVAVY se jette dans le canal de MOZAMBIQUE par un delta très étendu où sont installées les plantations de canne à sucre de NAMAKIA.

Après un parcours de 410 km se situant grossièrement autour du méridien 46°E, la MAHAVAVY couvre un bassin de 18 500 km²

### 6.3.4.1.4. Le Manambolo

Il prend sa source dans la chaîne de l'ANKAROKA vers 1 250 m d'altitude à environ 25 km au nord-est de TSIROANOMANDIDY. Il coule vers l'ouest, contourne, par le sud, le massif du BEVATO, draine la pénéplaine de TSIROANOMANDIDY puis descend l'escarpement du BONGOLAVA. Dans la dépression du BETSIRIRY, la direction générale devient nord-sud, avec une pente nettement plus faible. Le plateau du BEMARAHA, que le NAMAMBOLO traverse par des gorges encaissées en amont de BEKOPAKA, l'oriente à nouveau vers l'ouest. Il se jette dans le canal de MOZAMBIQUE par un delta à peine marqué.

La superficie de son bassin est égale à 13 970 km² et sa longueur totale à 370 km. Son principal affluent rive droite est le MANAMBOLOMATY qui draine le nord de la dépression de BETSIRIRY.

### 6.3.4.1.5. La Tsiribihina (fig. 1.14.)

C'est le troisième fleuve de MADAGASCAR par la surface de son bassin versant et, probablement, le second après la BETSIBOKA par les volumes d'eau écoulés annuellement.

Elle est constituée par la réunion, à la sortie du socle cristallin, de la MAHAJILO et de la MANIA, drainant les Hauts Plateaux, de la SAKENY et de la MANANDAZA coulant, du sud au nord et du nord au sud, dans la plaine du BETSIRIRY.

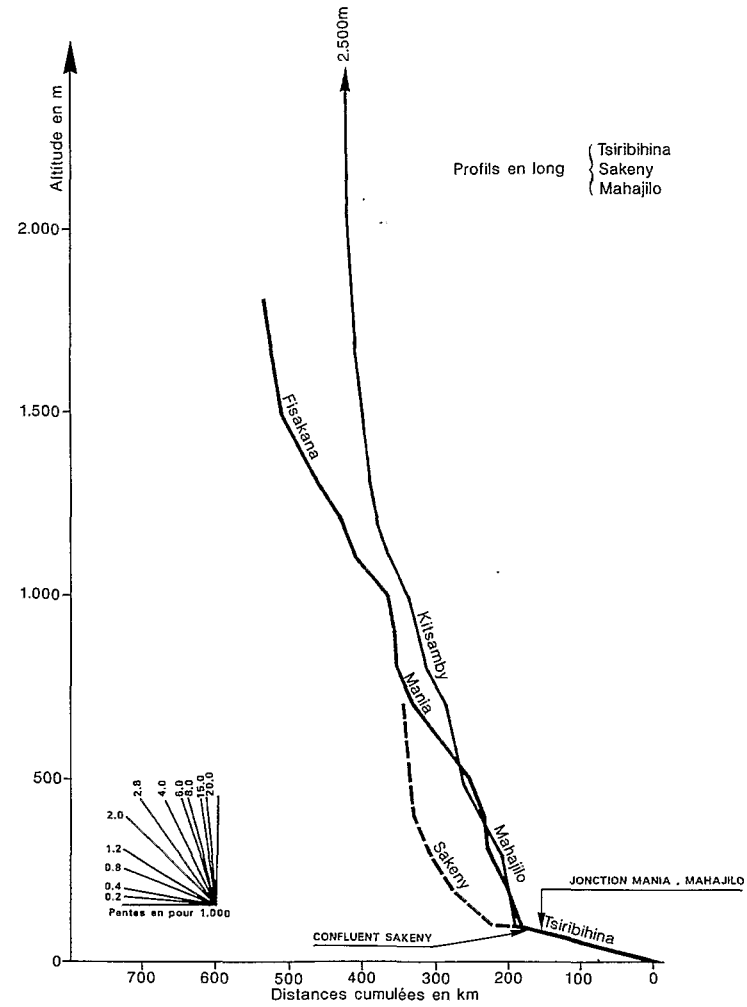
Les rivières les plus importantes sont, évidemment, celles qui descendent des Hauts Plateaux.

La KITSAMBY prend sa source dans le massif de l'ANKARATRA près du TSIAFAJAVONA vers 2 500 m d'altitude. Jusqu'au confluent avec la SAKAY, c'est un véritable torrent qui dégringole de 1 800 m en moins de 140 km, ce qui donne une pente moyenne de près de 13 m/km. La SAKAY prend naissance à l'est de TSIROANOMANDIDY sur un plateau marécageux de 1 400 m d'altitude. Elle reçoit en rive gauche, par la LILY, les eaux du lac ITASY.

A travers le relief chaotique de la région, les rivières ont un tracé en plan très sinueux avec des vallées souvent très escarpées.

figure 1.14.

Cours d'eau du versant ouest




Après leur jonction, la KITSAMBY et la SAKAY constituent la MAHAJILO. La direction générale devient est-ouest jusqu'à MIANDRIVAZO, puis, dans le BETSIRIRY, la MAHAJILO coule vers le sud jusqu'au confluent avec la MANIA et la SAKENY. La pente est très forte jusqu'à MIANDRIVAZO et particulièrement dans la descente du BONGOLAVA où sur 17 km, la rivière descend de 200 m environ.

La MANIA sous le nom de FISAKANA naît en bordure de la falaise orientale, au nord-est de FANDRIANA, vers 1 800 m d'altitude.

Son cours est très sinueux avec une orientation générale est-ouest. Elle traverse plusieurs chaînes montagneuses et la plus belle chute se situe en aval de la plaine de SOAVINA, où la dénivelée est de l'ordre de 200 m sur 10 km environ.

Dans le BONGOLAVA, la pente est un peu moins rapide que celle de la MAHAJILO.

La MANIA reçoit, en rive droite, la MANANDONA qui draine la région d'ANTSIRABE, puis l'IANDRATSY qui vient de la région de BETAFO. En rive gauche, le principal affluent est l'IVATO.

La SAKENY prend sa source dans le nord du massif du MAKAY et coule, en direction sud-nord, dans la dépression du BETSIRIRY. Sa pente est relativement faible et son lit est très large et très mobile à l'étiage.

La réunion des trois rivières se fait dans le BETSIRIRY, dans une zone basse et marécageuse, avec de nombreux lacs qui se remplissent en crue et se vident en saison sèche par infiltration et évaporation.

La TSIRIBIHINA se dirige ensuite vers l'ouest et traverse le plateau de BEARAHA dans un défilé aux berges abruptes. A la sortie, la TSIRIBIHINA devient très large, les zones d'inondation et les lacs sont nombreux jusqu'à la mer.

En crue, de grandes surfaces de terrains sont emportées presque tous les ans ce qui pose de graves problèmes pour les plantations situées à proximité des berges. Après BELO, la TSIRIBIHINA se jette dans la mer par un immense delta qui s'étend du nord au sud sur 35 km environ et qui progresse lentement vers le large.

La longueur totale de la TSIRIBIHINA depuis la source de la FISAKANA est de 525 km. La SAKENY mesure 170 km et la MAHAJILO-KITSAMBY : 260 km.

Le bassin versant total couvre une superficie de 49 800 km2 dont 7 025 km² pour la SAKENY, 14 500 km² pour la MAHAJILO et 18 565 km² pour la MANIA.

Dans leur partie supérieure, les deux principales rivières présentent de grosses possibilités du point de vue énergétique. Seule est actuellement utilisée une petite chute sur la MANANDONA pour l'alimentation d'ANTSIRABE.

#### *6.3.4.1.6. Le Mangoky (fig. 1.15.)*

C'est le plus grand fleuve malgache par la superficie du bassin versant, est constitué par la MATSIATRA, la MANANANTANANA et le ZOMANDAO se rejoignant dans la zone de contact cristallin-sédimentaire, à 300 km environ du canal de MOZAMBIQUE.

La MATSIATRA prend sa source à 1 250 m d'altitude dans le massif du TSITONDROINA. Sur les cinq premiers kilomètres de son cours, elle coule d'abord vers le sud. Elle traverse ensuite, sur 80 km, des régions plates et marécageuses et, jusqu'au confluent avec la FANINDROAN, en rive droite, la pente est de l'ordre de 0,50 m/km.

Dans le massif granitique de l'ISANDRA, la pente atteint par endroits 14 m/km. Les rapides sont nombreux, mais il n'y a pas de véritable chute. Les derniers contreforts quartzitiques de l'ITREMO maintiennent une pente relativement importante. Puis la MATSIATRA pénètre, à 750 m dans la plaine d'IKALAMAVONY. Son lit s'élargit et plusieurs biefs calmes sont délimités par des seuils rocheux parsemés d'îles.

A IOVOLO, la MATSIATRA oblique un peu vers le nord et garde la direction est-sud-est/ouest-nord-ouest jusqu'à FITAMPITO.

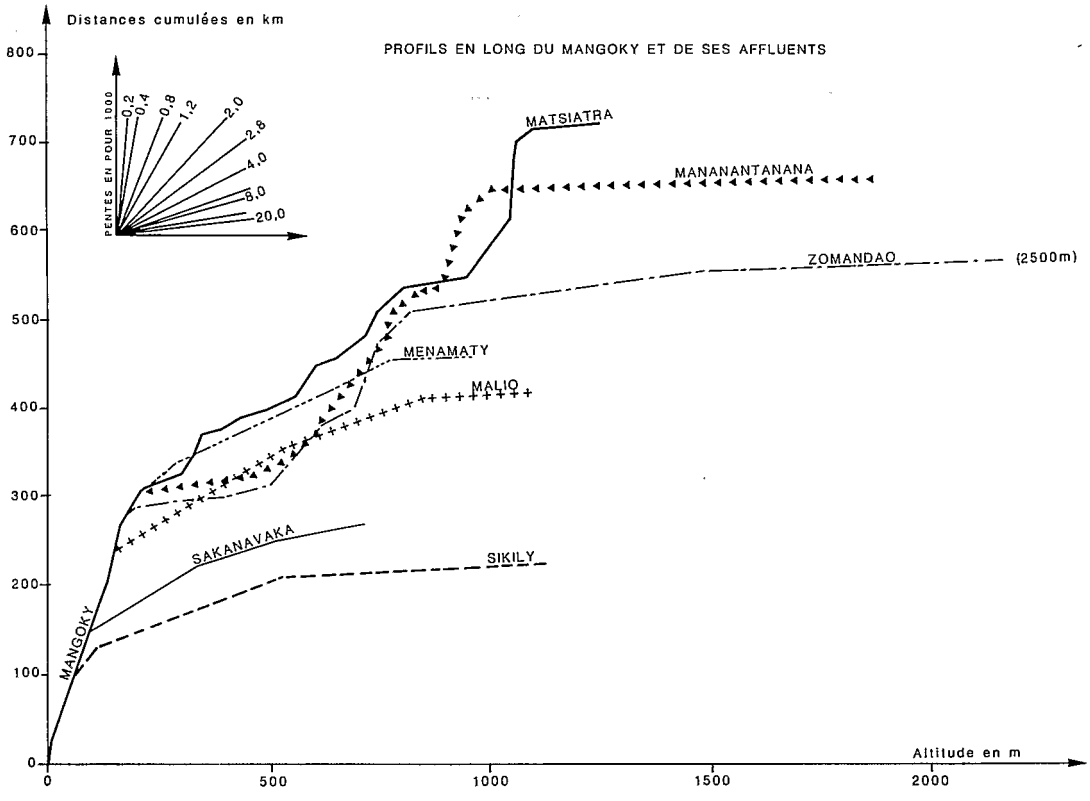
La pente moyenne est de l'ordre de 2,3 m/km. Elle reçoit deux affluents importants en rive droite : l'ISAKA et la MATANAIKA.

A partir de FITAMPITO, la direction redevient est-ouest et la pente augmente légèrement : 3,6 m/km jusqu'à la sortie des gorges de MALAKIALINA, avec, dans les gneiss du VOHIMENA, des passages à 8,6 m/km.

A la sortie de ces formations, la MATSIATRA se dirige vers le sud et coule dans un lit très large (200 à 300 m par endroits) encombré de bancs de sable à l'étiage.

figure 1.15.

Cours d'eau du versant ouest




La pente moyenne, sur ce parcours, est de 1,1 m/km. Une faille met à nouveau en contact, à l'altitude 310 m environ, les couches de la SAKOA supérieure avec les micaschistes et les gneiss de la série du VOHIMENA que la MATSIATRA doit entailler par des gorges profondes de 200 à 300 m, avant de rejoindre la dépression SAKAMENIENNE et le MANGORY à l'altitude 206 m. La pente moyenne, dans les gorges, est de l'ordre de 4,8 m/km. La longueur totale de la MATSIATRA est égale à 410 km. La perte d'altitude est de 1 050 m environ, soit une pente moyenne de 2,6 m/km. Jusqu'au confluent, la MATSIATRA draine 13 370 km².

La MANANANTANANA prend sa source sur le versant est du TSITONDROINA (2 019 m), vers 1 850 m d'altitude et, pendant les premiers kilomètres de son cours, elle se dirige vers l'est. Après 10 km, le torrent se trouve à 1 000 m d'altitude.

Différents massifs granitiques la font obliquer d'abord vers le sud, puis vers l'ouest et enfin suivant un axe est-sud-est/ouest-nord-ouest, en direction d'AMBALAVAO. Son tracé est très sinueux et l'énorme boucle au sud-est d'AMBALAVAO est très spectaculaire.

La pente générale est de l'ordre de 0,5 m/km.

Elle reçoit deux affluents en rive gauche, la MANANDRIANA et le MANANBOLO. A la traversée du massif quartzitique du RINGORINGO (1 456 m), la pente augmente (4,3 % sur 12 km) pour devenir ensuite inférieure à 1 m/km jusqu'à SOLILA.

De SOLILA à TSITONDROINA, la MANANANTANANA poursuit sa route vers l'ouest/nord-ouest. C'est une rivière majestueuse, coulant entre des berges basses le plus souvent bordées de galeries forestières bien développées. La pente générale du lit est de 1,5 m/km. Sur ce parcours, la MANANANTANANA reçoit son affluent le plus important en rive droite : le MANAMBOVO.

A TSITONDROINA, l'échelle limnimétrique est approximativement à la cote 600. Ensuite, la rivière oblique vers le sud-ouest à cause de l'obstacle créé par le massif de l'AMBOHIBOLA. La pente augmente un peu (2,5 %).

La traversée des massifs de BETAINAMBOA (911 m), d'AMBARARATAKOLO (933 m) et de MAHATISNJOROA (695 m) se fait en direction est-ouest par des gorges assez resserrées et avec une pente de 4 à 5 m/km à partir de la cote 450 environ.

La MANANANTANANA rejoint le MANGOKY à la cote 206. La pente moyenne sur les derniers 21 km est de l'ordre de 12 m/km, soit trois fois plus forte environ que celle observée sur la MATSIATRA en amont du confluent. Ceci est dû à l'orientation différente des deux rivières lors de la traversée des micaschistes et des gneiss du VOHIMENA : la MATSIATRA suit en gros l'axe des différents plissements, tandis que la MANANANTANANA les attaque perpendiculairement, ce qui détermine un profil en "escalier" à pente plus importante.

Depuis sa source jusqu'à son embouchure dans le MANGOKY, la MANANANTANANA parcourt 350 km. Elle descend de 1 640 m environ soit une pente moyenne de 4,7 m/km. La surface totale de son bassin est égale à 7 680 km².

Le ZOMANDAO prend sa source sur la face nord-est du pic BOBY, dans le massif de l'ANDRINGITRA, vers 2 500 m d'altitude. Sur les cinquante premiers kilomètres, la pente est très importante, la rivière descend de 2 500 à 824 m.

Après ANKARAMENA, à la cote 760 m environ, il pénètre dans la plaine du ZOMANDAO, et la pente moyenne n'est plus que de 1 m/km. Le principal affluent est la FENOARIVO en rive droite qui draine les chaînes quartzitiques de l'AMPIZARAMASO (1 464 m).

Après ce confluent, l'aspect de la rivière change. Le lit est coupé de nombreux seuils, la pente augmente et atteint parfois 4 m/km.

A 213 km de sa source, le ZOMANDAO reçoit en rive gauche, l'IHOSY dont le haut bassin très étroit présente, par endroits, d'une ligne de crête à l'autre, une largeur de l'ordre de 6 km.

Le parcours commun des deux rivières s'effectue en direction est-sud-est/ouest-nord-ouest jusqu'au rebord occidental du socle cristallin, avec une pente moyenne de l'ordre de 2 m/km. Le ZOMANDAO oblique ensuite vers l'ouest à travers des gorges analogues à celles de la MATSIATRA et de la MANANANTANANA, taillées dans les mêmes formations du VOHIMENA. Dans cette portion, la pente longitudinale est très forte 9,5 % en moyenne avec des passages à 20 m/km dans la partie centrale.

Le ZOMANDAO se jette dans le MANGOKY un peu en amont de IAVIRY à la cote 177 m environ. Sur les dix derniers kilomètres, situés déjà dans les orientations de la SAKAMENA, la pente n'est plus que de 2,3 m/km.

Le ZOMANDAO a parcouru 283 km de sa source au confluent avec le MANGOKY. Sa pente moyenne est égale à 8,2 m/km. La surface de son bassin est de 10 300 km².

L'IHOSY, de sa source au confluent avec le ZOMANDAO, mesure 304 km, sa pente moyenne est de 2,4 m/km. Il draine une surface de 3 700 km².

Le MANGOKY coule, après le confluent de la MATSIATRA et de la MANANANTANANA en direction de l'ouest dans un lit encaissé dans les derniers affleurements de gneiss du système ANDROYEN et du VOHIMENA.

A 25 km de SALIO, le MANGOKY reçoit le ZOMANDAO et jusqu'à BERONOHA, la direction générale est nord-est/sud-ouest. Le lit très large est bordé par de grandes plaines d'inondation, vestiges probables d'anciens lits abandonnés. La pente est voisine de 1,2 m/km.

Un peu à l'aval de BERONOHA à 153 m d'altitude, le MANGOKY reçoit la MALIO et l'ISAHENA qui prennent leur source dans le massif de l'ISALO. Ces deux rivières transportent de grandes quantités de sable qui, se déposant dans le MANGOKY, amènent un élargissement notable du lit (2 à 2,5 km en aval de BERONOHA). La pente qui est de 0,45 m/km immédiatement en amont de BERONOHA devient égale à 0,60 m/km à l'aval, par suite de ces apports sableux.

De BERONOHA au confluent de la SIKILY, à 61 km de la mer, le MANGOKY suit une direction sensiblement est-ouest et traverse successivement les cuestas de calcaires jurassiques de l'IANBINDA, de l'ISALO III et des grès durs de l'ARGOVIEN par une série de resserrements et de gorges. C'est dans ces dernières qu'est située la station hydrologique de BANIAN.

Les principaux affluents aboutissent en rive gauche ; ce sont la SAKANAVAKA et la SIKILY. Ces rivières, aux crues très brutales, sont à sec pendant six mois, de juin à novembre.

La cuesta calcaire de NOSY-AMBOSITRA rejette le MANGOKY vers le nord-ouest. Il conservera cette direction jusqu'à la mer. Le lit devient très large (1 à 2 km) avec des zones d'inondation pouvant s'étendre sur 5 à 6 km. Des traces de lits anciens sont visibles en rive droite, en face de BEVOAY.

Le delta du MANGOKY forme un triangle caractéristique de 80 km de hauteur et d'une cinquantaine de kilomètres de large sur le littoral. Au sud, le lac IHOTRY, pourrait être le témoin d'un cours ancien du fleuve qui suivait, depuis NOSY-AMBOSOTRA, une direction est-ouest et se jetait à la mer au sud de MOROMBE.

Au niveau de la station SAMANGOKY de TANANDAVA, le KITOMBO est un ancien lit parfaitement bien conservé, qui aurait cessé de fonctionner depuis une centaine d'années.

Actuellement, le MANGOKY semble vouloir abandonner le bras nord, appelé rivière d'ANKAZOMANGABE qui ne débite que lors des fortes crues. Un mouvement vers le sud est déjà amorcé. Au cours des campagnes 1964-65 et 1965-66, nous avons pu nous déplacer, en canot, sur des bras qui, il y a deux ans à peine, n'étaient que de tout petits "marigots" ayant tout au plus 1 à 2 m de large et profonds de quelques dizaines de centimètres.

C'est le cas de la rivière d'ANDRANOLAVA, au sud d'ANTONGO qui, en moins de deux années, est devenu un énorme bras de 100 m de large en moyenne et profond de 3 à 4 m. Toute la région située le long de ce cours ressemble à une zone inondée, les arbres meurent, du fait de la submersion permanente et, dans le delta, on assiste à une régression de la limite est des palétuviers, la quantité d'eau salée devenant probablement trop faible. Le bras principal, ou bras d'ANTONGO, s'ensable petit à petit et les pirogues vezo remontent maintenant le MANGOKY par le nouveau bras. Même par moyennes eaux, le bras d'ANDRANOLAVA donne le spectacle d'une rivière en forte crue, pleine à ras bord, avec un courant souvent violent, cherchant à se frayer un chemin à travers la forêt et les "baiboho".

Le MANGOKY depuis sa formation, au confluent MATSIATRA-MANANANTANANA, a parcouru 304 km. La pente moyenne est égale à 0,67 m/km.

Si l'on considère la MATSIATRA, comme la branche-mère du MANGOKY, la longueur totale du fleuve est égale à 714 km. Depuis la source de l'IHOSY, on a un développement plus important : 821 km soit environ 100 km de plus. Le MANGOKY est ainsi le plus long fleuve Malgache, il vient assez loin devant la BETSIBOKA qui, même en prenant comme origine la source de la MANANARA, ne mesure jusqu'à la mer que 605 km.

La surface totale du bassin du MANGOKY est égale à 55 750 km². C'est le plus grand bassin fluvial de MADAGASCAR, la BETSIBOKA, compte non tenu de la MAHAJAMBA, ne couvre en effet que 49 000 km².

#### *6.3.4.1.7. L'Onilahy*

Il est constitué par la réunion de l'ISOANALA, de l'IHAZOFOTSY, du MANGORY et de l'IMALOTO. La branche-mère du fleuve est le MANGOKY qui prend naissance dans le massif de l'IVAKOANY, vers 1 300 m d'altitude.

Sa direction générale est sud-nord, jusqu'à BETROKA. La rivière coule dans une zone relativement basse et marécageuse où de nombreuses rizières ont été aménagées tout le long du fleuve.

Après BETROKA, les contreforts de l'HOROMBE font obliquer le MANGOKY vers l'ouest puis vers le sud-ouest. La pente du lit augmente notablement jusqu'au confluent avec l'IMALOTO, à la traversée de la bordure orientale des Hauts Plateaux (7 m/km en moyenne avec quelques passages à plus de 20 m/km).

L'IMALOTO prend naissance, sous le nom de LALANA, à l'est de BETROKA, dans les contreforts du KALAMBATITRA, vers 1 200 m d'altitude. La LALANA se dirige d'abord vers le nord, puis oblique à l'ouest, et traverse le plateau de l'HOROMBE. A la sortie de ce plateau, elle reçoit en rive droite l'IHAZOFOTSY qui coule à l'est de l'ISALO suivant une direction générale nord-sud.

Après leur jonction, la rivière prend le nom d'IMALOTO et continue à couler vers le sud jusqu'au confluent avec le MANGOKY.

L'IHAZOFOTSY et l'ISOANALA drainent la partie sud du bassin.

A la sortie de l'ISALO, l'ONILAHY coule directement vers l'ouest dans un lit très large encombré de bancs de sable à l'étiage et présentant, surtout dans la dernière partie de son cours, de nombreux méandres. L'ONILAHY se jette dans le canal de MOZAMBIQUE par un estuaire, dans la Baie de SAINT-AUGUSTIN. La traversée des plateaux calcaires se fait avec des pertes d'eau assez importantes dont témoignent les résurgences qu'on peut voir tout le long de la côte, particulièrement à SARODRANO. Dans la zone sédimentaire, les principaux affluents sont la SAKAMARE et la TAHEZA en rive droite, qui, descendant du massif de l'ISALO, ont un débit permanent. Sur la rive gauche, il n'y a pas d'affluent important.

L'ONILAHY mesure 400 km de long depuis la source du MANGOKY. L'IMALOTO et la LALANA parcourent 242 km jusqu'au confluent.

La surface du bassin versant est égale à 32 000 km².

### 6.3.4.2. Les petits fleuves côtiers

Nous ne citerons, du nord au sud, que les plus importants :

- l'ANKOFIA prend sa source au nord de BEFANDRIANA nord, draine un bassin de 2 500 km² et se jette dans la LOZA ;
- la TSINJOMORONA naît dans l'ANALAMONTANA (1 005 m) et se dirige vers le nord-ouest. Elle reçoit sur sa rive gauche la DOROA. Le bassin versant a une surface de 3 980 km². Les deux rivières se jettent par un delta dans la partie supérieure de la LOZA ;

- la SAMBAO descend du seuil de MAHERINERINA et draine la région des dômes de BEKOBAKA. Cette rivière traverse, au nord de BESALAMPY, une zone marécageuse et se jette dans la mer par un delta. La surface du bassin versant est de 6 040 km² et la longueur totale 250 km ;
- la MANAMBAHO draine avec son affluent principal de rive gauche, le BEMARIVO, un bassin de 8 060 km². La longueur de la MANAMBAHO est de 340 km ;
- la MORONDAVA prend sa source dans le massif du MAKAY. A l'aval d'ANKILIZATO, elle traverse la falaise du complexe gréso-marneux par une vallée encaissée, puis s'étale, à la sortie, dans un lit large et très mobile. Au droit de MAHABO, la KABATOMENA est un ancien lit de la MORONDAVA.

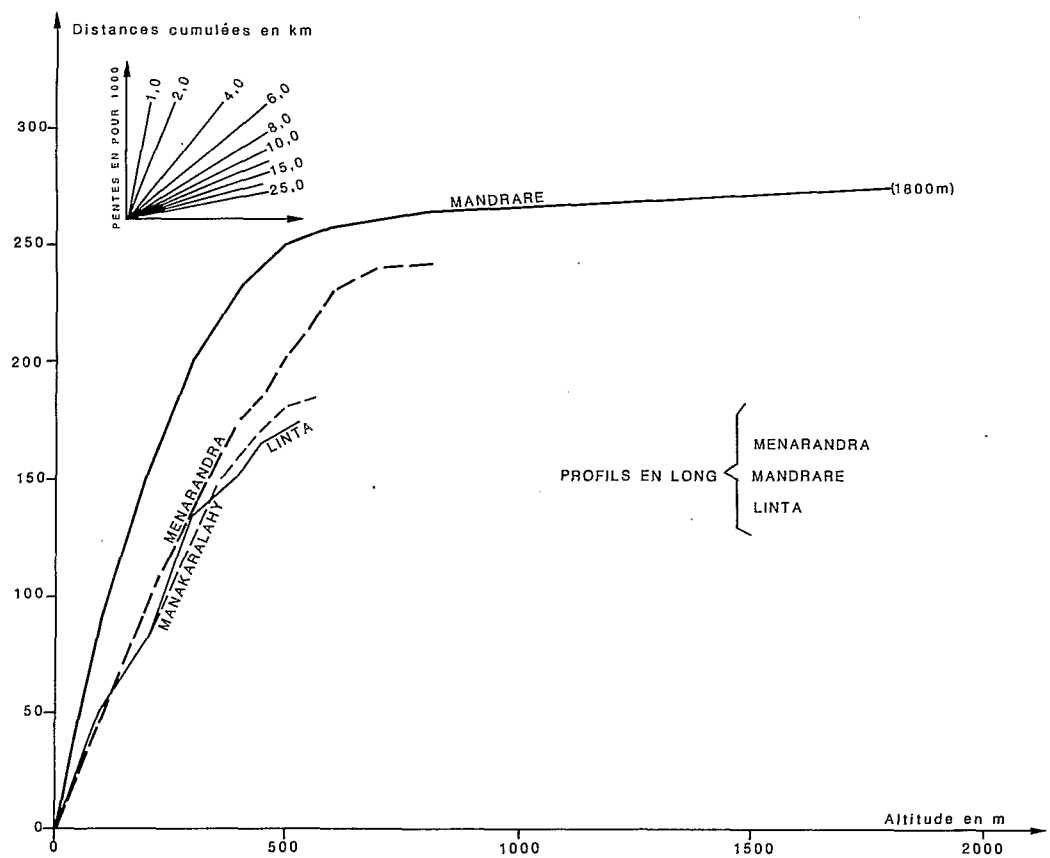
Le bassin versant couvre une surface de 6 400 km², la longueur du cours est de 200 km environ.

- la MAHARIVO descend aussi du massif du MAKAY. Mais son bassin est plus petit que celui de la MORONDAVA, 4 700 km2. En étiage, le cours supérieur est à sec une longue partie de l'année. De la source à la mer, la MAHARIVO mesure 165 km ;
- le FIHERENANA est un fleuve très capricieux descendant du massif de l'ISALO et sujet à de très fortes crues qui inondent parfois TULEAR. Le cours est dirigé vers le sud-ouest. Le FIHERENANA se jette dans la mer en amont de TULEAR dans une zone basse où le lit n'est pas encore stabilisé, après avoir parcouru 200 km environ et couvert 7 600 km².

## 6.3.5. Les versants méridionaux

Ils couvrent une surface de 48 750 km², soit environ 8,2 % de la superficie de MADAGASCAR, et sont entièrement au sud du Tropique du Capricorne (fig. 1.16).

figure 1.16.
Cours d'eau du versant sud




P. Chaperon, J. Danloux, L. Ferry

### 6.3.5.1. Le Mandrare

Entouré à l'est par les chaînes Anosyennes et au nord par le massif de l'IVAKOANY, le bassin du MANDRARE présente une forme circulaire particulièrement caractéristique.

Le MANDRARE prend sa source dans le massif du BEAMPINGARATRA, près du pic TRAFONAOMBY (1 957 m), vers 1 800 m d'altitude. Pendant les premiers kilomètres de son cours, il se dirige vers le nord dans une vallée tectonique étroite et encaissée. Sa pente est forte et son lit coupé de nombreuse chutes et rapides. Un aménagement hydro-électrique a été envisagé dans la région d'ANDETSY.

A la sortie du massif granitique et jusqu'à MAHALY, la direction devient sensiblement est-ouest et la pente diminue notablement (2,5 m/km). La traversée de la chaîne rhyolitique de l'IVOHIBARIA et de l'AMPAHIGOLO à quelques kilomètres en aval de MAHALY, à la cote 200 environ, se fait dans un défilé relativement étroit où un barrage de régularisation a été projeté.

Le MANDRARE descend ensuite vers le sud/sud-ouest jusqu'à IFOTAKA où une coulée volcanique récente le repousse vers le sud/sud-est, en direction de la mer. La pente est faible de l'ordre de 1,3 m/km. Le lit encaissé dans des berges abruptes rend difficile l'utilisation des eaux pour l'irrigation.

C'est la seule rivière Malgache dont le profil en long est aussi régulier et très voisin du profil d'équilibre.

Les principaux affluents sont le MANAMBOLO qui descend du versant ouest du TRAFONAOMBY, se dirige d'abord vers l'ouest, puis vers le nord et se jette dans le MANDRARE, en rive gauche, à quelques kilomètres en amont de MAHALY.

Le deuxième gros affluent de la rive gauche, la MANANARA, prend naissance dans les contreforts sud des chaînes Anosyennes et se jette dans le MANDRARE en amont d'AMBOASARY-sud. Un barrage à BERAKETA permet l'utilisation de ses eaux pour l'irrigation de la plaine de BEHARA.

En rive droite, toute une série de petites rivières drainent le versant sud du massif de l'IVAKOANY, la plus importante est l'ANDRATINA.

La surface du bassin du MANDRARE est égale à 12 570 km² et sa longueur totale à 270 km.

### 6.3.5.2. Le Manambovo

Cette rivière, au bassin relativement petit (4 450 km²), prend naissance au nord d'ANTANIMORA, dans la pénéplaine de l'ANDROY. Sa direction est grossièrement nord-sud. Très rapidement, le MANAMBOVO creuse profondément son lit dans les alluvions. La pente moyenne est assez forte et comprise entre 2,5 et 3 m/km. Pendant sept à huit mois, il n'y a pas d'écoulement superficiel. La longueur totale est de 165 km.

### 6.3.5.3. La Menarandra

C'est, après le MANDRARE, le fleuve le plus important du sud. Elle prend naissance à l'ouest d'ISOANALA dans le massif du TSIKORIKY (1 425 m) vers 800 m d'altitude. Sa direction est d'abord nord-est/sud-ouest, puis nord-sud.

Jusqu'à BEKILY, le lit est barré par des seuils rocheux qui, très souvent, ne sont pas continus.

A BEKILY, elle reçoit en rive gauche, la MANANTANANA. Le débit de ces deux branches peut être nul en saison sèche.

Le principal affluent, celui qui conserve un écoulement permanent toute l'année, est la MENAKOMPY qui se jette, en rive gauche à 30 km en aval de BEKILY.

La MENARANDRA coule vers le sud/sud-est dans un lit large, encaissé dans les alluvions où, à l'étiage, serpente un maigre filet d'eau qui disparaît très souvent en amont d'AMPOTAKA.

Sur la MENARANDRA, les débits d'étiage augmentent régulièrement jusqu'à TRANOROA, puis ils diminuent ensuite de TRANOROA à la mer.

En aval de BEKILY, le lit est coupé par deux seuils rocheux très fissurés, l'un à TRANOROA, l'autre à RIAMBE. Ces accidents ne sont pas visibles sur le profil en long qui présente une forte pente, mais régulière, de l'ordre de 2,50 m/km de la cote 600 m à la mer.

Le bassin versant drainé par le MENARANDRA a une superficie de 8 350 km². Sa longueur totale est égale à 235 km.

### 6.3.5.4. La Linta

Cette rivière, moins bien alimentée, draine un bassin plus petit (5 800 km²), elle présente à la sortie du socle gneissique, un lit très large, complètement sec d'avril à décembre. Elle prend naissance dans la région de FOTADREVO à 520 m d'altitude environ. A l'aval d'EJEDA, elle reçoit en rive gauche ses deux principaux affluents, la MANAKARALAHY et la MANAKARAVAVY, dont les écoulements s'annulent du mois de juillet au mois de novembre.

La LINTA se jette dans la mer à l'est d'ANDROKA après avoir parcouru 173 km.

A quelques kilomètres en amont de l'embouchure, un puits a été creusé à proximité du lit et l'eau de l'écoulement souterrain est pompée par une éolienne pour servir à l'alimentation des troupeaux de la région.

# Facteurs climatologiques

Chapitre 2

## 1. GÉNÉRALITÉS SUR LE CLIMAT DE MADAGASCAR

Par sa position géographique, Madagascar est soumise à l'influence de deux grands centres d'action météorologique qui règlent les conditions générales de circulation atmosphérique dans le sud-ouest de l'Océan Indien : la zone des basses pressions intertropicales au nord et la cellule océanique de hautes pressions centrée en quasi permanence au sud des Mascareignes (H. GERMAIN et A. CHAUSSARD, 1964 ; G. DONQUE, 1975).

Les mécanismes du climat malgache sont également liés aux éléments géographiques : latitude, relief. La conjugaison de ces différents facteurs fait apparaître une très grande variété de climats à l'intérieur de ce petit continent (Ch. ROBEQUAIN, 1958).

Nous examinerons séparément l'influence des mouvements atmosphériques et l'influence des facteurs géographiques.

### 1.1. Influence de la circulation des masses d'air

Les mouvements de masses d'air dans la troposphère au voisinage de Madagascar sont réglés par les deux centres d'action suivants :

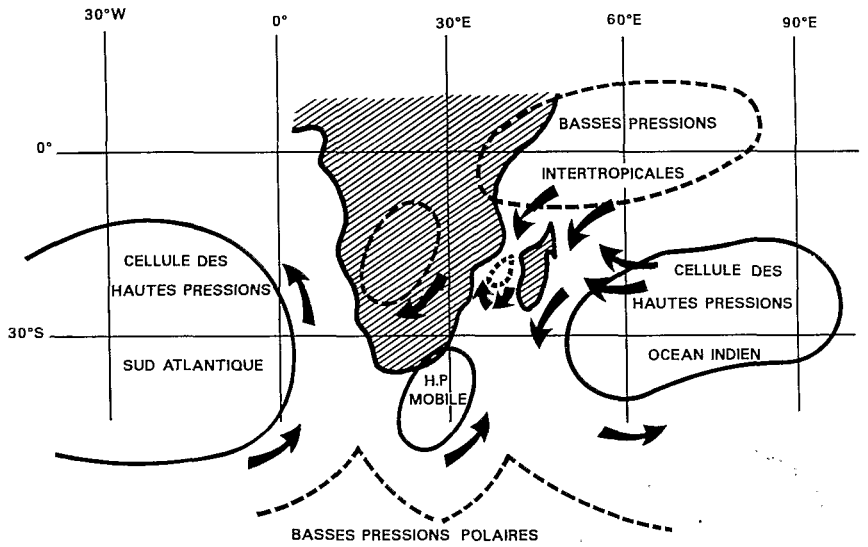
- la zone des basses pressions intertropicales dont le mouvement méridien, lié au déplacement apparent du soleil, particulièrement important à la longitude de Madagascar, entraîne l'alternance des saisons chaudes et saisons fraîches ;
- la cellule océanique semi-permanente de hautes pressions, élément de la ceinture anticyclonique subtropicale dont la position moyenne est située dans le sud de l'Archipel des Mascareignes.

Cette zone de hautes pressions n'est pas continue dans le temps et dans l'espace ; elle est en effet soumise à l'influence du courant de perturbations polaires qui prennent naissance sur la face sud-est de la cellule des hautes pressions atlantiques (anticyclone de Sainte-Hélène) et qui sont souvent suivies d'anticyclones mobiles. Ainsi, la cellule des hautes pressions de l'Océan Indien est affaiblie ou rejetée vers le sud-est par le passage des dépressions ; les arrivées d'air polaire la régénèrent.

La figure 2.1. schématise la situation des centres d'action sur le sud-Atlantique et l'Océan Indien pendant la saison chaude (octobre à avril).

figure 2.1.

Schématisation des principaux centres d'action réglant le temps à Madagascar (saison chaude)




Ces centres d'action dirigent sur Madagascar les vents alizés d'une part et les vents du nord-ouest d'autre part.

Les vents alizés sont des vents de secteur est à est/sud-est qui soufflent toute l'année sur la face équatoriale des hautes pressions de l'Océan Indien. Ils proviennent des masses d'air d'origine polaire méridionale ayant parcouru un long trajet sur des mers de plus en plus chaudes. Cet air présente une humidité relative importante, une température élevée et une instabilité très grande en arrivant sur le relief malgache, ce qui entraîne des formations nuageuses épaisses, un plafond bas et des pluies assez abondantes.

L'action des alizés est la plus puissante et la plus régulière ; les autres masses d'air peuvent la contrarier sans jamais l'effacer complètement.

Les vents du nord-ouest sont observés au nord de la zone des basses pressions intertropicales lorsque celle-ci se trouve sur Madagascar pendant l'été austral.

Ces vents de nord-ouest ont leur origine dans l'hémisphère nord et ne sont autres que les alizés de cette région déviés par la traversée de l'équateur et probablement aussi par le relief africain. Ils sont souvent qualifiés de "mousson de nord-ouest". Ces masses d'air sont très instables, chaudes et humides par suite d'un long parcours sur des mers chaudes. Ces vents du nord-ouest n'ont pas, en saison chaude, la constance de l'alizé en saison fraiche ; on constate une alternance des influences des alizés et des vents du nord-ouest lors des descentes vers le sud, plus ou moins prononcées, de la zone de convergence intertropicale.

Enfin, on observe par intermittence des vents d'ouest sur la partie méridionale de l'île. Ces vents d'ouest sont provoqués par le passage de la partie septentrionale des creux barométriques qui accompagnent la limite antérieure de l'air polaire entrainé par les perturbations du front polaire. Ces vents sont peu persistants, mais provoquent sur les régions méridionales de Madagascar un apport d'air plus frais que celui entraîné par les alizés. L'extension de cet air frais est en général très limitée et ne dépasse que rarement le tiers méridional de la Grande Ile. Il arrive parfois (cas du mois d'août 1961) que l'air froid amené par l'anticyclone méridional soit assez peu dégénéré. On constate alors une baisse très importante des températures sur le sud de l'île, baisse qui peut se manifester assez loin vers le nord dans la mesure où la circulation anticyclonique est suffisamment puissante. Une invasion d'air froid de ce type, en août 1961, a provoqué une des rares, mais importante, chute de neige sur le Pic BOBY dans le massif de l'Andringitra.

## 1.2. Influence des facteurs géomorphologiques

Un autre facteur important du climat de Madagascar est son orographie. Le relief est constitué par une masse montagneuse continue dont les sommets dépassent 2 500 m et dont l'altitude moyenne est comprise entre 1 000 et 1 500 m. Les versants orientaux sont très abrupts et les plaines côtières correspondantes étroites. Par contre, les versants occidentaux sont en pente plus douce, et les plaines ou pénéplaines beaucoup plus larges. Les alizés doivent franchir ou contourner cet obstacle et il en résulte :

- sur les régions orientales, un soulèvement général de l'air humide. Il y a donc formation de nuages orographiques au vent et de précipitations plus ou moins abondantes. On est toutefois amené à distinguer plusieurs régions :

  • au nord du massif du Tsaratanana, une prédominance du secteur est avec accélération des vents et courbure anticyclonique des lignes de courant, ce qui atténue les précipitations (minimum relatif septentrional) ;

  • entre les massifs du Tsaratanana et de l'Ankaratra les vents prennent une orientation de secteur sud-est, ce qui impose une courbure cyclonique aux lignes de courant, donc un accroissement de la convergence au sein de la masse d'air et une recrudescence des précipitations (maximum relatif oriental) ;

  • entre les massifs de l'Ankaratra et de l'Andringitra, une orientation des vents au secteur nord-est et une courbure anticyclonique des lignes de courant s'accompagnant de l'affaiblissement des précipitations (minimum relatif oriental) ;

  • au sud du massif de l'Andringitra, un retour au secteur est avec accélération des vents contournant le massif et courbure cyclonique des lignes de courant ; il y a donc intensification des précipitations (maximum relatif méridional).

- sur les régions occidentales, un mouvement général descendant de l'air après franchissement de la chaîne montagneuse et formation d'une dépression sous le vent. L'air ayant abandonné une partie de son humidité sur les versants au vent et subissant un effet de subsidence est donc asséché et on observe sur ces régions une pluviosité faible et des températures assez élevées (effet de Foëhn).

- le relief exerce aussi son influence :

  • sur les courants de nord-ouest : dans ce régime, le nord-ouest de Madagascar, situé au vent, reçoit des précipitations abondantes et c'est le nord-est de l'île qui subit l'influence de l'air asséché, aux précipitations rares.

  • sur les vents d'ouest méridionaux. C'est ainsi que, lorsqu'une dépression se trouve à proximité sud de Madagascar et dirige sur cette île un courant d'ouest assez fort et épais, il se forme un creux barométrique orographique sur la côte sud-est et il peut arriver qu'un effet de Foëhn important y soit observé.

## 1.3. Les saisons

On distingue deux saisons principales : la saison fraîche, en hiver austral, et la saison chaude. La différence essentielle entre ces deux saisons résulte de l'intervention de la zone de basses pressions intertropicales en saison chaude. Par suite de son influence, les caractères des deux saisons sont bien tranchés ; la saison chau-

de est la saison de l'instabilité orageuse en toutes régions et, parfois, des cyclones tropicaux ; la saison fraîche est celle de la sécheresse dans les régions occidentales et des pluies de stratocumulus dans les régions orientales.

La saison fraîche a lieu d'avril à octobre, la saison chaude couvrant le reste de l'année. Toutefois, la deuxième quinzaine de mars, les mois d'avril et d'octobre constituent des périodes de transition.

### 1.3.1. La saison fraîche

Le seul centre d'action étendant son influence à Madagascar pendant cette saison est l'anticyclone océanique situé au sud des Mascareignes. Il dirige, de façon quasi permanente, sur la grande île, un régime d'alizés humides, d'épaisseur comprise entre 2 000 et 4 000 m surmontés de vents d'ouest subsidents, donc très secs (H. GERMAIN et A. LAPLACE, 1964).

Cette masse d'air tropicale maritime indienne est celle qui est la mieux établie et la plus puissante en saison fraîche. Elle est un peu affaiblie en saison chaude par les autres centres d'action mais son influence ne disparaît jamais totalement. Pendant la saison fraîche, la côte est, les versants correspondants et la partie orientale des plateaux sont soumis à un temps très nuageux, mais subissant fortement l'évolution diurne. Les précipitations ont lieu sous forme de pluies faibles ou modérées sur le littoral et les versants, de crachins sur la partie orientale des plateaux. La limite du temps orageux est grossièrement parallèle à la côte orientale, mais subit des fluctuations zonales en fonction de l'activité des alizés, elle-même liée à l'épaisseur de la couche humide (carte du 4 août 1963) (fig. 2.2.).

Cette situation moyenne est perturbée par les expulsions polaires en direction de l'Equateur. Lorsque celles-ci ont lieu sur la face orientale de l'anticyclone océanique, elles se traduisent sur Madagascar par une augmentation de l'épaisseur de la couche humide, une accélération des vents alizés, une extension vers l'ouest de la zone nuageuse et une intensification des précipitations sur les régions orientales. Il peut même y avoir débordement de ces précipitations sur les régions de l'extrême nord-ouest de Madagascar (Région de Nosy-Bé, Ambanja).

Si l'expulsion se fait en direction de Madagascar, sa limite antérieure s'accompagne d'un creux barométrique dont l'approche se traduit par une diminution de l'épaisseur de la couche humide, une amélioration des conditions atmosphériques sur les régions orientales et un recul vers l'est de la limite de la zone nuageuse. Par contre, dans la hausse du champ de pression consécutive au passage du creux barométrique, le temps s'aggrave à nouveau, l'aggravation débutant dans le sud de l'île et se propageant ensuite vers le nord. On retrouve les conditions décrites précédemment, mais on peut dans ce cas recueillir quelques précipitations dans l'extrême sud-est (cartes du 20 août 1963) (fig. 2.3.).

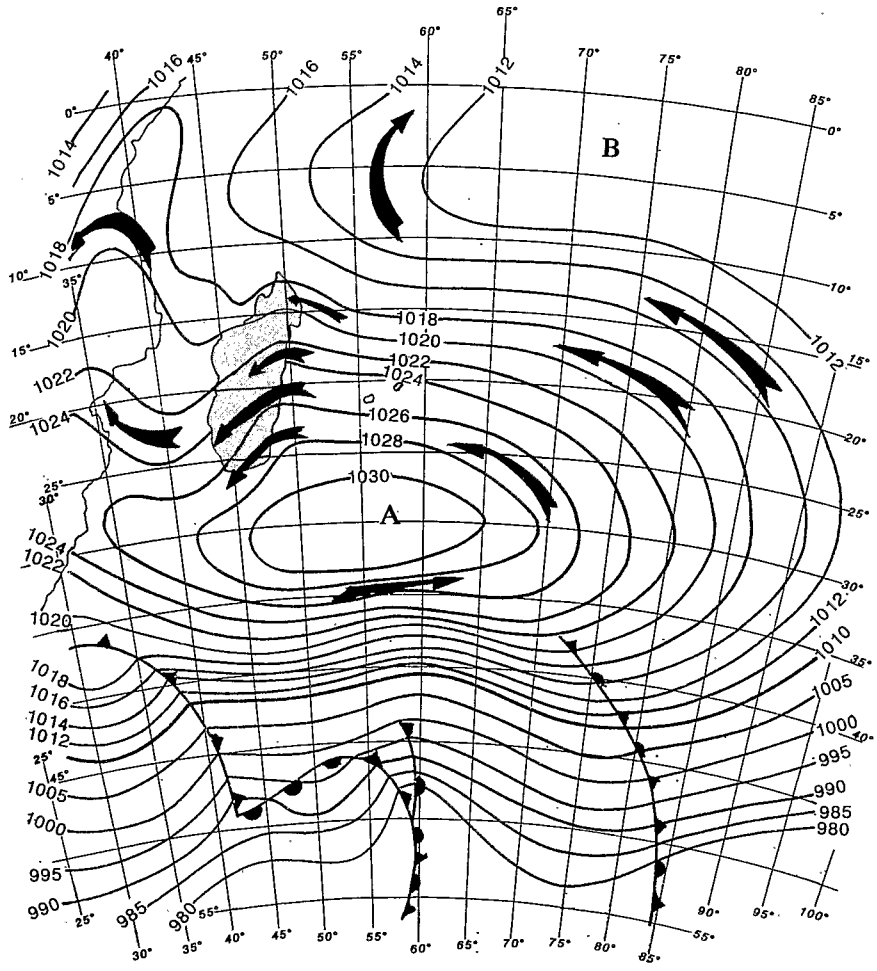
Ces deux situations sont celles que l'on rencontre le plus fréquemment pendant l'hiver austral. Il en existe une très grande variété qu'il est impossible d'examiner en détail dans ce chapitre relatif aux grands traits du climat malgache. Elles ont été parfaitement décrites par Gérald DONQUE et nous renvoyons le lecteur à son étude exhaustive et fort bien documentée (G. DONQUE, 1975).

### 1.3.2. La saison chaude

Pendant la saison chaude, les deux types de temps les plus fréquents sont ceux résultant d'une part, de la descente vers le sud de la zone de convergence intertropicale et d'autre part, des perturbations cycloniques plus ou moins creusées et de faible diamètre sur l'Océan Indien et le canal du Mozambique (cyclones tropicaux).

figure 2.2.

Situation isobarique
le dimanche 4 août 1963
à 06 TU



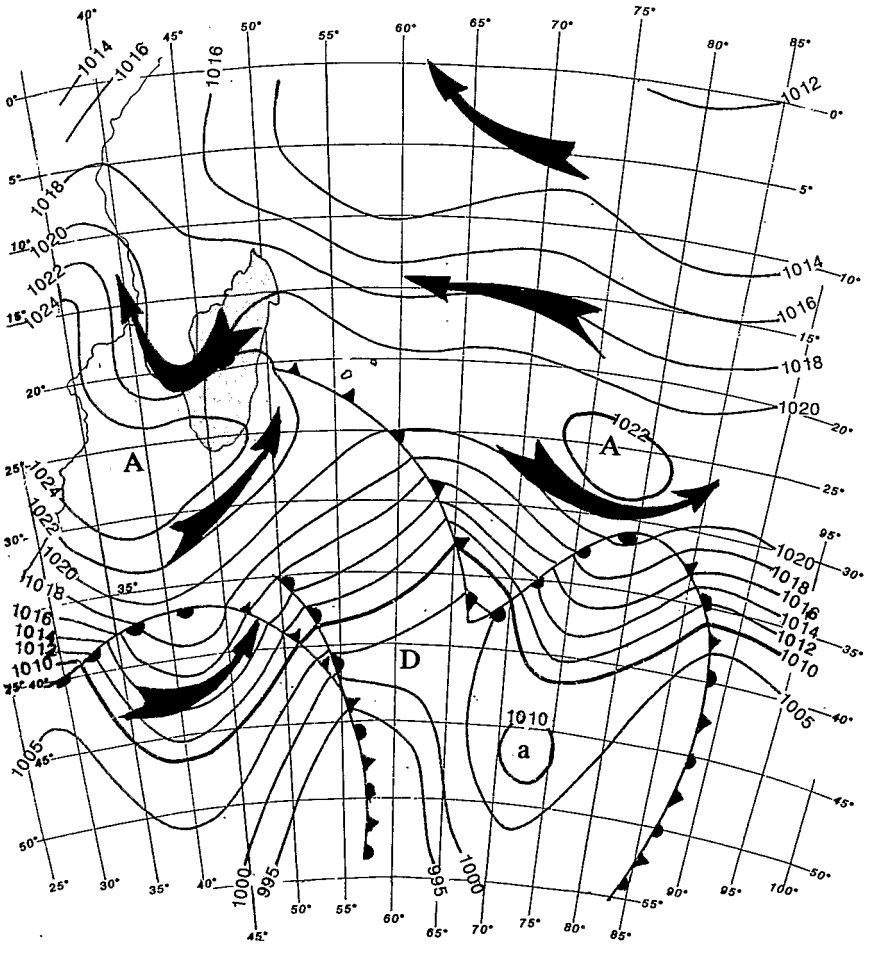

## 1.3.2.1. Zone de convergence intertropicale sur Madagascar

La saison chaude est caractérisée par un affaiblissement de l'anticyclone et l'intervention de la zone de basses pressions intertropicale à Madagascar.

La subsidence dans les couches moyennes observées en saison fraîche a disparu et l'instabilité convective peut se développer en toutes régions. La zone des basses pressions marque, à la latitude de Madagascar, la limite entre le régime de nord-ouest de sa face équatoriale et celui du secteur est de sa face polaire. Il y a donc convergence des deux flux et les mouvements ascendants sont favorisés. L'instabilité orageuse peut se développer et c'est donc la position de la zone de convergence qui en contrôle l'importance à Madagascar. En dehors de cette zone, elle reste en général modérée.

figure 2.3.

Situation isobarique le mardi 20 août 1963 à 06 TU




La position de la zone de convergence intertropicale est sous la dépendance des individus polaires de l'hémisphère sud et de l'anticyclone d'Arabie.

Le passage d'une dépression polaire au sud de Madagascar s'accompagne en général d'un mouvement vers le sud de la zone de convergence et de la zone d'instabilité orageuse qui lui est liée. Par contre, le passage d'une cellule anticyclonique la rejette vers le nord, et les régions orientales sont soumises à un régime d'alizés, d'ailleurs plus instable qu'en saison fraîche. Par contre, l'instabilité est fortement freinée sur les Plateaux.

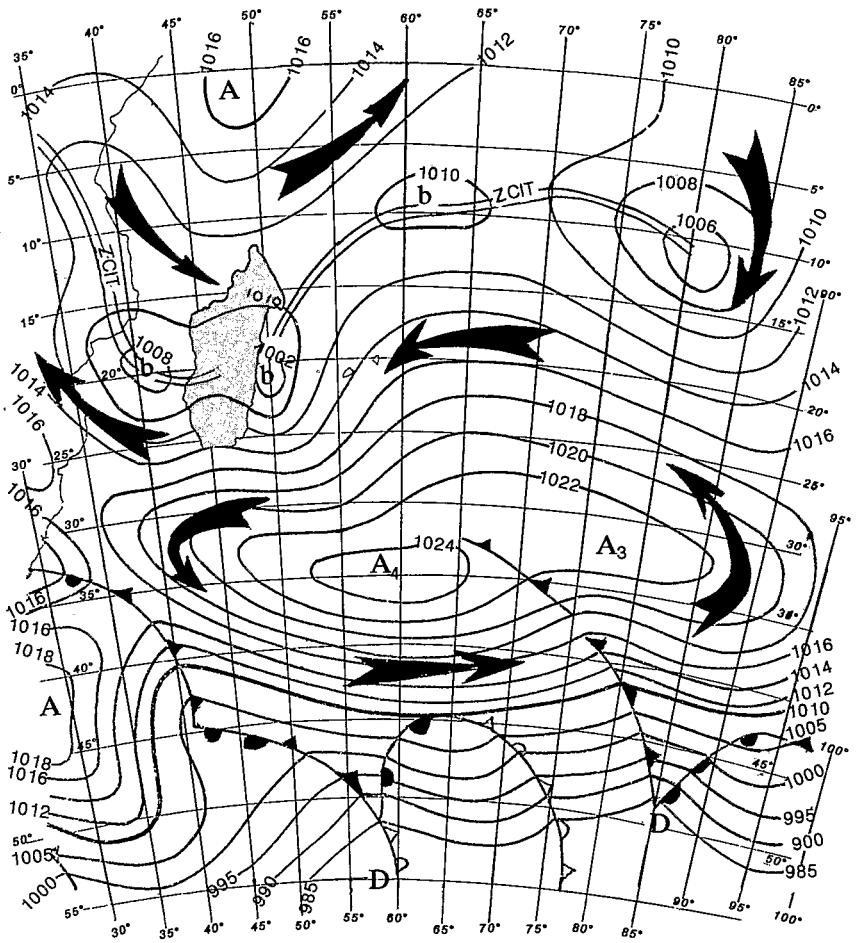
Le renforcement de l'anticyclone d'Arabie s'accompagne souvent d'une accélération du régime de nord-ouest qui se traduit par un mouvement de la zone de convergence vers le sud et un accroissement de l'instabilité orageuse principalement sur le nord-ouest de l'île et des Plateaux. Les orages sont alors très nombreux et souvent violents sur les Comores et le nord-ouest de Madagascar.

L'activité de la zone de convergence sur Madagascar est maximale lorsque la zone dépressionnaire des basses couches est surmontée par une zone de vents faibles, mais présentant une circulation dépressionnaire jusqu'à

des niveaux élevés, 300 millibars, par exemple. Les précipi-tations sont alors très abondantes sur les Plateaux et l'évolution diurne est à peine sensible, par suite de la présence d'une épaisse couche de nuages moyens. La carte de la figure 2.4. donne un exemple de situation isobarique de saison chaude (journée du 4 janvier 1963).

figure 2.4.

Situation isobarique le vendredi 4 janvier 1963 à 06 TU




## 1.3.2.2. Les cyclones tropicaux

Ce sont des perturbations très importantes et très violentes se présentant sous forme de tempêtes dépressionnaires qui intéressent une plus ou moins grande partie de Madagascar durant la saison chaude et y créent, pendant une période de durée variable (une semaine à quinze jours) un type de temps très particulier caractérisé généralement par l'abondance des précipitations.

A son stade de plein développement, un cyclone tropical est visible sur la carte des pressions ramenée au niveau de la mer, sous la forme d'une profonde dépression à isobares grossièrement circulaires et concentriques dont le diamètre peut varier de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres.
Le passage de ces météores sur une station se traduit par un barogramme caractéristique en V, la pression au centre (œil du cyclone) pouvant être très basse. On a ainsi relevé :

| | | |
|---|---|---|
| 932 mb | le 08.03.1973 | à TROMELIN |
| 933 mb | le 29.03.1968 | à RODRIGUES |
| 940 m | le 03.03.1927 | à TOAMASINA |
| 940 mb | le 24.01.1948 | à l'Ilot Avocaire (21 km au S.E. de Saint BRANDON) |
| 942 mb | le 26.02.1960 | à SAINT BRANDON |
| 942 mb | le 26.02.1960 | à MAURICE |
| 950 mb | le 25.03.1959 | à TROMELIN |
| 955 mb | le 10.11.1944 | à SAINT DENIS (Réunion) |
| 960 mb | le 05.02.1950 | à ANTALAHA |
| 961 mb | le 12.02.1943 | à TOAMASINA |

La figure 2.5. montre trois barogrammes caractéristiques enregistrés en février et mars 1959 à Nosy-Bé, Sambava et Tromelin.

Notons que la pression la plus faible observée dans le monde a été relevée lors du passage d'un cyclone tropical sur l'Océan Pacifique : 867 mb (J.P. TRIPLET et G. ROCHE, 1977).

Les vents sont violents et peuvent dépasser 250 km/h en rafales. On a relevé à Rodrigues, le 29 mars 1968, des moyennes horaires de 193 km, avec des pointes à 276 km/h ; à Maurice, le 19 juin 1964, pointes de 220 km/h ; à Morombe, le 25 décembre 1966, 204 km/h ; à Rodrigues, le 23 décembre 1967, 213 km/h.

La violence des vents croît, en général, de la périphérie du météore jusqu'à la proximité du centre ou "œil du cyclone" où l'on constate par contre une absence presque totale de vent (calme central).

D'importantes formations nuageuses accompagnent le cyclone qui, sur les photographies prises par les satellites, présentent l'aspect d'une nébuleuse spirale.

Les précipitations recueillies lors du passage d'un cyclone sont très souvent exceptionnelles :

| | | | |
|---|---|---|---|
| en 24 h | 1870 mm | à CILAOS (Réunion) | le 15.03.1952 |
| en 24 h | 1583 mm | à AURERE (Réunion) | le 07.04.1958 |
| en 24 h | 1688 mm | à BELOUVE (Réunion) | le 28.02.1964. |

Sur Madagascar, les pluies sont beaucoup moins importantes : elles atteignent à peine, 500 à 600 mm en 24 heures. On a recueilli 453 mm le 27 mars 1959 à Mahanoro 337 mm le 19 janvier 1943 à Nosyvarika ; 300 à 450 mm le 6 février 1945 à l'intérieur du triangle Fianarantsoa, Mananjary, Manakara ; 285 mm le 14 février 1946 à Ankazoabo-sud. En cinq jours du 25 au 29 mars 1959, il est tombé 828 mm à Ampasinambo et 790 mm à Nosy Varika. Durant le mois de mars 1959, les précipitations recueillies sur la côte orientale malgache ont dépassé 1 000 mm sur une zone de 500 km de long et une centaine de large (maximum 1 983 mm). Ces pluies persistantes et diluviennes entraînent de graves inondations et causent de très gros dégâts.

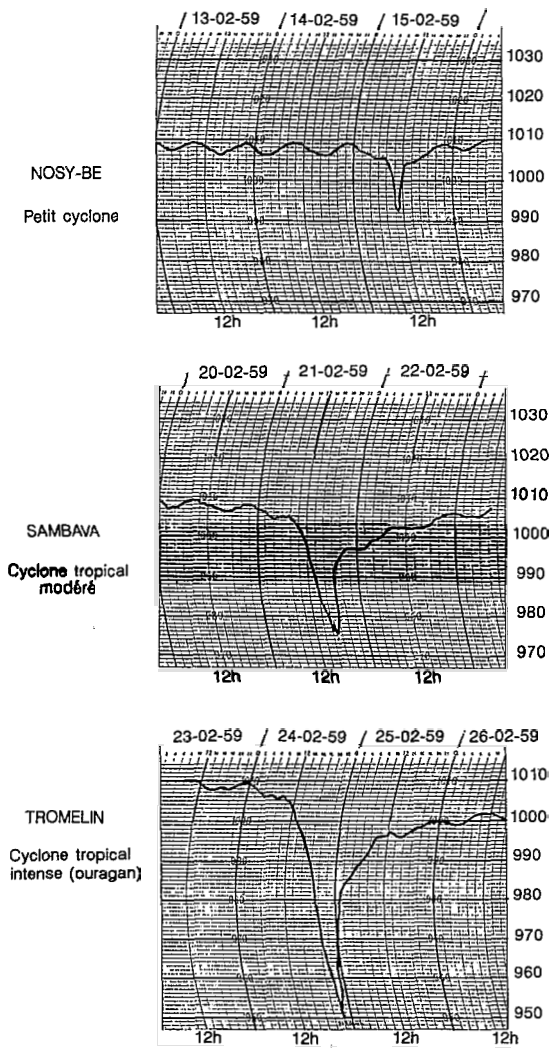
Les cyclones se forment sur les mers chaudes, à une certaine distance de l'Equateur (5 à 7° de latitude) (voir la fig. 2.6). Les conditions nécessaires à leur formation sont :

- une masse d'air chaud et humide d'épaisseur suffisante : cet air se réchauffe au contact de l'eau de l'Océan dont la température en surface est voisine de 26-27 degrés ;

- une perturbation initiale dans les basses couches ;
- une accélération des vents sur une ou plusieurs faces de cette dépression ;
- une répartition des vents en altitude telle que l'air ascendant, par convection dans la dépres-sion, soit évacué à de grandes distances.

figure 2.5.

Barogrammes
de février 1959



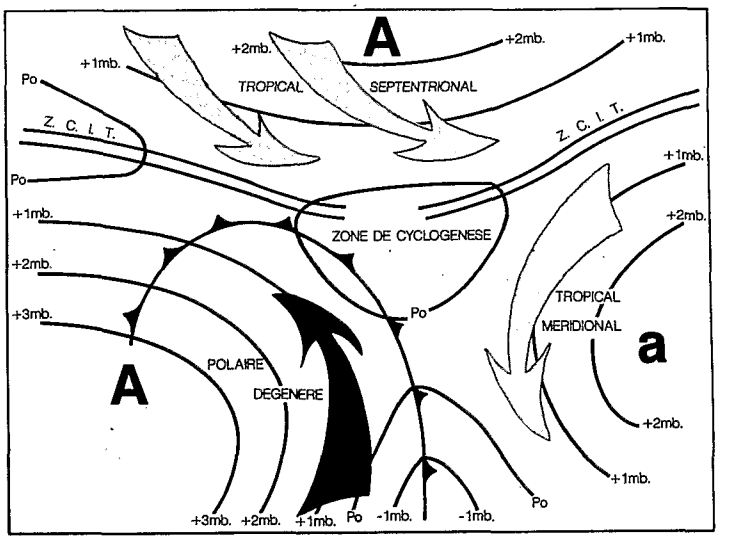

Certains auteurs (voir Ch. ROBEQUAIN, 1958 et G. DONQUE, 1975) prétendent qu'un "jet stream ou aérojet" provenant des couches supérieures froides de la troposphère précèderait le développement du cyclone. Cette théorie est encore difficilement vérifiable par suite du manque de mesures précises, en altitude, au-dessus de l'Océan Indien.

Les cyclones qui intéressent Madagascar se forment dans deux régions principales :

- la partie de l'Océan Indien située au nord-est de la Grande Ile. Ces cyclones prennent un mouvement d'abord dirigé vers l'ouest, puis leur trajectoire s'infléchit et se recourbe pour, finalement, se diriger vers le sud-est et s'éloigner ainsi de nos régions après avoir, ou non, traversé une partie de Madagascar ;
- le canal de Mozambique. Les cyclones sont alors en général plus petits et moins violents. Ils se dirigent la plupart du temps vers l'est et le sud-est et peuvent traverser Madagascar.

figure 2.6.

Cyclone de point triple
Schéma de formation




Le déplacement des cyclones de l'Océan Indien se fait, le plus fréquemment, suivant une direction générale est-ouest, avec une vitesse variable selon les caractéristiques du météore et la phase de son développement. La vitesse moyenne est de l'ordre de 20 km/h avec parfois des arrêts dans le déplacement qui peuvent durer un ou plusieurs jours.

La violence des vents faiblit rapidement dans un cyclone tropical arrivant sur terre, mais les précipitations deviennent très abondantes. Le cyclone peut retrouver sa force lorsque, après un parcours terrestre, il arrive de nouveau sur une mer chaude.

Au cours des cinquante saisons chaudes de 1911 à 1960, Madagascar a subi l'influence de deux cent une perturbations tropicales ayant le caractère de cyclones plus ou moins forts et plus ou moins vastes. Il se répartissent ainsi : un en octobre, onze en novembre, vingt-six en décembre, cinquante et un en janvier, cinquante-six en février, trente-huit en mars, seize en avril, un en mai et un en juin.

La carte (figure 2.7.) donne la situation isobarique du mercredi 25 mars 1959 à 6 h 00. TU au moment où un fort cyclone tropical atteint la cote nord-est de Madagascar.

Les cartes des figures 2.8. et 2.9. montrent quelques trajectoires de ces météores.

D'après G. DONQUE (1975) sur les six cent quatre-vingt quatorze cyclones enregistrés de 1849 à 1972 formés sur l'Océan Indien, cent cinquante-cinq (soit 22,3 % de l'ensemble) ont touché les côtes malgaches. La répartition par secteurs côtiers est la suivante :

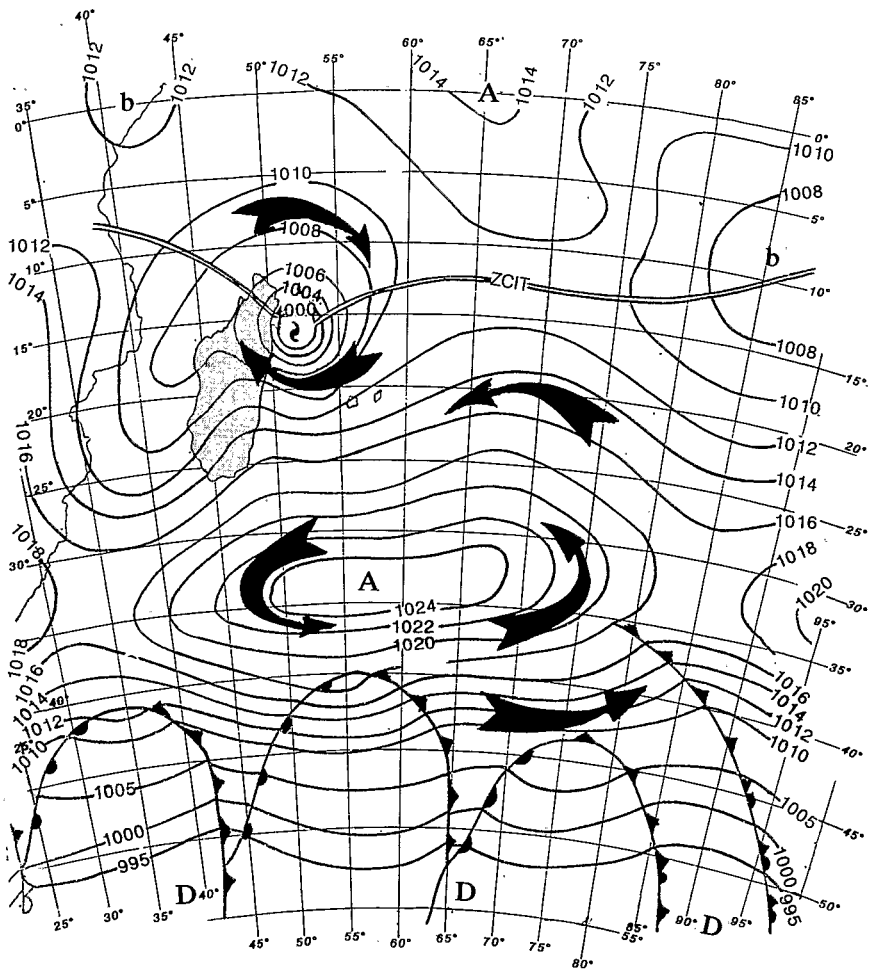
- 59 cyclones ont abordé entre Antsiranana et le Cap Masoala ;
- 46 entre la baie d'Antongil et Mahanoro ;

- 49 entre Mahanoro et Farafangana ;
- 50 entre Farafangana et Tôlanaro.

Il semble donc que la totalité de la cote orientale malgache ait, du nord au sud, une probabilité à peu près égale de recevoir un cyclone venant de l'Océan Indien avec toutefois un risque légèrement plus grand pour la partie nord de l'île.

figure 2.7.

Situation isobarique
le mercredi 25 mars 1959
à 06 TU

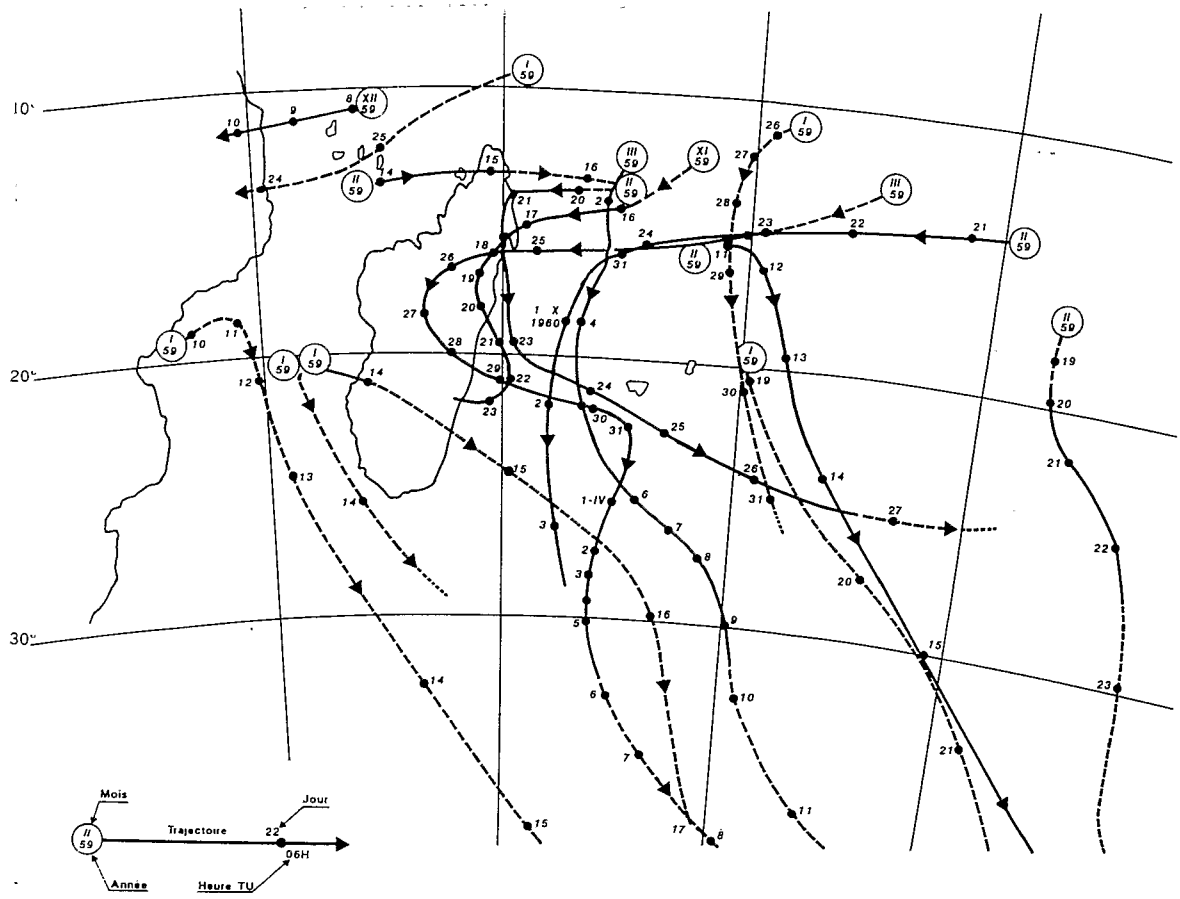



## 1.3.3. Les intersaisons

Le passage d'une saison à l'autre se fait progressivement par une période de transition plus ou moins longue, l'intersaison durant laquelle on retrouve alternativement les caractéristiques de la saison fraîche ou chaude. C'est ainsi qu'en septembre-octobre, époque où l'on passe de la saison fraîche à la saison chaude, des périodes de "temps d'alizés" séparent les périodes d'instabilité. Toutefois, l'instabilité orageuse fait son appa-

figure 2.8.

Trajectoire des perturbations et cyclones tropicaux du sud-ouest de l'océan indien




rition d'abord au voisinage des massifs montagneux du nord (Tsaratanana) puis du centre (Ankaratra), avant de se faire sentir sur les autres régions moins élevées.

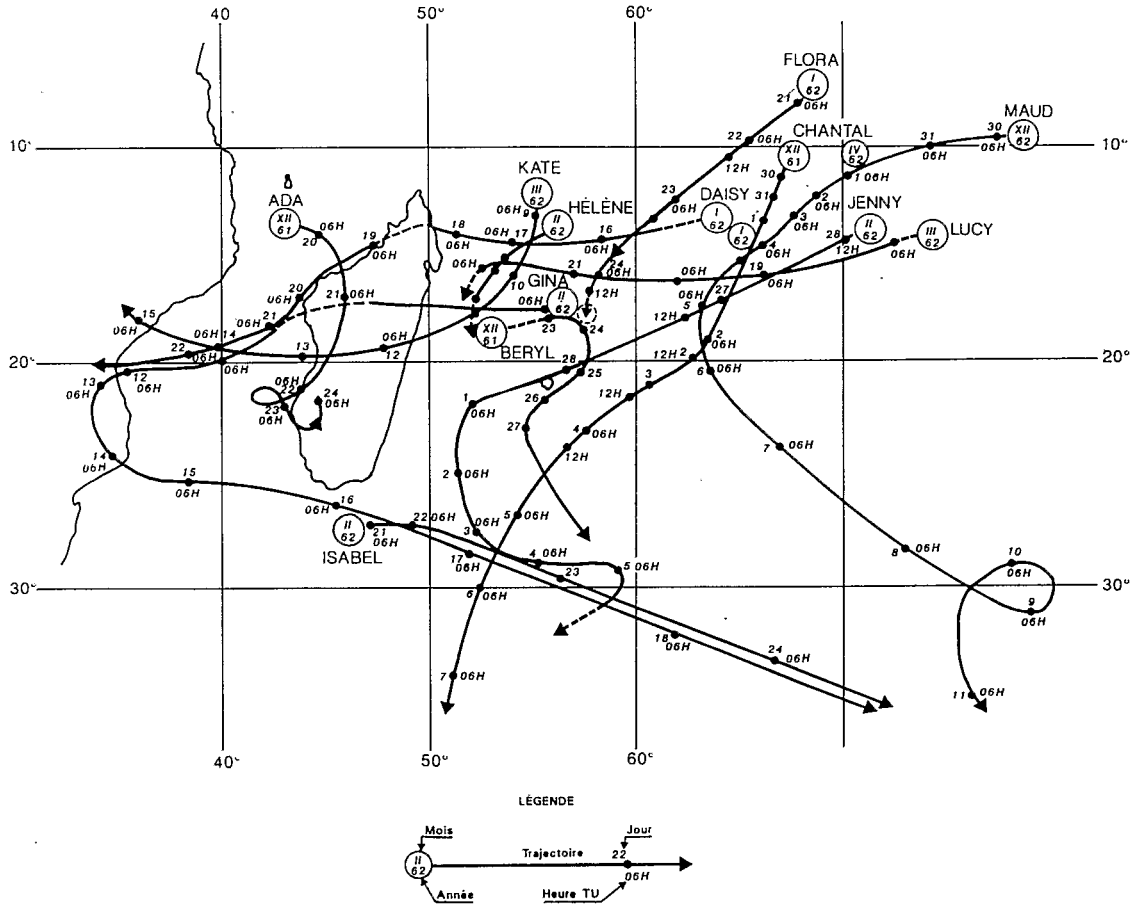
Les orages ont lieu en fin d'après-midi ou début de nuit et sont suivis de pluies d'étalement pendant la nuit particulièrement dans le nord-ouest. C'est durant cette période qu'on observe les orages les plus violents sur les hautes terres centrales.

Au cours de la transition saison chaude-saison fraîche (avril-mai), on observe les derniers orages sur les massifs montagneux de l'Ankaratra et du Tsaratanana.

Avant de donner un aperçu des différentes régions climatiques malgaches, nous examinerons rapidement les paramètres (vent, température, évaporation, précipitations) qui interviennent pour caractériser les climats.

figure 2.9.

Trajectoires des perturbations et cyclones tropicaux du sud-ouest de l'océan indien



# 2. LES VENTS

La circulation atmosphérique qui vient d'être examinée dirige donc, sur Madagascar, deux grands courants principaux : le courant d'est et le courant de nord-ouest. Ce schéma général se complique un peu par la superposition de mouvements de masses d'air provoqués, soit par la position de la zone de convergence intertropicale, soit par le relief de l'île, soit par les variations diurnes de température créant des vents locaux et régionaux dans l'intérieur des terres comme sur le littoral (brises de mer et brises de terres).

## 2.1. La direction des vents

C'est en saison fraîche, par suite de la présence de la cellule de hautes pressions de l'Océan Indien, que la direction générale des vents est la mieux établie. Les vents (alizés) s'écoulent en direction de l'est en tournant en sens inverse des aiguilles d'une montre autour de l'anticyclone, ce qui donne sur le versant oriental, au nord, des vents de secteur est et au sud des vents de secteur nord-est. Mais la présence du relief malgache modifie la direction des vents au sol : le long du versant nord-est, les vents sont déviés vers le nord tandis que le long du versant sud, ils sont déviés vers le sud. En altitude, les vents sont peu perturbés par le relief et conservent donc leur direction initiale est-ouest.

Ceci est confirmé, par l'examen de la figure n° 2.10. présentant pour quelques stations, la direction des vents pendant la saison fraîche sur des roses à huit directions. Toutes les stations de la cote est (sauf Toamasina) ainsi que les stations des hautes terres, présentent un maximum de vents de composantes est, nord-est ou sud-est selon la latitude. La rose des vents de Toamasina présente en toute saison mais particulièrement en saison fraîche, un maximum de fréquence dans les secteurs sud-ouest, ouest et sud ; ceci est probablement dû au fait que l'on enregistre à cette station la résultante des brises (mer ou terre) et des vents synoptiques.

En saison chaude, les vents de secteur est sont moins réguliers et moins actifs qu'en saison fraîche. De plus, la descente vers le sud de la zone de convergence intertropicale amène des vents de secteur nord-ouest qui présentent certains caractères de l'alizé, en particulier la persistance nocturne. Les roses des vents de saison chaude portées sur la figure 2.11. montrent que l'influence des vents de nord-ouest est nette en saison chaude pour quelques stations du littoral ouest (Mahajanga particulièrement), mais que pour les autres stations, les vents semblent venir à peu près également de toutes les directions. Ceci est dû à l'influence des brises de terre et des brises de mer provoquées par la dépression thermodynamique existant sur la terre pendant la journée et sur la mer au cours de la nuit. La brise marine se manifeste sur le littoral, mais aussi à l'intérieur des terres par suite des conditions topographiques : elle emprunte les grandes vallées orientées ouest-est. Ce phénomène est bien connu des pêcheurs VEZO qui utilisent la brise de mer pour remonter à la voile, assez loin à l'intérieur des terres, les grands fleuves se jetant dans le canal de Mozambique.

D'autre part, ces graphes montrent sur les stations des plateaux et de la côte orientale une légère augmentation des vents de secteur ouest et nord-ouest, mais les vents de secteur est, sud-est et nord-est (suivant la latitude) sont toujours dominants.

figure 2.10.

Fréquence et directions des vents en saison fraîche

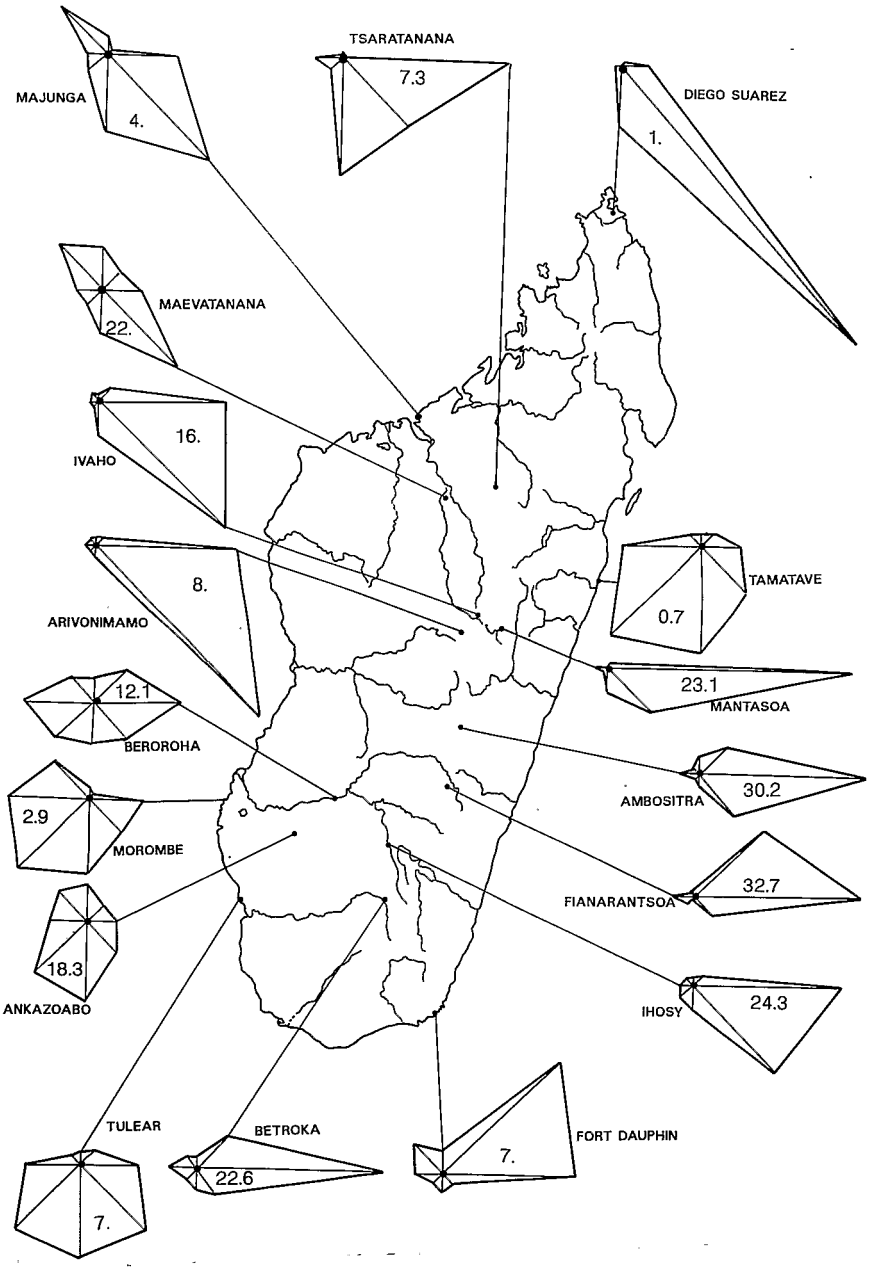
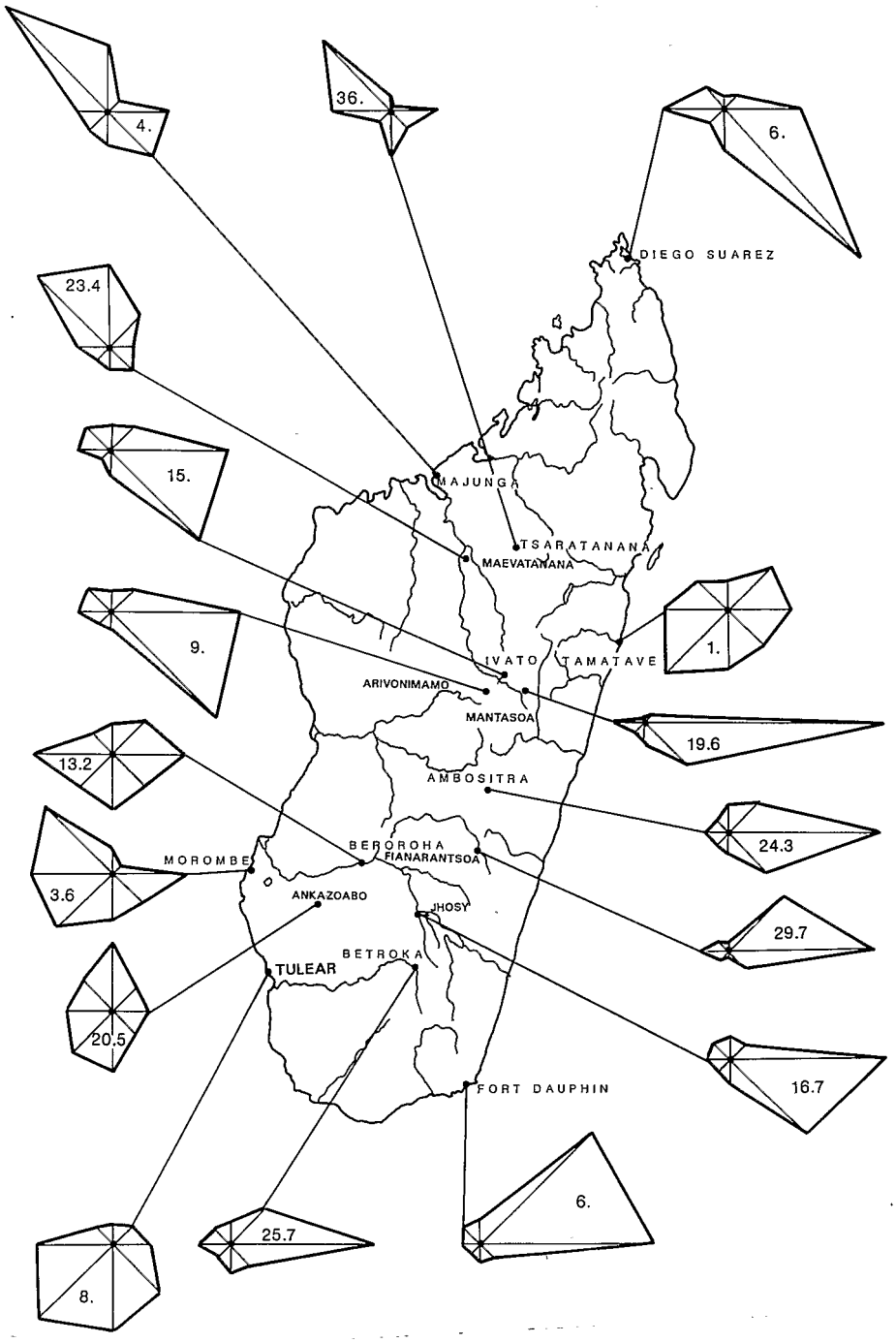


figure 2.11.

Fréquence et directions des vents en saison chaude



## 2.2. La vitesse des vents

Bien plus que la direction, la vitesse du vent est un paramètre complexe très largement affecté par les facteurs locaux.

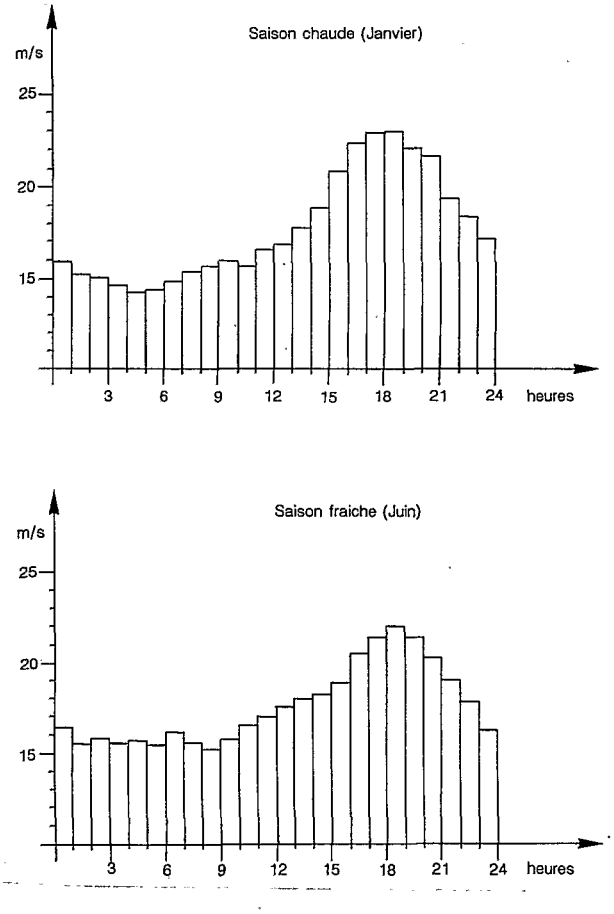
Quelle que soit la région et la saison, la vitesse du vent au voisinage du sol est plus grande le jour que la nuit. Cette vitesse augmente au cours de la matinée, atteint son maximum dans l'après-midi et décroît ensuite pendant la nuit. Sur les hautes terres, les vents de secteur est sont renforcés au cours de la journée par les appels d'air des centres thermodynamiques de l'ouest et leur vitesse augmente jusqu'à la disparition, au cours de la nuit, de ces centres de basses pressions (voir fig. 2.12. donnant la variation diurne de la vitesse du vent au sol en juin et en janvier à Antananarivo).

Les orages qui se produisent généralement en fin d'après-midi, contribuent également à renforcer la vitesse du vent qui souffle alors par rafales pouvant être assez violentes (vitesse supérieure à vingt cinq nœuds).

Il faut noter enfin que les vents les plus violents sont toujours observés pendant les passages des cyclones ; nous avons donné dans le chapitre relatif à ces météores, quelques vitesses maximales observées à Madagascar et à quelques postes de l'Océan Indien.

figure 2.12.

Variation diurne de la vitesse de vent au sol à Tananarive



## 2.3. Les régimes des vents

Pour conclure sur le régime des vents, on peut faire quelques commentaires sur les graphes obtenus à partir des observations aux stations portées sur les cartes n° 2.10. et 2.11.

### 2.3.1. Le long de la côte orientale

On constate le long de la côte orientale :

- à Antsiranana, les vents dominants sont de direction sud-est en toute saison : plus de 75 % des cas en saison fraîche et environ 40 % en saison chaude. On constate en saison chaude, une nette augmentation des vents du secteur ouest, nord-ouest et est. En saison fraîche, les vents de secteur sud-est sont très forts : vingt nœuds en moyenne atteignant quarante à cinquante nœuds vers 14 heures. Ils sont plus faibles en saison chaude : cinq à dix nœuds de moyenne, le maximum de vitesse étant observé avec les vents d'ouest, environ vingt nœuds ;

- à Toamasina, on observe en toutes saisons la résultante des brises (terre et mer) et des vents synoptiques ; ce qui donne, pendant la saison fraîche, des vents de secteur sud-ouest le matin (dix à quinze nœuds), sud l'après-midi (quinze à vingt nœuds) avec des rafales pouvant atteindre trente-cinq nœuds et pendant la saison chaude des vents de sud-ouest le matin, mais un peu plus faibles (huit à dix nœuds), nord-est l'après-midi (dix à quinze nœuds) avec parfois des rafales sous les orages ;

- à Tôlanaro, dans l'extrême sud, les vents dominant durant toute l'année sont de secteur est à nord-est : 25 à 30 % des cas dans les deux directions, mais pendant la saison chaude la fréquence des vents de secteur est dépasse 35 %.

En saison fraîche, les vents d'est et nord-est peuvent atteindre en moyenne quinze à vingt cinq nœuds avec des rafales atteignant cinquante nœuds l'après-midi (vents thermiques soumis à l'évolution diurne). En saison chaude, les vitesses sont un peu plus faibles, de l'ordre de huit à quinze nœuds dans le secteur est et nord-est.

### 2.3.2. Sur la bordure de la falaise orientale

En bordure de la falaise orientale et sur quelques stations à l'est des hautes terres :

- à Mantasoa, les vents d'est dominent en toutes saisons dans plus de 50 % des cas. Toutefois, un très léger renforcement des vents d'ouest est observé en saison des pluies ;

- à Ivato et Arivonimamo en toutes saisons, vents dominants du secteur est à sud-est. Renforcement des vents d'ouest et nord-ouest, en saison chaude, plus sensible que sur la bordure immédiate de la falaise orientale. Comme partout ailleurs, on a des rafales d'orages en saison chaude ;

-à Ambositra, Fianarantsoa, Ihosy et Bétroka, prédominance des vents d'est en toutes saisons. On a, suivant les stations, un pourcentage du même ordre dans les secteurs nord-est (Fianarantsoa) ou sud-est (Ihosy). Les répartitions des vents à ces stations sont en toutes saisons assez semblables à celles de Mantasoa.

Elles doivent être représentatives de toute la bordure orientale des hautes terres, à quelques variantes près dues à la latitude.

## 2.3.3. A l'ouest des hautes terres

A l'ouest des hautes terres, la forme de la rose des vents est nettement dépendante de la latitude :

- à Tsaratanana, on note une nette dominance des vents de secteur est, sud-est et sud en saison fraîche, nord-ouest et ouest pendant la saison chaude, la dominance des vents d'est a disparu ;

- à Maevatanana, on voit déjà l'influence des brises de terre et de mer de directions dominantes, sud-ouest le matin, nord-ouest l'après-midi, en saison fraîche. En saison chaude, il semble que les vents synoptiques de nord-ouest soient prépondérants accompagnés d'une augmentation assez nette dans le secteur nord ;

- les stations de Beroroha et Ankazoabo, dans le sud-ouest, enregistrent en toutes saisons une fréquence à peu près égale de vents de secteur est et ouest pour la première et une répartition à peu près égale dans toutes les directions, avec toutefois une légère prédominance du secteur nord en saison chaude et sud en saison fraîche pour la seconde.

Il semble donc que les brises de terre et de mer, en remontant le Mangoky se font sentir jusqu'à Beroroha. La répartition des vents à Ankazoabo pourrait être due à la situation de la station et à l'influence des vents locaux.

## 2.3.4. Le long du canal du Mozambique

Le long du canal du Mozambique, le vent, aux différentes stations, résulte essentiellement de l'action des brises de terre et de mer :

- à Mahajanga, en saison fraîche, vents de secteur est à sud-est le matin, dix à vingt nœuds, tournant au secteur ouest l'après-midi, cinq à dix nœuds, puis retour à sud-est dans la nuit. En saison chaude, même répartition avec des pluies un peu plus faibles le matin, légèrement plus fortes le soir avec rafales sous les orages. Les vents synoptiques augmentent les fréquences dans le secteur sud-est en saison fraîche et dans le secteur nord-ouest, en saison chaude ;

- Morombe, située au sud du delta du Mangoky subit un régime assez semblable avec vents de sud-ouest l'après-midi, sud à sud-est le matin. On observe aussi, en saison chaude, un renforcement des vents de nord-ouest. La vitesse des brises de terre est généralement inférieure à dix nœuds alors que les brises de mer peuvent atteindre vingt à vingt cinq nœuds ;

- à Toliara, les vents de secteur sud dominent en toutes saisons, 40 % des cas en saison fraîche, 36 % en saison chaude. En saison fraîche, les brises de mer (ouest à sud-ouest) et brises de terre (est à sud-est) présentent, à quelques points près, les mêmes fréquences. En saison chaude, on observe une diminution des vents de secteurs est et sud-est avec un léger renforcement du secteur ouest et sud-ouest.

Un facteur non négligeable pour les phénomènes hydrologiques (évaporation en particulier) est le nombre de jours sans vent (calmes). L'examen des roses des vents montre que ce nombre est minimal sur la côte est avec 1 à 2 % de calmes, de l'ordre de 3 % sur la côte ouest à Morombe.

Ceci indique donc que les cotes malgaches sont en quasi permanence soumises à des vents plus ou moins forts. Le plus grand nombre de jours sans vent est enregistré sur les hautes terres où l'on relève à certaines stations 30 à 35 % de calmes.

# 3. LES TEMPÉRATURES

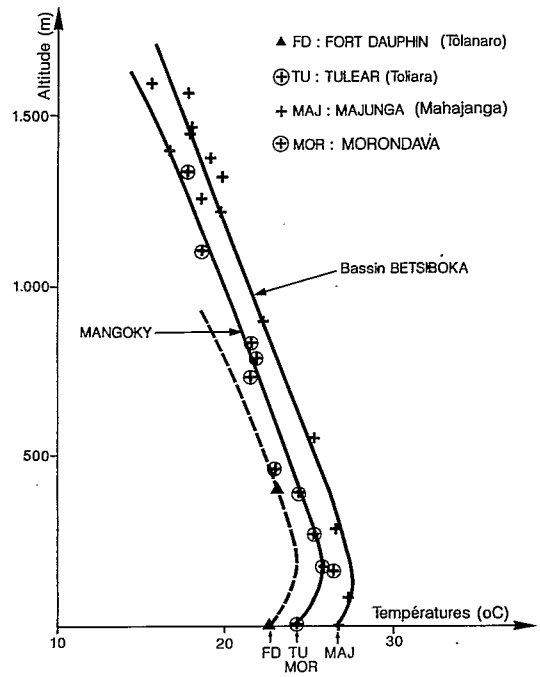
Les températures à Madagascar, sont soumises à des influences très diverses et, contrairement à ce qu'on pourrait penser à première vue, ce n'est pas la latitude, mais l'altitude qui constitue le facteur prépondérant.

En effet, comme le montre la carte n° 2.13. (cf. p. 87) du nord au sud, l'écart en latitude des températures moyennes annuelles n'est que de 3° environ : 25°8 à Antsiranana contre 23° à Tôlanaro.

Par contre, en reportant sur le graphe n° 2.14. pour quelques stations des bassins de l'Ikopa, Betsiboka et du Mangoky, les températures moyennes annuelles en fonction de l'altitude, on constate une différence de près de 13° entre les valeurs observées sur le littoral ou à proximité et celles relevées en altitude.

figure 2.14.

Variation des températures moyennes annuelles en fonction de l'altitude




La station de Nanokely située dans l'Ankaratra à 2 100 m d'altitude, enregistre une température moyenne de 14°1, alors qu'à Maevatanana considéré comme un des points les plus chauds de l'île, on note 27°5. Ce graphe montre également que le gradient des températures est compris entre 0°6 et 0°8 pour chaque élévation de 100 m, sauf à proximité de la côte ouest, où l'influence de la mer provoque une baisse des températures assez nette aux stations du littoral.

On constate également en examinant la carte des isothermes moyennes annuelles (fig. 2.13.) que la température moyenne est toujours plus basse sur la côte orientale, entre le tropique du Capricorne et la latitude de Nosy-be : les stations de l'ouest accusent deux à trois degrés de plus que les stations de l'est. Certains auteurs y voient là une conséquence de la continentalité, le canal de Mozambique, mer chaude et de faible étendue, n'ayant pas un pouvoir modérateur aussi marqué que l'Océan Indien (G. DONQUE, 1975).

Sur cette carte, l'effet de l'altitude se dessine d'une façon particulièrement nette malgré le faible nombre de stations de mesures sur les hautes montagnes. Sur le Tsaratanana, la plus haute station accuse une température moyenne annuelle de 19°4, mais il est bien évident que sur les sommets cette température doit être nettement plus faible, de l'ordre, probablement d'une dizaine de degrés. Sur l'Ankaratra, grâce à la station de Nanokely, on peut esquisser l'isotherme 14°, mais là aussi, sur les hautes cimes avoisinantes, on doit avoir des températures encore plus basses. Pour l'Andringitra, dont l'étendue à haute altitude est nettement plus faible, on ne descend probablement pas en-dessous de 12 à 13°. Même le petit massif de la Montagne d'Ambre est vraisemblablement soumis à des températures moyennes assez basses de l'ordre de 13 à 14°.

Les graphes de la figure 2.15. donnant la répartition des températures mensuelles au cours de l'année montrent que :

- la moyenne des températures maximales oscille entre 26 et 33° (33°,3 à Maevatanana) sur la côte ouest dans le sud, le versant ouest et aussi sur la côte est. Notons, cependant une diffé-rence entre le versant occidental et le versant oriental pour la date du maximum : le plus souvent février, quelquefois janvier ou mars sur la côte est, novembre ou octobre sur l'ouest avec toutefois, sur la côte nord-ouest, un deuxième maximum en avril sensiblement du même ordre que celui d'octobre-novembre. Sur le littoral sud-ouest et l'extrême sud, le mois le plus chaud semble être février. Sur les hautes terres centrales, les températures maximales moyennes annuelles ne dépassent que très rarement 23° et restent même à certaines stations d'altitude, inférieures à 20°. Les dates les plus fréquentes pour le maximum mensuel sont décembre et janvier ;
- si l'on examine les moyennes mensuelles des températures minimales, on remarque qu'en toutes régions, sauf sur la côte est, le mois le plus froid est le mois de juillet. Mais cette fraîcheur est très relative puisque la moyenne des températures minimales est de l'ordre de 25° dans l'ouest, 18 à 20° dans le sud et le sud-ouest, et 13 à 15° sur les hautes terres centrales ;
- sur les graphes donnant les variations mensuelles des températures, sont indiquées, en plus des moyennes (max, min, annuelle) les valeurs maximales et minimales observées.
- sur les graphes de la figure 2.15., qui ne prend en compte que vingt huit stations, on note que la plus forte valeur est observée à Ampanihy avec 42°6 et la plus faible à Ambositra avec - 0°3.

Mais cet échantillon ne donne pas les valeurs extrêmes maximales et minimales relevées dans l'île. D'après une note ronéotypée de la météorologie malgache, on peut retenir pour les différentes régions, les valeurs extrêmes suivantes :

| | |
|---|---|
| - Côte est : | 36°8 à Antsiranana et 36°5 à Toamasina (décembre 1936 et janvier 1953)<br>11°3 à Toamasina (juin 1964) et 8°8 à Tolanaro (août 1966) |
| - Hautes terres : | 40°0 à Betroka en novembre 1955<br>- 8°5 à Nanokely en juillet 1963 et août 1964 |
| - Nord-ouest : | 45° à Ambilobe en novembre et décembre 1928<br>10°5 à cette même station en juillet-août 1964 |
| - Côte sud-ouest : | 40°4 à Toliara en février 1962<br>5°1 à Morombe en août 1948 |
| - Extrême sud : | 46°5 à Tranoroa en novembre 1936<br>2°0 à Ampotaka en juin 1961 |

L'influence de la latitude intervient dans la répartition des températures maximales au cours de l'année, dans les diverses régions de l'île. En effet, suivant la position des stations, le graphe des moyennes mensuelles des températures maximales présente deux formes différentes.

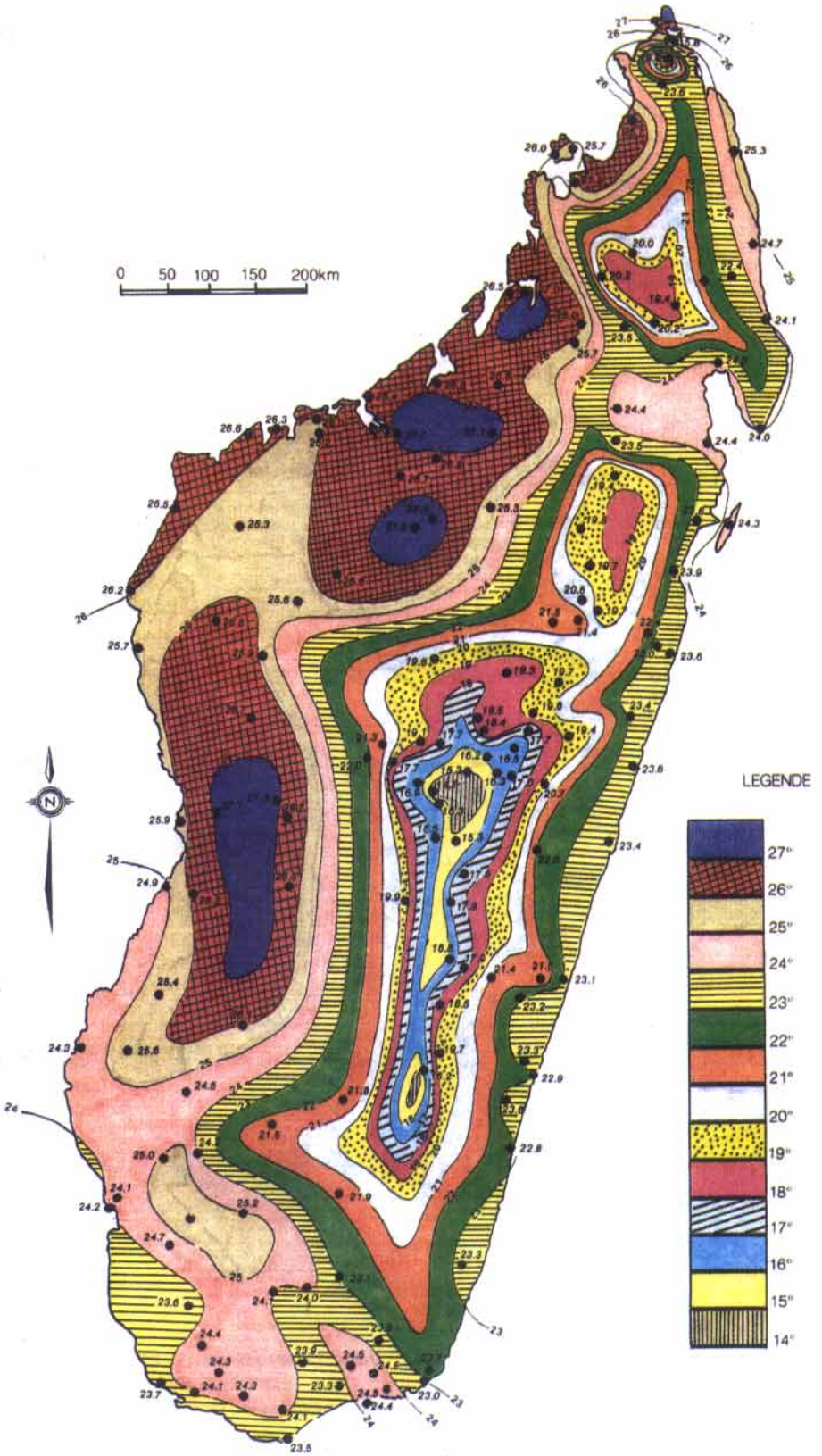



figure 2.13.

Températures moyennes interannuelles (d'après les relevés du service météorologique en °c et 1/10

P. Chaperon, J. Danloux, L. Ferry

figure 2.15.

Carte de situation des stations climatologiques

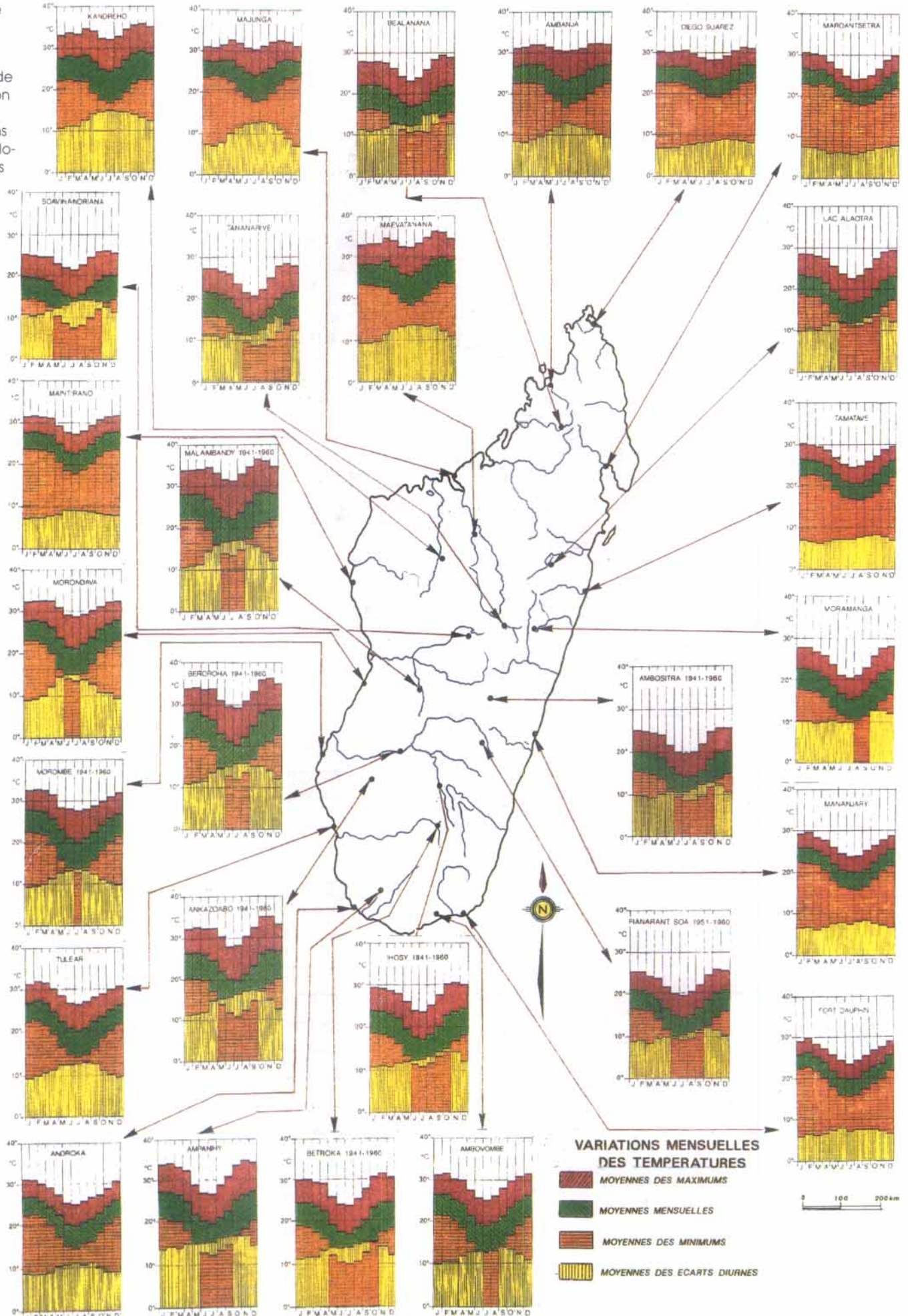


figure 2.16.

Variations mensuelles de l'humidité relative

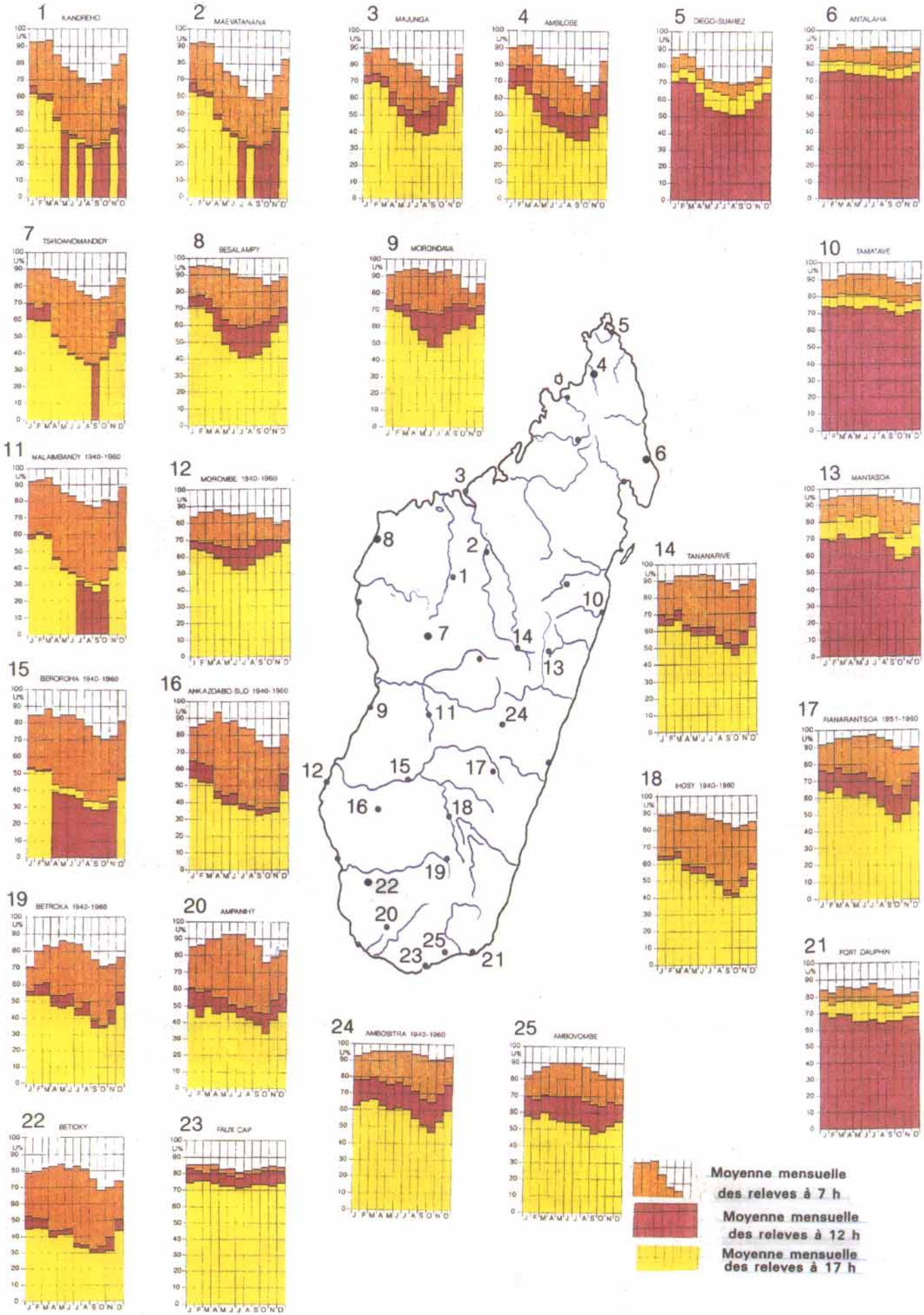
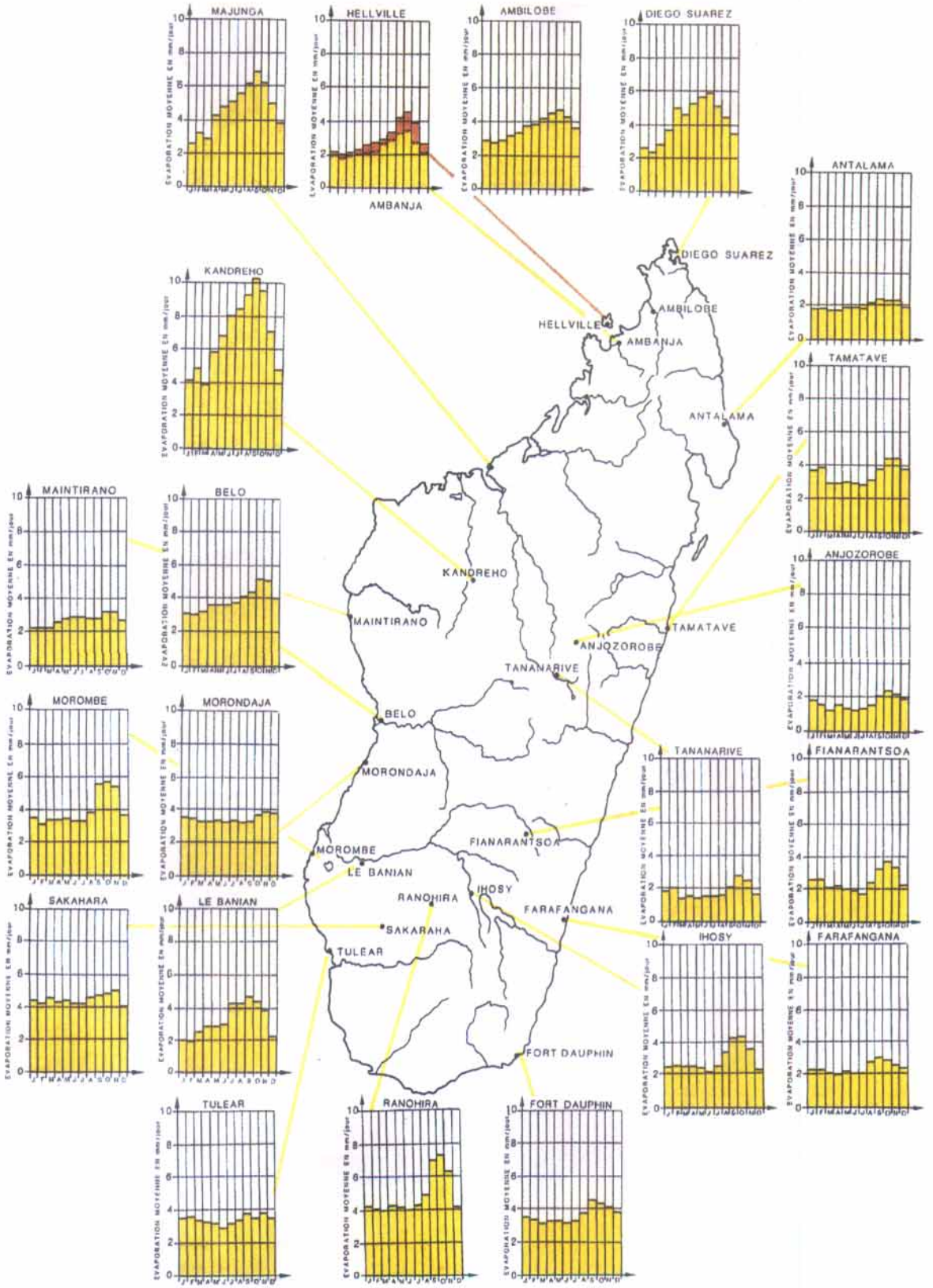


figure 2.17.

Variations mensuelles de l'évaporation Piche



Toutes les stations de la côte est, sauf Antsiranana, du sud, du sud-ouest et quelques stations de l'extrême sud, présentent une courbe à maximum unique, le plus souvent en février mais, parfois, en janvier ou mars.

-Sur la côte ouest et les versants nord-ouest de Maintirano à Antsiranana, on observe une courbe avec deux maximums : un en novembre ou quelquefois octobre, l'autre en avril.

On peut expliquer ce phénomène de la façon suivante : toute la partie de Madagascar située au nord du Tropique du Capricorne voit le soleil passer au zénith deux fois par an : 26 octobre et 17 février à Antsiranana (12° sud), 17 novembre et 26 janvier à Antananarivo (19° sud). Le premier maximum de la courbe des moyennes mensuelles des températures maximales est donc provoqué par le passage du soleil au zénith en octobre-novembre. Il devrait y avoir, en fonction de la hauteur du soleil, un deuxième maximum en janvier-février. Or, on observe à cette époque là, une baisse des températures. Cette baisse des températures est liée à la forte nébulosité et aux précipitations abondantes observées en fin de matinée et en cours d'après-midi sur le nord-ouest de Madagascar. Le maximum d'avril s'explique par la diminution de la nébulosité et des pluies et par la hauteur encore importante du soleil au-dessus de l'horizon en ces régions.

Les courbes des moyennes mensuelles des températures maximales pour les stations des hautes terres, présentent un maximum unique en novembre, quelquefois en octobre, correspondant au passage du soleil au zénith. Les températures baissent ensuite à cause des pluies se produisant en janvier, février et mars. Le soleil, particulièrement pour les stations du centre-sud, n'est plus assez haut en avril pour amener un réchauffement notable et faire apparaître un deuxième maximum.

Les écarts diurnes varient assez notablement d'un point à l'autre de l'île : 5 à 8° sur la côte est, 8 à 14° sur la côte ouest et nord-ouest et 12 à 17° dans le centre-sud.

L'amplitude diurne des températures atteint son maximum en saison fraîche (juillet parfois août), sur les côtes nord-ouest, ouest et sud-ouest et à leur voisinage, en septembre ou octobre sur les hautes terres du centre et du sud, en novembre dans la zone forestière du versant est. Elle est minimale en janvier-février sur la plus grande partie du pays.

*En résumé, au point de vue des températures, on peut distinguer à Madagascar une saison chaude qui correspond à la période pluvieuse et une saison fraîche s'étendant de mai à octobre.*

La carte des isothermes moyennes annuelles (fig. 2.13.) fait apparaître trois grands domaines présentant les caractères suivants :

- la zone des hautes terres centrales du Massif du Tsaratanana où les températures moyennes restent toujours en-dessous de 20° et les températures maximales moyennes atteignent à peine 31°. C'est donc une zone où les températures sont modérées pendant la saison chaude, fraîche à froides suivant l'altitude durant l'hiver austral ;

- l'ouest et le nord-ouest avec des températures moyennes supérieures à 25° et des températures maximales moyennes dépassant 40° en bordure des hautes terres centrales (Maevatanana, Miandrivazo) ;

- le reste, constitué par la côte orientale, le moyen ouest et le sud, enregistrent des moyennes annuelles de l'ordre de 20 à 25°. Des différences apparaissent dans les valeurs des écarts diurnes (pratiquement constants à l'est, ils varient plus amplement dans le sud et le moyen ouest) et les valeurs des températures maximales moyennes (toujours inférieures à 35° sur le versant oriental, elles peuvent atteindre 38° à 40° dans le sud et le moyen ouest). L'extrême sud enregistre des températures minimales moyennes plus faibles que la côte orientale de l'ordre de 3 à 4°, alors que sur le versant est, on ne descend jamais en-dessous de 6 à 7°. Ceci est en rapport avec l'aridité de cette région du sud.

# 4. L'HUMIDITÉ RELATIVE

Nous utiliserons les mesures effectuées par la météorologie malgache aux stations synoptiques et climatologiques. Certaines stations sont équipées d'enregistreurs, mais le plus souvent l'humidité relative est obtenue par lectures du psychromètre à 7 h - 12 h et 17 h. Nous avons reporté, pour quelques stations, sur la carte n° 2.16. les variations mensuelles de l'humidité relative.

L'examen de cette carte montre que :

- l'humidité la plus faible est observée soit à 12 h, soit à 17 h suivant la région : ainsi sur le versant oriental, en toutes saisons, l'humidité relevée à 17 h est toujours inférieure à celle relevée à 12 h et l'écart est assez grand de l'ordre de 8 à 10 % toute l'année : ceci est vrai jusqu'en bordure des hautes terres centrales (graphe de Mantasoa). On observe exactement l'inverse dans le sud et sur la côte ouest et le versant occidental (l'amplitude des écarts d'un mois à l'autre est plus variable, 8 à 20° environ). Sur la bordure ouest des hautes terres, on constate, pendant la saison fraîche, que les humidités relatives à 12 h et 17 h sont sensiblement équivalentes avec, pendant quelques mois, une humidité plus faible à 17 h comme cela est observé sur le versant oriental ;

- les amplitudes entre valeurs maximales et minimales vont en croissant lorsqu'on se déplace de l'est vers l'ouest pour accuser ensuite une légère diminution à proximité de la côte occidentale.

Dans le tableau 2.1., nous avons rassemblé les valeurs moyennes annuelles de l'humidité relative relevées à quelques stations de la Grande Ile.

Sur le versant oriental, cette moyenne annuelle se situe entre 75 et 80 %. Au nord, Antsiranana, avec 68 %, est située dans une zone de relative sécheresse résultant de la position géographique : orientation de la côte et des lignes de relief parallèles à la direction des vents dominants de sud/sud-est n'amenant que des ascendances orographiques faibles et par suite des pluies faibles en régimes d'alizés. De ce fait, l'humidité relative observée à Antsiranana est sensiblement la même que celle observée sur la côte ouest : comprise du nord au sud, entre 65 et 70 %.

Sur la côte ouest, la région de Nosy Bé et du Sambirano présente une humidité importante (de l'ordre de 75 % voisine de celle observée sur le versant oriental) qui s'explique par le climat particulier dû à la présence du Massif du Tsaratanana et aux pluies abondantes apportées par les courants de nord-ouest.

Sur les hautes terres, l'humidité relative moyenne annuelle se situe entre 65 et 75 % alors que sur tout le versant occidental, du nord au sud, on observe les taux d'humidité les plus faibles compris entre 55 et 65 %.

Contrairement à ce qu'on pourrait penser au premier abord, le sud présente une humidité relative plus élevée, entre 60 et 70 %, probablement à cause des incursions des masses d'air polaire, pendant une grande partie de la saison fraîche, entraînant fréquemment des brouillards matinaux et des phénomènes de rosée.

En toutes régions, les valeurs maximales de l'humidité relative sont toujours voisines de 100 % comme le montrent quelques valeurs observées sur les bassins de la Betsiboka et du Mangoky : Arionimano 95 %, Ivato 94 %, Fianarantsoa 99 %, Ranohira 98 %, Morombe 98 %.

tableau 2.1.

Humidité relative : valeurs moyennes annuelles (U %)

| Versant est | | Hautes terres | |
|---|---|---|---|
| Tôlanaro | 76 | Ihosy | 65 |
| Farafangana | 82 | Ranohira | 62 |
| Manakara | 82 | Fianarantsoa | 73 |
| Mananjary | 83 | Ambositra | 75 |
| Vatomandry | 81 | Antsirabe | 67 |
| Toamasina | 80 | Ambohibary | 73 |
| Fenerive | 81 | Manokely | 71 |
| Maroantsetra | 85 | Soavinandriana | 70 |
| Antalaha | 81 | Antanarivo | 76 |
| Vohemar | 77 | Ankazobe | 68 |
| Antsiranana | 68 | Moramanga | 76 |
| Midongy-Sud | 78 | Bealanana | 73 |
| Ifanadiana | 82 | Mandritsara | 64 |
| Marolambo | 76 | | |
| Anosibe | 81 | | |
| Lac Aloatra | 76 | | |
| Andapa | 77 | | |

| Versant ouest et Centre sud | | Côte ouest | |
|---|---|---|---|
| Betroka | 58 | Toliara | 70 |
| Benenitra | 52 | Morombe | 71 |
| Ankazoabo | 58 | Morondava | 65 |
| Sakaraha | 59 | Belo/Tsiribihina | 69 |
| Beroroha | 55 | Soalala | 71 |
| Bekily | 54 | Besalampy | 68 |
| Tsivory | 59 | Mahajanga | 69 |
| Manja | 59 | Ananalava | 69 |
| Tsiroanomandidy | 60 | Abanja | 75 |
| Maevatanana | 55 | Nosy-Bé | 74 |
| Marovoay | 60 | Ambilobe | 68 |
| Port Berge | 68 | Ambahivahibe | 74 |
| Miandrivazo | 65 | | |
| Bekodoka | 65 | | |
| Malaimbandy | 57 | | |
| | | Sud | |
| | | Ambovombe | 69 |
| | | Tsihombe | 66 |
| | | Ampanihy | 61 |
| | | Ejeda | 63 |

Le tableau 2.2. donne quelques valeurs extrêmes de l'humidité relative observées sur la Grande Ile d'après les relevés de la météorologie nationale.

tableau 2.2.

Humidité relative : valeurs extrêmes

| Station | Pourcentage par rapport à la saturation | Date |
|---|---|---|
| **Côte est** | 23 | Juillet 1950 |
| Antsiranana | 39 | Juillet 1945 |
| Antalaha | 39 | Octobre 1960 |
| Andapa | 37 | Mai 1950 |
| Sainte-Marie | 36 | Novembre 1943 |
| Toamasina | 25 | Juin 1965 |
| Marolambo | 20 | Juillet 1966 |
| Mananjary | 28 | Septembre 1941 |
| Farafangana | | |
| Tôlanaro | | |
| **Hautes terres** | 30 | Décembre 1966 |
| Antananarivo-Ville | 7 | Novembre 1957 |
| Arivonimano | 5 | Août 1951 et 1956 |
| Nanokoly | 27 | Août 1944 |
| Antsirabo | 7 | Août 1963 |
| Fianarantsoa | 14 | Septembre 1958 |
| Betroka | 20 | Septembre 1949 |
| **Nosy-Bé - Sambirano** | | |
| Ambilobe | 32 | Septembre 1944 |
| Nosy-Bé | 25 | Août 1962 |
| **Côte et versant ouest** | | |
| Analalava | 14 | Août 1964 |
| Mahajanga | 15 | Septembre 1966 |
| Maovatenena | 23 | Septembre 1946 |
| Maintirano | 13 | Août 1946 |
| Morondava | 11 | Septembre 1947 |
| Malainbandy | 23 | Sept. 1945 & Octobre 1946 |
| Morombe | 10 | Octobre 1966 |
| Toliara | 10 | Novembre 1941 |
| **Extrême sud** | | |
| Tranoroa | 24 | Octobre 1941 |
| Tsihombé | 29 | Septembre 1950 |
| Faux-cap | 19 | Mai 1960 |

Le minimum annuel de l'humidité relative est observé, le plus souvent, en septembre ou octobre sur la plupart des régions, en juillet ou août sur la côte occidentale.

L'humidité de l'air croît très rapidement en novembre, décembre, avec l'arrivée des premiers orages sur le versant ouest et les hautes terres. Cet accroissement est moins net dans le sud et sur la côte est, les variations de l'humidité en ces régions étant toujours très faibles d'un mois à l'autre. A 17 h, 4 % - à 12 h, 12 % et à 7 h, 7 %. L'écart entre les moyennes du mois le plus humide et du mois le plus sec est de l'ordre de 4 % à 17 h, 12 % à 12 h et 7 % à 7 h.

*Pour conclure, les variations saisonnières de l'humidité relative sont très marquées sur les hautes terres et le versant occidental, plus faibles sur le versant est et dans le sud.*

*Il semble que les variations de l'humidité à Madagascar ne sont pas liées à la latitude mais à l'altitude et à l'éloignement plus ou moins grand de l'Océan Indien.*

# 5. L'ÉVAPORATION ET L'ÉVAPOTRANSPIRATION

Ces deux paramètres sont relativement mal connus à Madagascar. Pour l'évaporation, nous disposons des mesures effectuées sous abri, à l'évaporomètre PICHE, par la météorologie nationale et des mesures effectuées sur bac, dans une dizaine de stations, par l'ORSTOM et l'INRA. Quant à l'évapotranspiration, elle n'est évaluée qu'à partir des formules classiques (THORNWAITHE, PENMANN, PRESCOTT, TURC, etc.).

## 5.1. L'évaporation Piche

La plupart des mesures ont été effectuées par la météorologie nationale à l'aide de l'évaporomètre PICHE classique sous abri normalisé. Nous avons retenu essentiellement les résultats des stations synoptiques situées dans les aérodromes et les grandes villes.

Les valeurs annuelles (mm) que nous donnons ci-dessous sont extraites de l'ouvrage de G. DONQUE (1975).

- Versant est (du nord au sud)

| | | | |
|---|---|---|---|
| ANTSIRANANA | 1555 | MANANJARY | 1345 |
| VOHEMAR | 1391 | IFADIANANA | 430 |
| ANDAPA | 682 | MANAKARA | 1226 |
| ANTALAHA | 718 | FARAFANGANA | 1181 |
| LAC ALAOTRA | 1221 | TOLANARO | 1324 |
| TOAMASINA | 1267 | | |

- Hautes terres (du nord au sud)

| | | | |
|---|---|---|---|
| BEALANANA | 803 | ANTSIRABE | 890 |
| MANDRITSARA | 1015 | FIANARANTSOA | 928 |
| ANJOZOROBE | 610 | IHOSY | 1015 |
| ANTANANARIVO | 867 | RANOHIRA | 1790 |
| MORAMANGA | 509 | | |

- Versant ouest et centre sud (du nord au sud)

| | | | |
|---|---|---|---|
| MAROVOAY | 1374 | BERoroha | 1514 |
| MAEVATANANA | 1825 | SAKARAHA | 1298 |
| TSIROANOMANDIDY | 1088 | BEKILY | 1364 |
| MIANDRIVAZO | 1090 | | |

- Côte ouest (du nord au sud)

| | | | |
|---|---|---|---|
| NOSY BE | 1068 | MAINTIRANO | 997 |
| AMBANJA | 878 | BELO | 1409 |
| ANALALAVA | 2104 | MORONDAVA | 1243 |
| MAHAJANGA | 1729 | MOROMBE | 1563 |
| SOALALA | 1210 | TOLIARA | 1250 |
| BESALAMPY | 1770 | | |

- Extrême sud

| | | | |
|---|---|---|---|
| FAUX CAP | 1437 | AMBOVOMBE | 1041 |

L'évaporation PICHE annuelle varie d'une station à l'autre, de 430 à 2 100 mm, sans qu'il soit possible de lier systématiquement ces grandes variations à la situation géographique ou à des paramètres caractéristiques du climat. Pour chaque station, le résultat des observations est surtout fonction de l'exposition de l'appareil (ventilation plus ou moins forte) et de son entretien.

Très globalement, nous retiendrons comme valeurs moyennes de l'évaporation PICHE annuelle :

- 700 à 1 100 mm (2 à 3 mm/j) sur la cote est et la bordure orientale des hautes terres.
-1 100 à 1 500 mm (3 à 4 mm/j) dans le sud et sur la côte ouest.
-1 800 à 2 200 mm (5 à 6 mm/j) sur le versant occidental et la bordure ouest des hautes terres.

Ces valeurs ne donnent toutefois qu'une approximation de l'évaporation sur nappe d'eau libre.

La carte n° 2.17. est illustrée d'une série de graphes des variations mensuelles de l'évaporation PICHE en divers points de l'île.

En toute régions, les maximums mensuels se situent en septembre-octobre. Mais les valeurs maximales observées peuvent être très différentes d'une station à l'autre : 10,5 mm/j à KANDREHO (versant occidental) et 2,3 mm/j à ANTAHALA (côte orientale) et ANJOZOROBE (hautes terres). Il ne faut pas accorder trop d'importance à la représentativité régionale de ces valeurs, l'effet de site étant souvent prédominant, par exemple à BELO ou TOAMASINA. On notera cependant qu'en général, les écarts entre mois le plus fort et mois le plus faible sont peu importants sur la côte est et la bordure orientale des hautes terres, un peu plus forts sur la côte ouest et très importants sur le versant ouest (RANOHIRA, KANDREHO).

## 5.2. L'évaporation sur bac et nappe d'eau libre

### 5.2.1. Dispositif de mesures

Les premières mesures sur bac ont été réalisées par l'ORSTOM en 1955-56 sur des bacs carrés enterrés de 0,914 m de cotés (type Colorado) aux stations de ANDROVAKELY (bassin versant) et du BANIAN (sur le MANGOKY).

A partir de 1958, l'ORSTOM a mis en service des stations climatologiques complètes dans le cadre d'études hydrologiques de grands bassins fluviaux.

L'équipement de ces stations était le suivant : un bac carré enterré (1 m² type ORSTOM), un bac rond classe A, posé sur le sol, un pluviomètre association enterré, un pluviographe à augets basculeurs, un anémomètre ROBINSON (mesure du vent au sol), un abri météorologique (température de l'air, humidité, pression atmosphérique, évaporation PICHE), un distillomètre GUN BELLANI (mesure du déficit de saturation) sur quelques unes des stations.

Les stations suivantes ont été mises en place :

- AMBODIROKA et ANTSATRANA (bassin de la BETSIBOKA) en 1958
- TSIMBAZAZA (centre ORSTOM d'Antananarivo) en 1960
- AMBOHIDRANO-NORO (bassin versant de la TAFAINA) en 1962
- BANIAN (en 1958) et TANANDAVA (en 1963) sur le bas MANGOKY
- PERINET (côte est) en 1962
- TRANOROA (dans le sud, bassin de la MANARANORA) en 1967.

D'autre part, ont été réalisées avec beaucoup de difficultés des mesures de l'évaporation sur nappe d'eau libre au moyen de bacs carrés flottants disposés sur un lac et dans le lit même de la BETSIBOKA, à proximité de la station d'AMBODIROKA (1959-60).

La carte (graphe n° 2.18.) permet de situer ces stations.

### 5.2.2. Contrôle et correction des résultats

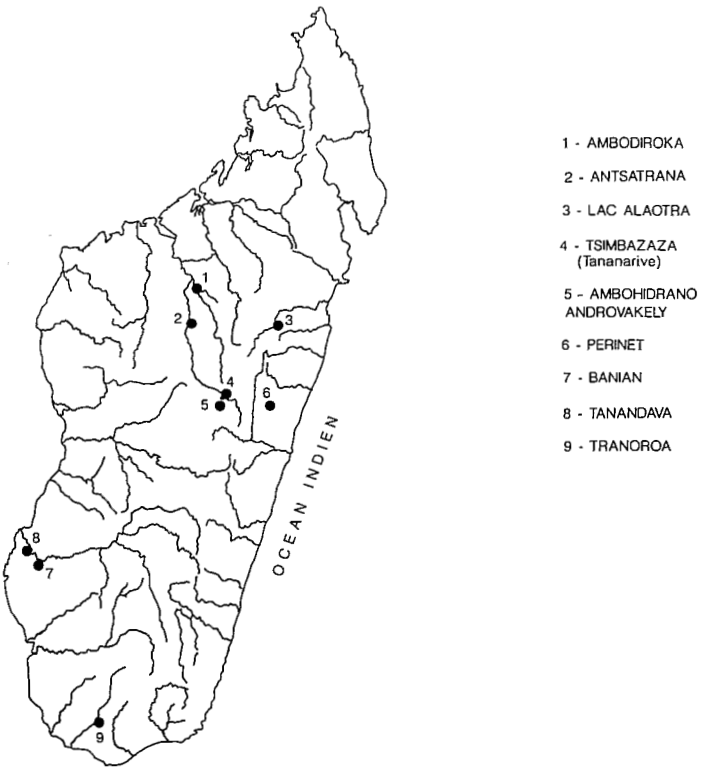
Les mesures sont entachées d'erreurs souvent indécelables en raison des contraintes d'exploitation : éloignement des stations, environnement difficile, forte pluviométrie, etc.

-l'éloignement des stations entraîne des contrôles et visites d'entretien espacés (nettoyage des bacs, contrôle des observateurs ...) ;
-l'environnement fausse souvent les mesures : terre battue non engazonnée entraînant l'échauffement des bacs en saison sèche et l'augmentation artificielle de l'évaporation ;
-les précipitations fréquentes et fortes en saison des pluies, faussent la mesure de l'évaporation. Les corrections sont souvent difficiles à réaliser. La mise en place d'un appareillage d'enregistrement de l'évaporation avec siphonage rapide de l'eau de pluie a permis d'améliorer, mais pas totalement, la mesure de l'évaporation en saison des pluies.

Plusieurs méthodes de contrôle et vérification des résultats ont été utilisées afin de corriger et tenter d'homogénéiser les résultats.

figure 2.18.

Plan de situation des bacs évaporation Orstom




- Contrôle en simple cumul des valeurs mensuelles pour toutes les stations. Ces contrôles ont permis d'éliminer certaines périodes présentant des distorsions (par exemple à partir d'octobre 1973 à TSIMBAZAZA) et de compléter quelques lacunes.
- Corrélations interstations des valeurs mensuelles. Sur les valeurs mensuelles, on constate une dispersion assez forte due aux différences d'exposition des sites ainsi qu'aux erreurs de mesures propres à chaque station (entretien des bacs et qualification des observateurs). Pour les meilleures stations, cette dispersion reste très acceptable.

Ainsi, entre Ambohidrano et Antananarivo, le cœfficient de corrélation est de 0.858 (96 couples). Autour de la droite de régression,

EAMB = 1,095 ETAN + 0.58,

l'intervalle de confiance à 95 % n'est que de 1,09 mm.

Cependant, afin de réduire la dispersion due aux erreurs de mesure, la comparaison a été effectuée systématiquement sur les moyennes mensuelles interannuelles (en mm/j).

La station de Antananarivo (Tsimbazaza) a été retenue comme poste de référence (ETSI).

La corrélation est significative ou satisfaisante pour les stations de BANIAN (r = 0.941), TRANOROA (r = 0.942), AMBOHIDRANO (r = 0.924), PERINET (r = 0.905) et TANANDAVA (r = 0.852).

Les droites de régression ont les expressions suivantes :

- AMBOHIDRANO E = 1,08 ETSI + 0,57
- PERINET E = 0,67 ETSI + 0,004
- BANIAN E = 1,35 ETSI - 0,01
- TANANDAVA E = 1,45 ETSI - 0,03
- TRANOROA E = 1,55 ETSI + 0,04

Dans la région du lac ALAOTRA, les mesures effectuées sur bac COLORADO (type ORSTOM) en 1975-1976 à la station d'AMBOHITSILAOZANA ont été comparées aux mesures effectuées sur le même site de 1956 à 1974 par l'IRAT sur bac en ciment enterré et à DIDY de 1956 à 1978, également sur bac en ciment.

On voit ainsi que l'évaporation sur bac ORSTOM est supérieure de 30 % à l'évaporation sur bac en ciment IRAT (moyenne interannuelle 1956-75 : 1 459 mm).

L'évaporation moyenne mensuelle à la station ORSTOM a été déduite des observations sur bac IRAT en les multipliant par 1,3.

Pour les stations du nord-ouest (AMBODIROKA et ANTSATRANA), les cœfficients de corrélation sont très médiocres (0,367 et 0,442). Cela est dû à une sous-évaluation de l'évaporation en saison des pluies (correction très difficile en raison des précipitations abondantes) et à une surestimation très nette de l'évaporation en saison sèche (sol nu surchauffé). Les observations mensuelles incorrectes déficientes ont été corrigées et l'on a à adopter les droites de régression suivantes :

- AMBODIROKA E = 0,76 ETSI + 5,24
- ANTSATRANA E = 0,72 ETSI + 3,87

Pour les mêmes raisons, les données de saison des pluies du bac du lac ALAOTRA ont dû être corrigées. La droite de régression retenue a pour expression :

- LAC ALAOTRA E = 1,005 ETSI + 1,76

## 5.2.3. Résultats

Le tableau 2.3. consigne les résultats (moyennes journalières des valeurs mensuelles interannuelles et total moyen interannuel) des observations effectuées sur bac ORSTOM.

En accordant aux résultats des différentes stations une certaine représentativité régionale, on retiendra que l'évaporation annuelle sur bac varie de 2 900 mm au nord-ouest (AMBODIROKA : 2 900, ANTSATRANA : 2 400) à 1 500 mm sur les Hauts Plateaux Centraux (AMBIMODRANO : 1 670, ANTANANARIVO : 1 370), puis 1 000 mm sur le versant oriental (PERINET : 920). Dans le sud-ouest (BANIAN : 1 870, TANANDAVA 1 950) la lame évaporée est légèrement inférieure à 2 000 mm ; elle atteint plus de 2 100 mm dans le sud (TRANOROA).

On aurait pu attendre une évaporation beaucoup plus forte dans le sud, mais l'influence des invasions d'air polaire pendant la saison fraîche (abaissement de la température, assez forte nébulosité, présence de brouillards) peut expliquer cette relative modération de l'évaporation.

tableau 2.3.

Evaporation mesurée sur Bac et Piche (stations ORSTOM)

| | Moyennes journalières des valeurs mensuelles interannuelles (en mm/j) | | | | | | | | | | | | Moyenne interannuelle du total annuel en mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | |
| **Antananarivo** 1960-1973 | | | | | | | | | | | | | |
| Bac | 4.79 | 4.06 | 4.38 | 4.08 | 3.83 | 3.73 | 3.04 | 2.46 | 2.53 | 3.01 | 4.20 | 4.89 | 1 368 |
| Piche | 2.13 | 1.51 | 1.65 | 1.60 | 1.29 | 1.49 | 1.36 | 1.32 | 1.39 | 1.62 | 1.99 | 2.35 | 599 |
| **Ambohidrano** 1962-1971 | | | | | | | | | | | | | |
| Bac | 5.22 | 4.43 | 5.06 | 5.01 | 4.79 | 4.31 | 3.79 | 3.16 | 3.21 | 4.15 | 5.30 | 6.60 | 1 673 |
| Piche | 2.97 | 2.45 | 2.60 | 2.61 | 2.52 | 2.54 | 2.50 | 2.24 | 2.07 | 2.45 | 3.13 | 3.81 | 970 |
| **Périnet** 1962 1973 | | | | | | | | | | | | | |
| Bac | 3.09 | 2.92 | 3.22 | 3.07 | 2.82 | 2.46 | 1.88 | 1.79 | 1.71 | 1.76 | 2.27 | 3.18 | 917 |
| **Lac Alaotra** 1955 -1977 | | | | | | | | | | | | | |
| Bac | 6.41 | 5.83 | 6.16 | 5.86 | 5.60 | 5.51 | 4.73 | 4.28 | 4.24 | 4.90 | 6.03 | 6.81 | 2 018 |
| **Ambodiroka** 1958-1971 | 8.74 | 8.17 | 8.40 | 8.20 | 8.01 | 7.94 | 7.21 | 6.94 | 7.40 | 7.43 | 8.27 | 8.76 | 2 903 |
| **Antsatrana** 1958-1972 | 7.39 | 6.78 | 7.02 | 6.80 | 6.62 | 6.55 | 5.69 | 5.53 | 6.08 | 6.03 | 6.89 | 7.38 | 2 395 |
| **Banian** 1958-1965 | 7.04 | 5.60 | 5.47 | 5.20 | 4.92 | 4.79 | 4.06 | 3.12 | 3.63 | 4.64 | 6.00 | 6.96 | 1 869 |
| **Tanandava** 1963-1969 | 7.82 | 6.11 | 5.25 | 4.87 | 4.99 | 4.68 | 4.05 | 3.51 | 3.84 | 5.09 | 6.31 | 7.54 | 1 950 |
| **Tranoroa** 1967-1972 | 7.04 | 7.26 | 6.41 | 6.69 | 6.47 | 5.68 | 4.51 | 3.37 | 3.82 | 5.16 | 6.31 | 7.38 | 2 130 |

## 5.2.4. Comparaison de l'évaporation sur bac et de l'évaporation Piche

En comparant les moyennes mensuelles interannuelles des observations sur bac et sur évaporomètre PICHE, on obtient des corrélations assez satisfaisantes pour les stations de :

- ANTANANARIVO Ebac = 1.83 EPiche + 0.74 (r = 0.76)
- AMBOHIDRANO Ebac = 1.93 EPiche - 0.53 (r = 0.915)
- PERINET Ebac = 1.80 EPiche + 0.54 (r = 0.77)
- ANTSATRANA Ebac = 0.63 EPiche + 3.47 (r = 0.78)
- TANANDAVA Ebac = 0.56 EPiche + 2.01 (r = 0.682)

Pour BANIAN et AMBODIROKA, les corrélations sont mauvaises ou inexistantes.

A l'échelle des valeurs mensuelles, les régressions montrent que les droites ne présentent pas les mêmes pentes pour tous les mois (paramètres variant de 1 à 3) et que les cœfficients de corrélations des mois de transition entre saisons des pluies et saisons sèches sont les moins significatifs.

On pourra utiliser, avec prudence (compte tenu de la forte variabilité des mesures sur PICHE en fonction des conditions de site) les relations définies ci-dessus, pour évaluer l'évaporation sur bac dans les hautes terres, le versant oriental et l'ouest de Madagascar à partir des observations faites sur évaporomètre PICHE.

## 5.2.5. Évaporation sur nappe d'eau libre

Bien que plus représentatives que les observations faites sur PICHE, les observations effectuées sur bac ne peuvent être directement extrapolées pour évaluer l'évaporation sur nappe d'eau libre, naturelle ou artificielle.

Afin de définir un cœfficient de passage, des observations ont été effectuées sur bacs flottants (sur un lac et dans le lit de la Betsiboka) à proximité de la station d'Ambodiroka. Les observations n'ont pu être effectuées que durant les trois mois (juillet-septembre) des saisons sèches 1959 et 1960.

Le rapport de l'évaporation sur le fleuve à l'évaporation sur le bac est de 0.70 (0,75 si l'on effectue la moyenne fleuve-lac). Ce cœfficient est très voisin des cœfficients (compris entre 0,7 et 0,9) déterminés en d'autres pays africains.

En conclusion, on retiendra donc comme ordre de grandeur de l'évaporation sur nappe d'eau libre, les valeurs suivantes :

- 2 000 mm dans le nord-ouest
- 1 600 mm dans le sud
- 1 400 mm dans le sud-ouest
- 1 000 à 1 100 mm sur les Hauts Plateaux
- 700 mm sur le versant oriental

## 5.2.6. Variabilité interannuelle et distribution mensuelle

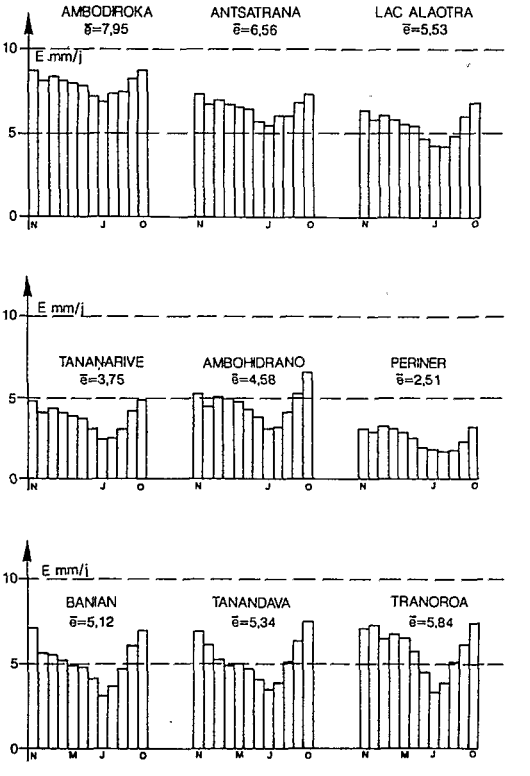
Le cœfficient d'irrégularité K3 (rapport des valeurs décennales) est généralement compris entre 1.10. et 1.20.

| Fréquence au dépassement | 90 % | 10 % |
|---|---|---|
| Antananarivo | 1 260 mm | 1 475 mm |
| Ambohidravo | 1 600 mm | 1 750 mm |

Les graphes de distribution mensuelle de l'évaporation sur bac (fig. 2.19.) montrent un maximum en octobre-novembre et un minimum situé en juillet beaucoup plus accentué dans le sud que dans le centre-ouest.

figure 2.19.

Moyennes mensuelles de l'évaporation journalière sur bac Orstom




## 5.3. L'évapotranspiration

Les mesures directes de l'évapotranspiration (sur lysimètre) sont rares à Madagascar. C'est pourquoi les naturalistes ont cherché dans l'arsenal des formules climatiques, celles qui, comparativement aux résultats des mesures, donnaient les meilleures approximations.

RIQUIER (1963) a estimé (après avoir testé neuf formules) que les meilleurs résultats étaient obtenus avec les formules de PENMANN, BUSINGER, WALKER, TURC et PRESCOTT. Cependant les calculs impliquent que soient disponibles un certain nombre de paramètres (insolation, albedo, radiation vraie, etc.) mesurés dans un nombre relativement rare de stations climatologiques. N'exigeant que des données de température (mesurées sur un grand nombre de stations) la formule de THORNTHWAITE, bien qu'assez peu fiable pour exprimer les variations mensuelles, a pu être utilisée pour l'évaluation des données annuelles et l'établissement des cartes climatiques.

La répartition des moyennes interannuelles de l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculées d'après THORNTHWAITE est la suivante :

- sur les Hauts Plateaux du centre de Madagascar (T annuelle < 20°C) l'ETP est voisine de 1 000 mm ;
- l'ETP croît progressivement vers l'est (côte orientale) et le sud pour atteindre 1 200 mm ;
- vers le nord-ouest et le sud-ouest, c'est-à-dire sur les régions où la température annuelle moyenne dépasse 25°C (Bassins de MAHAJANGA et de MORONDAVA, ISALO), l'ETP croît assez fortement en dépassant les 1 500 mm annuels pour atteindre dans certains secteurs 1 800 à 2 000 mm.

L'évapotranspiration réelle (ETR) est évidemment fonction des disponibilités annuelles en précipitation et de leur répartition mensuelle (durée de la saison "sèche").

Le rapport de l'ETR à l'ETP est voisin de 100 % (satisfaction des besoins de l'ETP pendant la quasi totalité de l'année) sur le versant oriental, de SAMBAVA à TOLANARO.

Il diminue progressivement en allant vers l'ouest. Sur les Hauts-Plateaux Centraux, ce rapport n'est plus que de 70 à 80 %. Puis vers le littoral occidental, il passe progressivement à 50 et 60 % et atteint ses valeurs les plus faibles (25 à 30 %) sur la côte sud-ouest.

Les valeurs annuelles suivantes de l'ETR ont été estimées (DUFOURNET, Atlas de Madagascar) :

| | |
|---|---|
| - Versant oriental | |
| VOHEMAR | 1 313 mm |
| TOAMASINA | 1 275 mm |
| IFANADIANA | 1 034 mm |
| FARAFANGANA | 1 153 mm |
| TOLANARO | 1 178 mm |
| - Hauts plateaux | |
| MORAMANGA | 902 mm |
| AMBOSITRA | 816 mm |
| ANTANANARIVO | 726 mm |
| BEALANANA | 704 mm |
| - Versant nord-ouest et ouest | |
| ANTSIRANANA | 842 mm |
| AMBILOBE | 1 088 mm |
| NOSY BE | 1 278 mm |
| AMBANJA | 1 258 mm |
| MAROVOAY | 1 040 mm |
| BEFANDRIANA | 989 mm |
| MAINTIRANO | 996 mm |
| MIANDRIVAZO | 1 149 mm |
| - Sud-ouest et sud | |
| MORONDAVA | 755 mm |
| IHOSY | 725 mm |
| BETIOKY | 616 mm |
| AMPANINY | 566 mm |
| MOROMBE | 455 mm |
| TOLIARA | 344 mm |
| ANDROKA | 344 mm |
| FAUX CAP | 373 mm |

Les valeurs les plus fortes de l'évapotranspiration réelle (ETR), comprises entre 1 000 et 1 300 mm, sont observées sur l'ensemble du versant oriental, ainsi que sur la côte nord-ouest (bassin inférieur du SAMBIRANO).

Des valeurs intermédiaires de l'ETR (800 à 1 000 mm) sont observées, à l'est, sur une zone de transition entre le versant oriental et les Hauts Plateaux centraux, et, au nord-ouest, sur les terres basses de la couverture sédimentaire, de NOSY BE à MORONDAVA.

Les valeurs les plus faibles de l'ETR (inférieures à 800 mm) sont observées sur les Hauts Plateaux (7 à 800 mm) puis, avec un gradient décroissant, selon un axe nord-est - sud-ouest, pour atteindre les valeurs minimales (inférieures à 400 mm) sur le littoral du sud et du sud-ouest.

# 6. L'INSOLATION ET LE RAYONNEMENT SOLAIRE

Nous utiliserons les mesures effectuées par la météorologie nationale malgache pour l'insolation en diverses stations du bassin de la Betsiboka et du Mangoky et le rayonnement solaire direct à Antananarivo.

Astronomiquement, la durée d'insolation dépend de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon et de la durée respective des jours et des nuits. Du nord au sud, les hauteurs du soleil à midi varient aux solstices, les dates de passage du soleil au zénith et les durées extrêmes entre les levers et les couchers du soleil sont les suivantes :

| | | Antsiranana | Antananarivo | Tolanaro |
|---|---|---|---|---|
| Hauteurs : | Juin | 54°16'nord | 47°38'nord | 41°31'nord |
| | Décembre | 78°50'sud | 85°25'sud | 88°25'nord |
| Dates passages : | | 26 octobre | 17 novembre | pas de passage |
| | | 17 février | 26 janvier | au zénith |
| Durée du jour : | Décembre | 12 h 50 | 13 h 17 | 13 h 42 |
| | Juin | 11 h 25 | 10 h 59 | 10 h 36 |

Dans le tableau 2.4. extrait d'une publication ronéotypée de la météorologie nationale malgache, nous donnons pour un certain nombre de stations la durée de l'insolation annuelle et le pourcentage par rapport à la durée théorique possible.

L'insolation est mesurée à l'aide d'héliographes CAMPELL, par le service météorologique. Nous donnons ci-après les valeurs moyennes mensuelles relevées à quelques stations des hautes terres et de l'ouest (il y a quelques légères différences entre les totaux annuels calculés à partir de ce tableau et ceux portés sur le tableau précédent : les périodes de référence ne sont pas exactement les mêmes).

tableau 2.4

Valeurs de l'insolation

| Station | Latitude | Durée de l'insolation en heures et dixièmes Moyenne annuelle | Pourcentage par rapport à la durée possible de l'insolation |
|---|---|---|---|
| **Côte est** | | | |
| Antsiranana | 12°21'S | 3.088,0 | 70,1 % |
| Antalala | 15°00'S | 2.564,1 | 58,2 % |
| Toamasina | 18°07'S | 2.509,7 | 57,0 % |
| Mananjary | 21°12'S | 2.561,7 | 58,2 % |
| Farafangara | 22°48'S | 2.573,4 | 58,5 % |
| Tôlanaro | 25°02'S | 2.684,8 | 61,0 % |
| **Plateaux** | | | |
| Andapa | 14°39'S | 1.733,9 | 39,4 % |
| Ambohitsilaozana (Lac Alaotra) | 17°38'S | 2.498,2 | 56,7 % |
| Antananarivo-Observ. | 18°55'S | 2.692,8 | 60,3 % |
| Antsirabe-Aérodro. | 19°49'S | 2.791,1 | 63,4 % |
| Fianarantsoa | 21°27'S | 2.310,8 | 52,5 % |
| Ranohira | 22°33'S | 3.187,6 | 72,4 % |
| **Côte ouest** | | | |
| Nosy-Bé | 13°19'S | 3.085,3 | 70,0 % |
| Analalava | 14°38'S | 3.343,3 | 75,9 % |
| Mahajanga | 15°40'S | 3.278,3 | 74,4 % |
| Bosalampy | 15°45'S | 3.321,1 | 75,4 % |
| Kandreho | 17°28'S | 3.173,2 | 72,0 % |
| Norondava | 20°17'S | 3.550,9 | 80,6 % |
| Morombé | 21°45'S | 3.724,0 | 84,6 % |
| Toliara | 23°23'S | 3.636,2 | 82,6 % |

Le tableau 2.5. montre que l'insolation est maximale en toute région au mois d'octobre. Théoriquement, on devrait avoir un ensoleillement plus grand en février, mars puisque la durée possible est plus grande en février qu'en octobre (12 h 38 contre 12 h 26 à Antananarivo). Mais le mois de février est un mois pluvieux d'où une nébulosité plus importante qu'en octobre, mois présentant un nombre plus grand de jours avec ciel clair et bien dégagé.

Sur le bassin du Mangoky, les valeurs maximales et minimales en heures relevées au cours de la période d'observation considérée, sont les suivantes :

| | | |
|---|---|---|
| - FIANARANTSOA | 287.9 en novembre 1957 | 100.9 en mars 1959 |
| - RANOHIRA | 322.8 en octobre 1957 | 178.0 en février 1963 |
| - MOROMBE | 365.6 en octobre1957 | 194.1 en février 1963 |

La faible valeur du mois de mars 1959 à FIANARANTSOA est due à la succession de quatre violents cyclones qui ont maintenu un ciel gris et bas pendant la presque totalité du mois de mars. Il en a été de même du 16 au 25 février 1963, sur le sud-ouest de Madagascar, où les dépressions tropicales "FANNY" et "HILDA" ont provoqué de très fortes précipitations.

En moyenne annuelle, on constate que le maximum est observé dans le sud-ouest de Madagascar (Toliara, Morombe) avec environ 3 700 h plus de 80 % de la durée théorique possible. La bordure orientale présente des durées d'ensoleillement de l'ordre de 2 500 h, soit près de 60 % de la durée théorique. Une station accuse une durée très faible de l'insolation : Andapa, avec moins de 2 000 h soit environ 40 % de la durée théorique. Ceci s'explique par la situation dans une cuvette en altitude, où la nébulosité est très forte et les brouillards très fréquents.

tableau 2.5

Insolation mensuelle en heures

| Station | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Antananarivo** 1941-1960 | 180,5 | 173,7 | 189,1 | 226,7 | 223,9 | 204,0 | 206,4 | 225,7 | 241,0 | 260,1 | 224,4 | 199,3 |
| **Fianarantsoa** 1957-1963 | 195,4 | 177,1 | 162,5 | 191,5 | 189,5 | 177,6 | 166,8 | 196,1 | 224,0 | 242,0 | 215,7 | 186,7 |
| **Ranohira** 1957-1963 | 254,5 | 139,5 | 262,1 | 264,2 | 282,4 | 263,5 | 266,2 | 261,5 | 296,8 | 302,0 | 273,7 | 235,1 |
| **Morombe** 1959-1963 | 312,2 | 284,6 | 314,3 | 306,3 | 316,2 | 295,9 | 303,9 | 318,5 | 320,5 | 333,2 | 327,0 | 292,5 |
| **Mahajanga** 1951-1960 | 163,3 | 158,6 | 207,0 | 294,2 | 320,1 | 297,5 | 308,7 | 323,2 | 320,2 | 336,4 | 288.5 | 231,1 |

Il faut noter également que, d'une année à l'autre, la durée d'insolation peut varier dans d'assez grandes proportions. On a ainsi relevé à Antananarivo :

233 h en juin 1959
228 h en juin 1950
174 h en juin 1951pour une durée théorique de 323 h
258 h en novembre 1958
184 h en novembre 1952 pour une durée théorique de 380 h

Ces dernières valeurs peuvent s'expliquer par les hauteurs de précipitations recueillies au cours de ces mêmes mois : 97.7 mm en novembre 1958 et 217.0 mm en novembre 1952.

La valeur du rayonnement direct est mesurée par le service météorologique à Antananarivo à l'aide d'un solarimètre KIPP. Nous donnons ci-dessous les valeurs mensuelles moyennes du rayonnement direct.

Valeur moyenne mensuelle du rayonnement solaire direct à Antananarivo en calories/cm² (période 1956-59)

| J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 300,2 | 245,8 | 255,1 | 292,8 | 275,1 | 240,0 | 241,5 | 318,0 | 374,5 | 416,2 | 404,9 | 327,8 |

Valeur moyenne horaire du rayonnement solaire direct à Antananarivo en calories/cm² (période 1956-59)

| 6 h | 7 h | 8 h | 9 h | 10 h | 11 h | 12 h | 13 h | 14 h | 15 h | 16 h | 17 h | 18 h | 19 h |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,0 | 1,7 | 8,2 | 19,0 | 31,4 | 41,5 | 46,5 | 47,1 | 42,0 | 34,0 | 22,3 | 10,8 | 2,0 | 0,0 |

L'amplitude des écarts entre le mois le plus fort et le mois le plus faible est égal à 176 cal/cm². Le maximum est toujours observé en octobre. Le rayonnement direct reste sensiblement constant de février à juillet, mois présentant une forte nébulosité. Il augmente rapidement en août, pour dépasser 400 cal/cm² en octobre et novembre.

# 7. LES PRÉCIPITATIONS

## 7.1. Les précipitations annuelles

### 7.1.1. Les précipitations et isohyètes moyennes interannuelles

Un inventaire des observations pluviométriques et hydrométriques de Madagascar et leur archivage sur support informatique est en cours de réalisation dans le cadre d'un programme "Banque de Données Hydroclimatiques de Madagascar" mené par la Direction de la Météorologie et de l'Hydrologie, le centre National de Recherches sur l'Environnement et l'ORSTOM. Après un an de travail, 972 stations pluviométriques ont été inventoriées et plus de 7000 années-stations de pluviométrie journalière saisies. Les quelques estimations faites laissent à penser que le nombre d'années-station de pluie journalière serait proche de 10 000 pour Madagascar. Mais, déjà, les documents et les fichiers actuellement disponibles donnent une bonne image du réseau d'observation pluviométrique depuis 1880 ainsi que du volume et de la qualité des observations.

#### 7.1.1.1. Historique du réseau pluviométrique

La pluviométrie a commencé à être mesurée de façon régulière à partir de 1880 à la station de "Tananarive Observatoire" puis à Majunga et Tamatave (vers 1897 et 1889).

Entre 1901 et 1903 ont été mises en place quelques stations pluviométriques dans les grandes villes des côtes est (Mananjary, Farafangana, Diégo-Suarez, Fort Dauphin) et ouest (Majunga, Morondava, Tuléar) ainsi que

quelques postes sur les hautes terres (Fianarantsoa, Arivonimamo). Sur toutes ces stations, les relevés ont été assez irréguliers et des manques sont constatés un peu partout jusque vers la fin des années 1930.

Le nombre de stations, limité à moins de 25 postes jusqu'en 1933, a connu une croissance régulière jusqu'à la fin des années "cinquante" (50 à 75 stations de 1933 à 1946, 120 à 140 stations de 1946 à 1956). En 1957, l'extension du réseau fût notable puisque le nombre moyen de stations fût porté à environ 250 postes entre 1957 et 1962. Une certaine réduction de l'effectif peut être constatée entre 1962 et 1970 (environ 180 stations) puis une croissance brutale en 1971-1972 (330 postes). Depuis cette date on constate une réduction régulière de l'effectif (de l'ordre d'une centaine de stations vers 1985). Cependant les principales stations ont été maintenues avec un renforcement des observations climatiques (stations synoptiques).

Le Service central de la météorologie (SCM) puis, la Direction de la météorologie et de l'hydrologie (DMH) ont été les principaux gestionnaires du réseau pluviométrique et sont à l'origine des longues séries d'observation. A cela il faut ajouter des observations plus disparates, de quelques mois à plusieurs années) faites par divers organismes et services dont :

- des religieux pour les premières observations ;
- les services de l'Agriculture et du Génie rural dans le cadre d'études ponctuelles ;
- des organismes de recherche (IRAM, CENRADERU, ORSTOM).

La répartition des postes pluviométriques est très inégale avec des densités très faibles sur les bordures est et ouest de l'île et des concentrations importantes en particulier sur :

- les hauts bassins de l'Ikopa (région d'Antananarivo) et du Maningory (région du lac Alaotra) ;
- l'axe routier Antananarivo/Brickaville ;
- les hautes terres entre Antananarivo et Fianarantsoa ;
- la région de Fort Dauphin.

### 7.1.1.2. Tracé de la carte des isohyètes interannuelles

343 stations pluviométriques réparties sur toute l'île ont été retenues pour le tracé de la carte des isohyètes moyennes interannuelles en année hydrologique de novembre à octobre (tabl. 2.6). 255 de ces stations ont fait l'objet d'une homogénéisation succincte sur la période 1941/1942 à 1973/1974 soit sur 20 à 32 années suivant les stations. Les 88 autres, non homogénéisées et corrigées à vue, ont été utilisées avec application éventuelle de cœfficients d'hydraulicité.

Pour la clarté du dessin, seuls 285 postes pluviométrtiques ont été portés sur la carte des isohyètes (carte détaillée en hors texte, et carte simplifiée : graphe 2.20).

Deux arguments sont en faveur du tracé des isohyètes à partir de moyennes interannuelles calculées sur la période homogénéisée.

- Pour une station donnée, les moyennes calculées sur différentes périodes (suffisamment longues) ne diffèrent pratiquement pas de la moyenne calculée sur l'ensemble des observations à la même station.
- Les valeurs médianes sont très proches des moyennes (cœfficient de corrélation $\approx 0.999$).

Le tracé des isohyètes interannuelles est basé sur un compromis entre les valeurs des pluies moyennes précédemment définies et les effets du relief. Cependant, il ne faut pas considérer les tracés comme de simples tra-

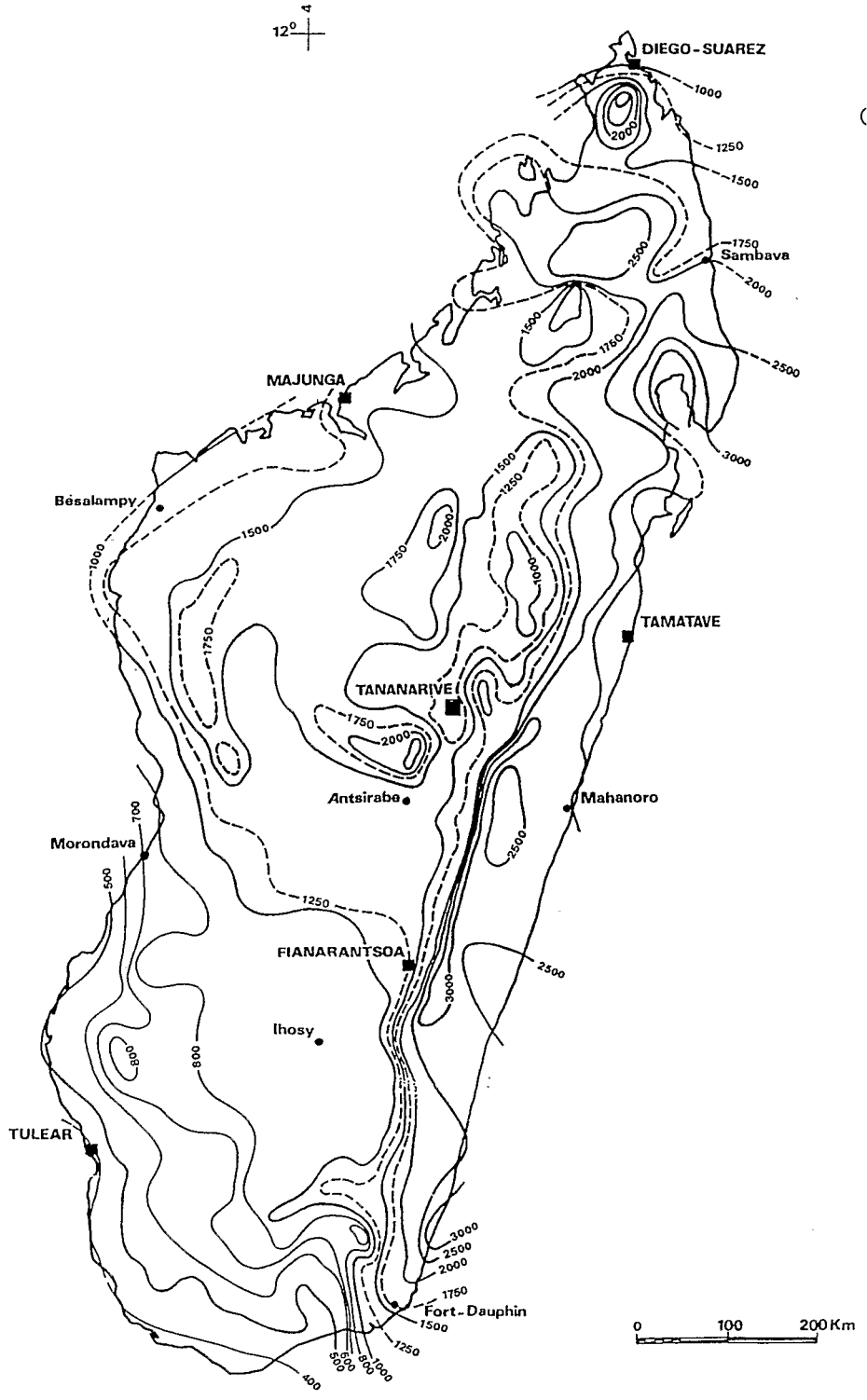



figure 2.20.

Carte des isohètes interannuelles (cf. carte plus détaillée en hors-texte)

ductions des courbes de niveau en isohyètes notamment pour la cote est où les effets de barrière et de couloir ont été pris en considération.

### 7.1.1.3. Les régimes pluviométriques

Les régimes pluviométriques présentent une grande diversité avec des pluies moyennes annuelles observées comprises entre 377 mm à Faux-Cap au sud et 3 792 mm à Maroantsetra au nord, dans la baie d'Antongil.

Les observations seules indiqueraient que la zone la plus arrosée se situerait au fond de la baie d'Antongil, avec des **maximums** annuels supérieurs à 5 000 mm à Maroantsetra. Mais, et cette hypothèse semble confirmée par les débits observés, des pluies **moyennes** annuelles supérieures à 5 000 mm sont probables sur le massif du Tsaratanana.

Afin de mieux caractériser la variété des régimes pluviométriques de Madagascar cinq profils ouest-est sont présentés ci-après (graphes 2.21 à 2.25) :

profil 1 : Baie de Narinda / Bealanana /Région de Diego-Suarez
profil 2 : Majunga / Tamatave
profil 3 : Delta du Manambolo / Vatomandry
profil 4 : Tulear / Namorona
profil 5 : Itampolo / Manatenina

figure 2.21

Profil1 de la baie de Narinda à la région d'Antsiranana

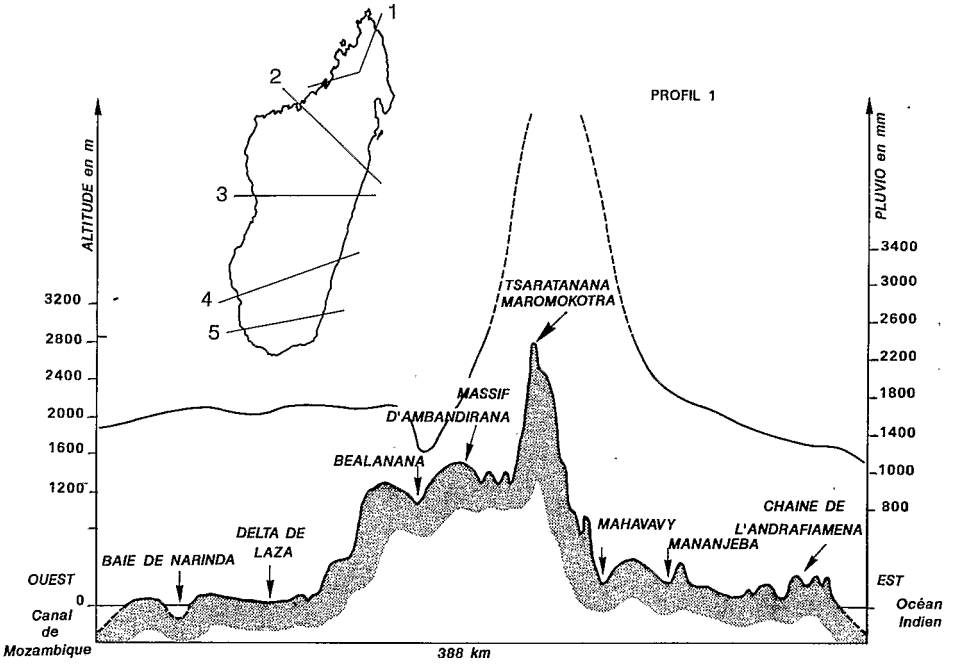


figure 2.22

Profil 2
de Mahajanga
à Toamasina

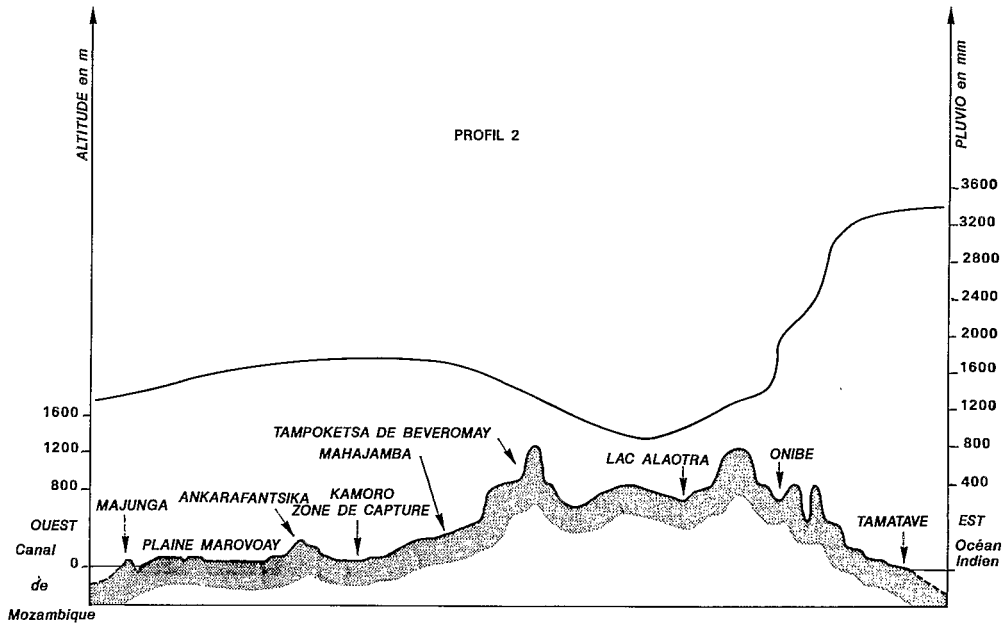
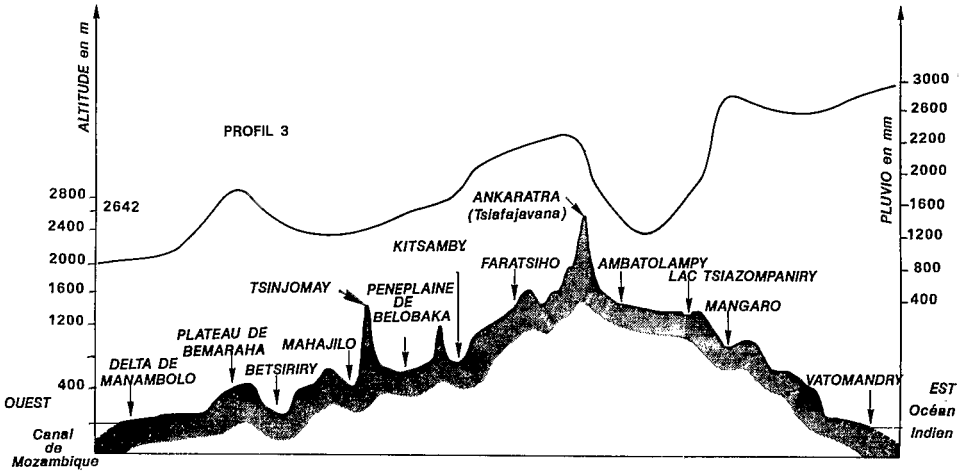



figure 2.23

Profil 3 du delta du
Manambolo à
Vatomandry




Avec la présence des massifs de la Montagne d'Ambre et du Tsaratanana, le nord de l'île présente un ensemble bien différencié des autres régions. Cette région est en effet soumise d'une part, aux alizés du sud-est sur sa bordure orientale et, d'autre part, aux vents de nord-ouest sur le versant occidental.

figure 2.24

Profil 4 de Toliara à Namorona

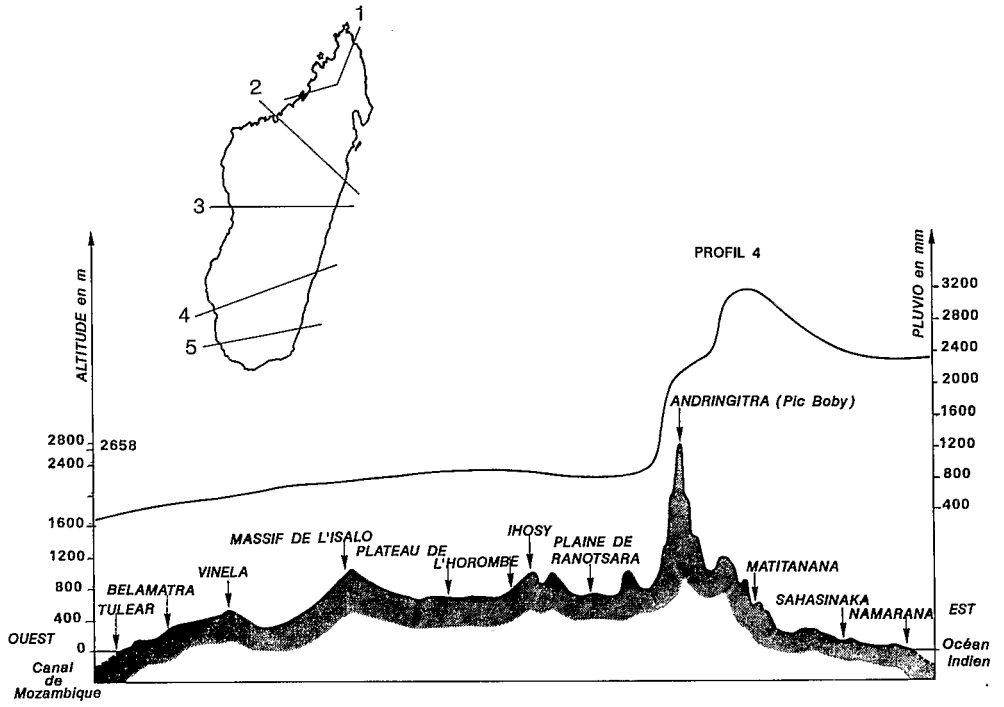
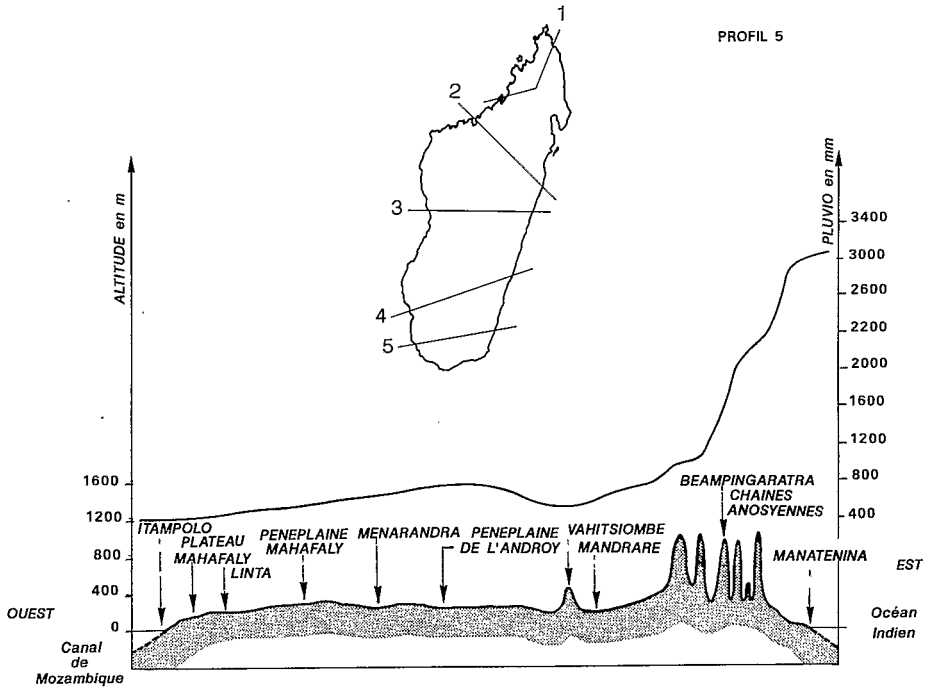



figure 2.25

Profil 5 d'Itampolo à Manatenina




A ces deux flux, il faudrait également ajouter ce que certains auteurs ont appelé "l'anomalie du climat du Sambirano". En effet entre Ambilobe et Maromandia, on observe un régime pluviométrique qui ressemble à celui de la côte orientale, avec des pluies abondantes de décembre à avril et la présence de précipitations de 50 mm à 100 mm pendant les mois de juillet, août et septembre. Cette particularité du climat du versant ouest du Tsaratanana serait due à la présence du massif montagneux qui, obligeant les alizés à contourner l'obstacle, créerait sous le vent, une dépression capable d'attirer un courant de nord ouest très humide accompagné de pluies aussi importantes que celles enregistrées à l'est du massif.

•Les stations de Diégo-Suarez (1 032 mm), de Andranofanjava (1 961 mm) et de Roussettes (3 301 mm) permettent le tracé des isohyètes de la Montagne d'Ambre avec en son sommet (1 475 m) des précipitations proches de 3 500 mm.

tableau 2.6.

Madagascar : précipitations moyennes interannuelles

| STATION | P. AN. (mm) | STATION | P. AN. (mm) |
|---|---|---|---|
| ALAROBIA CENTRE | 1318 | AMPANGABE MORAMANGA | 902 |
| ALAROBIA TSF | 1256 | AMPANIHY OUEST | (570) |
| ALATSINAINY-BAKARO | 1205 | AMPANOTOKANA | 1415 |
| ALBRAND PHARE | (2774) | AMPARAFARAVOLA ALAO | 1109 |
| AMBAHIKILY | (552) | AMPASIKELY ALAO | 1311 |
| AMBAKIRENY ALAO | (1450) | AMPASIMBE | (2859) |
| AMBALAVAO CENTRE | 1332 | AMPASIMPOTSY MASSE | 1799 |
| AMBALAVAO SUD | 956 | AMPASINAMBO | 2582 |
| AMBANJA | 2091 | AMPEFY | 1520 |
| AMBARARATA BEFANDRIANA | (1654) | ANABORANO | (1967) |
| AMBATO BOENI | (1482) | ANALALAVA | (1763) |
| AMBATOBE | 1357 | ANALAMAZAOTRA | 1776 |
| AMBATOFINANDRAHANA | 1270 | ANARAFALY | 496 |
| AMBATOFOTSY GARE | 1281 | ANDAINGO ALAO | 1230 |
| AMBATOLAHY | 1293 | ANDAPA VILLE | 1874 |
| AMBATOLAMPY ALAO | 979 | ANDEKALEKA-ROGEZ | 2885 |
| AMBATOLAMPY GARE | 1405 | ANDETSY | 506 |
| AMBATOLAONA | 1875 | ANDEVORANTO | 2352 |
| AMBATOMAFANA ALAO | 1138 | ANDILAMENA ALAO | 1112 |
| AMBATOMAINTY AERO | (1643) | ANDILANATOBY ALAO | 1172 |
| AMBATOMAINTY SUD | 1282 | ANDRAMASINA | 1253 |
| AMBATOMANGA | 1582 | ANDRAMBOVATO | 3247 |
| AMBATONDRAZAKA AERO ALAO | 1091 | ANDRAMOSABE ALAO | 1111 |
| AMBATONDRAZAKA VIL. ALAO | 1056 | ANDRANOBE ALAO | 1114 |
| AMBATOSORATRA ALAO | 974 | ANDRANOFANJAVA | (1961) |
| AMBATOTSIPIHINA ECOLE | 1307 | ANDRANOMANELATRA | 1390 |
| AMBATOVOLA TCE | 2968 | ANDRANOMENA ALAO | 978 |
| AMBILA LEMAITSO | 2963 | ANDRANOPASY | (461) |
| AMBILOBE SOSUMAV | (1858) | ANDRIAMBILANY Gare | 1363 |
| AMBOANJOBE | 2892 | ANDRIAMENA | (1518) |

suite

| STATION | P.AN. (mm) | STATION | P.AN. (mm) |
|---|---|---|---|
| AMBOASARY MORAMANGA | 1657 | ANDRIBA FORET | (1773) |
| AMBOASARY SUD | 491 | ANDROKA | (411) |
| AMBODIRANO MANGORO | 1628 | ANGAVOKELY | 1441 |
| AMBOHIBARY ANTSIRABE | 1463 | ANIVORANO EST | 2759 |
| AMBOHIDRABIBY | 1219 | ANJANABORONA | (1249) |
| AMBOHIDRATRIMO | 1243 | ANJEVA | 1296 |
| AMBOHIDRONY ALAO | 1819 | ANJIRO | 1269 |
| AMBOHIJANAHARY SCM ALAO | 1091 | ANJOZOROBE | 1373 |
| AMBOHIJANAKA | 1228 | ANKADIMANGA | 1610 |
| AMBOHIMAHASOA | 1238 | ANKADINANDRIANA | 1163 |
| AMBOHIMANDROSO AMBALAVAO | 957 | ANKADINONDRY (BABETH-VILLE) | 1576 |
| AMBOHIMANDROSO ANTSIRABE | 1309 | ANKARIMBELO | 2797 |
| AMBOHIMANDROSO ITAOSY | 1188 | ANKAVANDRA | 1310 |
| AMBOHIMANGAKELY | 1272 | ANKAZOABO SUD | (758) |
| AMBOHIMIADANA | 1254 | ANKAZOBE | (1423) |
| AMBOHIPANDRANO | 1368 | ANKAZOMIRIOTRA | 1306 |
| AMBOHITRAIVO | 1523 | ANKIABE (BEALANANA) | (1798) |
| AMBOHITRANDRIAMANITRA | 1464 | ANKILIABO | (558) |
| AMBOHITSILAOZANA ALAO | 1110 | ANKILIVALO | 767 |
| AMBONDRONA ALAO | 1303 | ANKILIZATO | 977 |
| AMBONGALAVA ALAO | 1354 | ANORORO ALAO | 1074 |
| AMBOSITRA | 1448 | ANOSIBE ANDRAMASINA | 1323 |
| AMBOVOMBE FERME | 575 | ANOSIBE AN ALA | 2141 |
| AMPAMAHERANA | 1611 | ANOSIROA ALAO | 1361 |
| AMPANDRANDAVA | 1004 | ANOVIARA | (2566) |
| ANTALAHA (VANILLE) | 2218 | DIEGO-SUAREZ | 1032 |
| ANTANAMALAZA | 1139 | DJANGOA | (1910) |
| ANTANAMBAO ALAO | 1147 | DOANY (ANDAPA) | (1546) |
| ANTANAMBE | (2867) | EBELO | 578 |
| ANTANIFOTSY | 1361 | EMINIMINY | 1783 |
| ANTANIFOTSY ALAO | 1072 | ESIRA | 838 |
| ANTANIMENA TSF | 1224 | FANDRANDAVA | 1862 |
| ANTANIMENABAKA ALAO | 1022 | FANDRIANA | 1719 |
| ANTANIMORA | 595 | FANOVANA | 2972 |
| ANTELOMITA | 1194 | FARAFANGANA | 2518 |
| ANTENINA | (2273) | FARATSIHO | 2094 |
| ANTOKAZO ALAO | 1141 | FAUX CAP | (377) |
| ANTONIBE | (1572) | FENERIVE EST | 2711 |
| ANTSALOVA | 1629 | FENOARIVO CENTRE | (1497) |

suite

| STATION | P.AN. (mm) | STATION | P.AN. (mm) |
|---|---|---|---|
| ANTSAPANDRANO FORETS | 1677 | FENOARIVO SUD | (946) |
| ANTSEVABE ALAO | 942 | FIADANANA | 1220 |
| ANTSIRABE AERO | 1512 | FIANARANTSOA | 1209 |
| ANTSIRABE ECOLE | 1457 | FIHAONANA | (1467) |
| ANTSIRABE NORD | (1789) | FORT CARNOT | 3211 |
| ANTSIRABE PEPINIERE | 1425 | FORT DAUPHIN | 1557 |
| ANTSOHIHY AERO | 1507 | FOULPOINTE | 3115 |
| ANTSOHIHY VILLE | (1575) | GERAUD-RAZANAKA | 2563 |
| ARIVONIMAMO AERO | 1466 | IALATSARA | 1329 |
| ARIVONIMAMO VILLE | 1296 | IFANADIANA | (2509) |
| BEALANANA VILLE | (1212) | IFARANTSA | 1930 |
| BEFANDEFA | ( 521) | IFOTAKA (MANDRARE) | 498 |
| BEFANDRIANA SUD | ( 778) | IHAZOLAVA | 1265 |
| BEFANDRIANA NORD | 1906 | IHOSY | (812) |
| BEFOTAKA SUD | 1743 | IKALAMAVONY | 963 |
| BEHARA VILLE | 482 | ILAKA CENTRE | 1272 |
| BEHENJY | 1269 | ILAKA EST (I.F.C.C.) | 2737 |
| BEKILY | (734) | ILEMPONA | 1210 |
| BEKODOKA | (1464) | IMANOMBO | 773 |
| BELO SUR MER | (554) | IMERIMANDROSO ALAO | 922 |
| BELO SUR TSIRIBIHINA | 815 | IMERINTSIATOSIKA | 1267 |
| BELOBAKA | 1477 | ISAKA IVONDRO | 1798 |
| BELOHA | (466) | ISALO | 1260 |
| BEMARIVO | (790) | ISOANALA | (885) |
| BENENITRA | (668) | IVATO AERO | 1343 |
| BERAKETA | 805 | IVOHIBE | 885 |
| BERAVINA | 1414 | IVOLOINA (AGRO) | 2942 |
| BEREVO RANOBE | (1366) | KANDREHO | (1591) |
| BEREVO TSIRIBIHINA | 1299 | KIANJASOA | 1510 |
| BEROROHA | ( 796) | KIRANOMENA | 1635 |
| BESALAMPY | 1420 | LA BOURDONNAIS AMBODIVANDRIK | 2726 |
| BETAFO | 1447 | LOHARIANDAVA JUNCK TCE2846 | |
| BETANATANANA | 973 | MADIORANO | 2675 |
| BETROKA | (882) | MAEVATANANA | (1589) |
| BEZAHA (SEDEFITA) | (582) | MAHABE | 1443 |
| BOSY | 848 | MAHABO | 806 |
| BRICKAVILLE VOHIBINANY | 2913 | MAHAJAMBA | (1272) |
| CAP D'AMBRE | (979) | MAHAKARY ALAO | 1313 |

suite

| STATION | P.AN. (mm) | STATION | P.AN. (mm) |
|---|---|---|---|
| CAP EST | (2618) | MAHALY | 657 |
| CARION | 1242 | MAHANORO VILLE | 2829 |
| DIDY ALAO | 1083 | MAHASOA | (826) |
| MAHASOLO | 1992 | MORAMANGA | 1642 |
| MAHATSINJO (MAEVATANANA) | (1810) | MORARANO SUD SCM ALAO | 1344 |
| MAHITSY | 1315 | MOROMBE AERO | (496) |
| MAINTIRANO AERO | 1086 | MORONDAVA AERO | 780 |
| MAJUNGA VILLE | (1503) | MOUNEYRES-FANASANA | 2691 |
| MALAIMBANDY | 1332 | NANOKELY | 1750 |
| MAMPIKONY | (1446) | NOSY AKAO | (1210) |
| MANAKAMBAHINY EST ALAO | 1304 | NOSY ANAMBO | (937) |
| MANAKARA VILLE | 2506 | NOSY IRANJA | (2060) |
| MANAMBARO | 1235 | NOSY LAVA | (1780) |
| MANANARA NORD | (2314) | NOSY VARIKA | 2717 |
| MANANDAZA | 1352 | PORT BERGE | 1482 |
| MANANDONA | 1327 | RANOHIRA | (942) |
| MANANDRAY | 1198 | RANOMAFANA BRICKAVILLE2818 | |
| MANANJARY VILLE | 2739 | RANOMAFANA IFANADIANA2644 | |
| MANANKAZO VILLE (FOFIFA) | 1932 | RANOMAFANA SUD | 1794 |
| MANDABE | ( 783) | RANOPISO | 907 |
| MANDOTO | 1482 | RANOTSARA ATSIMO | 1153 |
| MANDRAKA-LE | 2402 | RENDRIRENDRY | 3160 |
| MANDRITSARA | 1091 | ROUSSETTES | 3301 |
| MANDROSEZA | 1231 | SAHAMBAVY GARE | 1602 |
| MANGABE | 1106 | SAHANIDINGANA ALAO | 1160 |
| MANGALIMASO AERO | (3306) | SAKALALINA | (748) |
| MANGINDRANO | (1253) | SAKARAHA VILLE | (764) |
| MANGORO GARE | 1585 | SAKOAMADINIKA ALAO | 1095 |
| MANJA | (875) | SAMBAINA ANTSIRABE | 1264 |
| MANJAKANDRIANA | 1631 | SAMBAVA | 2388 |
| MANJAKATOMPO | 1912 | SENDRISOA BEANANA | 1193 |
| MANOHILAHY ALAO | 1486 | SITAMPIKY | (1511) |
| MANOMBO SUD | (460) | SOALALA | (1121) |
| MANTASOA BARRAGE | 1750 | SOALAZAINA SCM ALAO | 1305 |
| MANTASOA ECOLE | 1638 | SOAMANJAKA | 1490 |
| MARERANO | (884) | SOANIERANA IVONGO | (3148) |
| MAROANTSETRA VILLE | 3792 | SOANINDRARINY | 1286 |
| MAROHOTRO | 512 | SOAVINA (AMBATOFINANDRAHANA) | 1182 |
| MAROLAMBO | 1983 | SOAVINA (BETAFO) | 1262 |

suite

| STATION | P.AN. (mm) | STATION | P.AN. (mm) |
|---|---|---|---|
| MAROMANDIA | (1690) | SOAVINANDRIANA | 1865 |
| MAROTANDRANO | (1100) | SOLILA | 975 |
| MAROTSIRAKA | 716 | TAMATAVE AERO | 3305 |
| MAROVATO | (1149) | TAMBOHORANO | 1373 |
| MAROVITSIKA | 2001 | TAMPINA | 2824 |
| MAROVOAY | (1479) | TANAMBE ALAO | 1218 |
| MAROVOAY MLA | 1437 | TANANARIVE OBSERVATOIRE | 1346 |
| MAROVOAY OUEST | 1336 | TANANARIVE S.C.M. | 1304 |
| MASOARIVO | 875 | TANDRANO | (757) |
| MERIKANJAKA | 1442 | TRANOROA | (619) |
| MERIMANDROSO CENTRE | 1406 | TSARAHONENANA | (1774) |
| MIADANIMERINA | 1302 | TSARASAOTRA ALAO | 1274 |
| MIANDRIVAZO | 1233 | TSARATANANA | (1722) |
| MIANTSO | 1342 | TSIAZOMPANIRY | 1515 |
| MIANTSOARIVO | 1411 | TSIHOMBE | (483) |
| MIARINARIVO ITASY | 1531 | TSIMBAZAZA | 1255 |
| MIARINARIVO NORD | (1170) | TSINJOARIVO | 1455 |
| MIDONGY SUD | (1625) | TSIROANOMANDIDY | 1724 |
| MORAFENOBE | 1835 | TSIVORY | 799 |
| TULEAR VILLE | (390) | VOHIMASINA (FORGEOT) | 1186 |
| VANGAINDRANO | 2559 | VOHIMENAKELY ALAO | 1094 |
| VATOMANDRY | 3012 | VOHIPARARA | 2997 |
| VAVATENINA | 2113 | VOHITSARA ALAO | 1147 |
| VOHEMAR VILLE | 1639 | VOLOBE | 3191 |
| VOHIDIALA ALAO | 1202 | VONDROZO | 2422 |
| VOHILAVA | 1940 | | |

• En revanche, le tracé des isohyètes du massif du Tsaratanana n'a pu être réalisé au- dessus de l'isohyète 2 500 mm faute d'observation pluviométrique (profil n° 1). Les valeurs de débit enregistrées sur le pourtour du Tsaratanana y indiqueraient de très fortes précipitations. Les précipitations moyennes annuelles pourraient atteindre 5 000 mm à 7 000 mm par an sur certains sommets (2 876 m au pic de Maromokotro). Ces valeurs extrêmes ne seraient pas incompatibles avec celles enregistrées dans d'autres pays. Rappelons à ce sujet des moyennes annuelles dépassant 10 000 mm par an à l'île de la Réunion située à moins de 1 000 km au sud-est (3 069 m au Piton des Neiges).

D'une manière générale, nous observons du nord au sud de l'île (graphes 2.21 à 2.25) :

• une certaine homogénéité des précipitations (2 500 mm à 3 500 mm) entre la côte et les premiers reliefs de la bordure orientale, ceci depuis le Cap est jusqu'à Fort Dauphin ; reliefs marquant une véritable barrière entre les versants est et ouest. Le versant est est caractérisé par des pluies abondantes y compris pendant les mois de juillet à septembre pendant lesquels des précipitations proches de 200 mm/mois sont courantes. Les minima sont généralement observés aux mois d'octobre et novembre ;

• une diminution progressive des pluies moyennes annuelles sur la cote ouest depuis Analalava à (1 763 mm) au nord jusqu'à Faux-Cap au sud (377 mm). Dans la zone aride du sud et du sud-ouest, notons que les dépressions polaires maintiennent une certaine pluviosité même pendant la saison sèche ;
• des saisons bien différenciées sur tout le versant ouest ainsi que sur les hautes terres.

En ce qui concerne les variations pluviométriques d'est en ouest, l'effet orogénique semble prépondérant ; effet sur lequel s'ajoute, sur le versant ouest et les hautes terres du centre de l'île, l'influence des flux de nord-ouest et des alizés du sud-est. Les profils 2,3,4 et, d'une manière moins nette le profil 5 montrent l'influence de ces facteurs sur les précipitations.

Ainsi, en dehors des fortes pluies de la bordure est dont il a été question précédemment soulignons :

• dans la partie nord-ouest de l'île au nord de l'axe Majunga Maevatanana une zone à pluviométrie relativement importante comprise entre 1 500 mm et 2 000 mm due à la perte de l'humidité des vents de nord-ouest au contact des premiers escarpements (profil n° 2) ;
• l'accroissement sur un gradient faible, des précipitations depuis la cote ouest, de Maintirano à Faux Cap, jusqu'aux hautes terres centrales (profil 3 à 5) ;
• une pluviosité moindre au niveau de la gouttière qu'occupent les hauts bassins du Maningory (région rizicole du lac Aloatra) et du Mangoro (région de Moramanga) par rapport aux régions voisines (profil n° 2) ;
• des précipitations abondantes sur les massifs de l'Ankaratra et de l'Andringintra (environ 2500 mm), et sur le plateau du Bemaraha (supérieure à 1 750 mm).

Le profil 5 est très représentatif du contraste entre versants est et ouest. Ce contraste est particulièrement visible lorsque, sur quelques dizaines de kilomètres, en allant de Fort Dauphin à Ambovombe les pluies moyennes annuelles passent de plus de 1 500 mm à moins de 500 mm. Ainsi, au niveau du col de Ranopiso (907 mm) la végétation passe rapidement de la forêt luxuriante de l'est à la pseudo steppe arbustive du sud ouest.

Cet aperçu sur les pluies à Madagascar est évidemment encore très incomplet. Une étude plus détaillée ne pourra être entreprise que lorsque le programme "Banque de données hydroclimatologiques de Madagascar" sera achevé. La possibilité de disposer sur support informatique de la quasi totalité des informations pluviométriques devrait permettre de procéder de manière sérieuse à l'étude des précipitations à divers pas de temps.

Dans l'immédiat, la carte des isohyètes interannuelles qui vient d'être présentée ne doit être considérée que comme un outil de travail et de réflexion. A priori, les résultats semblent très acceptables. Des informations complémentaires issues de la banque de données ne permettraient d'affiner le tracé des isohyètes que pour les régions à forte concentration de postes pluviométriques. Mais seules des mesures complémentaires et de longue durée pourraient dans l'état actuel de nos connaissances résoudre les nombreuses incertitudes qui demeurent pour certaines région de Madagascar et notamment sur les sommets.

### 7.1.2. Distribution statistique des précipitations annuelles

Trente-cinq stations présentant des chroniques de quarante années ou plus ont fait l'objet d'ajustements statistiques. Leur répartition dans les différents versants hydrologiques (zones 1 à 7) est la suivante :

1 - 3 stations sur le versant nord et la montagne d'Ambre
2 - 2 stations sur le TSARATANANA
3 - 11 stations sur le versant oriental

4 - 8 stations sur les Hautes-Terres
5 - 3 stations sur les hauteurs intermédiaires du Moyen ouest
6 - 5 stations sur la côte ouest
7 - 2 stations sur la côte sud

La plus longue période (1880-1970) a été observée à la station d'ANTANANARIVO-observatoire.

Sept fonctions statistiques (Gauss, Galton, Gumbel, exponentielle, Fichet, Goodrich et Pearson III) ont été essayées. Les meilleurs ajustements retenus pour chaque station ont permis d'obtenir les valeurs des quantiles jusqu'aux centennales.

Le tableau 2.7. consigne les différentes valeurs obtenues.

Sur la quasi-totalité des stations, il ne semble pas exister une adéquation correcte des échantillons à une fonction unique. Pour les années humides, tel ajustement convient bien alors que pour les années sèches, c'est un autre ajustement qui s'adapte mieux.

La fonction de répartition qui s'adapte le plus fréquemment (vingt fois sur trente huit) est la loi de Goodrich, puis pour sept stations, la loi de Galton et pour six autres, la loi de Gumbel. Les lois de Gauss et ou Pearson III conviennent respectivement pour une station seulement.

On constate qu'à l'inverse de ce que l'on observe pour de nombreux régimes tropicaux non cycloniques, il n'y a pas de tendance particulière à un bon ajustement de la loi de Gauss pour les hauteurs de précipitation annuelle dépassant 1 500 à 1 800 mm par an. Ceci est dû à l'apparition des précipitations cycloniques qui pourraient donner lieu à l'apparition de deux popu-lations statistiques distinctes (avec et sans cyclone) ce qui pourrait expliquer la grande difficulté à l'adaptation d'une fonction de répartition unique.

L'observation des échantillons expérimentaux a montré l'existence d'anomalies dans les distributions (hauteurs semblant trop fortes en années humides ou sèches) : Antsiranana, Fenerive, Moramanga, Andapa, entre autres. Ceci complique le choix de la meilleure adéquation.

L'irrégularité interannuelle, caractérisée par le rapport K3 des décennales humides et sèches, varie entre 1.5 et 3.3.

Les valeurs les plus faibles (1.5 à 1.8) sont observées sur la côte orientale (là ou les précipi-tations annuelles sont en général les plus fortes). Les fortes valeurs (1.8 à 3.3) sont observées pour les pluviométries les plus faibles (côte sud-ouest et extrême sud, région d'Antsaranana) et caractérisent, en particulier, les régions arides. Les valeurs intermédiaires (1.6 à 2) sont observées sur les hauts plateaux et tendent à augmenter lorsque l'on va vers l'ouest, en même temps que diminuent les précipitations annuelles (graphe 2.26.).

## 7.2. Précipitations moyennes sur les bassins fluviaux

Pour les stations hydrométriques de référence (une quarantaine) particulièrement étudiées dans cet ouvrage, les précipitations mensuelles moyennes sur les bassins versants ont été calculées par la méthode de Thiessen.

Le tableau 2.8. rassemble les valeurs interannuelles des précipitations sur les différents bassins.

Une remarque s'impose : la méthode de Thiessen, pour être efficace, implique une pluviométrie sur le bassin pas trop hétérogène et sans gradient trop élevé. De plus, les postes pluviométriques utilisés doivent être bien répartis et présenter une densité minimale.

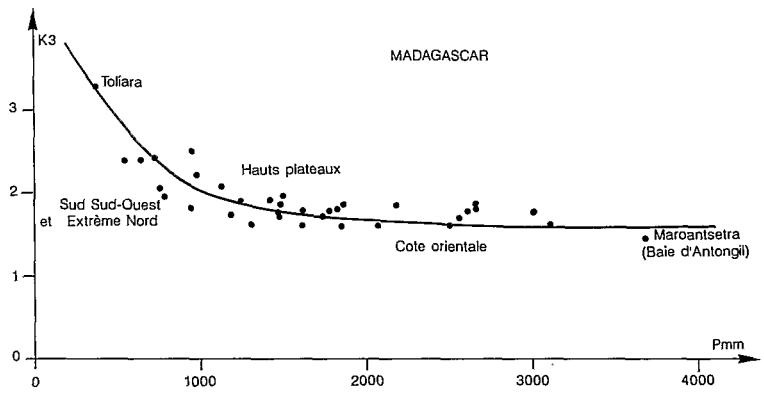
tableau 2.7.

Précipitations annuelles
à Madagascar (mm)

| | | Années déficitaires | | | | | | Années excédentaires | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Récurrence | 100 | 50 | 20 | 10 | 5 | méd | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | Période | Loi |
| Zones | Stations | | | | | | | | | | | | | |
| | Antsinanara | 397 | 444 | 521 | 597 | 700 | 943 | 1269 | 1485 | 1692 | 1961 | 2162 | 1921/1974 | Gumbel |
| 1 | Ambilobe | 1126 | 1181 | 1270 | 1358 | 1477 | 1759 | 2138 | 2388 | 2629 | 2940 | 3174 | 1920/1974 | Gumbel |
| | Vohemar | 984 | 1000 | 1038 | 1090 | 1181 | 1493 | 1804 | 2111 | 2346 | 2633 | 2837 | 1901/1971 | Goodrich |
| 2 | Ambanja | 1112 | 1195 | 1340 | 1485 | 1677 | 2067 | 2464 | 2668 | 2833 | 3019 | 3134 | 1927/1973 | Goodrich |
| | Andapa | 1267 | 1292 | 1347 | 1417 | 1531 | 1840 | 2238 | 2511 | 2736 | 3005 | 3192 | 1935/1974 | Goodrich |
| | Antalaha | 1197 | 1272 | 1407 | 1549 | 1745 | 2166 | 2618 | 2898 | 3053 | 3277 | 3424 | 1913/1974 | Goodrich |
| | Maroantsetra | 2467 | 2578 | 2767 | 2931 | 3190 | 3664 | 4132 | 4368 | 4559 | 4767 | 4902 | 1921/1973 | Goodrich |
| | Fenerive | 1532 | 1634 | 1800 | 1962 | 2177 | 2656 | 3242 | 3597 | 3920 | 4318 | 4606 | 1930/1970 | Galton |
| | Ivoloina | 2134 | 2167 | 2242 | 2343 | 2514 | 3006 | 3706 | 4146 | 4543 | 5023 | 5362 | 1921/1972 | Goodrich |
| | Moramanga | 800 | 866 | 968 | 1071 | 1205 | 1485 | 1800 | 1989 | 2149 | 2339 | 2473 | 1927/1979 | Pearson 3 |
| 3 | Vatomandry | 1743 | 1902 | 2140 | 2352 | 2600 | 3099 | 3587 | 3846 | 4037 | 4295 | 4454 | 1927/1977 | Gauss |
| | Mananjary | 1749 | 1796 | 1892 | 2009 | 2191 | 2654 | 3239 | 3582 | 3879 | 4228 | 4468 | 1901/1979 | Goodrich |
| | Manakara | 1551 | 1648 | 1805 | 1957 | 2158 | 2602 | 3137 | 3459 | 3750 | 4107 | 4364 | 1928/1975 | Galton |
| | Farafangana | 1701 | 1775 | 1896 | 2015 | 2176 | 2557 | 3069 | 3400 | 3733 | 4154 | 4469 | 1901/1971 | Gumbel |
| | Vangaindrano | 1732 | 1818 | 1924 | 2029 | 2172 | 2509 | 2961 | 3261 | 3549 | 3921 | 4199 | 1935/1975 | Gumbel |
| | Tôlanaro | 976 | 1036 | 1132 | 1225 | 1348 | 1619 | 1944 | 2139 | 2315 | 2530 | 2684 | 1924/1975 | Galton |
| | Mandritsara | 751 | 761 | 787 | 825 | 895 | 1117 | 1467 | 1700 | 1917 | 2188 | 2403 | 1901/1975 | Goodrich |
| | Tsaratanana | 1198 | 1223 | 1277 | 1344 | 1431 | 1732 | 2099 | 2310 | 2510 | 2738 | 2895 | 1920/1971 | Goodrich |
| | Ankazobe | 1046 | 1060 | 1095 | 1142 | 1222 | 1455 | 1790 | 2001 | 2193 | 2426 | 2590 | 1920/1975 | Goodrich |
| 4 | Antananarivo | 851 | 895 | 966 | 1033 | 1120 | 1309 | 1529 | 1658 | 1773 | 1912 | 2011 | 1880/1970 | Galton |
| | Faratsiho | 1224 | 1252 | 1315 | 1394 | 1520 | 1857 | 2301 | 2569 | 2805 | 3084 | 3278 | 1932/1972 | Goodrich |
| | Ambositra | 909 | 962 | 1048 | 1130 | 1239 | 1476 | 1759 | 1928 | 2080 | 2265 | 2398 | 1900/1976 | Galton |
| | Fianarantsoa | 725 | 768 | 837 | 904 | 992 | 1185 | 1416 | 1554 | 1670 | 1829 | 1938 | 1901/1979 | Galton |
| | Ihosy | 445 | 473 | 520 | 566 | 628 | 776 | 974 | 1105 | 1231 | 1394 | 1517 | 1928/1975 | Gumbel |
| | Ivohibe | 517 | 550 | 609 | 671 | 754 | 931 | 1118 | 1216 | 1297 | 1307 | 1447 | 1935/1975 | Goodrich |
| 5 | Maevatanana | 1043 | 1098 | 1105 | 1260 | 1377 | 1611 | 1805 | 2047 | 2191 | 2365 | 2488 | 1939/1970 | Galton |
| | Miandrivazo | 626 | 676 | 765 | 856 | 978 | 1233 | 1498 | 1636 | 1749 | 1875 | 1957 | 1928/1972 | Goodrich |
| | Ankazoabo/sud | 399 | 422 | 465 | 514 | 585 | 752 | 946 | 1054 | 1146 | 1250 | 1321 | 1924/1975 | Goodrich |
| | Analabava | 990 | 1068 | 1191 | 1315 | 1480 | 1820 | 2170 | 2350 | 2497 | 2660 | 2767 | 1931/1974 | Goodrich |
| | Mahajanga | 968 | 983 | 1020 | 1070 | 1157 | 1417 | 1799 | 2043 | 2267 | 2539 | 2733 | 1907/1971 | Goodrich |
| 6 | Maintirano | 528 | 550 | 597 | 654 | 745 | 979 | 1280 | 1459 | 1615 | 1798 | 1925 | 1928/1979 | Goodrich |
| | Morondava | 312 | 347 | 404 | 460 | 536 | 716 | 957 | 1117 | 1270 | 1468 | 1617 | 1901/1975 | Gumbel |
| | Toliara | 88 | 106 | 142 | 181 | 237 | 367 | 515 | 597 | 666 | 744 | 797 | 1911/1974 | Goodrich |
| 7 | Betioky/sud | 263 | 288 | 335 | 388 | 462 | 631 | 822 | 926 | 1014 | 1113 | 1180 | 1928/1972 | Goodrich |
| | Ambovombe | 277 | 290 | 318 | 352 | 406 | 548 | 730 | 838 | 933 | 1043 | 1122 | 1928/1970 | Goodrich |

figure 2.26.

Évolution du rapport K3 avec la pluviométrie annuelle




Les conditions sont généralement remplies pour la plupart des stations des hauts plateaux centraux et du sud. Par contre, en particulier sur le versant oriental, pour une bonne moitié des bassins, les postes existants, utilisés pour le calcul, ont une représentativité très insuffisante : faible densité, localisation dans les vallées habitées ou le long des axes routiers, parfois en marge des bassins étudiés. Trop rares sont les postes situés dans les zones d'altitudes de ces bassins où les précipitations sont assez fortement sous-estimées. Les valeurs présentées ne doivent être considérées que comme des indices pluviométriques, plus ou moins bien corrélés avec les valeurs "vraies" difficiles à évaluer avec précision. Nous reviendrons sur ce point au cours de l'analyse, station par station, des données hydrologiques.

## 7.3. Variations saisonnières des précipitations

Pour les stations disposant de longues périodes d'observation, nous avons calculé les précipitations moyennes mensuelles interannuelles ainsi que les cœfficients pluviométriques mensuels : ($m_i$ / moyenne interannuelle) x 1000, mi étant la moyenne de chaque mois. Les résultats sont rassemblés dans les deux tableaux donnés ci-après (2.9. et 2.10.).

Des histogrammes de la répartition mensuelle des précipitations dans les différentes régions de Madagascar sont présentés dans les graphes 2.27. à 2.29.

Les moyennes ont été calculées pour toutes les stations sur la période 1930-70 (novembre à octobre), mais pour quelques stations ayant une période plus longue, nous avons fait les moyennes sur la totalité de l'échantillon. Les écarts sont très faibles en saison sèche, un peu plus forts en saison des pluies mais ne dépassant jamais 10 %.

En toutes régions, les mois les plus abondants sont : décembre, janvier, février et mars. Le maximum se présente le plus souvent en janvier sur les hautes terres, le versant nord et TSARATANANA, le versant ouest et sud, alors que sur la côte orientale, la hauteur maximale mensuelle est toujours enregistrée en mars. Les stations de Moramanga, à la limite des hautes terres et Antalaha, à proximité du Tsaratanana, bien que situées sur le versant est, présentent un maximum en janvier.

figure 2.27.

Répartition mensuelle des précipitations

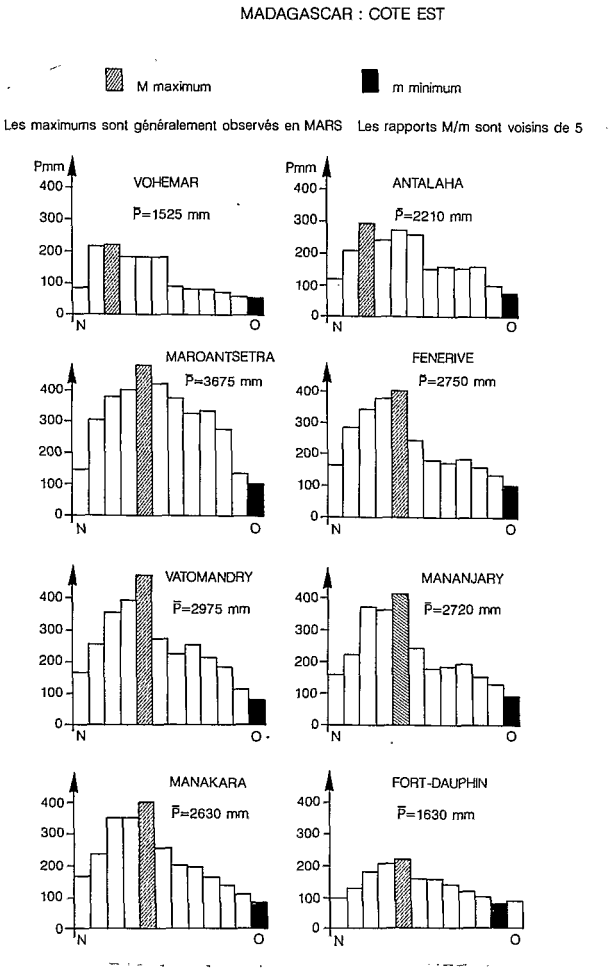
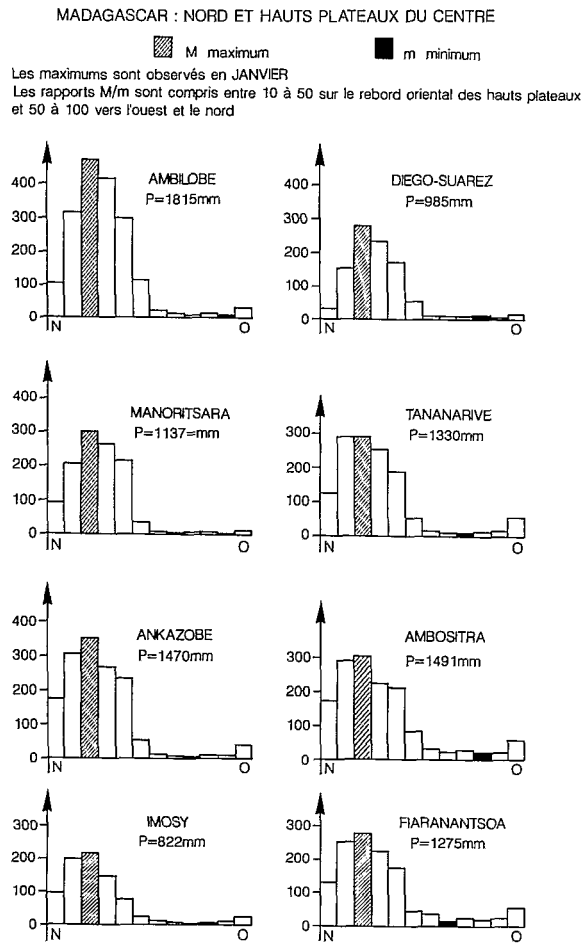



figure 2.28.

Répartition mensuelle des précipitations




La saison des pluies débute par quelques orages isolés courant octobre et s'installe vraiment en novembre sur toute la partie occidentale de l'île. Sur le versant oriental, les mois de septembre et octobre sont généralement les plus secs, mais ceci est très relatif. En effet, sur ce versant, les mois de saison fraîche (avril à septembre) reçoivent toujours des quantités d'eau assez importantes (très souvent supérieures à 100 mm), avec un léger maximum en juillet et août provoqué par le renforcement des alizés de sud-est qui perdent leur humidité à la rencontre de l'escarpement des hautes terres.

Par contre, le nord-ouest et l'ouest Malgaches, ont une saison sèche bien marquée, avec des précipitations nulles en juillet et août relativement fréquentes.

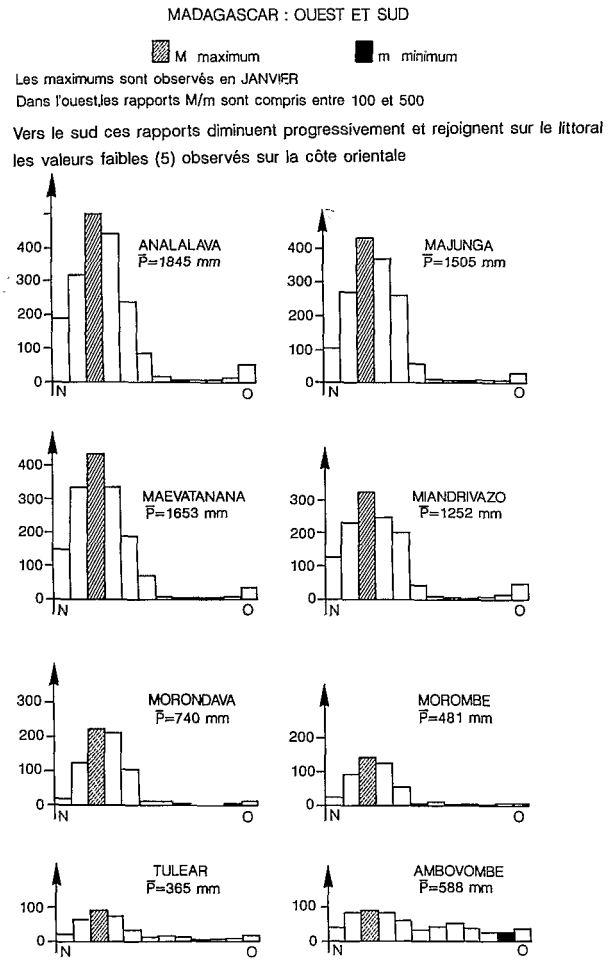



figure 2.29.

Répartition mensuelle des précipitations

Dans la zone aride du sud, les pluies sont peu abondantes de novembre à mars, toujours inférieures à 100 mm par mois. Pendant la saison fraîche, le passage des cyclones de front polaire apporte des quantités de pluies assez importantes ; les cœfficients pluviométriques des mois de juillet à octobre sont relativement élevés : TOLIARA, 10 à 40 et AMBOVOMBE, 37 à 55.

On constate en examinant le tableau (2.10.) des cœfficients pluviométriques, que les stations du littoral oriental, du nord au sud, présentent un rapport Max./Min. compris entre 4 et 6, ceci est la conséquence de la pluviosité assez forte observée en ces régions pendant les mois de saison fraîche. On retrouve des valeurs du même ordre dans l'extrême sud : AMBOVOMBE qui ne reçoit que 588 mm d'eau dans l'année, a un rapport de 4 comme MAROANTSETRA ou FENERIVE qui enregistrent des hauteurs annuelles sept à huit fois plus fortes. Dans les deux cas, il n'y a pas de distinction bien nette entre saison des pluies et saison "sèche".

tableau 2.8.

Pluviométrie moyenne selon Thiessen (mm et 1/10)

| Bassins et périodes | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RAMENA à AMBODIMANGA 1951-52, 1969-70 | 173.3 | 306.3 | 407.1 | 376.9 | 281.1 | 149.8 | 41.9 | 31.7 | 30.9 | 33.3 | 35..5 | 62.8 | 1930.7 |
| SAMBIRANO à AMBANJA 1951-52, 1969-70 | 161.1 | 297.5 | 386.0 | 354.7 | 271.0 | 141.4 | 39.7 | 29.4 | 28.6 | 31.7 | 32.9 | 58.8 | 1832.8 |
| IVONDRO à RINGARINGA 1949-50, 1969-70 | 129.1 | 207.6 | 276.9 | 210.5 | 260,2 | 96.3 | 69.7 | 81.8 | 87.5 | 93.2 | 46.1 | 50.3 | 1609.2 |
| MANGORO à MANGORO 1949-50, 1969-70 | 179.7 | 284.4 | 288.2 | 203.6 | 234.1 | 65.5 | 31.6 | 37.8 | 44.3 | 46.9 | 21.4 | 35.0 | 1472.5 |
| VOHITRA à ROGEZ 1949-50, 1969-70 | 168.1 | 284.6 | 318,9 | 248.8 | 270.1 | 88.1 | 62.7 | 77.8 | 94.6 | 88.5 | 48.9 | 45.7 | 1796.9 |
| VOHITRA à ANDEKALEKA 1949-50, 1969-70 | 172.2 | 294.3 | 339.9 | 280.5 | 309.0 | 109.8 | 83.5 | 99.5 | 119.6 | 115.9 | 61.1 | 54.4 | 2038.7 |
| RIANILA à BRICKAVILLE 1949-50, 1969-70 | 159.8 | 272.7 | 333.1 | 291.8 | 342.2 | 130.5 | 108.6 | 128.6 | 143.5 | 138.2 | 68.9 | 62.2 | 2180.1 |
| MANANJARY à ANTSINDRA 1945-46, 1969-70 | 163.3 | 296.2 | 335.1 | 276.6 | 285.7 | 98.8 | 65.7 | 62.2 | 66.2 | 57.6 | 47.3 | 51.0 | 1806.5 |
| IVOANANA à FATIHITRA 1945-46, 1969-70 | 146.0 | 273.6 | 324.0 | 286.3 | 295.7 | 100.4 | 74.0 | 72.0 | 78.8 | 71.5 | 52.9 | 49.8 | 1825.1 |
| NAMORONA à VOHIPARARA 1945-46,1969-70 | 145.8 | 269.3 | 308.7 | 289.7 | 281.2 | 95.0 | 70.3 | 72.3 | 81.6 | 84.8 | 51.6 | 52.8 | 1803.0 |
| FARAONY à VOHILAVA 1948-49, 1969-70 | 193.3 | 341.3 | 418.3 | 376.3 | 421.4 | 157.3 | 108.4 | 125.4 | 128.2 | 126.4 | 83.4 | 73.5 | 2553.1 |
| MANANARA à SOAKIBANY 1949-50,1969-70 | 110.1 | 221.1 | 265.1 | 175.2 | 152.7 | 49.4 | 26.0 | 29.7 | 26.3 | 29.5 | 25.6 | 39.8 | 1150.6 |
| EFAHO à FANJAHIRA 1951-52, 1969-70 | 155.3 | 248.3 | 277.6 | 209.6 | 278.8 | 122.3 | 97.9 | 87.6 | 102.9 | 87.0 | 61.9 | 72.8 | 1802.1 |
| IKOPA à AMBOHIMANAMBO 1945-46, 1969-70 | 167.9 | 268.1 | 277.2 | 191.9 | 219.4 | 43.2 | 22.9 | 19.7 | 24.5 | 27.5 | 16.2 | 46.0 | 1324.6 |
| IKOPA à MAHITSY 1945-46, 1969-70 | 167.3 | 270.6 | 275.7 | 191.2 | 218.6 | 42.4 | 21.6 | 18.1 | 22.6 | 25.7 | 15.5 | 45.4 | 1314.6 |
| AMDROMBA à TSINJONY 1945-46, 1969-70 | 197.6 | 294.5 | 278.6 | 230.7 | 266.1 | 69.4 | 30.6 | 16.9 | 21.3 | 21.5 | 23.3 | 66.2 | 1516.8 |
| SISAONY à ANDRAMASINA 1945-46, 1969-70 | 172.0 | 265.4 | 265.4 | 178.1 | 212.1 | 40.1 | 15.3 | 10.4 | 15.8 | 16.7 | 11.1 | 46.9 | 1249.3 |
| IKOPA à BEVOMANGA 1945-46, 1969-70 | 167.6 | 278.1 | 273.2 | 196.7 | 227.3 | 47.0 | 20.0 | 12.7 | 16.3 | 18.7 | 14.4 | 47.2 | 1319.2 |
| IKOPA au bac d e FIADANANA 1945-46, 1969-70 | 167.3 | 285.7 | 294.4 | 228.6 | 242.6 | 50.5 | 18.9 | 9.9 | 12.9 | 15.1 | 13.9 | 45.7 | 1385.5 |
| IKOPA à ANTSATRANA 1945-46, 1969-70 | 171.2 | 311.7 | 342.1 | 275.6 | 266.9 | 57.6 | 17.1 | 8.0 | 9.3 | 11.6 | 13.3 | 49.8 | 1536.4 |
| ISINKO à AMBODOROKA 1945-46, 1969-70 | 150.6 | 351.7 | 451.0 | 352.4 | 325.0 | 65.1 | 7.5 | 2.4 | 2.3 | 4.8 | 6.0 | 38.1 | 1756.8 |
| BETSIBOKA à AMBODIROKA 1945-46, 1969-70 | 155.6 | 303.8 | 350.9 | 276.7 | 267.8 | 50.2 | 12.8 | 8.7 | 10.4 | 10.0 | 7.2 | 38.1 | 1492.1 |

suite

| Bassins et périodes | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ONIVE à TSINJOARIVO 1945-46, 1969-70 | 182.5 | 271.0 | 268.9 | 217.5 | 235.2 | 67.7 | 35.0 | 20.4 | 23.9 | 22.2 | 24.4 | 63.6 | 1432.2 |
| AMBOROMPOT à ANTSAMPA 1945-46, 1969-70 | 181.9 | 326.6 | 313.5 | 256.5 | 270.1 | 95.0 | 37.9 | 18.2 | 24.1 | 23.3 | 31.1 | 87.9 | 1666.1 |
| SAHANIVOTRY au PK 197 1945-46, 1969-70 | 162.6 | 282.0 | 259.2 | 202.8 | 200.7 | 62.9 | 29.4 | 15.2 | 18.6 | 12.2 | 22.8 | 83.4 | 1351.9 |
| MANANDONA à SAHANIVOT 1945-46, 1969-70 | 157.2 | 276.9 | 268.7 | 205.6 | 217.1 | 65.4 | 29.2 | 14.4 | 18.1 | 14.9 | 26.1 | 79.1 | 1372.7 |
| MANIA à FASIMENA 1945-46, 1969-70 | 149.5 | 270.7 | 279.6 | 206.0 | 197.6 | 58.3 | 26.7 | 16.9 | 21.6 | 16.8 | 23.2 | 58.6 | 1325.3 |
| MATSIATRA à MALAJIALINA 1949-50, 1969-70 | 122.6 | 278.2 | 305.6 | 219.4 | 181.9 | 40.2 | 20.9 | 18.9 | 20.1 | 21.3 | 21.4 | 43.8 | 1294.3 |
| MANANANTA à TSITONDROIN 1949-5, 1969-70 | 107.0 | 251.2 | 282.3 | 173.9 | 152.0 | 30.4 | 16.9 | 13.9 | 12.2 | 14.0 | 15.1 | 35.4 | 1104.2 |
| ZOMANDAO à ANKARAMEN 1949-50, 1969-70 | 121.6 | 279.4 | 314.2 | 211.9 | 173.7 | 39.9 | 17.2 | 22.3 | 22.1 | 27.3 | 28.9 | 37.7 | 1296.3 |
| IHOSY à IHOSY 1949-50, 1969-70 | 98.1 | 213.1 | 230.3 | 148.1 | 103.9 | 33.1 | 13.9 | 12.3 | 9.7 | 14.5 | 16.0 | 30.1 | 923.2 |
| MANGOKY au BANIAN 1949-50, 1969-70 | 90.7 | 228.2 | 258.3 | 168.3 | 133.9 | 27.2 | 13.2 | 9.8 | 8.7 | 10.3 | 12.8 | 32.7 | 993.8 |
| MANGOKY à BEVOAY 1949-50, 1969-70 | 88.3 | 223.9 | 255.7 | 165.2 | 131.2 | 26.3 | 12.8 | 9.4 | 8.2 | 9.9 | 12.5 | 32.0 | 975.3 |
| MANDRARE à ANDABOLAVA 1951-52, 1969-70 | 91.3 | 177.4 | 171.9 | 111.7 | 95.7 | 43.8 | 20.5 | 20.7 | 13.7 | 14.2 | 26.3 | 34.0 | 821.2 |
| MANANARA à BEVIA 1951-52, 1969-70 | 92.7 | 167.9 | 171.0 | 126.1 | 131.9 | 52.8 | 41.6 | 37.9 | 35.6 | 28.1 | 35.5 | 41.6 | 962.7 |
| MANDRARE à AMBOASARY 1951-52, 1969-70 | 81.5 | 167.3 | 163.2 | 114.2 | 94.5 | 38.4 | 21.9 | 20.0 | 14.4 | 13.0 | 24.7 | 36.2 | 789.4 |
| MANAMBOVO à TSIHOMBE 1951-52, 1969-70 | 43.9 | 118.5 | 114.6 | 85.0 | 77.1 | 22.3 | 20.0 | 18.3 | 14.1 | 10.8 | 18.4 | 23.4 | 566.5 |
| MENARANDRA à TRANOROA 1951-52, 1969-70 | 73.0 | 171.4 | 175.6 | 128.5 | 84.3 | 26.5 | 18.7 | 12.4 | 8.6 | 10.3 | 21.0 | 29.8 | 760.2 |

tableau 2.9.

Répartition mensuelle des précipitations (mm et 1/10)

| Stations | Date | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Nord** | | | | | | | | | | | | | | |
| ANTSIRANANA | 1900-1970 | 31.6 | 153.6 | 279.2 | 234.0 | 171.5 | 56.7 | 8.9 | 9.5 | 9.2 | 11.4 | 7.3 | 14.4 | 987.3 |
| ANTSIRANANA | 1930-1970 | 33.7 | 133.8 | 280.0 | 230.9 | 182.1 | 57.8 | 10.0 | 11.8 | 10.5 | 11.9 | 6.3 | 11.5 | 980.3 |
| AMBILOBE | 1930-1970 | 103.0 | 314.0 | 468.0 | 416.0 | 298.0 | 114.0 | 21.8 | 15.5 | 9.3 | 15.1 | 9.4 | 30.4 | 1814.5 |
| VOHEMAR | 1900-1970 | 86.2 | 216.8 | 219.5 | 183.7 | 183.8 | 183.9 | 87.9 | 82.3 | 83.3 | 77.9 | 61.1 | 58.4 | 1524.8 |
| VOHEMAR | 1930-1970 | 90.6 | 201.6 | 233.4 | 192.7 | 175.7 | 156.6 | 79.3 | 77.7 | 75.7 | 84.3 | 58.6 | 58.9 | 1485.1 |
| TSARATANANA AMBANJA | 1930-1970 | 174.0 | 321.0 | 483.0 | 413.0 | 288.0 | 144.0 | 49.3 | 31.6 | 25.3 | 34.1 | 38.2 | 67.6 | 2069.1 |

suite

| Stations | Date | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Est** | | | | | | | | | | | | | | |
| ANTALAHA | 1930-1970 | 119.9 | 210.6 | 294.9 | 244.7 | 274.1 | 261.8 | 152.0 | 160.8 | 156.1 | 160.3 | 99.4 | 75.9 | 2210.5 |
| MAROANTSETRA | 1930-1970 | 147.0 | 303.0 | 380.0 | 402.7 | 481.0 | 423.0 | 372.0 | 324.0 | 336.0 | 272.0 | 136.0 | 99.9 | 3675.9 |
| FENERIVE | 1930-1970 | 163.0 | 286.0 | 345.0 | 379.0 | 406.0 | 242.0 | 179.0 | 172.0 | 182.0 | 160.0 | 134.0 | 100.0 | 2748.0 |
| MORAMANGA | 1930-1970 | 154.3 | 282.6 | 299.0 | 241.2 | 220.8 | 71.9 | 44.6 | 47.3 | 53.7 | 46.4 | 27.7 | 40.7 | 1530.2 |
| VATOMANDRY | 1930-1970 | 164.0 | 256.0 | 352.0 | 392.0 | 469.0 | 270.0 | 224.0 | 254.0 | 212.0 | 187.0 | 116.0 | 79.0 | 2975.0 |
| MANANJARY | 1901-1970 | 161.7 | 233.0 | 372.0 | 362.6 | 413.9 | 244.7 | 179.9 | 183.9 | 190.9 | 155.4 | 130.1 | 93.4 | 2721.5 |
| MANANJARY | 1930-1970 | 183.9 | 228.4 | 379.6 | 366.9 | 453.0 | 234.2 | 197.4 | 203.0 | 197.8 | 169.3 | 130.3 | 90.3 | 2834.1 |
| MANAKARA | 1930-1970 | 167.0 | 234.0 | 351.0 | 350.0 | 398.0 | 255.0 | 199.0 | 196.0 | 160.0 | 134.0 | 108.0 | 80.1 | 2632.1 |
| TOLANARO | 1902-1970 | 92.7 | 124.6 | 178.1 | 206.4 | 213.5 | 155.1 | 150.6 | 137.2 | 114.6 | 98.9 | 77.1 | 82.0 | 1630.8 |
| TOLANARO | 1930-1970 | 102.2 | 133.2 | 195.2 | 180.0 | 222.8 | 127.0 | 124.9 | 135.8 | 123.8 | 99.5 | 62.0 | 86.0 | 1592.4 |
| ***Ouest Hautes Terres*** | 1930-1970 | 91.9 | 204.5 | 300.7 | 262.7 | 213.5 | 34.2 | 5.9 | 2.6 | 3.5 | 5.0 | 2.7 | 10.1 | 1137.3 |
| MANDRITSARA | 1930-1970 | 173.0 | 305.0 | 351.0 | 268.0 | 233.0 | 57.0 | 11.0 | 5.9 | 5.3 | 9.0 | 10.2 | 41.9 | 1470.4 |
| ANKAZOBE | 1880-1970 | 146.0 | 290.7 | 289.3 | 254.8 | 187.0 | 49.5 | 15.8 | 7.9 | 7.4 | 10.2 | 15.8 | 54.0 | 1328.4 |
| ANTANANARIVO (observatoire) | 1930-1970 | 163.9 | 302.7 | 279.5 | 223.8 | 207.7 | 48.4 | 15.9 | 9.6 | 9.4 | 11.3 | 12.1 | 46.0 | 1330.3 |
| ANTANANARIVO (observatoire) | 1913-1970 | 191.1 | 395.8 | 420.2 | 390.0 | 274.3 | 99.2 | 28.1 | 9.5 | 12.5 | 11.0 | 18.9 | 103.3 | 1953.9 |
| SOAVINANDRIANA | 1930-1970 | 196.9 | 400.3 | 410.4 | 361.1 | 262.2 | 91.0 | 28.4 | 11.2 | 14.7 | 10.5 | 23.2 | 105.5 | 1915.4 |
| SOAVINANDRIANA | 1930-1970 | 175.7 | 291.0 | 303.1 | 224.6 | 216.3 | 83.3 | 32.5 | 25.5 | 28.5 | 25.0 | 25.7 | 60.2 | 1491.4 |
| AMBOSITRA | 1901-1970 | 127.7 | 254.2 | 276.7 | 225.6 | 171.3 | 47.0 | 32.4 | 17.0 | 22.0 | 20.5 | 23.0 | 55.7 | 1273.1 |
| FIARANANTSOA | 1930-1970 | 130.0 | 247.0 | 278.2 | 213.8 | 165.3 | 46.3 | 27.4 | 19.4 | 22.4 | 22.1 | 22.6 | 55.3 | 1249.8 |
| IHOSY | 1930-1970 | 94.3 | 197.0 | 217.0 | 146.0 | 77.2 | 23.8 | 11.8 | 8.0 | 2.8 | 6.1 | 10.3 | 27.4 | 821.7 |
| BETROKA | 1930-1970 | 94.5 | 209.9 | 210.1 | 135.6 | 89.0 | 29.4 | 13.5 | 12.3 | 9.0 | 9.4 | 13.6 | 36.1 | 862.4 |
| **Moyen ouest** | | | | | | | | | | | | | | |
| MAEVATANANA | 1930-1970 | 145.0 | 333.0 | 436.0 | 335.0 | 286.0 | 68.3 | 5.6 | 0.8 | 2.2 | 2.2 | 6.9 | 32.0 | 1653.0 |
| MIANDRIVAZO | 1930-1970 | 124.2 | 228.7 | 323.2 | 245.0 | 199.9 | 46.1 | 9.6 | 5.7 | 1.6 | 7.5 | 12.8 | 48.2 | 1252.5 |
| AMKAZOABO-SUD | 1930-1970 | 67.7 | 174.0 | 205.0 | 136.0 | 82.2 | 17.7 | 8.0 | 7.5 | 2.9 | 5.3 | 7.3 | 30.6 | 744.2 |
| **Côte ouest** | | | | | | | | | | | | | | |
| ANALALAVA | 1930-1970 | 188.1 | 314.7 | 494.6 | 439.1 | 237.2 | 83.6 | 12.6 | 6.4 | 4.7 | 3.4 | 9.8 | 50.2 | 1844.4 |
| MAHAJANGA | 1908-1970 | 99.6 | 263.5 | 426.6 | 366.9 | 256.6 | 55.3 | 6.7 | 1.5 | 0.9 | 4.4 | 2.2 | 21.7 | 1505.9 |
| MAHAJANGA | 1930-1970 | 101.8 | 257.9 | 446.6 | 371.5 | 288.7 | 59.1 | 8.9 | 2.0 | 1.2 | 3.0 | 2.1 | 22.2 | 1565.0 |
| MAINTIRANO | 1902-1970 | 58.2 | 163.8 | 257.9 | 208.9 | 143.5 | 26.3 | 8.4 | 4.6 | 2.8 | 4.5 | 5.9 | 16.3 | 901.1 |
| MAINTIRANO | 1930-1970 | 56.3 | 184.5 | 302.6 | 224.4 | 152.6 | 30.8 | 8.2 | 4.7 | 3.4 | 4.4 | 7.1 | 15.2 | 994.2 |
| MOROMDAVA | 1930-1970 | 19.6 | 135.0 | 221.0 | 211.0 | 106.0 | 11.0 | 10.2 | 5.1 | 1.4 | 2.5 | 6.1 | 10.5 | 739.3 |
| MOROMBE | 1930-1970 | 24.7 | 91.0 | 140.9 | 134.9 | 54.3 | 5.9 | 9.3 | 6.3 | 2.6 | 1.5 | 4.3 | 5.7 | 481.4 |
| TOLIARA | 1900-1970 | 22.7 | 66.5 | 91.2 | 77.2 | 35.5 | 12.1 | 17.0 | 11.3 | 4.8 | 3.5 | 8.9 | 13.9 | 364.6 |
| TOLIARA | 1930-1970 | 27.1 | 67.2 | 82.8 | 77.4 | 37.2 | 10.0 | 18.4 | 10.2 | 3.7 | 3.8 | 8.2 | 14.4 | 360.4 |
| **Sud** | | | | | | | | | | | | | | |
| AMBOVOMBE | 1930-1970 | 42.0 | 84.6 | 90.2 | 81.9 | 59.7 | 28.8 | 41.0 | 50.7 | 32.3 | 23.8 | 22.0 | 31.4 | 588.4 |

tableau 2.10.

Coefficients pluviométriques mensuels

| Stations | Date | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Max./min. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Nord** | | | | | | | | | | | | | | |
| DIEGO-SUAREZ | 1900-1970 | 32 | 156 | 283 | 237 | 174 | 57 | 9 | 10 | 9 | 12 | 7 | 15 | 38 |
| DIEGO-SUAREZ | 1930-1970 | 34 | 136 | 286 | 236 | 186 | 59 | 10 | 12 | 11 | 12 | 6 | 12 | 44 |
| AMBILOBE | 1930-1970 | 57 | 173 | 258 | 229 | 164 | 63 | 12 | 9 | 5 | 8 | 5 | 17 | 50 |
| VOHEMAR | 1900-1970 | 57 | 142 | 144 | 120 | 121 | 121 | 58 | 54 | 55 | 51 | 40 | 38 | 4 |
| VOHEMAR | 1930-1970 | 61 | 136 | 157 | 130 | 118 | 105 | 53 | 52 | 51 | 57 | 39 | 40 | 4 |
| **Tsaratanana** | | | | | | | | | | | | | | |
| AMBANJA | 1930-1970 | 84 | 55 | 233 | 200 | 139 | 70 | 24 | 15 | 12 | 16 | 18 | 33 | 19 |
| **Est** | | | | | | | | | | | | | | |
| ANTALAHA | 1930-1970 | 54 | 95 | 133 | 111 | 124 | 118 | 69 | 73 | 71 | 73 | 45 | 34 | 4 |
| MAROANTSETRA | 1930-1970 | 40 | 82 | 103 | 109 | 131 | 115 | 101 | 88 | 91 | 74 | 37 | 27 | 5 |
| FENERIVE | 1930-1970 | 59 | 104 | 126 | 138 | 148 | 88 | 65 | 63 | 66 | 58 | 49 | 36 | 4 |
| MORAMANGA | 1930-1970 | 101 | 185 | 195 | 158 | 144 | 47 | 29 | 31 | 35 | 30 | 18 | 27 | 11 |
| VATOMANDRY | 1930-1970 | 55 | 86 | 118 | 132 | 158 | 91 | 75 | 85 | 71 | 63 | 39 | 27 | 6 |
| MANANJARY | 1901-1970 | 59 | 86 | 137 | 133 | 152 | 90 | 66 | 68 | 70 | 57 | 48 | 34 | 4 |
| MANANJARY | 1930-1970 | 65 | 81 | 134 | 129 | 160 | 83 | 70 | 72 | 70 | 60 | 46 | 32 | 5 |
| MANAKARA | 1930-1970 | 63 | 89 | 133 | 133 | 151 | 97 | 76 | 74 | 61 | 51 | 41 | 30 | 5 |
| FORT-DAUPHIN | 1902-1970 | 57 | 76 | 109 | 127 | 131 | 95 | 92 | 84 | 70 | 61 | 47 | 50 | 3 |
| FORT-DAUPHIN | 1930-1970 | 64 | 84 | 123 | 113 | 140 | 80 | 78 | 85 | 78 | 62 | 39 | 54 | 4 |
| **Ouest hautes terres** | | | | | | | | | | | | | | |
| MANDRITSARA | 1930-1970 | 81 | 180 | 264 | 231 | 188 | 30 | 5 | 2 | 3 | 4 | 2 | 9 | 116 |
| ANKAZOBE | 1930-1970 | 118 | 207 | 239 | 182 | 158 | 39 | 8 | 4 | 4 | 6 | 7 | 28 | 66 |
| TANANARIVE (OBS) | 1880-1970 | 110 | 219 | 218 | 192 | 141 | 37 | 12 | 6 | 6 | 8 | 12 | 41 | 39 |
| TANANARIVE (OBS) | 1930-1970 | 123 | 228 | 210 | 168 | 156 | 36 | 12 | 7 | 7 | 8 | 9 | 35 | 32 |
| SOAVINANDRIANA | 1913-1970 | 98 | 203 | 215 | 200 | 140 | 51 | 14 | 5 | 6 | 6 | 10 | 53 | 44 |
| SOAVINANDRIANA | 1930-1970 | 103 | 209 | 214 | 189 | 137 | 48 | 15 | 6 | 8 | 5 | 12 | 55 | 39 |
| AMBOSITRA | 1930-1970 | 118 | 195 | 203 | 151 | 145 | 56 | 22 | 17 | 19 | 17 | 17 | 40 | 12 |
| FIARANANTSOA | 1901-1970 | 100 | 200 | 217 | 177 | 135 | 37 | 25 | 13 | 17 | 16 | 18 | 44 | 16 |
| FIARANANTSOA | 1930-1970 | 104 | 198 | 223 | 171 | 132 | 37 | 22 | 16 | 18 | 18 | 18 | 44 | 14 |
| IHOSY | 1930-1970 | 115 | 240 | 264 | 178 | 94 | 29 | 14 | 10 | 3 | 7 | 13 | 33 | 77 |
| BETROKA | 1930-1970 | 110 | 243 | 244 | 157 | 103 | 34 | 16 | 14 | 10 | 11 | 16 | 42 | 23 |
| **Moyen ouest** | | | | | | | | | | | | | | |
| MAEVATANANA | 1930-1970 | 88 | 201 | 264 | 203 | 173 | 41 | 3 | 0 | 1 | 1 | 4 | 19 | 545 |
| MIANDRIVAZO | 1930-1970 | 99 | 183 | 258 | 196 | 160 | 37 | 8 | 5 | 1 | 6 | 10 | 38 | 202 |
| AMKAZOBE-SUD | 1930-1970 | 91 | 234 | 275 | 183 | 110 | 24 | 11 | 10 | 4 | 7 | 10 | 41 | 71 |

suite

| Stations | Date | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Max./min. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Côte ouest** | | | | | | | | | | | | | | |
| ANALALAVA | 1930-1970 | 102 | 171 | 268 | 238 | 129 | 45 | 7 | 3 | 3 | 2 | 5 | 27 | 145 |
| MAJUNGA | 1908-1970 | 66 | 175 | 283 | 244 | 170 | 37 | 4 | 1 | 1 | 3 | 1 | 14 | 474 |
| MAJUNGA | 1930-1970 | 65 | 165 | 285 | 237 | 184 | 38 | 6 | 1 | 1 | 2 | 1 | 14 | 372 |
| MAINTIRANO | 1902-1970 | 65 | 182 | 286 | 232 | 159 | 29 | 9 | 5 | 3 | 5 | 7 | 18 | 92 |
| MAINTIRANO | 1930-1970 | 57 | 186 | 304 | 226 | 153 | 31 | 8 | 5 | 3 | 4 | 7 | 15 | 89 |
| MORONDAVA | 1930-1970 | 27 | 183 | 299 | 285 | 143 | 15 | 14 | 7 | 2 | 3 | 8 | 14 | 158 |
| MOROMBE | 1930-1970 | 51 | 189 | 293 | 280 | 113 | 12 | 19 | 13 | 5 | 3 | 9 | 12 | 94 |
| TULEAR | 1900-1970 | 62 | 182 | 250 | 212 | 97 | 33 | 47 | 31 | 13 | 10 | 24 | 38 | 26 |
| TULEAR | 1930-1970 | 75 | 186 | 230 | 215 | 103 | 28 | 51 | 28 | 10 | 11 | 23 | 40 | 22 |
| **Sud** | | | | | | | | | | | | | | |
| AMBOVOMBE | 1930-1970 | 71 | 144 | 153 | 139 | 101 | 49 | 70 | 86 | 55 | 40 | 37 | 53 | 4 |

Les stations de l'escarpement oriental ont un rapport Max/Min compris entre 10 et 20 ; il en est de même dans le SAMBIRANO : à AMBANJA il est égal à 19. Sur les hautes terres et dans le nord, l'irrégularité augmente un peu et le rapport varie entre 30 et 70. Plus on se déplace vers l'ouest et plus la valeur du rapport croît ; le record est atteint à MAEVATANANA avec 545, MAHAJANGA affiche 400. On retrouve bien là un diagramme tropical classique avec saison des pluies et saison et saison sèche bien tranchées, contrairement au versant oriental.

TOLIARA avec 360 mm de précipitations annuelles, a un régime pluviométrique saisonnier relativement régulier puisque le rapport Max./Min. est égal à 26. Les régimes pluviométriques de l'extrême sud bien que peu abondants sont donc caractérisés par une régularité assez grande, en moyenne inter-annuelle bien évidemment.

En effet, si l'on examine les relevés annuels, on constate, pour un même mois, d'une année à l'autre, une irrégularité très grande en rapport avec la forte valeur de K3 indiquée plus haut. On a observé 369 mm en janvier 1952 et 30 mm le même mois de 1941 à AMPANIHY. Juin 1949 a reçu 105 mm alors que ce mois a été totalement sec à plusieurs reprises pendant la période d'observation. De longues périodes sèches se produisent assez fréquemment : à AMBOVOMBE on a vu en 1943, cent cinquante jours consécutifs sans une goutte d'eau. Tout ceci ajouté aux autres facteurs et particulièrement les vents quasi permanents de secteurs sud renforcent considérablement le caractère aride du climat de ces régions.

## 7.4. Pluies journalières

En l'absence de relevés originaux, il ne nous a pas été possible de faire une étude poussée de la pluviométrie journalière aux stations utilisées dans les deux paragraphes ci-dessus. Nous reprendrons donc les études déjà faites par la section d'hydrologie du centre ORSTOM de TANANARIVE (M. ALDEGHERI, 1964, 1967 - M. ALDEGHERI et P. POURRUT, 1987, 1988 - M. ALDEGHERI et G. OBERLIN, 1965 - P. POURRUT, 1976).

Les pluies journalières présentent des caractéristiques très différentes suivant qu'elles sont produites par les orages ou par les cyclones et dépressions tropicales.

## 7.4.1. Les pluies d'orages

Les précipitations orageuses peuvent se produire en toutes régions. Toutefois, la fréquence des orages est plus forte sur les hautes terres, dans l'ouest et le nord, particulièrement à proximité des grands massifs montagneux. Les pluies orageuses débutent à la fin de la saison sèche (fin octobre, début novembre), puis l'activité orageuse se poursuit pendant la saison des pluies, avec une intensité moindre, liée à la position de la zone de convergence intertropicale. Elle peut prendre une ampleur plus grande à la fin mars et au début du mois d'avril.

Ces pluies se produisent, généralement, en fin d'après-midi ou en début de nuit. Les orages peuvent être très violents au moment de l'approche d'un cyclone, mais ils cessent toujours lors du passage du météore.

On peut, sur le hyétogramme d'une pluie orageuse, distinguer trois parties :

-une période préliminaire, d'intensité moyenne toujours inférieure à 10 mm/h et de courte durée ;
-le corps de l'averse proprement dite, avec une forte ou très forte intensité moyenne (80 à 100 mm/h), de durée assez courte, dix à vingt minutes, avec parfois un paroxysme de cinq minutes au moins pouvant atteindre 200 mm/h et plus ;
-la traîne de faible intensité, passant très rapidement de 30 à 15 mm/h à 10 puis 5 mm/h. La durée de la traîne atteint souvent plusieurs heures.
Les graphes n° 2.30. et 2.31. montrent quelques hyétogrammes enregistrés à TANANARIVE et sur les bassins versants représentatifs ayant fonctionné en diverses régions entre 1960 et 1970. Tous ont été choisis pour leurs maximums d'intensité particulièrement élevés.

La pluie du 15 novembre 1962 présente une intensité très forte de courte durée (519 mm/h pendant six minutes) ce qui donne au hyétogramme une allure peu représentative d'une averse orageuse. Sur un total de 91,3 mm, 50 mm sont tombés en six minutes. Le hyétogramme du 29 novembre 1962, toujours au pluviographe du centre ORSTOM, donne une représentation plus classique d'une pluie orageuse. On enregistre 175 mm/h pendant quinze minutes, pour une hauteur totale de 78 mm. Le corps de l'averse a duré cinquante minutes ; il est suivi d'une traîne d'intensité très faible (1 à 2/10 mm) pendant environ quatre-vingt dix minutes.

Sur le bassin de la TAFAINA, situé à 40 km au sud de TANANARIVE, nous avons enregistré plusieurs pluies dont les intensités maximales sont supérieures à 100 mm/h ; nous donnons quelques exemples sur le graphe n° 2.31. L'intensité la plus forte a été observée le 2 décembre 1965 avec : 312 mm/h pendant 5 minutes et 215 mm/h pendant 15 minutes au pluviographe A ; 240 mm/h pendant 5 minutes et 176 mm/h pendant 15 minutes au pluviographe B.

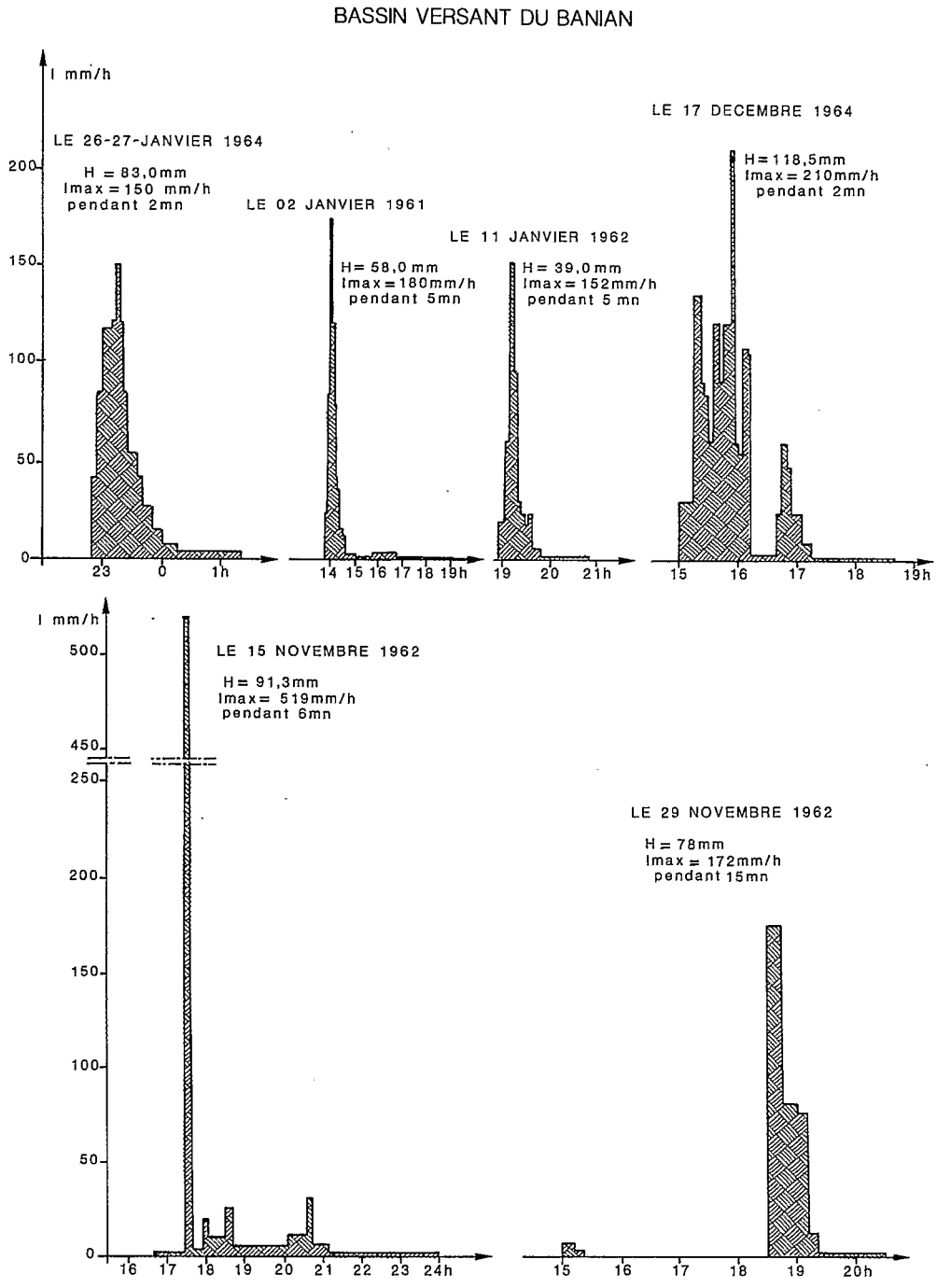
Ce jour là, il est tombé sur chaque site respectivement 73 et 64 mm. Ce ne sont pas les plus fortes hauteurs recueillies sur ce bassin ; le maximum a été observé le 4 décembre 1963 avec 128 mm ; l'intensité de la pluie pendant cinq minutes a été 114 mm/h au pluviographe A et 108 mm/h au pluviographe B.

Dans la région de MAEVATANANA, sur le bassin de l'ANKABOKA, nous avons relevé les valeurs suivantes pour l'averse du 1 avril 1962 : 216 mm/h en cinq minutes, 170 mm/h en dix minutes et 130 mm/h en vingt minutes. Mais, malheureusement, nous ne disposons pas du hyétogramme original. Les hyétogrammes que nous reproduisons fig. 2.31. accusent des intensités maximales de 168, 144, 120 mm/h pour des hauteurs de pluies variant entre 30 et 45 mm. Comme sur le bassin de la TAFAINA, les intensités maximales ne sont jamais observées au cours des averses ayant donné la plus grande hauteur d'eau (hauteur maximale observée sur ce bassin : 124 mm).

Sur le bassin du BANIAN, dans le bas MANGOKY, (fig. 2.30.), nous avons observé des intensités de 210 mm/h pendant deux minutes le 17 décembre 1964, 180 mm/h pendant cinq minutes le 2 janvier 1961, 152 mm/h pendant cinq minutes le 11 janvier 1962. La plus forte pluie journalière, le 20 décembre 1964, a apporté 153,5 mm avec une intensité maximale de 144 mm/h pendant cinq minutes.

figure 2.30.

En haut : bassin versant du Banian
En bas : station météo de Tsim bazaza



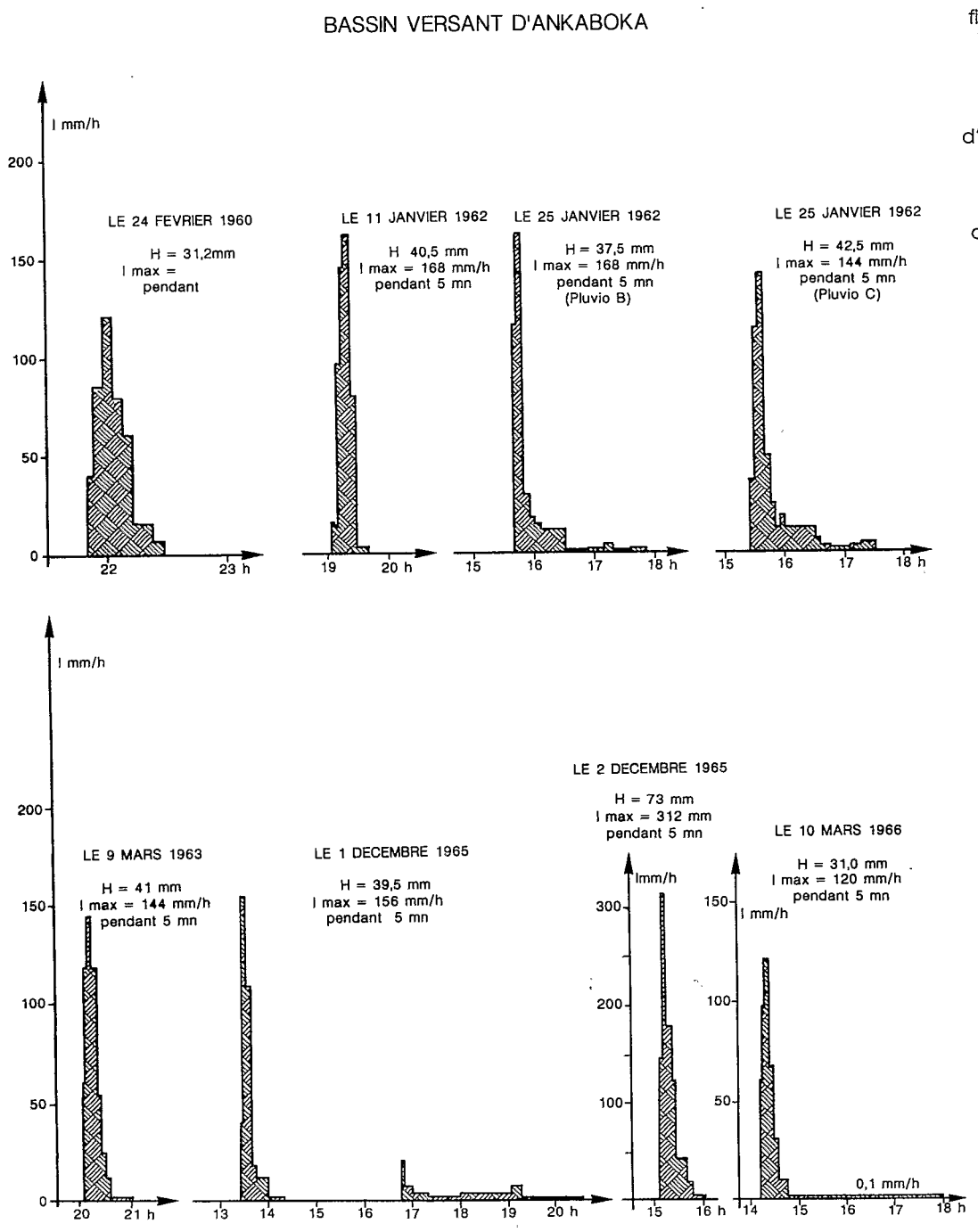



figure 2.31.

En haut : bassin versant d'Ankaboka
En bas : bassin versant de Tafaina

Pour ces pluies d'orage, le schéma est donc sensiblement le suivant : période préliminaire souvent très courte et même inexistante, traîne suivant la période à forte intensité de longueur variable de quelques minutes à plusieurs heures avec parfois une reprise des précipitations plus intenses, hauteurs totales de précipitations relativement modestes. Les plus fortes hauteurs enregistrées présentent souvent un hyétogramme assez complexe faisant apparaître le caractère plutôt dépressionnaire de ces précipitations.

Les fortes valeurs de l'intensité maximale conduisent à un ruissellement notable, mais les orages ne couvrent en général que des superficies assez faibles des bassins versants.

L'activité orageuse est liée à la présence sur l'île, de la zone de convergence inter-tropicale qui engendre une très forte instabilité des masses d'air. Il n'est pas rare de voir se développer sur certains bassins fluviaux, des crues importantes dues à la succession des orages pendant plusieurs jours. Les pointes de ces crues peuvent atteindre des valeurs comparables à celles provoquées par les cyclones tropicaux.

### 7.4.2. Les précipitations dépressionnaires

Elles sont provoquées soit par un cyclone tropical abordant Madagascar, soit par une cellule dépressionnaire située au voisinage de l'île, cette dépression ayant ou non un caractère cyclonique. Les pluies sont régulières et de longue durée. Leurs intensités sont modérées.

Les volumes d'eau précipités sont, malgré cela, très importants, la durée des pluies dépassant souvent plusieurs dizaines d'heures. Ainsi, en 1959 sur le haut bassin de l'IKOPA, il a plu presque sans interruption du mercredi 25 mars à 19 heures au samedi 28 mars à 15 heures, comme le montre le graphe n° 2.32. donnant le hyétogramme enregistré par le Service Météorologique de TANANARIVE. Les intensités ont toujours été relativement faibles : maxi-mum égal à 36 mm/h pendant quelques minutes.

Le graphe n° 2.32. montre également le hyétogramme enregistré à MOROMBE pendant que deux dépressions se creusent sur le canal de Mozambique entre le 10 et le 14 janvier 1959. La première se forme le 11 janvier au large des bouches du Zambèze, elle passe sur l'île Europa le 12 au soir et s'éloigne en direction des Kerguelen. La seconde se forme le 13 au nord-est de l'île Europa, elle se déplace vers le sud-est, longe la côte sud-ouest de Madagascar et s'éloigne sur l'océan. Ces perturbations ont provoqué des pluies qui ont duré du lundi 12 janvier à 13 heures au mercredi 14 janvier à 15 heures, avec seulement quelques courtes interruptions le 12 de 16 à 22 heures et le 13 de 21 à 24 heures. L'intensité maximale est de l'ordre de 88 mm/h pendant quinze minutes.

Les pluies cycloniques couvrent des zones beaucoup plus étendues que les pluies orageuses ; elles intéressent donc la presque totalité de la surface des bassins fluviaux situés sur la trajectoire des météores. Du fait que les intensités sont faibles, on pourrait s'attendre à des cœfficients de ruissellement peu importants. Il en est souvent tout autrement car, par suite de leur longue durée, ces pluies amènent très rapidement les terrains au voisinage de la saturation, en outre, la totalité du bassin est affectée par le cyclone. En 1959, les cœfficients de ruissellement calculés sur le bassin supérieur de l'IKOPA étaient tous au moins égaux à 70 %.

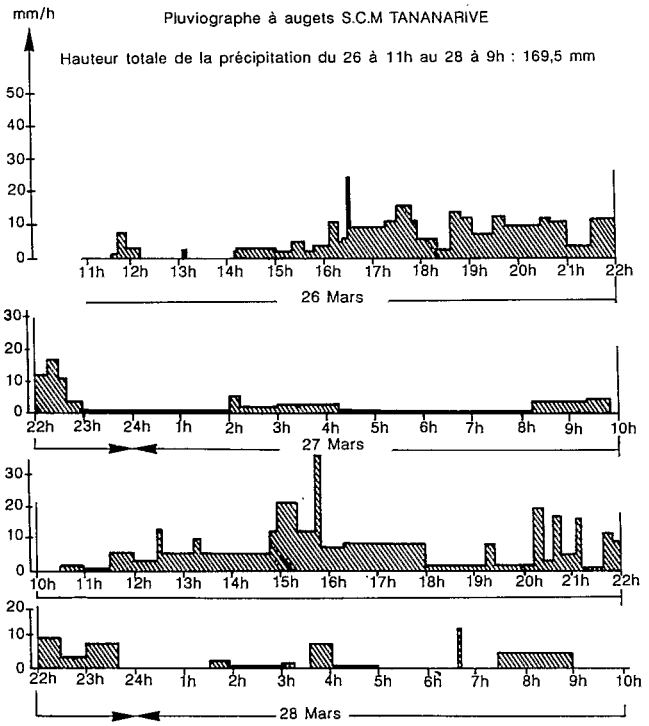



figure 2.32.a

Hyétogramme de la pluie cyclonique du 26 au 28 mars 1959

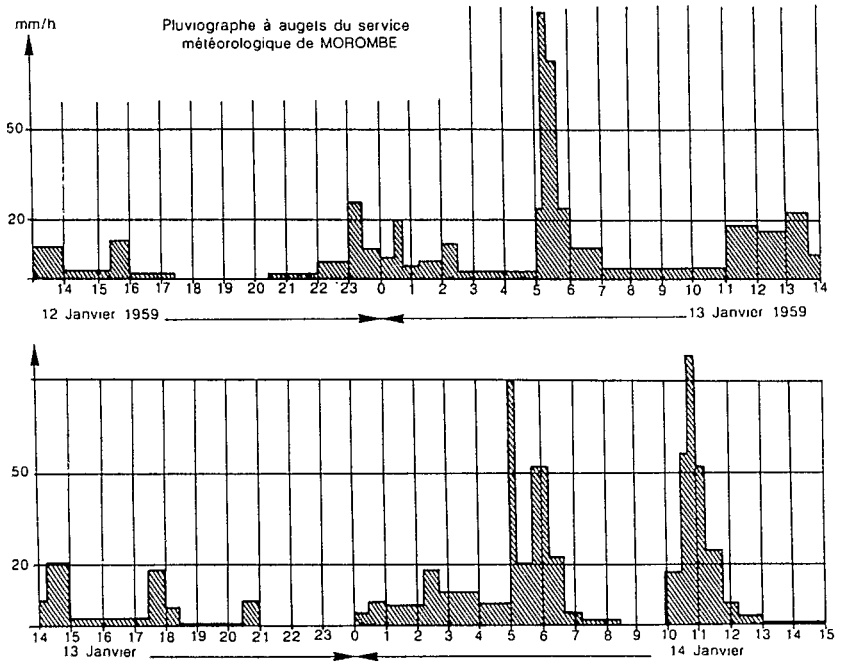



figure 2.32.b

Hyétogramme de la pluie cyclonique des 12-13-14 janvier 1959

## 7.4.3. Etude statistique des intensités de pluies journalières

Ne disposant pas des enregistrements des pluies journalières, il ne nous a pas été possible de réaliser l'étude statistique des intensités de pluies. Nous citerons les résultats des travaux effectués sur ce sujet par le BCEOM en 1967 et l'ORSTOM en 1970.

Le tableau 2.12. (R. GOUYET) donne, en fonction de la durée de l'averse et de la période de retour, l'intensité des pluies calculée par le BCEOM pour diverses stations malgaches.

Nous résumons ci-dessous (tableau 2.11.) les calculs faits par l'ORSTOM à partir des enregistrements du pluviographe de TSIMBAZAZA :

tableau 2.11.

Intensités en mm/h

| t mn<br>Période de retour<br>T (ans) | 15 | 30 | 60 |
|---|---|---|---|
| 1 | 112 | 84 | 55 |
| 5 | 160 | 112 | 72 |
| 10 | 180 | 132 | 84 |
| 50 | 224 | 170 | 110 |
| 100 | 260 | 190 | 124 |

Les calculs ont été réalisés par des opérateurs différents, sur des enregistrements couvrant des périodes non identiques et de longueurs inégales (six ans pour les durées inférieures à quinze minutes, huit ans pour les durées supérieures à trente minutes à la station d'IVATO, dix ans à la station de TSIMBAZAZA. Pour la première, les calculs ont été arrêtés en 1963, pour la seconde en 1970. Ces calculs ont donné des intensités de pluies sensiblement équivalentes pour des durées de quinze, trente, soixante minutes et des périodes de retour de un et cinq ans.

En comparant l'intensité maximale calculée pour la pluie du 15 novembre 1961 aux résultats obtenus par le BCEOM, on peut se poser quelques questions sur la fréquence de retour d'une telle averse. Précisons tout d'abord que nous avons subi l'orage du 15 novembre et nous avons encore en mémoire les trombes d'eau tout à fait impressionnantes qui sont tombées en l'espace de quelques minutes. La violence du ruissellement pendant la pluie (avenue LABIGORNE ou "tranchée de la mort" transformée en un torrent tumultueux ou voitures et piétons ne pouvaient guère s'aventurer) et l'ampleur des dégâts constatés après l'orage (tonnes de boue et de graviers amoncelés aux "exutoires" tout autour du stade de Mahamasina) ont nettement montré que nous avons eu une précipitation tout à fait exceptionnelle. Nous avons nous-même dépouillé le pluviogramme (à augets basculeurs) et malgré la faible précision de cet enregistrement (journalier), nous avons adopté 519 mm/h pendant six minutes.

On peut dire que cette intensité doit avoir une fréquence de retour supérieure à 100 ans.

tableau 2.12.

Intensité-Durée-Fréquence
des pluies à Madagascar d'après
Etude BCEOM Juillet 1967

**Nord**

station : Antsiranana
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 5 | 15 | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 136 | 89 | 61 | 41 | 31 | 17,5 |
| 2 | 157 | 102 | 75 | 53 | 42 | 26 |
| 5 | 172 | 115 | 87 | 65 | 54 | 37 |
| 10 | 183 | 124 | 95 | 73 | 62 | 44 |

station : Vohemar
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 52 | 37 | 28 | 18 |
| 2 | 62 | 45 | 35 | 22 |
| 5 | 77 | 55 | 43 | 27 |

**Tsaratanana**

station : Andapa
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 72 | 47 | 34 | 20 |
| 2 | 84 | 56 | 41 | 23,5 |
| 5 | 95 | 64 | 47 | 28 |

station : Sambava
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 82 | 53 | 40 | 24 |
| 2 | 98 | 63 | 47 | 28,5 |
| 5 | 114 | 76 | 57 | 35 |

**Hautes terres**

station : Antananarivo
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 5 | 15 | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 156 | 99 | 69 | 43 | 32 | 19 |
| 2 | 180 | 114 | 94 | 61 | 46 | 27 |
| 5 | 206 | 132 | 94 | 61 | 46 | 27 |
| 10 | 221 | 144 | 101 | 67 | 51 | 31 |

station : Ivato
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 5 | 15 | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 126 | 103 | 72 | 47 | 34 | 20 |
| 2 | 165 | 133 | 90 | 60 | 46 | 29 |
| 5 | 200 | 160 | 110 | 75 | 59 | 39 |

station : Antsirabe
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 5 | 15 | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 125 | 90 | 65 | 42 | 32 | 20 |
| 2 | 148 | 107 | 78 | 51 | 39 | 24 |
| 5 | 170 | 122 | 90 | 59 | 45 | 28 |

station : Fianarantsoa
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 5 | 15 | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 132 | 100 | 72 | 47 | 35 | 21 |
| 2 | 150 | 113 | 82 | 54 | 41 | 25 |
| 5 | 165 | 125 | 90 | 60 | 46 | 29 |

suite

**Est**

station : Antalaha
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 5 | 15 | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 107 | 82 | 59 | 42 | 34 | 22 |
| 2 | 132 | 100 | 72 | 51 | 42 | 28 |
| 5 | 157 | 120 | 89 | 66 | 54 | 37 |

station : Sainte-Marie
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 5 | 15 | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 135 | 113 | 90 | 62 | 49 | 33 |
| 2 | 157 | 130 | 107 | 75 | 60 | 41 |
| 5 | 180 | 147 | 120 | 88 | 71 | 49 |

station : Toamasina
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 5 | 15 | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 200 | 121 | 86 | 55 | 42 | 26 |
| 2 | 227 | 142 | 103 | 67 | 51 | 32 |
| 5 | 255 | 167 | 122 | 84 | 64 | 39 |
| 10 | 275 | 180 | 135 | 94 | 72 | 45 |

station : Mananjary
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 5 | 15 | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 120 | 92 | 73 | 51 | 38 | 24 |
| 2 | 140 | 108 | 88 | 60 | 45 | 28 |
| 5 | 160 | 125 | 102 | 69 | 52 | 34 |

**Ouest**

station : Analalava
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 5 | 15 | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 198 | 130 | 99 | 68 | 52 | 31 |
| 2 | 230 | 153 | 118 | 80 | 61 | 37 |
| 5 | 260 | 175 | 135 | 95 | 73 | 46 |

station : Mahajanga
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 5 | 15 | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 158 | 112 | 78 | 54 | 40 | 23 |
| 2 | 178 | 125 | 88 | 61 | 46 | 27 |
| 5 | 208 | 140 | 102 | 72 | 55 | 34 |
| 10 | 228 | 153 | 115 | 81 | 62 | 38 |

station : Toliara
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 5 | 15 | 30 | 60 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 96 | 54 | 41 | 30 | 22,5 | 14 |
| 2 | 125 | 71 | 50 | 38 | 30 | 17 |
| 5 | 160 | 92 | 67 | 47 | 37 | 22 |
| 10 | 180 | 105 | 77 | 54 | 43 | 27 |

station : Morondava
intensité I(t.P) en mm/h

| t(mn) P(ans) | 30 | 60 | 90 | 180 | 360 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 76 | 49 | 38 | 22,5 | 13,5 | |
| 2 | 94 | 63 | 48 | 30 | 18 | |
| 5 | 110 | 78 | 60 | 38 | 24 | |

Il est dommage que pour le dépouillement de l'ensemble des données du pluviographe de TSIMBAZAZA, on ne soit pas descendu en-dessous d'une durée de quinze minutes. Il faut noter que l'appareil dont on dispose (à augets basculeurs) avec une durée de rotation journalière, ne permet pas une détermination précise des intensités de pluie pour des durées inférieures à quinze minutes.

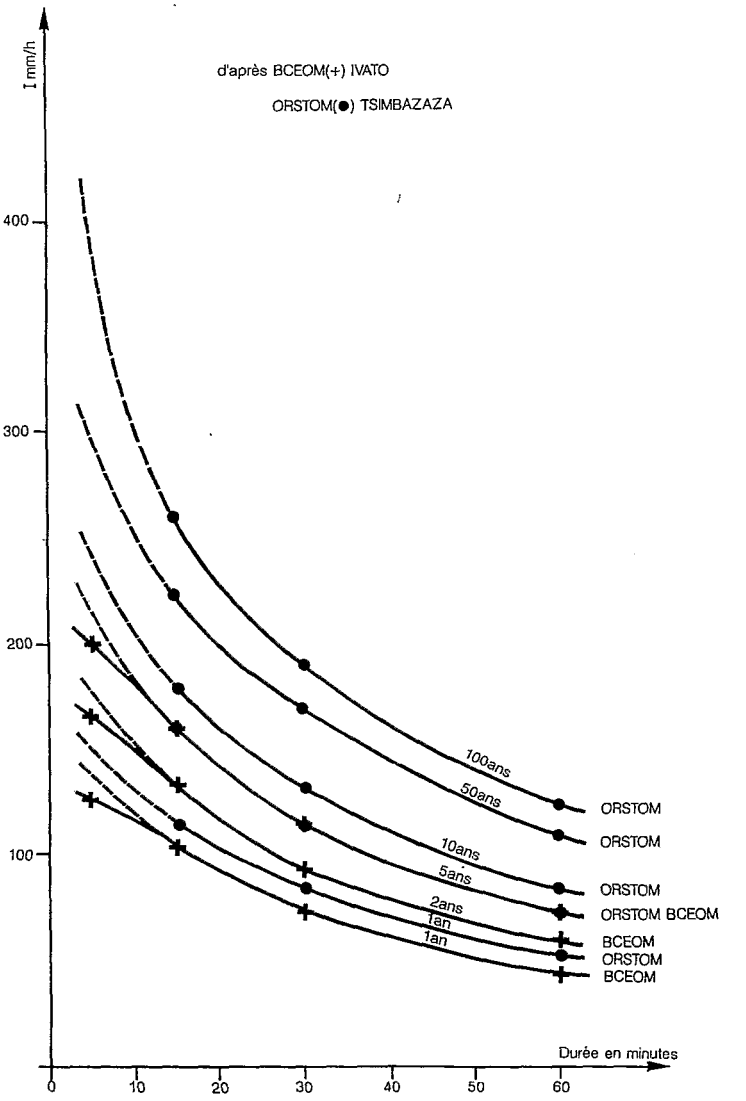
En juxtaposant les résultats obtenus par le BCEOM et l'ORSTOM aux stations d'IVATO et de TSIMBAZAZA, on peut tracer le graphe n° 2.33. On constate une petite anomalie dans le tracé des courbes obtenues par le BCEOM, les intensités de cinq minutes paraissent en effet un peu faibles (probablement à cause des difficultés signalées ci-dessus) : des valeurs de 140, 180 et 220 mm/h pour une durée de cinq minutes et des

périodes de retour de un, deux et cinq ans sembleraient plus correctes. En extrapolant la courbe ORSTOM de période de retour cent ans jusqu'à une durée de cinq minutes, on obtient une intensité de 400 mm/h environ. Ceci pourrait donc confirmer une fréquence supérieure à la centennale pour la pluie du 15 novembre 1961.

Nous pensons nécessaire de souligner à nouveau, le caractère assez approximatif de l'estimation des intensités maximales de faible durée avec les appareils qui existaient à cette époque à Madagascar. Ces valeurs ne peuvent donner que des ordres de grandeur.

figure 2.33.

Courbes intensité
Durée-Fréquence




## 7.4.4. Pluies exceptionnelles

Nous donnons ci-dessous (tableaux 2.13. à 2.16.) les plus fortes précipitations de vingt-quatre heures enregistrées à quelques stations du réseau météorologique malgache.

tableau 2.13

| Stations | Hauteur mm | Date | Période d'observations |
|---|---|---|---|
| AMBATOLAONA | 162,8 | 12-02-1943 | 1933-1963 |
| | 154,8 | 15-02-1945 | |
| | 141,7 | 14-01-1954 | |
| | 122,9 | 26-01-1956 | |
| | 129,4 | 27-03-1959 | |
| ANTANANARIVO | 133,3 | 29-01-1938 | 1930-1963 |
| | 132,5 | 28-02-1941 | |
| | 121,6 | 03-03-1941 | |
| | 131,2 | 14-10-1946 | |
| AMBONDRONA | 135,3 | 12-02-1943 | 1935-1963 |
| | 161,9 | 14-01-1954 | |
| BEHENJY | 122,0 | 14-01-1954 | 1934-1963 |
| | 120,0 | 30-10-1955 | |
| | 167,3 | 23-01-1958 | |
| MIARINARIVO | 124,8 | 25-12-1954 | 1938-1963 |
| MANJAKATOMPO | 129,9 | 18-01-1945 | 1934-1963 |
| | 121,9 | 20-03-1950 | |
| | 118,5 | 17-12-1951 | |
| ANKAZOBE | 122,8 | 06-02-1952 | 1930-1963 |
| ANJOZOROBE | 123,3 | 14-01-1954 | 1935-1963 |
| | 135,2 | 26-03-1959 | |
| KIANGARA | 121,6 | 01-02-1955 | 1935-1963 |
| | 122,4 | 16-12-1956 | |
| | 136,3 | 31-12-1962 | |
| ANDRIBA | 128,4 | 05-02-1938 | 1930-1963 |
| | 169,5 | 21-01-1939 | |
| | 165,2 | 09-01-1942 | |
| | 117,3 | 13-02-1943 | |
| | 124,2 | 17-01-1951 | |
| | 119,8 | 21-01-1958 | |
| | 131,0 | 19-11960 | |
| MAEVATANANA | 158,0 | 22-01-1935 | 1930-1963 |
| | 133,7 | 14-01-1937 | |
| | 171,7 | 16-03-1937 | |
| | 118,9 | 25-2-1938 | |
| | 125,4 | 10-03-1939 | |
| | 161,4 | 18-01-1941 | |
| | 166,9 | 10-02-1943 | |
| | 126,7 | 18-11-1946 | |
| | 162,0 | 21-02-1949 | |
| | 156,0 | 16-01-1951 | |
| | 138,1 | 16-03-1951 | |
| | 158,9 | 26-02-1956 | |
| | 123,6 | 15-12-1958 | |

suite

| Station | P en mm | Date | Période d'observations |
|---|---|---|---|
| KANDREHO | 120,2 | 12-04-1935 | 1934-1963 |
| | 168,6 | 21-11-1935 | |
| | 138,0 | 08-01-1937 | |
| | 126,9 | 21-01-1939 | |
| | 161,9 | 14-02-1940 | |
| | 122,6 | 01-03-1941 | |
| | 218,6 | 18-01-1943 | |
| | 138,2 | 13-11-1943 | |
| | 144,5 | 21-01-1951 | |
| | 152,0 | 10-02-1954 | |
| | 120,3 | 19-12-1954 | |
| | 125,0 | 26-01-1956 | |
| | 375,0 | 18-03-1958 | |
| TSARATANANA | 153,2 | 26-01-1931 | 1930-1963 |
| | 129,7 | 08-12-1932 | |
| | 132,9 | 05-01-1934 | |
| | 188,3 | 11-01-1937 | |
| | 132,5 | 22-01-1939 | |
| | 130,1 | 12-02-1940 | |
| | 130,1 | 07-01-1941 | |
| | 133,5 | 11-12-1941 | |
| | 125,3 | 13-02-1942 | |
| | 140,1 | 14-02-1943 | |
| | 121,8 | 14-12-1945 | |
| | 120,4 | 04-03-1946 | |
| | 132,5 | 09-01-1951 | |
| | 393,5 | 14-01-1953 | |
| | 214,7 | 08-01-1959 | |
| IFANADIANA | 258,2 | 10-01-1937 | 1930-1965 |
| | 231,8 | 17-01-1941 | |
| | 222,5 | 06-02-1945 | |
| | 220,8 | 17-02-1963 | |
| | 172,6 | 10-01-1934 | |
| | 163,6 | 19-06-1953 | |
| | 157,6 | 25-01-1956 | |
| | 154,0 | 28-03-1959 | |
| | 130,8 | 20-03-1931 | |
| | 130,4 | 27-02-1937 | |
| | 128,0 | 18-01-1943 | |
| | 122,3 | 20-01-1957 | |
| AMBOSITRA | 186,0 | 24-09-1952 | 1926-1965 |
| | 171,1 | 28-01-1956 | |
| | 113,3 | 06-02-1945 | |
| FIANARANTSOA | 166,6 | 06-02-1945 | 1928-1965 |
| | 127,9 | 17-01-1941 | |
| | 127,2 | 25-01-1933 | |
| BETROKA | 147,0 | 13-01-1955 | 1929-1965 |
| | 123,0 | 30-12-1937 | |
| | 122,3 | 07-01-1942 | |

suite

| Stations | Hauteur mm | Date | Période d'observations |
|---|---|---|---|
| IHOSY | 132,6 | 28-01-1941 | 1928-1965 |
| | 95,2 | 17-12-1958 | |
| | 91,9 | 10-02-1954 | |
| | 91,2 | 23-01-1939 | |
| RANOHIRA | 150,3 | 14-02-1946 | 1934-1965 |
| | 128,1 | 28-01-1941 | |
| | 103,8 | 04-12-1956 | |
| BERoROHA | 250,4 | 14-02-1946 | 1934-1965 |
| | 164,8 | 08-01-1956 | |
| | 163,0 | 12-11-1946 | |
| | 143,9 | 20-03-1946 | |
| | 120,9 | 25-12-1950 | |
| MALAIMBANDY | 150,0 | 25-02-1939 | 1934-1965 |
| | 141,5 | 08-01-1959 | |
| | 127,8 | 27-02-1958 | |
| | 119,9 | 05-12-1939 | |
| SAKARAHA | 143,6 | 07-01-1952 | 1934-1965 |
| | 116,9 | 04-03-1944 | |
| | 107,5 | 08-10-1965 | |
| | 106,8 | 13-03-1939 | |
| ANKAZOABO | 285,0 | 14-02-1946 | 1924-1965 |
| | 153,7 | 18-02-1945 | |
| | 145,0 | 25-01-1964 | |
| | 142,3 | 28-01-1941 | |
| | 115,3 | 13-01-1948 | |
| MANJA | 205,4 | 13-01-1948 | 1935-1965 |
| | 200,0 | 06-01-1952 | |
| | 138,9 | 20-03-1946 | |
| | 130,4 | 23-01-1939 | |
| | 130,0 | 28-01-1941 | |
| | 120,0 | 19-02-1953 | |
| MOROMBE | 242,2 | 13-02-1946 | 1929-1965 |
| | 217,4 | 13-01-1958 | |
| | 198,7 | 07-01-1965 | |
| | 170,4 | 17-03-1952 | |
| | 164,7 | 16-01-1953 | |
| | 125,0 | 01-03-1931 | |

Extrait de : monographie hydrologique de la BETSIBOKA, tome A, pages 144,145 et 146.
Monographie hydrologique du MANGOKY, tome A, pages 129 et 130.

tableau 2.14.

Précipitations sur l'est

| Maxima de pluie en 24 h (mm) | | |
|---|---|---|
| Stations | Max. en 24 h | Date |
| Antsaranana | 508,1 | 14-3-37 |
| | 533,3 | 9-3-62 |
| Sambava | 354,6 | 31-1-66 |
| Antalaha | 324,6 | 2-2-66 |
| Ambodifototra | 301,5 | 20-3-31 |
| Maroantsetra | 328,2 | 13-2-38 |
| Tamatave | 441,5 | 7-3-49 |
| Vatomandry | 543,3 | 8-4-63 |
| Fenerive | 333,5 | 17-3-59 |
| Mahanoro | 452,7 | 27-3-59 |
| Nosy-Varika | 385,8 | 28-3-59 |
| Mananjary | 430,8 | 28-3-59 |
| Manakara | 334,5 | 1-2-69 |
| Farafangana | 336,8 | 20-11-34 |
| Vangaindrano | 216,8 | 10-2-54 |
| Tolanaro | 282,7 | 23-3-56 |
| Andapa | 265,0 | 1-4-56 |
| Moramanga | 280,0 | 15-2-38 |
| Mouneyres | 247,9 | 2-4-44 |
| Périnet | 259,2 | 2-3-37 |
| Fanovana | 295,0 | 25-12-48 |
| Ivoloina | 311,5 | 14-3-31 |
| Anosibe | 271,2 | 20-2-35 |
| Marolambo | 225,0 | 14-1-54 |
| Ifanadiana | 258,2 | 11-10-37 |
| Vondrozo | 234,9 | 11-3-44 |
| Midongy | 244,5 | 16-12-45 |
| Nahampoana | 380,0 | 29-1-51 |

tableau 2.15.

Pluies sur l'ouest

| Pluies en 24 h | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Records 1960-1970 | | | Records absolus | | |
| Stations | mm | Date | Stations | mm | Date |
| Mahajanga | 205,0 | 20-12-61 | Analalava | 256,1 | 02-45 |
| | 94,4 | 30-12-68 | Mahajanga | 320,5 | 03-40 |
| | 138,4 | 20-01-62 | Besalampy | 378,1 | 01-65 |
| | 171,3 | 12-01-64 | Maintirano | 300,7 | 12-58 |
| | 113,2 | 06-01-68 | Belo sur Tsiribihinazz | 233,9 | 02-69 |
| | 101,1 | 08-01-70 | Morondava | 313,0 | 02-40 |
| | 188,5 | 14-02-66 | Morombe | 242,2 | 02-45 |
| | 245,2 | 11-02-69 | Toliara | 225,4 | 02-66 |
| | 105,7 | 08-03-64 | Faux-Cap | 122,6 | 02-49 |
| | 117,3 | 21-04-68 | Befandriana N. | 273,3 | 01-41 |
| Maevatanana | 136,0 | 23-12-65 | Mampikony | 224,5 | 01-64 |
| | 112,0 | 21-01-67 | Port-Bergé | 267,6 | 02-40 |
| Miandrivazo | 101,2 | 16-12-63 | Marovoay | 261,5 | 03-50 |
| | 108,4 | 22-01-65 | Maevatanana | 171,7 | 03-37 |
| Morondava | 244,0 | 29-12-69 | Ankavandra | 158,0 | 01-54 |
| | 156,0 | 11-01-64 | Miandrivazo | 262,3 | 01-54 |
| | 268,1 | 16-01-70 | Ankazoabo | 285,0 | 01-46 |
| | 233,6 | 18-02-68 | Betioky | 199,7 | 12-63 |
| Toliara | 167,8 | 05-01-61 | Ampanihy | 179,2 | 01-38 |
| | 137,3 | 27-01-68 | | | |
| | 225,4 | 11-02-66 | | | |
| | 111,9 | 12-02-66 | | | |
| | 165,5 | 19-12-64 | | | |
| Ankazoabo | 145,0 | 25-01-64 | | | |

Les plus fortes pluies de vingt-quatre heures sont recueillies sur la côte est : VATOMANDRY, 543 mm le 8 avril 1963.

Antsiranana a reçu le 9 mars 1962, 533 mm, donc très voisin du record de la côte est.

Sur le versant occidental, le maximum, en vingt-quatre heures, est observé à TSARATANANA avec 398 mm, suivi par BESALAMPY, 378 mm en janvier 1965 et KANDREHO, 375 mm le 14 janvier 1953. MAHAJANGA, en mars 1940, a enregistré 320 mm et MORONDAVA, 313 mm en février 1940.

Les hautes terres reçoivent des hauteurs journalières maximales, beaucoup plus faibles ; 188 mm à SOAVINANDRIANA, le 9 janvier 1937, 186 mm à AMBOSITRA le 24 septembre 1952, 167 mm à FIANARANTSOA le 6 février 1945 et 166 mm à AMBATOLAMPY le 1er février 1948.

Dans le sud, les précipitations maximales en vingt-quatre heures sont à peu près du même ordre : TOLIARA, 225 mm en février 1966, 179 mm à FAUX CAP, en février 1949.

On peut compléter cette énumération par quelques valeurs maximales observées sur plusieurs jours consécutifs au cours des cyclones tropicaux. Ainsi, il a été recueilli :

en 1959 :
- à MANDRITSARA,en cinq jours, du 16 au 20 mars 303 mm,
- à MANANARA-NORD,en trois jours, du 15 au 17 mars 515 mm,
- à MAHANORO,en six jours, du 16 au 21 mars, 746 mm,
- à TOAMASINA,en quatre jours, du 16 au 19 mars, 603 mm,

en 1958 :
- à ISALO, en quatre jours, du 22 au 25 Février, 807 mm,
- à MAINTIRANO, en deux jours 279 mm

en 1956 :
- à MALAKIALINA,en six jours, du 7 au 12 janvier, 562 mm,
  dont, en deux jours, les 7 et 8 janvier 395 mm.

tableau 2.16.

Maxima pluviométriques
estivaux en 24 heures sur les hautes-terres
Extrait de "Contribution géographique
*à l'étude du climat de Madagascar"*
par G. DONQUE, 1971.

| | Ankazobe | Anjozorobe | Tsiroanomandidy | Soavinandriana | Imerintsiatosika | Arivonimamo | Ivato | Tananarive | Angavokely | Mantasoa | Ambatolampy |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Oct.** | | | | | | | | | | | |
| mm | 62,0 | 50,2 | 79,1 | 92,8 | 45,6 | 48,1 | 105,6 | 132,2 | 64,2 | 49,6 | 49,9 |
| date | 30/10/40 | 16/10/46 | 7/10/55 | 27/10/39 | 25/10/58 | 8/10/64 | 27/10/63 | 14/10/46 | 1/10/44 | 1/10/44 | 24/10/54 |
| **Nov.** | | | | | | | | | | | |
| mm | 85,0 | 47,5 | 36,6 | 114,7 | 117,7 | 99,6 | 82,0 | 100,1 | 72,7 | 74,7 | 67,0 |
| date | 28/11/50 | 15/11/53 | 24/11/41 | 16/11/38 | 14/11/46 | 14/11/51 | 19/11/67 | 19/11/46 | 3/11/51 | 8/11/52 | 24/11/59 |
| **Déc.** | | | | | | | | | | | |
| mm | 99,3 | 92,0 | 86,2 | 115,7 | 114,4 | 96,5 | 155,7 | 110,0 | 75,8 | 100,1 | 87,0 |
| date | 11/12/60 | 18/12/36 | 30/12/55 | 11/12/59 | 30/12/51 | 11/12/65 | 6/12/63 | 14/12/59 | 7/12/47 | 7/12/43 | 26/12/41 |
| **Janv.** | | | | | | | | | | | |
| mm | 108,5 | 123,3 | 130,3 | 188,2 | 78,9 | 103,6 | 100,4 | 133,3 | 117,5 | 148,5 | 144,8 |
| date | 6/01/47 | 14/01/54 | 5/01/41 | 9/01/37 | 5/01/43 | 11/01/67 | 8/01/66 | 29/01/38 | 21/01/54 | 21/01/54 | 11/01/48 |
| **Fév.** | | | | | | | | | | | |
| mm | 122,8 | 84,0 | 136,1 | 119,4 | 121,8 | 100,8 | 113,6 | 132,5 | 94,1 | 133,2 | 166,3 |
| date | 6/02/52 | 3/02/38 | 13/02/43 | 21/02/60 | 6/02/46 | 18/02/67 | 5/02/64 | 28/02/41 | 11/02/49 | 20/02/43 | 1/02/48 |
| **Mars** | | | | | | | | | | | |
| mm | 98,0 | 135,2 | 128,0 | 113,7 | 92,2 | 110,5 | 98,1 | 121,6 | 94,2 | 107,8 | 103,0 |
| date | 5/03/60 | 26/03/59 | 5/03/38 | 15/03/39 | 19/03/53 | 3/03/38 | 31/03/49 | 3/03/41 | 30/03/49 | 8/03/44 | 16/03/51 |

suite

| | Maniakatompo | Tsinjoarivo | Faratsiho | Ambohibary | Anistrabe | Nanokely | Ambositra | Fianarantsoa | Ambalavao | Ihosy | Betroka |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Oct.** | | | | | | | | | | | |
| mm | 57,5 | 46,0 | 55,9 | 80,9 | 75,8 | 54,1 | 63,4 | 69,7 | 49,8 | 53,4 | 52,2 |
| date | 7/10/48 | 31/10/45 | 30/10/41 | 25/1052 | 15/10/53 | 14/10/40 | 14/10/41 | 24/10/40 | 26/10/50 | 28/10/45 | 19/10/41 |
| **Nov.** | | | | | | | | | | | |
| mm | 85,6 | 192,0 | 59,2 | 100,9 | 64,5 | 70,5 | 68,2 | 100,5 | 73,6 | 103,8 | 86,9 |
| date | 16/11/49 | 26/11/59 | 5/11/54 | 17/11/51 | 16/11/40 | 21/11/53 | 15/11/47 | 15/11/47 | 6/11/41 | 21/11/59 | 28/11/34 |
| **Déc.** | | | | | | | | | | | |
| mm | 118,5 | 150,6 | 85,0 | 102,6 | 86,6 | 70,1 | 93,3 | 95,6 | 90,3 | 95,2 | 123,0 |
| date | 6/12/51 | 13/12/58 | 19/12/51 | 20/12/46 | 28/12/50 | 15/12/38 | 17/12/55 | 19/12/52 | 22/12/43 | 17/12/58 | 30/12/37 |
| **Janv.** | | | | | | | | | | | |
| mm | 129,9 | 126,5 | 92,0 | 101,0 | 107,6 | 102,1 | 171,1 | 127,9 | 95,3 | 132,6 | 147,0 |
| date | 8/01/45 | 6/01/59 | 26/01/58 | 2/01/32 | 23/01/58 | 01/51 | 28/01/50 | 17/01/41 | 17/01/41 | 28/01/41 | 13/01/55 |
| **Fév.** | | | | | | | | | | | |
| mm | 96,4 | 114,0 | 178,4 | 95,4 | 99,8 | 106,0 | 113,3 | 166,6 | 149,3 | 91,9 | 90,0 |
| date | 20/02/52 | 6/02/56 | 4/02/57 | 16/02/39 | 2/02/37 | 5/02/45 | 6/02/45 | 6/02/45 | 7/02/45 | 10/02/54 | 18/02/42 |
| **Mars** | | | | | | | | | | | |
| mm | 121,9 | 67,0 | 94,5 | 100,1 | 111,3 | 104,8 | 98,6 | 79,0 | 72,5 | 57,0 | 78,5 |
| date | 25/03/50 | 19/03/42 | 15/03/39 | 4/03/41 | 4/03/44 | 16/03/41 | 20/03/43 | 19/03/31 | 2/03/36 | 12/03/39 | 7/03/41 |

Pour terminer ce paragraphe sur les pluies exceptionnelles, nous citerons l'étude faite par Electricité de France (réservoir de TSIAZOMPANIRY, évacuation des crues vers le bassin de MANGORO. Note hydrologique. EDF, IGECO-ORSTOM, 1963) pour l'établissement d'un hyétogramme "enveloppe" à partir d'épisodes pluvieux abondants, en vue de la détermination de la crue exceptionnelle de la VARAHINA sud, dans la région des hautes terres centrales :

Le bassin versant de la VARAHINA-SUD à TSIAZOMPANIRY occupe une superficie de 335 km² à une altitude variant de 1 500 à 2 000 m environ sur les Hauts-Plateaux malgaches à l'est du massif de l'ANKARATRA. Il s'inscrit entre les parallèles 19°15' et 19°35'sud et les méridiens 47°45' et 48°est.

Sur les hauts plateaux, au nord, à l'est et au sud du massif de l'ANKARATRA, le régime pluviométrique est assez homogène. Les précipitations importantes se produisent généralement de décembre à mars et surviennent bien souvent en séries successives. Ces épisodes pluvieux couvrent des durées de cinq à quinze et même parfois vingt jours sans interruption. Les hauteurs d'eau recueillies sont relativement abondantes lorsque ces épisodes pluvieux ont un caractère cyclonique.

On observe, dans ces conditions, des précipitations sur une très grande superficie et si l'on prend des postes pluviométriques, distants de 20 à 50 km par exemple, on constate une bonne corrélation entre les hauteurs d'eau recueillies par mois ou pour la totalité d'un épisode pluvieux long et intense.

Cependant cette corrélation est beaucoup plus lâche si l'on examine les précipitations journalières : les dates d'apparition des phases intenses d'un épisode ne sont généralement pas les mêmes aux divers postes pluviométriques de la région intéressée par cet épisode.

On pourra donc, sans méconnaître l'existence d'une certaine liaison, considérer à l'échelle des précipitations journalières, des postes pluviométriques distants pour le moins de 20 km comme indépendants.

Ceci nous permet d'appliquer la méthode des stations-années. Il n'existe, en effet, ni dans le bassin de la VARAHINA-SUD ni dans la région, de poste pluviométrique assez ancien pour que sa seule analyse permette l'établissement d'un hyétogramme-enveloppe de fréquence rare.

La plus ancienne station, celle de l'Observatoire de TANANARIVE, ne nous offre, en effet, que soixante-deux années complètes de relevés journaliers des précipitations.

Nous avons donc choisi autour du bassin de TSIAZOMPANIRY, comme cadre de notre étude pluviométrique, un rectangle de 250 km de long sur 105 km de large limité par les coordonnées suivantes : 18°20' et 20°3°'sud; 47 et 48° est.

A l'intérieur de cette surface d'environ 26 000 km2, nous avons retenu seize postes pluviométriques, distants d'environ 20 km au moins les uns des autres et situés à plus de 1 200 m (et même 1 400 m pour la majorité). En voici la liste dressée en s'éloignant du bassin de TSIAZOMPANIRY et pour des altitudes décroissantes ; nous avons fait figurer sur cette liste la période des relevés journaliers obtenus auprès du service météorologique et le nombre d'années complètes d'observation :

Pour chacune de ces stations, nous avons procédé à l'inventaire des épisodes pluvieux les plus intenses. Au début et à la fin de ces épisodes, nous n'avons pas tenu compte des petites pluies inférieures à 10 mm négligeables pour notre étude.

Certains de ces épisodes n'avaient pas un centre intense unique, mais deux journées très arrosées distantes de plusieurs jours ; nous avons considéré que cet épisode devait être scindé en deux phases distinctes si les maximums journaliers étaient séparés par plus de deux journées consécutives ayant reçu moins de 20 mm.

Dans ce dernier cas, en effet, il est patent, connaissant la durée du ruissellement unitaire à TSIAZOMPANTRY, que la crue résultante aurait eu deux pointes distinctes et donc que débit maximal et volume ruisselé ne pourraient prétendre à un caractère exceptionnel.

tableau 2.17

| Stations | Période de relevés journaliers | Nombre d'années complètes |
|---|---|---|
| AMBOHIMIADANA | 1935-1963 | 29 |
| ALATSINAINY-BAKARO | 1935-1963 | 29 |
| TSINJOARIVO | 1922-1963 (sauf 28) | 41 |
| AMBATOLAMPY | 1935-1963 | 29 |
| AMBOHIDRABIBY | 1934-1963 | 30 |
| ILEMPONA | 1950-1963 (sauf 60-62) | 12 |
| ANTSIRABE-Ecole | 1903-1905, 1912-1914 | |
| | 1921-1925 et 1929-1963 | 46 |
| ANDRAMASINA | 1934-1963 | 30 |
| MANJAKANDRIANA | 1942-1963 | 22 |
| ANTANANARIVO-Observatoire | 1891-1915, 1924-1963 | |
| | (sauf 60-61) | 62 |
| ARIVONIMAMO | 1938-1963 | 26 |
| FANDRIANA | 1953-1963 (sauf 56) | 10 |
| AMBOSITRA | 1902-1905, 1921-1924 | |
| | 1927 à 1963 (sauf 33 et 49 | 43 |
| MAHITSY | 1934-1963 | 30 |
| ANJOZOROBE | 1936-1963 | 28 |
| ANKAZOBE | 1932-1963 (sauf 59) | 31 |
| Total | | 498 |

Cet inventaire, mené aux seize stations dans l'ordre de la liste précédente, nous a conduit à retenir, au fur et à mesure, les épisodes pluvieux dont le hyétogramme avait, pour une journée quelconque, une intensité supérieure à toutes celles observées jusqu'alors pour la même journée. Les comparaisons des épisodes pluvieux entre eux ont été effectuées en superposant les journées de précipitations maximales ; dans l'hypothèse d'un épisode à deux pointes, on s'est efforcé de le mettre dans la position la plus dangereuse en le centrant au mieux sur les hyétogrammes à pointe unique.

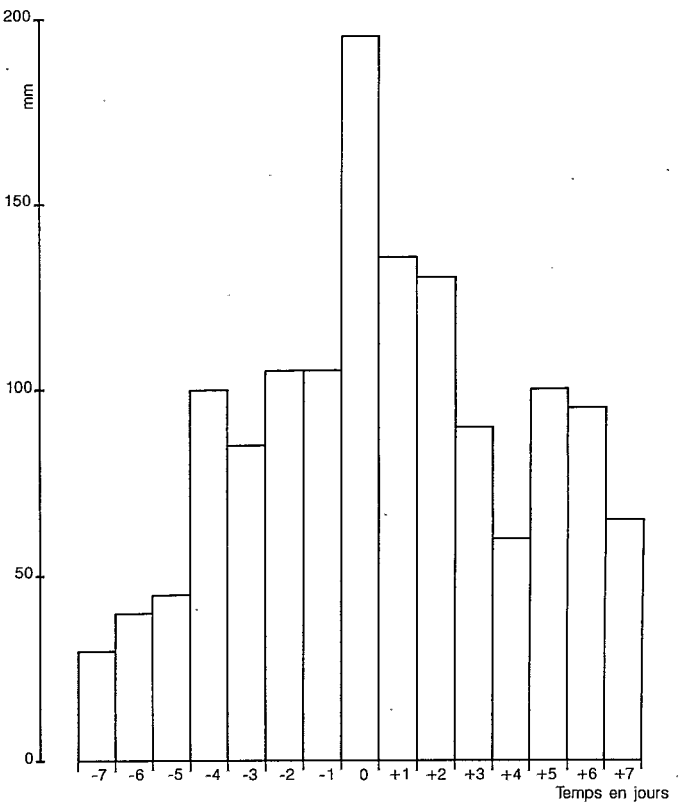
Ce travail accompli, il nous restait neuf épisodes pluvieux très intenses qui, à un titre ou à un autre, concourent à l'établissement du hyétogramme-enveloppe ; ils figurent sur le tableau n° 2.18. On remarquera que tous ces épisodes se sont produits à des dates différentes, ce qui renforce l'hypothèse d'indépendance entre stations.

L'échantillon traité nous fournit seulement cinq cents stations-années. Nous avons estimé que le hyétogramme-enveloppe que l'on pourrait en déduire n'aurait peut-être pas une fréquence assez rare. Aussi, pour atteindre avec sécurité le phénomène exceptionnel (disons la fréquence millénaire si l'on veut à tout prix parler ce langage), avons-nous décidé de majorer de 10 % les maximums journaliers de l'épisode pluvieux obtenu et d'arrondir les résultats aux 5 mm supérieurs afin d'avoir le hyétogramme-enveloppe désiré".

Une représentation graphique en est donnée sur le dessin 2.34.

figure 2.34.

Hyétogramme enveloppe de fréquence rare




CRUE EXCEPTIONNELLE DE LA VARAHINA SUD

tableau 2.18.

Episodes pluvieux intenses dans la région de Antananarivo (mm)

| Stations | Date | -7 | -6 | -5 | -4 | -3 | -2 | -1 | J.J | +1 | +2 | +3 | +4 | +5 | +6 | +7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AMBOHIMIADANA | 21-31/1/48 | | | | 89,1 | 17,9 | 63,8 | 60,0 | 14,9 | 44,9 | 26,1 | 24,8 | 35,6 | 89,3 | | |
| AMBOHIMIADANA | 28-31/12/51 | | | | | | | 7,5 | 170,5 | 103,5 | 115,0 | | | | | |
| TSINJOARIVO | 11-18/12/58 | | | | | | 5,0 | 37,9 | 150,6 | 92,0 | 110,0 | 38,0 | 52,0 | 17,2 | | |
| TSINJOARIVO | 1-12/1/59 | | | 25,3 | 35,6 | 19,5 | 97,8 | 90,0 | 126,5 | 20,5 | 20,33 | 32,4 | 32,4 | 68,7 | 25,0 | |
| AMBATOLAMPY | 5-19/1/48 | 27,2 | 34,0 | 39,4 | 22,8 | 76,6 | 42,3 | 24,7 | 144,8 | 32,5 | 36,3 | 22,6 | 41,7 | 33,3 | 83,7 | 55,9 |
| MANJAKANDRIANA | 9-17/12/54 | | | | | 1,5 | 7,5 | 16,2 | 174,8 | 29,7 | 34,2 | 57,1 | 9,4 | | | |
| MANJAKANDRIANA | 23-29/3/59 | | | | | 3,9 | 5,1 | 98,2 | 160,0 | 94,5 | 40,0 | 5,9 | | | | |
| AMBOSITRA | 25-31/1/56 | | | | 13,6 | 25,4 | 41,8 | 12,4 | 171,1 | 122,4 | 10,4 | 0,5 | | | | |
| ANJOZOROBE | 23/2 - 4/3/59 | | | | 73,6 | 45,4 | 25,2 | 15,2 | 53,5 | 20,2 | 22,5 | 78,6 | 27,2 | 22,4 | | |
| Maximums journaliers | | 27,2 | 34,0 | 39,4 | 89,1 | 76,6 | 97,8 | 98,2 | 174,8 | 122,4 | 115,0 | 78,6 | 52,0 | 89,3 | 83,7 | 55,9 |
| Episode enveloppe | | 30,0 | 40,0 | 45,0 | 100,0 | 85,0 | 110,0 | 110,0 | 195,0 | 135,0 | 130,0 | 90,0 | 60,0 | 100,0 | 95,0 | 65,5 |

# 8. LES RÉGIONS CLIMATIQUES

Diverses méthodes de classification ont été utilisées pour différencier les régions climatiques de MADAGASCAR, notamment les méthodes "ombrothermiques" (Atlas de Madagascar). En utilisant les critères de GAUSSEN, on définit en un point donné un mois "humide" par le fait que la précipitation mensuelle moyenne (en mm) est supérieure au double de la température mensuelle moyenne (en degré centigrade).

A l'instar des pédologues de l'ORSTOM (RIQUIER, HERVIEU) nous retiendrons de préférence la méthode basée sur la comparaison de la courbe des précipitations mensuelles et de la courbe de l'évapotranspiration potentielle (ces deux facteurs étant prédominants dans l'établissement du bilan hydrologique). En utilisant la méthode du bilan de THORNTHWAITE, on définit alors le mois "humide" comme étant le mois pour lequel la reprise par évapotranspiration potentielle est totalement satisfaite, soit par les apports pluviométriques seuls (s'ils sont suffisants, les sols étant considérés comme saturés) soit et à défaut, par l'utilisation de la réserve en eau du sol. Lorsque cette réserve est épuisée, l'évapotranspiration est réduite ; le mois est considéré comme "sec".

La figure 2.35. présente la carte des régions climatiques délimitées par les isolignes de l'indice global d'humidité de THORNTHWAITE ; le graphique 2.36. des diagrammes "pluie-ETP" pour certaines stations représentatives des différents climats malgaches (HERVIEU, 1967).

On distingue quatre régions climatiques principales.

## 8.1. Région perhumide

Les précipitations annuelles moyennes sont supérieures à 1 500 mm et peuvent atteindre ou dépasser 3000mm.

Les saisons sont peu contrastées. En saison "sèche", la quasi-totalité des précipitations mensuelles dépassent 100 mm.

La température moyenne annuelle reste comprise entre 20 et 25°C. La température moyenne du mois le plus frais reste supérieure à 15°. On observe une forte humidité atmosphérique et la nébulosité est presque toujours importante.

L'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne est comprise entre 900 et 1 300 mm.

On y observe dix à douze mois "humides". Les sols restent toujours pratiquement saturés. L'ETR est voisine de l'ETP. L'indice global d'humidité (THORNTHWAITE) est supérieur à 100. Station représentative : TOAMASINA.

La région perhumide correspond au versant oriental de l'île, entre ANTALAHA au nord et TOLANARO au sud, à l'est du rebord oriental des Hauts-Plateaux (falaise de l'ANGAVO), mais à l'exception de la dépression

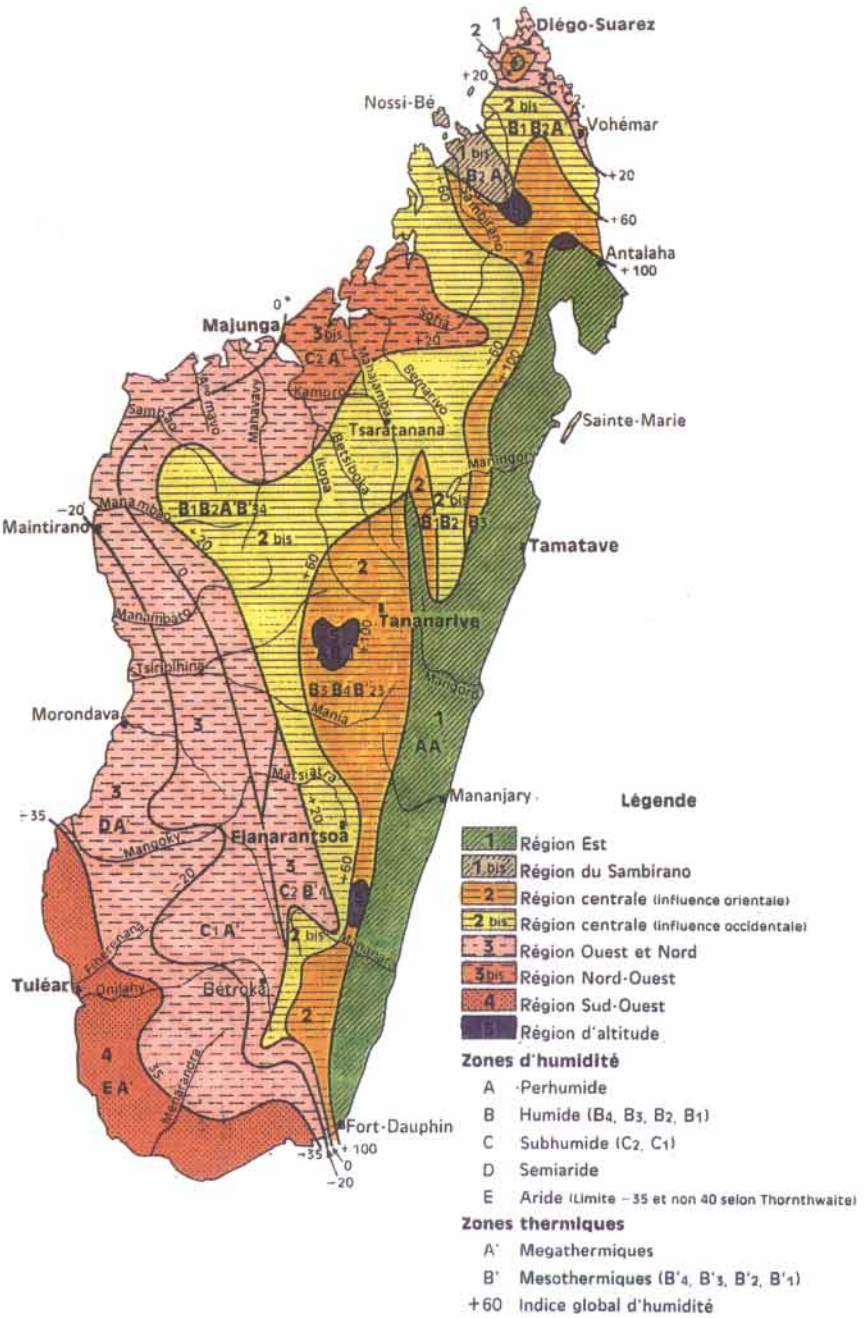
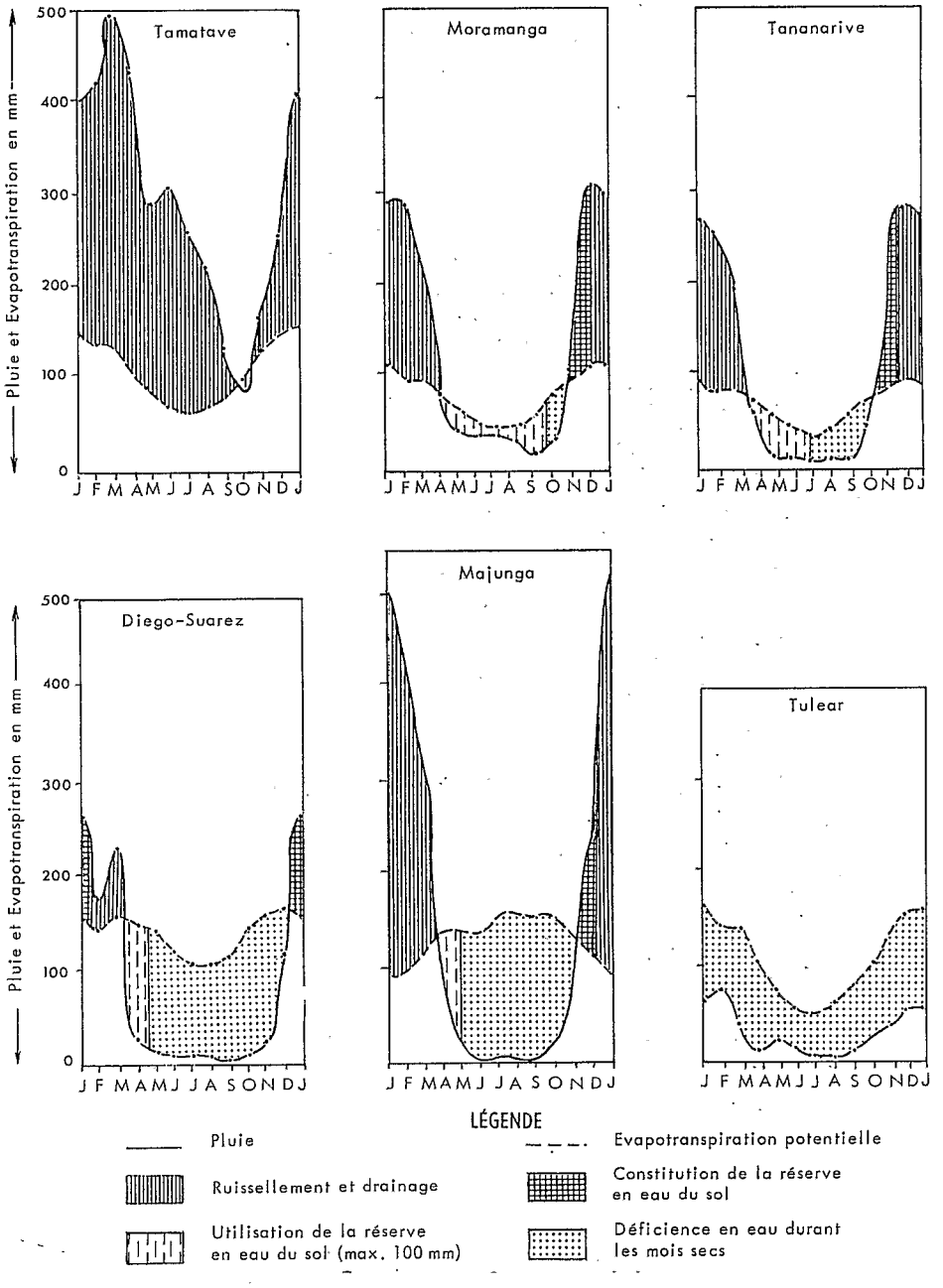



figure 2.35.

Régions climatiques (classification Thornthwaite, d'après J. Riquier - Extrait des cah. Orstom, sér. Pédol., vol. 1967

figure 2.36.

Courbes pluie - Evapotranspiration (extrait des cah. Orstom, sér. Pédol., vol. 1-1967)




MANGORO-ALAOTRA. Ce climat correspond également à la partie sommitale de la montagne d'Ambre ainsi qu'à la région NOSY-BE-BAS SAMBIRANO sur la côte nord-ouest, bien que dans cette dernière région on voit

apparaître une petite saison sèche pluviométrique, de juin à août.

## 8.2. Région humide et climat d'altitude

Les précipitations moyennes annuelles sont comprises, dans la région humide, entre 1 200 et 1 500 mm. La saison sèche commence à être marquée (pendant six mois environ, les précipitations restent comprises entre 10 et 50 mm).

La température moyenne annuelle est inférieure à 20°C. Pour le mois le plus frais, la température moyenne est comprise entre 10 et 15°C. L'humidité atmosphérique est moins accentuée que sur le versant oriental, ainsi que la nébulosité.

L'évapotranspiration potentielle est comprise entre 800 et 1 200 mm. On y observe six à dix mois "humides" et, de ce fait, l'évapotranspiration réelle ne représente plus que 70 à 80 % de l'ETP. L'indice global d'humidité est compris entre 20 et 100.

Station représentative : MARAMANGA - ANTANANARIVO.

La région humide correspond aux Hautes-Terres Centrales ; les caractéristiques climatiques se rapprochent du climat perhumide vers l'est (ANGAVO), du climat sub-humide vers l'ouest (BONGOLAVA).

Se rattachent à la région humide, la dépression du MANGORO-ALAOTRA, les contreforts de la montagne d'Ambre ainsi qu'au sud-ouest les massifs de l'ISALO et l'ANALAVELONA.

Sur les grands massifs montagneux (TSARATANANA, ANKARATRA, ANDRINGITRA), le climat d'altitude se caractérise par des précipitations annuelles moyennes supérieures à 2 000 mm, bien réparties avec une saison pluviométrique "sèche" peu marquée et des températures moyennes annuelles nettement inférieures à 20°C (de l'ordre de 15°) ; le mois le plus frais est compris entre 5 et 10°C. L'évapotranspiration potentielle est plus faible que sur les Hauts-Plateaux et on doit y observer dix à douze mois "humides".

## 8.3. Région sub-humide à semi-aride

Les précipitations annuelles moyennes sont comprises entre 700 mm (région semi-aride) et 1 500 mm (région sub-humide). La saison déficitaire est nettement marquée (quatre à cinq mois reçoivent moins de 15 mm).

Les températures moyennes annuelles sont relativement élevées (plus de 25°C). La température du mois le plus frais reste supérieure à 20°C.

L'évapotranspiration potentielle est forte ; supérieure à 1 200 mm, elle peut atteindre ou dépasser les 1800mm.

On observe entre deux et six mois "humides". L'ETR est réduite à 50 à 60 % de l'ETP.

L'indice global d'humidité est compris entre - 35 et + 20.

Stations représentatives : ANTSIRANANA - MAJUNGA.

La région sub-humide correspond, à l'ouest et au nord-ouest, à la bordure occidentale des Hauts-Plateaux Centraux, à la dépression périphérique du massif ancien et au bassin sédimentaire de MAHAJANGA, ainsi qu'à l'extrême nord de l'île : région de ANTSIRANANA.

La région semi-aride correspond au sud-ouest continental, du bassin de MORONDAVA au plateau de l'HOROMBE. Les massifs de l'ISALO et de l'ANALAVELONA se rattachent au climat sub-humide à humide.

## 8.4. Région sèche

Les précipitations annuelles moyennes sont comprises entre 350 et 600 mm, avec une forte irrégularité inter-annuelle. La saison pluviométrique sèche est assez peu différenciée car les précipitations sont soutenues par les apports méridionaux, mais quatre à cinq mois seulement reçoivent plus de 15 mm.

Les températures moyennes annuelles sont comprises entre 20 et 25°C. La température moyenne du mois le plus frais est égale ou supérieure à 20°C.

L'évapotranspiration potentielle est comprise entre 1 200 et 1 300 mm. On n'y observe que zéro ou un mois "humide" et l'ETR est fortement réduite (25 à 30 % de l'ETP).

L'indice global d'humidité est inférieur à - 35.

Station représentative : TOLIARA.

La région sèche correspond aux avancées les plus méridionales du socle et aux terrains sédimentaires du sud-ouest et du sud (plateau MAHAFALY et zone côtière entre MOROMBE et AMBOVOMBE).

# Analyse des données hydrologiques

## Deuxième partie

# Présentation de l'analyse

Chapitre 3

## 1. DONNÉES DISPONIBLES

De 1945 à 1989, plusieurs centaines de stations hydrométriques, réparties sur l'ensemble de l'île, ont fait l'objet d'observations et mesures par les hydrologues de l'ORSTOM, seuls ou associés à des services malgaches.
Pour la grande majorité des stations, les observations ont été de courte durée, voire épisodiques, pour différentes raisons :

- éloignement et difficultés d'accès à la station ;
- mauvaises conditions hydrauliques se traduisant le plus souvent par une instabilité notable de la section de contrôle ;
- insuffisance du nombre de jaugeages et impossibilité d'établir une courbe de tarage ;
- étude ponctuelle effectuée pour un projet d'aménagement.

Pour quarante-trois stations, les observations et mesures ont été d'assez longue durée et de qualité suffisante pour constituer des échantillons relativement consistants. A partir de corrélations hydropluviométriques ou interstations, il a généralement été possible de réaliser des échantillons d'environ une trentaine d'années par station, soit un ensemble d'environ 1 300 stations-années. Ces stations contrôlent un ensemble de bassins représentant environ 226 000 km² (soit près de 38 % de la superficie de Madagascar). Les bassins contrôlés sont situés sur la façade occidentale du TSARATANANA, sur la côte orientale, le sud de l'île et les trois plus grands bassins malgaches : la BETSIBOKA, la TSIRIBIHINA et le MANGOKY.

Par contre, quelques grands fleuves malgaches, où les données sont fragmentaires ou de qualité médiocre, restent encore peu connus : le haut bassin de l'ONILAHY, la SOFIA, la MAHAVAVY du sud, le MANAMBOLO pour ne citer que quelques exemples.

Répartition par superficie des bassins contrôlés

| Superficie (km²) | Nombre de stations |
|---|---|
| 10 à 50 000 | 8 |
| 5 à 10 000 | 6 |
| 1 à 5 000 | 20 |
| inférieure à 1 000 | 9 |

# 2. MÉTHODOLOGIES DE L'ANALYSE

Pour les quarante-trois stations de référence, la démarche a été la suivante.

## 2.1. Examen critique des lectures limnimétriques

Il y a eu un relevé par jour jusqu'en 1960, puis trois relevés journaliers en saison des pluies - octobre à avril - et un relevé journalier en saison sèche.

Certaines stations avaient été équipées de limnigraphes à inscription graphique qui, pour des raisons matérielles, n'ont pu être encore exploités. Quelques sondages comparatifs entre débits provenant de la traduction des relevés journaliers et débits provenant d'un dépouillement sommaire des limnigrammes n'ont pas mis en évidence des distorsions significatives. Il n'en reste pas moins que, dès que possible, devra être réalisée la numérisation des diagrammes, ce qui permettra d'apporter une valorisation sensible de la connaissance des débits ponctuels, voire journaliers ou mensuels.

Par des méthodes classiques (comparaison inter-stations, correction des erreurs flagrantes de lecture, utilisation des comptes rendus de visite de contrôle des lecteurs, etc.) un certain nombre de corrections et complètement des lacunes de courte durée ont pu être effectués et permettre la constitution des fichiers de chroniques de hauteurs limnimétriques (couples hauteurs-temps).

## 2.2.Établissement des courbes d'étalonnage et barèmes de traduction de hauteurs en débits

Cette opération, relativement aisée, sauf exceptions, quand le nombre de jaugeages était suffisant pour la partie médiane des relations, comporte cependant des extrapolations délicates vers les basses eaux (prise en compte pour les sections non contrôlées par un seuil stable naturel ou artificiel des détarages entraînés par la mobilité du lit) et vers les hautes eaux (estimations des débits probables pour les fortes cotes par utilisation des méthodes classiques).

## 2.3.Traduction des hauteurs limnimétriques en débits par utilisation du logiciel Hydrom

Traduction suivie du calcul des débits moyens journaliers, mensuels et annuels.

Examen critique des résultats par analyse de la cohérence spatiale et temporelle des résultats (amont-aval et bassins adjacents, prise en compte des épisodes pluvieux). A ce stade, des corrections ont pu être effectuées (erreurs de lecture non décelées en première analyse, validité des courbes d'étalonnage utilisées).

## 2.4. Comparaison à l'échelle mensuelle des précipitations et des débits

Pour la plupart des stations de référence, les précipitations moyennes mensuelles sur les bassins ont été calculées (généralement sur la période novembre 1945 à octobre 1970) par la méthode de THIESSEN. Lorsque la densité et la répartition des postes utilisés sont satisfaisantes, et à condition que le gradient pluviométrique du bassin ne soit pas trop prononcé, les résultats sont convenables. Pour certains bassins, essentiellement situés sur le versant oriental, les postes disponibles sont situés sur les voies de communication, voire en bordure ou à l'extérieur des bassins, et prennent mal en compte les effets de relief et d'altitude. Pour ces bassins, la pluviométrie moyenne généralement très sous-estimée a dû être corrigée à partir des isohyètes interannuelles et en attribuant aux bassins des déficits d'écoulement régionalement homogènes.

Les résultats ont donc été affectés d'un cœfficient de correction qui respecte la variance des indicateurs pluviométriques mensuels.

Pour l'ensemble des bassins de référence, et pour les années concomitantes, les liaisons statistiques ont été effectuées à l'échelle mensuelle pour répondre à un triple objectif :

– vérifier sur deux échantillons réalisés indépendamment la fiabilité des données. Les résultats des régressions (la significativité des cœfficients de détermination étant systématiquement testée - loi de FISCHER-SNEDECOR) ont été généralement satisfaisants et ont permis de constater la bonne qualité moyenne des données hydropluviométriques ;
– étudier (à partir des cœfficients de corrélation) les influences respectives des précipitations et des débits antérieurs sur les différents débits mensuels en saison des pluies et en saison "sèche", première approche des mécanismes généraux des bassins. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux et graphiques ;
– permettre à partir des modèles linéaires simples ou multiples le complètement des données mensuelles manquantes (limité en général à un seul mois en saison des pluies et/ou plusieurs en saison sèche, en raison de la continuité du tarissement très souvent observée et du poids relativement plus faible des mois de basses eaux dans le calcul du débit moyen annuel). Dans le cas d'anomalies flagrantes non décelées au cours des étapes précédentes, des corrections de débits mensuels ont pu être effectuées à ce stade. Les modèles présentés pourront éventuellement être utilisés, en simulation, pour générer des chroniques.

Les résultats (valeurs mensuelles, moyennes et écarts-type, maximums et minimums observés, quantiles) sont présentés dans des tableaux rassemblant valeurs observées, complétées et corrigées. Des graphiques représentent des exemples de l'écoulement journalier en année humide et sèche.

## 2.5. Étude des apports annuels

Les débits moyens annuels, calculés pour les années complètes, ont été transformés en lames écoulées annuelles.

$Hmm = Qm^3s^{-1} * 86.4 * 365$ (ou 366) / S $km^2$

H lame annuelle, Q débit moyen annuel, S superficie du bassin versant.

Afin de vérifier la cohérence des valeurs annuelles, les lames ont été comparées (corrélation) avec les lames écoulées des bassins emboîtants ou adjacents ainsi qu'avec les précipitations annuelles sur les bassins (facteur

principal) corrigées éventuellement par un indice de concentration mensuelle de la pluviométrie et/ou un indice des précipitations (ou débits) relatif à l'année immédiatement antérieure (facteurs secondaires). Pour chaque station, l'échantillon des lames observées, calculées sur l'année hydrologique caractéristique des régimes malgaches (novembre-octobre, mois où statistiquement est observé le débit mensuel le plus faible) a été complété à partir des observations pluviométriques sur le bassin et/ou à partir des lames observées sur les bassins voisins en utilisant les régressions établies, corrigées d'une valeur aléatoire de l'écart-type résiduel pour conserver la variance initiale de l'échantillon.

Les échantillons ainsi constitués, d'une taille voisine en général de trente ans, ont été analysés statistiquement en adaptant les lois généralement utilisées en Hydrologie : GAUSS, GALTON (ou LOG-NORMALE), GUMBEL, GOODRICH, FRECHET, PEARSON III etc., par utilisation du logiciel DIXLOIS élaboré par l'ORSTOM. L'utilisation de tests statistiques (BRUNET-MORET, CHI2) permet de retenir les meilleures adéquations. Nous n'avons pas retenu à ce stade de l'analyse, une loi "régionale", choix souvent arbitraire, mais la loi fournissant la meilleure adéquation.

Les quantiles présentés dans les tableaux de résultats sont relatifs aux périodes de retour correspondant (ou peu supérieures) à la taille de l'échantillon analysé. Les paramètres de la loi retenue sont fournis afin de permettre aux éventuels utilisateurs le calcul des caractéristiques plus rares nécessaires aux projets d'aménagement. Enfin nous n'avons généralement pas reproduit, pour des raisons d'encombrement, les graphes représentatifs des échantillons et lois adaptées, ces illustrations maintenant bien connues n'apportant pas d'informations supplémentaires.

## 2.6. Étude des crues

Les hauteurs maximales atteintes chaque année ont été recensées (plus hautes eaux PHE observées à la station, observations effectuées sur les cours d'eau sur des stations voisines, nivellement des délaissées de crue, enquêtes sur les débordements et inondations, etc.). Elles ont été soigneusement critiquées et mises en regard des épisodes de crue observés sur les bassins voisins, notamment au cours des dépressions cycloniques observées sur les différentes régions de Madagascar.

Les courbes d'étalonnage ne sont généralement établies que pour un marnage réduit aux basses et moyennes eaux. Elles ont du être assez souvent fortement extrapolées pour la traduction en débit des plus hautes eaux par des méthodes classiques (extrapolation logarithmique, méthode de STEVENS à partir de la courbe de vitesses moyennes et de la courbe section mouillée/hauteur limnimétrique en tenant compte des débordements éventuels, etc.) Les débits ainsi obtenus doivent être appréciés avec une certaine réserve et ne représentent, le plus souvent, qu'un ordre de grandeur raisonnable.

Enfin, les échantillons d'observations continues correspondant à la période d'observation des différentes stations ont pu être complétés par une enquête historique sur les plus hautes eaux observées antérieurement, à partir des documents d'archive. Les hauteurs ainsi reconstituées ont été recalées par rapport aux échelles limnimétriques des stations et les débits correspondants estimés.

Les échantillons observés ont fait l'objet d'ajustement statistique à partir des lois classiques. Les quantiles ainsi calculés ont assez souvent été réévalués pour les récurrences rares (cinquantenales, centennales) par prise en compte des informations historiques. Les valeurs figurant dans les différents tableaux sont relativement fiables jusqu'aux valeurs decennales. Pour les récurrences plus rares, les résultats devront être considérés avec prudence.

## 2.7. Étude des débits de basses eaux

L'utilisation du logiciel de classement des débits journaliers (HYDROM) a permis de déterminer les différents débits caractéristiques.

QJmin. : débit journalier le plus faible de l'année ;

DCE : débit caractéristique d'étiage (non dépassé dix jours dans l'année) ;

DC11 : débit caractéristique non dépassé 30 jours dans l'année (consécutifs ou non) ;

DC9 : débit caractéristique non dépassé 90 jours dans l'année (consécutifs ou non).

Ces débits classés ont été calculés sur l'année calendaire (et parfois sur la période février-janvier). Les débits journaliers les plus faibles relatifs à l'année hydrologique apparaissent en effet très souvent en novembre, voire en décembre et exceptionnellement en janvier avant la reprise effective de la saison des pluies de l'année suivante.

Les relations statistiques entre QJmin, DCE, DC11 et DC9 ont été établies ainsi que les rapports des valeurs moyennes interannuelles de ces différents éléments caractéristiques de l'étiage.

Chaque fois que possible, les relations statistiques entre QJmin. et les facteurs déterminants du débit minimal (à savoir débit mensuel du mois charnière de fin de saison des pluies, indice pluviométrique de la saison des pluies, date du débit minimal, etc.) ont été établies.

Les dates d'observation du débit minimal ont été étudiées et leurs quantiles présentés dans les tableaux de débits caractéristiques.

Enfin, l'étude systématique des courbes de tarissement (lorsqu'elles ont pu être mises en évidence) a été effectuée. On admet que la vidange des aquifères non réalimentés et drainés par un cours d'eau obéit globalement et par approximation à une loi de DARCY. L'expression généralement adoptée est ainsi formalisée :

$QJmin. = Qo\ e^{-\alpha T}$

ou QJmin. est le débit moyen journalier le plus faible, Qo un débit journalier "charnière" correspondant au débit de base du début de la vidange des réservoirs du bassin, T la durée en jour séparant l'observation des débits journaliers Qo et QJmin, $\alpha$ un cœfficient caractéristique de la loi de vidange du bassin.

Sur certains bassins, il est possible d'observer plusieurs lois de tarissement correspondant à la vidange de réservoirs complexes.

Très souvent, le premier cœfficient (avril-juin par exemple) correspond à un pseudo-tarissement lié à la vidange progressive du (ou des) réservoirs globaux du bassin en position haute de la nappe (fort potentiel) ainsi qu'au ressuyage des sols et petits réservoirs naturels de surface (dépressions, mouilles, etc.). Le second cœfficient (juillet-novembre), nettement plus faible, correspond au véritable tarissement. Il peut être suivi, assez rarement sur les bassins observés, d'un troisième tarissement correspondant à l'épuisement des réserves ultimes du bassin (ceci se produit généralement en cas de reprise tardive de la saison des pluies).

Lorsque nous n'observons pas de cassure dans la droite de tarissement (obtenue sur un graphe Q en ordonnée logarithmique, T en abscisse normale), il est parfois observé un faisceau de droites caractéristiques de pentes variables autour d'une pente moyenne. Les différentes valeurs du cœfficient $\alpha$ peuvent parfois, dans ce cas, être mises en relation statistique avec les valeurs des débits charnières Qo relatives au début du tarissement. Cette relation traduit l'influence sur le cœfficient de tarissement du potentiel de la (ou des) nappes en fin de saison des pluies.

## 2.8. Bilans hydrologiques annuels et mensuels - Mécanismes de l'écoulement

Pour chaque année d'observation, les termes du bilan hydrologique annuel du bassin sont présentés. Ces différents termes correspondent à la loi de conservation des masses ainsi formulée.

P - H = DE (valeurs en mm)
Ke % = H/P (cœfficient d'écoulement)

où P est la précipitation moyenne annuelle sur le bassin ;
H l'ensemble des écoulements de surface et par drainage ;
DE le déficit d'écoulement qui peut comporter trois termes :
ETR l'évapotranspiration réelle (évaporation des sols et des eaux libres, transpiration des formations végétales),
DR différentiel des états de stockage entre le début et la fin de l'année considérée,
Inf infiltration profonde non drainée à l'exutoire du bassin. Cette infiltration profonde est le plus souvent négligeable et dépend de la nature du sous-sol, de la proximité des formations imperméables sous jacentes et de la position en altitude de la station de contrôle. Elle peut être cependant importante pour les bassins situés sur des formations volcaniques perméables en grand de faciès jeune (montagne d'Ambre) ou bien sur des zones karstiques (ouest de Madagascar).

La lame écoulée H est en corrélation plus ou moins étroite avec les précipitations P (avec une dispersion qui tient compte de l'effet parfois sensible de la répartition spatio-temporelle des précipitations, de l'influence de l'état antérieur des réserves (DR) et des conditions thermiques.

Le déficit d'écoulement DE, dont la variance est presque toujours nettement inférieure à celles des termes P et H, est déterminé pour sa partie principale ETR, par la pluviométrie de l'année et la distribution des précipitations mensuelles (sévérité de la saison sèche, ainsi bien sûr que par les températures et autres facteurs climatologiques non pris en compte dans ces bilans). Le déficit DE croît généralement en même temps que P. La représentation graphique des couples DE, P montre une organisation des points représentatifs autour d'une courbe moyenne de forme convexe qui tend par asymptote vers une limite supérieure correspondant à l'évapotranspiration potentielle caractéristique de la région climatique où se trouve situé le bassin. Selon la région climatique, cette limite peut être rapidement approchée (cas des bassins du versant oriental de Madagascar à forte pluviométrie) ou jamais rejointe (cas des bassins du Sud sous climat sec).

En moyenne interannuelle sur une durée suffisante d'observations, la variation de réserve DR peut être considérée comme négligeable devant P et H. De même, l'infiltration profonde a été considérée comme négligeable pour la plupart des bassins ne comportant pas, ou très peu, de formations perméables en grand (basaltes fissurés ou karst). Le déficit moyen interannuel DE est alors assimilé à l'évapotranspiration réelle ETR (fraction de l'évapotranspiration potentielle ETP caractéristique de la région climatique du bassin.) On a vu (cf. chapitre II, 5.3) que le rapport de l'ETR à l'ETP était compris à Madagascar entre 1 (ETR=ETP) pour les bassins les mieux arrosés de la côte est et 0.25 pour les bassins du Sud (région sèche).

Pour un certain nombre de bassins caractéristiques, les bilans hydrologiques (précipitations, évapotranspirations potentielles et réelles, lames écoulées, stockages et destockages dans les différents réservoirs) ont été établis à l'échelle mensuelle. L'évapotranspiration potentielle et sa répartition mensuelle ont été évaluées à partir des données régionales (stations climatologiques, bassins versants expérimentaux). Le bilan est calculé par la méthode de THORNTHWAITE simplifiée : pour la commodité du calcul, les deux ensembles de réservoirs (aquifères et réserves utiles des sols) ont été confondus sans vouloir attribuer à la réserve utile une dimension arbitraire. Le mécanisme général est le suivant.

En saison des pluies (décembre à mars en général), les excédents pluviométriques (appelés parfois "pluie efficace"), une fois satisfaites l'ETR (pratiquement égale à l'ETP) et la réhumidification des sols (complètement de

la réserve utile), permettent de nourrir la recharge éventuelle des différents aquifères (stockage) : latérites et zones altérées du socle sous-jacent, ainsi que l'écoulement par refus des sols saturés ou ruissellement des secteurs imperméables ou peu perméables (intensités des précipitations supérieures aux capacités d'infiltration). On observe généralement un solde cumulé croissant du stockage jusqu'en février puis ensuite une décroissance lente des stocks (une partie des réserves servant à nourrir l'écoulement conjointement avec les précipitations) jusqu'en mars-avril.

En fin de saison des pluies, la réserve mobilisable est comparée à la lame écoulée cumulée de saison "sèche" (mai-octobre en général). Cette réserve globale peut satisfaire entièrement l'écoulement de saison "sèche" et correspondre éventuellement à un solde (RU>O) dans la réserve utile pour le soutien de l'ETR. Dans certains cas (bassins du versant oriental), les écoulements de saison "sèche" sont alimentés conjointement par le drainage des nappes et par les précipitations encore relativement abondantes. Quant à l'ETR en saison "sèche", elle est réduite aux précipitations avec parfois le soutien, généralement pendant la première partie de la saison sèche, des stocks résiduels de la réserve utile.

Les bilans sont calculés en ligne (vérification des termes du bilan en moyenne interannuelle) et en colonne (vérification des termes du bilan à l'échelle du mois). Seuls figurent les soldes en fin de mois des variations de stock après transferts pendant le mois : en saison des pluies, drainage des aquifères et recharges ; en saison sèche, ruissellements de surface pour les précipitations les plus intenses, recharges partielles des nappes, reprises par ETR, etc. Il ne faut pas attribuer aux valeurs présentées une précision qu'elles n'ont pas en raison des indéterminations sur certains des termes (évapotranspiration potentielle et dans une moindre mesure, précipitations et écoulements) mais les tableaux et graphes permettent d'avoir une assez bonne idée des mécanismes d'écoulement et surtout facilitent l'intercomparaison des fonctionnements des différents bassins de l'île.

## 2.9. Autres bassins

Sur ces bassins, les informations sont anciennes et difficilement vérifiables ou bien récentes mais de trop courte durée ; nous fournirons les données recueillies en donnant une appréciation sur leur qualité. Dans la mesure du possible, par comparaison d'hydraulicité avec les stations de référence les plus proches, nous tenterons d'évaluer sommairement les caractéristiques moyennes de l'écoulement.

Afin de combler certaines lacunes sur la connaissance des crues, les résultats d'études particulières menées par l'ORSTOM dans un cadre contractuel, tout comme certaines données élaborées par d'autres services gestionnaires (Division d'Hydrométéorologie, Eaux et Forêts et CTFT) ont été repris, de même que quelques mesures et relevés d'enquêtes effectuées à la faveur d'épisodes cycloniques particuliers (jaugeages sur la SOFIA au pont de la RN 6 lors du cyclone Inès, plus hautes eaux atteintes par la SAHARENANA lors du cyclone ISIS,...)

L'analyse des différents bassins sera présentée dans l'ordre suivant :

- nord de Madagascar (montagne d'Ambre et massif du TSARATANANA) ;
- côte est (de la MANANARA du nord à la MANANARA du Sud) ;
- sud de Madagascar ;
- versant occidental (De l'ONILAHY à la SOFIA).

# Nord de Madagascar

Chapitre 4

Nous examinerons successivement les rivières tributaires de la montagne d'Ambre et du massif du TSARATANANA, dont une localisation schématique est représentée sur le graphe 4.1.

## 1. MONTAGNE D'AMBRE (AMBOHITRA)

La montagne d'Ambre occupe l'extrême nord de l'île et culmine à 1 475 m. Elle est presque entièrement constituée d'un socle volcanique néogène et quaternaire, essentiellement représenté par des basaltes fissurés et très perméables. Les altérites sont constituées, au sommet, de sols ferrallitiques typiques rouges. La partie sommitale est recouverte par une forêt ombrophile dense d'assez faible extension. Les flancs sont le domaine d'une végétation à tendance xérophytique (futaie claire peu élevée).

Les rivières adoptent un dispositif rayonnant avec des bassins allongés et très étroits d'organisation simple, dont la superficie totale représente environ 11 000 km². De fortes pentes sur les hauts bassins, les lits sont encombrés de blocs basaltiques. Les cours d'eau les plus importants, sur le versant oriental plus développé, sont la BESOKATRA, la SAHARENANA et l'IRODO.

En l'absence de stations d'observations permanentes, les données disponibles sont fragmentaires.

### 1.1. Bassin de la Besokatra

La BESOKATRA draine la façade nord-est de la montagne d'Ambre. Des observations ont été effectuées, entre 1948 et 1952, sur le haut bassin de la rivière au-dessus de la cote 400.

La station située sur le SAKAMARY-BE, petit affluent de la BESOKATRA, à la féculerie Cassam-Chenai (près de JOFFREVILLE) a pour coordonnées 12°34'S et 49°17'E. Le bassin a une altitude maximale de 1 120 m, la station étant voisine de la cote 400. La superficie contrôlée est d'environ 18 km².

figure 4.1.

Cours d'eau de la Montagne d'Ambre et du Tsaratanana et bassin de la Sofia

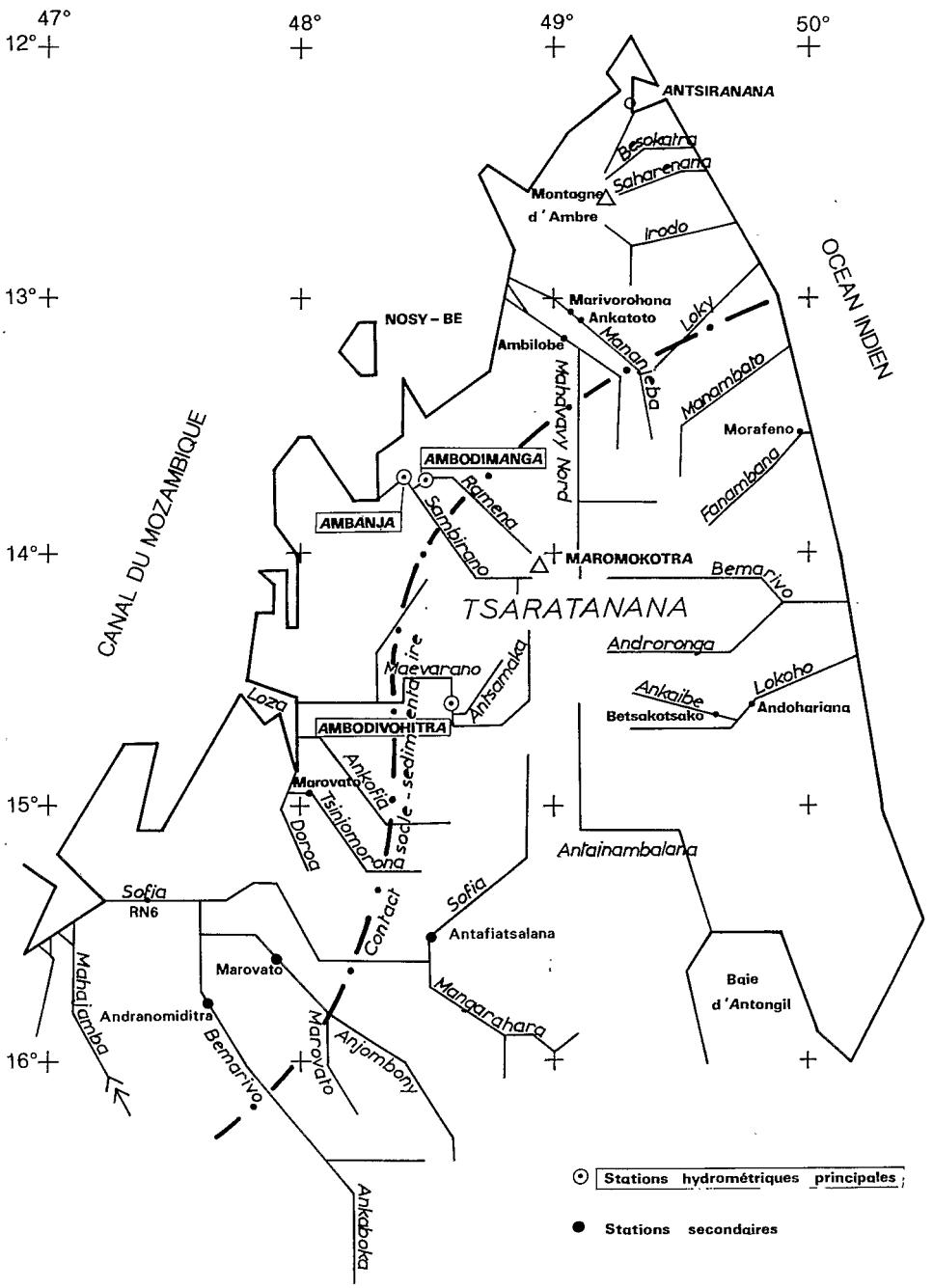


tableau 4.1.

Sakamary-Be
Débits observés (1/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1948-49 | | | | | | | | | 186 | 145 | 144 | 128 | |
| 1949-50 | 124 | 125 | 841 | 918 | 635 | 297 | 192 | 154 | 141 | 134 | 119 | 112 | 313 |
| 1950-51 | 115 | 150 | 1210 | 1240 | 978 | 348 | 161 | 118 | 106 | 105 | 98 | 95 | 389 |
| 1951-52 | 96 | 162 | 737 | 736 | 740 | 519 | 234 | 165 | | | | | |
| Moyenne | 112 | 146 | 929 | 965 | 784 | 388 | 196 | 146 | 144 | 128 | 120 | 112 | 345 |

Le graphe 4.2 représente l'hydrogramme de l'année 1949-50.

Les débits maximaux observés sont de :

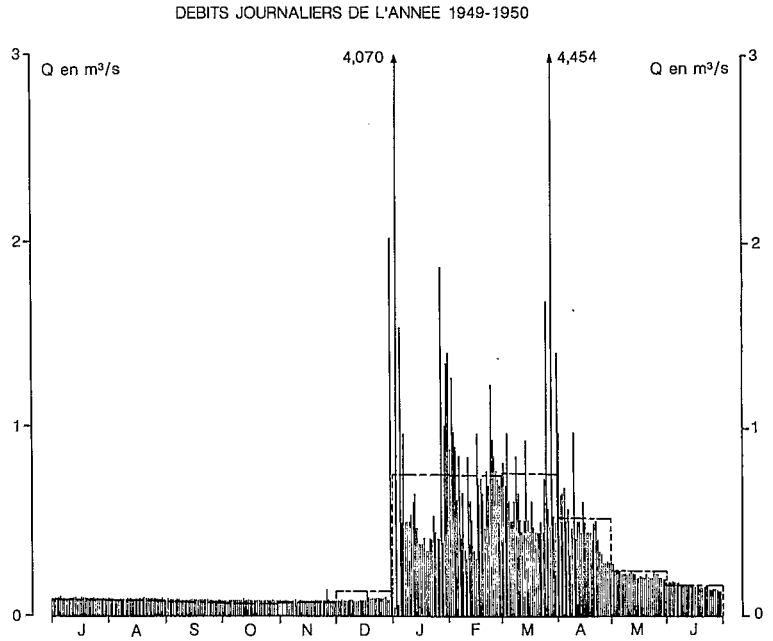
4.43 m³/s (246 l/s/km²) le 09 janvier 1950
3.03 m³/s (168 l/s/km²) le 23 janvier 1951
4.43 m³/s (246 l/s/km²) le 29 mars 1952

Les débits minimaux observés sont de :

.120 m³/s (6.7 l/s/km²) en novembre 1950
.105 m³/s (5.8 l/s/km²) en octobre 1951
.094 m³/s (5.2 l/s/km²) en novembre 1952

figure 4.2.

Sakaramy-Be à Joffreville



Des observations ont également été effectuées sur la branche-mère de la BESOKATRA, à l'altitude 450, pour un bassin versant de 50 à 60 km².

tableau 4.2.

Besokatra (cote 450)
Débits observés (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1948-49 | | | | | | | | | | | | .38 | |
| 1949-50 | .35 | .35 | 5.5 | - | 2.50 | 1.55 | .7 | .47 | .47 | .35 | .30 | - | |
| 1950-51 | | | | | | | | | | | | | |
| 1951-52 | | | | | | | | | .59 | .56 | .56 | .54 | |
| 1952-53 | .63 | .76 | 2.89 | 2.37 | 2.33 | 2.94 | 1.67 | - | - | - | - | - | |
| Moyenne | .49 | .55 | 4.20 | 2.37 | 2.42 | 2.25 | 1.19 | .47 | .53 | .45 | .43 | .46 | 1.31 |

Ainsi que plus en aval, à MAHAVANONA (12°29'S, 49°18'E), où la station située à la cote 70 contrôle un bassin d'environ 113 km².

tableau 4.3.

(valeurs en l/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1980-81 | 483 | | | | | | | 364 | 295 | 278 | 184 | 186 |
| 1981-82 | 207 | | | | | | | 916 | 664 | 468 | 275 | 279 |

avec des débits d'étiage de :

.134 m³/s le 16/10/81 (DCE = .150 m³/s soit 1.32 l/s/km²)
.186 m³/s le 27/09/82 (DCE = .208 m³/s soit 1.83 l/s/km²)
(.200) m³/s en 1983

De ces renseignements fragmentaires, nous pouvons avec prudence dégager les éléments caractéristiques suivants :

- lames écoulées d'environ 600 mm pour le SAKAMARY-BE, de 700 mm pour la BESOKATRA à la côte 450. Mises en regard de la pluviométrie moyenne sur les bassins, sommairement évaluée à environ 2 500 mm (d'après les isohyètes interannuelles), ces lames correspondent à un déficit d'écoulement voisin de 1 800 à 1 900 mm, très supérieur à l'évapotranspiration réelle voisine de 1 000 à 1 200 mm. Il est donc permis d'évaluer l'infiltration profonde dans les formations perméables basaltiques à 7 à 800 mm. Cette lame infiltrée échappe au drainage des hauts bassins et ne ressurgit qu'au niveau des basses vallées, voire par des sources sous-marines ;
- crues d'amplitude modérée (quelques centaines de l/s/km²) et ceci en dépit des fortes pentes qui leur confèrent cependant une forme aigüe avec de brefs temps de montée et des décroissances rapides jusqu'au débit de base. Il faut y voir l'influence prédominante des basaltes très perméables, qui réduisent sensiblement les cœfficients de ruissellement pour les précipitations de moyenne intensité ;
- débits de base soutenus en saison des pluies et ne descendant pas, en étiage, au-dessous de 2 à 6 l/s/km². Pour l'ensemble BESOKATRA + SAKAMARY + rivière des MAKIS (petit affluent du SAKAMARY à la cote 450, le débit moyen du semestre juin-novembre était estimé à 1.15 m³/s et le débit d'étiage à 850 l/s (étude d'alimentation en eau de ANTSIRANANA).

## 1.2. Bassin de la Saharenana

La SAHARENANA draine le flanc Sud-est de la montagne d'Ambre. Son bassin allongé aux pentes fortes repose sur des roches volcaniques fissurées (basaltes, labradorites).

La station du pont de la RN6 a été observée de 1980 à 1983 avec de nombreuses lacunes de lecture (un relevé journalier). L'étalonnage, basé sur une quinzaine de jaugeages, a pu être extrapolé jusqu'aux plus fortes cotes de 1983 (8.5 m³/s). Les débits mensuels indiqués dans le tableau 4.4. sont donnés à titre indicatif (en m³/s).

tableau 4.4.

Saharenana au pont de la RN 6 (12°35'S - 49°24'E)

Superficie du bassin versant : 197 km2.

Altitude maximale, moyenne, minimale : 1445 - 525 - 90 (en m)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1979-80 | | | | | | | | | | | | 1.17 | |
| 1980-81 | 1.22 | 1.72 | 1.14 | 20.0 | 12.5 | | | | | | | | |
| 1981-82 | | | | | | | | | | | | | |
| 1982-83 | 1.98 | 5.06 | 10.5 | 8.02 | 8.78 | 5.59 | 4.22 | 2.28 | 1.73 | 1.41 | 1.30 | 1.48 | 4.35 |
| 1983-84 | 1.36 | 3.13 | | | | | | | | | | | |

La lame écoulée 1982-83 (696 mm) correspond à une année voisine de la quinquennale humide (d'après le SAMBIRANO, station de référence la moins éloignée mais située plus au sud sur la façade occidentale du TSARATANANA). Avec prudence, on évaluera la lame écoulée médiane de la SAHARENANA à 550 à 600 mm, ce qui amène à des conclusions semblables à celles effectuées pour la BESOKATRA concernant le déficit d'écoulement.

Les crues sont très brèves et violentes. La forte crue de février 1982 qui détruisit la culée rive gauche du pont, aurait atteint d'après les délaissées, 3,20 m à l'échelle, soit un débit estimé à 270 m³/s (1370 l/s/km²). En 1973, le cyclone ISIS (16 février) avait été accompagné de précipitations intenses sur le nord-est de Madagascar. Le débit maximal de crue de la SAHARENANA avait pu être évalué à 1 120 m³/s (soit 5 680 l/s/km²). On voit ainsi que, si pour les précipitations moyennes, l'effet réducteur de la perméabilité des basaltes est très sensible, l'effet des fortes pentes devient prédominant pour les précipitations intenses et permet d'atteindre de très fortes valeurs spécifiques (plusieurs milliers de l/s/km²).

Les débits de base restent soutenus. En étiage, on a observé les valeurs suivantes :

.950 m³/s (4.80 l/s/km²) en septembre 1980
1.21 m³/s (6.14 l/s/km²) en fin 1982
1.12 m³/s (5.69 l/s/km²) en septembre 1983

Ils attestent la présence de puissantes nappes souterraines dans les formations basaltiques bien drainées à l'exutoire de basse altitude (70 m) du bassin.

Près du pont de la RN6, les débits d'étiage ont pu être observés sur l'ANDRANOTSIMITIALONA (12°35'S - 49°23'E) pour un bassin de 60 km² (altitude de la station de contrôle : 100 m).

1980 .130 m³/s (2.17 l/s/km²)
1982 .250 m³/s (4.17 l/s/km²)
1983 .210 m³/s (3.50 l/s/km²).

## 2. MASSIF DU TSARATANANA

Le TSARATANANA est le plus puissant massif de l'île. Il culmine au MAROMOKOTRO (2 876 m), situé approximativement à l'intersection 14°S - 49°E. L'ensemble du massif est constitué essentiellement de granites et migmatites anciens, soulevés par un anticlinal est-ouest, de micaschistes altérés, gneiss et migmatites du système du graphite recouverts partiellement de formations volcaniques (phénolites, basaltes) de la phase néogène et quaternaire. Plus rarement, on observe également la présence de roches éruptives basiques (amphibolites, pyroxénites) du système de VOHIBORY. Les formations sédimentaires littorales sont constituées, à l'ouest, par des séries gréseuses, gréso-calcaires et parfois schisteuses de la série de l'ISALO, à l'est, par des séries sédimentaires volcaniques crétacées (région de SAMBAVA-ANTALAHA).

Les altérites sont représentés sur les forts reliefs des parties sommitales en partie par des sols peu évolués (sols bruts d'érosion) mais essentiellement par des sols ferrallitiques typiques, jaune sur rouge sur les contreforts est du massif, rouge sur roches diverses cristallines au sud-ouest et sur le littoral oriental. Les formations sédimentaires de l'ouest sont le domaine des sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés sur altérites sableuses du système de l'ISALO. La basse SAMBIRANO est occupée par un large cône d'alluvions et sables alluvionnaires.

La forêt ombrophile dense, d'aspect sub-équatorial, est encore assez largement représentée, quoiqu'en régression. Quelques lambeaux de forêt dense tropophile caducifoliée sont également observés sur les contreforts nord-est. Partout ailleurs, on observe le domaine de la forêt dégradée en "Savaka" ainsi qu'au nord et au sud, des steppes et savanes herbacées et légèrement boisées.

La pluviométrie du TSARATANANA est mal déterminée. Les stations d'observations, de faible altitude sur les plaines littorales, sont parfois situées dans des cuvettes abritées (BEALANANA par exemple). En raison des flux d'air humide : alizés de la côte est dans la prolongation de la baie d'ANTONGIL, "mousson" d'ouest du secteur de NOSY-BE ainsi que des fortes lames écoulées des rivières étudiées, nous avons considéré que la pluviométrie moyenne du massif se situait avec de très fortes probabilités, au-dessus de 2 500 mm, et vraisemblablement devait dépasser, pour les parties les plus élevées, 3 500 à 4 000mm. Cela devrait naturellement être vérifié par des observations.

Les cours d'eau pour leurs hauts et moyens bassins, correspondent à un dispositif rayonnant centrifuge, mais d'organisation moins simple que pour la montagne d'Ambre, avec de fortes pentes initiales supérieures à 25 ‰

(cf. figure 1.9. de la première partie). Au contact des plaines littorales, ces pentes s'atténuent assez brutalement (1 à 2 ‰) et les cours s'infléchissent vers l'ouest (canal de MOZAMBIQUE) ou vers l'est (Océan Indien).

L'ensemble des bassins représente un superficie globale d'environ 25 000 km². Les cours d'eau les plus importants sont la MAHAVAVY du nord, le SAMBIRANO et la MAEVARANO sur le versant occidental, la BEMARIVO sur le versant oriental.

## 2.1. Le versant occidental

### 2.1.1. Bassin de la Mananjeba

Issue des derniers contreforts nord du massif, la MANANJEBA, située immédiatement au nord de la MAHAHAVY, a un bassin très allongé sur roches éruptives et volcaniques. Les pentes, très fortes dans le haut bassin (altitude maximale 1785 m), s'atténuent en approchant des plaines littorales.

De 1971 à 1976, des observations ont été effectuées à la station de ANKATOTO (13°11'S - 49°08'E) contrôlant un bassin de 945 km².

tableau 4.5.

Mananjeba à Ankatoto
Débit moyens journaliers (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1971-72 | 17.6 | 31.7 | 62.6 | 156 | 116 | 14.3 | 4.61 | 1.98 | .791 | .542 | .182 | .172 | 33.9 |
| 1972-73 | 7.38 | 23.7 | 109 | 230 | 108 | 22.3 | 10.6 | 7.27 | 5.33 | 3.70 | 2.87 | 1.57 | 44.3 |
| 1973-74 | .889 | 18.1 | 20.7 | 34.9 | 31.0 | 9.54 | 7.42 | 3.01 | 2.99 | 2.30 | 1.36 | .680 | 11.1 |
| 1974-75 | .510 | 19.0 | 39.0 | 42.2 | 84.1 | 12.9 | 6.41 | 3.52 | 2.68 | 1.96 | .770 | .366 | 17.8 |
| 1975-76 | 4.07 | 60.7 | 112 | 58.9 | 35.0 | 34.9 | 17.6 | 12.5 | 6.71 | - | - | - | - |
| Moyenne | 6.09 | 30.6 | 68.7 | 104 | 74.8 | 18.8 | 9.33 | 5.66 | 3.70 | 2.13 | 1.30 | .697 | 26.8 |

Une série de mesures réalisée à la faveur du cyclone Félicie, a permis de procéder à l'étalonnage de hautes eaux et à l'évaluation des plus forts débits de crue connus à cette station entre 1929 et 1983 (PHE 1931-32 et 1961-62).

L'échantillon des débits maximums annuels de la période 1961-1976 a été constitué à partir des relevés d'observations (station installée en octobre 1971) et des PHE, ainsi que de valeurs déduites des débits de crue connus sur la MAHAVAVY NORD à AMBILOBE.

| Année | Q m3/s | Date | ANKATOTO | MARIVORAHONA | Obs. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1931-1932 | 1160 | | (4,42) | | |
| 1961-1962 | 1470 | 19/01/62 | 4,83 | 21,97 NGM | PHE |
| 1962-1963 | (110) | | | | Amb |
| 1963-1964 | (400) | | | | Amb |
| 1964-1965 | (430) | | | | Amb |
| 1965-1966 | (850) | | | | Amb |
| 1966-1967 | (275) | | | | Amb |
| 1967-1968 | (630) | | | | Amb |
| 1968-1969 | (400) | | | | Amb |
| 1969-1970 | (240) | | | | Amb |
| 1970-1971 | 642 | 31/01/71 | 3,43 | 21,47 NGM | PHE |
| 1971-1972 | 687 | 08/03/72 | 3,55 | | 3rel |
| 1972-1973 | 965 | 02/02/73 | 4,15 | | 3rel |
| 1973-1974 | 225 | 28/12/73 | 2,00 | | 3rel |
| 1974-1975 | 317 | 14/03/75 | 2,45 | | 3rel |
| 1975-1976 | 1050 | 22/01/76 | 4,26 | | 3rel |

L'ajustement statistique (loi log-normale) effectué sur un échantillon de 15 années fournit les quantiles suivants :

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 482 | 826 | 1090 | (1750) | (2050) |
| q l/s/km² | 510 | 874 | 1150 | (1850) | (2170) |

Les débits minimums journaliers observés sont de :

.100 m3/s (.11 l/s/km²) en 1972 (DCE = .113 m³/s ou .12 l/s/km²)
.113 m3/s (.12 l/s/km²) en 1973 (DCE = .140 m³/s ou .15 l/s/km²)
.350 m3/s (.37 l/s/km²) en 1974 (DCE = .543 m³/s ou .57 l/s/km²)
.180 m3/s (.19 l/s/km²) en 1975 (DCE = .250 m³/s ou .26 l/s/km²)

Plus récemment et en aval, une station (13°05'S - 49°07'E), située à la cote 23 et contrôlant un bassin de 1140km², a fait l'objet d'observations et mesures (18 jaugeages) de 1980 à 1983.

Pour les mêmes années, la lame moyenne écoulée (1980-83) du SAMBIRANO représente 84 % de la lame interannuelle. A partir de ce cœfficient d'hydraulicité, on peut sommairement évaluer la lame moyenne inter-annuelle de la MANANJEBA à 800 mm (29.8 m3/s).

Les débits de pointe de crues ont atteint les valeurs suivantes :

230 m³/s le 18-02-81 (202 l/s/km²)
345 m³/s le 04-02-82 (303 l/s/km²)
426 m³/s le 18-02-83 (374 l/s/km2)

tableau 4.5 bis

Mananjeba à Marivorahona
Débit moyens mensuels ($m^3/s$)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1980-81 | 2.15 | 18.7 | 13.9 | 58.6 | 19.0 | 17.7 | 7.16 | 3.45 | 2.14 | 1.12 | .727 | 1.61 | 11.0 |
| 1981-82 | .900 | 12.6 | 44.3 | 102 | 86.7 | 46.7 | 16.6 | 6.40 | 3.74 | 3.35 | 3.90 | 3.19 | 27.1 |
| 1982-83 | 6.22 | 50.7 | 56.8 | 128 | 117 | 24.6 | 11.4 | 5.76 | 4.51 | 2.50 | 1.57 | 1.02 | 33.7 |
| Moyenne | 3.09 | 27.3 | 38.3 | 96.2 | 74.2 | 29.7 | 11.7 | 5.20 | 3.46 | 2.32 | 2.07 | 1.94 | 24.2 |

Les débits d'étiage observés pour les mêmes années sont les suivants :

Qmin .138 $m^3/s$ (.12 $l/s/km^2$) le 26-11-81 (DCE = .417 $m^3/s$ ou .365 $l/s/km^2$)
Qmin .664 $m^3/s$ (.58 $l/s/km^2$) le 29-10-82 (DCE = 1.47 $m^3/s$ ou 1.29 $l/s/km^2$)
Qmin .250 $m^3/s$ (.22 $l/s/km^2$) le 16-11-83 (DCE = .486 $m^3/s$ ou 43 $l/s/km^2$)

Ces débits, nettement plus faibles que sur les bassins voisins, reflètent probablement le développement limité par la forme très allongée du bassin des réserves souterraines et sans doute des transferts à l'extérieur du bassin.

## 2.1.2. Bassin de la Mahavavy du nord

La MAHAVAVY du nord prend naissance à l'est de la dorsale centrale du massif vers 2 200 m d'altitude. Jusqu'à la chute d'ANDRANOMAFANA, son cours supérieur, caractérisé par de fortes pentes (de l'ordre de 30 m par km), est orienté vers le nord. Son cours s'infléchit ensuite vers le nord/nord-ouest avec une atténuation sensible de la pente (2 m/km) et s'achève par une zone deltaïque dans laquelle se situent les plantations de canne à sucre de la SIRAMA.

La station, située au pont d'AMBILOBE, contrôle un bassin dont la superficie est de 3 210 $km^2$. Les observations ont été effectuées sur une échelle, puis un limnigraphe à partir de 1972. Bien qu'elles datent de 1948, les observations limnimétriques n'ont pu être traduites en débits (quarante neuf jaugeages) que sur les périodes 1967-69 et 1980-83. Il faut noter que la station située à l'aval de la prise du canal de la SIRAMA ne contrôlent que les débits résiduels de la rivière. Le débit dérivé par le canal, compris entre 3 et 9 $m^3/s$ en saison des pluies, est presque entièrement acheminé par le canal (10 à 14 $m^3/s$) en saison sèche. Par sommation des débits de la rivière et des débits observés sur le canal, il est possible d'évaluer le débit global de la rivière.

Les lames écoulées des années complètes correspondent pour le SAMBIRANO à une hydraulicité moyenne de 84 %.

La lame interannuelle de la MAHAVAVY peut donc être estimée à 1100 mm (112 $m^3/s$) ce qui, pour une pluviométrie estimée entre 1900 et 2000 mm, correspond à un déficit d'écoulement voisin de 800 à 900 mm et à un cœfficient d'écoulement moyen de 55 à 58 %.

Suivie par les Travaux publics puis l'ORSTOM, de 1948 à 1983, la station contrôle la quasi-totalité des débits de la MAHAVAVY nord (prise d'eau du Génie rural en amont du pont).

tableau 4.6

Débit moyens mensuels ($m^3/s$)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1966-67 | | | | 165 | 203 | 158 | | | | | | | |
| 1967-68 | | | 442 | 382 | 375 | 125 | | | | | | | |
| 1968-69 | (17.3) | 149 | 143 | 288 | 111 | 92.6 | 51.2 | 41.6 | 30.5 | (29.7) | 27.4 | 24.1 | (82.5) |
| 1979-80 | | | | | | | | | | | | 19.0 | |
| 1980-81 | 18.5 | 43.7 | 37.2 | 121 | 72.1 | 58.4 | 34.5 | 21.5 | 13.3 | 12.7 | 8.02 | 15.5 | 37.5 |
| 1981-82 | 14.6 | 52.1 | 105 | 216 | 282 | 205 | 82.1 | 50.5 | 33.8 | 27.1 | 24.1 | 20.7 | 91.9 |
| 1982-83 | 66.9 | 191 | 263 | 389 | 356 | 115 | 57.4 | 48.8 | 38.9 | 31.2 | 22.9 | 18.8 | 132 |
| 1983-84 | 30.7 | | | | | | | | | | | | |
| Moyenne | 29.6 | 109 | 198 | 260 | 233 | 126 | 56.3 | 40.6 | 29.1 | 25.2 | 20.6 | 19.6 | 94.7 |

L'étalonnage de hautes eaux s'appuie sur les jaugeages complets (de 767 à 1900 $m^3/s$) de février 1971 (cyclone Félicie), un certain nombre de mesures flotteurs réalisées en janvier-mars 1937 (de 530 à 3400 $m^3/s$) et des mesures des PHE et des pentes de la ligne d'eau entre la prise et le pont.

Les archives des Travaux publics, du Génie rural à AMBILOBE ainsi que les résultats d'enquêtes par la SOSUMAV ont non seulement permis de retrouver les mesures de 1937, mais également de recaler les plus fortes crues relevées entre 1928 et 1948 (tableau 4.6. bis).

Dans la moitié des cas environ, ces débits correspondent à des événements cycloniques.

Une année sur deux, le débit maximal est observé au cours de la période 15 janvier - 15 mars.

L'ajustement d'une loi de Galton (log-normale) à l'échantillon de 28 années (1949-1984) fournit les valeurs suivantes des quantiles qui peuvent être réévalués pour les récurrences plus rares en tenant compte de l'information historique (observations antérieures à 1949).

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| $Qm^3/s$ | 1265 | 2350 | 3350 | 6450 | 8250 |
| Réévaluation en tenant compte de l'information historique | | | 3500 | (8350) | (10750) |
| q l/s/$km^2$ | 394 | 732 | 1090 | (2600) | (3350) |

La crue cyclonique de 1962 (10 500 $m^3/s$) serait de récurrence centennale.

tableau 4.6 bis

Maximum annuels de crues

| Année | Qm³/s | Hm | Hm* | Date | Obs. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1928-29 | 7940 | | 32,60 | | |
| 1933-34 | 2040 | 84,90 | 29,6 | 08-12 | |
| 1936-37 | 5150 | 86,70 | 31,4 | janvier | |
| 1937-38 | | | | | |
| 1938-39 | 1010 | | 28,65 | | |
| 1945-46 | 7940 | | 32,6 | décembre | |
| 1948-49 | 969 | | 28,80 | 16-02 | |
| 1949-50 | 1890 | | 30,10 | 17-02 | |
| 1950-51 | 1650 | | 29,30 | 21-02 | |
| 1951-52 | 3170 | | 30,50 | 03-01 | |
| 1952-53 | 745 | | 28,35 | 15-01 | |
| 1953-54 | 2520 | | 30,00 | 29-12 | |
| 1954-55 | 739 | 3,00 | 28,90 | 03-01 | |
| 1955-56 | 1800 | 4,25 | 30,15 | 02-04 | |
| 1956-57 | 1400 | 3,80 | 29,70 | 25-01 | |
| 1957-58 | 969 | 3,30 | 29,20 | 07-03 | |
| 1958-59 | 2100 | 4,40 | 30,30 | 28-03 | |
| 1959-60 | 1370 | 3,80 | 29,70 | 20-01 | |
| 1960-61 | 500 | 2,87 | 28,77 | 02-01 | |
| 1961-62 | 10500 | | 34,69 | 19-01 | PHE du cyclone |
| 1962-63 | 467 | 2,60 | 28,50 | 10-01 | |
| 1963-64 | 1000 | 3,30 | 28,64 | 19-02 | |
| 1964-65 | 1080 | 3,40 | 28,74 | 17-03 | |
| 1965-66 | 2570 | 4,70 | 30,04 | 27-12 | |
| 1966-67 | 739 | 3,88 | 29,22 | 15-04 | |
| 1967-68 | 1690 | 4,20 | 29,54 | 16-01 | |
| 1968-69 | 1000 | 4,02 | 29,36 | 12-02 | |
| 1969-70 | 676 | 3,50 | 18,84 | 04-02 | |
| 1970-71 | 2360 | 4,50 | 29,84 | 25-01 | |
| 1971-72 | ≥2280 | 4,80 | 29,78 | 08-03 | Min. |
| 1972-73 | 1850 | 4,50 | 29,48 | 02-03 | |
| 1973-74 | 793 | 3,40 | 28,38 | 28-12 | |
| 1974-75 | 793 | 3,40 | 28,38 | 14-03 | |
| 1975-76 | 2150 | 4,70 | 29,68 | 30-03 | |
| 1980-81 | 512 | 2,95 | 27,93 | 18-02 | |
| 1981-82 | 1820 | 4,48 | 29,46 | 19-03 | |
| 1982-83 | 1610 | 4,30 | 29,28 | 18-02 | |
| 1983-84 | ≥845 | | | 17-12 | Min. |

* Calage de l'échelle dans le système dit des marées

Les débits d'étiage correspondent en moyenne à un DCE d'environ 11.6 m³/s (3.6 l/s/km²).

| Date | QJ min | | DCE | |
|---|---|---|---|---|
| | m³/s | l/s/km² | m³/s | l/s/km² |
| 25.11.68 | (9.9) | (3.1) | | |
| 23.10.69 | 10.2 | 3.2 | 11.7 | 3.6 |
| 05.10.80 | 8.79 | 2.7 | 10.5 | 3.3 |
| 07.10.81 | 6.00 | 1.9 | 6.50 | 2.0 |
| 17.10.82 | 13.2 | 4.1 | 15.0 | 4.7 |
| 16.10.83 | 11.0 | 3.4 | 14.5 | 4.5 |

Quelques mesures de débit ont été effectuées sur l'ANTSIATSIA, principal affluent rive droite de la MAHAVAVY, peu avant sa confluence (bassin versant 449 km²).
En année moyenne, le DCE peut être évalué à 1 à 1.5 l/s/km².

## 2.1.3. Bassin de l'Ifasy

Sur cette rivière, située entre la MAHAVAVY et le SAMBIRANO, quelques mesures de débit ont été effectuées à l'exutoire d'un bassin d'environ 1 360 km² (pont de la RN6). Les débits mesurés montrent un étiage assez soutenu :

2.5 l/s/km² en fin septembre 1980
3.0 l/s/km² en septembre 1981
8.2 l/s/km² en août 1982

## 2.1.4. Bassin du Sambirano

Le SAMBIRANO et ses affluents (dont le plus important est la RAMENA) drainent la façade occidentale du TSARATANANA. La majeure partie du bassin est constituée de roches cristallines du socle ancien (micaschistes et migmatites du système du graphite, gneiss, micaschistes et pyroxénites du système du VOHIBORY) recouvertes de coulées éruptives néogènes et quaternaires. Toutes ces formations sont profondément altérées. L'ouest du bassin est constitué des formations sédimentaires de l'ISALO et l'on observe un important remblaiement alluvial sur la partie inférieure du SAMBIRANO. La partie aval du bassin est recouverte de forêt tropicale alors que les pentes du massif supportent une savane légèrement boisée et des prairies avec galeries forestières le long des cours d'eau.

D'une altitude moyenne de 780 m, le bassin voit ses formateurs issus de la partie sommitale du massif (MAROMOKOTRO 2 876 m). Les pentes initiales sont très fortes (supérieures à 25 m/km) mais s'adoucissent dans les plaines littorales (2 m/km).

### 2.1.4.1. Le Sambirano à Ambanja

La station de référence d'AMBANJA, située à une altitude voisine de dix mètres, contrôle un bassin versant de 2 830 km².

Coordonnées 13°41'S - 48°27'E
Indice de pente global Ig = 21.4 m/km

Les premières observations remontent à 1925 mais ce n'est qu'à partir de 1952 (date de l'installation de l'échelle ORSTOM, plusieurs fois remplacée avec des changements de zéro) que les observations ont été régulières. Elles se sont poursuivies jusqu'en décembre 1977 et ont été reprises d'octobre 1980 à octobre 1983. La série 1952-77 est interrompue de mars 1972 (construction du pont) à novembre 1973 (réinstallation d'un limnigraphe).

De 1952 à 1975, 99 mesures de débit ont été effectuées entre 6,34 et 472 m3/s. De 1980 à 1983, dix neuf mesures supplémentaires ont été effectuées entre 15 et 501 m³/s. La section peut être considérée comme relativement stable mais plusieurs courbes d'étalonnage ont dû être tracées pour tenir compte des décalages d'échelle. L'extrapolation vers les hautes eaux (au-dessus de 600 m³/s) est très importante. Elle a été menée jusqu'à 9200 m3/s (cote 7.00 m).

La pluviométrie du bassin a été estimée par la méthode de THIESSEN à partir des postes suivants (AMBANJA, coefficient 0.08 - DJANGOA, 0.03 - MANAMBATO, 0.07 - ANTSIAMALAHA, 0.58 - MANGIDRANO, 0.24). Assez bien estimée sur la partie aval du bassin (2 000 à 2 100 mm), elle est très mal évaluée sur l'amont très arrosé (massif du TSARATANANA). Le poste de MANGINDRANO occupe en effet une position abritée dans la cuvette de l'ANKAIZINA. La pluviométrie moyenne interannuelle, évaluée à 1 830 mm, est grossièrement sous-estimée. A partir des isohyètes reconstitués mais plus vraisemblables et en ajoutant à la lame écoulée moyenne, un déficit probable d'environ 1 000 mm, nous avançons provisoirement pour le bassin, une pluviométrie moyenne d'environ 2 500 mm. Les précipitations mensuelles (1951 à 1970) ont été corrigées d'un rapport (1.36) permettant d'obtenir des "indices pluviométriques" sans doute plus proches de la réalité.

### *2.1.4.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles*

Les corrélations simples à l'échelle mensuelle ont été établies entre lames écoulées mensuelles et précipitations mensuelles sur une période de dix-huit ans et entre débits mensuels et débits antérieurs sur une période de vingt-cinq années.

Les résultats sont les suivants :

tableau 4.7
Coefficients de corrélation

| Lame (mm) ou Q (m³/s) | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pi | .55 | .81 | .89 | .84 | .62 | .53 | (.30) | (.32) | (.27) | (.12) | .58 | (.38) |
| Pi - 1 | (.41) | (.22) | .65 | (.39) | (.24) | (.13) | (.40) | .48 | (.04) | (.34) | (.23) | .46 |
| Qi - 1 | .59 | .59 | .55 | (.32) | (.27) | .53 | .62 | .91 | .92 | .94 | .94 | .72 |

* nota : pour mars, sans la valeur de 1959 suspecte.

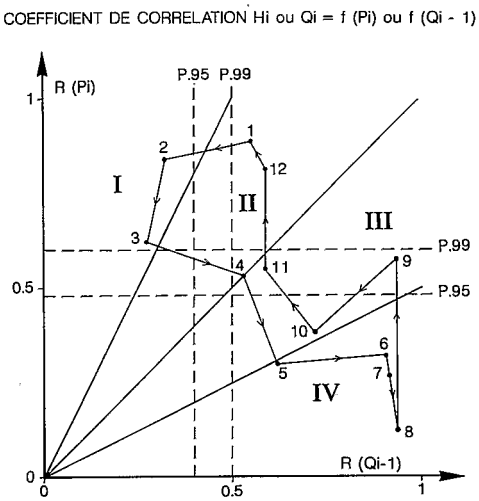
Les coefficients soulignés ont une probabilité de signification (Test de Snedecor, noté dans la suite du texte P> 0.99) supérieure à 99 %. Les coefficients (entre parenthèses) ont une probabilité inférieure à 95 %.

Le graphe 4.3. représente la position des différents mois. Quatre secteurs sont délimités.

Le premier secteur correspond à une influence prépondérante de la précipitation du mois et une influence nulle ou faible (ce qui ne signifie pas qu'elle n'existe pas, mais qu'elle est masquée par le facteur principal) du débit du mois immédiatement antérieur. Pour le SAMBIRANO, les mois de février et mars, cœur de la saison des pluies, se situent dans ce secteur.

figure 4.3

Sambirano à Ambanja




Le second secteur correspond à une influence principale de la précipitation du mois et secondaire, mais non négligeable, du débit antérieur. Dans ce second secteur, se situent décembre et janvier.

Le troisième secteur correspond à une influence principale du débit antérieur (drainage des réserves) et secondaire des précipitations du mois. Les mois de transition, novembre et avril affichent une influence presque équivalente des deux facteurs explicatifs. Le poids des précipitations est moins sensible pour septembre et octobre.

Le quatrième secteur correspond à l'influence principale du débit antérieur et nulle ou faible des précipitations du mois. C'est le cas des mois de saison "sèche" : mai à août.

Sur ce graphe sont reportés les seuils de signification des cœfficients de corrélation à 99 % et 95 %. Les cœfficients des facteurs principaux tous supérieurs à 99 % montrent une bonne qualité moyenne des échantillons, compte tenu de l'imprécision sur les valeurs réelles des précipitations (indices pluviométriques dans le cas du SAMBIRANO).

Dans la suite du texte, et pour les stations de référence, les résultats des corrélations seront ainsi présentés sans reprendre le détail des explications.

Des modèles linéaires multiples pour les différents mois ont pu être réalisés :

tableau 4.8.

| | |
|---|---|
| H11 = .11 P11 + .80 H10 - 6.8 | (R2 = .50 P > 995) |
| H12 = .36 P12 + 2.35 H11 - 107 | (R2 = .84 P > 995) |
| H01 = .57 P01 + .38 P12 - 190 | (R2 = .88 P > 995) |
| H02 = .73 P02 + .23 P01 - 154 | (R2 = .77 P > 995) |
| H03 = .66 P03 + .29 P0201 - 92 | (R2 = .57 P > 995) |
| H04 = .54 P04 + .35 H03 - 16 | (R2 = .65 P > 995) |

suite

| | |
|---|---|
| H05 = .29 H04 + .29 P05 + 21 | (R2 = .65P > 995) |
| H06 = .42 H05 + .07 P06 + 6.9 | (R2 = .81 P > 995) |
| H07 = .74 H06 + .10 P07 - 7.8 | (R2 = .86 P > 995) |
| H08 = .77 H07 + .05 P08 - 3.1 | (R2 = .91 P > 995) |
| H09 = .66 H08 + .025 P09 | (R2 = .88 P > 995) |
| H10 = .69 H09 + .04 P10 + 1 | (R2 = .78 P > 995) |

où H11 représente la lame écoulée de novembre, P11 la précipitation mensuelle de novembre, P0201 la moyenne des précipitations de février et janvier, etc.

Faute de disposer des précipitations mensuelles de 1972 et 1973, nous n'avons pas effectué le completement des lacunes de ces années, d'ailleurs trop importantes pour que le calcul soit très fiable. Nous noterons que la lame de mars 1 959, très forte en regard des précipitations, se situe anormalement en dehors de la régression des mois de mars. La lame annuelle 1958-59 (1 616 mm) se situant, cependant, relativement bien dans l'échantillon des lames annuelles, nous avons conservé, sous réserve, la valeur "observée" de mars 1959.

Le tableau 4.9. consigne les valeurs mensuelles et annuelles des débits observés ainsi que leur distribution empirique (maximums, médianes et minimums, premier quantile Q1 non dépassé dans 75 % des cas, troisième quantile Q3 non dépassé dans 25 % des cas). Le graphe 4.4. représente les débits caractéristiques mensuels, les graphes 4.5. et 4.6. les hydrogrammes d'une année humide (1961-1962) et d'une année sèche (1980-1981).

figure 4.4

Sambirano à Ambanja
Débits mensuels caractéristiques

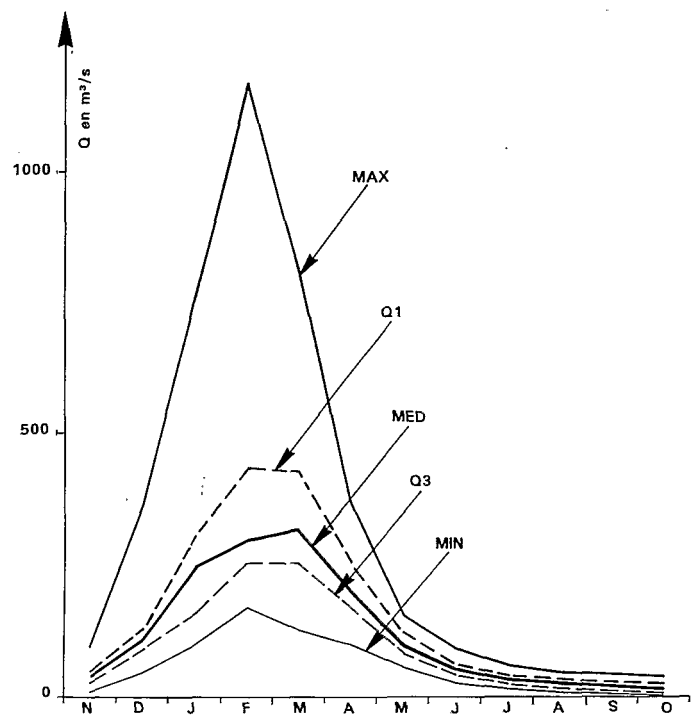


figure 4.5.

Sambirano à Ambanja Débits moyens journaliers

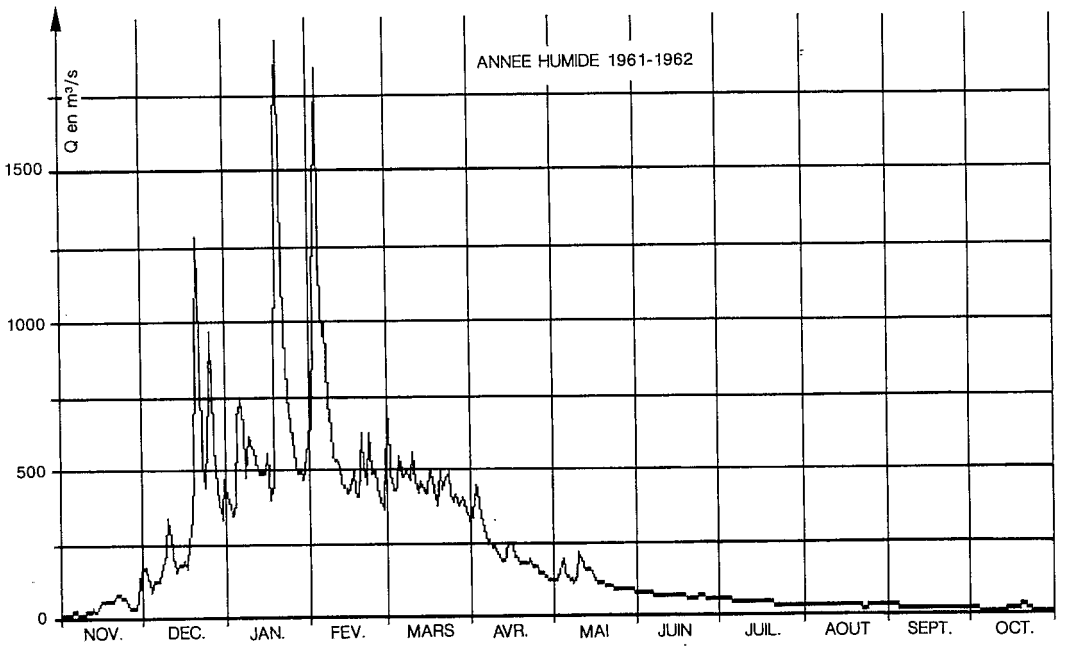



figure 4.6.

Sambirano à Ambanja Débits moyens journaliers

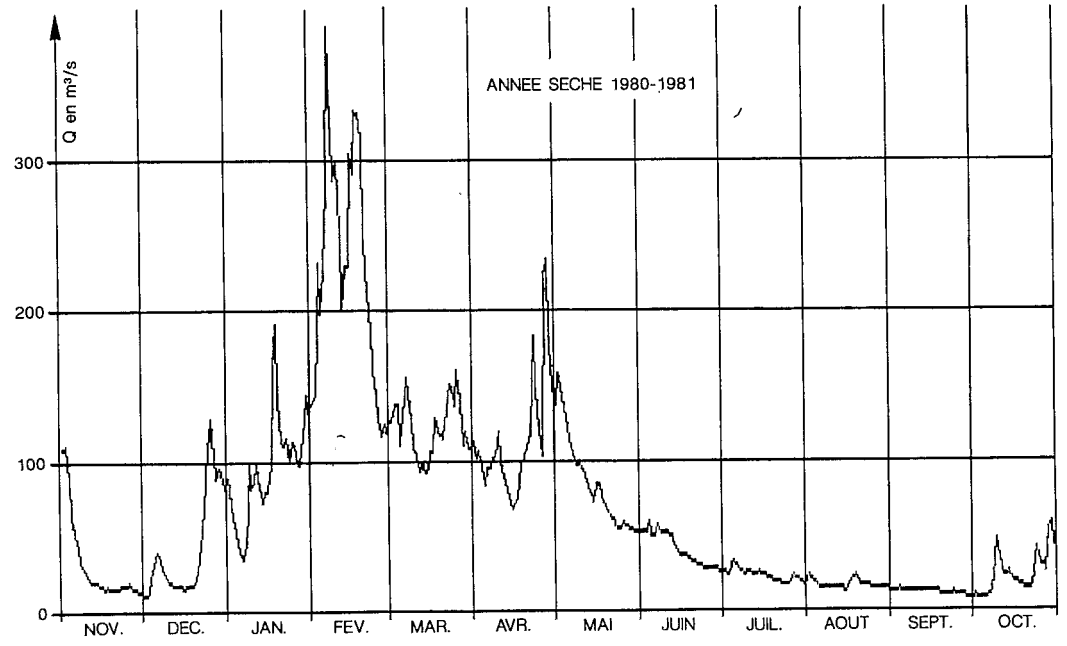


tableau 4.9.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1257100103 Ambanja
Rivière : Sambirano
Pays : Madagascar
Bassin : Sambirano
Débits en m³/s :

Latitude : 13°41'00
Longitude : 48°27'00

Aire : 2 830 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1951-52 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 45.5 | 31.8 | - |
| 1952-53 | 40.8 | 71.2 | 250 | 217 | 205 | 159 | 82.3 | 53.7 | 38.3 | 31.8 | 29.1 | 23.7 | 99.5 |
| 1953-54 | 38.9 | 151 | 760 | 408 | 609 | 305 | 102 | 55.9 | 35.4 | 26.1 | 20.1 | 16.5 | 210 |
| 1954-55 | 28.9 | 89.1 | 161 | 454 | 378 | 168 | 87.1 | 55.1 | 39.9 | 34.3 | 27.1 | 27.5 | 127 |
| 1955-56 | 32.7 | 102 | 287 | 295 | 267 | 356 | 135 | 59.8 | 42.8 | 32.6 | 23.5 | 24.6 | 138 |
| 1956-57 | 30.8 | 98.6 | 256 | 1170 | 421 | 363 | 159 | 80.7 | 61.8 | 42.0 | 27.3 | 23.7 | 221 |
| 1957-58 | 21.1 | 116 | 148 | 219 | 449 | 190 | 66.7 | 29.9 | 19.7 | 15.9 | 14.0 | 23.5 | 109 |
| 1958-59 | 48.3 | 111 | 113 | 167 | (806) | 286 | 90.4 | 43.0 | 25.2 | 20.3 | 16.3 | 10.3 | 145 |
| 1959-60 | 57.5 | 126 | 386 | 278 | 224 | 117 | 133 | 63.0 | 35.5 | 22.0 | 17.8 | 12.1 | 122 |
| 1960-61 | 22.2 | 102 | 226 | 260 | 273 | 260 | 128 | 65.4 | 42.3 | 39.0 | 24.4 | 18.6 | 121 |
| 1961-62 | 42.1 | 362 | 656 | 642 | 448 | 219 | 122 | 65.4 | 43.0 | 30.7 | 22.7 | 18.2 | 221 |
| 1962-63 | 36.2 | 108 | 140 | 345 | 259 | 198 | 102 | 72.6 | 43.8 | 29.4 | 20.8 | 16.8 | 113 |
| 1963-64 | 34.8 | 99.1 | 232 | 255 | 248 | 203 | 81.5 | 46.1 | 28.9 | 19.3 | 11.7 | 11.6 | 105 |
| 1964-65 | 22.2 | 61.3 | 137 | 297 | 342 | 219 | 95.0 | 50.5 | 38.8 | 26.4 | 19.8 | 27.7 | 110 |
| 1965-66 | 60.7 | 235 | 257 | 345 | 180 | 97.9 | 57.7 | 35.5 | 20.8 | 14.3 | 10.3 | 10.5 | 109 |
| 1966-67 | 17.7 | 56.1 | 186 | 207 | 253 | 173 | 76.5 | 37.5 | 22.7 | 16.0 | 10.2 | 9.09 | 88.1 |
| 1967-68 | 40.9 | 108 | 305 | 286 | 424 | 189 | 80.9 | 41.7 | 22.4 | 14.8 | 11.6 | 9.38 | 128 |
| 1968-69 | 10.8 | 119 | 188 | 515 | 161 | 174 | 104 | 61.2 | 28.5 | 16.1 | 10.7 | 11.2 | 114 |
| 1969-70 | 22.5 | 89.7 | 275 | 406 | 278 | 207 | 98.7 | 49.1 | 26.3 | 18.0 | 10.5 | 8.16 | 128 |
| 1970-71 | 23.6 | 124 | 575 | 568 | 255 | 161 | 70.0 | 32.0 | 16.2 | 9.54 | 6.54 | 5.51 | 152 |
| 1971-72 | 18.8 | 95.9 | 150 | 467 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1972-73 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | - |
| 1973-74 | 48.5 | 105 | 184 | 279 | 312 | 205 | 150 | 87.6 | 53.8 | 38.4 | 29.8 | 24.7 | 127 |
| 1974-75 | 41.2 | 92.6 | 254 | 264 | 435 | 202 | 115 | 69.4 | 56.3 | 49.3 | 44.2 | 41.0 | 137 |
| 1975-76 | 58.5 | 125 | 440 | 430 | 369 | 316 | 159 | 90.9 | 54.6 | 40.7 | 28.8 | 24.0 | 177 |
| 1976-77 | 33.6 | 65.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1977-78 | | | | | | | | | | | | | |
| 1978-79 | | | | | | | | | | | | | |
| 1979-80 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 15.0 | - |
| 1980-81 | 30.4 | 45.4 | 97.6 | 230 | 123 | 115 | 85.6 | 41.6 | 23.7 | 17.4 | 12.6 | 24.6 | 69.5 |
| 1981-82 | 27.0 | 82.9 | 154 | 248 | 316 | 249 | 106 | 56.2 | 35.5 | 27.4 | 29.5 | 39.1 | 113 |
| 1982-83 | 94.5 | 303 | 335 | 307 | 366 | 218 | 100 | 57.5 | 38.2 | 21.9 | 15.5 | 16.9 | 156 |
| Moyenne | 36.5 | 120 | 275 | 368 | 336 | 214 | 104 | 56.1 | 35.8 | 26.2 | 20.8 | 19.4 | 133 |
| Ecart-type | 17.4 | 71.1 | 167 | 202 | 147 | 69.4 | 28.1 | 16.3 | 12.4 | 10.4 | 10.0 | 10.8 | |
| Max. | 94.5 | 362 | 760 | 1170 | 806 | 363 | 159 | 90.9 | 61.8 | 49.3 | 45.5 | 41.0 | |
| Q1 | 42.1 | 124 | 305 | 430 | 423 | 255 | 125 | 65.4 | 42.9 | 33.5 | 27.3 | 24.6 | |
| Méd. | 33.6 | 102 | 241 | 296 | 312 | 203 | 100 | 55.9 | 35.5 | 26.1 | 20.0 | 18.4 | |
| Q3 | 22.5 | 89.1 | 154 | 255 | 250 | 170 | 91.9 | 42.3 | 24.4 | 16.7 | 11.7 | 11.4 | |
| Min. | 10.8 | 45.4 | 97.6 | 167 | 123 | 97.9 | 57.7 | 29.9 | 16.2 | 9.54 | 6.54 | 5.51 | |

### 2.1.4.1.2. Écoulements annuels

Sur un échantillon de dix-huit valeurs concomittantes (lames annuelles écoulées et précipitations annuelles corrigées). il est possible d'établir la régression suivante :

$H = .86 (P - 745)$ $R^2 = .61$ $P > 995$

La prise en compte d'un indice annuel de concentration de pluies mensuelles. Cp. ainsi formulé (M. ROCHE. 1964) :

$Cp = 1/p (1/132 * \sum_1^{12} (pi - p)^2)^{1/2}$

où p = moyenne des pluies mensuelles = P annuelle/12 permet d'améliorer la régression :

$H = .774 (P * (1 + Cp - \overline{Cp} - 579))$ $R2 = .70$ $P > 995$

Cp est l'indice moyen de concentration égal à .286 sur le SAMBIRANO. Cette relation nous a permis d'évaluer la lame écoulée de 1951-52 (H = 1 520 mm, Q = 136 m3/s).

Les lames observées sur la station d'AMBANJA sont bien corrélées avec celles observées sur son affluent principal, la RAMENA.

H SAMB = .556 H RAM + 461 (R2 = .76 P > 995)

Cette relation nous a permis d'évaluer les lames écoulées de 1971-72 et 1972-73 (1 700 et 1 655 mm).

L'échantillon de vingt-huit valeurs des lames annuelles, ainsi complété, a été analysé statistiquement. La meilleure adéquation est obtenue avec la loi de GUMBEL (Test Brunet-Moret, 5.05) et fournit les quantiles suivants :

tableau 4.9. bis

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Période de retour (ans) | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Lame écoulée (mm) | 886 | 971 | 1055 | 1169 | 1438 | 1800 | 2040 | 2269 | 2567 |
| Modules (m³/s) | 79.4 | 87.1 | 94.6 | 105 | 129 | 161 | 183 | 203 | 230 |
| Débits spécifiques (l/s/km²) | 28.1 | 30.8 | 33.4 | 37.1 | 45.6 | 56.9 | 64.7 | 71.7 | 81.3 |

Loi de GUMBEL, échelle : 319.2, position 1321.2.

Valeurs de récurrence centennale : 834 mm (74.8 m³/s) et 2 700 mm (250 m³/s).

En année moyenne, le cœfficient d'écoulement doit être voisin de 60 %.

Nous n'avons présenté dans ce tableau, comme par la suite, que les quantiles correspondant à des périodes de retour inférieures au double de la taille de l'échantillon. Afin de permettre le calcul des quantiles plus rares, nous indiquerons les paramètres de la loi statistique retenue, ainsi que les estimations des valeurs centennales.

### 2.1.4.1.3. Crues

Si les détarages sont encore sensibles en moyennes eaux, surtout après édification du pont et la disparition en aval de la station du pont provisoire (03/72) qui était remonté à chaque saison sèche, la station peut être considérée comme assez stable en très hautes eaux.

L'extrapolation s'appuie sur des mesures de vitesses superficielles par flotteurs, réalisées par les Travaux publics en 1945 et rattachées à l'échelle de la Compagnie Nossybéenne (CNIA), qui était calée 0,20 m au-dessus de la première échelle ORSTOM.

| Date | Hauteur (m) | V (m/s) | Q (m³/s) |
|---|---|---|---|
| 19/01/45 | 5,22 | 3,0 | 2830 |
| 12/12/45 | 5,67 | 4,0 | 4120 |

tableau 4.10.

Sambirano à Ambanja
Maximum annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1952-53 | 1680 | 15/01/53 12h00 | 4,80 | 3rel |
| 1953-54 | 4190 | 02/03/54 18h00 | 5,90 | 3rel |
| 1954-55 | 1670 | 18/02/55 18h00 | 4,78 | 3rel |
| 1955-56 | 2430 | 27/01/56 15h00 | 5,35 | 3rel |
| 1956-57 | 6240 | 06/02/57 | 6,47 | PHE |
| 1957-58 | 1160 | 09/03/58 06h00 | 4,08 | 3rel |
| 1958-59 | 4970 | 28/03/59 18h00 | 6,16 | 3rel |
| 1959-60 | 1620 | 20/01/60 18h00 | 4,76 | 3rel |
| 1960-61 | 513 | 03/01/61 18h00 | 2,65 | 3rel |
| 1961-62 | 2080 | 19/01/62 18h00 | 5,20 | 3rel |
| 1962-63 | 517 | 13/02/63 12h00 | 2,66 | 3rel |
| 1963-64 | 480 | 14/02/64 12h00 | 2,55 | 3rel |
| 1964-65 | 480 | 19/03/65 12h00 | 2,55 | 3rel |
| 1965-66 | 1110 | 28/12/65 06h00 | 3,98 | 3rel |
| 1966-67 | 567 | 25/01/67 12h00 | 2,81 | 3rel |
| 1967-68 | 1000 | 15/03/68 12h00 | 3,78 | 3rel |
| 1968-69 | 2150 | 11/02/69 18h00 | 5,25 | 3rel |
| 1969-70 | 1040 | 24/02/70 12h00 | 3,85 | 3rel |
| 1970-71 | 4320 | 25/01/71 18h00 | 5,98 | 3rel |
| 1971-72 | 3570 | 08/03/72 | 5,80 | PHE |
| 1972-73 | >1420 | 06/01/73 12h00 | 4,48 | Min |
| 1973-74 | 645 | 21/02/74 06h00 | 3,30 | 3rel |
| 1974-75 | 1730 | 14/03/75 06h00 | 5,50 | 3rel |
| 1975-76 | 4030 | 23/01/76 06h00 | 6,50 | 3rel |
| 1976-77 | | | | |
| 1977-78 | | | | |
| 1978-79 | | | | |
| 1979-80 | | | | |
| 1980-81 | 544 | 07/02/81 15h30 | 2,99 | Lim |
| 1981-82 | 704 | 20/03/82 01h00 | 3,48 | Lim |
| 1982-83 | 744 | 26/12/82 08h00 | 3,60 | Min |

Les premières observations remontent à 1925 (CNIA), assurées par les Travaux publics à partir de 1929 et poursuivies jusqu'en 1945.

De ces relevés, seules ont pu être reprises les valeurs des maximums des principales crues de cette période.

Qu'il s'agisse des échelles CNIA-TP ou des échelles ORSTOM, les cotes des plus fortes crues de la période 1924-83 sont données par rapport au repère n°83 (AMBANJA - Hall d'information- cote 13,253 NGM.

| Année | PHE | Date | TP | ORSTOM |
|---|---|---|---|---|
| 1924-25 | 14,41 | 04/02/25 | 6,77 | |
| 1931-32 | 13,49 | 05/02/32 | 5,85 | |
| 1936-37 | 13,79 | 13/01/37 | 6,15 | |
| 1944-45 | 13,51 | 18/01/45 | 5,87 | |
| 1945-46 | 13,56 | 12/12/45 | 5,92 | |
| 1956-57 | 13,91 | 06/02/57 | | 6,47 |
| 1958-59 | 13,55 | 28/03/59 | | 6,16 |

Les débits maximaux de crue sont observés entre la mi-décembre et la fin mars (date médiane : 7 février). Cinquante pour cent des débits maximaux sont observés entre le 19 janvier et le 27 février.

Les crues les plus importantes sont liées à des événements cycloniques (février 1957, mars 1959, janvier 1971 : FELICIE, mars 1972 : HERMIONE, janvier 1976 ; DANAE, etc.).

Les rapports entre débit maximal instantanné (QMAX), débit maximal journalier (QJMAX), débit caractéristique de crue (DCC) et débit dépassé un mois par an (DC1), sont les suivants :

QMAX = 1.28 QJMAX - 52 (R2 = .98) $\overline{QMAX}/\overline{QJMAX}$ = 1.25
QJMAX = 4.03 DCC - 568 (R2 = .50) QJMAX/DCC = 2.58
QJMAX = 8.24 DC1 - 1294 (R2 = .35) QMAX/DC1 = 4.57

Par ajustement d'une loi de Goodrich à l'échantillon de 24 valeurs annuelles (et prise en compte des valeurs historiques, antérieures à 1952), les quantiles suivants peuvent être évalués.

tableau 4.11.

Sambirano à Ambanja
Débits maximaux de crue

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 1550 | 3100 | 4280 | (7010) | (8200) |
| ql/s/km² | 550 | 1100 | 1510 | (2480) | (2900) |

La crue historique de 1925 (6.77 m à l'échelles, débit voisin de 8000 m³/s) serait légèrement inférieure à la valeur centennale.

### *2.1.4.1.4. Basses eaux*

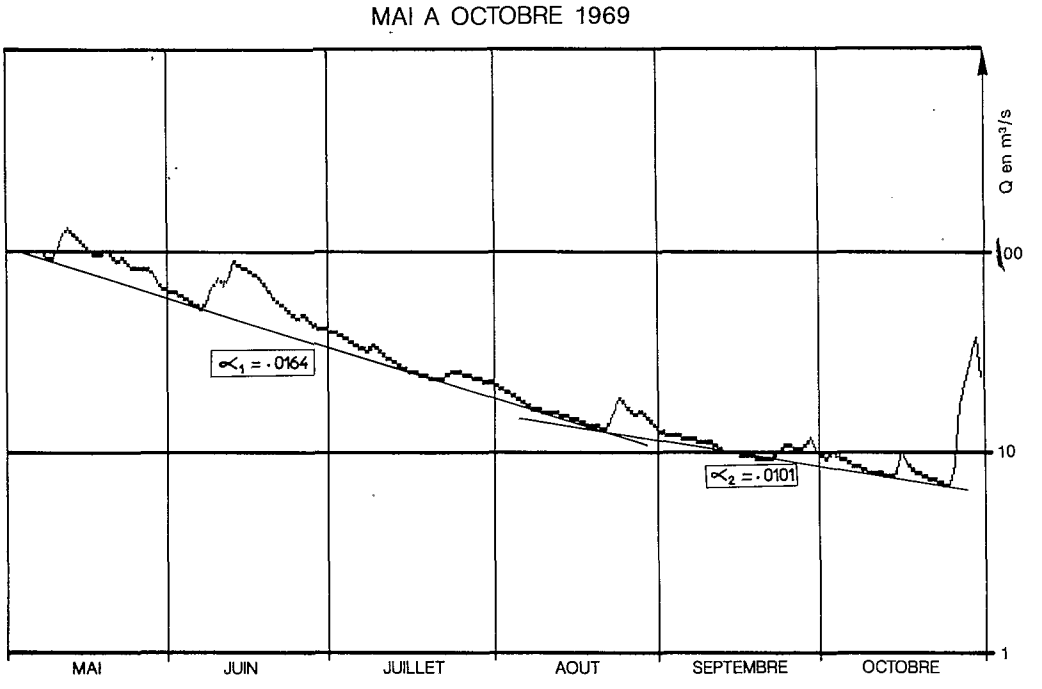
■ 2.1.4.1.4.1. Le tarissement

Pour le SAMBIRANO, comme pour la plupart des cours d'eau malgaches, à l'exception de ceux du sud, les excédents pluviométriques de la saison des pluies, une fois satisfaite l'évapotranspiration et après avoir rechargé la réserve utile des sols, sont stockés dans des aquifères (nappes d'altérites) dont la vidange nourrit principalement les écoulements de la saison sèche. Les débits moyens journaliers représentés sur un graphique semi-logarithmique s'ordonnent linéairement. Il est généralement possible compte tenu d'intumescences secondaires dues à la recharge partielle, voire au ruissellement des plus fortes précipitations, d'adapter à ces débits une droite-enveloppe dont la pente est caractéristique de la géométrie et de la nature globales des réservoirs.

Sur le SAMBIRANO, on observe généralement deux droites de tarissement successives (cf. graphe 4.7.).

figure 4.7

Tarissement du Sambirano à Ambanja




La première correspond à un pseudo-tarissement de mai à juin dont le coefficient α médian est égal à 0.017, pour un débit initial médian (fin de saison des pluies) voisin de 70 m³/s. La seconde à un tarissement plus lent (de juin-juillet à octobre) de cœfficient médian voisin de 0.010 pour un débit initial médian voisin de 30 m³/s. Certaines années (cinq dans l'échantillon observé), un troisième cœfficient (0.005) correspond à un épuisement des dernières réserves drainables avant la reprise plus tardive des précipitations de novembre-décembre.

La réserve drainable des aquifères peut être ainsi évaluée à :

$$H = \left( \frac{Qo1 - Qo2}{\alpha 1} + \frac{Qo2}{\alpha 2} \right) * \frac{86.4}{S} = 165 \text{ mm} \quad (\text{ou } 467.10^6 \text{ m}^3)$$

tableau 4.12.

| | Premier tarissement | | | Second tarissement | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Débit initial Qo1 | α1 | Tc | Débit initial Qo2 | α2 | Tc |
| Max. | 155 m³/s | .0229 | 30 | 75 m³/s | .0130 | 53 |
| 75 % | 76 m³/s | .0200 | 35 | 45 m³/s | .0106 | 65 |
| Méd. | 69 m³/s | .0171 | 41 | 31 m³/s | .0098 | 71 |
| 25 % | 55 m³/s | .0165 | 42 | 14 m³/s | .0087 | 80 |
| Min. | 49 m³/s | .0139 | 10 | 10 m³/s | .0075 | 92 |

α cœfficient de la formule $Q = Qo \text{ Exp } (- \alpha T)$
Tc temps caractéristique : durée en jours pour que le débit de base soit divisé par 2 :
$(Tc = \text{Log}2 / \alpha)$

Les deux échantillons classés (Qo et α) sont indépendants et nous n'avons pu mettre en évidence de relation statistique entre α et le débit initial Qo (peut-être simplement parce que ce débit, masqué par les dernières précipitations de la saison des pluies, est mal déterminé).

■ 2.1.4.1.4.2. Les débits d'étiage

Les débits caractéristiques d'étiage (calculés sur l'année calendaire) de la période étudiée sont présentés dans le tableau 4.13.

tableau 4.13.

Sambirano à Ambanja
Débits caractéristiques d'étiage (m³/s)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date | Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1952 | | | | 25.7 | 06-11 | 1967 | 16.6 | 9.40 | 7.52 | 6.86 | 17-10 |
| 1953 | 31.3 | 26.2 | 22.3 | 19.7 | 23-10 | 1968 | 13.7 | 8.97 | 8.09 | 7.75 | 25-10 |
| 1954 | 24.8 | 17.1 | 15.4 | 15.0 | 20-10 | 1969 | 16.4 | 9.63 | 7.91 | 6.81 | 25-10 |
| 1955 | 33.3 | 25.3 | 23.9 | 22.8 | 29-10 | 1970 | 16.5 | 7.83 | 7.00 | 6.70 | 06-10 |
| 1956 | 30.4 | 22.5 | 21.0 | 18.5 | 06-10 | 1971 | 9.83 | 5.77 | 5.13 | 4.88 | 30-10 |
| 1957 | 29.0 | 21.5 | 18.7 | 15.2 | 07-12 | | | | | | |
| 1958 | 19.3 | 12.5 | 10.7 | 9.80 | 18-10 | 1974 | 37.8 | 23.8 | 21.3 | 19.3 | 22-10 |
| 1959 | 22.0 | 11.0 | 9.43 | 8.90 | 16-10 | 1975 | 49.9 | 42.5 | 40.1 | 38.8 | 26-10 |
| 1960 | 21.2 | 10.6 | 9.12 | 8.77 | 10-11 | 1976 | 36.4 | 23.8 | 21.7 | 20.0 | 07-11 |
| 1961 | 32.5 | 18.1 | 15.8 | 14.8 | 08-11 | | | | | | |
| 1962 | 30.8 | 19.4 | 14.8 | 14.2 | 29.10 | | | | | | |
| 1963 | 30.8 | 19.0 | 14.5 | 13.6 | 15-10 | 1980 | | | | 7.82 | 15-10 |
| 1964 | 18.3 | 11.0 | 9.40 | 8.25 | 29-10 | 1981 | 20.3 | 13.7 | 10.8 | 8.42 | 05-10 |
| 1965 | 27.8 | 20.8 | 16.7 | 15.5 | 13-10 | 1982 | 36.3 | 25.9 | 24.6 | 22.5 | 16-10 |
| 1966 | 13.5 | 9.03 | 8.38 | 7.31 | 16-11 | 1983 | | | | 11.6 | 19-10 |

tableau 4.14

Quantiles (m³/s)

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 49.9 | 42.5 | 40.1 | 8.8 | 07-12 |
| Q1 | 31.9 | 23.2 | 21.2 | 19.3 | 06-11 |
| Méd. | 26.3 | 17.6 | 14.6 | 13.6 | 25-10 |
| Q3 | 17.5 | 10.1 | 8.75 | 7.82 | 16-10 |
| Min. | 9.83 | 5.77 | 5.13 | 4.88 | 05-10 |

La distribution statistique des débits minimaux journaliers (QJmin) est la suivante (loi de PEARSON 3 pour vingt-sept valeurs - test Brunet-Moret : 3.16).

tableau 4.15

| Période retour | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Q ($m^3/s$) | 5.18 | 5.67 | 6.38 | 7.67 | 12.0 | 19.3 | 24.5 | 29.6 | 36.2 |
| q ($l/s/km^2$) | 1.83 | 2.00 | 2.25 | 2.71 | 4.24 | 6.82 | 8.66 | 10.4 | 12.8 |

Paramètres de la loi de PEARSON 3 : échelle: 6.62, position : 4.68, forme : 1.42.
Centennales sèche et humide : 4.98 $m^3/s$ et 41.1 $m^3/s$.

La date médiane d'étiage est le 25 octobre. 50 % des étiages sont observés entre le 16 octobre et le 6 novembre.

Entre les débits caractéristiques d'étiage peuvent être effectuées les régressions suivantes :

DCE = 1.045 QJ min + 6 ($R^2$ = .99) DCE/QJmin = 1.09
DC11 = 1.088 QJ min + 2.15 ($R^2$ = .97) DC11/QJ min = 1.25
DC9 = 1.18 QJ min + 9.3 ($R^2$ = .88) DC9/QJ min = 1.86

Enfin, la valeur du débit d'étiage journalier est significativement liée au débit moyen mensuel de juillet et à la durée T en jours séparant le 30 septembre de la date d'apparition de l'étiage.

$QJ\ min = .29 * Q07^{1.21} * T^{(-.165)}$ ($R^2$ = .71)

Les étiages bien soutenus de la SAMBIRANO attestent la présence d'aquifères importants dans les altérites du socle, susceptibles d'emmagasiner en saison des pluies un stock d'eau considérable et réalimenté en saison "sèche" par des précipitations encore notables.

### *2.1.4.1.5. Bilan hydrologique et mécanismes de l'écoulement*

Nous avons procédé, de la façon indiquée ci-dessus (cf. III 2.8.), au calcul des bilans mensuels et annuels du cycle de l'écoulement sur le bassin de la SAMBIRANO. Les valeurs (en mm) relatives aux termes de l'écoulement sont présentées dans le tableau 4.16.

tableau 4.16

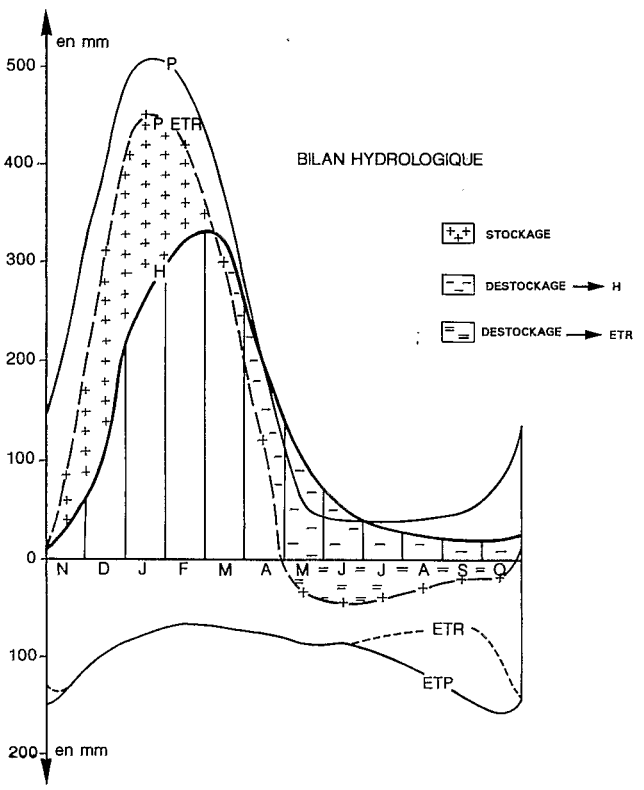
Sambirano à Ambanja
Bilan hydrologique (1952-70) (mm)

| | N | D | J | F | M | A | J | J | A | S | O | N | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 220 | 405 | 527 | 484 | 370 | 193 | 54 | 40 | 39 | 43 | 45 | 80 | 2500 |
| ETP | 133 | 93 | 76 | 64 | 71 | 74 | 87 | 85 | 100 | 118 | 140 | 159 | 1200 |
| ETR | 133 | 93 | 76 | 64 | 71 | 74 | 87 | 85 | 79 | 73 | 65 | 100 | 1000 |
| P-ETR | 87 | 312 | 451 | 420 | 299 | 119 | - 33 | - 45 | - 40 | - 30 | - 20 | - 20 | 1500 |
| H | 34 | 115 | 262 | 319 | 320 | 198 | 99 | 52 | 35 | 26 | 20 | 20 | 1500 |
| DR + | 53 | 197 | 189 | 101 | | | | | | | | | + 540 |
| DR - | | | | | 21 | 79 | 132 | 97 | 75 | 56 | 40 | 40 | - 540 |
| R | 53 | 250 | 439 | 540 | 519 | 440 | 308 | 211 | 136 | 80 | 40 | 0 | |

Le graphe n° 4.8. représente les variations mensuelles des différents paramètres : évapotranspirations en ordonnées négatives, précipitations en ordonnées positives. La courbe P-ETR est comparée à la courbe des écoulements H. Lorsqu'elle se situe au-dessus de la courbe H (saison des pluies), la surface (+) correspond au stockage dans les nappes d'altérites et à la réhumidication des sols (recharge de la réserve utile) ; en fin de saison des pluies, la courbe P-ETR passe sous la courbe H et les surfaces (- et =) représentent les destockages : surface (-) en ordonnées positives, pour le destockage par drainage des aquifères nourrissant les écoulements de saison "sèche" ; surface (=), en ordonnées négatives, pour le destockage de la réserve utile des sols soutenant l'évapotranspiration réelle. Les valeurs sont évidemment approximatives, en raison principalement de l'incertitude sur les précipitations mensuelles (valeurs observées corrigées), mais le mécanisme est bien mis en évidence.

figure 4.8

Sambirano à Ambanja




Pendant la saison des pluies (novembre à avril), les précipitations cumulées (2 200 mm soit 88 % de la précipitation annuelle) sont largement supérieures à la somme de l'évapotranspiration réelle, égale à l'ETP entièrement satisfaite (510 mm) et de l'écoulement (1 250 mm) soit 83 % de la lame annuelle. La lame stockée croît jusqu'en février (+ 540 mm) puis commence à alimenter l'écoulement (- 100 mm)) concurremment avec les précipitations.

En début de saison sèche (mai à octobre), les réserves globales (440 mm) alimentent par drainage les écoulements (250 mm) et par reprise sur la réserve utile (190 mm) l'évapotranspiration réelle (490 mm dont 300 mm à partir des précipitations de saison sèche). Les termes du bilan ne représentent évidemment que les soldes en fin de mois. Les précipitations encore nourries de la saison "sèche" doivent contribuer à réalimenter partiellement les réserves et, certaines années abondantes, à nourrir directement les écoulements de surface (petites crues adventices).

## 2.1.4.2. La Ramena à Ambodimanga

La station d'AMBODIMANGA (13°45'S - 48°30'E) est située près du pont de la route d'AMBANJA, à une altitude voisine de 50 m, et contrôle un bassin versant de 1 080 km². Les premières observations remontent à juin 1952, date de l'installation de la première échelle. Les échelles ont été plusieurs fois déplacées avec de légères variations de la cote du zéro, sauf en septembre 1968 (zéro de la nouvelle échelle situé 40 cm sous le zéro de l'ancienne échelle). Les lectures, parfois incomplètes, sont assez médiocres jusqu'en 1964, améliorées depuis cette date.

De 1952 à 1974, 93 mesures de débit ont été effectuées entre 7.4 et 215 m³/s. Plusieurs courbes d'étalonnage ont été tracées notamment pour tenir compte du décalage de 1968. L'extrapolation vers les hautes eaux est importantes (de 250 à 2730 m³/s) en s'appuyant sur les débits de crue concomittants de la RAMENA et du SAMBIRANO. Après traduction des hauteurs en débits, un certain nombre de débits journaliers ont pu être complétés d'après les débits correspondant du SAMBIRANO (janvier 1954, avril 1956, février 1957, mars 1959, mars et avril 1962, septembre 1963, octobre 1971).

La pluviométrie mensuelle et annuelle sur le bassin, calculée par la méthode de THIESSEN, à partir de cinq postes, tous situés hors du bassin (ANTSIMALAHA, .63 - MANAMBATO, .19 - AMBANJA, .13 - AMBORANO et MANGINDRANO, .03) est encore plus imprécise que sur le bassin emboîtant. La valeur estimée (1 930 mm), très sous évaluée, a du être corrigé à partir des isohyètes probables et en attribuant au bassin un déficit d'écoulement (1 100 mm) voisin de celui du SAMBIRANO. Les indices mensuels pluviométriques ont été calculés en utilisant un cœfficient de correction de 1.55.

### *2.1.4.2.1 Relations hydropluviométriques mensuelles*

Calculés sur une période de 16 ou 17 ans entre lames écoulées et indices pluviométriques, sur 22 à 23 ans pour les relations entre débits moyens, les cœfficients de corrélation sont consignés dans le tableau 4.17.

tableau 4.17
Cœfficient de corrélation

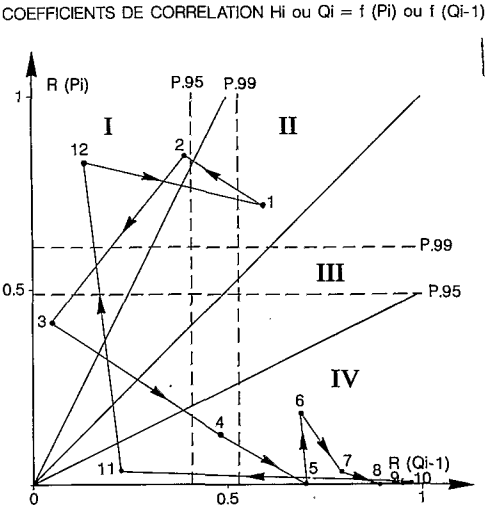
| Lames (mm) ou Q ($cm^3/s$) | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pi | (.03) | .83 | .72 | .85 | .42 | (.13) | -.18 | (.18) | (.03) | -.03 | -.12 | (-.0) |
| Pi-1 | .47 | (.11) | .82 | (.29) | (.10) | (.20) | -.15 | (.13) | (.02) | (.10) | -.20 | -.03 |
| Qi-1 | (.22) | (.13) | .59 | (.39) | (.05) | .48 | .70 | .69 | .79 | .89 | .95 | .97 |

notation : .83 (P > .99).42 (P > .95)(.29) (P < .95)

Le graphe 4.9. représente la position des couples (Hi, Pi) et (Qi, Qi-1). Tout en rappelant le schéma du SAMBIRANO, les corrélations sont nettement moins significatives et même très médiocres (mars, avril, novembre), ce qui reflète probablement l'imprécision sur la pluviométrie.

figure 4.9.

Ramena à Ambodimanga
Coefficients de correlation
Hi ou Qi = f (Qi-1)




Les modèles statistiques suivants ont été réalisés :

tableau 4.18

| | | | |
|---|---|---|---|
| H11 = .24 | P1009 + 24.5 | ($R^2$ = .27 | P > .95) |
| H12 = .47 | P12 - 63 | ($R^2$ = .69 | P > .99) |
| H01 = .88 | P01 + .43 P12 - 385 | ($R^2$ = .87 | P > .99) |
| Q04 = .33 | Q05 + 55 | ($R^2$ = .23 | P > .95) |
| Q05 = .32 | Q04 + 20.7 | ($R^2$ = .49 | P > .99) |
| Q06 = .31 | Q05 + 11.7 | ($R^2$ = .48 | P > .99) |
| Q07 = .70 | Q06 | ($R^2$ = .62 | P > .99) |
| Q08 = .94 | Q07 - 2.8 | ($R^2$ = .79 | P > .99) |
| Q09 = 1.11 | Q08 - 5.3 | ($R^2$ = .90 | P > .99) |
| Q10 = .74 | Q09 + 2.4 | ($R^2$ = .94 | P > .99) |

Les relations ont permis de corriger les valeurs anormales de juillet à octobre 1954 et de compléter celle d'octobre 1972.

Le tableau 4.19. rassemble les débits moyens mensuels, observés, complétés et corrigés de 1953 à 1976, ainsi que leur distribution empirique (maximums, médianes, minimums, quantiles et écart-types de la moyenne).

Les débits moyens mensuels de la RAMENA et du SAMBIRANO sont bien corrélés,
(QRAMENA = .53 QSAMBIRANO + 5 $R^2$ = .83 P > .995)
ce qui atteste la bonne qualité moyenne des valeurs observées.
Les graphes 4.10. (débits caractéristiques mensuels), 4.11. et 4.12., hydrogrammes d'une année sèche et humide, permettent d'apprécier visuellement les distributions mensuelles de débits.

tableau 4.19

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1257102003 Ambodimanga
Rivière : Ramena
Pays : Madagascar
Bassin : Sambirano
Débit en m³/s

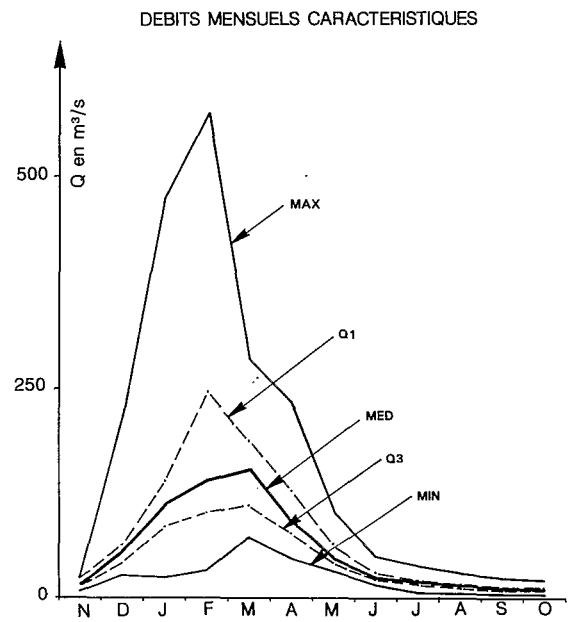
Latitude : 13.45.00
Longitude : 48.30.00

Aire : 1 080 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1952/53 | | | | | | | | | | | | 21.8 | |
| 1953/54 | 26.9 | 77.9 | 286 | 133 | 232 | 122 | 108 | 51.4 | (39.7) | (30).7 | (23.7) | (18.4) | 95.9 |
| 1954/55 | 14.1 | 53.5 | | | | | | | | | 8.72 | 9.13 | |
| 1955/56 | 8.27 | 51.8 | 125 | 122 | 108 | 148 | 65.9 | 22.4 | 20.2 | 13.5 | 9.64 | 8.72 | 58.4 |
| 1956/57 | 13.8 | 35.7 | 90.1 | 573 | 179 | 175 | 48.3 | 26.8 | 22.9 | 17.3 | 12.7 | 12.6 | 97.2 |
| 1957/58 | 13.9 | 63.7 | 24.0 | 48.1 | 181 | 233 | 105 | 39.4 | 15.4 | 16.6 | 11.2 | 14.7 | 63.8 |
| 1958/59 | 27.2 | 41.1 | 63.0 | 34.3 | 284 | 167 | 72.3 | 25.6 | 15.9 | 8.85 | 4.99 | 4.09 | 62.7 |
| 1959/60 | 14.9 | 59.4 | 141 | 103 | 89.3 | 56.5 | 54.2 | 17.1 | 7.15 | 5.27 | 5.43 | 4.65 | 46.4 |
| 1960/61 | 7.77 | 60.5 | 151 | 185 | 108 | 94.1 | 50.5 | 23.3 | 11.7 | 16.7 | 4.92 | 4.99 | 59.1 |
| 1961/62 | 13.0 | 214 | 475 | 324 | 252 | 131 | 79.0 | 46.4 | 25.6 | 13.3 | 11.8 | 11.3 | 132 |
| 1962/63 | 25.8 | 74.4 | 104 | 114 | 130 | 92.7 | 42.6 | 43.1 | 26.8 | 17.5 | 11.4 | 10.1 | 57.4 |
| 1963/64 | 23.6 | 65.4 | 117 | 122 | 126 | 129 | 47.7 | 31.3 | 21.0 | 15.8 | 9.56 | 8.86 | 59.6 |
| 1964/65 | 15.3 | 41.4 | 68.7 | 147 | 161 | 113 | 53.3 | 29.8 | 19.2 | 10.5 | 7.32 | 11.3 | 55.9 |
| 1965/66 | 26.9 | 129 | 114 | 155 | 80.8 | 48.2 | 32.7 | 22.5 | 17.9 | 14.3 | 11.5 | 11.7 | 54.9 |
| 1966/67 | 15.8 | 36.0 | 106 | 98.5 | 124 | 79.1 | 39.8 | 22.0 | 16.6 | 13.0 | 9.64 | 12.1 | 47.5 |
| 1967/68 | 26.1 | 50.2 | 139 | 125 | 189 | 84.5 | 40.4 | 21.9 | 15.2 | 11.3 | 9.46 | 8.13 | 59.9 |
| 1968/69 | 8.70 | 59.9 | 65.0 | 247 | 73.0 | 73.2 | 50.0 | 31.4 | 19.8 | 13.7 | 10.7 | 10.3 | 53.9 |
| 1969/70 | 14.1 | 43.0 | 101 | 183 | 116 | 79.9 | 34.9 | 20.1 | 13.2 | 9.63 | 6.59 | 6.19 | 51.5 |
| 1970/71 | 11.3 | 32.1 | 372 | 387 | 146 | 88.0 | 44.7 | 27.9 | 20.7 | 17.1 | 12.8 | 11.5 | 95.9 |
| 1971/72 | 21.1 | 64.5 | 109 | 247 | 210 | 93.5 | 47.2 | 25.3 | 19.5 | 21.2 | 14.6 | (13.2) | (73.3) |
| 1972/73 | 18.7 | 50.6 | 138 | 353 | 220 | 93.2 | 43.8 | 25.2 | 19.9 | 15.8 | 13.7 | 10.7 | 81.8 |
| 1973/74 | 11.2 | 47.4 | 61.8 | 103 | 113 | 61.7 | 45.0 | 23.1 | 17.3 | 13.6 | 11.9 | 9.82 | 42.9 |
| 1974/75 | 13.4 | 29.3 | 86.0 | 90.1 | 183 | 65.1 | 40.1 | 21.2 | 16.0 | 11.6 | 9.90 | 9.07 | 47.8 |
| 1975/76 | 20.4 | 58.2 | 226 | 229 | 169 | 126 | 69.5 | 32.2 | 22.5 | 18.9 | 12.9 | 13.0 | 82.7 |
| 1976/77 | 16.2 | | | | | | | | | | | | |
| Moyenne | 17.0 | 62.6 | 144 | 187 | 158 | 107 | 55.2 | 28.6 | 19.3 | 14.9 | 10.7 | 10.7 | 67.3 |
| Ecart-type | 6.28 | 38.9 | 107 | 128 | 66.2 | 44.5 | 20.4 | 9.02 | 7.90 | 8.35 | 9.50 | 7.52 | |
| Max. | 27.2 | 214 | 475 | 573 | 284 | 233 | 108 | 51.4 | 39.7 | 30.7 | 23.7 | 21.8 | |
| Q1 | 22.4 | 64.5 | 141 | 247 | 189 | 129 | 65.9 | 31.4 | 21.0 | 17.1 | 12.7 | 12.1 | |
| Méd. | 15.1 | 53.5 | 112 | 140 | 154 | 93.4 | 48.0 | 25.5 | 19.4 | 14.0 | 10.7 | 10.3 | |
| Q3 | 13.2 | 41.4 | 86.0 | 103 | 113 | 79.1 | 42.6 | 22.4 | 15.9 | 11.6 | 8.72 | 8.72 | |
| Min. | 7.77 | 29.3 | 24.0 | 34.3 | 73.0 | 48.2 | 32.7 | 17.1 | 7.15 | 5.27 | 4.92 | 4.09 | |

figure 4.10.

Ramena à Ambodimanga
Débits mensuels caractéristiques




### *2.1.4.2.2. Écoulements annuels*

La régression suivante peut être établie entre lames annuelles écoulées et précipitations annuelles corrigées sur le bassin (seize couples).

$H = 1.03\ (P - 1130)$ $(R^2 = .60 \quad P > .995)$

La prise en compte de l'indice de concentration des précipitations mensuelles Cp améliore légèrement la corrélation.

$H = .88\ (P * (1 + Cp - \overline{Cp} - 835)$ $(R^2 = .65 P > .995)$ avec $\overline{Cp} = .287$

De la même façon, il est possible d'établir une relation statistique entre les lames annuelles de la RAMENA et de la SAMBIRANO :

$HRAM = 1.36 \quad (HSAMB - 114)$ $(R^2 = .76 \quad P > .995)$

Ces relations permettent d'estimer les lames annuelles :

1951-52 (H = 2040 mm, Q = 69.8 m³/s) d'après P et Cp
1952-53 (H = 1300 mm, Q = 30.7 m³/s) d'après les lames correspondantes du SAMBIRANO
1954-55 (H = 1880 mm, Q = 44.4 m³/s) " "
1980-81 (H = 870 mm, Q = 29.8 m³/s) " "
1981-82 (H = 1705 mm, Q = 58.2 m³/s) " "
1982-83 (H = 2160 mm, Q = 74 m³/s) " "

L'analyse statistique de l'échantillon complété de vingt-huit valeurs de la lame annuelle permet d'établir les quantiles présentés dans le tableau 4.20.

figure 4.11.

Ramena
à
Ambodimanga
Débits
moyens
journaliers

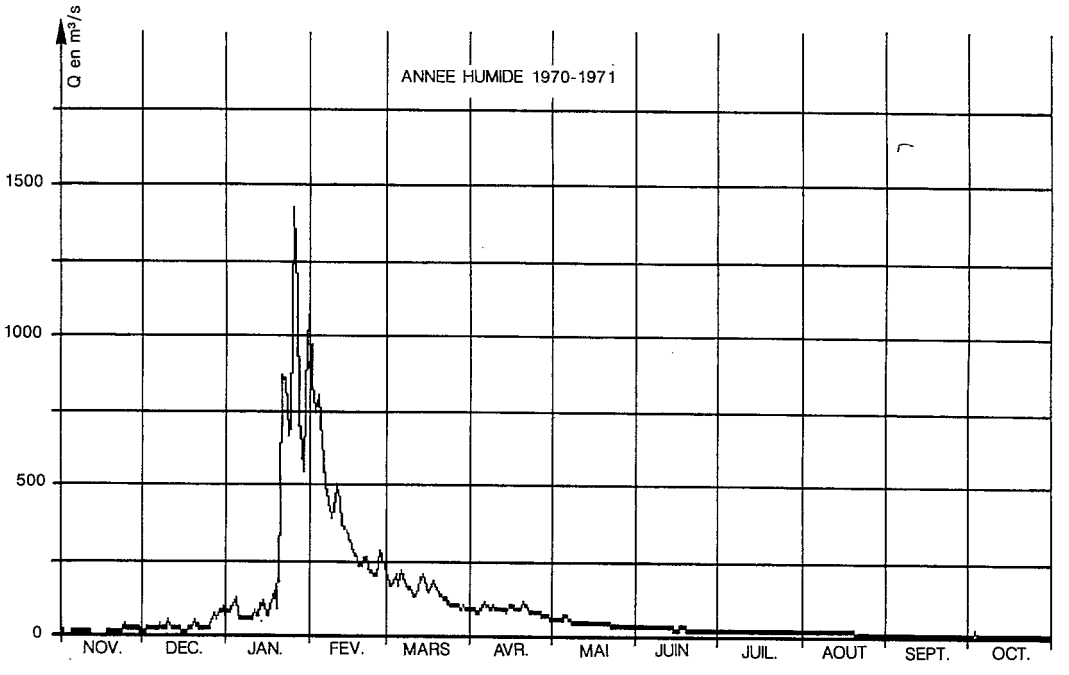



figure 4.12.

Ramena
à
Ambodimanga
Débits
moyens
journaliers

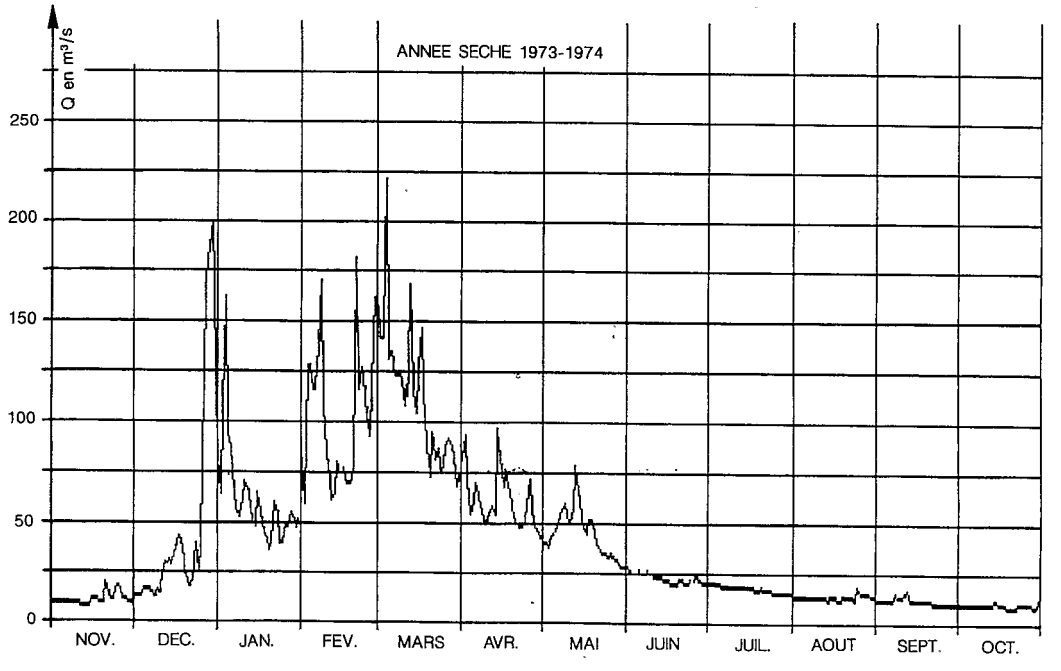


tableau 4.20.

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Période de retour (ans) | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Lames (mm) | 1010 | 1132 | 1253 | 1417 | 1803 | 2322 | 2666 | 2995 | 3422 |
| Modules ($m^3/s$) | 34.6 | 38.7 | 42.9 | 48.5 | 61.7 | 79.5 | 91.2 | 102. | 117 |
| Q spécif. ($l/s/km^2$) | 32 | 36 | 40 | 45 | 57 | 74 | 84 | 94 | 108 |

Loi de GUMBEL (test Brunet-Moret : 3.48, échelle: 458, position: 1635).
Centennales sèches et humides: 935 mm (Q = $32m^3/s$).

### *2.1.4.2.3. Crues*

■ 2.1.4.2.3.1.Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

Bien que les relevés des échelles et des plus hautes eaux aient été effectués le long d'un bief de près de 2 km (sites pont, échelle amont et échelle aval), les conditions (topographie, écoulement) permettent une extrapolation de type logarithmique, à partir des jaugeages de moyennes eaux réalisées en 1965 à l'échelle amont.

tableau 4.21.

Ramena à Ambodimanga
Maximums annuels de crues

| Année | $Qm^3/s$ | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1953-54 | 1740 | 16/01/54 18h00 | 6,50 | 3rel |
| 1954-55 | > (178) | 18/02/55 18h00 | 2,20 | Min |
| 1955-56 | 1410 | 27/01/56 18h00 | 5,89 | Min |
| 1956-57 | 2340 | 07/02/57 | 7,52 | PHE |
| 1957-58 | 422 | 08/03/58 06h00 | 3,19 | 3rel |
| 1958-59 | 2730 | 28/03/59 | 8,10 | PHE |
| 1959-60 | 651 | 22/01/60 06h00 | 3,99 | 3rel |
| 1960-61 | 353 | 12/02/61 06h00 | 2,93 | 3rel |
| 1961-62 | 1400 | 19/01/62 12h00 | 5,86 | 3rel |
| 1962-63 | 883 | 13/02/63 18h00 | 4,69 | 3rel |
| 1963-64 | 299 | 15/04/64 06h00 | 2,70 | 3rel |
| 1964-65 | 306 | 01/02/65 18h00 | 2,73 | 3rel |
| 1965-66 | 845 | 27/12/65 18h00 | 4,60 | 3rel |
| 1966-67 | 384 | 25/01/67 06h00 | 3,05 | 3rel |
| 1967-68 | 647 | 14/03/68 21h00 | 3,98 | 3rel |
| 1968-69 | 1340 | 11/02/69 18h00 | 6,04 | 3rel |
| 1969-70 | 631 | 24/02/70 06h00 | 4,23 | 3rel |
| 1970-71 | 1680 | 25/01/71 18h00 | 6,70 | PHE |
| 1971-72 | 1490 | 08/03/72 06h00 | 6,35 | 3rel |
| 1972-73 | 1070 | 02/02/73 06h00 | 5,43 | 3rel |
| 1973-74 | 320 | 21/02/74 06h00 | 3,09 | 3rel |
| 1974-75 | 946 | 14/03/75 06h00 | 5,14 | 3rel |
| 1975-76 | 1320 | 22/01/76 18h00 | 5,99 | 3rel |

■ 2.1.4.2.3.2 Résultats de l'enquête historique

Ils proviennent essentiellement des archives des Travaux publics où un profil (exécuté en 1935 pour l'étude du pont), situe le maximum de l'année 1924-25, 8,78 m au-dessus du niveau des plus basses eaux, soit une hauteur de 9,20 m à l'échelle aval (Q = 3300 m³/s).

Comme pour le SAMBIRANO à AMBANJA, le maximum de l'année 1924-25 a été considéré comme le plus important de la période 1924-83.

Les dix-sept valeurs concomittantes des débits de pointe observés sur la RAMENA et le SAMBIRANO présentent une corrélation bien marquée :

QMAX (RAMENA) = .374 QMAX (SAMBIRANO) + 290 ($R^2$ = .81)

Cette relation permet d'estimer sommairement les valeurs correspondant aux observations effectuées à AMBANJA :

1953 : 850 m³/s 1955 : 980 m³/s 1981 : 550 m³/s
1982 : 610 m³/s 1983 : 610 m³/s

Cinquante pour cent des débits maximaux sont observés entre le 24 janvier et la fin février (date médiane : 9 février, dates extrêmes : 27 décembre et 15 avril).

Les relations suivantes peuvent être établies entre les débits caractéristiques de crue :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| QMAX | = 1.18 | QJMAX + 80 | ($R^2$ = .85) | $\overline{QMAX}/\overline{QMAX}$ | = | 1.29 |
| QJMAX | = 2.39 | DCC + 150 | ($R^2$ = .37) | QJMAX/DCC | = | 3.6 |
| QJMAX | = 5.07 | DC1 - 13 | ($R^2$ = .24) | QJMAX/DCI | = | 5 |

Ces rapports, légèrement supérieurs à ceux du bassin emboitant, correspondent à des crues plus individualisées et plus aigües que celles de la SAMBIRANO. Le bassin, de taille plus réduite, a des pentes plus fortes.

L'ajustement d'une loi Gamma incomplète à l'échantillon observé fournit les quantiles suivants :

tableau 4.22.

Ramena à Ambodimanga
Débits maximaux

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 867 | 1500 | 1930 | (2850) | (3250) |
| q l/s/km2 | 803 | 1390 | 1790 | (2640) | (3000) |

La cure de 1925 serait de récurrence centennale, celle de 1958-59, un peu inférieure à la crue cinquantennale. Les débits spécifiques de crue de la RAMENA, supérieures à ceux du bassin emboitant correspondent à une aire de réception plus réduite avec des pentes plus accentuées et des précipitations plus intenses.

### *2.1.4.2.4. Basses eaux*

■ 2.1.4.2.4.1. Le tarissement

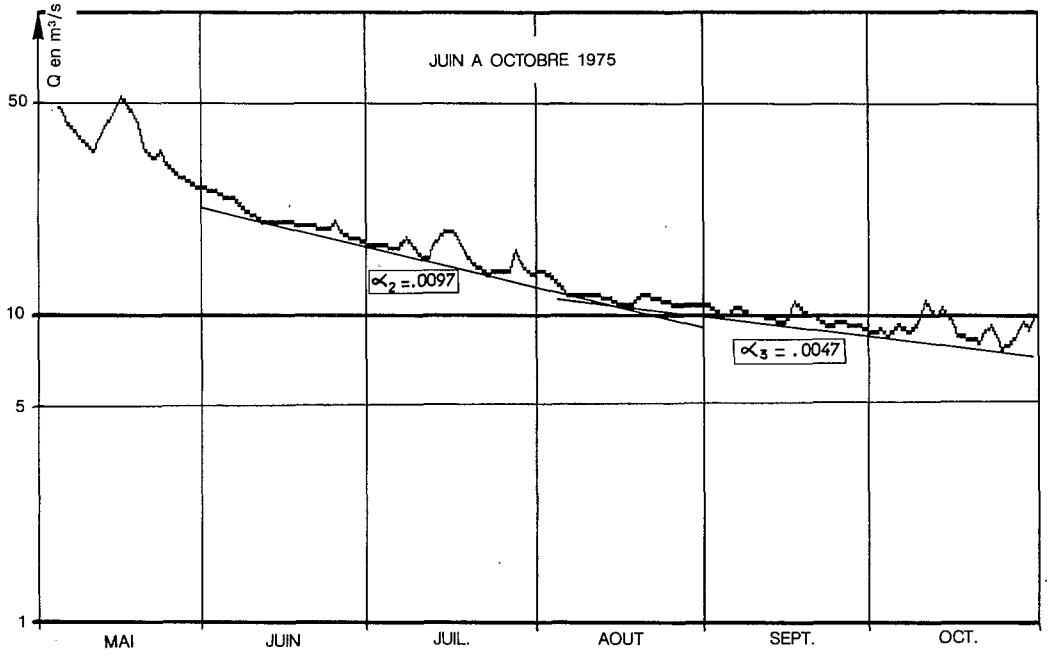
Cinq années (sur vingt et une), on a observé une décrue régulière affectant l'aspect d'un pseudo-tarissement, de mai à juin et de pente $\alpha 1$ = .015 à .025 avec un débit initial Qo compris entre 20 et 50 m³/s.

Dans 60 % des cas, un premier tarissement (juin à septembre), est observé, ayant pour pente $\alpha 2 = .0095$ (Tc = 73 jours) avec un débit initial compris entre 10 et 20 m³/s. Dans 50 % des cas, il est immédiatement suivi (septembre-octobre) d'un second tarissement de pente $\alpha 3 = .0050$ (Tc = 139 jours) avec un débit initial compris entre 5 et 12 m³/s (graphe 4.13.). Les réserves drainables peuvent être évaluées entre 120 et 260 mm (130 à $280.10^6$ m³).

Ces caractéristiques sont très voisines de celles observées sur le SAMBIRANO, avec une vitesse de drainage cependant plus lente.

figure 4.13.

Tarissement de la Ramena à Ambodimanga




■ 2.1.4.2.4.2. Les débits d'étiage

Les tableaux 4.23. et 4.24. consignent les observations (débits caractéristiques d'étiage et quantiles) effectuées de 1954 à 1976.

Versant est :
le Mangoro
dans la région
de Moramanga



Versant est :
la Fandramana
dans la région
d'Ihosy
(bassin de la
Mananara
du sud)

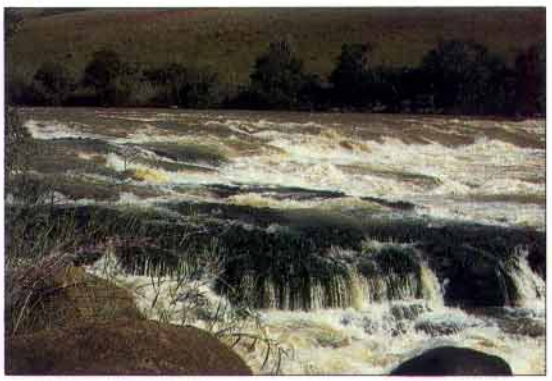


Hautes terres centrales : l'Andromba à Ambohikambana (bassin de la Betsiboka)





Hautes terres centrales : l'Andromba à Antananarivo (bassin de la Betsiboka)



Hautes terres centrales : L'Ikopa à Fiadanana (bassin de la Betsiboka)

Ouest : la Mazy dans la région d'Itasy (bassin de la Tsiribihina)





Sud : le Mandrare à Anadabola

Sud :
la Menarandra
à Tranoroa



tableau 4.23.

Ramena à Ambodimanga
Débits caractéristiques d'étiage ($m^3/s$)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1954 | 47.1 | 15.8 | 9.46 | 8.39 | 30-10 |
| 1955 | | | | 6.43 | 14-10 |
| 1956 | 12.3 | 8.43 | 7.86 | 7.52 | 07-11 |
| 1957 | 15.3 | 12.1 | 10.8 | 10.4 | 14-10 |
| 1958 | &16.0 | 10.5 | 9.70 | 8.23 | 18-10 |
| 1959 | 9.17 | 4.26 | 3.95 | 3.44 | 31-10 |
| 1960 | 5.62 | | | | |
| 1961 | 9.28 | | | | |
| 1962 | 14.5 | | | | |
| 1963 | 20.5 | | | | |
| 1964 | 15.6 | | | | |
| 1965 | 11.5 | 6.31 | 4.57 | 4.01 | 13-10 |
| 1966 | 13.8 | 10.5 | 9.75 | 9.14 | 16.11 |
| 1967 | 14.7 | 9.28 | 7.90 | 7.30 | 15.10. |
| 1968 | 10.6 | 7.60 | 6.84 | 6.44 | 23.10 |
| 1969 | 13.2 | 9.83 | 8.09 | 6.95 | 25-10 |
| 1970 | 10.2 | 5.73 | 4.98 | 4.61 | 22-10 |
| 1971 | 17.8 | 11.6 | 10.5 | 10.1 | 28-10 |
| 1972 | | | | | |
| 1973 | 14.0 | 10.4 | 9.65 | 8.78 | 14-11 |
| 1974 | 13.3 | 10.1 | 9.28 | 8.48 | 21-10 |
| 1975 | 11.8 | 9.50 | 8.68 | 7.84 | 25-10 |
| 1976 | | | | 8.10 | 27-10 |

tableau 4.23. (suite)

Quantiles ($m^3/s$)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | (47.1) | 15.8 | 10.8 | 10.4 | 23.11 |
| Q1 | 15.5 | 10.5 | 9.56 | 8.51 | 30.10 |
| Méd. | 13.5 | 9.67 | 8.39 | 7.68 | 25.10 |
| Q3 | 11.0 | 6.96 | 5.84 | 5.23 | 17.10 |
| Min. | 5.62 | 4.24 | 3.51 | 3.14 | 13.10 |

La date médiane d'apparition de l'étiage est, comme sur le SAMBIRANO, le 25 octobre. La moitié des étiages de l'échantillon est observée entre le 17 et le 30 octobre.
Les débits caractéristiques d'étiage sont bien corrélés :
DCE = 1.024 QJ min + 5 ($R^2$ = .98 P > .995)
DC11 = 1.115 QJ min + 1.15 ($R^2$ = .75 P > .995)
DC9 = 1.09 QJ min + 5.5 ($R^2$ = .53 P > .995)

La valeur suspecte du DC9 de 1954 n'a pas été retenue dans le dernier échantillon.

Enfin, entre QJmin et débit moyen mensuel de juillet, il est possible d'établir la relation suivante :

QJ min = .29 Q07 + 1.7 ($R^2$ = .38 P > .995)

Les débits spécifiques médians de la RAMENA sont assez nettement supérieurs à ceux du SAMBIRANO.

Rapport des débits minimaux journaliers 6.8/4.14 = 160 %
des DCE spécifiques 7.8/5.2 = 150 %
des DC11 spécifiques 9.0/6.2 = 145 %
des DC9 spécifiques 12.5/9.3 = 135 %

Une loi de GOODRICH (test Brunet-Moret: 2.90) permet d'établir les différents quantiles relatifs aux débits journaliers minimums (QJmin.) pour un échantillon de vingt deux valeurs.

tableau 4.24.

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Période de retour (ans) | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q ($m^3/s$) | 3.25 | 4.32 | 5.49 | 7.37 | 8.85 | 9.51 | 10.0 |
| Q ($l/s/km^2$) | 3.0 | 4.0 | 5.1 | 6.8 | 8.2 | 8.8 | 9.3 |

Paramètres de la loi de Goodrich : (échelle : 27.8, position : -19.6, forme : .063).
Centennales sèche et humide : 1 $m^3/s$ (.9 $l/s/km^2$) et 10.8 $m^3/s$ (10 $l/s/km^2$).

#### *2.1.4.2.5. Bilan hydrologique*

De façon très approchée, la pluviométrie annuelle sur le bassin a été évaluée à 2 900 à 3 000 mm, ce qui pour une lame écoulée de 1 800 mm correspond à un déficit d'écoulement de 1 100 à 1 200 mm et un cœfficient annuel d'écoulement de 63 %.

Les mécanismes mensuels du bilan doivent être assez proches de ceux déterminés sur le SAMBIRANO avec sans doute un emmagasinement plus important en saison des pluies.

## 2.1.5. Bassin de la Loza

L'estuaire de la LOZA réunit deux groupes de tributaires :

-la MAEVARANO qui draine avec ses affluents la cuvette de l'ANKAIZINA, au pied des contreforts sud du TSARATANANA ;

-l'ANKOFIA et le TSINJOMORONA, au sud, qui drainent la façade occidentale du plateau de l'ANDRONA, à l'ouest du bassin supérieur de la SOFIA.

Les formations géologiques sont assez semblables à celles des bassins précédents : granites et migmatites du socle cristallin (système du graphite) recouvertes de sols ferrugineux tropicaux rouges peu lessivés gréso-calcaires du système du KARROO (ISALO) avec des sols ferrallitiques typiques et des sols hydromorphes à gley dans les dépressions marécageuses, calcaires jurassiques marins à sols ferrugineux tropicaux.

La végétation dominante est représentée par la pseudo-steppe (savane herbeuse à aristida, dans les bassins supérieurs, savane de l'Ouest à Aristida, Hyparrhenia et Hétéropogon).

## 2.1.5.1 Le bassin de la Maevarano

La MAEVARANO et ses affluents principaux (ANTSAMAKA, BEANDRAREZONA, BEALANANA) drainent la cuvette de l'ANKAIZINA, caractérisée par de nombreux lacs et marécages étagés, débordants en saison des pluies, qui jouent au rôle non négligeable sur l'écrêtement des crues et l'évapotranspiration des apports. Ces étangs et marais peuvent représenter entre 8 et 20 % de la superficie des bassins.

La pluviométrie qui peut atteindre 3 000 mm sur la bordure Nord du bassin, sur les pentes du TSARATANANA, est inférieure à 1 500 mm dans le centre du bassin.

### *2.1.5.1.1. La Maevarano à Ambodivohitra*

La station principale est située sur le seuil d'AMBODIVOHITRA (14°36'S - 48°32'E) et contrôle un bassin versant d'une superficie de 2 585 km².

Les observations sont effectuées depuis 1955 mais avec de nombreuses lacunes jusqu'en 1963.

Vingt et une mesures de débit ont été effectuées entre 1963 et 1975, permettant d'établir une courbe d'étalonnage extrapolée jusqu'à 640 m³/s. Cinq mesures complémentaires entre 1979 et 1982 ont mis en évidence un détarage, lié probablement à une modification du contrôle aval.

Les lacunes d'observations (1954 à septembre 1963) ont pu être comblées partiellement à partir des observations effectuées sur la station voisine d'AMBODISANTRAKELY, située légèrement plus en aval (2 800 km²). Entre 1955 et 1974, seuls les débits de saison des pluies ont pu être évalués. Avec une précision acceptable, les modules annuels ont pu être estimés en établissant une relation entre débits moyens de saison des pluies et de saison sèche à partir des observations 1955-58 et 1963-74.

#### ■ 2.1.5.1.1.1. Débits moyens mensuels

Le tableau 4.25. rassemble les débits moyens mensuels et annuels observés et complétés ainsi que leurs distributions empiriques. Le graphe 4.14 représente les débits moyens mensuels caractéristiques. A noter la valeur évaluée très élevée du mois d'avril 1959 due à une crue cyclonique.

tableau 4.25.

Maevarano à Ambodivohitra
Débits moyens mensuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Module |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1955/56 | 2.64 | (46.8) | (125) | (169) | (121) | (129) | 42.9 | 26.1 | 19.4 | 13.2 | 7.76 | 4.75 | (59) |
| 1956/57 | 2.30 | 31.11 | (88) | (211) | (137) | (106) | 35.6 | 20.7 | 14.7 | 11.1 | 6.05 | 3.01 | (55) |
| 1957/58 | (1.70) | (41.2) | (90) | (119) | (206) | (122) | 40.0 | 24.1 | 18.5 | 18.7 | 11.3 | 6.98 | (58) |
| 1958/59 | 7.14 | (11.7) | (48.8) | (79.9) | (44.3) | (295) | | | | | | | (49) |
| 1959/60 | (26.0) | (54.6) | (111) | (96.8) | (110) | (60.3) | | | | | | | (46) |
| 1960/61 | (9.61) | (27.3) | (124) | (83.2) | (98.5) | (84.6) | | | | | | | (43) |
| 1961/62 | (10.7) | (93.6) | (145) | (236) | (220) | (118) | | | | | | | (79) |
| 1962/63 | (11.9) | (34.4) | (46.9) | (122) | (108) | (55.7) | | | | | | | (39) |
| 1963/64 | 14.6 | 36.2 | 81.7 | 125 | 115 | 53.6 | 25.7 | 17.9 | 13.9 | 11.5 | 7.03 | 5.02 | 42.0 |
| 1964/65 | 5.97 | 12.3 | 33.5 | 148 | 99.4 | 109 | 34.1 | 22.6 | 16.0 | 11.3 | 7.70 | 5.12 | 41.3 |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Module |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1965/66 | 10.6 | 65.0 | 93.5 | 114 | 66.1 | 44.1 | 26.7 | 18.0 | 12.8 | 9.97 | 7.31 | 4.40 | 39.0 |
| 1966/67 | 5.16 | 11.5 | 83.2 | 106 | 144 | 66.0 | 36.4 | 20.7 | 15.2 | 11.2 | 7.46 | 4.11 | 42.3 |
| 1967/68 | 13.7 | 67.5 | 177 | 158 | 187 | 74.0 | 38.5 | 25.0 | 18.9 | 13.7 | 9.03 | 5.78 | 66.6 |
| 1968/69 | 4.49 | 73.0 | 113 | 111 | 66.4 | 51.9 | 34.4 | 24.8 | 18.6 | 13.5 | 8.89 | 6.20 | 43.5 |
| 1969/70 | 8.45 | 56.6 | 121 | 170 | 112 | 86.2 | 40 | 25.7 | 18.1 | 12.7 | 8.58 | 5.36 | 54.7 |
| 1970/71 | 5.90 | 9.97 | 117 | 182 | 115 | 49.5 | 28.5 | 19.6 | 15.9 | 11.5 | 7.84 | 4.86 | 46.5 |
| 1971/72 | 12.6 | 38.0 | 51.2 | 159 | 118 | 56.7 | 43.6 | 21.8 | 15.2 | 11.9 | 7.65 | 5.56 | 44.7 |
| 1972/73 | 11.4 | 23.3 | 118 | 194 | 200 | 75.3 | 35.0 | 24.9 | 19.5 | 14.0 | 9.40 | 5.53 | 60.1 |
| 1973/74 | 3.03 | 6.19 | 40.8 | 77.0 | 97.9 | 40.7 | 29.0 | 17.5 | 12.0 | 8.28 | 6.16 | 4.80 | 28.3 |
| 1974/75 | 5.42 | 15.4 | 52.3 | 81.1 | 157 | 64.7 | 31.2 | 19.5 | 13.8 | 11.2 | 7.45 | 4.75 | 38.5 |
| 1975/76 | 9.02 | 25.2 | 133 | 238 | 122 | 115 | 45.6 | 30.4 | 21.6 | 15.1 | 8.98 | 6.66 | 63.5 |
| 1976/77 | 8.03 | 13.1 | 53.5 | 118 | 147 | 78.3 | 35.0 | 23.4 | 16.8 | 12.8 | 8.27 | 5.87 | 42.9 |
| 1977/78 | 3.94 | 4.72 | 19.1 | 29.3 | 49.1 | 33.7 | 19.3 | 13.0 | 12.0 | 8.12 | 5.45 | 3.48 | 16.7 |
| 1978/79 | 4.51 | 23.2 | 41.6 | 113 | 74.7 | 36.0 | 21.5 | 15.1 | 11.4 | 7.81 | 5.22 | 3.16 | 29.2 |
| 1979/80 | 8.19 | 41.7 | 118 | 118 | 117 | 154 | 74.8 | 27.9 | 19.4 | 14.7 | 9.60 | 7.42 | 59.0 |
| 1980/81 | 8.23 | 15.1 | 21.8 | 37.5 | 50.9 | 31.9 | 18.9 | 12.1 | 8.69 | 6.49 | 4.50 | 5.57 | 18.4 |
| 1981/82 | 4.63 | 19.3 | 73.6 | 109 | 148 | 110 | 36.4 | 20.6 | 13.5 | 9.79 | 7.61 | 7.03 | 46.2 |
| 1982/83 | 16.7 | 29.2 | 110 | 148 | 160 | 72.0 | 28.6 | 19.6 | 14.3 | 9.77 | 7.06 | 8.78 | 51.5 |
| 1983/84 | 12.1 | 65.5 | | | | | | | | | | | |
| Moyenne | 8.55 | 34.2 | 86.8 | 130 | 121 | 84.8 | 34.9 | 21.4 | 15.7 | 11.7 | 7.67 | 5.40 | 46.4 |
| Ecart-type | 5.15 | 23.0 | 40.8 | 52.2 | 46.6 | 52.4 | 11.4 | 4.58 | 3.22 | 2.74 | 1.55 | 1.38 | |
| Max. | 26.0 | 93.6 | 177 | 238 | 220 | (295) | 74.8 | 30.4 | 21.6 | 18.7 | 11.3 | 8.78 | |
| Q1 | 11.7 | 50.7 | 118 | 164 | 148 | 110 | 40.0 | 24.9 | 18.6 | 13.5 | 8.89 | 6.20 | |
| Méd. | 8.19 | 19.2 | 89.0 | 118 | 116 | 73.0 | 35.0 | 20.7 | 15.2 | 11.5 | 7.65 | 5.36 | |
| Q3 | 4.57 | 14.1 | 50.0 | 101 | 98.2 | 52.7 | 28.5 | 18.0 | 13.5 | 9.79 | 7.03 | 4.75 | |
| Min. | 1.70 | 4.72 | 19.1 | 29.3 | 44.3 | 31.9 | 18.9 | 12.1 | 8.69 | 6.49 | 4.50 | 3.01 | |

Les débits de saison sèche présentent des corrélations très significatives :

Q5 = .27 Q4 + 14.3 (R = .80 P > .99)
Q6 = .32 Q5 + 10.2 (R = .80 P > .99)
Q7 = .68 Q6 + 1.2 (R = .96 P > .995)
Q8 = .76 Q7 - 2 (R = .89 P > .99)
Q9 = .54 Q8 + 1.4 (R = .95 P > .99)
Q10 = .49 Q9 + 1.6 (R = .55 P >.99)

■ 2.1.5.1.1.2 Apports annuels

Sur la période 1955-1982 (vingt-huit valeurs), l'analyse statistique donne les quantiles suivants :

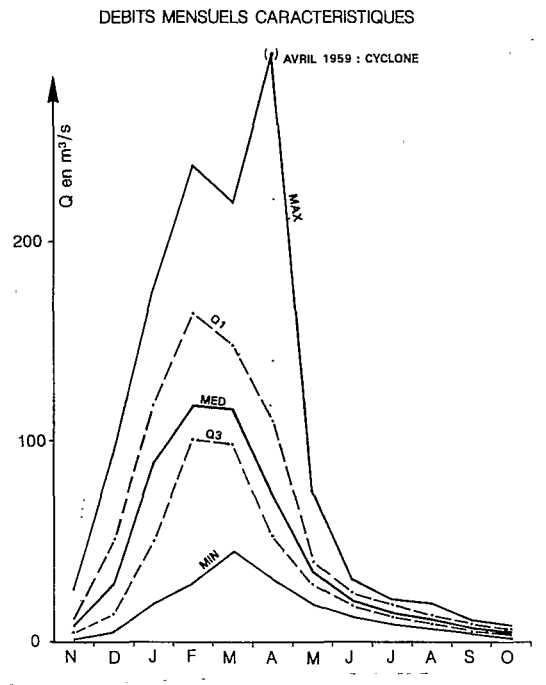
tableau 4.26.

| Période de retour (ans) | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| H mm | 237 | 303 | 362 | 433 | 568 | 704 | 775 | 833 | 899 |
| Q ($m^3/s$) | 19.4 | 24.8 | 29.7 | 35.5 | 46,5 | 57.7 | 63.5 | 68.2. | 73.6 |
| q ($l/s/km^2$) | 7.5 | 9.6 | 11.5 | 13.7 | 18 | 22.3 | 24.6 | 26.4 | 28.5 |

Loi de GAUSS (test Brunet-Moret : 4.3 échelle : 161 mm, position : 568 mm).
Centennales sèche et humide : 194 mm (Q = 15.9 $m^3/s$) et 943 mm (Q = 77.2 $m^3/s$).

figure 4.14.

Maevarano à Ambohitra




En utilisant (J. Danloux, 1975) un indice pluviométrique annuel constitué à partir des précipitations observées sur les postes de BETAINKANKANA (poids .55), ANTSOHIHY (poids .11) et ANDAPA (poids .33), les débits et lames annuelles ont pu être évalués (avec une précision de l'ordre de 20 %) pour la période 1935-1954.

Les quantiles de l'échantillon de lames annuelles 1935-1982 (quarante-huit valeurs) sont les suivants :

tableau 4.27.

| Récurrence | Années sèches | | | | | Médiane | Années humides | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 100 | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 |
| H mm | 217 | 253 | 311 | 367 | 441 | 605 | 801 | 918 | 1024 | 1153 | 1246 |
| Q ($m^3/s$) | 17.8 | 20.7 | 25.5 | 30.1 | 36.1 | 49.6 | 65.6 | 75.2 | 83.9 | 94.4 | 1028 |

Loi de Galto (test Brunet-Moret: 4.3 échelle: 984 mm, position : -379 mm).

Tout en gardant à l'esprit l'imprécision sur les valeurs 1935-54, il semble que cette distribution permet d'attribuer à la valeur observée en 1961-62 une récurrence (15 années humides) plus vraisemblable que la récurrence (plus rare que la centennale) déterminée sur l'échantillon de vingt-huit années.

■ 2.1.5.1.1.3. Crues

Les échelles d'AMBODIVOHITRA aval, d'ANTETEZAMBATO et d'AMBODISANTRAKELY (A = 2800 km²), qui contrôlent la sortie générale des cuvettes de l'ANKAIZINA, ont été assez diversement suivies.

Les corrélations entre hauteurs aux différentes échelles et les jaugeages de hautes eaux réalisés au cours de la campagne 1974-75 (cyclone Inès) ont permis :

- un étalonnage assez complet de la station d'AMBODIVOHITRA aval ;
- une estimation correcte des crues de la période 1955-76 ;

et l'évaluation du maximum de l'année 1944-45, troisième valeur de l'échantillon 1939-84.

tableau 4.28.

Maevarano à Ambodivohitra aval
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1944-45 | 550 | 19/02/45 | Antetezambato | |
| 1955-56 | 641 | 26/01/56 | 5,51 | |
| 1956-57 | 327 | 07/02/57 | Ambodisantrakely | |
| 1957-58 | 339 | 25/03/58 | | |
| 1958-59 | 641 | | | |
| 1959-60 | 160 | 09/03/60 | Ambodisantrakely | |
| 1960-61 | 231 | 11/01/61 | | |
| 1961-62 | 453 | 05/02/62 | | |
| 1962-63 | 211 | 04/02/63 | | |
| 1963-64 | 183 | 18/02/64 | 3,97 | 3Rrel |
| 1964-65 | 229 | 13/02/65 | 4,26 | 3rel |
| 1965-66 | 189 | 17/02/66 | 4,01 | 3rel |
| 1966-67 | 237 | 17/03/67 | 4,30 | 3rel |
| 1967-68 | 239 | 15/02/68 | 4,31 | 3rel |
| 1968-69 | 193 | 25/12/68 | 4,04 | 3rel |
| 1969-70 | 260 | 10/02/70 | 4,42 | 3rel |
| 1970-71 | 386 | 01/02/71 | 4,85 | 3rel |
| 1971-72 | 213 | 15/02/72 | 4,16 | 3rel |
| 1972-73 | 327 | 11/03/73 | 4,67 | 3rel |
| 1973-74 | 159 | 16/03/74 | 3,77 | 3rel |
| 1974-75 | 266 | 15/03/75 | 4,45 | 3rel |
| 1975-76 | 402 | 26/01/76 | 4,90 | 3rel |
| 1976-77 | < (260) | 25/02/77 | | Min |
| 1977-78 | < (72) | 28/03/78 | | Min |
| 1978-79 | < (150) | 09/02/79 | | Min |
| 1979-1980 | 348 | 23/01/80 | 4,73 | 3rel |
| 1980-81 | 87 | 22/03/81 | 2,98 | 3rel |
| 1981-82 | 229 | 19/02/82 | 4,26 | 3rel |
| 1982-83 | 229 | 20/02/83 | 4,26 | 3rel |

La crue cyclonique de 1937 serait de même ordre de grandeur que celle de 1945.

La moitié des débits maximaux est observée entre le 23 janvier et le 17 février (date médiane : 6 février).

L'ajustement d'une loi de Frechet à l'échantillon de 28 valeurs donne les quantiles suivants :

tableau 4.29.

Maevarano à Ambodivohitra
Débits maximaux

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 248 | 364 | 445 | (640) | (730) |
| q l/s/km² | 96 | 141 | 172 | (250) | (280) |

Les crues cycloniques de 1956 et 1959 seraient de récurrence cinquantennale.

On notera la relative modération des débits spécifiques maximaux en les comparant à ceux du SAMBIRANO, moins du cinquième pour la crue médiane.

L'effet écreteur des zones marécageuses et des étangs, ainsi que des précipitations nettement moins abondantes, jouent un rôle important dans cette modération.

■ 2.1.5.1.1.4. Basses eaux

On observe généralement deux droites de tarissement pour les basses eaux de la MAEVARANO.

La première de cœfficient $\alpha 1$ voisin de 0.0125 (Tc = 55 jours), correspond à une première vidange des réserves de juillet à octobre.

Le second tarissement (octobre-décembre) est plus rapide : $\alpha 2$ = .023
(Tc = 30 jours )

Les débits caractéristiques suivants ont été observés :

tableau 4.30.

Maevarano à Ambodivohitra
Débits caractéristiques
d'étiage (m³/s)

| DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|
| 2.08 | 1.42 | 27.11.55 |
| 2.08 | 1.75 | 14.11.56 |
| (1.20) | < 1.20 | |
| 3.94 | 2.30 | 11.58 |
| (5.66) | (4.78) | 1959 |
| (2.11) | (1.92) | 1960 |
| (2.66) | (2.02) | 1961 |
| (6.28) | (5.22) | 1962 |
| 3.33 | 2.71 | 1963 |
| 4.35 | 3.53 | 30.10.64 |
| 3.74 | 3.12 | 17.11.65 |
| 2.30 | 1.75 | 17.11.66 |
| 5.53 | 3.12 | 25.10.67 |
| 3.94 | 3.53 | 12.11.68 |
| 5.27 | 4.53 | 24.10.69 |
| 4.35 | 4.01 | 15.11.70 |

suite

| DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|
| 4.53 | 3.53 | 31.10.71 |
| 4.35 | 3.84 | 11.11.72 |
| 2.19 | 1.64 | 01.12.73 |
| 3.74 | 2.51 | 05.12.74 |
| | 3.53 | 75 |
| | 4.25 | 76 |
| | 1.86 | 77 |
| | 2.19 | 78 |
| | 2.08 | 79 |
| 5.30 | 4.44 | 30.11.80 |
| 3.71 | 3.28 | 24.1181 |
| 6.59 | 5.92 | 18.10.82 |
| 4.93 | 4.49 | 16.11.83 |

Les valeurs entre parenthèses ont été évaluées d'après MAEVARANO-Kely (station située en amont du confluent de l'ANTSAMAKA).

| | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|
| Max. | 6.59 | 5.92 | 05.12 |
| Q1 | 4.73 | 4.13 | 23.11 |
| Méd. | 3.84 | 3.12 | 10.11 |
| Q3 | 2.48 | 1.97 | 24.10 |
| Min. | 1.20 | < 1.20 | 18.10 |

DCE = 1.06 QJ min + .46 ($R^2$ = .95 P > .995)

La moitié des étiages sont observés entre le 24 octobre et le 23 novembre.

tableau 4.31.

Quantiles pour 29 valeurs observées ($m^3/s$)

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Q ($m^3/s$) | 1.29 | 1.45 | 1.66 | 2.00 | 2.91 | 4.11 | 5.84 | 5.48 | 6.24 |
| Q ($l/s/km^2$) | .50 | .56 | .64 | .77 | 1.13 | 1.59 | 1.87 | 2.1. | 2.4 |

Loi de GOODRICH (test Brunet-Moret : 2.53) échelle : 2.30, position : 1.06, forme : .595).
Centennales sèche et humide : 1.20 $m^3/s$ (.47 $l/s/km^2$) et 6.77 $m^3/s$ (2.6 $l/s/km^2$).

Les débits caractéristiques d'étiage sont sensiblement moins élevés que sur le bassin du SAMBIRANO (dans un rapport de 1 à 4 ou 5) et les tarissements plus rapides. Ce qui permet d'estimer que les aquifères du bassin de la MAEVARANO sont nettement moins puissants que sur le bassin du SAMBIRANO (avec également une reprise par évapotranspiration en saison sèche plus importante sur les étangs et marais).

■ 2.1.5.1.1.5. Bilan hydrologique

La pluviométrie annuelle sur le bassin est évaluée à 1 730 mm. Avec une lame écoulée interannuelle de 600 mm, on obtient un déficit d'écoulement de 1 130 mm et un coefficient d'écoulement de 35 %. Là encore, la comparaison avec le SAMBIRANO, met en évidence le rôle important joué dans le bilan par les dépressions marécageuses. Une comparaison effectuée sur l'année 1973-74 entre différents bassins de la cuvette de l'ANKAIZINA laisse apparaître une liaison certaine entre le déficit d'écoulement et le rapport des zones inondables à la superficie totale (Danloux, 1975).

### *2.1.5.1.2 La Maevarano à Beroitra (superficie du bassin versant = 780 km²)*

Le contrôle des deux échelles limnimétriques (ANTAFIANDAKANA et BEROITRA) d'une part et d'autre du seuil de BEROITRA et une série de jaugeages au cours de l'année 1975, ont permis l'évaluation des débits des plus hautes eaux connues (années 1958-59 et période 1973-76) sur la MAEVARANO à la sortie de la première cuvette.

| Année | Qm³/s | Date | Beroitra | Antafiandakana |
|---|---|---|---|---|
| 1958-59 | 170 | | 5,95 | 5,10 |
| 1973-74 | 49 | | 4,04 | |
| 1974-75 | 106 | 17/03/75 | 4,98 | 4,21 |
| 1975-76 | 155 | 23/01/76 | 5,85 | 4,99 |

La crue cinquantenale a été estimée à 160 m³/s (205 l/s/km²).

### *2.1.5.1.3. La Maevarano à Antelopolo (bassin versant : 1 185 km²)*

Pour la traduction en débits des plus hautes eaux connues pour l'année 1958-59 et la période 1972-76, une extrapolation de type logarithmique a été menée à partir des jaugeages les plus importants effectués à cette station, installée à l'amont immédiat du seuil d'ANTELOPOLO.

| Année | Qm³/s | Date | Hmm | Obs |
|---|---|---|---|---|
| 1958-59 | 260 | | 6,44 | PHE |
| 1975-76 | 238 | 24/01/76 | 6,10 | Lim |
| 1972-73 | 162 | | 4,76 | PHE |

Les débits maximaux de récurrence decennale et cinquantenale ont été estimés à 245 m³/s (207 l/s/km²) et 260 m³/s (220 l/s/km²).

### *2.1.5.1.4. La Beandrarezona à Beandrarezona*

Avec la BEALANANA, la BEANDRAREZONA est un des principaux affluents de l'ANTSAMAKA, affluent principal de la MAEVARANO.

La station de BEANDRAREZONA (14°29'S - 48°41'E), située à l'entrée du marais d'ANKOTROBAKA, contrôle un bassin versant d'une superficie de 190 km².

Une échelle a été installée en janvier 1975. Détruite en janvier 1976 par la crue consécutive au cyclone DANAE, elle a été réinstallée en octobre 1979 (limnigraphe).

Quarante-huit jaugeages ont permis d'établir une courbe de tarage assez stable. Pour les débits de crue, une extrapolation de type logarithmique a été menée à partir des mesures de hautes eaux réalisées lors du passage du cyclone INES (13 et 14 mars 1975).

Les débits journaliers ont pu être établis pour l'année 1974-75 et d'octobre 1980 à décembre 1983.

tableau 4.32.

Beandrarezona
Débits moyens mensuels ($m^3/s$)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1974-75 | (1.4) | (3.3) | (8.5) | 8.75 | 20.7 | 8.21 | 4.34 | 2.66 | 2.06 | 1.81 | 1.45 | 1.08 | (5.3) |
| 1979-80 | | | | | | | | | | | | 1.42 | |
| 1980-81 | 1.40 | 2.78 | 2.06 | 7.03 | 4.91 | 3.76 | 2.29 | 1.77 | 1.30 | 1.12 | .991 | 1.44 | 2.54 |
| 1981-82 | 1.12 | 2.81 | 6.91 | 11.8 | 8.58 | 7.98 | 3.16 | 2.52 | 2.04 | 1.55 | 1.26 | 1.29 | 4.20 |
| 1982-83 | 3.32 | 4.11 | 10.0 | 15.5 | 17.8 | 10.6 | 8.18 | 6.71 | 5.24 | 3.75 | 2.28 | 2.22 | 7.43 |
| 1983-84 | 1.42 | 5.78 | | | | | | | | | | | |
| Moyenne | 1.73 | 3.76 | 6.87 | 10.8 | 13.0 | 7.64 | 4.49 | 3.42 | 2.66 | 2.06 | 1.50 | 1.49 | |

La moyenne des lames observées, pour les mêmes années sur la MAEVARANO, représente 83 % de la lame interannuelle. Par correction d'hydraulicité, on peut évaluer la lame moyenne interannuelle de la BEANDRAREZONA à 985 mm (Q = 5.9 $m^3/s$).

Les débits maximaux de crue (observés ou évalués d'après des délaissés) sont les suivants :

| Date | Qmax ($m^3/s$) | | q ($l/s/km^2$) |
|---|---|---|---|
| 1973 | (174) | ou | 916 |
| 14-03-75 | 99 | | 521 |
| 21-03-76 | (465) | | 2450 |
| 16-02-81 | 32.1 | | 169 |
| 21-02-82 | 51.1 | | 269 |
| 12-02-83 | 65.5 | | 345 |

Par comparaison avec les crues de la MAEVARANO, il est possible d'évaluer la crue médiane à 95 $m^3/s$ et, sous réserve, la crue decennale à 365 $m^3/s$ (1940 $l/s/km^2$), la crue cinquantenale à 760 $m^3/s$ (4040 $l/s/km^2$) et la crue centenale à 980 $m^3/s$ (5200 $l/s/km^2$).

Les débits d'étiage observés sont les suivants :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 30-10-75 | .94 | $m^3/s$ | ou | 4.9 | $l/s/km^2$ | |
| 17-10-80 | .99 | $m^3/s$ | ou | 5.2 | $l/s/km^2$ | (DCE : 1.09 $m^3/s$) |
| 03-10-81 | .92 | $m^3/s$ | ou | 4.8 | $l/s/km^2$ | (DCE : .96 $m^3/s$) |
| 28-10-82 | 1.12 | $m^3/s$ | ou | 5.9 | $l/s/km^2$ | (DCE : 1.19 $m^3/s$ |
| 14-10-83 | .90 | $m^3/s$ | ou | 4.8 | $l/s/km^2$ | (DCE : 1.88 $m^3/s$) |

Les débits d'étiage spécifiques, nettement plus élevés que sur la MAEVARANO, se rapprochent des valeurs observées sur le SAMBIRANO.

### *2.1.5.1.5. Petits sous-bassins de la Maevarano*

D'autres observations ont été effectuées sur différents sous-bassins de la MAEVARANO (Danloux, 1975). Elles permettent de distinguer les sous-bassins d'altitude, situés sur les contreforts du massif, à pluviométrie moyenne voisine de 2 000 mm, dont les caractéristiques (en particulier les débits d'étiage) sont proches de celles des bassins de la façade occidentale du TSARATANANA (SAMBIRANO) et les sous-bassins (ainsi que le bassin principal global de la MAEVARANO) d'altitude moyenne moins élevée (dépression de l'ANKAIZINA), sous pluviométrie plus réduite (1 500 à 1 800 mm) et dont les caractéristiques, beaucoup plus modérées, reflètent l'influence des étangs et marais

■ 2.1.5.1.5.1. La Bealanankely à Betainkankana (A = 85,0 km²)

Pour l'estimation d'un ordre de grandeur des débits maximaux de la période 1973-76, l'extrapolation de type logarithmique est très importante (de 5 à 128 m³/s) pour cette station, installée directement en amont du seuil d'ANDRIANA.

Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Episode cyclonique |
|---|---|---|---|
| 1973-74 | 19,7 | 08/02/74 | |
| 1974-75 | 40,0 | 14/03/75 | Cyclone Inès |
| 1975-76 | 128 | 23/01/76 | Cyclone Danae |

Comme pour toutes les autres stations des rivières des cuvettes de l'ANKAIZINA (MAEVARANO et affluents), le maximum décennal de crue a été déduit des résultats de l'étude statistique menée sur la MAEVARANO à AMBODIVOHITRA et estimé à 150 m³/s (1765 l/s/km²).

■ 2.1.5.1.5.2. La Bealanana à Ambinanindrano (A = 95,4 km²)

L'étalonnage de hautes eaux de cette station installée en janvier 1976 s'appuie sur quelques jaugeages et le relevé des pentes de la ligne d'eau (formule de MANNING-Strickler).

| Année | Qm³/s | Date | Episode cyclonique |
|---|---|---|---|
| 1974-75 | 121 | /01/75 | PHE |
| | 32 | 13/03/76 | Cyclone Inès |
| 1975-76 | 127 | 22/01/76 | Cyclone Danae |

La crue décennale a été estimée à 160 m³/s (1680 l/s/km²).

■ 2.1.5.1.5.3 L'Antsamaka à Antsamaka (A = 565 km²)

Installée en octobre 1973 dans les derniers rapides en aval de la cuvette et des seuils d'AMBATORIHA, cette station a été bien étalonnée en mars 1975 (cyclone Inès).

L'extrapolation de type logarithmique, employée pour l'estimation des débits maximums connus des périodes 1944-50 et 1973-76, demeure relativement faible.

| Année | Qm³/s | Date | Antsamaka | Ambathoriha |
|---|---|---|---|---|
| 1949-50 | (153) | 09/02/50 | | (4.88) |
| 1944-45 | (127) | 17/02/45 | | (4.75) |
| 1975-76 | 177 | 23/01/76 | 2,92 | |
| 1974-75 | 78 | 17/03/75 | 2,41 | |

## 2.1.5.2. Bassins de l'Ankofia et du Tsinjomorona

### *2.1.5.2.1. L'Ankofia*

L'ANKOFIA prend sa source au Nord de BEFANDRIANA et rejoint l'estuaire de la LOZA entre la MAEVARANO et le TSINJOMORONA. Quelques mesures de débit de basses eaux ont été effectuées, entre 1980 et 1983, au niveau du radier de la route ANTSOMILY-BEALANANA (14°51'S - 48°15'E) pour un bassin de 1 650 km².

Les débits d'étiage sont faibles et voisins en année moyenne de 0.7 à 0.8 l/s/km².

### *2.1.5.2.2. Le Tsinjomorona*

Le TSINJOMORONA, située au Sud de l'ANKOFIA, draine la façade Ouest du plateau de l'ANDRONA, entre 100 et 400 m d'altitude. A la sortie du plateau, le TSINJOMORONA divague dans une vaste plaine alluviale avant de rejoindre l'estuaire de la LOZA.

Des observations et mesures ont été effectuées en 1968-69 à ANKOBAKOBAKA (bassin : 866 km²) et de 1980 à 1983 à MAROVATO (14°59'S - 48°04'E, bassin : 1 460 km²).

tableau 4.33.

Tsinjomorona à Marovato
Débits moyens mensuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1968-69 | .98 | 46.5 | 27.9 | 39.6 | 19.9 | 19.8 | 4.90 | 1.67 | (.73) | .16 | .01 | .01 | (13.8) |
| 1980-81 | (.22) | 24.3 | 10.2 | 15.1 | 72.3 | 18.6 | 2.43 | .379 | .106 | .016 | 0 | 0 | 11.9 |
| 1981-82 | .563 | 2.14 | 34.8 | 77.3 | 44.6 | 15.1 | 2.37 | .479 | .195 | .017 | 0 | .112 | 14.5 |
| 1982-83 | 14.3 | 7.47 | 38.8 | 38.5 | 27.0 | 5.40 | .689 | .083 | .009 | 0 | 0 | .332 | (10.9) |
| 1983-84 | 1.17 | | | | | | | | | | | | |

La lame moyenne 1980-83 de la MAEVARANO représente 83 % de la lame moyenne interannuelle. En utilisant, avec prudence, ce coefficient d'hydraulicité, on peut évaluer la lame moyenne interannuelle du TSINJOMORONA à MAROVATO à 325 mm (Q = 15 m³/s). Pour une pluviométrie moyenne évaluée sommairement à 1 500 mm, le déficit d'écoulement doit être voisin de 1 150 à 1 200 mm (Ke = 22 %).

Les débits maximaux de crue observés sont les suivants :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1981 | > 740 | m³/s | soit | > 507 | l/s/km² |
| 1982 | 675 | m³/s | soit | 462 | l/s/km² |
| 1983 | 483 | m³/s | soit | 330 | l/s/km² |

A ANKOBAKOBAKA, l'évaluation des débits correspondants aux plus hautes eaux connues après enquête (1924-25 et 1958-59) et de 1968 à 1977 a été effectuée à partir d'une assez forte extrapolation (de 2.58 à 8.80 m) de la courbe de tarage.

| Année | H | Qm³/s | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1924-25 | | (1920) | |
| 1958-59 | 8.80 | 1920 | PHE |
| 1976-77 | 6.32 | 820 | PHE |
| 1972-73 | 5.80 | 670 | PHE |

En tenant compte de l'information historique, le débit de crue décennal a été évalué à 620 m³/s (700 l/s/km²).

Le tarissement est complet à partir de juillet avec des débits nuls en fin septembre, début octobre.

Avec un écoulement annuel assez faible, des débits maximaux de crue élevés correspondant probablement à des zones du bassin assez imperméables et une annulation du débit indiquant l'absence d'aquifères importants sur le bassin, le régime de la TSINJOMORONA, très différent de ceux des tributaires du TSARATANANA, se rattache aux régimes du Nord-Ouest de Madagascar, à pluviométrie modérée et saison sèche très accusée, mais sans soutien des débits de basses eaux par les réserves souterraines.

## 2.2. Le versant oriental

### 2.2.1. Bassin de la Fanambana

Le bassin s'étend sur le flanc nord-est du TSARATANANA (socle cristallin composé de granites et migmatites). D'une altitude moyenne de 550 mètres, le bassin présente un relief vigoureux.

La pluviométrie annuelle est importante : plus de 3 000 mm sur le bassin supérieur et près de 2 000 mm à l'éxutoire du bassin.

La station de MORAFENO, située au niveau du pont de la RN5A reliant VOHEMAR à SAMBAVA (13°32'S - 49°59'E), contrôle un bassin versant de 1830 km².

Neuf jaugeages entre 3,4 et 38 m³/s ont permis d'établir trois courbes d'étalonnage (tenant compte des décalages d'échelle et du recreusement du lit) pour les moyennes eaux et de déterminer très approximativement les débits journaliers de hautes eaux (à partir d'une seule lecture d'échelle, ce qui est très sommaire en raison

des crues très rapides) et à partir d'une extrapolation (vitesses moyennes et section mouillée) jusqu'à 3.30 m (PHE 82-83, cyclone JUSTINE). Au-delà, l'extrapolation a été poursuivi linéairement pour obtenir l'évaluation (minimale) du débit le plus important de la période 1972-83.

tableau 4.34.

Débits moyens mensuels ($m^3/s$)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1980-81 | 5.01 | 19.4 | 7.47 | 50.5 | 10.5 | 46.5 | 4.62 | 4.55 | 4.63 | 4.95 | 3.16 | |
| 1981-82 | 4.71 | 9.44 | | 70.5 | | | | 33.8 | 26.5 | 26.2 | 13.7 | 13.5 |
| 1982-83 | 16.1 | 45.4 | | | | | | 20.8 | 15.8 | 13.2 | 10.3 | 13.1 |
| 1983-84 | 10.5 | 58.5 | | | | | | . | | | | |

Les données sont trop fragmentaires et imprécises (pour les hautes eaux) pour qu'il soit possible d'estimer une valeur moyenne des apports annuels. On notera les débits soutenus de saison "sèche" correspondant à une pluviométrie en juin, juillet et août, nettement plus accentuée que sur le versant occidental.

Pour les débits maximaux de crue évalués à partir des délaissées, du profil de la section et des mesures de pente, les valeurs suivantes peuvent être avancées :

| Année | Hm | Qm³/s | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1972-73 | 6.43 | (2580) | PHE |
| 1980-81 | 1.54 | 145 | 3rel |
| 1981-82 | 5.70 | (2170) | PHE |
| 1982-83 | 3.30 | (815) | 3rel |

Des débits de 1 000 à 2000 l/s/km2 doivent être très probablement observés sur ce bassin pour la récurrence décennale.

Basses eaux :

09-11-80 QJmin = 3.54 $m^3/s$ (1.9 $l/s/km^2$) DCE = 3.76 $m^3/s$
30-09-8 QJmin = 1.20 $m^3/s$ (.66 $l/s/km^2$) DCE = 1.47 $m^3/s$
07-11-82 QJmin = 6.80$m^3/s$ (3.7 $l/s/km^2$) DCE = 10.2 $m^3/s$
09-11-83 QJmin = 3.70$m^3/s$ (2.0 $l/s/km^2$) DCE = 5.57 $m^3/s$

Avec prudence, on attribuera à ce bassin des débits moyens QJmin compris entre 2 et 4 $l/s/km^2$.

## 2.2.2. Bassin de la Lokoho

Le bassin de la LOKOHO, situé immédiatement au Sud de celui de la BEMARIVO, draine la façade orientale du prolongement sud-est du massif de TSARATANANA. Il est situé sur le socle éruptif (granites et migmatites). D'une altitude maximale voisine de 2 200 mètres, il présente des pentes relativement fortes (10 à

20 m/km) dans sa partie supérieure, mais au niveau de la cuvette d'ANDAPA, qui représente plus de 20 % de la superficie du bassin, les pentes deviennent faibles (inférieures à 1 m/km), avant de s'accentuer à nouveau vers l'Océan indien.

### 2.2.2.1. La Lokoho à Andohariana

La station située à proximité d'ANDAPA (14°37'S - 49°40'30"E), contrôle un bassin versant de 1 040 km². Elle est située immédiatement à l'amont des prises effectuées pour l'irrigation des périmètres agricoles (7 500 ha en saison des pluies, 5 000 ha en saison sèche) qui dérivent en moyenne 7.5 m³/s.

tableau 4.35.

Débits moyens mensuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1965-66 | | | | | | | 28.4 | 26.5 | 32.0 | 29.8 | 21.5 | 17.0 | |
| 1966-67 | 23.3 | 53.0 | 89.0 | 120 | 94.2 | 54.4 | 43.8 | 33.3 | 30.6 | 42.8 | 35.5 | 26.3 | 53.5 |
| 1967-68 | 53.4 | 103 | 171 | 120 | 113 | 38.7 | 29.4 | 22.5 | 24.4 | | | | |
| 1968-69 | 15.7 | 64.6 | 114 | 151 | 39.6 | 40.6 | 31.4 | 30.9 | 30.8 | 42.6 | | | |
| 1969-70 | | | | | | | 44.1 | 30.9 | 34.2 | 33.2 | 33.1 | 29.9 | |
| 1970-71 | 24.8 | 36.2 | 162. | 89.5 | 99.3 | 64.2 | 42.2 | 35.2 | 39.4 | 54.8 | 20.5 | 21.5 | 57.4 |
| 1971-72 | 39.4 | 47.8 | | 73.6 | 81.7 | 57.8 | 43.7 | 24.5 | 25.4 | 24.9 | 23.3 | 25.0 | |
| 1972-73 | | | 109 | 166 | | | | | | | | | |
| 1980-81 | | | | | | | 26.0 | 19.8 | 15.7 | 17.9 | 15.0 | 14.2 | |
| Moyenne | 31.3 | 60.8 | 129 | 120 | 85.6 | 51.1 | 36.1 | 28.0 | 29.1 | 35.1 | 24.8 | 22.3 | 54.2 |

Nota : débits naturels, y compris le débit dérivé·

La lame écoulée interannuelle peut être estimée à 1 650 mm (Q = 55 m³/s), la moyenne des années observées correspondant à l'hydraulicité moyenne du nord de la côte est.

A l'occasion d'une étude de sites de microcentrales (Lamagat, 1982), les débits maximaux de crue avaient été estimés à :

760 m³/s (730 l/s/km²) pour la récurrence annuelle
1 965 m³/s (1 890 l/s/km² pour la récurrence décennale

Les débits de basses eaux, calculés sur la décade la plus faible de l'année (et voisins du DCE), sont les suivants :

| | | |
|---|---|---|
| fin octobre 66 | 16.1 m³/s | (15.5 l/s/km²) |
| début novembre 67 | 24.8 m³/s | (23.8 l/s/km²) |
| fin octobre 70 | 28.7 m³/s | (27.6 l/s/km²) |
| mi octobre 71 | 15.0 m³/s | (14.4 l/s/km²) |
| début octobre 72 | 18.0 m³/s | (17.3 l/s/km²) |
| début octobre 81 | 13.3 m³/s | (12.8 l/s/km²) |

Le DCE moyen doit être voisin de 16 m3/s (15.3 l/s/km²). Le débit maximal de récurrence quinquennale sèche a été estimé à 12.5 m³/s.

Par ses caractéristiques générales, le régime de la LOKOHO se rapproche des cours d'eau de la côte Est de Madagascar que nous étudierons ci-après.

### 2.2.2.2. L'Ankaibe à Betsakotsako

L'ANKAIBE est la branche principale de la LOKOHO. Ce bassin, situé à une altitude moyenne de 900 m, reçoit une pluviométrie importante de l'ordre de 2000 à 2500 mm.

Directement en amont du seuil d'ANDOHARIANA (contrôle de la cuvette d'ANDAPA) et de la confluence avec l'ANDRAMONTA, la station de BETSAKOTSAKO, suivie entre 1966 et 1968, a été réinstallée en octobre 1980.

Coordonnées de la station : 14° 39'S - 49°38'E
Altitude de la station : 465 m
Superficie du bassin versant : 480 km²

tableau 4.36.

Déits moyens mensuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1980-81 | 5.40 | 9.90 | 20.9 | 16.7 | 14.8 | 10.2 | 10.2 | 7.57 | 5.15 | 6.83 | 5.63 | 5.28 | 9.85 |
| 1981-82 | 6.44 | | | 29.0 | | 14.7 | 12.5 | 10.8 | 11.3 | 10.8 | 9.54 | 8.13 | |
| 1982-83 | 10.1 | 14.6 | 26.8 | 37.6 | 28.2 | 17.7 | 13.7 | 12.1 | 9.90 | 9.38 | 8.29 | 7.17 | 16.3 |
| 1983-84 | 11.1 | 27.4 | | | | | | | | | | | |
| Moyenne | 8.26 | 17.3 | 23.9 | 27.8 | 21.5 | 14.2 | 12.1 | 10.2 | 8.78 | 9.00 | 7.82 | 7.13 | |

La lame moyenne écoulée est comprise entre 900 et 950 mm.

L'extrapolation importante (de 51 à 515 m³/s) menée par AGRER en 1968 à partir des vitesses moyennes et de sections mouillées ?) permet une estimation des débits des plus fortes crues connues de la période 1960-83 (cyclones Justine le 19/03/82, Georgette en 1968 et Hortense (?) en 1973).

| Année | Hcm | Qm³/s | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1967-68 | 515 | 5,30 | PHE 470,16 NGM |
| 1972-73 | 252 | 4,30 | PHE |
| 1980-81 | 57 | 1,95 | |
| 1981-82 | 560 | 5,70 | PHE |
| 1982-83 | 94 | 2,50 | PHE |

*Hauteurs dans le système de la nouvelle échelle

Le débit de crue décennal a été évalué à 275 m³/s (573 l/s/km²).

tableau 4.37.

Débits de basses eaux

| | QJmin (m³/s) | Débit spécifique (l/s/km²) | DCE (m³/s) |
|---|---|---|---|
| 01-01-81 | 4.29 | 8.93 | 4.67 |
| 15-10-81 | 4.48 | 9.33 | 4.65 |
| 10-06-82 | 4.61 | 9.60 | 5.87 |
| 18-11-83 | 6.10 | 12.7 | 14.3 |

Ces débits spécifiques sont élevés. Outre l'intervention des réserves drainables, il faut y voir l'influence des précipitations intermittentes de saison sèche (tarissement perturbé).

# Le versant oriental

Chapitre 5

L'ensemble des bassins versants de la côte orientale de Madagascar représente une superficie globale de 150 000 km² (25 % de l'île). D'ANTALAHA à TOLANARO, la façade littorale s'allonge sur 1200 km et présente une succession de bassins d'organisation généralement simple, orientés ouest-est. La distance moyenne de la ligne de crêtes du littoral est d'environ une centaine de kilomètres (distance maximale : 190 km pour le bassin de l'ONIVE drainant la façade orientale de l'ANKARATRA - distance minimale : 50 km au nord de TOLANARO).

Pour la plupart des cours d'eau, la longueur développée de la branche principale n'excède pas 1,5 à 2 fois la longueur moyenne du bassin. Ils se présentent sous l'aspect de biefs tranquilles de faible extension, coupés de rapides et chutes parfois importantes au niveau des falaises, ce qui leur confère un fort potentiel hydroélectrique. Au niveau de l'étroite plaine littorale (20 à 30 km de largeur), les lits divaguent en méandres et contribuent à alimenter le chapelet des lagunes séparés de l'océan par un cordon dunaire et constituant le canal des "Pangalanes".

Cependant, trois cours d'eau importants échappent à ce schéma en raison de la direction générale nord-sud des accidents tectoniques. Il s'agit du MANINGORY, du MANGORO et de la MANANARA du sud dont les formateurs suivent des vallées relativement étroites d'extension nord-sud avant de se réunir et de franchir les reliefs par des seuils bien marqués pour se diriger enfin vers l'est. La longueur développée de ces cours d'eau représente entre deux et huit fois la distance de la ligne de crête à l'océan.

La géologie des bassins est dominée par la présence des formations du socle cristallin appartenant aux systèmes d'ANTONGIL (granites et migmatites du MANANARA), de l'infragraphite et du graphite (micaschistes, gneiss et migmatites granitoïdes) et du VOHIBORY (roches éruptives basiques). Ces formations, d'origine sédimentaire, métamorphisées et fortement plissées, sont recoupées par des roches éruptives néogènes et quaternaires (ANKARATRA). Elle sont profondément altérées en sols épais ferrallitiques typiques jaunes sur rouge et rouges dans le sud.

Les formations sédimentaires plus récentes sont d'extension limitée aux étroites plaines côtières : marno-calcaires du crétacé marin et du pliocène avec présence de sols peu évolués sur la frange littorale et de quelques secteurs de sols hydromorphes, coulées crétacées dans le sud avec des sols ferrallitiques indurés sur formations volcaniques.

Les reliefs sont le domaine de la forêt dense ombrophile de l'est, parfois bien sauvegardée dans les réserves forestières (haut bassin de l'ONIVE, bassin de la RIANILA) mais très souvent dégradée sous l'action anthropique. Après brûlis, elle a évolué en forêt secondaire claire ("savoka") à bambous, ravenala et plantes ligneuses, puis en savanes et prairies côtières à stenotaphrum et axonopus avec de nombreuses zones cultivées. Dans certains secteurs littoraux (TOAMASINA par exemple) on note la présence d'une forêt côtière à cycas et pandanus.

La pluviométrie abondante se distribue selon des isohyètes parallèles au littoral : très forte (2 500 à plus de 3 000 mm) sur le littoral, elle tend à s'atténuer progressivement vers l'ouest sur quelques dizaines de

kilomètres puis se redresse très sensiblement (plus de 3 000 mm) au contact des falaises avant de subir un gradient décroissant (jusqu'à moins de 1 500 mm) sur la bordure orientale des hauts plateaux.

Pour la plupart des cours d'eau, la tendance générale d'amont en aval est donc à des précipitations croissantes dont le gradient est d'autant plus marqué que l'extension des bassins supérieurs sur les hauts plateaux est importante.

Ce phénomène est encore plus net pour les cours d'eau dont les formateurs drainent des vallées aux dépressions abritées des vents dominants à pluviométrie relativement faible (MANINGORY, MANGORO et MANANARA du sud).

Cette pluviométrie abondante est assez bien répartie dans l'année ; c'est dans ce secteur de la côte est que le contraste entre saison des pluies et saison "sèche" est le moins marqué puisque, presque partout, les précipitations de mai à octobre restent globalement supérieures à 100 mm, ce qui permet la satisfaction de l'ETP, voire certaines années abondantes la recharge partielle des nappes et des crues de saison "sèche".

Les graphes 5.1. et 5.2. représentent schématiquement la disposition des principaux cours d'eau et l'emplacement des stations de référence.

# 1. BASSIN DU MANINGORY

Jusqu'au seuil d'ANDROMBA, le bassin du MANINGORY occupe la cuvette du lac ALAOTRA, délimitée par les parallèles 17 et 18°S et les méridiens 48 et 48°30E.

La cuvette est une zone dépressionnaire créée par un effondrement tectonique daté du tertiaire et peu à peu comblée par des sédiments détritiques à prédominance sableuse.

Les bordures de la cuvette sont constituées par les rebords des plateaux encaissants représentés par les gneiss et migmatites du socle ancien.

Le lac ALAOTRA, situé au nord-est de la cuvette à l'altitude 750, a une superficie moyenne voisine de 250 km². Il est entouré d'une zone marécageuse à tourbe flottante et papyrus de près d'un millier de km².

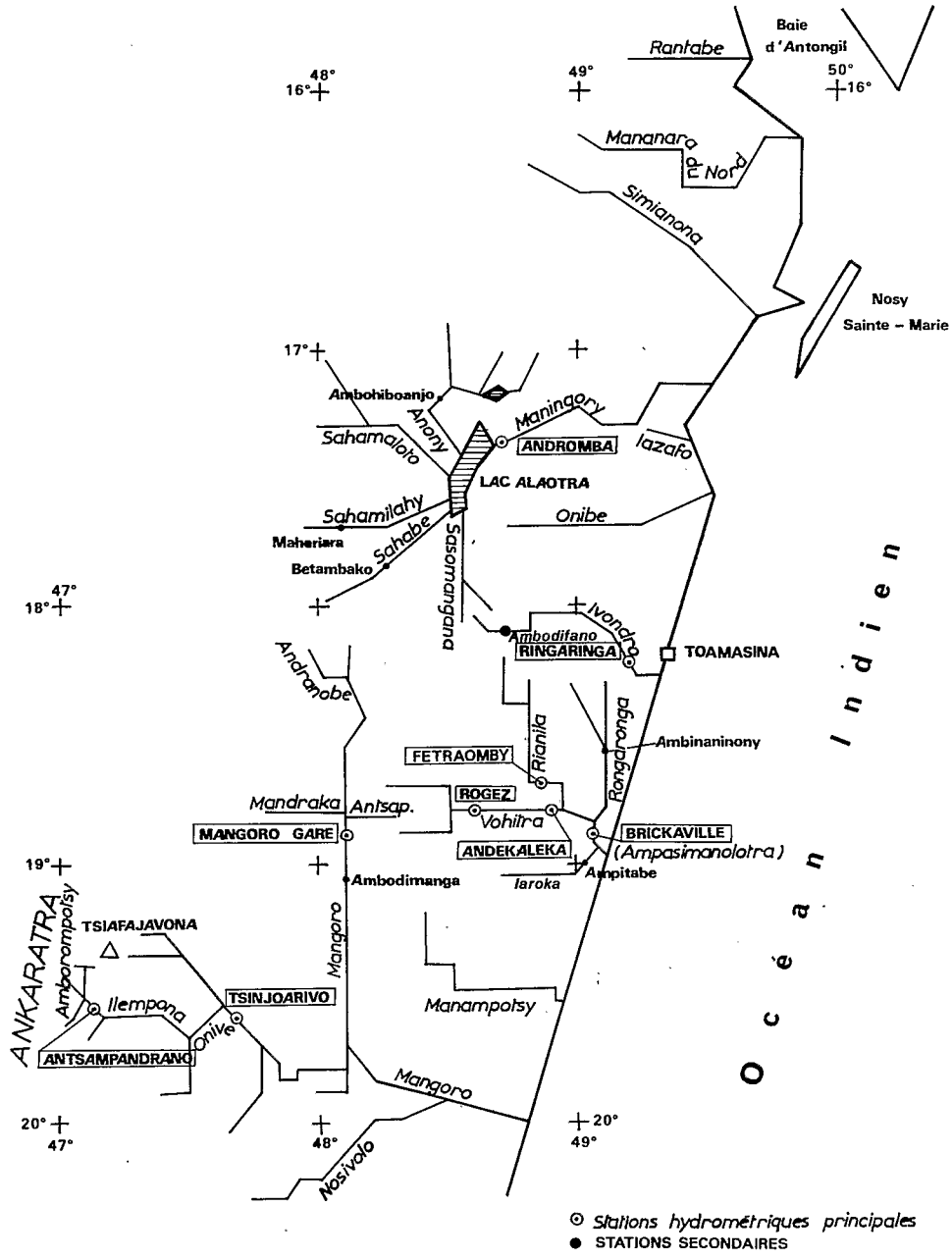
La quasi-totalité des terres entourant le marécage est occupée par des périmètres rizicoles (600 km² environ) dont la majeure partie est aménagée en casiers irrigués et drainés.

La végétation naturelle est représentée par la prairie à graminées et dans la partie sud-est du bassin par une forêt ombrophile à sous-bois herbacé.

Le lac est alimenté par plus de trente rivières en dispositif rayonnant dont les plus importantes sont l'ANONY, au nord (bassin versant d'environ 1 600 km²) et la SAHABE, au sud (BV d'environ 1 200 km²). Les autres affluents (SAHAMALOTO, ILAKANA, SASOMANGANA, etc.) ont des bassins plus réduits ne dépassant pas les 300 km².

figure 5.1.

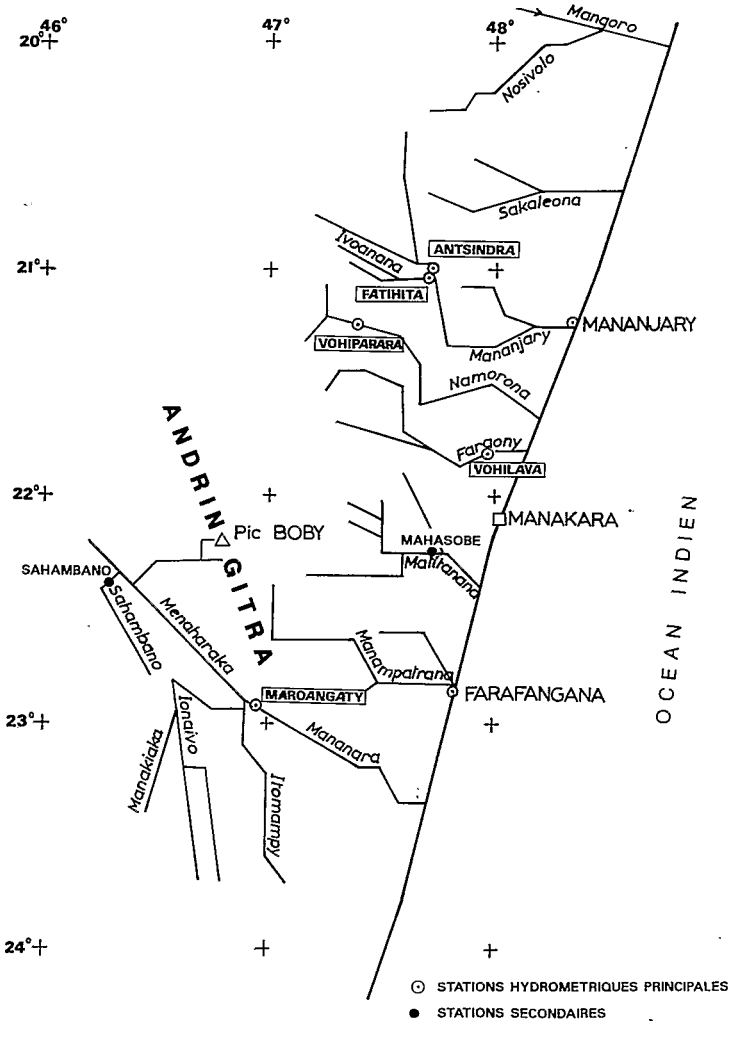
Côte est
(entre 16° et 20°S)




Les lignes de crêtes reçoivent des précipitations légèrement supérieures à 1 500 mm, mais la majeure partie de la cuvette reçoit moins de 1 250 mm par an et même moins de 1 000 mm sur certains secteurs : ANONY, bordure est du lac, etc.

figure 5.2.

Côte est
(entre 20° et 24°S)




## 1.1. Le Maningory à Andromba

La station (17°24'10"S - 48°38'20"E) située au niveau du seuil naturel servant d'exutoire au lac ALAOTRA, contrôle les débits s'écoulant du lac vers la côte est. Le bassin versant a une superficie de 6 855 km².

Les observations sont effectuées depuis janvier 1976, sans lacunes très importantes.

Soixante dix-huit mesures de débit, effectuées de 1976 à 1987, entre 66 m³/s et 315 m³/s ont permis d'établir trois courbes d'étalonnage (légers détarages entraînés par la construction du pont d'ANDROMBA et les crues cycloniques d'avril 1984) jusqu'à près de 400 m³/s. L'étalonnage est de bonne qualité.

## 1.1.1. Débits moyens mensuels

tableau 5.1.

Maningory à Andromba
Débits moyens mensuels
et annuels observés ($m^3/s$)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1975-76 | - | - | - | 124 | 104 | 82.2 | 81.9 | 76.0 | 63.0 | 45.2 | 31.2 | 13.1 | - |
| 1976-77 | 8.88 | 18.4 | 67.5 | 134 | 212 | 180 | 121 | 79.7 | 50.9 | 35.6 | 26.6 | 17.6 | 79.4 |
| 1977-78 | 13.2 | 11.8 | 9.46 | 31.6 | 50.2 | 48.9 | 38.2 | 27.6 | 21.8 | 17.2 | 11.5 | 6.79 | 24.0 |
| 1978-79 | 4.04 | 7.89 | 20.6 | 77.3 | 107 | 72.4 | 47.5 | 30.8 | 21.0 | 14.7 | 9.24 | 5.47 | 34.8 |
| 1979-80 | - | - | 39.4 | 82.8 | 84.2 | 107 | 78.3 | 52.3 | 35.1 | 25.1 | 16.9 | 8.84 | - |
| 1980-81 | - | - | - | - | - | 36.0 | 31.4 | 26.2 | 20.7 | 15.6 | 11.4 | 7.90 | - |
| 1981-82 | 5.14 | 26.8 | 74.6 | 258 | 285 | 242 | 168 | 109. | 74.9 | 54.3 | 39.2 | 29.7 | 114 |
| 1982-83 | 23.8 | 24.4 | 36.7 | 85.9 | 100 | 86.1 | 66.4 | 49.8 | 39.8 | 31.2 | 23.0 | 14.8 | 48.5 |
| 1983-84 | 13.8 | 38.6 | 188 | 278 | 295 | 297 | 262 | 176 | 120 | 82.3 | 56.6 | 35.2 | 154 |
| 1984-85 | 32.8 | 46.6 | 48.7 | 102 | 188 | 165 | 117 | 77.3 | 55.0 | 42.1 | 31.8 | 19.7 | 77.2 |
| 1985-86 | 9.90 | 28.9 | 111 | 108 | 194 | 200 | 127 | 80.2 | 52.1 | 35.9 | 23.3 | 16.8 | 82.3 |
| 1986-87 | 17.3 | 23.4 | 85.7 | 159 | 181 | 157 | 111 | 69.7 | 47.5 | 33.8 | 23.9 | 13.8 | 76.9 |
| 1987-88 | 6.94 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 13.6 | 25.2 | 68.2 | 131 | 164 | 140 | 104 | 71.2 | 50.2 | 36.1 | 25.4 | 15.8 | 76.7 |

On notera que les hauteurs du MANINGORY observées à la station présentent des variations quotidiennes d'une amplitude de 10 à 20 cm qui peuvent être attribuées à un phénomène de seiches sur le lac ALATROA.

## 1.1.2. Apports annuels

Pour les besoins de projets d'aménagements sur le bassin du lac ALAOTRA, un modèle mathématique conceptuel maillé a été élaboré (H. DOSSEUR, D. IBIZA, 1982). Ce modèle hydroclimatologique a permis de reconstituer de façon tout à fait satisfaisante les apports mensuels et annuels sur la période 1945-76. En y ajoutant le résultat des observations 1976-1987, on dispose d'un échantillon de quarante et une valeurs annuelles dont l'analyse statistique fournit les quantiles du tableau 5.2.

## 1.1.3. Crues

Plusieurs séries de jaugeages, réalisées entre 1975 et 1977, et les conditions hydrauliques (faibles pentes en amont du goulet d'AMBATOMAFANA et des rapides de la MENASAKA) ont permis le recalage des différentes échelles et l'adoption d'une extrapolation de type $Q = CS\ (2gh)^{.5}$ pour l'évaluation des débits maximums de crue.

Si un détarage de basses et de moyennes eaux est à considérer à partir d'octobre 1982 avec l'édification du pont, les jaugeages plus récents ont montré que l'étalonnage de hautes eaux restait lié au contrôle plus aval.

Plusieurs enquêtes et données d'archives ont permis l'estimation des débits maximums des crues les plus importantes de la période 1899-1984, mais la constitution d'un échantillon de crues de 1949 à 1984 n'a été rendue possible qu'après reprise de certaines données calculées (modèle ALAOTRA).

tableau 5.2.

Maningory à Andromba
Lames, modules et débits spécifiques
de différentes périodes de retour (ans)

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Lames (mm) | 103 | 139 | 175 | 222 | 328 | 459 | 540 | 613 | 705 |
| Modules (m³/) | 22.2 | 30.2 | 38.0 | 48..2 | 71.2 | 99.7 | 117 | 133 | 153 |
| q.. spécifique | 3.2 | 4.4 | 5.5 | 7.0 | 10.4 | 14.5 | 17.1 | 19.4 | 22.3 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret 9.64) échelle : 554 mm, position : - 226 mm, forme : .253). Centennales sèche et humide : 82 mm (Q = 17,8 m³/s) et 771 mm (Q = 167 m³/s).

Tableau 5.3.

Maningory à Andromba
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | H NGM | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1904-05 | (590) | | ANORORO |
| 1913-14 | (525) | 753,92 | ANORORO |
| 1916-17 | (378) | | Aval ANDROMBA |
| 1926-27 | (364) | 753,40 | AMBOHIJAHANARY |
| 1929-30 | (378) | | ANDROMBA |
| 1930-31 | (378) | | ANDROMBA |
| 1936-37 | (525) | | AMBOHITSILAOZANA |
| 1940-41 | (653) | 754,30 | ANORORO |
| 1948-49 | 244 | 752,92 | AMBATOSORATRA |
| 1949-50 | 101 | 751,75 | AMBATOSORATRA |
| 1950-51 | 163 | 752,33 | AMBATOSORATRA |
| 1951-52 | 265 | 753,02 | |
| 1952-53 | 161 | 752,32 | AMBATOSORATRA |
| 1953-54 | 79 | 751,46 | AMBATOSORATRA |
| 1954-55 | 207 | 752,66 | AMBATOSORATRA |
| 1955-56 | 298 | 753,16 | AMBATOSORATRA |
| 1956-57 | 218 | 752,74 | AMBATOSORATRA |
| 1957-58 | (203) | | |
| 1958-59 | 966 | 755,14 | ANDROMBA |
| 1959-60 | (148) | | |
| 1960-61 | (86) | | |
| 1961-62 | 158 | 752,30 | AMBATOSORATRA |
| 1962-63 | 173 | 752,41 | AMBATOSORATRA |
| 1963-64 | 184 | 752,49 | AMBATOSORATRA |

suite

| Année | Qm³/s | H NGM | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1964-65 | 250 | 752,95 | AMBATOSORATRA |
| 1965-66 | 119 | 751,98 | AMBATOSORATRA |
| 1966-67 | (201) | | |
| 1967-68 | 125 | 752,04 | |
| 1968-69 | (132) | | |
| 1969-70 | (213) | | |
| 1970-71 | (155) | | |
| 1971-72 | 314 | 753,22 | ANDROMBA |
| 1972-73 | 525 | 753,92 | ANDROMBA |
| 1973-74 | (115) | | |
| 1974-75 | 236 | 752,87 | ANDROMBA |
| 1975-76 | 126 | 752,05 | ANDROMBA |
| 1976-77 | 222 | 752,77 | ANDROMBA |
| 1977-78 | 64 | 751,26 | AMBATOSORATRA |
| 1978-79 | 110 | 751,87 | ANDROMBA |
| 1979-80 | 108 | 751,84 | ANDROMBA |
| 1980-81 | 33 | 750,63 | ANDROMBA |
| 1981-82 | 295 | 753,15 | ANDROMBA |
| 1982-83 | 109 | 751,60 | ANDROMBA |
| 1983-84 | 394 | 753,51 | ANDROMBA |
| 1984-85 | 196 | | ANDROMBA |
| 1985-86 | 251 | | ANDROMBA |
| 1986-87 | 189 | | ANDROMBA |

L'ajustement d'une loi de Frechet à l'échantillon des débits maximaux (réévalué pour tenir compte de l'information historique) correspond aux quantiles suivants :

Tableau 5.3 bis

Maningory à Andromba
Débits maximaux

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 171 | 277 | 363 | 610 | 740 |
| Réévaluation en tenant compte de l'information historique | | | | 705 | (860) |
| q l/s/km² | 25 | 40 | 53 | 103 | (125) |

L'effet régularisateur du lac se traduit par l'observation à l'exutoire du lac d'un seul hydrogramme de crue annuelle dont le maximum Qmax est lié au débit moyen annuel Q par la relation analytique suivante (établie en 1982 par H. DOSSEUR à partir des résultats du modèle).

Q MAX = (.0108 Q + 1.76) *Q

Cette relation montre que la forme de la crue annuelle du MANINGORY est d'autant plus "pointue" que le module est élevé.

## 1.1.4. Basses eaux

Aux trente valeurs reconstituées des débits d'étiages s'ajoutent onze valeurs observées de 1976 à 1987 :

| Année | Date | QJ min ($m^3/s$) |
|---|---|---|
| 1975-76 | 29-11-76 | 7.21 |
| 1976-77 | 23-01-78 | 5.70 |
| 1977-78 | 09-12-78 | 2.83 |
| 1978-79 | 31-10-79 | 4.77 |
| 1979-80 | 29-11-80 | ≤ 1.38 |
| 1980-81 | 25-11-81 | 2.25 |
| 1981-82 | 25.11-82 | 22.1 |
| 1982-83 | 06-11-83 | 8.36 |
| 1983-84 | 11-10-84 | 24.4 |
| 1984-85 | 25-11-85 | 6.02 |
| 1985-86 | 30-11-86 | 13.1 |
| 1986-87 | ≥ 31-10-87 | ≤ 8.99 |

La relation entre DCE et QJmin. s'exprime ainsi :

DCE = .98 QJmin. + 1.14 ($R^2$ = .98)

La distribution des débits d'étiage est la suivante :

Tableau 5.4.

Maningory à Andromba
DCE et QJmin. (en $m^3/s$)

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| DCE | 2.83 | 5.05 | 7.12 | 9.78 | 15.4 | 21.6 | 25.2 | 28.4 | 32.1 |
| QJmin. ($m^3/s$) | 1.47 | 3.99 | 5.96 | 8.62 | 14.2 | 18.4 | 24.0 | 27.2 | 30.9 |
| q ($l/s/km^2$) | .21 | .58 | .87 | 1.26 | 2.07 | 2.7 | 3.5 | 4.0 | 4.5 |

Loi log-normale [test Brunet-Moret : 3.57, échelle : 15.9, position : - 34.2, forme : .142].

Centennales sèche et humide : DCE = 1.43 $m^3/s$ et 34.7 $m^3/s$
QJmin. = (.27) $m^3/s$ et 33.5 $m^3/s$

## 1.1.5. Bilan hydrologique

Pour une pluviométrie moyenne interannuelle sur le bassin évalué à 1 200 mm et une lame écoulée de 330 mm environ, le déficit moyen d'écoulement est de 870 mm (coefficient d'écoulement Ke = 28 %).

Il est possible d'établir schématiquement les bilans mensuels hydrologiques et d'approcher les mécanismes de l'écoulement sur le bassin du MANINGORY (tableau 5.5. et graphe 5.3.).

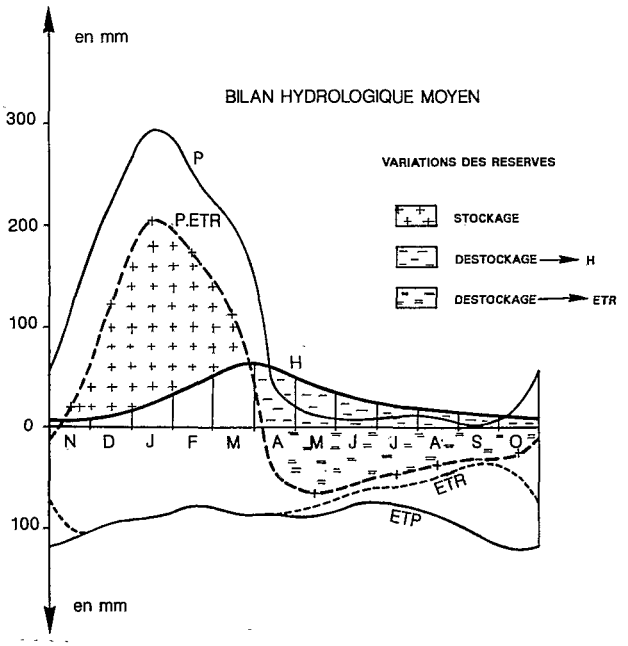
Tableau 5.5.

Maningory à Andromba
Bilan hydrologique moyen (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 121 | 218 | 294 | 253 | 200 | 41 | 13 | 10 | 13 | 11 | 3 | 23 | 1200 |
| ETP | 112 | 95 | 90 | 79 | 87 | 86 | 87 | 75 | 76 | 87 | 105 | 121 | 1100 |
| ETR | 100 | 95 | 90 | 79 | 87 | 85 | 79 | 65 | 59 | 48 | 35 | 48 | 870 |
| P-ETR | 21 | 123 | 204 | 174 | 183 | - 44 | - 66 | - 55 | - 46 | - 37 | - 32 | - 25 | 330 |
| H | 7 | 11 | 23 | 40 | 61 | 57 | 41 | 28 | 22 | 17 | 13 | 10 | 330 |
| ΔR+ | 14 | 112 | 181 | 134 | 52 | | | | | | | | +493 |
| ΔR- | | | | | | 101 | 107 | 83 | 68 | 54 | 45 | 35 | - 493 |
| R | 14 | 126 | 307 | 441 | 493 | 392 | 285 | 202 | 134 | 80 | 35 | 0 | |

figure 5.3.

Maningory à Andromba




De novembre à mars, les précipitations cumulées (1 086 mm) représentent 90 % du total annuel ; sur la même période, la lame cumulée (142 mm) ne représente que 43 % du total écoulé annuel. L'évapotranspiration potentielle est presque totalement satisfaite et le reliquat P-ETR-H est stocké essentiellement dans le lac et les marécages en extension notable, dans les rizières, ainsi que dans les nappes ; en majeure partie dans la nappe phréatique de type topographique à battement annuel et pour une assez faible part dans les aquifères d'altérites peu développés en raison de la structure géomorphologique du bassin.

Les réserves ainsi accumulées sont déstockées (par vidange des nappes d'eau libre et de la nappe phréatique) pour satisfaire l'écoulement de saison sèche (avril-octobre) qui représente 57 % du total annuel. On notera le décalage entre le maximum annuel de l'écoulement (mars-avril) et le maximum mensuel pluviométrique (janvier). Les réserves non écoulées (305 mm) stockées dans les marécages, les rizières et la réserve utile du sol pour le reste du bassin soutiennent (avec le concours des précipitations de saison sèche : 114 mm) l'évapotranspiration réelle qui, sur l'année, représente près de 80 % de l'ETP.

## 1.2. Affluents du lac Alaotra

Dans le cadre de l'étude du lac ALAOTRA, la majeure partie des rivières alimentant le lac ont été suivies plus ou moins régulièrement. La plupart des stations sont d'un étalonnage délicat en raison des très nombreux ouvrages de dérivation mis en place.

Nous donnerons ci-dessous, à titre d'exemple, les meilleurs résultats obtenus au cours des campagnes effectuées de 1975 à 1987 (L. FERRY, 1989).

### 1.2.1. La Sahabe

Tableau 5.6.

Sahabe à Betambako
17°50'28"S - 48°11'12"E - Sup. B. V. : 968 km²
Débits moyens mensuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1975-76 | - | - | - | 26.3 | 23.6 | 25.4 | 14.7 | 10.6 | 8.64 | 6.69 | - | - | - |
| 1976-77 | 7.75 | 20.1 | 25.6 | 30.3 | 35.3 | 20.2 | 12.9 | 10.7 | 8.36 | 7.78 | 5.53 | 4.78 | 15.8 |
| 1977-78 | 8.33 | 13.8 | 12.5 | 15.7 | 20.6 | 11.2 | 7.44 | 6.41 | 7.46 | 4.54 | 3.19 | 2.40 | 9.46 |
| 1978-79 | 5.93 | 11.3 | 20.0 | 29.8 | 13.0 | 11.0 | 5.83 | 4.07 | - | - | - | - | - |
| 1979-80 | 6.47 | 20.4 | 18.7 | 17.3 | 24.8 | 21.8 | - | - | - | - | - | - | - |
| 1980-81 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1981-82 | | | | | | | | | | | | | |
| 1982-83 | | | | | | | | | | | | | |
| 1983-84 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1984-85 | 13.8 | 15.7 | 14.3 | 27.7 | 31.4 | 19.0 | 14.4 | 11.2 | 9.65 | 7.90 | 6.32 | 5.64 | 14.8 |
| 1985-86 | 5.75 | 24.2 | 15.4 | 23.8 | 26.5 | 15.6 | 12.8 | 8.80 | 7.36 | 6.43 | 4.88 | 9.21 | 13.4 |
| 1986-87 | 8.93 | 22.1 | 33.8 | 34.7 | 23.8 | 17.6 | 12.4 | 9.92 | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 8.14 | 18.3 | 20.0 | 25.7 | 24.9 | 17.7 | 11.5 | 8.81 | 8.29 | 6.67 | 4.98 | 5.51 | 13.4 |

Si l'évaluation des débits de hautes eaux demeure assez hasardeuse à cette station (très large plaine d'inondation rive droite, digue routière aval) les jaugeages et les observations réalisés à cette station et en aval de la RN3a (A = 1200 km²) permettent l'évaluation de quelques débits de crue sur cette rivière.

| Année | Betambako | | RN3a (SB1) | |
|---|---|---|---|---|
| | Qm³/s | Hm | Qm³/s | Hm |
| 1950-51 | | | (550) | |
| 1976-77 | 87 | 3,19 | 102 | 3,20 |

Tableau 5.6 bis

Sahabe à Betambako
Débits d'étiage
et de crus (m³/s)

| Année | QJmin. | Date | QJmax. |
|---|---|---|---|
| 1975-76 | 2.99 | 29-11-76 | |
| 1976-77 | 3.03 | 01-12-77 | 58.0 |
| 1977-78 | 1.88 | 26-10-78 | 59.8 |
| 1978-79 | 1.77 | 01-11-79 | |
| 1983-84 | (5.14) | 01-11-84 | |
| 1984-85 | 3.70 | 20-11-85 | 53.2 |
| 1985-86 | 4.42 | 13-11-86 | 66.4 |

Nota : les valeurs de débits de crue sont approchées.

## 1.2.2. L'Anony

Tableau 5.7.

Anony à Ambohiboanjo
17°22'S - 48°24'E - Sup. B.V. : 1 485 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1976-77 | - | 17.7 | 32.3 | 62.3 | 33.0 | 13.5 | 7.79 | 6.82 | 5.75 | 4.74 | 3.20 | 3.59 | - |
| 1977-78 | 4.12 | 5.00 | 15.4 | 22.4 | 14.5 | 9.61 | 5.02 | 3.68 | 5.03 | 3.41 | 2.82 | 1.40 | 7.70 |
| 1978-79 | 3.01 | 17.9 | 36.4 | 58.8 | 15.6 | 6.11 | 4.81 | 3.67 | 4.43 | 1.96 | 1.49 | .726 | 12.9 |
| 1979-80 | 3.19 | - | - | 15.6 | 26.7 | 7.05 | 4.59 | 3.83 | 3.68 | 3.31 | .632 | 2.06 | - |
| 1980-81 | 2.62 | 9.93 | 10.2 | 4.08 | 17.9 | 4.28 | - | 2.15 | 3.15 | 2.18 | 1.03 | 2.23 | - |
| 1981-82 | 3.89 | 41.4 | 52.6 | 76.1 | 56.9 | 16.3 | 7.39 | 5.64 | 4.91 | 4.71 | - | - | - |
| 1982-83 | 20.3 | 8.28 | 19.5 | 54.4 | 18.5 | 7.64 | 7.78 | 4.95 | 5.40 | 3.94 | 3.56 | 1.87 | 13.0 |
| 1983-84 | 3.70 | 47.1 | 92.0 | 82.7 | 39.2 | - | 16.2 | 13.2 | 12.8 | 12.2 | 7.29 | 4.23 | - |
| 1984-85 | 27.1 | 16.9 | 16.4 | 47.2 | 44.8 | 17.4 | 9.23 | 10.9 | 11.1 | 6.29 | 5.17 | 4.50 | 18.1 |
| 1985-86 | 6.19 | 44.8 | 26.3 | - | - | 10.5 | 8.83 | 7.22 | 6.90 | - | - | 8.16 | - |
| 1986-87 | 5.57 | 15.7 | 38.5 | 28.4 | 24.9 | 15.1 | 7.85 | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 7.97 | 22.5 | 34.0 | 45.2 | 29.2 | 10.8 | 7.95 | 6.21 | 6.32 | 4.75 | 3.15 | 3.20 | 12.9 |

Nota : Les débits moyens mensuels représentent le cumul des débits du déversoir, des chasses et des prises. Les résultats sont acceptables.

Pour la connaissance des débits à cette station, installée sur le seuil de prise d'AMBOHIBOANJO, plusieurs étalonnages ont été nécessaires (seuil largement ennoyé, vannes de prises).

Une estimation du débit des brèches (endiguement rive gauche) a permis l'évaluation :
- des débits maximums de la période 1968-1984 ;
- des débits annuels de crue au cours de la période 1976-1984.

| Année | Hm | Qm³/s | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1969-70 | 355 | 2,88 | Brèches |
| 1972-73 | 1050 | 3,78 | Brèches |
| 1976-77 | 245 | 2,56 | |
| 1977-78 | 93 | 1,58 | |
| 1978-79 | 195 | 2,32 | |
| 1979-80 | 112 | 1,65 | |
| 1980-81 | 87 | 1,56 | |
| 1981-82 | 274 | 2,77 | |
| 1982-83 | 123 | 1,70 | |
| 1983-84 | 580 | 3,25 | Brèches |

Un ordre de grandeur de la crue décennale (565 m³/s soit 380 l/s/km²) a été estimé à partir des résultats de l'étude statistique menée sur la MANINGORY à ANDROMBA.

## 1.2.3. L'Ivakaka

Tableau 5.8.

Ivakaka à Vohidiala
17°32'S - 48°14'E - Sup. B.V. : 173 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1976-77 | - | 3.09 | 2.81 | 6.20 | 4.64 | 2.65 | 1.86 | 1.89 | 1.69 | 1.92 | 1.54 | 2.23 | - |
| 1977-78 | 2.02 | 2.27 | 3.02 | 2.23 | 3.87 | 3.05 | .738 | .369 | .859 | 1.70 | - | .701 | - |
| 1978-79 | 1.74 | 3.25 | 5.93 | 5.89 | 4.69 | 2.97 | 1.76 | 2.88 | 4.24 | 4.23 | 3.73 | 1.61 | 3.58 |
| 1979-80 | 1.13 | 3.16 | - | - | 4.48 | 2.95 | 4.43 | 3.45 | 3.13 | 4.35 | 3.15 | 4.05 | - |
| 1980-81 | 1.54 | 1.50 | 1.12 | 1.38 | 3.72 | 1.32 | 1.93 | 1.43 | 1.12 | 1.26 | 1.15 | 2.48 | 1.66 |
| 1981-82 | 4.26 | 6.28 | 9.45 | 8.58 | 6.38 | 6.26 | 3.39 | 3.56 | 3.10 | 2.87 | 2.45 | 2.91 | 4.96 |
| 1982-83 | 3.64 | 3.49 | 3.98 | 5.67 | 3.32 | 3.21 | 2.23 | 2.12 | 2.11 | 1.89 | 1.66 | 2.53 | 2.99 |
| 1983-84 | 2.91 | 9.41 | 10.7 | 8.31 | 6.00 | 8.34 | 4.25 | 4.70 | 4.48 | 2.93 | 2.33 | 2.79 | 5.60 |
| 1984-85 | 4.32 | 3.55 | 3.73 | 6.82 | 6.76 | 4.14 | 2.82 | 2.38 | 2.25 | 1.85 | 1.99 | 1.83 | 3.54 |
| 1985-86 | 2.49 | 5.30 | 4.92 | 6.41 | 5.77 | 3.26 | 2.75 | 2.53 | 2.38 | 2.36 | - | - | - |
| 1986-87 | - | 5.58 | 7.10 | 4.83 | 5.33 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 2.67 | 4.26 | 5.28 | 5.63 | 5.00 | 3.82 | 2.62 | 2.53 | 2.54 | 2.54 | 2.25 | 2.35 | 3.72 |

Nota : les débits représentent le cumul des débits du déversoir, des prises et des chasses. En raison d'imprécision sur le tracé de la courbe de tarage du déversoir et sur les débits de chasse, les résultats sont considérés comme approximatifs.

| Année | QMax. m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1979-80 | 25 | 12/03/80 02h00 | 4,10 | |
| 1980-81 | 21 | 05/03/81 04h00 | 3,96 | |
| 1981-82 | 98 | 03/02/82 17h30 | 5,92 | |
| 1982-83 | 23 | 24/02/83 19h00 | 4,02 | |
| 1983-84 | 106 | 13/04/84 00h00 | 6,02 | Min |

Un ordre de grandeur de la crue décennale a été assez grossièrement estimé par comparaison avec l'ANONY à AMBOHIBOANJO : 110 m³/s (640 l/s/jm²).

## 1.2.4. La Sahamilahy

Tableau 5.9.

Sahamilahy à Maheriara
17°46'26"S - 48°05'14"E - Sup. B.V. : 157 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1980-81 | - | - | 1.54 | 1.46 | 3.55 | 1.72 | 1.62 | 1.14 | .958 | .897 | .972 | 1.08 | - |
| 1981-82 | 1.17 | 2.39 | 5.05 | 10.2 | 5.28 | 3.39 | 2.57 | 2.30 | 2.04 | 1.79 | 1.62 | 1.66 | 3.29 |
| 1982-83 | 2.08 | 4.29 | 4.65 | 5.60 | 5.40 | 3.56 | 2.54 | 2.29 | 2.01 | 1.68 | 1.47 | 1.45 | 3.09 |
| 1983-84 | 2.12 | 10.8 | 16.0 | 12.6 | 13.0 | - | 7.02 | 5.09 | 4.26 | 3.49 | 2.64 | 2.26 | - |
| 1984-85 | 3.72 | 3.85 | 4.20 | 8.83 | 6.96 | 4.11 | 2.96 | 2.56 | 2.32 | 2.03 | 1.64 | 1.40 | 3.72 |
| 1985-86 | 1.48 | 5.91 | 3.84 | 6.43 | 7.43 | 3.66 | 2.79 | 2.39 | 2.08 | 1.81 | 1.43 | 3.04 | 3.52 |
| 1986-87 | 2.08 | 6.73 | 9.33 | 5.28 | 4.64 | 4.16 | 3.02 | 2.39 | 2.16 | 1.99 | 1.50 | 1.48 | 3.73 |
| Moyenne | 2.11 | 5.66 | 6.37 | 7.20 | 6.61 | 3.43 | 3.22 | 2.59 | 2.26 | 1.96 | 1.61 | 1.77 | 3.47 |

Ces résultats sont de bonne qualité.

On trouvera des résultats plus complets dans le rapport final "Etudes hydrologiques dans la région du lac ALAOTRA - L. FERRY, ORSTOM, 1989".

Un ordre de grandeur de la crue décennale a été assez grossièrement estimé, à partir des quelques maximums annuels connus à cette station, d'installation récente mais bien étalonnée, et par comparaison avec les données de la RANOFOTSY à ANDILANATOBY.

| Année | Hm | QMax. m3/s | Hm |
|---|---|---|---|
| 1980-81 | 14 | 05/03/81 | |
| 1981-82 | 42 | 12/02/82 | |
| 1982-83 | 22 | 22/01/83 | |
| 1983-84 | 97 | 13/04/84 | 3,60 |

La crue décennale est évaluée à 300 m³/s (1900 l/s/km²).

## 1.2.5. Autres stations

### 1.2.5.1. La Sasomangana à Antanifotsy (A = 75,4 km²)

Les débits naturels reconstitués (barrage édifié en 1959) pour les deux plus fortes crues observées au cours de la période 1957-80 sur la SASOMANGANA s'élèvent respectivement à 230 et à 160 m³/s.

| Année | Qm³/s | Date | Vr 10⁶m³ |
|---|---|---|---|
| 1958-59 | 230 | 04/03/59 | 5,9 |
| 1971-72 | 160 | 14/02/72 | 8,9 |

### 1.2.5.2. La Sasomangana à Marianina (A = 279 km²)

A l'entrée du PC15 (stations de MARIANINA à la RN 44 et du seuil de prise d'AMBOHIBOROMANGA) le Génie rural a estimé à 300 m³/s le débit déversé le 5/03/59 à 5h00.

Maximum probable de la période 1959-1985, cette valeur du débit de la SASOMANGANA est sans doute sous estimée, les débits des 5 brèches de la digue est du périmètre n'ayant pas été évalués et le batardeau provisoire du barrage d'ANTANIFOTSY plus amont ne s'étant rompu qu'après 5h00.

### 1.2.5.3. La Ranofotsy à Andilanatoby (A = 191 km²)

Quelques jaugeages et mesures de pente pour plusieurs maximums de crue connus à ANDILANATOBY et plus en amont (site de prise et PK 109,00 de la voie ferrée MLA), ont permis une estimation des débits des plus fortes crues de la période 1970-1985.

La crue décennale a été évaluée à 330 m³/s (1 730 l/s/km²).

| Année | Qm³/s | Andilanatoby | Site de prise |
|---|---|---|---|
| 1971-72 | 430 | 788,60 NGM | 799,64 NGM |
| 1972-73 | 250 | 788,00 NGM | |

### 1.2.5.4. La Mananontanana à la RN 44 (A = 67,3 km²)

Le maximum observé au cours des campagnes 1951-57, menées sur l'ALAOTRA par la SOGREAH et le Génie rural, a été avaluée à 220 m³/s (3 270 l/s/km²) pour la crue du 20 février 1957.

### 1.2.5.5. L'Andragorona à la RN 44 (A = 107 km²)

La crue la plus importante signalée entre 1957 et 1957 a été estimée à 330 m³/s (3 085 l/s/km²) pour la crue du 6 février 1956.

### 1.2.5.6. La Mananonoka à la RN 22 (A = 84 km²)

L'extrapolation de la courbe de tarage, à partir des valeurs moyennes et des sections mouillées est importante (de 2.28 à 67 m³/s) pour cette station observée de septembre 1980 à octobre 1983. Une évaluation du maximum décennal de crue (180 m³/s, 2140 l/s/km²) a été établie, à partir de données d'observations et des résultats de l'étude statistique menés sur la station la plus proche (IVONDRO à RINGARINGA).

## 1.2.6. Fonctionnement du lac Alaotra

Pour les besoins de l'étude préliminaire du lac, les apports de neuf des affluents principaux du lac avaient été calculés sur la période 1945-1979 à partir d'un modèle déterministe (DOSSEUR, 1982).

Les valeurs moyennes interannuelles calculées sont les suivantes :

Tableau 5.10.

Débits moyens mensuels et annuels (1945-79) (m³/s)

| Bassin | S km² | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ANONY | 1450 | 6.83 | 18.7 | 34.0 | 44.7 | 37.7 | 12.2 | 8.44 | 7.60 | 6.91 | 5.68 | 4.05 | 2.99 | 15.7 |
| SAHALOMOTO | 356 | 2.91 | 8.44 | 10.2 | 13.2 | 10.7 | 3.71 | 2.51 | 2.31 | 2.11 | 1.80 | 1.45 | 1.25 | 5.03 |
| IVAKAKA | 176 | 1.69 | 4.55 | 6.50 | 7.25 | 7.73 | 2.54 | 1.50 | 1.32 | 1.18 | .870 | .417 | .307 | 3.00 |
| IMAMBA | 57 | .509 | 1.32 | 2.26 | 2.23 | 2.34 | .840 | .478 | .428 | .381 | .310 | .216 | .183 | 963 |
| SAHABE | 1187 | 13.3 | 33.1 | 51.1 | 55.3 | 60.5 | 31.1 | 17.2 | 13.8 | 12.0 | 9.63 | 6.83 | 6.16 | 26.0 |
| RANOFOTSY | 189 | 1.89 | 4.48 | 6.57 | 6.35 | 6.08 | 2.12 | 1.38 | 1.27 | 1.14 | .930 | .683 | .609 | 2.79 |
| ILAKANA | 237 | 3.19 | 7.09 | 10.2 | 9.87 | 9.45 | 3.36 | 2.34 | 2.18 | 2.02 | 1.78 | 1.52 | 1.37 | 4.54 |
| SASOMANGANA | 275 | 1.88 | 5.30 | 8.74 | 9.30 | 9.22 | 3.83 | 2.55 | 2.23 | 1.92 | 1.57 | 1.13 | .911 | 4.02 |
| LOVOKA | 116 | 1.08 | 2.21 | 4.41 | 4.79 | 4.78 | 2.40 | 1.65 | 1.45 | 1.30 | 1.15 | 1.02 | .915 | 2.26 |
| Total sous-bassins | 4043 | 33.3 | 85.1 | 134 | 151 | 149 | 62.1 | 38.1 | 32.6 | 28.9 | 23.7 | 17.3 | 14.7 | 64.3 |
| MANINGORY | 6855 | 19.2 | 27.2 | 62.6 | 115 | 160 | 155 | 107 | 77.7 | 59.5 | 45.9 | 34.0 | 24.3 | 74.1 |

Nous avons représenté (graphe 5.4.) les hydrogrammes annuels de l'ensemble des sous-bassins (4 043 km² et de la MANINGORY. On notera les points suivants :

- décalage de la montée de la crue annuelle d'environ six semaines entre les sous-bassins et la MANINGORY ;

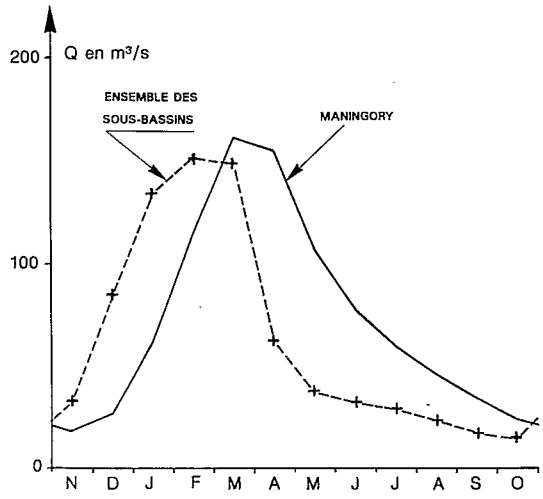
- décroissance plus régulière et lente des débits de la MANINGORY à comparer à la chute rapide des débits de mars à avril-mai pour les sous-bassins, avec un décalage dans le temps de six semaines à trois mois et demi ;

- écart notable entre les lames écoulées moyennes des sous-bassins (500 mm) et du MANINGORY (340 mm).

L'effet régularisateur et retardateur du lac, ainsi que son rôle (avec les marécages et rizières qui l'entourent) dans la reprise par évapotranspiration sont ainsi nettement mis en évidence compte tenu d'une pluviométrie moyenne sur les sous-bassins plus importante que sur le bassin global.

figure 5.4.

Comparaison entre l'écoulement moyen du Maningory à Andromba et celui des sous-bassins alimentant le lac Alaotra




# 2. BASSIN DE L'IAZAFO

L'IAZAFO est une petite rivière côtière de la côte Est, située entre le MANINGORY et l'ONIBE. Elle draine une petite zone dépressionnaire rizicole avant, par une pente plus rapide, de rejoindre l'océan au nord de MAHAMBO.

La station de MORAFENO (17°27'S - 49°18'E) contrôle un bassin versant de 103 km². Les observations (1980-83) n'ont été effectuées qu'en saison sèche.

Tableau 5.11.

Débits moyens mensuels (m³/s)

| Année | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1980 | | | | | 5.83 | |
| 1981 | 1.87 | 1.31 | 856 | 1.90 | 2.13 | 1.62 |
| 1982 | 1.71 | 3.00 | 5.77 | 5.37 | 1.58 | 5.24 |
| 1983 | 4.13 | 4.87 | 3.63 | 2.51 | 2.08 | |

La courbe de tarage est fortement extrapolée (vitesses et surfaces puis extrapolation logarithmique) pour l'évaluation des maximums annuels de cette station, suivie entre septembre 1980 et octobre 1982.

| Année | Hm | Qm³/s | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1980-81 | 5,23 | (56) | PHE |
| 1981-82 | 6,13 | (165) | PHE |
| 1982-83 | 4,95 | (33) | PHE |

Les débits caractéristiques d'étiage (peut-être un peu surestimés car les observations ne se sont pas poursuivies en novembre-décembre) sont les suivants :

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1980 | QJmin | = | .215 m³/s | (2.09 l/s/km²) | DCE | = | .485 m³/s |
| 1981 | QJmin | = | .385 m³/s | (3.73 l/s/km²) | DCE | = | .601 m³/s |
| 1982 | QJmin | = | 1.22 m³/s | (11.8 l/s/km²) | DCE | = | 1.32 m³/s |
| 1983 | QJmin | = | .702 m³/s | (6.81 l/s/km²) | DCE | = | .790 m³/s |

## 3. BASSIN DE L'ONIBE

L'ONIBE, située entre l'IAZAFO et l'IVONDRO, draine la partie extrême du plateau limitant à l'est le lac ALAOTRA et les rebords de la grande falaise orientale.

Le bassin (d'une surface d'environ 965 km²) à la station de MITANONOKA n'a été observé qu'une année (1948-49) avec un module évalué à 30 m3/s (970 mm) et un débit d'étiage voisin de 11 m3/s (8.5 l/s/km²). En année moyenne, par comparaison avec l'IVONDRO, la lame écoulée doit être voisine de 1300 mm.

## 4. BASSIN DE L'IVONDRO

L'IVONDRO prend sa source à l'ouest de la cuvette marécageuse de DIDY (d'une superficie globale d'environ 780 km²). Son cours se dirige ensuite vers l'est et sa pente s'accentue jusqu'à l'aval de l'usine de VOLOBE qui alimente actuellement ANTANANARIVO en énergie électrique, puis s'atténue ensuite, à partir de RINGA-RINGA jusqu'à l'océan. Ce bassin de forme allongée, repose essentiellement sur les schistes cristallins du socle, profondément altérés en latérites épaisses (jusqu'à 30 m). Dans la partie supérieure du bassin (cuvette de DIDY), les formations lacustres récentes sont altérées en sols hydromorphes (pseudo-tourbe et tourbe). Les formations végétales sont représentées par les prairies à "bozaka" sur les hauts plateaux, les "zozoros"

des marécages de DIDY et essentiellement (85 % du bassin), la forêt dense ombrophile sur le bassin moyen et inférieur.

La pluviométrie croît considérablement de l'amont à l'aval : 1 500 mm à DIDY, 3 100 mm à TOAMASINA.

## 4.1. Ivondro à Ringa-Ringa

La station de référence est située à proximité du bac de RINGA-RINGA (18°11'S - 49°15'E), a une altitude voisine de cinq à six mètres. L'altitude moyenne du bassin, dont la superficie est de 2 560 km², est voisine de 890 m (altitude maximale : 1 510 m).

Les premières observations datent de juillet 1952. Soixante-dix-huit mesures effectuées de 1951 à 1983, entre 30 et 2 050 m³/s, ont permis d'établir les courbes d'étalonnage, assez bien définies, et sans extrapolation trop importante, pour les moyennes et hautes eaux, plus imprécises pour les basses eaux en raison de l'instabilité de la relation hauteur-débit (remblayage de la section et peut-être influence de la marée). Les observations, pratiquement continues de 1953 à 1983, sont dans l'ensemble de bonne qualité.

La pluviométrie moyenne sur le bassin a été établie (méthode de THIESSEN) à partir de sept postes dont les principaux sont ceux de DIDY (poids : .48), VOLOBE (poids : .22) et MANAKAMBAINY (poids : .13). Les postes situés sur les hauts plateaux, moins arrosés, pèsent lourdement sur le calcul de la pluviométrie, très sous-estimée. Comme précédemment, nous avons établi les indices de pluviométrie mensuelle en utilisant un coefficient de correction de 1.55, c'est-à-dire pour une pluviométrie moyenne interannuelle de l'ordre de 2 500 mm.

### 4.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

Les coefficients de corrélation hydropluviométriques mensuels sont rassemblés dans le tableau 5.12.

Tableau 5.12.

Ivondro à Ringa-Ringa
Coefficients de corrélation mensuels.

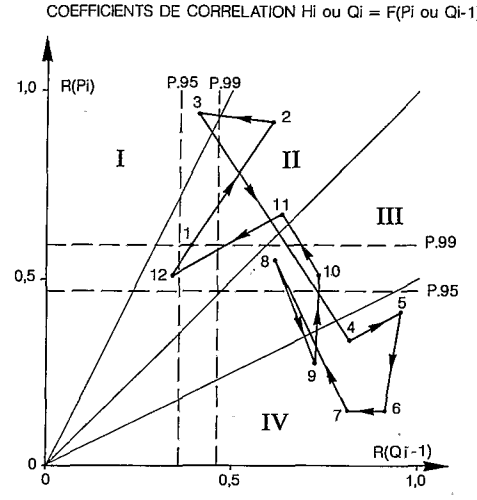
| Lames (mm) ou Q (m³/s) | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .67 | .51 | .59 | .92 | .94 | (.34) | (.42) | (.15) | (.15) | .55 | (.28) | .51 |
| Pi - 1 | .48 | (.24) | (.23) | .37 | .30 | .77 | (.28) | (.45) | (.12) | (.19) | (.33) | (.36) |
| Qi - 1 | .63 | .34 | .39 | .61 | .41 | .81 | .95 | .91 | .81 | .61 | .72 | .73 |

.67 : P > .99, .55 : P > .95, (.34) : P < .95

La position des points représentatifs est représentée sur le graphe 5.5.

figure 5.5.

Ivondro à Ringa-Ringa




Les mois de saison des pluies (novembre à mars) sont situés essentiellement dans le secteur II (précipitation du mois prépondérante et influence secondaire très sensible du débit antérieur). D'avril à juillet, le débit antérieur a une influence prépondérante (secteur IV) mais l'influence des précipitations du mois n'est pas négligeable. La fin de la saison sèche se caractérise par une influence accrue (en facteur secondaire) des précipitations du mois.

Pour chaque mois, les relations suivantes ont été établies :

Tableau 5.13.

Ivondro à Ringa-Ringa
(Régressions)

| | |
|---|---|
| H11 = .16 P11 + .95 H10 - 27.6 | ($R^2$ = .82 P > .995) |
| H12 = .14 P12 + .34 H11 - 27.5 | ($R^2$ = .37 P > .95) |
| H01 = .185 P01 + .84 H12 - 27.6 | ($R^2$ = .53 P > .99) |
| H02 = .37 P02 + .35 H01 - 25.6 | ($R^2$ = .91 P > .995) |
| H03 = .36 P03 + .39 H02 - 20.5 | ($R^2$ = .94 P > .995) |
| Q04 = .49 Q03 + .34 P04 - 14.8 | ($R^2$ = .87 P > .995) |
| Q05 = .62 Q04 + 17.4 | ($R^2$ = .90 P > .995) |
| Q06 = .76 Q05 + 19.7 | ($R^2$ = .83 P > .995) |
| Q07 = .66 Q06 + 34.9 | ($R^2$ = .66 P > .99) |
| Q08 = .75 Q07 + .25 P08 - 10 | ($R^2$ = .70 P > .995) |
| Q09 = .56 Q08 + .18 P09 + 9.9 | ($R^2$ = .67 P > .99) |
| Q10 = .71 Q09 + .09 P10 - 1.1 | ($R^2$ = .85 P > .995) |

Ces relations ont permis de compléter les débits mensuels de septembre, octobre, novembre et décembre 1952.

Tableau 5.14.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1252800109 Ringa-Ringa Bac
Rivière : Ivondro
Pays : Madagascar
Bassin : Ivondro

Latitude : 18.11.00
Longitude : 49.15.00
Aire : 2 560 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1951/52 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 131 | (95) | (71) | - |
| 1952/53 | (83) | (85) | 81.6 | 100 | 94.6 | 78.3 | 56.7 | 76.1 | 67.1 | 94.0 | 91.6 | 65.1 | (80.9) |
| 1953/54 | 57.4 | 101 | 178 | 100 | 96.4 | 79.5 | 76.2 | 82.8 | 71.0 | 74.0 | 61.8 | 50.5 | 85.8 |
| 1954/55 | 39.7 | 68.0 | 95.6 | 79.7 | 195 | 94.4 | 78.0 | 90.3 | 82.3 | 66.5 | 56.7 | 43.2 | 82.6 |
| 1955/56 | 38.8 | 103. | 181 | 412 | 255 | 242 | 183 | 146 | 122 | 107 | 88.5 | 69.3 | 161 |
| 1956/57 | 70.8 | 102 | 77.2 | 154 | 162 | 166 | 114 | 93.4 | 95.4 | 83.3 | 82.8 | 57.6 | 104 |
| 1957/58 | 48.4 | 79.3 | 114 | 118 | 193 | 106 | 87.1 | 105 | 100 | 91.7 | 63.5 | 67.3 | 97.8 |
| 1958/59 | 79.7 | 95.7 | 187 | 168 | 556 | 285 | 191 | 160 | 146 | 119 | 97.1 | 90.2 | 182 |
| 1959/60 | 150 | 102 | 156 | 116 | 96.0 | 84.2 | 72.8 | 85.9 | 75.5 | 69.6 | 74.3 | 62.7 | 95.3 |
| 1960/61 | 57.8 | 62.4 | 67.4 | 44.2 | 56.4 | 56.5 | 43.2 | 39.1 | 78.8 | 80.9 | 71.2 | 42.3 | 58.5 |
| 1961/62 | 45.7 | 141 | 97.2 | 144 | 113 | 74.4 | 71.7 | 57.5 | 55.2 | 79.3 | 68.9 | 60.5 | 83.8 |
| 1962/63 | 57.3 | 44.9 | 78.1 | 111 | 192 | 105 | 70.1 | 68.9 | 75.3 | 66.2 | 47.3 | 36.0 | 79.2 |
| 1963/64 | 60.2 | 85.3 | 56.7 | 92.1 | 251 | 115 | 85.2 | 96.9 | 112 | 113 | 111 | 101 | 107 |
| 1964/65 | 70.6 | 90.5 | 170 | 162 | 225 | 134 | 84.9 | 68.1 | 79.0 | 144 | 79.1 | 60.0 | 114 |
| 1965/66 | 75.1 | 149 | 119 | 183 | 113 | 80.2 | 67.9 | 72.6 | 97.7 | 88.9 | 69.5 | 50.6 | 96.8 |
| 1966/67 | 48.6 | 71.8 | 95.9 | 111 | 124 | 95.6 | 78.6 | 85.8 | 97.2 | 122 | 104 | 74.0 | 92.3 |
| 1967/68 | 96.8 | 124 | 217 | 167 | 180 | 96.9 | 76.1 | 63.4 | 89.7 | 72.4 | 56.4 | 49.1 | 107 |
| 1968/69 | 50.7 | 109 | 166 | 145 | 85.5 | 83.9 | 66.8 | 73.8 | 80.6 | 120 | 82.9 | 58.1 | 93.3 |
| 1969/70 | 49.9 | 86.8 | 129 | 131 | 145 | 196 | 117 | 108 | 102 | 136 | 98.2 | 69.9 | 114 |
| 1970/71 | 59.0 | 58.4 | 259 | 152 | 109 | 100 | 97.4 | 82.1 | 119 | 95.3 | 83.6 | 66.1 | 107 |
| 1971/72 | 87.9 | 90.9 | 110 | 263 | 315 | 168 | 118 | 103 | 124 | 88.3 | 74.4 | 73.8 | 134 |
| 1972/73 | 78.7 | 132 | 418 | 381 | 273 | 187 | 136 | 137 | 130 | 147 | 109 | 84.8 | 183 |
| 1973/74 | 67.1 | 69.7 | 185 | 176 | 150 | 145 | 107 | 103 | 129 | 134 | 89.6 | 69.3 | 118 |
| 1974/75 | 66.9 | 83.3 | 102 | 126. | 377 | 170 | 128 | 121 | 114 | 117 | 102 | 82.8 | 133 |
| 1975/76 | 86.2 | 194. | 218 | 183 | 188 | 145 | 112 | 102 | 97.2 | 84.6 | 71.2 | 66.3 | 129 |
| 1976/77 | 55.7 | 72.3 | 170 | 321 | 227 | 148 | 117 | 114. | 105 | 115 | 109 | 98.0 | 136 |
| 1977/78 | 80.9 | 79.5 | 77.7 | 81.6 | 155 | 102 | 74.1 | 84.8 | 95.4 | 76.2 | 104 | 51.9 | 88.6 |
| 1978/79 | 43.8 | 60.6 | 74.0 | 127 | 84.3 | 80.6 | 51.8 | 46.2 | 71.2 | 77.9 | 40.8 | 39.9 | 66.2 |
| 1979/80 | 38.3 | 93.5 | 202 | 110 | 154 | 87.4 | 77.4 | 65.4 | 80.8 | 74.4 | 59.0 | 59.6 | 92.0 |
| 1980/81 | 54.7 | 68.4 | 50.3 | 66.3 | 87.1 | 80.6 | 59.5 | 53.7 | 46.6 | 53.6 | 61.9 | 49.8 | 61.0 |
| 1981/82 | 43.4 | 74.2 | 164 | 257 | 248 | 126 | 92.3 | 112 | 115 | 127 | 90.0 | 121 | 130 |
| 1982/83 | 80.6 | 90.3 | 127 | 110 | 88.4 | 100 | 109 | 118 | 98.6 | 86.4 | 72.4 | 51.9 | 94.3 |
| 1983/84 | 71.5 | 127 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 65.5 | 93.6 | 143 | 158 | 180 | 123 | 93.5 | 90.8 | 95.3 | 98.0 | 79.7 | 65.3 | 107 |
| Ecart-type | 22.4 | 31.0 | 74.6 | 86.3 | 103 | 52.4 | 34.1 | 28.4 | 23.2 | 25.7 | 19.1 | 19.1 | |
| Max. | 150 | 194 | 418 | 412 | 556 | 285 | 191 | 160 | 146 | 147 | 111 | 121 | |
| Q1 | 78.7 | 103 | 181 | 176 | 227 | 148 | 114 | 108 | 114 | 120 | 97.1 | 73.8 | |
| Méd. | 59.0 | 90.3 | 127 | 131 | 155 | 102 | 84.9 | 85.9 | 87.2 | 90.3 | 79.1 | 62.7 | |
| Q3 | 48.6 | 71.8 | 81.6 | 110 | 96.4 | 83.9 | 71.7 | 68.9 | 78.8 | 77.0 | 63.5 | 50.6 | |
| Min. | 38.3 | 44.9 | 50.3 | 44.2 | 56.4 | 56.5 | 43.2 | 39.1 | 46.6 | 53.6 | 40.8 | 36.0 | |

Le tableau 5.14. rassemble les débits moyens mensuels et annuels de l'IVONDRO à RINGA-RINGA ainsi que les écarts-types et débits caractéristiques (Max., Q1, Méd., Q3 et Min.). Les débits caractéristiques sont représentés sur le graphe 5.6.

figure 5.6.

Ivondro à Ringa-Ringa

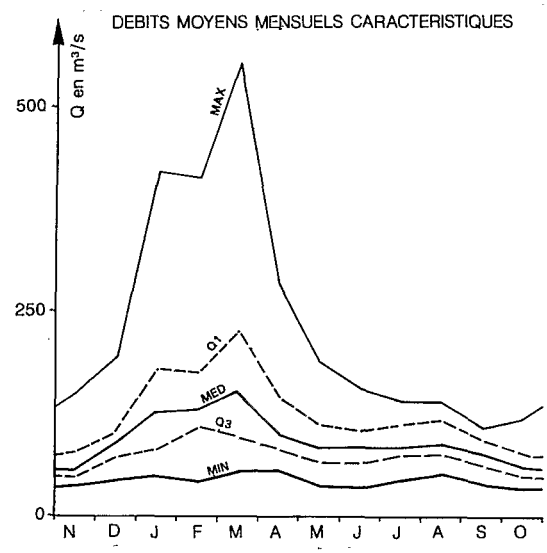



figure 5.7.

Ivondro à Ringa-Ringa

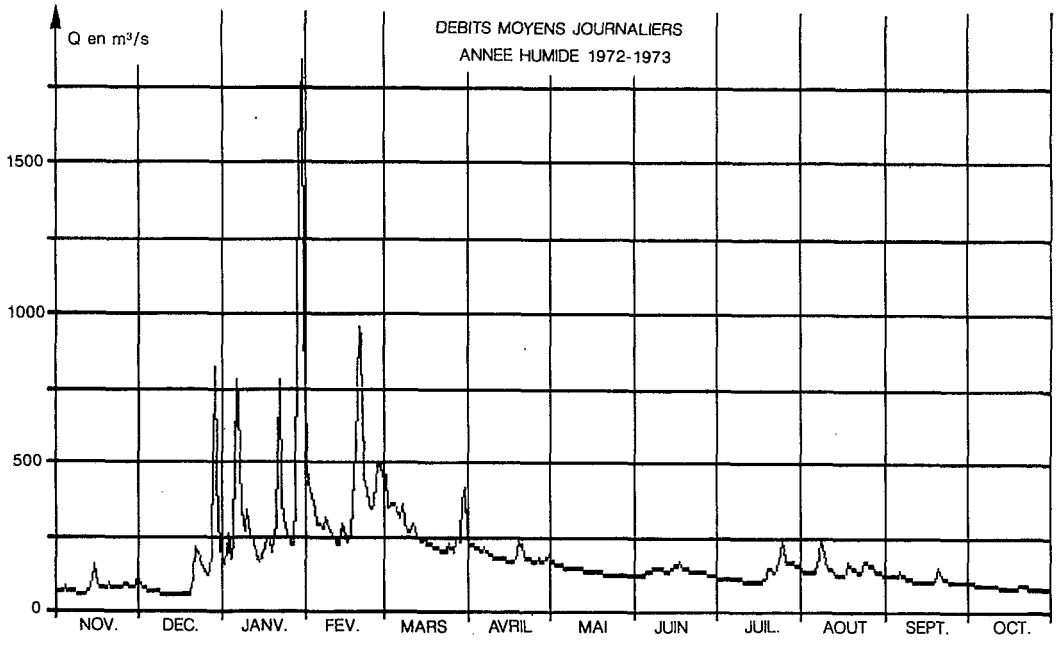
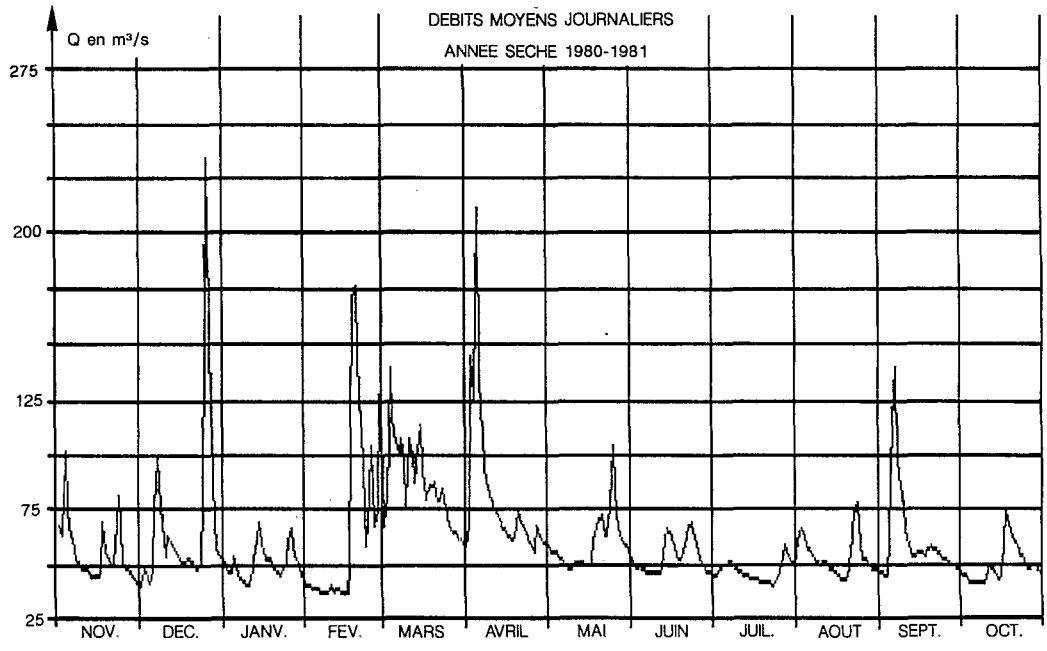


figure 5.8.

Ivondro à Ringa-Ringa




Les hydrogrammes annuels d'une année humide (1972-73, Q = 183 m³/s) et sèche (1980-81, Q = 61.0 m³/s) sont représentés sur les graphes 5.7. et 5.8.

En année humide, la saison des pluies est assez nettement différenciée de la saison "sèche" où les débits bien soutenus par les nappes d'altérites restent voisins ou supérieurs à 100 m³/s. En année sèche, la différenciation est beaucoup moins nette : certains mois de saison "sèche" peuvent avoir au débit moyen (ex : septembre 1981) voisin ou supérieur à ceux de certains mois de la saison des pluies (janvier-février). Les débits de base, moins soutenus qu'en année humide, sont considérablement abondés des écoulements dus aux précipitations.

## 4.1.2. Apports annuels

Entre lame annuelle écoulée et précipitation annuelle (corrigée), il est possible d'établir la régression suivante :

$H = .55 (P - 229)$ $(R^2 = .58$ $P > .995)$

améliorée par la prise en compte du coefficient de concentration des précipitations mensuelles Cp. (cf. SAMBIRANO chapitre 4 - 2.4.1.2.).

$H = 1.275\ P * Cp + 540$ ($R^2 = .89$ $P > .995$)

Le coefficient moyen $\overline{(Cp)} = .225$ sur le bassin.

*Cette relation a permis d'évaluer les lames et débits annuels de 1949-50 à 1952-53 :*

| | | |
|---|---|---|
| 1949-50 | H = 1340 mm | Q = 109 m³/s |
| 1950-51 | H = 1500 mm | Q = 122 m³/s |
| 1951-52 | H = 1210 mm | Q = 98.2 m³/s |
| 1952-53 | H = 1000 mm | Q = 80.9 m³/s |

Les quantiles tirés de l'ajustement statistique sont les suivants (tableau 5.15.).

Tableau 5.15.

Ivondro à Ringa-Ringa
Quantiles en m³/s

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence (an) | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| H mm | 749 | 829 | 909 | 1018 | 1269 | 1590 | 1791 | 1979 | 2214 |
| Q (m³/s) | 60.8 | 67.2 | 73.7 | 82.6 | 103 | 129 | 145 | 160 | 180 |
| q (l/s/km²) | 23.8 | 26.3 | 28.8 | 32.3 | 40.2 | 50.4 | 56.6 | 62.5 | 70.5 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 2.68, échelle : 1156 mm, position : 113 mm, forme : .291).
Centennales sèche et humide : 700 mm (Q = 56.8 m³/s) et 2388 mm (Q = 194 m³/s)

## 4.1.3. Crues

### 4.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

Si les détarages sont encore sensibles en moyennes eaux, la station peut être considérée comme assez stable en hautes eaux et la courbe d'étalonnage peut être tracée sans grande extrapolation jusqu'à 12,40 m, grâce à la série de jaugeages réalisée le 22/01/1971 (de 912 à 2050 m³/s pour des hauteurs allant de 6,38 à 10,05 m).

Cinquante pour cent des débits maximaux sont observés entre le 17 janvier et le 18 mars (date médiane : 10 janvier, dates extremes : 4 novembre et 13 août).

La crue de mars 1959 correspond au cyclone CAP EST, celle de janvier 1934 au cyclone FELICIE.

Entre les débits caractéristiques de crue, peuvent être établies les relations suivantes :

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| QMAX | = | 1.39 | QJMAX | - 9 | (R2 = .89) | $\overline{(QJMAX/QJMAX)}$ | = | 1.38 |
| QJMAX | = | 2.48 | DCC | + 189 | (R2 = .37) | $\overline{(QJMAX/DCC)}$ | = | 3.1 |
| QJMAX | = | 5.5 | DC1 | - 125 | (R2 = .36) | $\overline{(QJMAX/DC1)}$ | = | 4.7 |

Les quantiles de la distribution de Goodrich des débits maximaux de crue ajustée à l'échantillon de 32 valeurs observées sont consignés dans le tableau 5.17.

Tableau 5.16.

Ivondro à Ringa-Ringa
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1952-53 | 429 | 13/08/53 18h00 | 4,00 | Min |
| 1953-54 | 1820 | 14/01/54 18h00 | 9,50 | PHE |
| 1954-55 | 398 | 18/03/55 06h00 | 3,75 | 3rel |
| 1955-56 | 2970 | 06/02/56 12h00 | 12,40 | PHE |
| 1956-57 | 293 | 04/02/57 06h00 | 2,80 | 3rel |
| 1957-58 | 410 | 10/03/58 18h00 | 3,85 | 3rel |
| 1958-59 | 2790 | 25/03/59 18h00 | 12,00 | PHE |
| 1959-60 | 1230 | 04/11/59 06h00 | 7,50 | 3rel |
| 1960-61 | 180 | 26/07/61 12h00 | 1,98 | 3rel |
| 1961-62 | 1030 | 04/12/61 06h00 | 6,80 | 3rel |
| 1962-63 | (1370) | 14/03/63 18h00 | | |
| 1963-64 | 1830 | 09/03/64 06h00 | 9,50 | PHE |
| 1964-65 | (1680) | 21/03/65 12h00 | | |
| 1965-66 | 825 | 15/02/66 12h00 | 6,00 | 3rel |
| 1966-67 | 360 | 17/01/67 12h00 | 3,50 | 3rel |
| 1967-68 | 714 | 16/01/68 12h00 | 5,53 | 3rel |
| 1968-69 | 914 | 04/01/69 06h00 | 6,35 | 3rel |
| 1969-70 | 1520 | 07/04/70 21h00 | 8,50 | 3rel |
| 1970-71 | 2980 | 21/01/71 18h00 | 12,40 | PHE |
| 1971-72 | 1870 | 07/03/72 12h00 | 9,60 | 3rel |
| 1972-73 | 2070 | 29/01/73 12h00 | 10,16 | 3rel |
| 1973-74 | 1110 | 21/01/74 06h00 | 7,10 | 3rel |
| 1974-75 | 2560 | 13/03/75 06h00 | 11,40 | 3rel |
| 1975-76 | 476 | 26/12/75 12h00 | 4,30 | 3rel |
| 1976-77 | 1740 | 25/02/77 17h00 | 9,20 | 3rel |
| 1977-78 | 314 | 18/03/78 06h00 | 3,15 | 3rel |
| 1978-79 | 427 | 01/04/79 06h00 | 4,00 | 3rel |
| 1979-80 | 1070 | 21/01/80 17h00 | 6,90 | 3rel |
| 1980-81 | 269 | 25/12/80 12h00 | 2,85 | 3rel |
| 1981-82 | 857 | 03/02/82 12h00 | 6,12 | 3rel |
| 1982-83 | 455 | 22/01/83 06h00 | 4,17 | 3rel |
| 1983-84 | 349 | 29/12/83 06h00 | 3,45 | Min |

Tableau 5.17.

Ivondro à Ringa-Ringa
Débits maximaux de crue

| Période de retour - Tans | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| $Qm^3/s$ | 865 | 1770 | 2450 | 4040 | (4720) |
| $q\ l/s/km^2$ | 338 | 690 | 960 | 1580 | (1840) |

Les crues cycloniques de 1956 et 1971 auraient une période de retour proche de 20 ans.

Entre AMBODILAZANA (station secondaire peu suivie) et RINGARINGA plus aval, quelques relevés de plus hautes eaux ont pu être effectués sur l'Ivondro à l'aval immédiat de l'usine hydroélectrique de VOLOBE (canal de fuite - échelle EEM) pour un bassin de 2460 $km^2$.

* Hauteurs dans le système de l'ancienne échelle EEM (Volobe)
**Ringa-Ringa

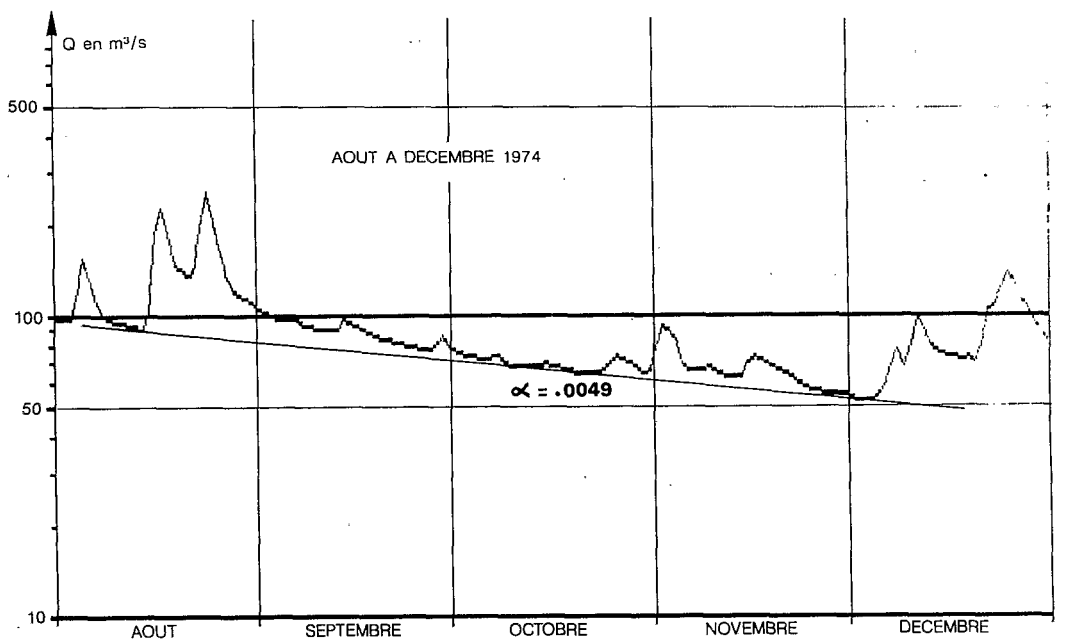
| Année | Hm* | Hm** | $Qm^3/s$** |
|---|---|---|---|
| 1971-72 | 70,51 | 9,60 | 1870 |
| 1972-73 | 71,10 | 10,16 | 2070 |
| 1973-74 | 68,20 | 7,10 | 1110 |
| 1974-75 | 71,45 | 11,40 | 2560 |

## 4.1.4. Basses eaux

Le plus souvent perturbé par les précipitations de saison "sèche", le tarissement des aquifères est cependant apparent sur les hydrogrammes (graphe 5.9.). La droite, enveloppe des débits de base, présente des coefficients assez dispersés ($\alpha$ compris entre .0027 et .0099) mais la moitié de ces coefficients se regroupent entre les valeurs .0044 et .0066.

figure 5.9.

Tarissement de l'Ivondro à Ringa-Ringa



Le tarissement médian a les caractéristiques suivantes :

Débit initial en août Qo # 75 m³/s (probablement assez supérieur au débit de base réel à cette date)
Coefficient de tarissement $\alpha$ # .0055 (Tc = 126 j)

Les débits caractéristiques d'étiage sont présentés dans le tableau 5.18.

Tableau 5.18.

Ivondro à Ringa-Ringa
*Débits caractéristiques d'étiage (m³/s)*

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1953 | 59.2 | 51.4 | 48.5 | 47.5 | 08-11 |
| 1954 | 58.9 | 44.3 | 35.7 | 33.6 | 23-11 |
| 1955 | 58.5 | 39.8 | 34.3 | 33.5 | 24-11 |
| 1956 | 87.5 | 66.5 | 59.5 | 57.2 | 26-10 |
| 1957 | 69.6 | 50.8 | 44.0 | 41.9 | 30-11 |
| 1958 | 70.0 | 59.6 | 54.2 | 46.5 | 08-12 |
| 1959 | 101 | 86.9 | 81.2 | 73.4 | 02-12 |
| 1960 | 64.8 | 52.7 | 48.4 | 44.9 | 13-12 |
| 1961 | 40.7 | 32.6 | 29.5 | 27.9 | 12-06 |
| 1962 | 54.2 | 44.4 | 36.2 | 30.6 | 26-12 |
| 1963 | 52.5 | 37.5 | 35.4 | 33.0 | 28-11 |
| 1964 | 74.8 | 54.2 | 45.1 | 42.8 | 03-02 |
| 1965 | 70.8 | 58.3 | 54.2 | 52.5 | 29-10 |
| 1966 | 60.2 | 45.2 | 40.6 | 38.3 | 06-12 |
| 1967 | 77.8 | 68.3 | 65.0 | 50.9 | 15-01 |
| 1968 | 58.9 | 45.9 | 43.0 | 39.3 | 11-11 |
| 1969 | 62.2 | 51.5 | 47.3 | 41.8 | 30-11 |
| 1970 | 74.7 | 57.2 | 52.5 | 48.3 | 26-12 |
| 1971 | 78.3 | 63.4 | 59.3 | 56.6 | 03-01 |
| 1972 | 77.6 | 64.6 | 59.6 | 55.9 | 16-12 |
| 1973 | 95.6 | 67.2 | 62.3 | 61.3 | 29-11 |
| 1974 | 80.2 | 66.7 | 56.7 | 52.6 | 03-12 |
| 1975 | 96.4 | 73.9 | 69.4 | 66.8 | 04-02 |
| 1976 | 72.2 | 57.4 | 51.7 | 47.7 | 06-12 |
| 1977 | 89.6 | 78.4 | 68.5 | 55.2 | 15-01-78 |
| 1978 | 58.9 | 46.8 | 41.0 | 37.7 | 09-11 |
| 1979 | 42.8 | 36.6 | 34.6 | 33.6 | 24-11 |
| 1980 | 62.7 | 47.8 | 44.3 | 40.7 | 01-12 |
| 1981 | 45.9 | 38.8 | 36.8 | 35.9 | 14-11 |
| 1982 | 85.4 | 71.1 | 58.9 | 48.4 | 06-01 |
| 1983 | 68.0 | 50.7 | 43.3 | 37.6 | 16-11 |

Les quantiles empiriques de ces débits caractéristiques sont les suivants (en m³/s) :

Tableau 5.19.

| | DC9 | DC11 | DCE | QJ min | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 101 | 86.9 | 81.2 | 73.4 | 15-01 |
| Q1 | 78.3 | 66.5 | 59.3 | 56.9 | 06-12 |
| Méd. | 69.6 | 52.7 | 48.4 | 46.5 | 27-11 |
| Q3 | 58.9 | 45.2 | 40.6 | 37.6 | 11-11 |
| Min. | 40.7 | 32.6 | 29.5 | 27.9 | 03-01 |

Si le débit minimal journalier peut être très tardif (15 janvier 78) pour l'année hydrologique 1976-77, ou bien, et assez souvent, précoce (mai, juin), voire se situer au coeur de la saison des pluies (1959, 1964, 1967, 1971, 1975, 1981, 1982), la moitié des QJmin se situent en mi-novembre, début décembre.

Entre les débits caractéristiques d'étiage, peuvent être calculées les régressions suivantes :

DCE = 1.08 QJmin + .34 ($R^2$ = .95 P > .995) DCE/QJmin = 1.08
DC11 = 1.10 QJmin + 4.5 ($R^2$ = .87 P > .995) DC11/QJmin = 1.20
DC9 = 1.26 QJmin + 11.4 ($R^2$ = .83 P > .995) DC9/QJmin = 1.51

Le débit minimal d'étiage est bien corrélé avec le débit moyen mensuel d'août-septembre.

QJmin = .45 Q0809 + 7.4 ($R^2$ = .58 P > .99)

Les quantiles de l'ajustement statistique sont les suivants :

Tableau 5.20.
Ivondro à Ringa-Ringa
Quantiles de la distribution

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Q (m³/s) | 28.3 | 30.7 | 33.1 | 36.4 | 44.0 | 53.9 | 60.2 | 66.0 | 73.4 |
| q (l/s/km²) | 11.1 | 12.0 | 12.9 | 14.2 | 17.2 | 21.1 | 23.5 | 25.8 | 28.7 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 1.01, échelle : 33.9 m³/s, position : 10.1 m³/s, forme : 304).
Centennales sèche et humide : 26.8 m³/s (10.5 l/s/km²) et 78.9 m3/s (30.8 l/s/km²),

## 4.1.5. Bilan hydrologique et mécanismes de l'écoulement

Pour une pluviométrie moyenne interannuelle évaluée à 2 500 mm, la lame écoulée interannuelle est de 1 320 mm, ce qui correspond à un déficit moyen d'écoulement de 1 180 mm et à un coefficient d'écoulement Ke = 53 %.

Le bilan mensuel de l'écoulement (tableau 5.21. et graphe 5.10.) permet d'effectuer les constatations suivantes :

Les précipitations de saison des pluies (novembre à mars) avec 1 684 mm, représentent 67 % du total annuel. Après satisfaction de l'ETP (665 mm) et de l'écoulement H (654 mm, soit 50 % du total annuel), le stock drainable des aquifères représente une lame équivalente de 365 mm, inférieure à la lame écoulée de avril à octobre (666 mm). Les précipitations de saison "sèche" interviennent, par recharge partielle des aquifères et/ou écoulement de surface, pour un total de 301 mm. Ces précipitations interviennent principalement

en juin, juillet et août, traduisant une amorce de régime pseudo-équatorial (seconde "saison des pluies"). L'ETR est presqu'entièrement satisfaite et ne laisse apparaître qu'une légère réduction de l'ETP en septembre et octobre.

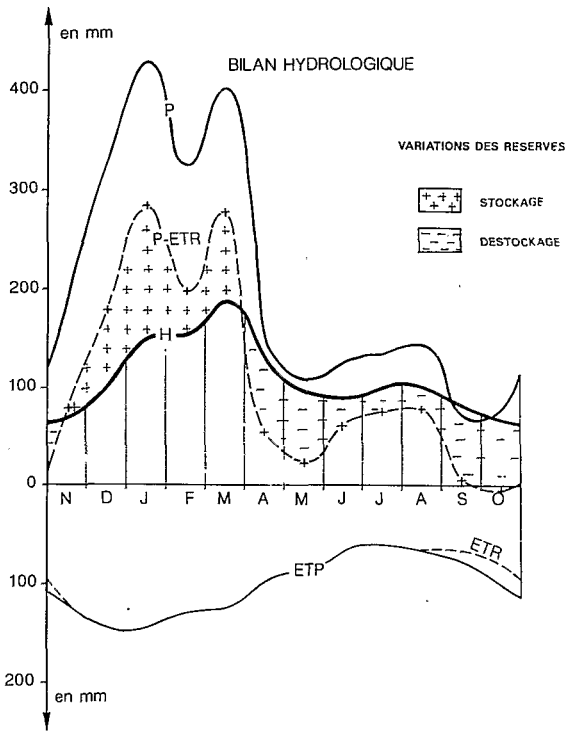
Tableau 5.21.

Ivondro à Ringa-Ringa
Termes mensuels
du bilan hydrologique (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 200 | 323 | 430 | 327 | 404 | 150 | 108 | 127 | 136 | 145 | 72 | 78 | (2500) |
| ETP | 120 | 145 | 145 | 130 | 125 | 95 | 85 | 65 | 60 | 65 | 75 | 100 | 1210 |
| ETR | 120 | 145 | 145 | 130 | 125 | 95 | 85 | 65 | 60 | 65 | 65 | 80 | 1180 |
| P-ETR | 80 | 178 | 285 | 197 | 279 | 55 | 23 | 62 | 76 | 80 | 7 | - 2 | 1320 |
| H | 66 | 98 | 150 | 151 | 189 | 125 | 98 | 92 | 100 | 103 | 80 | 68 | 1320 |
| ΔR+ | 14 | 80 | 135 | 46 | 90 | | | | | | | | +365 |
| ΔR- | | | | | | 70 | 75 | 30 | 24 | 23 | 73 | 70 | - 365 |
| R | 14 | 94 | 229 | 275 | 365 | 295 | 220 | 190 | 166 | 143 | 70 | 0 | |

figure 5.10.

Ivondro à Ringa-Ringa



## 4.2. Ivondro à Ambodifana

La station d'AMBODIFANA (18°08'S - 48°33'E) est située à la sortie de la cuvette de DIDY (cours supérieur de l'IVONDRO) et contrôle un bassin de 717 km². Observée de 1956 à 1963 et de 1976 à 1979, les mois manquants ont été complétés à partir d'une corrélation simple avec les débits mensuels de l'IVONDRO à RINGA-RINGA.

Les débits moyens mensuels interannuels (1953-1978) sont consignés dans le tableau 5.22.

Tableau 5.22.

Ivondro à Ambodifana
Débits moyens mensuels et annuels m³/s

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8.45 | 13.1 | 17.7 | 20.0 | 20.0 | 13.4 | 10.0 | 9.38 | 9.41 | 9.00 | 7.99 | 7.21 | 12.1 |

Les lames annuelles de l'IVONDRO à AMBODIFANA et celles de l'IVONDRO à RINGA-RINGA sont assez bien corrélées.

HAMBO = .31 HRINGA + 111 ($R^2$ = .64 P > .995)

Les quantiles calculés à partir de l'ajustement statistique sur les trente quatre lames annuelles observées ou reconstituées sont les suivants :

Tableau 5.23.

Ivondro à Ambodifana
Quantiles

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| H mm | 333 | 357 | 382 | 415 | 497 | 615 | 697 | 780 | 893 |
| Q (m³/s) | 7.57 | 8.11 | 8.68 | 9.43 | 11.3 | 14.0 | 15.8 | 17.7 | 20.3 |
| q (l/s/km²) | 10.6 | 11.3 | 12.1 | 13.2 | 15.8 | 19.5 | 22.0 | 24.7 | 28.3 |

Loi de Frechet (test Brunet-Moret : 2.0, échelle : 1548 mm, position : - 1087 mm, forme : - 0.063).
Centennales sèche et humide : 319 mm (Q = 7.25 m³/s) et 983 mm (Q = 22.3 m³/s)

On notera l'écart très important entre les lames écoulées moyennes du bassin supérieur de l'IVONDRO (cuvette de DIDY) : environ 500 mm et du bassin global à RINGA-RINGA : 1 320 mm.

Pour le bassin moyen et inférieur de l'IVONDRO, en aval d'AMBODIFANA (S = 1 843 km²) la lame écoulée peut être ainsi évaluée à 1 655 mm, ce qui atteste le gradient pluviométrique élevé observé sur le bassin de l'amont vers l'aval.

Les PHE 1958-59 (seuls relevés retrouvés de l'échelle GR), la correspondance entre échelles GR et SCET (document SCET) et les jaugeages de la SCET et de l'ORSTOM permettent une évaluation assez correcte des débits de quelques maximums annuels.

Ivondro à Ambodifana

| Année | Qm³/s | H GR | H SCET | H ORSTOM |
|---|---|---|---|---|
| 1958-59 | 200 | (5,00) | | |
| 1970-71 | 46 | | (1,96) | |
| 1971-72 | 159 | | (4,30) | |
| 1972-73 | 114 | | 3,46 | |
| 1973-74 | 75 | | 2,63 | |
| 1974-75 | 127 | | 3,72 | |
| 1975-76 | 49 | | 2,01 | |
| 1976-77 | 85 | | 2,86 | |
| 1977-78 | 34 | | 1,57 | |
| 1978-79 | 40 | | | 10,73 |

Une estimation de la crue décennale a été tirée de cet échantillon de crues et des résultats des stations les plus proches (MANINGORY à ANDROMBA et MANGORO à MANGORO Gare). Le débit est estimé à 115 m³/s (160 l/s/km²).

# 5. BASSIN DE LA RIANILA

La RIANILA prend sa source dans les hauteurs de BETSIMIRAKA, à l'est du bassin du MANGORO, vers 1 450 m (massif du FAHONA). De direction générale ouest-est, elle suit parfois des directions nord-sud, conformément aux lignes structurales des formations du socle (gneiss et magmatites). Jusqu'à FETRAOMBY, la pente est forte (de l'ordre de 25 m/km) puis s'adoucit jusqu'à son embouchure (cours d'eau navigable). Son principal affluent de la rive droite est la VOHITRA qui prend sa source à 1 200 m d'altitude (plaine de l'ANKAY) et rejoint la RIANILA près d'ANIVORANO. Les autres affluents importants sont la RONGA-RONGA, en rive gauche, et l'IAROKA, en rive droite qui descend des hauteurs de PERINET.

La végétation est représentée principalement par la forêt ombrophile sur les falaises et la savane des hauts plateaux.

La pluviométrie est contrastée : 1 200 mm à l'ouest du bassin (haut bassin de la VOHITRA) à plus de 3 000 mm au nord (bassin de la RONGA-RONGA).

Nous présenterons d'abord les résultats des observations effectuées sur les deux stations principales : ROGEZ (ANDEKALEKA) et BRICKAVILLE (AMPASIMANOLOTRA), puis sur les stations secondaires : FETRAOMBY sur la RIANILA en amont du confluent avec la VOHITRA, ANKAROHOTRA et ANDEKALEKA Aval sur la VOHITRA, AMBINANINONY sur la RONGA-RONGA et AMPITABE sur la IAROKA.

## 5.1. La Vohitra à Rogez (Andekaleka)

La VOHITRA prend sa source dans la plaine de l'ANKAY au sud d'ANDAINGO, vers 1 200 m d'altitude. Elle traverse en direction sud/sud-est une zone marécageuse dans la région de FIERENANA, puis sa pente s'accentue fortement. La station de ROGEZ (ANDEKALEKA) est située peu en aval du confluent de la VOHITRA et de la SAHATANDRA, son principal affluent de rive droite.

La station de référence (18°48'S - 48°36'E) est située à environ 400 m d'altitude et contrôle un bassin versant de 1 910 km².

En raison de son intérêt (potentiel hydroélectrique), la station avait été anciennement équipée (échelle limnimétrique dès 1928, limnigraphe en 1934). Mais les observations anciennes, incomplètes et de qualité médiocre, n'ont pu être exploitées car difficilement raccordables aux observations récentes réalisées en continu (échelle posée en mai 1952, limnigraphe en juin 1970) de mai 1952 à décembre 1979.

De 1948 à 1979, 189 mesures de débit effectuées entre 22 et 902 m³/s ont permis de tracer la courbe d'étalonnage de la station avec une extrapolation importante entre 1 000 et 2 800 m³/s pour les moyennes eaux.

Après complètement des observations manquantes en basses eaux principalement et jusqu'en 1964, nous disposons d'une chronique complète de mai 1952 à avril 1976 et de juillet 1977 à décembre 1979. La qualité de ces données est assez satisfaisante dans l'ensemble.

La pluviométrie moyenne sur le bassin est calculée (méthode de THIESSEN) à partir de dix postes dont les principaux sont ROGEZ (poids : .21), AMPANGANBE (poids : .20), AMBOHIDRAY (poids : .20) et PERINET (poids : .12). Les postes situés hors du bassin et dans la dépression du MANGORO pèsent excessivement dans le calcul de la pluviométrie moyenne (1 800 mm) qui, de ce fait, est assez sous-estimé. Sur la base des isohyètes interannuelles, nous avons corrigé les données mensuelles du coefficient 1.22, ce qui aboutit à une estimation de la pluviométrie interannuelle sur le bassin (2 200 mm), plus vraisemblable.

### 5.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

Les coefficients de corrélation simple entre lames mensuelles (ou débits mensuels) et précipitations mensuelles et débits antérieurs ont été établis.

Tableau 5.24.

Coefficients de corrélation

| Hi ou Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .60 | .81 | .79 | .82 | .96 | (.08) | .49 | .56 | (.19) | .71 | (.28) | .56 |
| Pi - 1 | (.39) | (.19) | -. 03 | .53 | (.25) | .80 | (.13) | .62 | (.12) | (.33) | .70 | (.45) |
| Qi - 1 | .68 | .47 | (.16) | .59 | (.11) | .85 | .88 | .83 | .59 | .48 | .83 | .78 |

Le graphe 5.11. situe les points représentatifs des liaisons mensuelles.

De décembre à mars, le facteur principal (Pi) est mis en évidence avec une influence secondaire assez forte de la précipitation (ou débit) antérieur. Avril est bien déterminé par le débit de mars (ou bien par le cumul des précipitations antérieures de saison des pluies). Mai, juin et juillet, de même que septembre à novembre, sont caractérisés par une influence prédominante du débit antérieur avec un poids sensible des précipitations

du mois (secteur III). Le mois d'août (secteur II) traduit une forte influence de la précipitation mensuelle (tendance pseudo-équatoriale).

Les modèles linéaires multiples suivants ont pu être calculés (tableau 5.25.).

figure 5.11.

Vohitra à Rogez

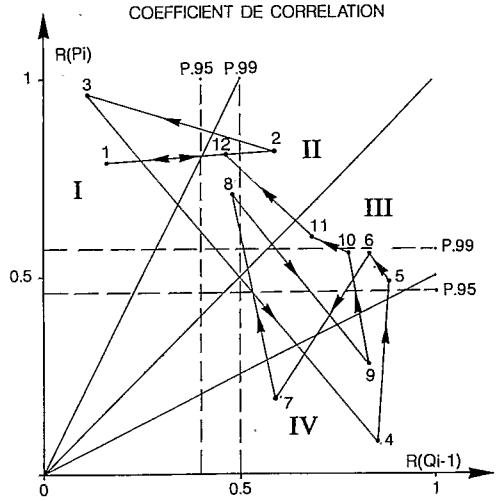



Tableau 5.25.

| | |
|---|---|
| H11 = .12 P11 + .995 H10 - 17.5 | ($R^2$ = .74 P > .995) |
| H12 = .185 P12 + .16 P1110 + 1.4 | ($R^2$ = .75 P > .995) |
| H01 = .43 P01 - 16.5 | ($R^2$ = .77 P > .99) |
| H02 = .62 P02 + .24 P01 - 127 | ($R^2$ = .80 P > .995) |
| H03 = .74 P03 + .60 P02011211 - 253 | ($R^2$ = .96 P >.995) |
| H04 = .53 P03020112 - 79 | ($R^2$ = .75 P > .995) |
| Q05 = .39 Q04 + .11 P05 + 13.6 | ($R^2$ = .82 P > .995) |
| Q06 = .66 Q05 + .16 P06 + 3.1 | ($R^2$ = .87 P > .995) |
| Q07 = .51 Q06 + .13 P07 + 14.6 | ($R^2$ = .37 P > .99) |
| Q08 = .78 Q07 + .22 P08 - 6.9 | ($R^2$ = .74 P > .995) |
| Q09 = .56 Q08 + .13 P09 + 5.1 | ($R^2$ = .73 P > .995) |
| Q10 = .58 Q09 + .09 P10 + 3.9 | ($R^2$ = .79 P > .995) |

* Hauteurs dans le système de l'ancienne échelle

Ces relations ont permis de calculer les débits mensuels de mai à octobre 1976. Ceux de février à juin 1977 et de octobre à décembre 1978 ont été évalués à partir des débits observés à la station amont d'ANKORAHOTRA (cf. infra).

Les graphes 5.12., 5.13. et 5.14. représentent respectivement les débits moyens mensuels caractéristiques et les hydrogrammes annuels en année humide (1972-73, Q = 110 m³/s) et sèche (1977-78, Q = 42.6 m³/s).

## 5.1.2. Apports annuels

Lames annuelles écoulées et précipitations annuelles (corrigées) sont reliées par la relation suivante :

H = .91 (P - 945) ($R^2$ = .66 P > .995)

Tableau 5.26.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1256602509 Rogez
Rivière : Vohitra
Pays : Madagascar
Bassin : Rianila

Latitude : 18.48.00
Longitude : 48.36.00
Aire : 1 910 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1951/52 | - | - | - | - | - | - | 95.0 | 98.0 | 69.4 | 81.5 | 54.2 | 44.4 | - |
| 1952/53 | 59.8 | 54.5 | 49.9 | 51.3 | 78.1 | 58.6 | 40.2 | 51.7 | 45.4 | 65.1 | 59.4 | 44.0 | 54.8 |
| 1953/54 | 40.0 | 57.6 | 228 | 80.6 | 70.6 | 57.6 | 49.6 | 71.2 | 52.9 | 48.0 | 38.4 | 30.7 | 68.9 |
| 1954/55 | 30.7 | 54.5 | 66.8 | 68.6 | 110 | 63.9 | 50.1 | 56.0 | 60.4 | 47.2 | 39.0 | 30.2 | 56.4 |
| 1955/56 | 28.0 | 54.4 | 221 | 385 | 154 | 109 | 80.6 | 71.1 | 53.1 | 44.1 | 34.9 | 26.3 | 104 |
| 1956/57 | 38.8 | 57.4 | 40.9 | 89.9 | 77.5 | 87.3 | 59.9 | 49.1 | 44.7 | 40.2 | 41.0 | 25.9 | 54.1 |
| 1957/58 | 22.7 | 55.0 | 56.0 | 76.2 | 141 | 49.7 | 41.6 | 56.3 | 57.7 | 57.4 | 36.4 | 37.5 | 57.3 |
| 1958/59 | 46.6 | 65.7 | 137 | 77.9 | 654 | 210 | 95.4 | 72.8 | 88.3 | 70.6 | 50.6 | 47.0 | 136 |
| 1959/60 | 73.7 | 48.5 | 114 | 81.9 | 74.0 | 51.3 | 38.4 | 54.2 | 48.8 | 41.3 | 36.2 | 27.7 | 57.4 |
| 1960/61 | 25.7 | 52.7 | 47.7 | 32.3 | 34.8 | 32.9 | 25.5 | 22.9 | 52.3 | 80.3 | 48.7 | 28.1 | 40.5 |
| 1961/62 | 45.1 | 105 | 62.9 | 154 | 57.5 | 40.9 | 35.9 | 37.6 | 56.7 | 47.5 | 40.7 | 39.5 | 59.7 |
| 1962/63 | 27.3 | 35.9 | 117 | 100 | 166 | 85.7 | 34.1 | 32.3 | 41.6 | 38.6 | 38.8 | 25.1 | 61.7 |
| 1963/64 | 44.0 | 74.9 | 42.4 | 59.9 | 237 | 68.9 | 53.7 | 57.2 | 67.2 | 73.6 | 71.0 | 62.0 | 76.2 |
| 1964/65 | 61.2 | 75.1 | 139 | 137 | 145 | 86.2 | 55.1 | 43.4 | 52.7 | 77.5 | 53.3 | 41.3 | 80.3 |
| 1965/66 | 53.9 | 95.8 | 78.9 | 97.1 | 72.0 | 53.6 | 47.3 | 47.0 | 56.6 | 56.5 | 44.8 | 33.3 | 61.2 |
| 1966/67 | 28.7 | 50.5 | 88.9 | 81.8 | 86.9 | 64.0 | 52.2 | 56.9 | 63.6 | 81.6 | 74.9 | 46.8 | 64.7 |
| 1967/68 | 77.0 | 93.8 | 181 | 130 | 101 | 64.1 | 50.5 | 40.3 | 56.3 | 44.0 | 33.1 | 27.1 | 74.8 |
| 1968/69 | 35.1 | 81.2 | 80.2 | 87.4 | 54.4 | 59.9 | 39.7 | 40.2 | 49.0 | 85.4 | 56.5 | 38.1 | 58.8 |
| 1969/70 | 34.7 | 77.2 | 107 | 102 | 81.6 | 120 | 75.9 | 67.1 | 66.1 | 87.0 | 57.2 | 41.0 | 76.3 |
| 1970/71 | 40.4 | 40.9 | 162 | 158 | 88.1 | 65.4 | 62.7 | 46.9 | 66.8 | 55.9 | 48.7 | 37.3 | 72.3 |
| 1971/72 | 48.9 | 64.0 | 72.8 | 239 | 204 | 95.0 | 65.0 | 49.6 | 61.5 | 40.1 | 32.9 | 44.8 | 84.3 |
| 1972/73 | 41.8 | 74.9 | 237 | 255 | 225 | 119 | 75.3 | 73.7 | 63.0 | 70.5 | 50.0 | 38.9 | 110 |
| 1973/74 | 28.7 | 34.1 | 109 | 109 | 95.5 | 97.0 | 72.2 | 63.7 | 80.3 | 66.4 | 50.1 | 41.3 | 70.4 |
| 1974/75 | 45.2 | 63.5 | 62.8 | 83.3 | 209 | 95.3 | 65.7 | 57.1 | 48.8 | 57.8 | 43.9 | 35.5 | 72.4 |
| 1975/76 | 47.4 | 93.3 | 164 | 115 | 93.4 | 80.5 | (54.7) | (53.1) | (56.7) | (58.5) | (45.7) | (36.1) | (74.8) |
| 1976/77 | - | - | 91.8 | (174) | (130) | (86.1) | (55.4) | (51.5) | 48.4 | 52.0 | 46.2 | 36.4 | - |
| 1977/78 | 36.4 | 41.3 | 39.6 | 39.4 | 73.0 | 52.3 | 37.4 | 45.2 | 46.7 | 36.2 | 33.0 | (30.4) | 42.6 |
| 1978/79 | (33.0) | (31.2) | 30.8 | 72.2 | 44.0 | 35.8 | 28.2 | 23.0 | 36.2 | 35.7 | 23.3 | 16.7 | 33.9 |
| 1979/80 | 21.0 | 44.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 41.3 | 62.1 | 105 | 116 | 132 | 77.4 | 54.9 | 53.2 | 56.8 | 58.6 | 45.8 | 36.2 | 69.8 |
| Ecart-type | 14.4 | 20.0 | 60.5 | 75.6 | 118 | 35.6 | 18.7 | 16.3 | 11.6 | 16.7 | 11.8 | 9.30 | |
| Max. | 77.0 | 105 | 237 | 385 | 654 | 210 | 95.4 | 98.0 | 88.3 | 87.0 | 74.9 | 62.0 | |
| Q1 | 47.4 | 75.1 | 139 | 137 | 154 | 95.0 | 65.7 | 63.7 | 63.6 | 73.6 | 53.3 | 41.3 | |
| Méd. | 40.0 | 57.4 | 88.9 | 89.9 | 93.4 | 65.4 | 52.2 | 51.7 | 56.3 | 56.5 | 44.8 | 37.3 | |
| Q3 | 28.7 | 48.5 | 56.0 | 76.2 | 73.0 | 53.6 | 39.7 | 43.4 | 48.8 | 44.0 | 36.4 | 28.1 | |
| Min. | 21.0 | 31.2 | 30.8 | 32.3 | 34.8 | 32.9 | 25.5 | 22.9 | 36.2 | 35.7 | 23.3 | 16.7 | |

Une partie de la dispersion résiduelle peut être corrigée par la prise en compte du coefficient Cp de concentration des précipitations mensuelles.

$H = .63 (P - 1\,655 (1 - 3.15\ Cp)$ $(R^2 = .89\ P > .995)$

ou $H = 1.66\ P * Cp + 248$ $(R^2 = .88\ P > .995)$

Nota : $\overline{(Cp)} = .245$

Il existe une bonne relation entre les lames annuelles de la VOHITRA et de l'IVONDRO :

$HVOHI = .86\ HIVON + 5\ R^2 = .85\ P > .995)$

Ces relations ont permis l'estimation des lames écoulées de 1949-50 à 1951-52 d'après P et Cp, de 1976-77 et de 1979-80 à 1982-83 d'après l'IVONDRO. Nous disposons ainsi d'un échantillon de trente-quatre valeurs annuelles observées ou calculées dont les quantiles calculés d'après l'ajustement statistique sont les suivants :

Tableau 5.26. bis

Vohitra à Rogez
Quantiles

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| H mm | 592 | 675 | 755 | 863 | 1105 | 1402 | 1583 | 1749 | 1954 |
| Q (m³/s) | 35.8 | 40.9 | 45.7 | 52.2 | 66.9 | 84.9 | 95.8 | 106 | 118 |
| q (l/s/km²) | 18.7 | 21.4 | 23.9 | 27.3 | 35.0 | 44.5 | 50.2 | 55.5 | 61.8 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 4.73, échelle : 1289 mm, position : - 185 mm, forme : .246).
Centennales sèche et humide : 542 mm (Q = 32.8 m³/s) et 2103 mm (Q = 127 m³/s).

figure 5.12.

Vohitra à Rogez

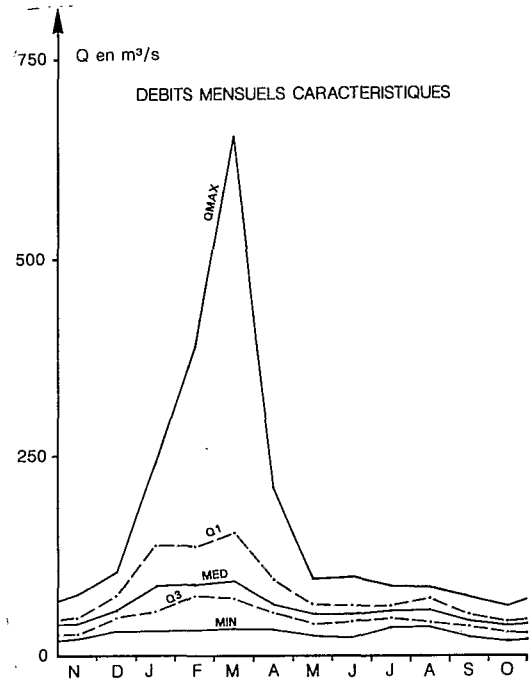


figure 5.13.

Vohitra à Rogez

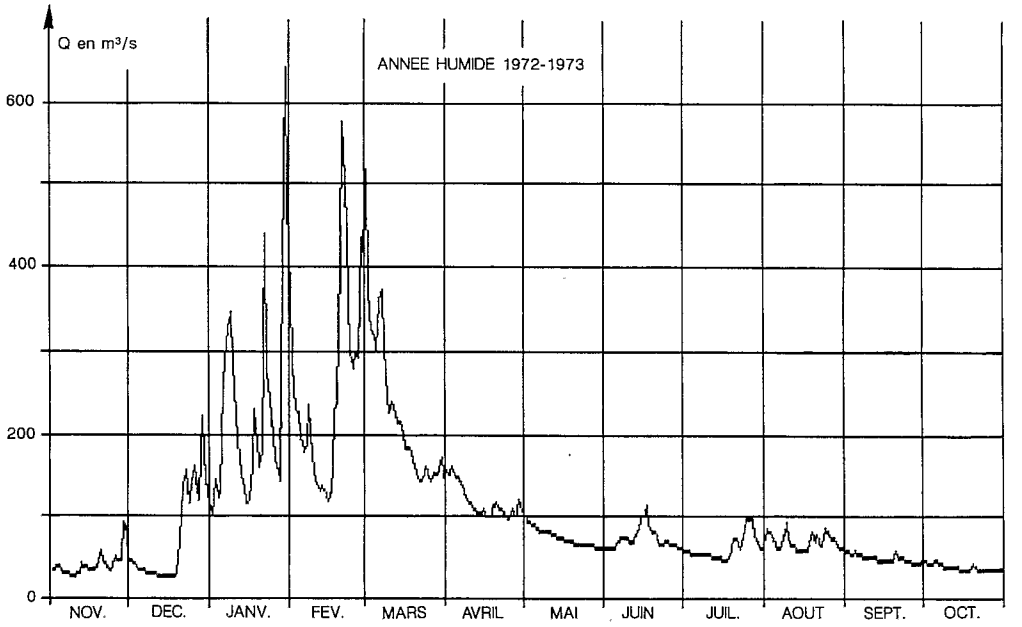
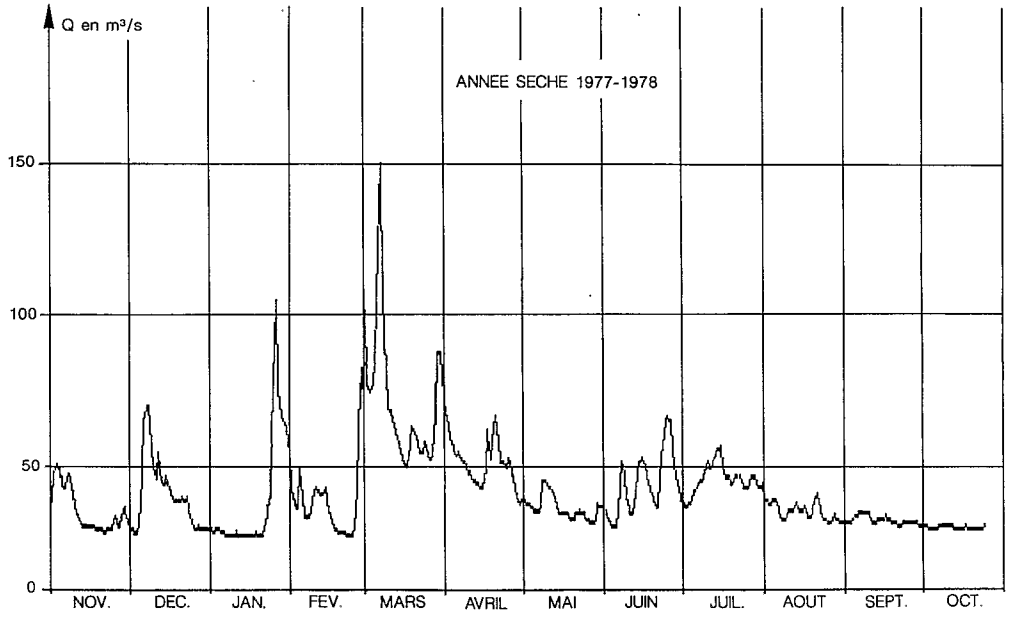



figure 5.14.

Vohitra à Rogez



## 5.1.3. Crues

### 5.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

Les conditions hydrauliques (chute de MERENA) permettent l'évaluation correcte des débits de très hautes eaux.

L'extrapolation de type logarithmique est importante (de 902 à 6090 m3/s pour des cotes allant de 5,65 à 13,46 m) et s'appuie essentiellement sur les résultats de jaugeages de la campagne 1971-72.

### 5.1.3.2. Résultats de l'enquête historique

Les premières mesures remontent à 1926 (jaugeages de la mission CANDELIER et de la SHI) mais, à part le nivellement des plus hautes eaux de l'année 1928-29, aucun relevé de 1928 à 1937 n'a été retrouvé.

Tableau 5.27.

Vohitra à Rogez
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm * | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1952-53 | 410 | 21/03/53 18h00 | 2,97 | 3rel |
| 1953-54 | 2190 | 14/01/54 18h00 | 7,40 | PHE |
| 1954-55 | 211 | 08/01/55 12h00 | 1,80 | 3rel |
| 1955-56 | 1990 | 06/02/56 12h00 | 7,07 | PHE |
| 1956-57 | 168 | 03/02/57 18h00 | 1,50 | 3rel |
| 1957-58 | 665 | 10/03/58 12h00 | 3,95 | 3rel |
| 1958-59 | 6090 | 26/03/59 21h00 | 12,46 | PHE |
| 1959-60 | 275 | 16/01/60 12h00 | 2,20 | 3rel |
| 1960-61 | 146 | 01/12/60 12h00 | 1,33 | 3rel |
| 1961-62 | 546 | 10/02/62 06h00 | 3,55 | 3rel |
| 1962-63 | 859 | 16/02/63 16h00 | 4,51 | 3rel |
| 1963-64 | (2850) | | | |
| 1964-65 | 715 | 21/01/65 15h00 | 4,10 | 3rel |
| 1965-66 | 268 | 27/12/66 12h00 | 2,16 | 3rel |
| 1966-67 | 261 | 17/01/67 06h00 | 2,12 | 3rel |
| 1967-68 | 761 | 15/01/68 06h00 | 4,23 | 3rel |
| 1968-69 | 240 | 16/04/69 06h00 | 2,00 | 3rel |
| 1969-70 | 810 | 07/04/70 12h00 | 5,37 | Lim |
| 1970-71 | 1190 | 25/01/71 19h40 | 6,38 | Lim |
| 1971-72 | 2010 | 14/02/72 11h15 | 8,10 | Lim |
| 1972-73 | 1730 | 19/02/7 21h40 | 7,55 | Lim |
| 1973-74 | 722 | 4,12 | Lim | |
| 1974-75 | 3400 | 13/03/75 9,25 | Lim | |
| 1975-76 | 698 | 22/01/76 18h00 | 5,05 | Min |
| 1976-77 | 1080 | 27/02/7 12h00 | 6,13 | 3rel |
| 1977-78 | 166 | 07/03/78 12h00 | 2,48 | 3rel |
| 1978-79 | 211 | 07/02/79 12h00 | 2,80 | Min |

*Hauteurs dans le système de l'ancienne échelle

L'extension de l'échantillon de crues a toutefois été permis après :

- recalage des relevés anciens des périodes 1936-1945 et 1948-1952 ;
- évaluation des maximums de la période 1945-1948 (relation entre pluies maximales de 48 h à ROGEZ et débits maximums).

La valeur du débit maximal de crue du cyclone de mars 1959 (PHE = 12.46 AE ou 13.46 NE70) est approchée, car en limite de l'extrapolation de la courbe d'étalonnage. Le débit est très probablement nettement supérieur à 5 000 m³/s.

Les plus fortes crues sont liées à des épisodes dépressionnaires (1956 : TAMATAVE, 1959 : MANANARA nord, 1964 : HARRIET, 1972 : EUGENIE, 1975 : INES, etc.).

Les débits maximaux sont observés, une année sur deux, entre le 16 janvier et le 27 février (date médiane : 5 février, dates extrêmes : 1er décembre et 16 avril).

Par ajustement d'une Gamma-incomplète à l'échantillon des 43 valeurs observées ou estimées, les valeurs des quantiles sont ainsi estimées.

Tableau 5.27.bis

Vohitra à Rogez
Débits de crue antérieurs à 1952-53

| Année | Hm | Qm³ | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1928-29 | 6,40 | 1650 | PHE |
| 1936-37 | 5,97 | 1440 | rel |
| 1937-38 | 4,60 | 890 | rel |
| 1938-39 | 2,39 | 308 | rel |
| 1939-40 | 4,50 | 855 | rel |
| 1940-41 | 2,28 | 289 | rel |
| 1941-42 | 1,57 | 178 | rel |
| 1942-43 | 5,00 | 1030 | rel |
| 1943-44 | 3,02 | 420 | rel |
| 1944-45 | 5,23 | 1130 | rel |
| 1945-46 | | (900) | |
| 1946-47 | | (3100) | |
| 1947-48 | | (200) | |
| 1948-49 | 7,60 | 2310 | rel |
| 1949-50 | 6,40 | 1650 | Lim |
| 1950-51 | 5,10 | 1070 | Lim |
| 1951-52 | 2,04 | 247 | rel |

Tableau 5.28.

Vohitra à Rogez
Débits maximaux de crue

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 678 | 1690 | 2530 | 4570 | (5470) |
| q l/s/km² | 355 | 885 | 1325 | 2390 | (2860) |

La crue de 1959 aurait une période de retour d'environ 150 ans.

## 5.1.4. Basses eaux

### 5.1.4.1. Tarissement

Bien que la courbe des débits journaliers soit très souvent perturbée par les recharges et crues de saison sèche, il est possible de définir les droites enveloppes des débits les plus faibles, proches du débit de base dont les coefficients sont compris entre $\alpha$ = .0080 et .0033. Cinquante pour cent des coefficients sont compris entre .0075 et .0052 avec comme coefficient moyen :

$\alpha$ = .0060 Tc = 115 jours

Le débit initial Qo est de l'ordre de 42 m³/s (50 % des valeurs entre 38 et 51 m³/s). Les réserves drainables peuvent être ainsi évaluées à environ 320 mm (H = Qo /$\alpha$ /S * 86.4).

### 5.1.4.2. Étiages

Tableau 5.29.

Débits caractéristiques d'étiage (m³/s)

| DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 38.4 | 33.6 | 03-11-52 | 52.2 | 46.0 | 43.0 | 38.0 | 15-01-67 |
| 41.1 | 36.6 | 34.3 | 32.8 | 17-11-53 | 36.8 | 26.8 | 22.9 | 20.8 | 10-11-68 |
| 40.6 | 29.8 | 24.7 | 23.8 | 02-11-54 | 39.9 | 34.1 | 31.5 | 25.7 | 30-11-69 |
| 38.9 | 28.6 | 25.3 | 23.7 | 18-11-55 | 48.8 | 36.0 | 31.1 | 28.7 | 25-12-70 |
| 40.9 | 26.1 | 21.5 | 20.3 | 15-11-56 | 46.0 | 36.7 | 33.0 | 31.4 | 13-11-71 |
| 35.3 | 23.4 | 21.5 | 20.3 | 29-11-57 | 39.1 | 30.1 | 27.5 | 25.7 | 08-10-72 |
| 39.4 | 34.4 | 29.3 | 25.2 | 11-01-58 | 45.5 | 29.2 | 25.5 | 24.3 | 30-11-73 |
| 57.2 | 44.3 | 41.3 | 38.8 | 15-10-59 | 50.4 | 39.9 | 36.0 | 32.0 | 04-12-74 |
| 34.8 | 24.7 | 21.5 | 20.6 | 20-11-60 | 44.8 | 34.2 | 29.2 | 28.1 | 08-11-75 |
| 25.7 | 21.9 | 20.6 | 19.3 | 07-11-61 | | | | | |
| 34.6 | 24.7 | 20.7 | 19.2 | 25-12-62 | | | 28.5 | 25.6 | 14-01-78 |
| 34.0 | 28.9 | 24.4 | 22.3 | 30-10-63 | | | 17.5 | 17.1 | 29-12-78 |
| 49.6 | 41.6 | 35.7 | 31.3 | 04-02-64 | 21.1 | 17.0 | 15.6 | 14.1 | 02-11-79 |
| 47.5 | 39.7 | 36.5 | 33.8 | 13-07-65 | | | | | |
| 38.0 | 28.5 | 24.9 | 20.6 | 07-12-66 | | | | | |
| 57.2 | 46.0 | 43.0 | 40.0 | 14-01 | ← Max. | | | | |
| 46.8 | 36.7 | 34.3 | 32.0 | 30-11 | ← Q1 | | | | |
| 40.2 | 30.0 | 27.5 | 25.7 | 15-11 | ← Méd. | | | | |
| 36.0 | 26.4 | 21.5 | 20.6 | 02-11 | ← Q3 | | | | |
| 21.1 | 17.0 | 15.6 | 14.1 | 11-01 | ← Min. | | | | |

Sur vingt-sept années, les débits d'étiage ont été observés trois fois en saison des pluies (janvier-février) et une fois en juillet. Mais dans 50 % des cas, l'étiage est observé en novembre (date médiane : 15 novembre).

Entre débits caractéristiques et étiage minimal, nous avons les relations suivantes :

DCE = 1.11 QJmin - 5 ($R^2$ = .97 P > .995) DCE/QJmin = 1.09

DC11 = 1.125 QJmin + 2.7 ($R^2$ = .94 P > .995) DC11/QJmin = 1.23

DC9 = 1.145 QJmin + 11.3 ($R^2$ = .79 P > .995) DC9/QJmin = 1.58

Entre le débit d'étiage minimal QJmin, le débit moyen d'octobre Q10 et le temps T séparant la date de l'étiage du 1er octobre, il est possible d'établir la relation suivante :

$QJMIN = 1.88\ Q10^{.815} * e^{(-.08T)}$ ($R^2$ = .73 P > .995)

QJmin est également en bonne corrélation avec le débit d'avril ou la somme des précipitations de décembre à mars (SP 1203) et la somme des précipitations de juillet à octobre (SP 0710).

QJmin = .13 Q04 + .047 SP 0710 ($R^2$ = .63 P > .995)

QJmin = .013 SP 1203 + .04 SP 0710 - 4.9 ($R^2$ = .56 P > .995)

Les quantiles de la distribution statistique sont les suivants (tableau 5.30.) :

Tableau 5.30.

Vohitra à Rogez
Quantiles de QJmin

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Q ($m^3/s$) | 14.7 | 16.5 | 18.2 | 20.5 | 25.3 | 31.0 | 34.3 | 37.3 | 40.8 |
| q ($l/s/km^2$) | 7.7 | 8.6 | 9.5 | 10.7 | 13.2 | 16.2 | 18.0 | 19.5 | 21.4 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 1.97, échelle : 33.2 $m^3/s$, position : - 7.87 $m^3/s$, forme : .187).
Centennales sèche et humide : 13.6 $m^3/s$ (7.1 $l/s/km^2$) et 43.4 $m^3/s$ (22.7 $l/s/km^2$).

## 5.1.5. Bilan hydrologique et mécanismes

Sur la période 1949-1982, la lame écoulée moyenne : 1 145 mm pour une pluviométrie interannuelle estimée à 2 200 mm correspond à un déficit d'écoulement DE = 1 055 mm (Ke = 52 %).

Les bilans hydrologiques mensuels et annuel sont présentés dans le tableau 5.31. (graphe 5.15.).

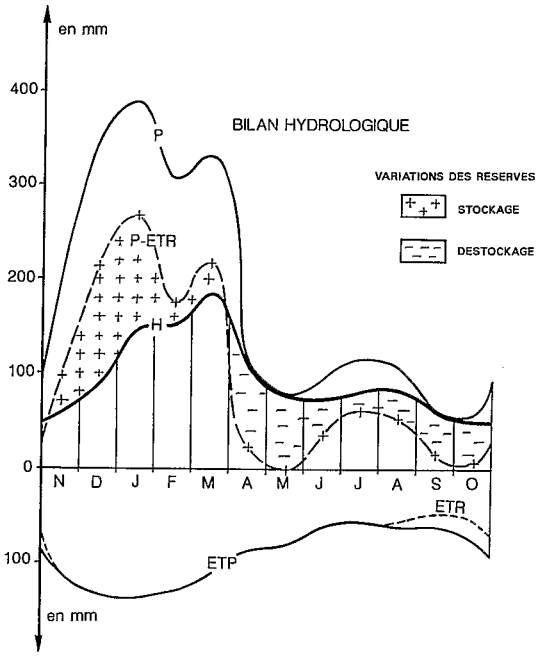



figure 5.15.

Vohitra à Rogez

Tableau 5.31.

Vohitra à Rogez
Bilan hydrologique (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 206 | 348 | 390 | 305 | 331 | 108 | 77 | 95 | 116 | 108 | 60 | 56 | 2200 |
| ETP | 110 | 135 | 135 | 130 | 115 | 85 | 80 | 60 | 55 | 60 | 60 | 75 | 1100 |
| ETR | 110 | 135 | 135 | 130 | 115 | 85 | 80 | 60 | 55 | 55 | 45 | 50 | 1055 |
| P-ETR | 96 | 213 | 255 | 175 | 216 | 23 | -3 | 35 | 61 | 53 | 15 | 6 | 1145 |
| H | 56 | 86 | 146 | 148 | 184 | 104 | 76 | 72 | 79 | 82 | 62 | 50 | 1145 |
| ΔR+ | 40 | 127 | 109 | 27 | 32 | | | | | | | | + 335 |
| ΔR- | | | | | | 81 | 79 | 37 | 18 | 29 | 47 | 44 | - 335 |
| R | 40 | 167 | 276 | 303 | 335 | 254 | 175 | 138 | 120 | 91 | 44 | 0 | |

De novembre à mars (saison des pluies), les précipitations cumulées (1 580 mm, soit 72 % du total annuel), après satisfaction de l'ETP (625 mm) et de l'écoulement (620 mm soit 54 % de la lame écoulée annuelle), permettent le stockage dans les altérites d'une réserve drainable équivalente à 335 mm. Cette valeur est très voisine de la valeur calculée d'après Qo et $\alpha$ (cf. 5.1.4.).

Le drainage de cette réserve alimente, avec le concours des précipitations de saison "sèche" (soit 190 mm, essentiellement en juillet et août), les écoulements d'avril à octobre : 525 mm. On notera ainsi l'amorce d'une seconde petite saison des pluies (tendance pseudo-équatoriale). L'ETR ne marque une légère réduction sur l'ETP qu'en fin de saison "sèche" (septembre-octobre).

## 5.2. La Rianila à Brickaville (Ampasimanolotra)

La station de BRICKAVILLE (ou VOHIBINANY) (18°49'S - 49°04'E) contrôle la majeure partie du bassin de la RIANILA (à l'exception du bassin de son affluent rive droite (la IAROKA), soit près de 6 000 km².

Elle est située à environ 25 km de l'océan, à une altitude voisine de 1 m et subit l'influence de la marée.

L'échelle a été installée en octobre 1951 et les observations ont été effectuées jusqu'en 1969, date à laquelle la station a été abandonnée en raison de l'impossibilité de contrôler les débits de basses eaux. Les observations du 20 mars à juillet 1959 sont incomplètes (très forts débits).

Trente-huit jaugeages (entre 50 et 1 270 m³/s) ont été effectués et permettent de tracer les courbes d'étalonnage, approximatives pour les basses eaux et très extrapolées jusqu'à plus de 9 100 m3/s pour les forts débits. Les observations de débits sont en général de qualité assez moyenne et très approchées pour les hautes eaux.

La pluviométrie du bassin est assez mal déterminée en raison de l'absence de postes sur le bassin de la RIANILA en amont du confluent de la VOHITRA. Le calcul (THIESSEN) effectué à partir des postes situés en périphérie fournit une valeur (2 180 mm) nettement trop faible. Nous avons corrigé les valeurs mensuelles d'un coefficient (1,33) attribuant à la pluviométrie moyenne une valeur (2 900 mm) plus vraisemblable.

### 5.2.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

Tableau 5.32

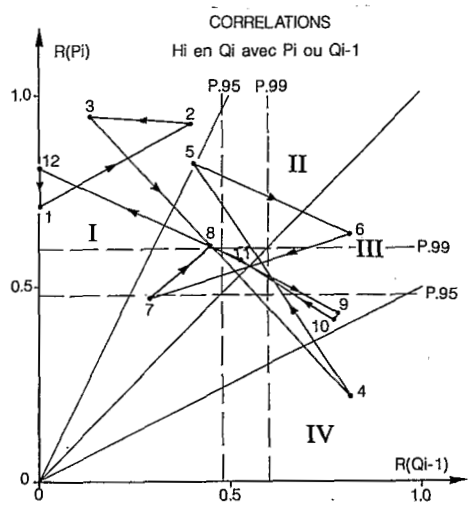
Vohitra à Rogez
Coefficients de corrélation

| Hi ou Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .57 | .81 | .71 | .93 | .95 | (.22) | .83 | .64 | .48 | .61 | (.43) | (.42) |
| Pi - 1 | (.18) | (.06) | (.17) | .57 | (.21) | .81 | (.41) | .69 | (.20) | (.20) | (.52) | (.36) |
| Qi - 1 | .52 | -.14 | -.07 | (.40) | .13 | .81 | (.40) | .81 | (.29) | (.44) | .78 | .77 |

Les points représentatifs des liaisons mensuelles sont situés sur le graphe 5.16.

figure 5.16.

Rianila à Brickaville




De décembre à mars, l'influence de la précipitation mensuelle est prédominante. Avril, mois de transition, est déterminé par la pluviométrie de mars (où le débit de mars). De mai à novembre, débits antérieurs et précipitation du mois pèsent à peu près du même poids (secteur II et III).

Tableau 5.33.

| | |
|---|---|
| Décembre à mars | |
| Hi = .76 Pi + .29 $P_{i-1}$ - 193 | ($R^2$ = .84 P > .995) |
| H12 = .33 P12 + 10 | ($R^2$ = .66 P > .995) |
| H01 = .59 P01 + .31 P12 - 161 | ($R^2$ = .67 P > .99) |
| H02 = .75 P02 + .31 P01 - 191 | ($R^2$ = .97 P > .995) |
| H03 = .88 P03 + .16 P02 - 159 | ($R^2$ = .92 P > .995) |
| Mai à août | |
| Hi = .49 Pi + .41 $H_{i-1}$ -11 | ($R^2$ = .74 P > .995) |
| Septembre à novembre | |
| Hi = .58 $H_{i-1}$ + .23 Pi + 1 | ($R^2$ = .60 P > .995) |

Les débits moyens mensuels de janvier 1952, avril à juillet 1959, juin à octobre 1968, ont été calculés à partir des débits moyens mensuels de la VOHITRA à ROGEZ au moyen des relations suivantes :

Pour QROGEZ > 50 m³/s (novembre à avril) QBRICK = 4.82 QROGEZ + 6.1 ($R^2$ = .87 P > .995)

Pour QROGEZ ≤ 50 m³/s (mai à octobre) QBRICK = 6.70 QROGEZ - 80 ($R^2$ = .67 P > .995)

Le débit moyen de mars 1959 a été estimé d'après les observations du gestionnaire.

Le tableau 5.34. présente des débits moyens mensuels observés ou reconstitués de novembre 1951 à novembre 1968.

Tableau 5.34.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1256600105 Brickaville
Rivière : Rianila
Pays : Madagascar
Bassin : Rianila

Latitude : 18.48.00
Longitude : 48.04.00
Aire : 6 000 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1951/52 | 325 | 169 | (557) | 493 | 478 | 341 | 977 | 689 | 355 | 353 | 317 | 318 | (448) |
| 1952/53 | 364 | 313 | 257 | 230 | 365 | 316 | 191 | 367 | 227 | 342 | 357 | 209 | 295 |
| 1953/54 | 106 | 115 | 919 | 323 | 322 | 293 | 269 | 434 | 284 | 348 | 235 | 223 | 323 |
| 1954/55 | 312 | 240 | 346 | 314 | 702 | 280 | 159 | 278 | 416 | 250 | 236 | 148 | 307 |
| 1955/56 | 115 | 374 | 777 | 1970 | 866 | 386 | 476 | 383 | 294 | 248 | 164 | 162 | 537 |
| 1956/57 | 221 | 399 | 276 | 507 | 428 | 654 | 363 | 246 | 227 | 217 | 205 | 161 | 324 |
| 1957/58 | 169 | 314 | 332 | 446 | 784 | 378 | 247 | 339 | 337 | 362 | 210 | 251 | 347 |
| 1958/59 | 223 | 298 | 584 | 514 | (3160) | (1020) | (466) | (357) | (432) | 284 | 187 | 148 | (643) |
| 1959/60 | 375 | 148 | 582 | 330 | 219 | 160 | 78.1 | 199 | 176 | 128 | 118 | 107 | 218 |
| 1960/61 | 87.2 | 159 | 157 | 83.3 | 112 | 126 | 90.2 | 72.8 | 371 | 276 | 213 | 88.6 | 154 |
| 1961/62 | 134 | 693 | 447 | 688 | 381 | 155 | 244 | 100 | 220 | 142 | 73.7 | 137 | 283 |
| 1962/63 | 160 | 124 | 267 | 554 | 836 | 448 | 186 | 215 | 165 | 147 | 107 | 71.4 | 272 |
| 1963/64 | 174 | 387 | 165 | 200 | 1200 | 322 | 227 | 287 | 347 | 359 | 393 | 309 | 366 |
| 1964/65 | 245 | 334 | 561 | 576 | 948 | 455 | 262 | 202 | 256 | 415 | 215 | 172 | 386 |
| 1965/66 | 289 | 401 | 329 | 546 | 517 | 254 | 257 | 245 | 331 | 287 | 218 | 204 | 322 |
| 1966/67 | 235 | 276 | 317 | 384 | 432 | 314 | 254 | 283 | 276 | 377 | 370 | 235 | 312 |
| 1967/68 | 251 | 335 | 1030 | 479 | 498 | 296 | 205 | (190) | (277) | (215) | (142) | (102) | (335) |
| 1968/69 | 207 | - | - | - | - | - | - | 224 | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 222 | 299 | 465 | 508 | 720 | 382 | 291 | 284 | 294 | 279 | 221 | 179 | 345 |
| Ecart-type | 86.9 | 141 | 263 | 407 | 690 | 221 | 207 | 138 | 77.8 | 88.2 | 92.3 | 72.1 | |
| Max. | 375 | 693 | 1030 | 1970 | 3160 | 1020 | 977 | 689 | 432 | 415 | 393 | 318 | |
| Q1 | 289 | 381 | 583 | 550 | 851 | 452 | 316 | 357 | 351 | 356 | 277 | 229 | |
| Méd. | 222 | 313 | 339 | 479 | 498 | 316 | 247 | 262 | 284 | 284 | 213 | 162 | |
| Q3 | 160 | 164 | 271 | 318 | 373 | 267 | 188 | 202 | 227 | 216 | 153 | 122 | |
| Min. | 87.2 | 115 | 157 | 83.3 | 112 | 126 | 78.1 | 72.8 | 165 | 128 | 73.7 | 71.4 | |

Les graphes 5.17., 5.18. et 5.19. représentent les débits mensuels caractéristiques et les hydrogrammes représentatifs d'une année humide (1955-56) et d'une année sèche (1962-63).

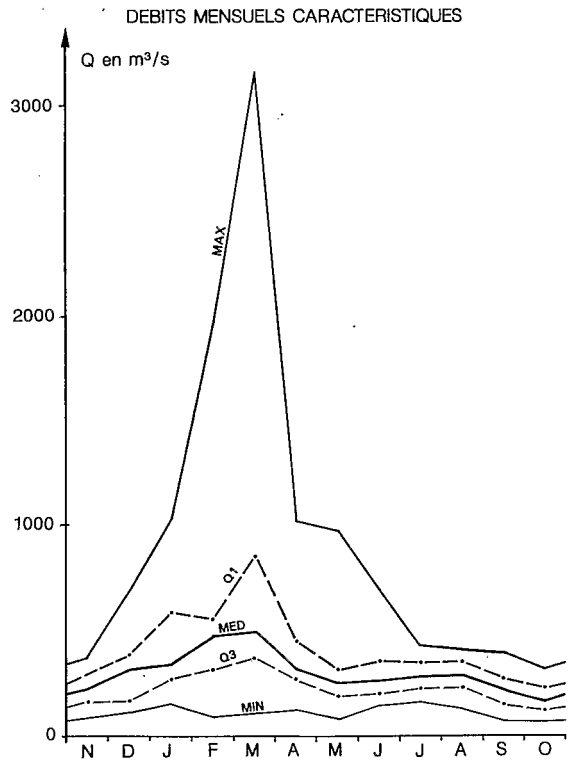



figure 5.17.

Rianila à Brickaville

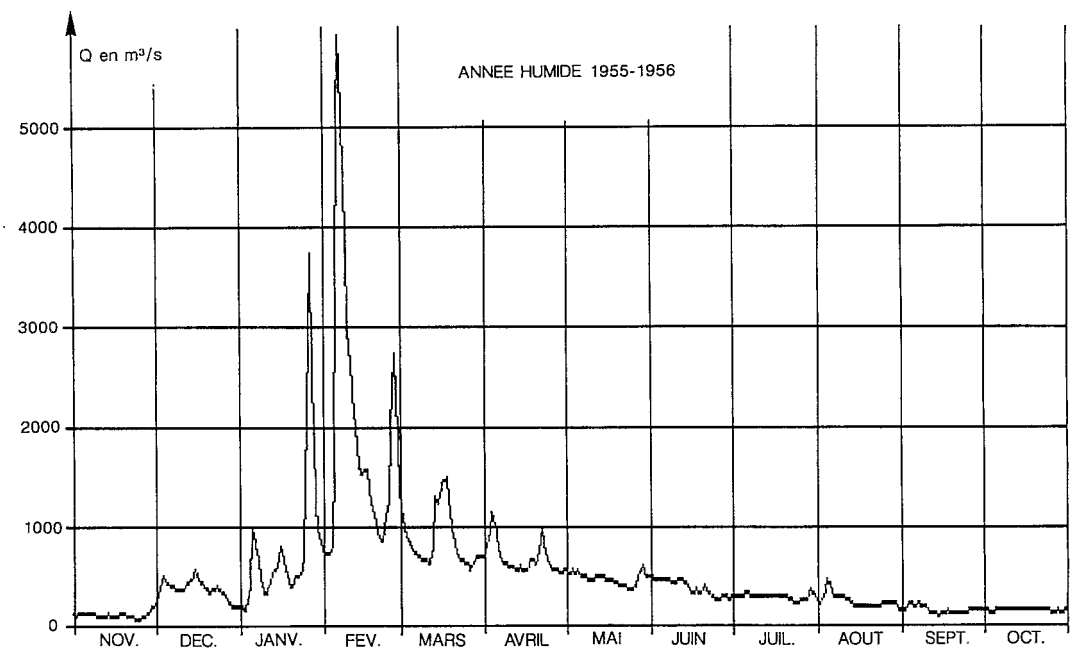
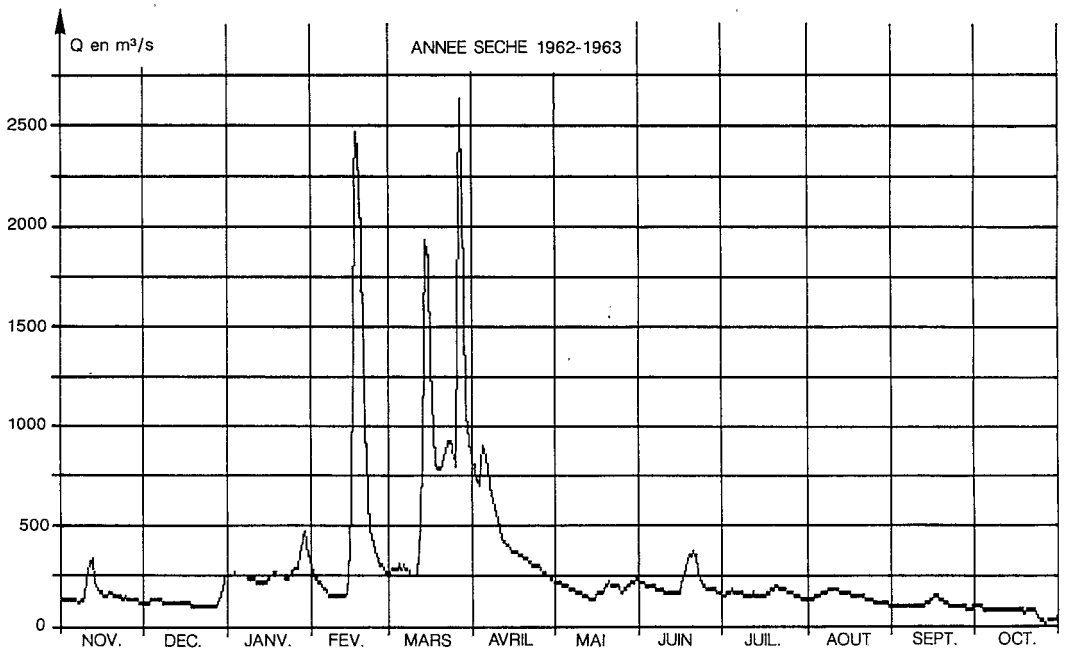



figure 5.18.

Rianila à Brickaville

figure 5.19.

Rianila à Brickaville




## 5.2.2. Apports annuels

Entre les dix-sept valeurs concommittantes (lames écoulées et précipitations annuelles corrigées), il est possible d'établir la relation suivante :

$H = 1.21 (P - 1383)$ $(R^2 = .75\ P > 995)$ $H = 6.10^{-4\ P\ 1.87}$ $(R^2 = .79\ P > 995)$

Cette relation n'est que faiblement améliorée par la prise en compte du coefficient de concentration des pluies mensuelles $Cp.\overline{(Cp)} = .21)$

$H = 1.02 (P - 1620 (1 - 1.55\ \overline{(Cp)}))$ $(R^2 = .82\ P > .995)$

Les lames écoulées de la RIANILA sont bien corrélées avec celles de la VOHITRA à ROGEZ et de l'IVONDRO à RINGA-RINGA.

$H_{BRICK} = 1.52\ H_{ROGEZ} + 48$ $(R^2 = .90\ P > .995)$ $H_{BRICK} = 1.51\ H_{RINGA} - 7$ $(R^2 = .85\ P > .995)$

Ces relations ont permis de calculer les lames écoulées de 1949-50 (H = 1 520 mm, Q = 289 m³/s) et de 1950-51 (H = 2430 mm, Q = 462 m³/s) à partir de P et Cp et celles de 1968-69 à 1982-83 à partir des lames observées sur la VOHITRA et l'IVONDRO (tableau 5.35).

Tableau 5.35.

| Année | H (mm) | Q (m³/s) |
|---|---|---|
| 1968-69 | 1505 | 286 |
| 1969-70 | 2050 | 390 |
| 1970-71 | 1765 | 336 |
| 1971-72 | 2140 | 406 |

suite

| Année | H (mm) | Q (m³/s) |
|---|---|---|
| 1972-73 | 2825 | 537 |
| 1973-74 | 1795 | 342 |
| 1974-75 | 1965 | 374 |
| 1975-76 | 2280 | 433 |
| 1976-77 | 2415 | 459 |
| 1977-78 | 1245 | 237 |
| 1978-79 | 880 | 167 |
| 1979-80 | 1655 | 314 |
| 1980-81 | 1110 | 211 |
| 1981-82 | 2255 | 429 |
| 1982-83 | 1745 | 332 |

Les quantiles calculés à partir de l'ajustement statistique sur l'échantillon de trente-quatre valeurs observées ou calculées sont présentés dans le tableau 5.36.

Tableau 5.36.
Rianila à Brickaville
Quantiles
des apports annuels

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| H mm | 889 | 1037 | 1185 | 1378 | 1790 | 2269 | 2549 | 2797 | 3096 |
| Q (m³/s) | 169 | 197 | 225 | 262 | 340 | 431 | 485 | 532 | 589 |
| q (l/s/km²) | 28.2 | 32.8 | 37.5 | 47.7 | 56.7 | 71.8 | 80.8 | 88.7 | 98.2 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 2.90, échelle : 2 999 mm, position : - 1 208 mm, forme : .176).
Centennales sèche et humide : 783 mm (Q = 149 m³/s) et 3308 mm (Q = 629 m³/s).

## 5.2.3. Crues

### 5.2.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

Si la station présente en basses eaux une certaine instabilité (nature du lit, influence possible de la marée plus aval), bien des dispersions signalées antérieurement étaient dues à de mauvais recalages des échelles,

0,89 NGM du 8/10/1951 au -/11/1955

-0,05 NGM du -/11/1955 au 21/06/1956 (échelle SNTP)

0,87 NGM du 22/06/1956 au 29/06/1959

0,41 NGM à compter du 30/06/1959

le seul repère à considérer étant la borne TCE cotée 9,58 NGM.

L'extrapolation de type logarithmique a été menée à partir des jaugeages réalisés entre 3,08 et 4,21 NGM (correspondant respectivement à des débits de 662 et de 1 270 m³/s).

tableau 5.37.

Rianila à Brickaville
*Maximums annuels de crues*

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1951-52 | 4550 | 25/05/52 18h00 | 7,00 | 3rel |
| 1952-53 | 1620 | 13/08/53 12h00 | 3,80 | Min |
| 1953-54 | 5150 | 14/01/54 12h00 | 7,50 | PHE |
| 1954-55 | 1280 | 06/03/55 12h00 | 3,30 | 3rel |
| 1955-56 | 6120 | 27/01/56 | 9,20 | PHE |
| 1956-57 | 2210 | 07/04/57 18h00 | 4,61 | 3rel |
| 1957-58 | 2410 | 10/03/58 18h00 | 4,86 | 3rel |
| 1958-59 | > 8200 | 19/03/59 | 9,66 | PHE |
| 1959-60 | 2640 | 16/01/60 12h00 | 5,50 | 3rel |
| 1960-61 | 986 | 27/07/61 18h00 | 3,18 | 3rel |
| 1961-62 | 2500 | 10/02/52 12h00 | 5,33 | 3rel |
| 1962-63 | 3090 | 27/03/63 06h00 | 5,96 | 3rel |
| 1963-64 | 7710 | 11/03/64 12h00 | 9,82 | 3rel |
| 1964-65 | 3420 | 23/03/65 06h00 | 6,41 | 3rel |
| 1965-66 | 1430 | 16/02/66 06h00 | 4,00 | 3rel |
| 1966-67 | 991 | 25/12/66 12h00 | 3,30 | 3rel |
| 1967-68 | 2910 | 15/01/68 18h00 | 5,89 | 3rel |
| 1968-69 | | | | |
| 1969-70 | | | | |
| 1970-71 | 4570 | 22/01/71 | 7,50 | PHE |
| 1971-72 | | | | |
| 1972-73 | 5010 | | 7,87 | PHE |
| 1973-74 | | | | |
| 1974-75 | 6320 | | 8,88 | PHE |

## 5.2.3.2. Résultats de l'enquête historique

Il y a peu d'éléments sur la crue qui en 1949 a provoqué la destruction de l'ancien pont, mais il semblerait que la ruine de cet ouvrage soit plutôt due à des obstructions importantes qu'à une très forte crue.

La crue de 1972 aurait été du même ordre de grandeur que celle de 1973 (5 000 m³/s).

Entre les plus fortes valeurs concomitantes des débits maximaux de crue observés à ROGEZ et BRICKAVILLE, il est possible d'établir graphiquement une relation d'expression :

QMAX (BRICK) = 1.67 QMAX (ROG) + 2000

Cette relation permet d'évaluer très sommairement les valeurs maximales de 1959 (lectures interrompues dès le 20 mars pour un débit probablement dépassé de 8200 m³/s) et de 1969 à 1979.

| Date | Qmax |
|---|---|
| 26.03.59 | 11 à 12 000 m³/s |
| 1969 | 2 400 m³/s |
| 1970 | 3 350 m³/s |
| 1974 | 3 200 m³/s |
| 1976 | 3 150 m³/s |
| 1977 | 3 800 m³/s |
| 1978 | 2 300 m³/s |
| 1979 | 2 350 m³/s |

L'ajustement d'une loi de Pearson III à l'échantillon des 17 valeurs observées (1951-68) fournit les quantiles suivants :

tableau 5.38.

Rianila à Brickaville
Débits maximaux

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 2770 | 4850 | 6340 | (9670) | (11100) |
| q l/s/km² | 462 | 810 | 1060 | (1610) | (1850) |

La prise en compte des valeurs estimées de 1969 à 1979, et d'une valeur réévaluée du maximum de 1959, donne par ajustement d'une loi de Frechet aux 28 valeurs de l'échantillon, complète, des quantiles un peu supérieurs.

tableau 5.38. bis

Rianila à Brickaville
Débits maximaux

| Période de retour - T (ans) | 2 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 3090 | 6370 | 10 200 | (12 200) |
| q l/s/km² | 515 | 1060 | 1700 | (2000) |

## 5.2.4. Basses eaux

Les débits de saison "sèche" ne présentent pas de courbe de tarissement discernable.

Les étiages observés sont présentés dans le tableau 5.39.

tableau 5.39.

Rianila à Brickaville
Débits caractéristiques d'étiage ($m^3/s$)

| Débit mensuel minimal | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 317 | | | 212 | 156 | 02-11-52 |
| 106 | 170 | 103 | 82.0 | 50.6 | 18-12-53 |
| 223 | 245 | 191 | 152 | 119 | 13-10-54 |
| 115 | 172 | 122 | 100 | 79.7 | 25-11-55 |
| 162 | 214 | 155 | 147 | 113 | 14-09-56 |
| 161 | 196 | 155 | 132 | 124 | 27-11-57 |
| 210 | 218 | 184 | 162 | 129 | 05-12-58 |
| 148 | | | 108 | 81.1 | 15-10-59 |
| 87.0 | 107 | 65.6 | 56.0 | 51.1 | 20-11-60 |
| 88.6 | 87.6 | 48.4 | 28.7 | 24.0 | 07-03-61 |
| 74.0 | 93.0 | 64.0 | 60.0 | 35.9 | 26-06-62 |
| 71.4 | 139 | 90.9 | 75.0 | 24.9 | 27-10-63 |
| 245 | 213 | 158 | 94.9 | 57.7 | 03-02-64 |
| 245 | 209 | 174 | 117 | 142 | 14-07-65 |
| 204 | 209 | 190 | 178 | 172 | 20-09-66 |
| 235 | 252 | 238 | 225 | 209 | 27-10-67 |

L'étiage apparaît généralement entre la mi-octobre et la mi-novembre mais peut être observé plus précocement (mars, juin ou juillet). Les valeurs sont approximatives en raison de la difficulté de mesurer les débits de basses eaux (influence de la marée ?).

Le débit minimal journalier est assez bien corrélé avec le débit minimal mensuel.

QJmin = .66 Qmin - 4 ($R^2$ = .77 P > .99)

Les quantiles de la distribution statistiques sont les suivants :

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q ($m^3/s$) | 23.2 | 34.5 | 50.3 | 88.5 | 140 | 174 | 207 |
| q ($l/s/km^2$) | 3.9 | 5.8 | 8.4 | 14.8 | 23.3 | 29.0 | 34.5 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 1.90, échelle : 146 $m^3/s$, position : - 57.6, forme : .36).
Cinquantennales sèche et humide : 12.1 $m^3/s$ (2.0 $l/s/km^2$) et 249 $m^3/s$ (41.5 $l/s/km^2$).

## 5.2.5. Bilan hydrologique

Pour une précipitation moyenne interannuelle évaluée à 2 900 mm, la lame écoulée interannuelle : 1 840 mm correspond à un déficit d'écoulement de 1 060 mm (Ke = 63 %).

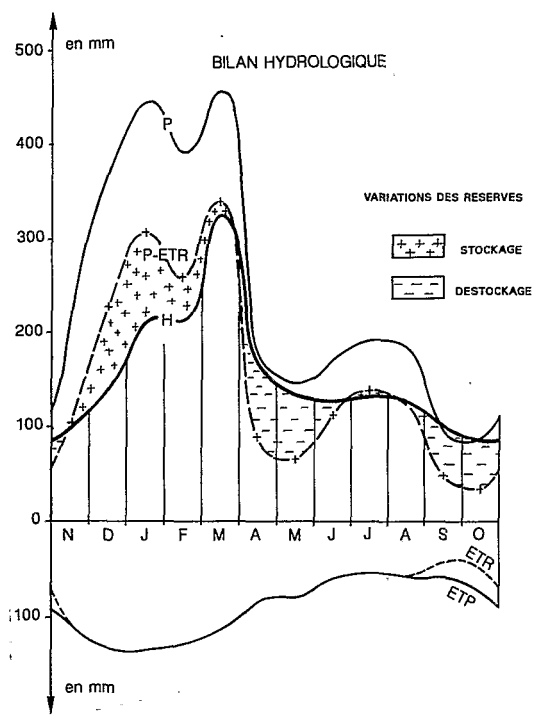
Les termes mensuel et annuel du bilan hydrologique, présentés dans le tableau 5.40. et sur le graphe 5.20., correspondent aux mécanismes suivants :

De novembre à mars, les précipitations cumulées (1 862 mm soit 64 % du total annuel) satisfont entièrement l'ETP (625 mm) et une fois déduite la lame écoulée cumulée (979 mm soit 53 % du total annuel, permettent la constitution dans les altérites d'une réserve drainable de 258 mm en fin mars (1550 $10^{-6}$ $m^3$).

La vidange de cette réserve assure environ 30 % de la lame écoulée de saison "sèche" (avril-octobre), les précipitations fournissant l'essentiel des écoulements, ce qui explique l'absence de tarissement observable.

figure 5.20.

Rianila à Brickaville




La tendance pseudo-équatoriale (petite "saison des pluies" en juillet-août) est ici assez nette puisque, sous réserve évidemment de la précision des valeurs estimées, il pourrait y avoir, certaines années, recharge partielle ou stabilisation du stock des réservoirs d'altérites en juillet et août.

L'ETR n'est réduite qu'en septembre et octobre et, sur l'année, représente environ 96 % de l'ETP.

Tableau 5.40.

Rianila à Brickaville
Bilan hydrologique (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 213 | 363 | 445 | 388 | 455 | 174 | 144 | 171 | 190 | 184 | 92 | 83 | 2900 |
| ETP | 110 | 135 | 135 | 130 | 115 | 85 | 80 | 60 | 55 | 60 | 60 | 75 | 1100 |
| ETR | 110 | 135 | 135 | 130 | 115 | 85 | 80 | 60 | 55 | 60 | 45 | 50 | 1060 |
| P-ETR | 103 | 228 | 308 | 258 | 340 | 89 | 64 | 111 | 135 | 124 | 47 | 33 | 1840 |
| H | 98 | 135 | 210 | 210 | 326 | 168 | 132 | 124 | 133 | 126 | 97 | 81 | 1840 |
| ΔR+ | 5 | 93 | 98 | 48 | 14 | | | | 2 | | | | + 260 |
| ΔR- | | | | | | 79 | 68 | 13 | | 2 | 50 | 48 | - 260 |
| R | 5 | 98 | 196 | 244 | 258 | 179 | 111 | 98 | 100 | 98 | 48 | 0 | |

## 5.3. La Vohitra à Ankorahotra

Cette station (18°38'S - 48°29'E), située sur la VOHITRA, en amont de ROGEZ, contrôle un bassin de 560 km².

Les observations et mesures ont été effectuées de mars 1977 à décembre 1979.

Ces débits mensuels sont en bonne corrélation avec ceux observés plus en aval à ROGEZ.

$QANKO = .245\ QROGEZ^{2.17}$ $(R^2 = .95 \quad P > .995)$

Tableau 5.41.

Vohitra à Ankorahotra
Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1976/77 | | | (20.3) | (42.5) | 27.9 | (16.4) | (11.5) | 11.5 | (10.8) | 11.6 | 9.22 | 7.72 | |
| 1977/78 | 7.42 | 10.0 | 8.28 | 8.13 | 16.4 | 9.43 | 9.40 | 5.99 | (8.27) | 7.10 | 5.04 | 3.50 | 8.01 |
| 1978/79 | 4.26 | 7.83 | 4.76 | 16.9 | 7.91 | 5.28 | 4.82 | (5.60) | (9.58) | 9.03 | 6.02 | (1.56) | 6.90 |
| 1979/80 | (20) | 4.45 | | | | | | | | | | | |
| Moyenne | 3.96 | 7.43 | 11.1 | 22.5 | 17.4 | 10.4 | 7.57 | 7.70 | (9.55) | 9.24 | 6.76 | 4.26 | 9.75 |

Entre parenthèses débits évalués par completement des lacunes journalières d'après ROGEZ.

À partir des résultats de la station de ROGEZ, il est possible d'évaluer le module interannuel à 14.9 m³/s et de façon approchée les quantiles suivants :

| | Décennale sèche | Médiane | Décennale humide |
|---|---|---|---|
| Q (m³/s) | 9.75 | 14.3 | 20.5 |
| Hmm | 550 | 805 | 1155 |

Pour un pluviométrie moyenne évaluée à 1 700 mm, la lame médiane (805 mm) correspond à un déficit de 900 mm environ (Ke = 47 %). La lame écoulée du bassin intermédiaire (entre les stations d'ANKORAHOTRA et ROGEZ) peut être ainsi évaluée à 1 230 mm (pour une superficie de 1 350 km²) et traduit l'augmentation sensible de la pluviométrie d'amont en aval.

## 5.4. La Vohitra à Andekaleka aval

La station d'ANDEKALEKA Aval (18°48'S - 48°57'E), est située à 3 km environ en amont du bac d'ANIVORANO, à 300 m en aval des chutes d'ANDEKALEKA, peu avant le confluent avec la RIANILA et à une altitude de 3 à 4 m. L'échelle a été installée en juin 1964 et les lectures ont été effectuées de juin 64 à mars 1973.

Trente mesures de débit (40 à 944 m³/s) ont permis d'établir une courbe d'étalonnage bien définie jusqu'à 1 000 m³/s et extrapolée jusqu'à 1 750 m³/s. Les débits sont bien liés à ceux observés en amont à ROGEZ.

La superficie du bassin est de 2 615 km².

La pluviométrie sur le bassin, estimée par la méthode de THIESSEN, est, pour les raisons exposées ci-dessus, assez mal déterminée. La pluviométrie réelle a été évaluée d'après les isohyètes régionales à 2 700 mm et les valeurs mensuelles calculées par THIESSEN ont été corrigées (cœfficient de correction : 1.32).

### 5.4.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

L'échantillon pluie-débit étant faible, nous avons regroupé les mois en trois périodes :

- période novembre-mars (saison des pluies : 5 mois, 30 valeurs)

$Hi = .24\ Pi + .125\ P_{i-1} + .14\ P_{i-2}$ ($R^2 = .73$ $P > .995$)

- mois de transition (mai, septembre et octobre : 3 mois, 20 valeurs)

$Hi = .45\ H_{i-1} + .25\ Pi + 13.4$ ($R^2 = .87$ $P > .995$)

- saison "sèche" (juin à août : 3 mois, 20 valeurs)

$Hi = .25\ H_{i-1} + .28\ Pi + 42$ ($R^2 = .49$ $P > .995$)

Les débits mensuels de ROGEZ et ANDEKALEKA aval présentent des régressions de bonne qualité :

novembre à mars QANDE = 2.39 QROGEZ - 35.5 ($R^2 = .83$ $P > .995$)
avril à octobre QANDE = 2.04 QROGEZ - 11.3 ($R^2 = .90$ $P > .995$)

Tableau 5.42.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1256602503 Andekaleka aval
Rivière : Vohitra
Pays : Madagascar
Bassin : Rianila

Latitude : 18.30.00
Longitude : 48.30.00
Aire : 2 615 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1963/64 | - | - | - | - | - | - | - | - | 101 | 126 | 134 | 103 | - |
| 1964/65 | 91.5 | 132 | 211 | 216 | 279 | 165 | 103 | 76.8 | 91.2 | 133 | 85.4 | 67.8 | 137 |
| 1965/66 | 98.6 | 165 | 130 | 185 | 145 | 100 | 97.2 | 85.2 | 110 | 105 | 81.5 | 57.4 | 113 |
| 1966/67 | 53.0 | 112 | 143 | 152 | 141 | 108 | 87.8 | 101 | 117 | 148 | 128 | 81.3 | 114 |
| 1967/68 | 121 | 150 | 385 | 250 | 143 | 112 | 89.7 | 71.5 | 101 | 76.5 | 56.8 | 48.5 | 134 |
| 1968/69 | 65.3 | 136 | 170 | 157 | 95.5 | 110 | 72.8 | 73.9 | 104 | 160 | 97.7 | 70.4 | 109 |
| 1969/70 | 60.0 | 95.7 | 148 | 206 | 156 | 267 | 162 | 140 | 128 | 180 | 104 | 63.4 | 142 |
| 1970/71 | 77.2 | 112 | 458 | 421 | 147 | 114 | 108 | 79.5 | 100 | 92.3 | 69.0 | 83.7 | 154 |
| 1971/72 | 95.5 | 110 | 159 | 507 | 333 | 191 | 112 | 102 | 108 | 87.0 | 66.3 | 122 | 165 |
| 1972/73 | 130 | 414 | 678 | 699 | 479 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 88.0 | 159 | 276 | 310 | 213 | 146 | 104 | 91.2 | 107 | 123 | 91.4 | 77.5 | 148 |
| Ecart-type | 26.6 | 98.2 | 191 | 190 | 125 | 58.6 | 26.5 | 22.9 | 10.8 | 35.5 | 27.0 | 23.1 | |
| Max. | 130 | 414 | 678 | 699 | 479 | 267 | 162 | 140 | 128 | 180 | 134 | 122 | |
| Q1 | 110 | 158 | 422 | 464 | 306 | 178 | 110 | 102 | 114 | 154 | 116 | 93.4 | |
| Méd. | 91.5 | 132 | 170 | 216 | 147 | 113 | 100 | 82.3 | 104 | 126 | 85.4 | 70.4 | |
| Q3 | 62.6 | 111 | 145 | 171 | 142 | 109 | 88.7 | 75.3 | 100 | 89.6 | 67.6 | 60.4 | |
| Min. | 53.0 | 95.7 | 130 | 152 | 95.5 | 100 | 72.8 | 71.5 | 91.2 | 76.5 | 56.8 | 48.5 | |

Sur le graphe 5.21. sont représentés les débits mensuels caractéristiques.

figure 5.21.

Vohitra à andekaleka aval

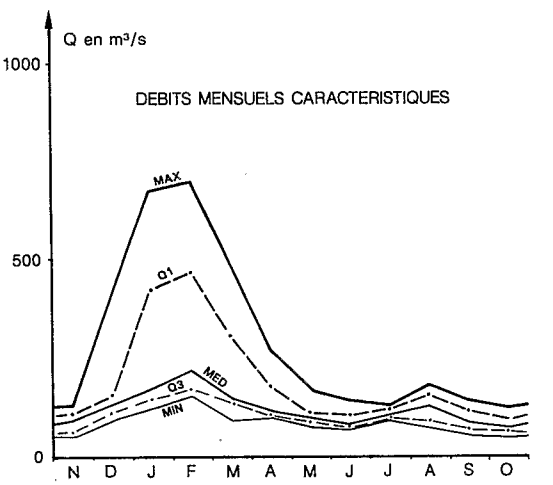
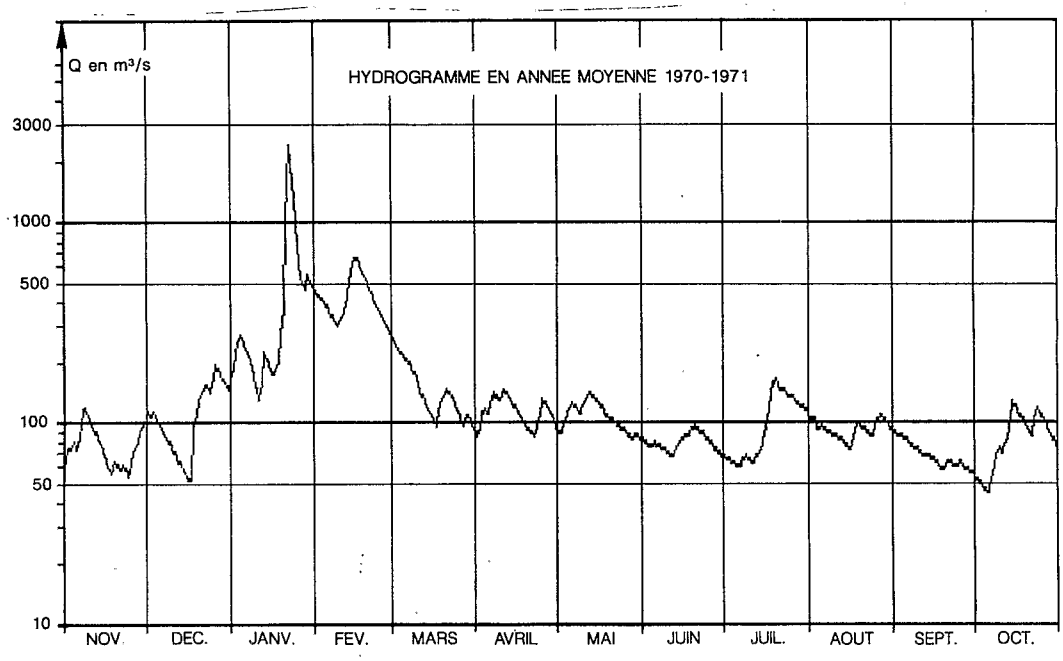


figure 5.22.

Vohitra à Andekaleka aval




## 5.4.2. Apports annuels

A partir des régressions mensuelles significatives entre les débits mensuels de ROGEZ et ANDEKALEKA, nous avons pu reconstituer les apports annuels à ANDEKALEKA, de mai 1952 à juin 1964.

Les lames observées et calculées à ANDEKALEKA présentent les droites de régressions suivantes :

HANDE = 1.81 HROGEZ - 395 ($R^2$ = .93 P > .995)
HANDE = 1.64 HIVONDRO - 498 ($R^2$ = .89 P > .995)
et avec la précipitation annuelle P et le cœfficient de concentration des pluies mensuelles {$\overline{Cp}$ = .192}.

H = 2.37 P * Cp + 176 ($R^2$ = .89 P > .995)

Le cœfficient Cp est très dispersé entre les valeurs minimales Cp = .136 en 1952-53 et Cp = .403 en 1958-59. Sa prise en compte améliore significativement la régression établie avec P seulement :

H = 1.27 P - 1795 ($R^2$ = .60)

Les lames de 1949-50 à 1951-52 ont été évaluées d'après P et Cp.

Les quantiles de la distribution statistique des apports sont les suivants :

tableau 5.43.

Vohitra à Andekaleka
Apports annuels

| Récurrence | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| H mm | 796 | 920 | 1043 | 1210 | 1603 | 2131 | 2481 | 2817 | 3250 |
| Q (m³/s) | 66.0 | 76.2 | 86.4 | 100 | 133 | 177 | 206 | 233 | 269 |
| q (l/s/km²) | 25.2 | 29.1 | 33.0 | 38.2 | 50.9 | 67.7 | 78.8 | 89.1 | 103 |

Loi de Gumbel (test Brunet-Moret : 4.28) échelle : 466 mm, position : 1 432 mm).
Centennales sèche et humide : 720 mm (Q = 59.7 m³/s) et 3 577 mm (Q = 296 m³/s).

## 5.4.3. Crues

### 5.4.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

L'extrapolation de type logarithmique est relativement faible (de 6,30 à 8,70 m) et s'appuie sur les jaugeages réalisés du 21 au 25/03/1965 (de 388 à 944 m³/s pour des hauteurs pour des hauteurs à l'échelle de 3,49 à 6,30 m).

### 5.4.3.2. Extension de l'échantillon de crues

Les plus hautes eaux de 1963-64, relevées lors de l'installation de l'échelle, ont été données vers 7,34 m, soit la quatrième valeur en 10 ans, alors que cette crue est la plus importante de la période 1963-73, tant en amont (VOHITRA à ROGEZ - T = 13 ans), qu'en aval (RIANILA à VOHIBINANY - T = 19 ans) d'ANDEKALEKA.

tableau 5.44.

Vohitra à Andekaleka aval
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1964-65 | 1110 | 21/01/65 18h00 | 6,90 | 3rel |
| 1965-66 | 528 | 14/02/66 12h00 | 4,28 | 3rel |
| 1966-67 | 474 | 24/12/66 12h00 | 3,96 | 3rel |
| 1967-68 | 1230 | 15/01/68 18h00 | 7,28 | 3rel |
| 1968-69 | 725 | 04/01/69 06h00 | 5,35 | 3rel |
| 1969-70 | 1580 | 08/04/70 06h00 | 8,36 | 3rel |
| 1970-71 | (1700) | 22/01/78,70 | PHE | |
| 1971-72 | 1450 | 15/02/72 18h00 | 7,98 | 3rel |
| 1972-73 | 1190 | 05/01/73 12h00 | 6,76 | Min |

Le débit maximal de janvier 1971, non observé, peut être évalué, d'après ROGEZ et FETRAOMBY à 2 500 m³/s.

Les débits maximaux de crue sont, en moyenne, supérieurs de 40 % aux valeurs correspondantes de ROGEZ, ce qui, avec prudence, permet d'estimer les quantiles suivants :

tableau 5.45.

Vohitra à Andekaleka aval

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 |
|---|---|---|---|
| Qm³/s | 780 | 3200 à 3400 | 4400 à 4600 |
| l/S/km² | 300 | 1200 à 1300 | 1680 à 1760 |

## 5.4.4. Basses eaux

Il est difficile de mettre en évidence un tarissement bien net, en raison des nombreuses recharges de nappe et écoulements de surface observés en saison "sèche". Sept années (sur neuf observées) font apparaître une décroissance exponentielle des débits de base alignée sur des droites de pentes $\alpha$ comprises entre .0040 et .0085.

tableau 5.44.

Vohitra à Andekaleka
Débits d'étiage observés (m³/s)

| DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|
| | | 71.3 | 58.9 | 23.11.64 |
| 80.6 | 67.0 | 61.1 | 56.8 | 30.10.65 |
| 69.4 | 49.3 | 40.3 | 32.4 | 05.12.66 |
| 85.6 | 75.2 | 70.0 | 63.0 | 15.01.67 |
| 64.3 | 47.8 | 38.7 | 32.7 | 12.11.68 |
| 69.6 | 58.7 | 51.6 | 43.2 | 01.12.69 |
| 93.4 | 62.7 | 54.3 | 44.6 | 11.10.70 |
| 81.1 | 64.30 | 55.6 | 44.5 | 06.10.71 |
| 85.8 | 68.1 | 58.5 | 54.5 | 30.09.72 |

On observe les relations suivantes :

DCE = .99 QJmin + 8.4 ($R^2$ = .94 P > .995)

DC11 = .82 QJmin + 23.4 ($R^2$ = .94 P > .995)

et entre les débits d'étiage à ANDEKALEKA et ROGEZ :

QJminANDE = 1.54 QJminROGEZ + 2.9 ($R^2$ = .81 P > .995)

Cette dernière relation permet d'évaluer les débits d'étiage QJmin de 1952 à 1963 et de 1974 à 1979. L'ajustement statistique sur les vingt-sept années observées ou calculées permet d'estimer les quantiles suivants :

tableau 5.45.

Vohitra à Andekaleka
Débits d'étiage QJmin

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Réccurence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q ($m^3/s$) | 25.0 | 27.6 | 31.6 | 41.5 | 53.5 | 60.4 | 66.4 |
| Q ($l/s/km^2$) | 9.6 | 10.6 | 12.1 | 15.9 | 20.5 | 23.1 | 25.4 |

Loi de Goodrich (test Brunet-Moret : 1.58, échelle : 27.0 $m^3/s$, position : 19.1, forme : .511).
Cinquantennales sèche et humide : 22.8 $m^3/s$ (8.7 $l/s/km^2$) et 73.3 $m^3/s$ (28.0 $l/s/km^2$).

### 5.4.5. Bilan hydrologique

Pour une précipitation interannuelle estimée à 2 700 mm, la lame moyenne interannuelle : 1 710 mm correspond à un déficit d'écoulement de 990 mm (Ke = 63 %).

## 5.5. Rianila à Fetraomby

La station de FETRAOMBY (18°40'S - 48°56'E) est située à une altitude voisine de 5 à 6 m, près du bac de la route ANIVORANO-MAROSERANANA. Le bassin contrôlé a une superficie de 1 863 $km^2$.

L'échelle a été installée en 1964 et les observations ont été effectuées jusqu'en décembre 1975 avec de nombreuses lacunes à partir d'octobre 1972, à la suite de la disparition de l'échelle de basses eaux.

Trente six mesures de débit (38 m3/s à 1 185 $m^3/s$) ont été effectuées et permettent de tracer deux courbes d'étalonnage décalées de 60 cm à partir de février 1966. L'extrapolation est très forte jusqu'à 5 000 $m^3/s$. La qualité des observations est relativement moyenne.

La pluviométrie sur le bassin en l'absence de tout poste pluviométrique, est difficile à déterminer. On peut l'évaluer sommairement à 3 300 mm.

### 5.5.1. Débits moyens mensuels et annuels

Les débits mensuels observés sont assez bien corrélés avec ceux des stations voisines.

QFETRA = 1.97 QROGEZ - 14.7 ($R^2$ = .83 P > .995)
QFETRA = .294 QBRICK + 21.4 ($R^2$ = .78 P > .995)
QFETRA = 1.48 QRINGA - 33.9 ($R^2$ = .91 P >.995)

Ces relations ont permis de calculer les débits manquants des années 1972 et 1973 (cf. tableau 5.46.). Les débits mensuels maximaux, moyens et minimaux sont représentés sur le graphe 5.23. Un hydrogramme en année moyenne (graphe 5.24.) permet de représenter l'allure de l'écoulement.

tableau 5.46.

Débits moyens mensuels et annuels

Station :1256600110 Bac de FETRAOMBY Latitude : 18.40.00
Rivière : Rianila Longitude : 48.56.00
Pays : Madagascar
Bassin : Rianila Aire : 1 863 km$^2$
Débit en m$^3$/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1963-64 | | | | | | | | | | | | 122 | |
| 1964-65 | 108 | 132 | 217 | 209 | 324 | 176 | 1274 | 101 | 120 | 170 | 111 | 95.1 | 157 |
| 1965-66 | 122 | 189 | 144 | 185 | 114 | 83.1 | 75.2 | 81 | .10.4) | (3.3) | (8.5) | 8.75 | 20.7 |
| 1966-67 | 62.3 | 76.7 | 103 | 117 | 109 | 96.9 | 80.6 | 89.2 | 91.1 | 122 | 103 | 76.4 | 93.8 |
| 1967-68 | 95.5 | 116 | 267 | 237 | 216 | 102 | 79.90 | 70.7 | 92.7 | 70.2 | 58.8 | 52.6 | 121 |
| 1968-69 | 62.8 | 103 | 1329 | 124 | 80.1 | 87.1 | 67.3 | 68.8 | 85.6 | 142 | 90.5 | 69.2 | 92.4 |
| 1969-70 | 61.2 | 95.1 | 167 | 172 | 211 | 276 | 158 | 128 | 129 | 167 | 100 | 78.2 | 145 |
| 1970-71 | 568.1 | 68.9 | 327 | 171 | 104 | 97.6 | 96.9 | 84.0 | 117 | 89.2 | 78.6 | 72.9 | 115 |
| 1971-72 | 98.7 | 106 | 119 | 360 | 322 | 179 | 122 | 107 | 129 | 96.8 | 101 | (84.2) | (151) |
| 1972-73 | (88) | (150) | 736 | 522 | 461 | 217 | (165) | (170) | (160) | (185) | (130) | (93) | (255) |
| Moyenne | 85.2 | 115 | 245 | 233 | 216 | 146 | 107 | 100 | 104 | 140 | 94.4 | 80.8 | 139 |

figure 5.23.

Rianila à Fetraomby

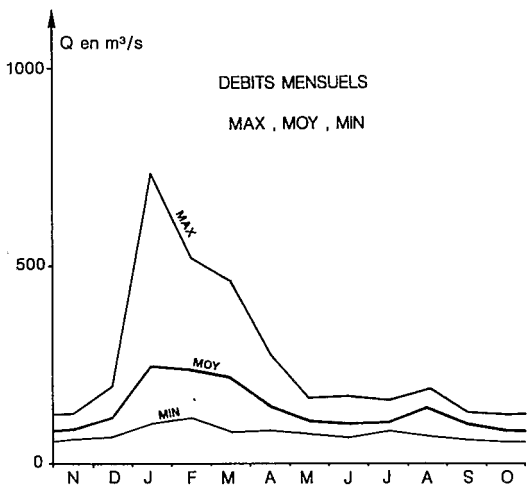
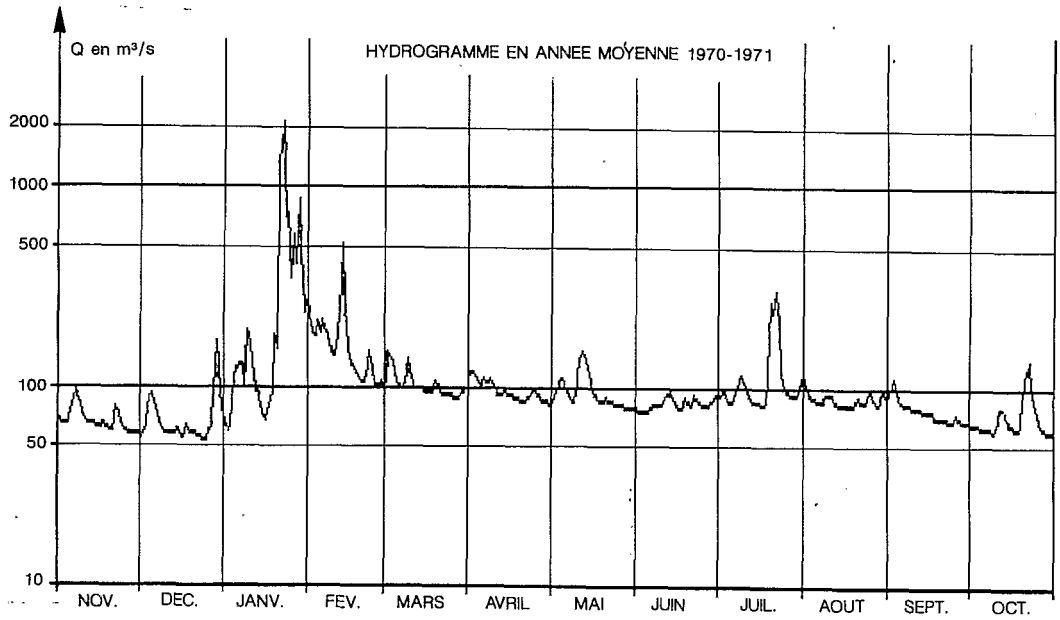


figure 5.24.

Rianila à Fetraomby




## 5.5.2. Apports annuels

Les lames observées 1964-72 présentent, avec les lames correspondantes des bassins voisins, les régressions *suivantes* :

HFETRA = 3.25 HROGEZ - 1730 ($R^2$ = .94)

HFETRA = 2.12 HBRICK - 1763 ($R^2$ = .98)

HFETRA = 2.34 HRINGA - 1000 ($R^2$ = .95)

Avec prudence, ces relations permettent d'établir les termes du bilan du bassin en année moyenne :

P # (3300) mm

H # 2100 mm

DE # 1200 mm (Ke = 64 %)

## 5.5.3. Crues

### 5.5.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

L'extrapolation logarithmique menée de 4,91 (cote du plus fort jaugeage) à 11,94 m dans le système de l'ancienne échelle, s'appuie sur les mesures réalisées du 19 au 26 mars 1965.

tableau 5.47.

Rianila à Fetraomby
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1963-64 | 3260 | 21/03/65 06h00 | 8,77 | PHE |
| 1964-65 | 1770 | 10/02/66 06h00 | 6,13 | 3rel |
| 1965-66 | 1050 | 17/01/67 06h00 | 4,54 | 3rel |
| 1966-67 | 777 | 23/02/68 06h00 | 4,41 | 3rel |
| 1967-68 | 1830 | 04/01/69 06h00 | 6,85 | 3rel |
| 1968-69 | 1050 | 31/01/70 12h00 | 5,14 | 3rel |
| 1969-70 | 3030 | 21/01/71 21h00 | 9,00 | 3rel |
| 1970-71 | 4550 | 14/02/72 12h00 | 11,50 | PHE |
| 1971-72 | 4570 | 28/01/73 18h00 | 11,53 | 3rel |
| 1972-73 | 4040 | 21/01/74 | 10,65 | 3rel |
| 1973-74 | 1580 | 13/03/75 06h00 | 6,35 | Min |
| 1974-75 | 4760 | | 11,85 | 3rel |

### 5.5.3.2. Résultats de l'enquête historique

Les seuls renseignements (maximums de l'année 1958-59) ont été obtenus lors de l'installation de l'échelle en 1964.

Evaluée à 5 180 m³/s, cette crue peut être considérée comme la plus importante de la période 1956-80.

Deux années sur trois, les débits maximaux de crue de la station et ceux de l'IVONDRO sont concomitants. Une relation graphique approchée entre les débits maximaux peut être tracée :

QMax (FETRAOMBY) = 1.6 QMax (IVONDRO) - 100

Une loi log-normale (sur l'échantillon de 12 années observées) complétée par un ajustement graphique tenant compte de l'information historique (24 années) fournit les quantiles suivants :

tableau 5.48.

Rianila à Fetraomby
Débits maximaux de crues

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 2220 | 3810 | (5090) | (8470) | (10200) |
| Ech. étendu Q m³/s | | | 4970 | 8000 | 8500 |
| q l/s/km² | 1190 | 2040 | 2680 | 4290 | 4560 |

### 5.5.4. Basses eaux

Le tarissement présente une pente moyenne $\alpha$ de l'ordre de .0045 (Tc = 154 jours).
Les valeurs caractéristiques observées pour les basses eaux sont présentées dans le tableau 5.49.

tableau 5.49.

Rianila à Fetraomby
Débits caractéristiques d'étiage

| DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|
| 104 | 93.6 | 88.3 | 85.2 | 13.07.65 |
| 68.1 | 56.7 | 52.0 | 49.6 | 07.12.66 |
| 79.7 | 73.5 | 70.1 | 56.8 | 15.01.67 |
| 63.2 | 50.5 | 48.1 | 44.8 | 11.11.68 |
| 65.6 | 60.9 | 55.0 | 52.0 | 30.11.69 |
| 80.6 | 63.2 | 58.0 | 54.5 | 25.12.70 |
| 81.9 | 65.6 | 60.9 | 59.0 | 19.11.71 |

La date d'apparition de l'étiage QJmin présente une bonne concordance avec celle de l'IVONDRO à RINGA-RINGA (bassin adjacent).

Entre les débits les plus faibles (et indépendants) de la RIANILA et de l'IVONDRO, nous pouvons établir (quatorze valeurs et trois jaugeages) la correspondance suivante :

QJminFETRA = .84 QminRINGA + 14.5 ($R^2$ = .92)

Cette relation permet d'estimer les valeurs de QJmin de 1953 à 1965, de 1972 à 1983 et, à partir de l'échantillon étendu (observations et estimations) de trente et une valeurs, d'estimer les quantiles des débits d'étiage.

tableau 5.50.

Rianila à Fetraomby
Débits d'étiage QJmin

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Q ($m^3/s$) | 32.6 | 36.5 | 40.1 | 44.6 | 53.8 | 63.8 | 69.4 | 74.1 | 79.8 |
| q ($l/s/km^2$) | 17.5 | 19.6 | 21.5 | 23.9 | 28.9 | 34.2 | 37.3 | 35.8 | 42.8 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 1.32, échelle : 115 $m^3/s$, position : - 60.9, forme : .099).

Centennales sèche et humide : 30.1 $m^3/s$ (16.2 $l/s/km^2$) et 83.6 $m^3/s$ (44.9 $l/s/km^2$).

## 5.6. La Ronga-Ronga au pont d'Ambinaninony

Le bassin de la RONGA-RONGA, principal affluent rive gauche de la RIANILA, est situé dans un secteur très arrosé (arrière-pays de TOAMASINA) entre la RIANILA supérieure et l'IVONDRO.

La station est située près du pont de la route AMBINANINONY-AMBALARONDRA (18°36'S - 49°07'E) et contrôle un bassin de 1 000 km² environ drainant la première falaise orientale (massif du MANGERIVOLA).

Des observations et mesures ont été effectuées de 1965 à 1969.

tableau 5.51.

Ronga-Ronga à Ambinaninony
Débits mensuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1965-66 | 90.3 | 117 | 87.0 | 172 | 106 | 55.2 | 53.5 | 63.6 | 89.5 | 71.4 | 43.8 | (28.9) | 81.5 |
| 1966-67 | | 57.7 | | | | | 55.7 | 68.1 | 78.5 | 123 | 89.7 | 48.8 | |
| 1967-68 | | | | | | | | | | | | | |
| 1968-69 | 23.2 | 72.5 | 142 | 101 | 53.5 | 56.4 | 32.0 | 45.0 | 59.7 | 96.1 | 58.4 | 29.4 | 64.1 |

Ces débits sont bien corrélés avec les débits correspondants de la VOHITRA à ROGEZ.

QRONGA-RONGA = 1.66 QROGEZ - 27 ($R^2$ = .78 P > .995)

Il est possible d'attribuer à la lame moyenne interannuelle une valeur voisine de 2 500 mm (Q = 79 m³/s) pour une pluviométrie moyenne d'environ 3 700 mm (Ke = 68 %).

A l'entrée de la plaine côtière, zone inondable où les pentes hydrauliques peuvent varier suivant l'état de remplissage (crues de la RONGA-RONGA et du RIANILA), cette station a été suivie de juin 1964 à octobre 1975.

Le nombre de mesures ne permettant pas de préciser l'allure de chaque crue ou décrue, une courbe moyenne pour une pente "normale" a été admise pour l'évaluation des débits maximums annuels.

| Année | Hm | Q m³/s | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1955-56 | 15,25 | 1620 | PHE |
| 1958-59 | 15,70 | 1570 | PHE |
| 1963-64 | 7,55 | 670 | PHE |
| 1964-65 | 8,00 | 720 | Min |
| 1965-66 | 6,95 | 602 | 3rel |
| 1966-67 | 3,90 | 277 | Min |
| 1967-68 | 7,56 | 672 | 3rel |
| 1968-69 | 7,14 | 624 | 3rel |
| 1969-70 | 8,00 | 720 | Min |
| 1970-71 | 11,30 | 1120 | PHE |
| 1971-72 | 10,84 | 1060 | 3rel |
| 1972-73 | 14,25 | 1500 | 3rel |
| 1973-74 | 5.89 | 484 | 3rel |
| 1974-75 | 13,10 | 1335 | 3rel |

En l'absence d'autres renseignements, les maximums des années 1955-56 et 1958-59 ont été retenus comme les plus importants de la période 1954-55.

Ajustée à l'échantillon de 12 années, une distribution de GUMBEL fournit les quantiles suivants :

Ronga-Ronga à Ambinaninony
Débits maximaux de crues

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 757 | 1080 | 1290 | (1750) | (1950) |
| q l/s/km² | 757 | 1080 | 1290 | (1750) | (1950) |

Les étiages sont les suivants :

| | | |
|---|---|---|
| DCE = 25.1 m³/s | QJmin = 23.5 m³/s (23.5 l/s/km²) | le 31-10-66 |
| | QJmin = 16.4 m³/s (16.4 l/s/km²) | le 03-11-68 |
| DCE = 18.7 m³/s | QJmin = (17) m³/s | le 22-10-69 |

## 5.7. Iaroka au bac d'Ampitabe

Le bassin de la IAROKA, dernier affluent rive droite de la RIANILA, draine le pied de la falaise orientale au sud de la RN2. Son relief ainsi que son altitude sont nettement moins accusés que ceux de la RONGA-RONGA et il est beaucoup moins arrosé.

La station est située près du bac à AMPITABE (18°59'S - 48°57'E) sur la route côtière AMPASIMANOLOTRA-VATOMANDRY. Le bassin versant a une superficie de 1 275 km².

tableau 5.52.

Iaroka à Ampitabe
Débits moyens mensuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1965-66 | 41.9 | 68.8 | 45.6 | 145 | 77.5 | 43.5 | 55.9 | 43.9 | 57.7 | 48.9 | 42.0 | 27.5 | 58.1 |
| 1966-67 | 28.3 | 46.5 | 73.0 | 95.3 | 57.4 | 53.9 | 37.8 | 45.2 | 52.7 | 65.4 | 57.1 | 44.5 | 51.8 |

Ces débits sont assez bien corrélés avec ceux de la VOHITRA à ROGEZ.

QIAROKA = .95 QROGEZ - 3.6 ($R^2$ = .56 P > .995)

La lame moyenne interannuelle estimée est voisine de 1 500 à 1 600 mm (Q = 60 à 65 m³/s) pour une pluviométrie estimée à 2 700 à 2 800 mm (Ke = 56 %).

Suivie de juin 1964 à octobre 1975, cette station est installée en amont de la plaine et des marais côtiers inondés par les crues du RIANILA et de la IAROKA.

Le nombre et la qualité des jaugeages ne permettant pas de juger des conditions d'écoulement en crue et en décrue, un tarage moyen pour une pente "normale" a été admis, comme pour la RONGA-RONGA à AMBINANINONY, pour l'estimation des débits maximums annuels.

Iaroka à Ampitabe
Maximum observés

| Année | Hm | Q m³/s | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1944-45 | 11.50 | 3900 | PHE |
| 1958-59 | (12,95) | 4400 | PHE |
| 1963-64 | 6,95 | 1500 | 3rel |
| 1964-65 | 8,10 | 2000 | 3rel |
| 1965-66 | 4,29 | 577 | 3rel |
| 1966-67 | 5,27 | 860 | 3rel |
| 1967-68 | 6,95 | 1500 | 3rel |
| 1968-69 | 4,65 | 642 | 3rel |
| 1969-70 | 8,00 | 1930 | Min |
| 1970-71 | 8,40 | 2100 | PHE |
| 1971-72 | (8,60) | 2200 | 3rel |
| 1972-73 | 7,98 | 1920 | 3rel |
| 1973-74 | (1,36) | 125 | 3rel |
| 1974-75 | 11,50 | 3900 | PHE |
| 1975-76 | | | |
| 1976-77 | 8,41 | 2100 | |

Les maximums de crues des années 1958-59, 1944-45 et 1974-75 ont été considérés comme les plus importants de la période 1940-1980.

Une loi log-normale ajustée sur l'échantillon des crues observées, complétée par un ajustement graphique tenant compte de l'échantillon historique fournit les quantiles suivants :

Iaroka à Ampitabe
Débits maximums de crue

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 1490 | 2350 | (2880) | (3960) | (4400) |
| (éch. historique) Qm³/s) | | | 2920 | 4210 | 4750 |
| q l/s/km² | 1170 | 1840 | 2290 | 3300 | 3730 |

Les débits d'étiage sont les suivants :

DCE = 23.6 m³/s QJmin = 21.2 m³/s (16.6 l/s/km²) le 4-12-65
DCE = 18.7 m³/s octobre 1967

## 5.8. Petits bassins côtiers au sud du bassin de la Rianila

### 5.8.1. Le Sakanila à Tsarasambo (A = 1 700 km²)

Situé au sud du bassin de la RIANILA et au nord de celui du MANGORO, le bassin du SAKANILA draine la première ligne de falaises bordant sur la rive gauche le bassin du MANGORO.

Les mesures à TSARASAMBO et l'enquête menée dans la basse vallée du SAKANILA (de MAINTINANDRY à AMPAHO) en 1979 ont permis une évaluation (formule de Manning-Strickler) des débits des plus hautes eaux connues des périodes 1920-1979 et 1970-1979.

| Année | Q m³/s | Tsarasambo | Ampaho |
|---|---|---|---|
| 1958-59 | (4500) | 8,57 NGM | 7,31 NGM |
| 1925-26 | (4500) | | |
| 1971-72 | (2160) | 5,77 NGM | 5,41 NGM |

En tenant compte de l'information historique, les débits de récurrence décennale et cinquantennale ont été évalués respectivement à 2 500 m³/s (1 470 l/s/km²) et 4 300 m³/s (2 530 l /s/km²).

### 5.8.2. La Manampotsy à Ilaka (A = 1 280 km²)

Le bassin de la MANAMPOTSY est situé entre ceux du SAKANILA et de la MANANA, au nord de l'embouchure du MANGORO.

Poursuivie sur la MANAMPOTSY, l'enquête de 1979 a permis l'évaluation des débits maximums les plus importants des périodes 1900-79 et 1970-79.

| Année | Q m³/s | H NGM |
|---|---|---|
| 1958-59 | (4400) | 7,58 |
| 1925-26 | (4400) | |
| 1906-06 | (4400) | |
| 1974-75 | (3300) | 6,73 |

A partir de l'information historique, les débits de crue décennale et cinquantennale ont été estimés respectivement à 2 600 m³/s (2 030 l/s/km²) et 4 700 m³/s (3 670 l/s/km²).

Trois petits tributaires du lac IHOSY et du canal des "Pangalanes" au nord de l'embouchure du MANGORO ont fait l'objet d'observations.

### 5.8.3. L'Ihosy à Ambamasina (A = 65 km²)

Le maximum connu (enquête de 1979) est celui de 1958-59 avec une cote de 7,94 NGM et un débit (évalué suivant la formule de Manning-Strickler) de l'ordre de 520 m³/s (8 000 l/s/km²).

### 5.8.4 La Lohariana à Maroambo (A = 158 km²)

Le maximum de l'année 1958-59 de ce second tributaire du lac IHOSY correspond à une cote de 6,70 NGM à MAROAMBO et de 7,67 m NGM à MAROAMITRA. En raison de l'important débordement en rive droite, il n'est pas possible d'évaluer le débit corespondant.

### 5.8.5. La Sahasaka à Miakara (A = 485 km²)

Les mesures et l'enquête menée en 1979 sur le lac IHOSY et son exutoire principal la SAHASAKA (les déversements vers le canal des Pangalanes ne doivent pas excéder 50 m³/s en très hautes eaux) ont permis le rattachement des plus hautes eaux et l'évaluation (formule de Manning-Strickler) du débit maximum connu (année 1958-59 - inondation de MAHANORO).

| Année | Q m3/s | Mahatsara | Ambilabe |
|---|---|---|---|
| 1974-75 | (750) | | 6,01 NGM |
| 1958-59 | (1000) | 5,29 NGM | 6,60 NGM |

# 6. BASSIN DU MANGORO

La branche mère du MANGORO draine du nord au sud la dépression de l'ALAOTRA-MANGORO, entre la première et la seconde falaise orientale. Le cours principal circule dans une plaine perchée alluviale partiellement occupée de petits marais et de rizières. Il reçoit en rive droite et en rive gauche des petits affluents de direction ouest-est (ANDRANOMBE, MANDRAKA, etc.) ou est-ouest (ANTSAPAZANA, etc.). Au sud d'ANTANDROKOMBY, le MANGORO, après avoir été rejoint par son principal affluent de rive droite, l'ONIVE, oblique brusquement vers l'Est et, après avoir franchi par un seuil bien marqué le prolongement de la falaise du BETSIHISARAKA, se dirige vers l'océan, où, après avoir reçu son dernier affluent rive droite, le NOSIVOLO, il se jette au sud de MAHANORO.

L'ONIVE draine la façade orientale du massif de l'ANKARATRA et les hauts plateaux situés entre ANTANANARIVO et ANTSIRABE, zone riche en rizières.

## 6.1. La branche mère du Mangoro

Le bassin repose sur le socle cristallin (granites et migmatites des TAMPOKETSA, en bordure ouest du système du graphite. La dépression est occupée par les formations lacustres du néogène. Les rebords des plateaux

sont occupés par des sols ferrallitiques profonds formant réservoir d'altérites et dans la plaine par des sols peu évolués alluviaux. La végétation est représentée sur les rebords des plateaux par la forêt dense ombrophile (avec des secteurs de reboisement industriel à raison de 10 000 ha/an de 1970 à 1975). La cuvette est le domaine de la savane herbacée et de la "savoka" avec de nombreuses formations marécageuses et quelques rizières. La pluviométrie, assez bien déterminée, est de l'ordre de 1 500 mm jusqu'à la gare de MANGORO, 1 800 mm plus au sud.

## 6.1.1. Le Mangoro à Mangoro-gare

La station (18°52'42"S - 48°06'30"E) est située en amont du pont de la RN2, à proximité de la gare.

Le bassin versant contrôlé a une superficie de 3 600 km². L'échelle a été installée en octobre 1956. Détruite en mars 1959, elle est remise en état en juillet. Les lectures sont connues de 1956 à 1979 avec des lacunes importantes (destruction d'éléments) de juillet 57 à décembre 58, mars 59 à mars 60, mars 67, mai à décembre 72, février à octobre 77, octobre 78, à partir de juillet 79.

Soixante onze mesures de débit (entre 24 et 850 m³/s) permettent d'établir une courbe d'étalonnage unique extrapolée jusqu'à 2 000 m³/s pour les moyennes eaux.

La pluviométrie moyenne sur le bassin a été calculée (THIESSEN) à partir de douze postes bien répartis : ANDAINGO (poids : .16), ANJOZOROBE (.10), AMPANGABE (.15), AMBOHIDRAY (.12), AMBOHIDRANO (.12), MANDRAKA (.11), MAROVOAY (.08), etc. Elle est de 1 473 mm sur la période 1949-70, et en moyenne interannuelle, voisine de 1 500 mm.

### 6.1.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 5.53.

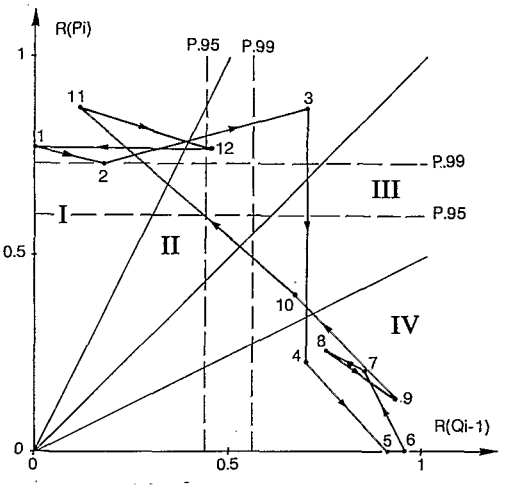
Mangoro à Mangoro-gare
Coefficients de corrélation

| Hi ou Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .87 | .77 | .77 | .73 | .87 | (.23) | -.29 | -.03 | (.21) | (.26) | (.14) | (.40) |
| Pi-1 | (.39) | (.27) | (.25) | (.26) | .64 | .64 | (.13) | -.30 | (.21) | (.15) | (.59) | (.38) |
| Qi-1 | (.11) | .45 | (.13) | (.18) | .70 | .70 | .91 | .95 | .85 | .75 | .93 | .67 |

Sur le graphe 5.25., on peut constater que les précipitations mensuelles sont le facteur principal déterminant de novembre à février. En mars, la précipitation antérieure (ou le débit antérieur) joue un rôle important en facteur secondaire. Puis d'avril à octobre, les débits antérieurs sont seuls déterminants, sans influence secondaire (sauf octobre) des précipitations du mois.

figure 5.25.

Mangoro




La formulation des régressions est la suivante :

tableau 5.54.

Mangoro à Mangoro-gare

| | |
|---|---|
| Saison des pluies (décembre à mars) | |
| HI = .28 PI + .15 $P_{I-1}$ - 5 | ($R^2$ = .50 P > .99) |
| H11 = .18 P11 + .28 P10 - 7.3 | ($R^2$ = .92 P > .99) |
| H12 = .39 P12 + .15 P11 + 60 | ($R^2$ = .72 P > .99) |
| H01 = .34 P01 - .26.4 | ($R^2$ = .59 P > .99) |
| H02 = ..53 P02 + .18 P01 - 50.6 | ($R^2$ = .74 P > .99) |
| H03 = .47 P03 + .29 P02 - 46.8 | ($R^2$ = .93 P >.99) |
| Saison sèche (avril à octobre) | |
| H04 = .39 P030201 - 12.7 | ($R^2$ = .56 P > .95) |
| Q04 = .25 Q03 + 63.3 | ($R^2$ = .49 P > .99) |
| H05 = .15 P030201 + 12.3 | ($R^2$ = .53 P > .99) |
| Q05 = .45 Q04 + 20.3 | ($R^2$ = .83 P > .995) |
| H06 = .11 P030201 + 12.3 | (R2 = .47 P> .95) |
| Q06 = .71 Q05 + 6 | ($R^2$ = .90 P > .995) |
| H07 = .07 P030201 + 18,4 | ($R^2$ = .44 P > .95) |
| Q07 = .64 Q06 + 15,6 | ($R^2$ = .72 P > .99) |
| Q08 = .65 Q07 + 11.2 | ($R^2$ = .56 P > .99) |
| Q09 = .63 Q08 + 6 | ($R^2$ = .86 P > .995) |
| Q10 = .58 Q09 + 9.2 | ($R^2$ = .46 P > .95) |

Ces relations ont permis d'évaluer les débits mensuels non observés de 1957, 1977 et 1978-79.

Les valeurs mensuelles et annuelles observées et calculées sont présentées dans le tableau 5.55.

Sur les graphes 5.26., 5.27. et 5.28. figurent les débits mensuels caractéristiques (Max, Q1, Méd, Q3 et Min) et les hydrogrammes annuels d'une année humide (1974-75, Q = 123 m³/s) et d'une année déficitaire (1960-61, Q = 55.1 m³/s).

figure 5.26.

Mangoro à Mangoro-gare

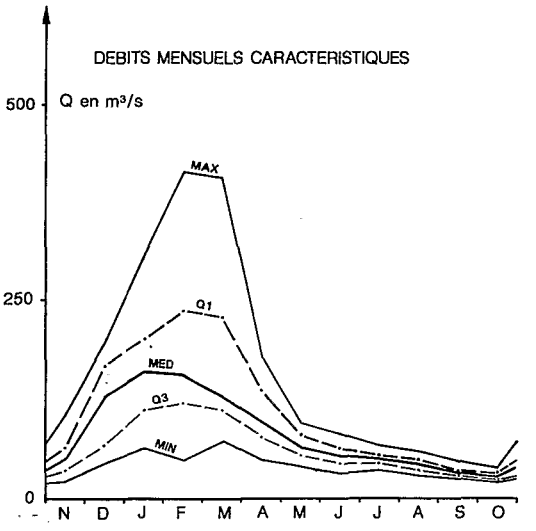



Figure 5.27.

Mangoro à Mangoro-gare

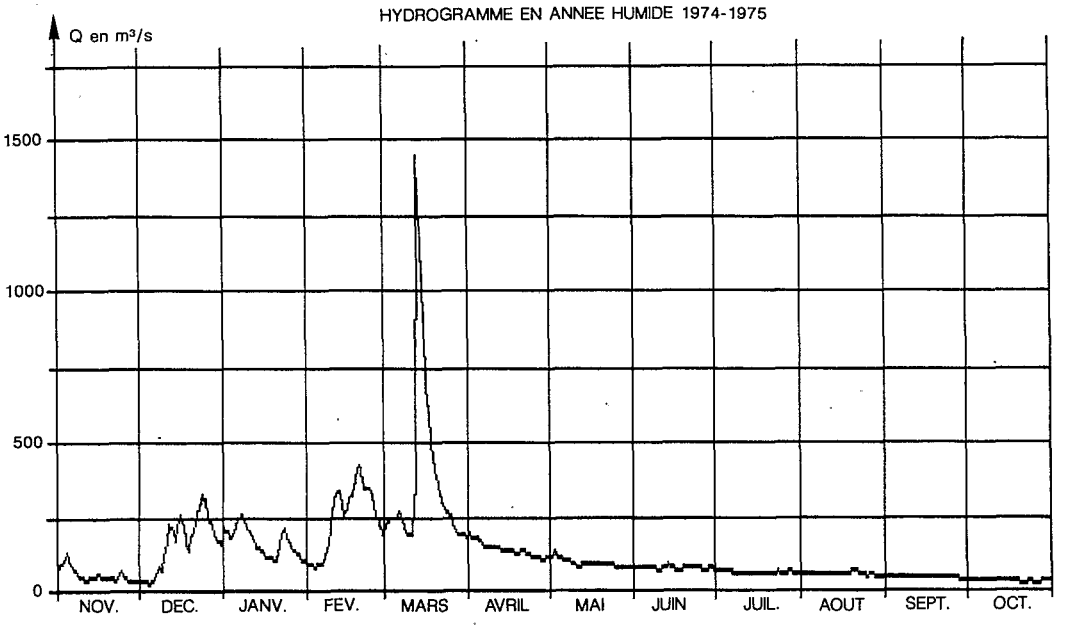
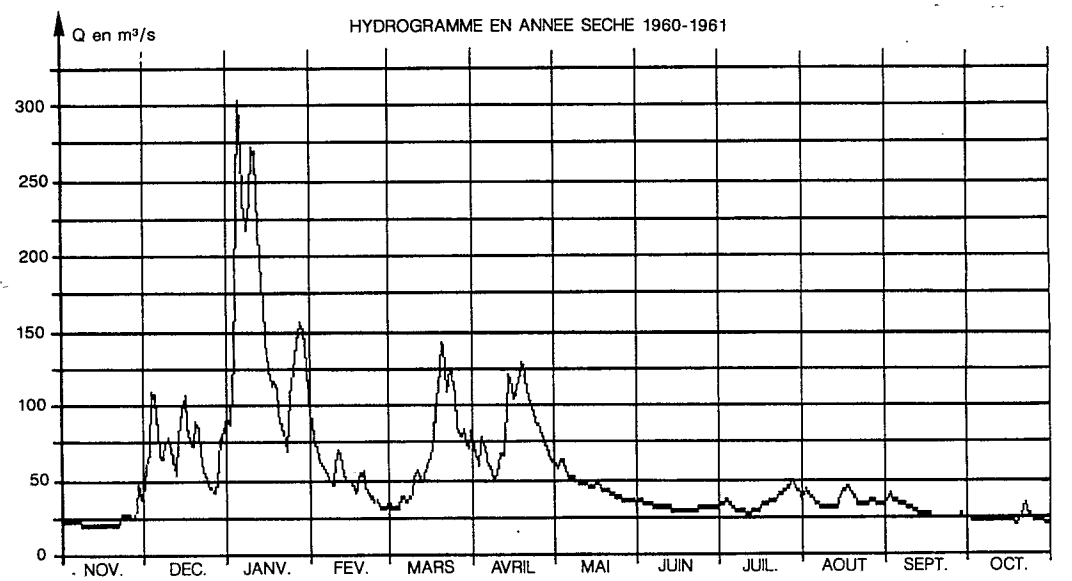


figure 5.28.

Mangoro à Mangoro-gare




## 6.1.1. 2. Apports annuels

Lames annuelles et précipitations annuelles présentent la relation suivante :

$H = .84 (P - 672)$ $(R^2 = .71 \quad P > .995)$

Les lames écoulées annuelles du MANGORO et de la VOHITRA à ROGEZ (bassins adjacents) présentent la régression suivante :

$HMANG = .91\ HROG.^{96}$ $(R^2 = .78 \quad P > .995)$

À partir de ces relations sont calculées les lames annuelles du MANGORO :

| | | | |
|---|---|---|---|
| - à partir de P | 1949-50 | H = 395 mm | Q = 45.1 m³/s |
| | 1950-51 | H = 685 mm | Q = 78.2 m³/s |
| | 1951-52 | H = 595 mm | Q = 67.7 m³/s |
| - à partir de HROGEZ | 1952-53 | H = 655 mm | Q = 74.8 m³/s |
| | 1953-54 | H = 840 mm | Q = 95.9 m³/s |
| | 1954-55 | H = 640 mm | Q = 73.1 m³/s |
| | 1955-56 | H = 1160 mm | Q = 132 m³/s |
| | 1957-58 | H = 615 mm | Q = 70.2 m³/s |
| | 1958-59 | H = 1300 mm | Q = 148 m³/s |
| | 1959-60 | H = 630 mm | Q = 71.7 m³/s |

Tableau 5.55.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1250900110 Mangoro-gare
Rivière : Mangoro
Pays : Madagascar
Bassin : Mangoro

Latitude : 19.00.00
Longitude : 48.00.00
Aire : 3 600 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1956/57 | 64.3 | 128 | 79.6 | 199 | 252 | 177 | 90.7 | 67.2 | (58.6) | (49.3) | (37.4) | (30.9) | (102) |
| 1957/58 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1958/59 | - | - | 309 | 168 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1959/60 | - | - | - | - | - | 72.3 | 51.2 | 43.9 | 37.3 | 33.7 | 26.5 | 26.1 | - |
| 1960/61 | 23.9 | 73.2 | 159 | 49.2 | 71.4 | 83.5 | 45.3 | 31.1 | 35.1 | 35.4 | 28.8 | 23.0 | 55.1 |
| 1961/62 | 28.2 | 177 | 72.6 | 110 | 98.7 | 72.0 | 47.9 | 40.5 | 35.6 | 33.5 | 25.9 | 26.4 | 63.9 |
| 1962/63 | 55.9 | 64.7 | 159 | 121 | 122 | 106 | 66.1 | 59.3 | 45.2 | 35.6 | 27.9 | 23.1 | 73.6 |
| 1963/64 | 78.3 | 119 | 77.0 | 198 | 226 | 95.7 | 60.9 | 53.2 | 48.8 | 44.5 | 33.8 | 32.6 | 88.6 |
| 1964/65 | 63.5 | 151 | 166 | 310 | 177 | 153 | 76.5 | 57.6 | 53.8 | 55.7 | 37.7 | 28.8 | 110 |
| 1965/66 | 47.0 | 170 | 136 | 107 | 91.8 | 72.2 | 58.1 | 43.9 | 44.5 | 42.7 | 33.8 | 24.2 | 72.6 |
| 1966/67 | 27.1 | 68.1 | 147 | 129 | 229 | 96.1 | 61.5 | 50.0 | 45.2 | 39.4 | 36.2 | 26.8 | 79.5 |
| 1967/68 | 104 | 195 | 194 | 149 | 154 | 83.3 | 57.1 | 45.4 | 48.4 | 37.1 | 26.8 | 23.1 | 93.1 |
| 1968/69 | 50.0 | 184 | 112 | 144 | 84.3 | 85.0 | 54.7 | 46.4 | 41.8 | 46.3 | 35.3 | 26.2 | 75.5 |
| 1969/70 | 49.4 | 169 | 215 | 183 | 112 | 104 | 72.1 | 58.5 | 49.6 | 49.1 | 34.8 | 26.9 | 93.2 |
| 1970/71 | 40.5 | 53.6 | 218 | 237 | 136 | 79.2 | 64.7 | 50.2 | 49.0 | 40.7 | 33.8 | 29.8 | 85.2 |
| 1971/72 | 79.7 | 168 | 110 | 415 | 296 | 144 | 94.5 | 64.7 | 65.4 | 47.0 | 36.4 | 38.0 | 129 |
| 1972/73 | 53.3 | 92.5 | 268 | 310 | 405 | 159 | 94.5 | 80.4 | 65.9 | 58.8 | 43.4 | 34.2 | 138 |
| 1973/74 | 29.2 | 45.3 | 173 | 144 | 116 | 110 | 80.0 | 63.6 | 64.3 | 50.3 | 39.6 | 37.0 | 79.0 |
| 1974/75 | 55.2 | 160 | 162 | 246 | 368 | 137 | 90.7 | 74.3 | 60.5 | 55.7 | 44.1 | 31.7 | 123 |
| 1975/76 | 101 | 118 | 207 | 156 | 115 | 113 | 71.4 | 56.7 | 52.3 | 43.8 | 33.1 | 32.0 | 91.4 |
| 1976/77 | 44.0 | 135. | 180 | (303) | (324) | 144 | 81.0 | 72.7 | 56.0 | 51.0 | 38.4 | 61.1 | (123) |
| 1977/78 | 35.1 | 55.3 | 63.7 | 84.9 | 122 | 49.5 | 39.5 | 36.8 | 49.5 | 31.2 | 27.0 | (24.9) | (51.5) |
| 1978/79 | 32.3 | 46.5 | 52.1 | 129 | 76.9 | 60.0 | 39.7 | 33.2 | (34.1) | (30.6) | (25.0) | (23.5) | (48.0) |
| Moyenne | 53.1 | 119 | 155 | 185 | 179 | 105 | 66.6 | 53.8 | 49.1 | 43.1 | 33.4 | 30.0 | 88.9 |
| Ecart-type | 23.3 | 50.4 | 64.9 | 89.4 | 59.0 | 34.6 | 17.0 | 12.8 | 9.60 | 8.30 | 5.60 | 4.80 | |
| Max. | 104 | 195 | 309 | 415 | 405 | 177 | 94.5 | 80.4 | 65.9 | 58.8 | 44.1 | 38.0 | |
| Q1 | 64.3 | 169 | 201 | 237 | 229 | 137 | 80.0 | 63.6 | 53.8 | 49.1 | 36.4 | 32.3 | |
| Méd. | 50.0 | 128 | 160 | 156 | 129 | 96.1 | 64.7 | 53.2 | 48.9 | 43.2 | 33.8 | 26.9 | |
| Q3 | 35.1 | 68.1 | 111 | 121 | 112 | 79.2 | 54.7 | 43.9 | 44.5 | 35.6 | 27.9 | 25.1 | |
| Min. | 23.9 | 45.3 | 63.7 | 49.2 | 714 | 49.5 | 39.5 | 31.1 | 35.1 | 31.2 | 25.9 | 23.0 | |

L'ajustement statistique sur l'échantillon de trente valeurs annuelles (observées ou calculées) fournit les quantiles suivants :

tableau 5.56.

Mangoro à Mangoro-gare
Quantiles des apports annuels

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Hmm | 396 | 446 | 497 | 567 | 732 | 950 | 1089 | 1220 | 1387 |
| Q ($m^3/s$) | 45.2 | 50.9 | 56.7 | 64.7 | 83.5 | 108 | 124 | 139 | 158 |
| q ($l/s/km^2$) | 12.6 | 14.1 | 15.8 | 18.0 | 23.2 | 30.0 | 34.4 | 38.6 | 43.9 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 2.75, échelle : 692 mm, position : 40.8 mm, forme : .324).
Centennales sèche et humide : H = 366 mm (Q = 41.7 $m^3/s$) et 1512 mm (Q = 172 m/s).

## 6.1.1.3. Crues

### *6.1.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux*

L'extrapolation de type logarithmique qui a été menée jusqu'à 2 750 $m^3/s$ est malheureusement assez forte et ne s'appuie que sur les jaugeages réalisés entre 2,86 m (Q = 266 $m^3/s$) et 5,20 m (Q = 850 $m^3/s$).

tableau 5.57.

Mangoro à Mangoro-gare
Maximums annuels de crues

| Année | Q$m^3/s$ | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1956-57 | 340 | 06/02/57 06h00 | 3,28 | 3rel |
| 1957-58 | | | | |
| 1958-59 | 2750 | 26/03/60 12h00 | 9,85 | PHE |
| 1959-60 | 157 | 04/01/61 06h12 | 2,29 | Min |
| 1960-61 | 312 | 27/12/61 18h00 | 3,15 | 3rel |
| 1961-62 | 377 | 03/01/63 06h00 | 3,45 | 3rel |
| 1962-63 | 270 | 09/03/64 18h00 | 2,95 | 3rel |
| 1963-64 | 659 | 04/02/65 12h00 | 4,52 | 3rel |
| 1964-65 | 839 | 11/12/75 12h00 | 5,15 | 3rel |
| 1965-66 | 275 | 07/03/67 18h00 | 2,98 | 3rel |
| 1966-67 | 529 | 31/12/67 06h00 | 4,05 | 3rel |
| 1967-68 | 351 | 18/12/68 06h00 | 3,33 | 3rel |
| 1968-69 | 413 | 02/02/70 06h00 | 3,60 | 3rel |
| 1969-70 | 355 | 29/01/71 06h00 | 3,35 | 3rel |

suite

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1971-72 | 1080 | 01/03/73 06h00 | 5,85 | 3rel |
| 1972-73 | 1080 | 09/01/74 18h00 | 5,86 | 3rel |
| 1973-74 | 393 | 13/03/75 18h00 | 3,52 | 3rel |
| 1974-75 | 1850 | 01/01/76 00h00 | 7,80 | PHE |
| 1975-76 | 349 | 26/02/77 | 3,32 | 3rel |
| 1976-77 | 645 | 02/02/78 06h00 | 4,45 | PHE |
| 1977-78 | 275 | 14/02/79 | 2,98 | 3rel |
| 1978-79 | 243 | | 2,81 | 3rel |

### *6.1.1.3.2. Résultats de l'enquête historique*

Les seuls renseignements obtenus (archives FOM) ne concernent que le cyclone de 1905 (bien connu sur l'ALAOTRA), dont la crue (5,00 m) aurait "submergé la case du bac du MANGORO sur la route de TAMATAVE", soit une hauteur à l'échelle actuelle 6,00 m.
Le débit correspondant aux plus hautes eaux de 1959 (cyclone Cap Est) est approché.
Une année sur deux, le débit maximal est observé entre le 2 janvier et le 4 mars (date médiane : 2 février - dates extrêmes : 11 décembre et 3 avril).
Les relations entre débits caractéristiques de crue sont les suivantes :
QMax = 1.21 QJMax - 68 ($R^2$ = .98) QMax /QJMax = 1.08
QMax = 2.34 DCC - 165 ($R^2$ = .58) QJMax/DCC = 1.78
QMax = 4.13 DC1 - 294 ($R^2$ = .58) QJMax/DC1 = 2.65
L'ajustement d'une loi de Fréchet à l'échantillon de 21 valeurs observées fournit les quantiles suivants :

tableau 5.57 bis.
Mangoro à Mangoro-gare

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 440 | 810 | 1210 | (2950) | (4300) |
| q l/s/km² | 120 | 225 | 340 | (820) | (1200) |

La crue cyclonique de 1959 serait proche de la crue de récurrence cinquantennale.

## 6.1.1.4. Basses eaux

Aux débits de saison sèche, s'ajuste un faisceau de droites enveloppes correspondant au tarissement de pentes a comprises entre .0022 et .0069 (50 % des coefficients compris entre $\alpha$ = .0051 et .0065).
Le coefficient $\alpha$ est influencé par le potentiel initial des nappes représenté par le débit charnière Qo observé généralement en mai ou juin.
$\alpha = (34.8 \text{ Log } Qo - 80).10^{-4}$ ($R^2$ = .65 P > .995)

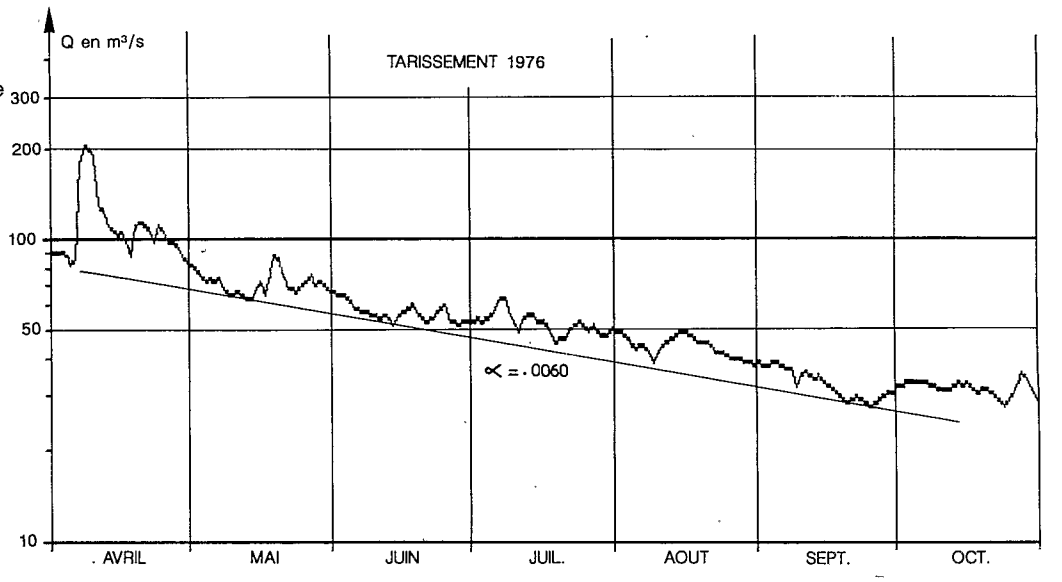
Les valeurs médianes sont les suivantes :
Qo # 47 m³/s, $\alpha$ = .0060 Tc = 115 jours.

Le stock initial médian (courant mai) correspond à un volume de $670.10^6$ m³ (lame équivalente : 187 mm).

Le graphe 5.29. représente le tarissement de l'année 1976.

figure 5.29.

Mangoro à Mangoro-gare




Les débits caractéristiques d'étiage observés sont les suivants :

tableau 5.57. ter

Mangoro à Mangoro-gare
Débits caractéristiques d'étiages (m³/s)

| DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|
| 31.3 | 23.8 | 20.8 | 20.1 | 20-11-60 |
| 30.2 | 23.0 | 21.1 | 20.0 | 02-11-61 |
| 33.6 | 24.8 | 23.3 | 22.0 | 05-11-62 |
| 39.5 | 25.2 | 22.0 | 21.2 | 15-10-63 |
| 44.3 | 30.0 | 25.5 | 24.6 | 01-10-64 |
| 46.1 | 30.0 | 27.0 | 24.8 | 01-11-65 |
| 34.0 | 23.5 | 21.3 | 20.8 | 06-11-66 |
| 41.2 | 29.7 | 25.3 | 24.1 | 28-10-67 |
| 36.1 | 23.2 | 21.9 | 21.3 | 06-10-68 |
| 41.9 | 26.9 | 22.4 | 21.6 | 18-10-69 |
| 42.1 | 28.0 | 25.3 | 23.2 | 02-11-70 |
| 42.1 | 30.6 | 25.8 | 23.8 | 11-10-71 |
| 45.6 | 33.8 | 29.9 | 28.0 | 08-10-72 |
| 42.8 | 30.3 | 25.9 | 24.7 | 01-12-73 |
| 48.5 | 35.4 | 29.3 | 27.1 | 10-10-74 |
| 52.4 | 34.2 | 28.2 | 26.1 | 26-10-75 |
| 40.7 | 30.7 | 28.1 | 26.4 | 26-11-76 |
| | | | (20.1) | 24-10-78 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 52.4 | 35.4 | 29.9 | 28.0 | 01-12 |
| Q1 | 45.0 | 30.7 | 27.6 | 24.8 | 05-11 |
| Méd. | 41.2 | 29.7 | 25.3 | 23.5 | 26-10 |
| Q3 | 35.0 | 24.3 | 22.0 | 21.2 | 11-10 |
| Min. | 30.2 | 23.0 | 20.8 | 20.0 | 01-10 |

Les relations entre débits caractéristiques sont les suivantes :

DCE = 1.18 QJmin - 2.9 ($R^2$ = .98P > .995) DCE /QJmin = 1.06
DC11= 1.53 QJmin - 7.6 ($R^2$ = .91P > .995) DC11/QJmin = 1.20
DC9 = 2.04 QJmin - 7.2 ($R^2$ = .71P > .99) DC9 /QJmin = 1.73

Enfin, le débit minimal journalier est relié aux facteurs déterminants de l'étiage par les relations suivantes :

QJmin = .008 P12010203 + 14.3 ($R^2$ = .47 P > .975)
QJmin = .4 Qmensuel minimal + 11.8 ($R^2$ = .53 P > .995)
QJmin = 9.1 Q $04^{.20}$ ($R^2$ = .25 P > .95)

Pour l'échantillon de dix-huit valeurs du débit minimal journalier, l'ajustement statistique retenu fournit les quantiles suivants :

tableau 5.58.

Mangoro à Mangoro-gare
Débits minimaux QJmin

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Réccurence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q ($m^3/s$) | 19.4 | 20.2 | 21.3 | 23.3 | 25.4 | 26.4 | 27.3 |
| Q ($l/s/km^2$) | 5.4 | 5.6 | 5.9 | 6.5 | 7.1 | 7.3 | 7.6 |

Loi de Gauss (test Brunet-Moret : 3.20, échelle : 2.42, position : 23.3 $m^3/s$).
Cinquantennales sèche et humide : 18.4 $m^3/s$ (5.1 $l/s/km^2$) et 28.3 $m^3/s$ (7.9 $l/s/km^2$).

### 6.1.1.5. Bilan hydrologique

Pour une pluviométrie moyenne sur le bassin de 1 500 mm, la lame écoulée interannuelle (770 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 730 mm et un coefficient d'écoulement Ke = 51 %.

Les termes mensuel et annuel du bilan sont figurés au tableau 5.59. et graphe 5.30.

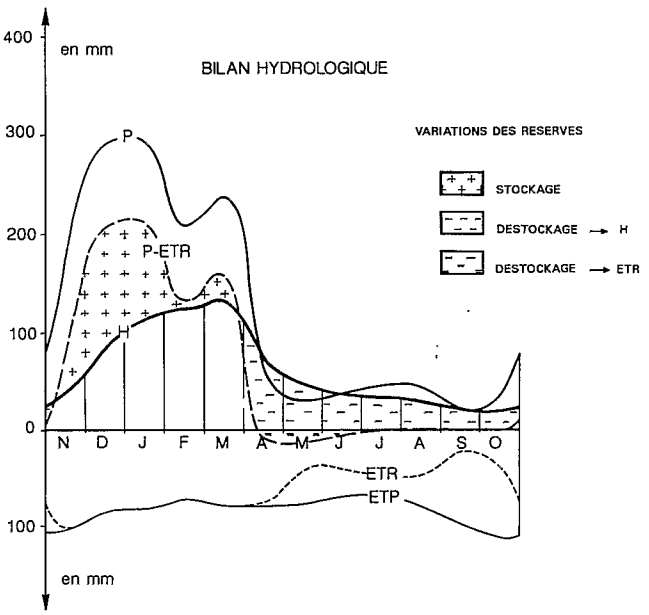
tableau 5.59.

Mangoro à Mangoro-gare
Bilan hydrologique (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 183 | 290 | 294 | 207 | 238 | 67 | 32 | 38 | 45 | 48 | 22 | 36 | 1500 |
| ETP | 102 | 86 | 82 | 72 | 79 | 78 | 79 | 68 | 69 | 80 | 95 | 110 | 1000 |
| ETR | 102 | 86 | 82 | 72 | 79 | 75 | 42 | 41 | 45 | 48 | 22 | 36 | 730 |
| P-ETR | 81 | 204 | 212 | 135 | 159 | -8 | -10 | -3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 770 |
| H | 38 | 87 | 114 | 124 | 132 | 75 | 49 | 38 | 36 | 32 | 24 | 21 | 770 |
| ΔR+ | 43 | 117 | 98 | 11 | 27 | | | | | | | | +296 |
| ΔR- | | | | | | 83 | 59 | 41 | 36 | 32 | 24 | 21 | -296 |
| R | 43 | 160 | 258 | 269 | 296 | 213 | 154 | 113 | 77 | 45 | 21 | 0 | |

figure 5.30.

Mangoro à Mangoro-gare



Pour la saison des pluies novembre-mars, les précipitations cumulées (1 212 mm) représentent 81 % du total annuel. L'ETR égale à l'ETP représente 421 mm et le cumul des lames écoulées, 495 mm (soit 64 % du total annuel). Le solde P-ETR-H est stocké dans les altérites.

Les réserves, fin mars, représentent 296 mm dont la quasi-totalité correspond par drainage, au cumul des lames écoulées d'avril à octobre (275 mm). Il reste un léger solde (21 mm) dans les réserves utiles du sol pour soutenir en avril et mai, l'ETR qui est cependant réduite à 53 % de l'ETP de saison sèche.

La réserve moyenne d'avril-mai (183 mm) correspond aux réserves calculées d'après Qo et a pour début mai (187 mm).

Bien que l'on puisse noter une légère recrudescence des précipitations en juillet-août (prolongement très affaibli de la tendance pseudo-équatoriale des régimes pluviométriques de la côte est), le mécanisme ainsi schématisé diffère assez nettement de ceux observés sur les bassins de la côte est : en saison sèche, les débits proviennent quasi exclusivement du drainage des réserves sans apports notables (sauf année très excédentaire) des précipitations.

## 6.1.2. Le Mangoro à Ambodimanga (bac)

La station du bac d'AMBODIMANGA est située sur le MANGORO en aval de la gare du MANGORO.

Les coordonnées de la station sont les suivantes : 19°04'S - 48°06'E. Le bassin a une superficie de 4 735 km².

Les observations ont été effectuées de décembre 1963 à octobre 1975.

tableau 5.60.

Débits moyens mensuels et annuels

Station :1250900105 Ambodimanga (bac) Latitude : 19.40.00
Rivière : Mangoro Longitude : 48.06.00
Pays : Madagascar
Bassin : Mangoro Aire : 4 735 km²
Débit en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1962-63 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1963-64 | - | 136 | - | - | 314 | 125 | 80.4 | 71.9 | 67.2 | 65.8 | 51.4 | 49.1 | - |
| 1964-65 | 82.9 | 200 | 261 | 425 | 260 | 220 | 105 | 79.9 | 76.2 | 80.4 | 54.7 | 42.6 | 157 |
| 1965-66 | 67.9 | 251 | 195 | 156 | 130 | 98.8 | 81.1 | 62.5 | 64.4 | 63.3 | 51.1 | 35.3 | 105 |
| 1966-67 | 36.3 | 104 | 220 | 185 | 329 | 134 | 83.5 | 69.3 | 61.6 | 55.7 | 54.9 | 38.3 | 114 |
| 1967-68 | 145 | 278 | 291 | 226 | 233 | 118 | 79.0 | 66.0 | 70.0 | 55.7 | 42.5 | 33.6 | 137 |
| 1968-69 | 69.1 | 260 | 164 | 229 | 116 | 116 | 73.2 | 62.2 | 55.0 | 67.4 | 48.5 | 35.4 | 108 |
| 1969-70 | 61.0 | 243 | 336 | 268 | 158 | 160 | 100 | 78.1 | 68.5 | 70.6 | 50.2 | 38.7 | 136 |
| 1970-71 | 52.5 | 72.6 | 332 | 404 | 221 | 111 | 90.6 | 70.6 | 66.7 | 56.2 | 47.9 | 41.5 | 131 |
| 1971-72 | 115 | 240 | 153 | 560 | 436 | 227 | 124 | 87.9 | 85.2 | 61.9 | 47.7 | 52.7 | 183 |
| 1972-73 | 66.1 | 144 | 428 | 462 | 567 | 251 | 136 | 107. | 90.2 | 79.3 | 55.7 | 44.9 | 203 |
| 1973-74 | 36.9 | 62.3 | 223 | 221 | 174 | 163 | 101 | 76.3 | 82.3 | 61.2 | 50.5 | 48.2 | 108 |
| 1974-75 | 72.7 | 240 | 253 | 402 | 576 | 242 | 140 | 97.0 | 81.5 | 78.1 | 61.6 | 42.1 | 191 |
| 1975-76 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 85.2 | 115 | 245 | 233 | 216 | 146 | 107 | 100 | 104 | 140 | 94.4 | 41.9 | 143 |

## 6.1.2.1. Apports annuels

En dépit d'une sous-estimation possible des débits de hautes-eaux due au défaut de mesures des forts débits, la corrélation entre les lames écoulées annuelles des deux stations du MANGORO est excellente :

HAMBODI = 1.15 HGARE - 38 ($R^2$ = .98 P > .995)

Cette relation permet d'évaluer les quantiles de la distribution des lames annuelles.

| | Années sèches | | Médiane | Années humides | |
|---|---|---|---|---|---|
| Réccurence | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 |
| Hmm | 534 | 614 | 804 | 1055 | 1214 |
| Q ($m^3/s$) | 80.1 | 92.1 | 121 | 158 | 182 |
| q ($l/s/km^2$) | 16.9 | 19.5 | 25.6 | 33.4 | 38.4 |

Pour une pluviométrie estimée à 1 500 à 1 600 mm, la lame écoulée moyenne (805 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 700 à 800 mm (Ke = 51 %).

## 6.1.2.2. Crues

### *6.1.2.2.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux*

Si la station peut être considérée comme très stable en moyennes et hautes eaux (rapides et chute), l'extrapolation de type logarithmique est très forte et ne s'appuie que sur les jaugeages de février 1964 réalisés entre 4,09 m (Q = 160 $m^3/s$) et 4,94 m (Q = 321 $m^3/s$).

tableau 5.61.

Mangoro à Ambodimanga
Maximums annuels de crues

| Année | Q $m^3/s$ | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1963-64 | 966 | 10/03/64 06h00 | 7,35 | Min |
| 1964-65 | 948 | 04/02/65 18h00 | 7,28 | 3rel |
| 1965-66 | 389 | 12/12/65 06h00 | 5,20 | 3rel |
| 1966-67 | 753 | 08/03/67 06h00 | 6,56 | 3rel |
| 1967-68 | 545 | 17/01/68 06h00 | 5,79 | 3rel |
| 1968-69 | 563 | 18/12/68 12h00 | 5,86 | 3rel |
| 1969-70 | 547 | 04/01/70 06h00 | 5,80 | 3rel |
| 1970-71 | 774 | 29/01/71 06h00 | 6,64 | 3rel |
| 1971-72 | 1270 | 16/02/72 18h00 | 8,50 | 3rel |
| 1972-73 | 1150 | 01/03/73 06h00 | 8,05 | 3rel |
| 1973-74 | 466 | 10/01/74 18h00 | 5,50 | 3rel |
| 1974-75 | 1380 | 16/03/75 06h00 | 8,94 | 3rel |

### *6.1.2.2.2. Extension de l'échantillon de crues*

Doublant la station de MANGORO-Gare, l'échelle d'AMBODIMANGA n'a plus été contrôlée après mai 1973 et il est probable que la crue consécutive au cyclone Inès 14-15/03/1975) a dépassé (largement ?) la cote 8,94 m et 1 380 $m^3/s$ (1 850 $m^3/s$ à MANGORO).

Neuf années sur douze, les dates d'apparition du débit journalier maximal correspondent, à un jour près, à celles des observations à la station amont (MANGORO-Gare). Pour les autres années (1967-68, 1969-70 et 1970-71), elles correspondent au maximum secondaire de la station amont, à l'exception de la crue de 1975, probablement sous estimée à AMBODIMANGA et la correspondance entre les débits maximaux des deux stations est correcte.

QJMaxAMBO = .85 QJMaxGARE + 250 (R2 = .91)

L'ajustement d'une loi Gamma incomplète à l'échantillon de douze années fournit les valeurs suivantes :

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 |
|---|---|---|---|
| Qm³/s | 750 | 1060 | 1250 |
| q l/s/km² | 160 | 225 | 265 |

### 6.1.2.3. Basses eaux

tableau 5.62.

Mangoro à Ambodimanga
Débits journaliers minimaux (m³/s)

| DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|
| | 36.3 | 29-10-64 |
| 40.7 | 36.4 | 01-11-65 |
| 28.9 | 25.8 | 08-11-66 |
| 36.0 | 34.3 | 27-10-67 |
| 28.7 | 27.9 | 02-11-68 |
| 29.8 | 28.2 | 24-10-69 |
| 34.6 | 32.0 | 04-11-70 |
| 37.4 | 34.7 | 31-10-71 |
| 38.7 | 37.0 | 08-10-72 |
| 33.9 | 30.8 | 02-12-73 |
| 39.7 | 36.6 | 04-12-74 |
| | 35.1 | 26-10-75 |

Les concordances de date entre les deux stations sont bonnes, neuf années sur douze.

Entre les débits minimaux journaliers, la corrélation est la suivante :

QJminAMBO = 1.41 QJminGARE - 1.26 (R2 = .69 P > .995)

Cette corrélation est correcte compte tenu des apports intermédiaires (dérivation du barrage de MANTASOA).

Les quantiles suivants peuvent être évalués :

| | Décennale sèche | Médiane | Décennale humide |
|---|---|---|---|
| QJmin (m³/s) | 27.2 | 31.6 | 36.0 |
| q (l/s/km2) | 5.7 | 6.7 | 7.6 |

## 6.1.3. L'Andranobe au pont Fanalamanga

La station, située dans le périmètre de reboisement d'ANJAFY, à 20 km au nord-ouest d'ANDAINGO, au débouché d'une vaste zone dépressionnaire drainée par l'ANDRANOBE, contrôle un bassin de 105 km².

Coordonnées : 18°12'S - 48°11'E.

L'échelle a été mise en place en septembre 1980. Quatre-vingt six mesures de débit (entre 0.28 m³/s et 10.5m³/s) ont permis d'établir sept courbes d'étalonnage avec une dispersion assez importante des jaugeages de basses eaux due à la mauvaise qualité des sections de mesure (végétation abondante).

tableau 5.63.

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1980/81 | .825 | 1.58 | 889 | 1.15 | 3.67 | 1.26 | 1.05 | .719 | .583 | .539 | .382 | .371 | - |
| 1981/82 | .667 | 1.84 | 4.70 | 3.49 | 7.60 | 3.08 | 2.18 | 1.84 | 1.70 | 1.45 | 1.42 | 1.51 | 2.62 |
| 1982/83 | 1.26 | 2.06 | 2.10 | 2.51 | 2.51 | 2.09 | 1.39 | 1.20 | 1.08 | .815 | .332 | .235 | 1.47 |
| 1983/84 | .851 | 3.66 | 4.42 | 3.31 | 2.88 | 3.00 | 1.80 | 1.59 | 1.49 | 1.23 | .762 | .652 | 2.14 |
| 1984/85 | 1.70 | 1.15 | 1.94 | 3.65 | 3.17 | 1.95 | 1.40 | 1.21 | 1.11 | .963 | .815 | .745 | 1.65 |
| 1985/86 | .749 | 3.05 | 1.49 | 2.71 | 3.48 | 1.76 | 1.22 | .904 | .812 | .791 | .587 | 1.46 | 1.58 |
| 1986/87 | 1.38 | 2.53 | 5.32 | 5.75 | 3.37 | 2.94 | 2.08 | 1.71 | 1.25 | 1.11 | .848 | .823 | 2.43 |
| 1987/88 | .684 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 1.01 | 2.27 | 2.98 | 3.22 | 3.81 | 2.30 | 1.59 | 1.31 | 1.15 | .985 | .735 | .828 | 1.84 |

Pour une pluviométrie moyenne annuelle évaluée à 1 350 mm, la lame moyenne de l'ordre de 550 mm correspond à un déficit d'écoulement d'environ 800 mm (Ke = 41 %).

### 6.1.3.1. Crues

Les valeurs maximales journalières ont été observées :

| Date | QJmax (m³/s) | q (l/s/km²) |
|---|---|---|
| 1980-81 | 18.2 | 173 |
| 1981-82 | 31.1 | 296 |
| 1982-83 | 10.6 | 101 |
| 1983-84 | 14.4 | 137 |
| 1984-85 | 14.0 | 133 |
| 1985-86 | 20.7 | 197 |
| 1986-87 | 15.0 | 143 |

### 6.1.3.2. Basses eaux

Les valeurs journalières minimales suivantes ont été observées :

| Date | QJmax ($m^3/s$) | q(l/s/$km^2$) |
|---|---|---|
| 21-10-81 | .235 $m^3/s$ | 2.2 |
| 27-11-82 | .848 $m^3/s$ | 8.1 |
| 05-11-83 | .140 $m^3/s$ | 1.3 |
| 14-01-85 | .463 $m^3/s$ | 4.4 |
| 20-11-85 | .320 $m^3/s$ | 3.0 |
| 15-11-86 | .388 $m^3/s$ | 3.7 |
| 10-87 | ≤ .644 $m^3/s$ | ≤ 6.1 |

Débit d'étiage moyen : .4 $m^3/s$ (3.8 l/s/$km^2$)

## 6.1.4. La Mandraka au PK 68.68

La station (18°55'42"S - 47°56'34E) était située au pont de la route ANTANANARIVO-TOAMASINA et contrôlait un bassin de 57 $km^2$. Le bassin, d'une altitude moyenne de 1 250 m, est situé sur les gneiss du socle, avec une couverture d'assez faible épaisseur d'argiles latéritiques. La moitié du bassin est recouverte de forêt ombrophile, pour le reste, de prairie avec ilôts forestiers résiduels.

L'échelle a été mise en place en septembre 1948 et les observations ont été effectuées jusqu'en juin 1954, date de la construction du barrage hydro-électrique.

tableau 5.64.

Mandraka au PK 68.68
Débits moyens mensuels et annuels $m^3/s$

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1947-48 | | | | | | | | | | | 1.15 | 1.10 | |
| 1948-49 | 1.21 | 2.46 | 1.56 | 2.75 | 6.36 | 2.87 | 2.52 | 1.93 | 1.80 | 1.50 | 1.30 | 1.20 | 2.29 |
| 1949-50 | 1.30 | 1.10 | 1.80 | 7.10 | 3.60 | 2.70 | 2.10 | 1.40 | 1.47 | .89 | .70 | .60 | 2.03 |
| 1950-51 | .97 | .90 | 7.40 | 3.21 | 4.75 | 2.85 | 1.80 | 1.38 | 1.40 | 1.30 | 1.13 | .95 | 1.74 |
| 1951-52 | 2.01 | 1.46 | 4.17 | 3.67 | 4.45 | 2.90 | 2.72 | 2.58 | 1.90 | 1.85 | 1.51 | 1.35 | 2.54 |
| 1952-53 | 1.93 | 2.86 | 2.05 | 2.23 | 3.58 | 2.92 | 1.93 | 1.67 | 1.58 | 1.65 | 1.47 | 1.19 | 2.09 |
| 1953-54 | 1.32 | 1.69 | 2.87 | 2.01 | 3.01 | 1.65 | 1.53 | (1.6) | | | | | |
| Moyenne | 1.46 | 1.75 | 3.31 | 3.50 | 4.29 | 2.65 | 2.10 | 1.76 | 1.63 | 1.44 | 1.21 | 1.07 | 2.18 |

Pour une pluviométrie moyenne annuelle voisine de 2 000 mm, la lame écoulée moyenne interannuelle (1 200 mm) correspond à un déficit d'écoulement d'environ 800 mm (Ke = 60 %).

### 6.1.4.1. Crues

Les débits maximaux de crue observées sont les suivants :

| Date | QJmax ($m^3/s$) | q(l/s/$km^2$) |
|---|---|---|
| mars 1949 | (21.4) | 375 |
| février 1950 | (28) | 491 |
| janvier 1951 | (25) | 439 |
| mars 1952 | (30) | 526 |
| décembre 1952 | (12.5) | 219 |
| janvier 1954 | (33.4) | 586 |

### 6.1.4.2. Basses eaux

Débits journaliers minimaux :

| Date | QJmin ($m^3/s$) | q(l/s/$km^2$) |
|---|---|---|
| novembre 1948 | .80 | 14 |
| décembre 1949 | .75 | 13.2 |
| novembre 1950 | .15 | 2.6 |
| octobre 1951 | .81 | 14.2 |
| octobre 1952 | 1.25 | 21.9 |
| octobre 1953 | .95 | 16.7 |
| étiage moyen | .78 | 13.8 |

## 6.1.5. L'Antsapazana à la RN 2

La station (18°55'S - 48°11'E) est située au pont métallique de la RN 2 à environ 3 km de MORAMANGA et contrôle un bassin de 84 $km^2$. Petit affluent rive gauche du MANGORO, l'ANTSAPAZANA serpente dans une zone dépressionnaire plate caractérisée par de nombreux marécages et zones de débordements, d'une altitude moyenne de 920 m.

La station a été observée de mars 1980 à décembre 1984 et quarante jaugeages y ont été effectués entre 19 et 13.6 $m^3/s$. La station est très instable en basses eaux en raison de la construction de diguettes sommaires pour l'irrigation des rizières.

tableau 5.65.

Débits moyens mensuels et annuels ($m^3/s$)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Module |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1979-80 | | | | | 3,26 | 1,83 | 1,06 | 0,701 | 0,650 | 0,337 | 0,231 | 0,442 | |
| 1980-81 | 0,604 | 1,51 | 0,894 | 1,51 | 3,55 | 2,36 | 0,929 | 0,559 | 0,391 | 0,355 | 0,199 | 0,430 | 1,11 |
| 1981-82 | 0,378 | 2,56 | 7,97 | 7,14 | 6,39 | 2,68 | 1,66 | 1,22 | 0,985 | 0,488 | 0,435 | 0,479 | 2,68 |
| 1982-83 | 0,597 | 0,634 | 1,63 | 1,17 | 0,765 | 1,11 | 0,473 | 0,596 | 0,463 | 0,325 | 0,279 | 0,465 | 0,706 |
| 1983-84 | 1,53 | 2,54 | | | | | | | | | | | |
| Moyenne | ,777 | 1,81 | 3.50 | 3.27 | 3.49 | 2.00 | 1.03 | ,769 | ,622 | ,376 | ,286 | ,454 | 1,52 |

Pour une pluviométrie moyenne d'environ 1 400 mm, la lame interannuelle estimée à 640 mm correspond à un déficit d'écoulement de l'ordre de 760 mm (Ke = 46 %)

## 6.1.5.1. Crues

Les débits de pointe des crues maximales annuelles ont atteint les valeurs suivantes :

Année 1979-80 Q = 17,9 $m^3/s$ soit 213 $l/s/km^2$ le 23-03-80
Année 1980-81 Q = 16,4 $m^3/s$ soit 195 $l/s/km^2$ le 06-12-80
Année 1981-82 Q = 26,7 $m^3/s$ soit 318 $l/s/km^2$ le 30-01-82
Année 1982-83 Q = 14,8 $m^3/s$ soit 176 $l/s/km^2$ le 22-01-83

## 6.1.5.2. Basses eaux

tableau 5.66.

Débits caractéristiques d'étiages

| Année | Date du Qmin | Qmin | | DCE | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $m^3/s$ | $l/s/km^2$ | $m^3/s$ | $l/s/km^2$ |
| 1980 | 16-09-80 | 0,157 | 1,87 | 0,195 | 2,32 |
| 1981 | 30-09-81 | 0,114 | 1,36 | 0,146 | 1,74 |
| 1982 | 04-12-82 | 0,183 | 2,18 | 0,225 | 2,68 |
| 1983 | 25-07-83 | 0,205 | 2,44 | 0,240 | 2,86 |

Le débit d'étiage moyen est de l'ordre de .18 $m^3/s$ (2.2 $l/s/km^2$)

## 6.2. Le bassin de l'Onive

Le bassin de l'ONIVE draine la façade orientale du massif de l'ANKARATRA et la région des hauts-plateaux situés entre ANTANANARIVO et ANTSIRABE. Les formations géologiques correspondent aux roches cristallines du socle (gneiss et magmatites des TAMPOKETSA) recouvertes dans l'ANKARATRA par des roches basiques du volcanisme néogène à quater-naire. Les sols dominants sont des altérites ferrallitiques rouges sur roches basiques et cristal-lines diverses passant à l'aval à des sols à horizons jaune sur rouge. La végétation dominante est représentée par la prairie du centre à aristida avec présence de nombreuses rizières de bas fond et de pentes. Les hauts bassins de l'ILEMPONA (principal affluent de l'ONIVE) présentent des zones protégées de forêt ombrophile dense, parfois reconstituée.

### 6.2.1. L'Amborompotsy à Antsampandrano

La station d'ANTSAMPANDRANO (19°37'S - 47°05'E), à l'altitude de 1 900 m, contrôle un bassin versant de 95 km², drainé par l'AMBOROMPOTSY, petit affluent de l'ILEMPONA, elle-même affluent principal rive gauche de l'ONIVE. Le bassin d'altitude moyenne élevée (supérieure à 2 000 m) s'étend sur les pentes Sud de l'ANKARATRA et correspond en grande partie à une réserve forestière de repeuplement en essences diverses.
La première échelle, installée en juin 1957, a été doublée d'un limnigraphe en 1967.

Cinquante-cinq mesures de débit (entre 77 et 16.9 m³/s) ont permis de tracer les courbes d'étalonnage dont l'extrapolation a été conduite jusqu'à 68 m³/s. La qualité des données obtenues est moyenne.

La pluviométrie sur le bassin a été calculée d'après deux postes : NANOKELY (poids : .37) et ANTSAMPANDRANO (.63).

La moyenne interannuelle ainsi calculée : 1 666 mm (1945-1970) est un peu faible en raison de l'altitude des postes de référence. Nous avons estimé la pluviométrie moyenne sur le bassin à 2 000 mm (coefficient de correction des pluies mensuelles : 1.20).

#### 6.2.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 5.67

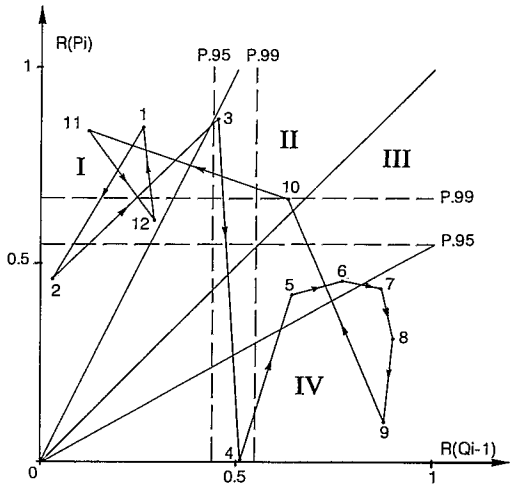
Amborompotsy à Antsampandrano
Coefficient de corrélation

| Hi ou Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .84 | (.51) | .85 | (.46) | .87 | -.12 | (.42) | (.46) | (.44) | (.31) | (.10) | .67 |
| Pi-1 | (.38) | (.46) | .65 | -.04 | (.08) | 56 | (36) | (44) | 58 | 55 | (23) | (.30) |
| Qi-1 | (12) | (29) | (.26) | (03) | .45 | .51 | .64 | .77 | .87 | .90 | .88 | .63 |

nota : .84 (P > .99) .56 (P > .95) (.36) (P > .95)

figure 5.31.

Amborompotsy à Antsampandrano




En saison des pluies, les précipitations du mois sont nettement prépondérantes (mais avec des relations assez médiocres en décembre et février). Avril est influencé par les débits de mars mais la corrélation n'est pas très forte. Les mois de saisons sèche sont sous l'influence prioritaire des débits antérieurs, mais, en mai, juin et juillet avec influence sensible des précipitations du mois.

| | |
|---|---|
| Saison des pluies | |
| Hi = .28 Pi + .22 $P_{i-1}$ - 35.7 | ($R^2$ = .64 P > .995) |
| H11 = .23 P11 + .12 P10 - 24.6 | ($R^2$ = .77 P > .995) |
| H12 = .323 P12 + .25 P11 - 50.1 | ($R^2$ = .63 P > .99) |
| H01 = .40 P01 + .20 P12 - 76.7 | ($R^2$ = .85 P > .995) |
| H02 = .22 P02 + 63 | ($R^2$ = .721 P > .90) |
| H03 = .365 P03 + .42 P0201 - 92.7 | ($R^2$ = .88 P >.995) |
| Saison sèche | |
| Q04 = .20 Q03 + 2.2 | ($R^2$ = .26 P > .95) |
| Q05 = .14 Q04 + 1.4 | ($R^2$ = .41 P > .95) |
| H05 = .22 H04 + .085 P05 + 27.8 | ($R^2$ = .85 P > .995) |
| Q06 = .59 Q05 + 3 | ($R^2$ = .59 P > .99) |
| H06 = .56 H05 + .17 P06 + 4.9 | ($R^2$ = .81 P> .995) |
| Q07 = .83 Q06 | ($R^2$ = .76 P> .(995) |
| H07 = .63 H06 + .04 P07 + 6.7 | ($R^2$ = .72 P > .995) |
| Q08 = .92 Q07 - .1 | ($R^2$ = .81 P > .99) |
| H08 = .90 H07 + .04 P08 - 2.9 | ($R^2$ = .75 P > .995) |
| Q09 = .66 Q08 + 2 | ($R^2$ = .77 P > .995) |
| Q10 = .83 Q09 + 2 | ($R^2$ = .40 P > .90) |
| H10 = .70 H09 + .045 P10 + 3.7 | ($R^2$ = .75 P > .995) |

tableau 5.69.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1250906503 Antsampandrano
Rivière : Amborompotsy
Pays : Madagascar
Bassin : Mangoro

Latitude : 19.37.00
Longitude : 47.05.00
Aire : 95.0 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1956/57 | - | - | - | - | - | - | - | - | 1.01 | .906 | .836 | .862 | - |
| 1957/58 | 1.18 | 2.38 | 5.15 | 2.51 | 7.32 | 2.11 | 1.36 | 1.05 | .932 | .870 | .835 | .752 | 2.20 |
| 1958/59 | 1.22 | 4.09 | 7.43 | 3.77 | 10.7 | 4.51 | 1.97 | 1.37 | 1.12 | 1.00 | .900 | .841 | 3.25 |
| 1959/60 | 1.46 | 2.23 | 5.86 | 5.28 | 5.49 | 2.87 | 1.70 | 1.37 | 1.15 | .986 | .945 | .826 | 2.51 |
| 1960/61 | .679 | 3.24 | 10.3 | 3.00 | 7.59 | 4.23 | 2.22 | 1.60 | 1.43 | 1.22 | .941 | .849 | 3.12 |
| 1961/62 | .887 | 6.54 | 4.19 | 5.45 | 5.10 | 4.62 | 2.23 | 1.55 | (1.02) | (.637) | (.562) | (.858) | 2.79 |
| 1962/63 | 5.04 | 6.22 | 7.30 | 8.57 | 5.78 | 2.92 | 1.87 | 1.76 | 1.37 | 1.13 | .946 | 1.03 | 3.63 |
| 1963/64 | 1.52 | 4.51 | 3.61 | 6.30 | 4.20 | 2.40 | 1.60 | 1.42 | (1.15) | (.957) | (.857) | (.879) | 2.14 |
| 1964/65 | 1.29 | 6.09 | 9.10 | 5.23 | 5.36 | 4.42 | 1.97 | 1.47 | 1.28 | 1.28 | 1.11 | 1.26 | 3.32 |
| 1965/66 | 1.17 | 2.89 | 2.06 | 2.49 | 2.36 | 1.84 | 1.65 | 1.21 | (1.00) | (.929) | (.940) | (.879) | 1.61 |
| 1966/67 | .891 | 1.65 | 3.95 | 2.71 | 7.66 | 3.16 | 1.62 | 1.28 | 1.09 | .865 | .932 | 1.16 | 2.25 |
| 1967/68 | 2.65 | 4.24 | 3.18 | 5.02 | 3.13 | 2.57 | 1.67 | 1.26 | 1.07 | .861 | .779 | .699 | 2.25 |
| 1968/69 | .804 | 4.22 | 5.48 | 8.22 | 4.81 | 2.79 | 1.91 | 1.24 | .983 | .855 | .730 | .792 | 2.71 |
| 1969/70 | 1.14 | 3.97 | (8.27) | 5.51 | 5.54 | 2.88 | 1.91 | 1.43 | 1.20 | 1.03 | .879 | .813 | 2.87 |
| 1970/71 | 2.76 | 3.30 | 6.59 | 7.78 | 5.53 | 3.52 | 2.20 | 1.64 | 1.39 | 1.13 | 1.05 | .863 | 3.12 |
| 1971/72 | 1.01 | 3.79 | 2.98 | 6.74 | 5.67 | 2.68 | 2.24 | 1.86 | 1.59 | 1.41 | 1.12 | 1.48 | 2.70 |
| 1972/73 | 2.28 | 4.47 | (6.44) | (12.0) | (17.2) | (4.12) | 2.09 | 1.44 | (1.29) | (1.21) | (.924) | (.832) | 4.49 |
| 1973/74 | 3.91 | 3.86 | 5.18 | 3.20 | 3.83 | 1.67 | (1.63) | (1.26) | (1.05) | (.865) | (.771) | (.840) | (2.34) |
| 1974/75 | 2.08 | 2.40 | 4.42 | 9.27 | 10.5 | 7.19 | 2.17 | 1.51 | 1.41 | 1.23 | 1.04 | .891 | 3.64 |
| 1975/76 | 1.99 | 3.33 | 4.78 | 4.80 | 5.47 | 4.46 | (2.02) | (1.49) | (1.24) | (1.04) | (.887) | (.936) | (2.70) |
| 1978/79 | 1.39 | 2.74 | (4.56) | 8.93 | 5.06 | 4.24 | 2.21 | 1.64 | 1.50 | 1.30 | 1.21 | 1.13 | 2.95 |
| Moyenne | 1.77 | 5.54 | 5.54 | 5.84 | 6.52 | 3.46 | 1.93 | 1.46 | 1.21 | 1.04 | .923 | .931 | 2.85 |
| Ecart-type | 1.12 | 2.14 | 2.14 | 2.63 | 3.29 | 1.29 | .27 | .20 | .20 | .20 | .15 | .20 | |
| Max. | 5.04 | 6.54 | 10.3 | 12.0 | 17.2 | 7.19 | 2.24 | 1.86 | 1.59 | 1.41 | 1.21 | 1.48 | |
| Q1 | 2.18 | 4.36 | 7.31 | 8.00 | 7.46 | 4.33 | 2.20 | 1.60 | 1.39 | 1.22 | 1.04 | 1.03 | |
| Méd. | 1.34 | 3.82 | 5.18 | 5.36 | 5.51 | 3.04 | 1.94 | 1.43 | 1.15 | 1.00 | .932 | .862 | |
| Q3 | 1.07 | 2.81 | 3.95 | 3.48 | 4.93 | 2.62 | 1.67 | 1.28 | 1.02 | .870 | .836 | .826 | |
| Min. | .679 | 1.65 | 2.06 | 2.49 | 2.36 | 1.67 | 1.36 | 1.05 | .932 | .637 | .562 | .699 | |

nota : les débits journaliers "observés" de saison sèche qui présentaient une allure suspecte pour les tarissements de 1962, 1964 et 1966, ont été corrigés d'après les stations voisines.
Les valeurs manquantes de mai à octobre 1974 et de mai à octobre 1976 ont été complétées d'après les régressions mensuelles hydropluviométriques.

Les débits caractéristiques mensuels sont représentés sur le graphe 5.32.

Les graphes 5.33. et 5.34. représentent des hydrogrammes annuels en année humide (1972-73, Q = 4.49 m³/s) et déficitaire (1965-66, Q = 1.61 m³/s).

figure 5.32.

Amborompotsy à Antsampandrano

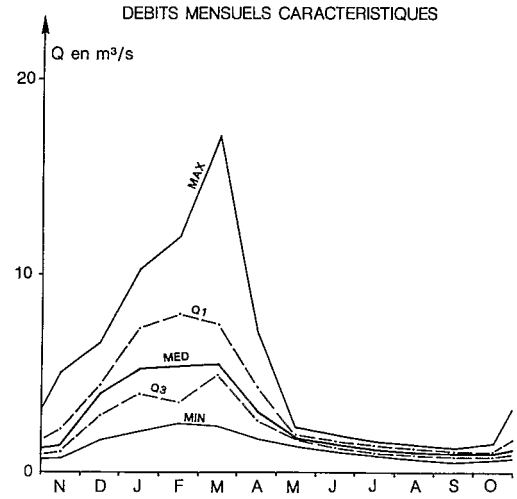



figure 5.33.

Amborompotsy à Antsampandrano

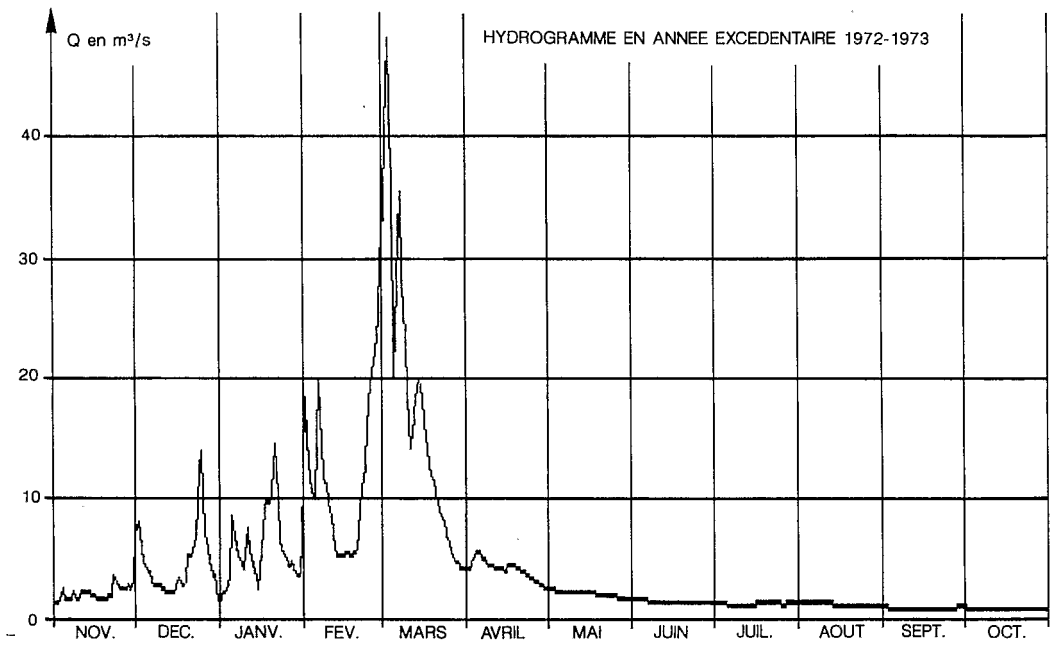
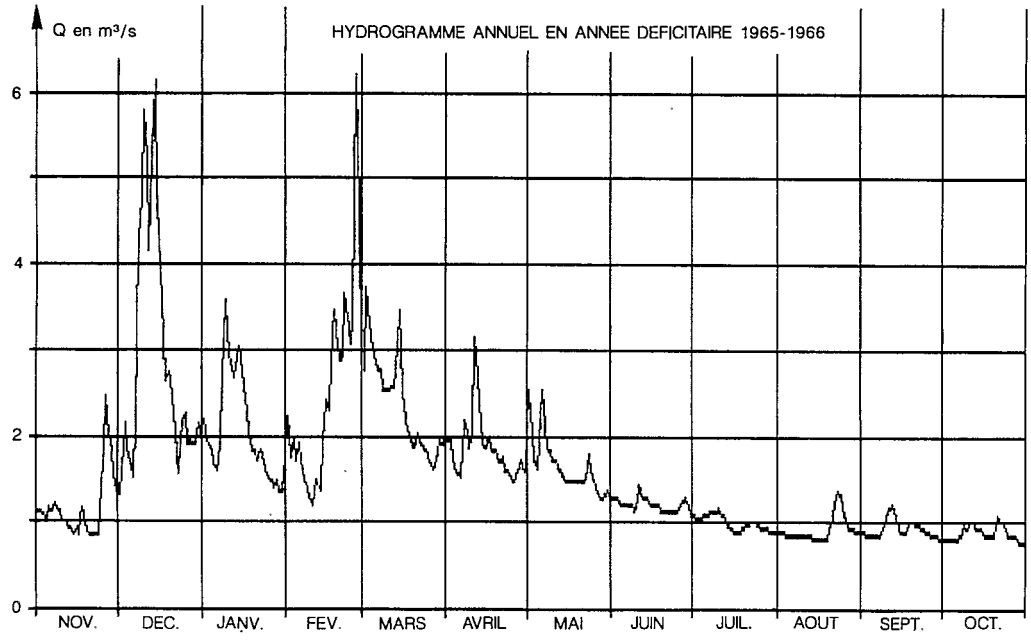


figure 5.34.

Amborompotsy à Antsampandrano




Les débits caractéristiques mensuels sont représentés sur le graphe 5.32.

Les graphes 5.33. et 5.34. représentent des hydrogrammes annuels en année humide (1972-73, Q = 4.49 m³/s) et déficitaire (1965-66, Q = 1.61 m³/s).

## 6.2.1.2. Apports annuels

Lames annuelles écoulées et précipitations annuelles (corrigées) sur le bassin sont liées par la relation suivante :

$H = .62 (P - 627)$ $(R^2 = .74 \quad P > .995)$

ou $H = .57 (P - 1067 (1 - 1.89 Cp))$ $(R^2 = .82 \quad P > .995)$

en prenant en compte le coefficient de concentration des précipitations annuelles Cp.

Avec les lames écoulées annuelles des bassins emboîtants ou voisins, les relations sont les suivantes :

HAMBOR. = 1.36 HONIVE - 48 $(R^2 = .71 \quad P > .995)$

HAMBOR. = 1.25 HMANANDONA + 135 $(R^2 = .66 \quad P > .995)$

Ces diverses relations ont permis de calculer les lames non observées de la période 1945-1979.

- d'après P et Cp de 1945-46 à 1956-57 :

| Année | 45/46 | 4647 | 47/48 | 48/49 | 49/50 | 50/51 | 51/52 | 52/53 | 53/54 | 54/55 | 55/56 | 56/57 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H | 615 | 1035 | 915 | 380 | 540 | 860 | 915 | 805 | 930 | 810 | 890 | 1080 |
| Q | 1.85 | 3.12 | 2.75 | 1.14 | 1.63 | 2.59 | 2.75 | 2.42 | 2.80 | 2.44 | 2.67 | 3.25 |

- d'après l'ONIVE pour 1976-77 et 1977-78 :

1976-77 H = 1205 mm Q = 3.63 m³/s
1977-78 H = 420 mm Q = 1.26 m³/s

L'ajustement statistique sur les trente-quatre valeurs annuelles observées et calculées (1945-1979) fournit les quantiles suivants :

tableau 5.70.

Amborompotsy à Antsampandrano Apports annuels

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Réccurence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Hmm | 430 | 522 | 604 | 702 | 891 | 1080 | 1179 | 1260 | 1352 |
| Q (m³/s) | 1.29 | 1.57 | 1.82 | 2.11 | 2..68 | 3.25 | 3.55 | 3.79 | 4.07 |
| q (l/s/km²) | 13.6 | 16.5 | 19.2 | 22.2 | 28.2 | 34.2 | 37.4 | 3.99 | 4.28 |

Loi de GAUSS (test Brunet-Moret : 4.17, échelle : 224 mm, position : 891 mm).
Centennales sèche et humide : 369 mm (Q = 1.11 m³/s) et 1413 mm (Q = 4.25 m³/s).

## 6.2.1.3. Crues

tableau 5.71.

Amborompotsy à Antsampandrano Maximums annuels de crues

| Année | Q m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1957-58 | 30 | 02/03/58 06h00 | 1,50 | 3rel |
| 1958-59 | 33 | 28/03/59 12h00 | 1,55 | 3rel |
| 1959-60 | 18 | 08/01/60 18h00 | 1,23 | 3rel |
| 1960-61 | 68 | 01/01/61 18h00 | 1,99 | 3rel |
| 1961-62 | 18 | 13/12/61 06h00 | 1,26 | 3rel |
| 1962-63 | 18 | 08/01/63 18h00 | 1,25 | 3rel |
| 1963-64 | 18 | 18/12/63 06h00 | 1,25 | 3rel |
| 1964-65 | 21 | 23/01/65 06h00 | 1,32 | 3rel |
| 1965-66 | 8 | 26/02/66 06h00 | 0,94 | 3rel |
| 1966-67 | 13 | 05/03/67 18h00 | 1,30 | 3rel |
| 1967-68 | 10 | 23/01/68 18h00 | 1,10 | 3rel |
| 1968-69 | 22 | 11/02/69 06h00 | 1,70 | 3rel |
| 1969-70 | 26 | 06/01/70 18h00 | 1,80 | 3rel |
| 1970-71 | 24 | 28/02/71 18h00 | 1,76 | Lim |
| 1971-72 | 16 | 15/02/72 06h00 | 1,46 | 3rel |
| 1972-73 | 27 | 01/04/73 00h00 | 5,86 | 3rel |
| 1973-74 | 17 | 27/11/73 18h00 | 5,50 | 3rel |
| 1974-75 | 15 | 10/03/75 06h00 | 5,40 | 3rel |
| 1975-76 | 11 | 06/01/76 06h00 | 5,19 | 3rel |
| 1976-77 | | | | |
| 1977-78 | (16) | 29/01/78 06h00 | 7,20 | Min |
| 1978-79 | (23) | 20/02/79 18h00 | 7,35 | 3rel |

Une année sur deux, le débit maximal est observé entre le 6 janvier et le 1er mars (date médiane : 29 janvier - dates extrêmes : 27 novembre et 28 mars).

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| QMax | = 1.40 | QJMax - 2.9 | ($R^2$ = .72) | QMax/QJMax = 1.25 |
| QJMax | = 2.25 | DCC - 5 | ($R^2$ = .85) | QJMax/DCC = 1.88 |
| QJMax | = 2.7 | DC1 | ($R^2$ = .44) | QJMax/DC1 = 2.78 |

L'ajustement d'une distribution de Fréchet aux 19 valeurs (1917-1976) fournit les quantiles suivants :

tableau 5.72.

Amborompotsy à Antsampandrano
Débits maximaux annuels

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 19 | 28 | 35 | (56) | (68) |
| q l/s/km² | 200 | 295 | 370 | (590) | (715) |

## 6.2.1.4. Basses eaux

Le tarissement est assez bien mis en évidence. Il se produit généralement à partir de mai ou juin, avec un débit initial Qo compris entre 1 et 2 m³/s. Les coefficients $\alpha$ de la droite de tarissement sont dans 50 % des cas compris entre .0041 et .0058 (min : .0035, max : .0067).

$\alpha$ méd. = .0052 $Tc$ = 140 jours

Le tarissement de 1970 est représenté sur le graphe 5.35. Les réserves drainables pour l'écoulement peuvent être évaluées en moyenne à 22.106 m³ (230 mm) en fin avril.

figure 5.35.

Amborompotsy
à
Antsampandrano

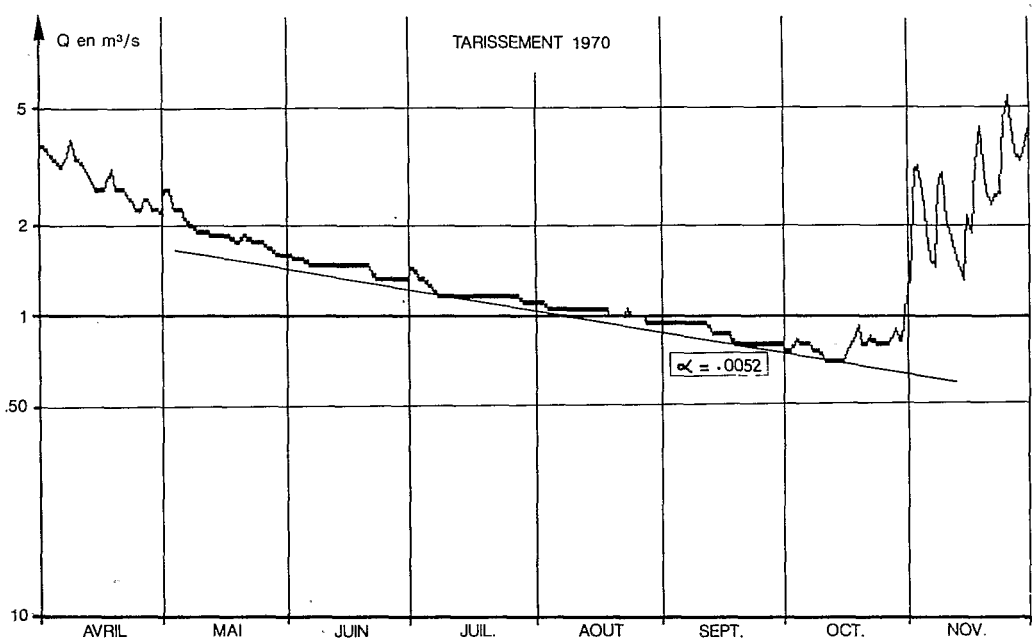


tableau 5.69.

Amborompotsy à Antsampandrano
Débits caractéristiques d'étiage (l/s)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1957 | - | - | 816 | 816 | 03-09 |
| 1958 | 849 | 691 | 604 | 604 | 13-10 |
| 1959 | 1020 | 844 | 834 | 764 | 01-10 |
| 1960 | 924 | 764 | 609 | 604 | 11-11 |
| 1961 | 1030 | 844 | 769 | 764 | 29-10 |
| 1962 | 914 | 580 | 540 | 510 | 04-10 |
| 1963 | 1290 | 924 | 854 | 844 | 27-09 |
| 1964 | 1030 | 844 | 769 | 740 | 04-10 |
| 1965 | 1200 | 1020 | 906 | 844 | 20-11 |
| 1966 | 910 | 810 | 684 | 619 | 07-11 |
| 1967 | 1090 | 875 | 822 | 822 | 18-08 |
| 1968 | 822 | 690 | 625 | 610 | 06-11 |
| 1969 | 875 | 724 | 677 | 625 | 21-10 |
| 1970 | 1120 | 822 | 775 | 724 | 11-10 |
| 1971 | 1070 | 822 | 705 | 625 | 09-11 |
| 1972 | 1530 | 1170 | 1060 | 1000 | 03-10 |
| 1973 | 1240 | 880 | 760 | 740 | 28-10 |
| 1974 | - | - | - | - | - |
| 1975 | 1310 | 948 | 829 | 822 | 18-10 |
| 1979 | - | - | - | 1050 | 01-10 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 1530 | 170 | 1060 | 1050 | 20-11 |
| Q1 | 1220 | 902 | 829 | 822 | 07-11 |
| Méd. | 1030 | 844 | 769 | 740 | 13-10 |
| Q3 | 912 | 744 | 677 | 619 | 01-10 |
| Min. | 822 | 580 | 540 | 510 | 03-09 |

tableau 5.70.

Amborompotsy
à Antsampandrano
Quantiles des débits
journaliers minimaux

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Réccurence | 20 | 10 | 5 | 0 | 5 | 10 | 20 |
| Q (l/s) | 547 | 581 | 626 | 728 | 851 | 926 | 994 |
| q (l/s/km²) | 5.7 | 6.1 | 6.6 | 7.7 | 9.0 | 9.7 | 10.5 |

Loi log normale (test Brunet-Moret = 2.81, échelle : 553 l/s, position : 175 l/s, forme : 24).
Cinquantennales sèche et humide : 512 l/s (5,4 l/s/km²) et 1.08 m³/s (11.4 l/s/km²).

Entre débits caractéristiques, les relations sont les suivantes :

DCE = 1.01 QJmin + 02 ($R^2$ = .85 P > .995) DCE/QJmin = 1.04
DC11 = 1.03 QJmin + 09 ($R^2$ = .89 P > .995) DC11/QJmin = 1.15
DC9 = 1.36 QJmin + 09 ($R^2$ = .77 P > .99) DC9/QJmin = 1.48

Il est enfin possible d'établir une relation entre QJmin et Q 0809 (moyenne des débits mensuels d'août et septembre), d'équation :

QJmin = .65 Q 0809 + 10 ($R^2$ = .60 P > .995)

Ces diverses relations montrent une bonne régulation des débits de basses eaux due à l'existence d'une nappe d'altérites assez importante et probablement au couvert forestier dense (rôle régularisateur de la litière d'humus).

### 6.2.1.5. Bilan hydrologique

Pour une pluviométrie moyenne interannuelle estimée à 2 000 mm, la lame écoulée moyenne (890 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 1 110 mm (Ke = 45 %).

Les termes mensuels du bilan sont présentés dans le tableau 5.71. et le graphe 5.36.

tableau 5.71.

Amborompotsy à Antsampandrano
Bilan hydrologique moyen (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 218 | 392 | 376 | 308 | 324 | 115 | 45 | 22 | 29 | 28 | 37 | 106 | 2000 |
| ETP | 119 | 102 | 109 | 99 | 104 | 102 | 104 | 90 | 86 | 102 | 126 | 157 | 1300 |
| ETR | 119 | 102 | 109 | 99 | 104 | 102 | 96 | 66 | 65 | 58 | 63 | 127 | 1110 |
| P-ETR | 99 | 290 | 267 | 209 | 220 | 13 | -51 | -44 | -36 | -30 | -26 | -21 | 890 |
| H | 45 | 101 | 147 | 141 | 170 | 89 | 51 | 37 | 32 | 28 | 24 | 25 | 890 |
| ΔR+ | 54 | 189 | 120 | 68 | 50 | | | | | | | | +481 |
| ΔR- | | | | | | 76 | 102 | 81 | 68 | 58 | 50 | 46 | -481 |
| R | 54 | 243 | 363 | 431 | 481 | 405 | 303 | 222 | 154 | 96 | 46 | 0 | |

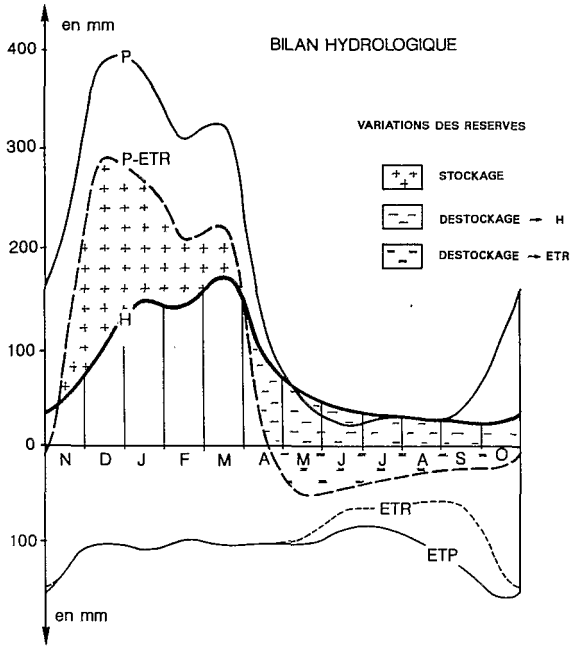
Les précipitations cumulées de la saison des pluies (novembre à mars) représentent 81 % du total annuel. Après satisfaction de l'ETR = ETP (533 mm) et production de l'écoulement (604 mm soit 68 % du total annuel), les réserves stockées dans les altérites et la réserve utile des sols représentent 481 mm en fin mars.

Le destockage se produit d'avril à octobre (saison "sèche") au profit :
- d'une part de l'écoulement : 286 mm (dont 273 mm à partir des nappes d'altérites et 13 mm à partir des précipitations) ;

- d'autre part de l'ETR : 577 mm (dont 369 mm à partir des précipitations et 208 mm à partir des réserves utiles du sol).

figure 5.36.

Amborompotsy à Antsampandrano




L'aspect du bilan hydrologique ne présente plus beaucoup de ressemblance avec ceux des bassins de la côte est. La saison "sèche" est beaucoup plus creusée et les précipitations de mai à octobre ne participent plus (en terme de bilan net) à l'écoulement. Le bassin est, il est vrai, situé à près de 75 km en retrait de la falaise de l'ANGAVO.

On notera également l'importance de l'ETR (bien que réduite à 85 % de l'ETP) ainsi que celle du stockage dans la réserve utile des sols, caractéristiques d'un bassin forestier tropical, cependant un peu atypique en raison des températures moyennes plus réduites (effet d'altitude).

Le cumul des lames écoulées de mai à octobre (200 mm) est comparable à la réserve drainable estimée en fin avril à partir de Qo et $\alpha$ (230 mm).

## 6.2.2. L'Onive à Ilempona

La station (19°38'S - 47°19'E) est située immédiatement à l'aval du confluent de l'ONIVE et de l'ILEMPONA et contrôle un bassin de 1 080 km².

Les débits observés en 1978-79 sont les suivants (m³/s) :

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10.1 | 16.0 | 48.6 | 88.6 | 49.0 | 40.8 | 18.0 | 12.9 | 12.3 | 10.4 | 7.13 | 4.27 | 26.1 |

Avec une pluviométrie annuelle de l'ordre de 1 800 mm, la lame moyenne interannuelle d'environ 900 mm correspond à un déficit d'écoulement d'environ 900 mm (Ke = 50 %).

## 6.2.3. L'Onive à Tsinjoarivo

La station (19°38'S et 47°41'E) est située à 1 350 m d'altitude, en amont de la chute de TSINJOARIVO, à quelques centaines de mètres en contrebas du "ROVA". Le bassin de l'ONIVE, d'une altitude maximale de 2 643 m (TSIAFAJAVONA) a une superficie de 3 200 km².

L'échelle a été installée en début août 1963 et doublée d'un limnigraphe TELEMNIP en 1967 (OTTX à flotteur à partir de 1972). Les lectures sont continues de août 1963 à mai 1980.

Cinquante mesures de débit (entre 3.6 et 420 m³/s) ont permis de tracer une courbe d'étalonnage unique, avec une faible dispersion des jaugeages. L'extrapolation est relativement faible, jusqu'à 700 m³/s. Les données sont de bonne qualité.

La pluviométrie est assez bien déterminée à partir de dix neuf stations bien réparties dont les principales sont : SOANINDRARINY (poids : .10), ANTANIFOTSY (.08), ILEMPONA (.12), AMBATOTSIPIMINA (.12), AMBOHIMANDROSO (.08), BELANITRA (.09), ANTSAMPANDRANO (.12), etc.

L'évaluation de la précipitation interannuelle (1430 mm) est cependant un peu faible (peu de postes d'altitude). La pluviométrie a été estimée à 1 590 mm (coefficient de correction des pluies mensuelles : 1.11).

### 6.2.3.1. Relations hydropluviométriques

tableau 5.72.

Onive à Tsinjoarivo
Coefficient de corrélation

| HI ou QI | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .93 | .81 | .80 | (.71) | .97 | (.44) | (.57) | (.14) | .87 | .76 | .76 | .74 |
| Pi-1 | .98 | .74 | (.67) | (.40) | -.40 | (.71) | .93 | (.52) | -.18 | .79 | .80 | (.67) |
| Qi-1 | (.50) | (.48) | (.43) | (.0) | .53 | (.40) | .79 | .91 | .86 | .86 | .72 | .61 |

nota : .93 (P > .99) .81 (P > .95) (.48) (P < .95)

Le graphe 5.37. permet d'effectuer les observations suivantes :

de novembre à mars, prépondérance du facteur précipitations du mois, avec influence secondaire du débit (ou des précipitations antérieures) en novembre et mars. Les lames d'avril, faiblement corrélées, et assez dispersées, dépendent également de la précipitation d'avril et de celle de mars. À l'exception de juin (très fortement dépendant du débit antérieur), les mois de saison sèche (secteurs II et III) sont déterminés, à parité, par les précipitations du mois et le débit du mois antérieur.

figure 5.37.

Onive à Tsinjoarivo

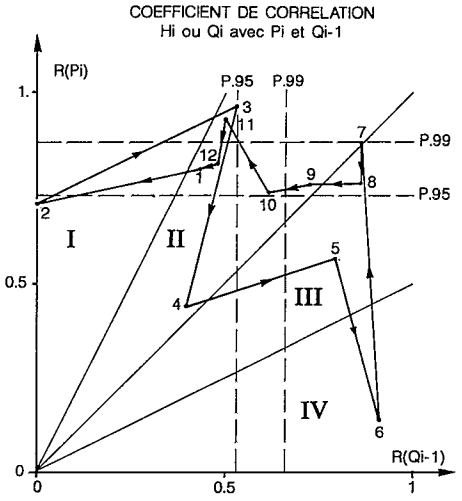



tableau 5.73.

Onive à Tsinjoarivo
Régressions mensuelles

| | | |
|---|---|---|
| | H11 = .20 P11 - 11.3 | ($R^2$ = .93 P > .99) |
| | H12 = .51 P12 - 61.3 | ($R^2$ = .81 P > .95) |
| | H01 = .59 P01 - 13.2 | ($R^2$ = .80 P > .95) |
| | H02 = .41 P02 + 12.7 | ($R^2$ = .71 P > .95) |
| | H03 = .67 P03 - 28.4 | ($R^2$ = .97 P > .99) |
| octobre + novembre | Hi = .10 Pi + .16 Pi-1 - 1 | ($R^2$ = .88 P > .995) |
| décembre à mars | Hi = .315 Pi + .21 Pi-1 - 21 | ($R^2$ = .57 P > .995) |
| décembre + janvier | Hi = .35 Pi + .35 Pi-1 - 78 | ($R^2$ = .80 P > .995) |
| février + mars | Hi = .47 Pi + 4.6 | ($R^2$ = .62 P > .995) |
| | Q05 = .33 Q04 + 19 | ($R^2$ = .62 P > .99) |
| | Q06 = .37 Q05 + 16.8 | ($R^2$ = .83 P > .99) |
| | Q07 = .68 Q06 + 7.1 | ($R^2$ = .74 P > .99) |
| | Q08 = .89 Q07 + 3 | ($R^2$ = .74 P > .99) |
| | Q09 = .54 Q08 + 6 | ($R^2$ = .52 P > .99) |
| | Q10 = 1.36 Q09 - 10.7 | ($R^2$ = .37 P > .95) |
| juillet à septembre | Hi = .12 Pi + 17.1 | ($R^2$ = .40 P > .995) |

Les débits mensuels et caractéristiques observés sont consignés dans le tableau 5.74. Le graphe 5.38. représente les débits caractéristiques mensuels. Les graphes 5.39. et 5.40., les hydrogrammes représentatifs d'une année humide (1972-73, Q = 101 m/s) et sèche (1965-66, Q = 54.8 m³/s).

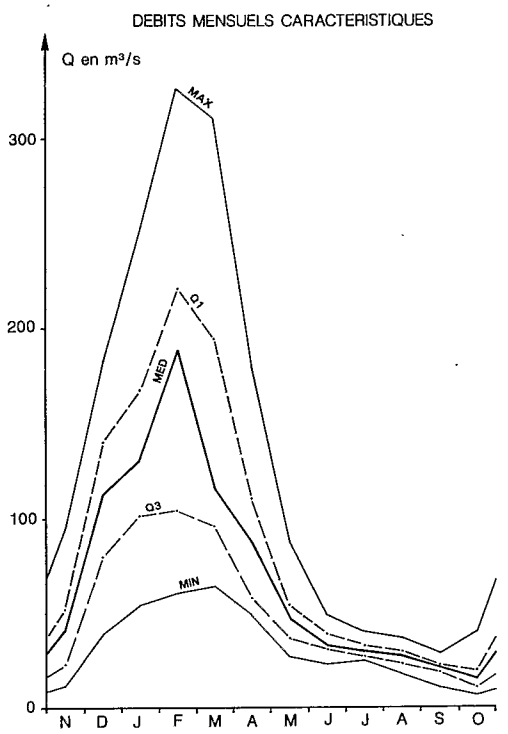



figure 5.38.

Onive à Tsinjoarivo

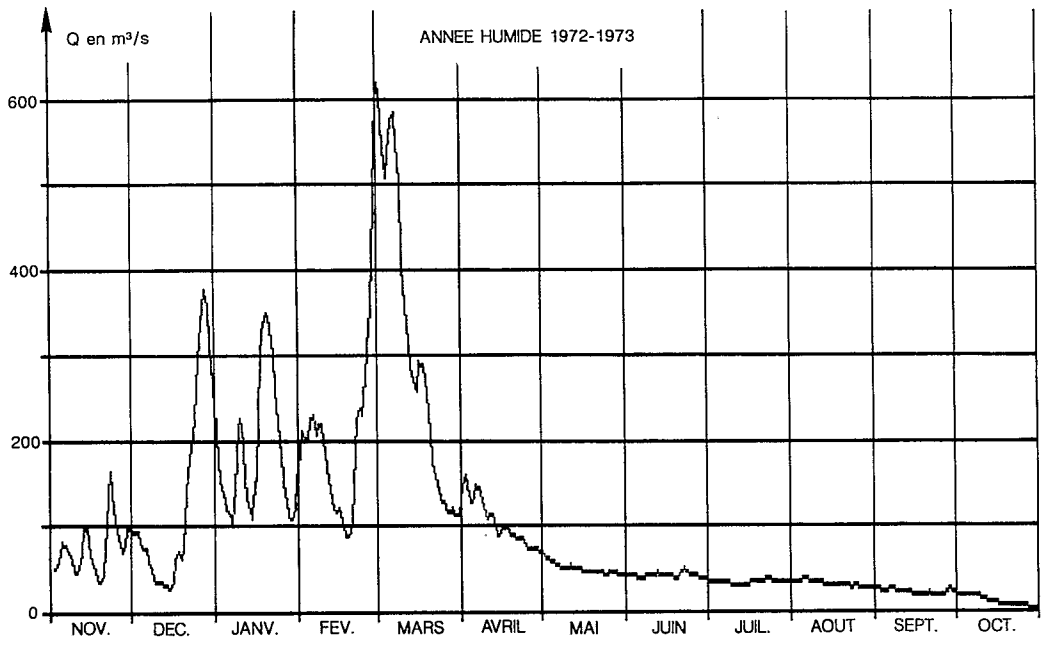
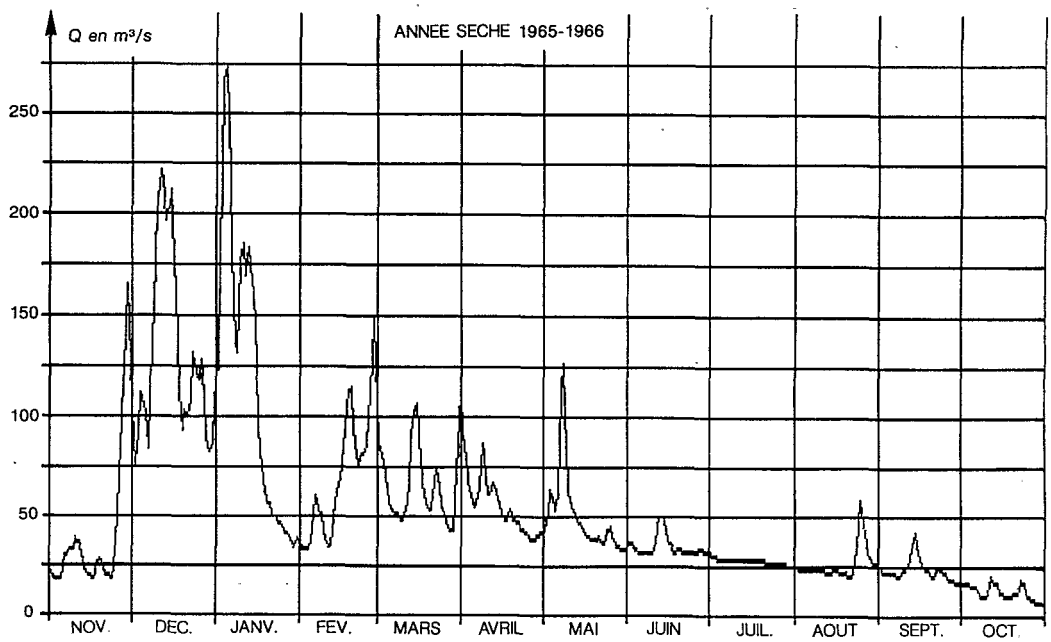



figure 5.39.

Onive à Tsinjoarivo

figure 5.40.
Onive à Tsinjoarivo




## 6.2.3.2. Apports annuels

Entre les lames annuelles de l'ONIVE et le précipitations annuelles, la relation est la suivante (influence de Cp très faible) :

$H = .71 (P - 555)$ $(R^2 = .84 \quad P > .995)$

Les régressions avec les lames écoulées des bassins voisins sont de bonne qualité :

$H = .64$ HMANGORO + 193 $(R^2 = .69 \quad P > .995)$
$H = .65$ HMANIA + 232 $(R^2 = .51 \quad P > .995)$
$H = .76$ HMANANDONA + 251 $(R^2 = .73 \quad P > .995)$
$H = 1.11$ HBEVOMANGA + 9 $(R^2 = .75 \quad P > .995)$
$H = 1.20$ HANDROMBA + 196 $(R^2 = .81 \quad P > .995)$
H = HSISAONY + 152 $(R^2 = .64 \quad P > .995)$

Ces relations permettent d'évaluer les valeurs non observées de la période 1945-1978.

| Année | 1945/46 | 1946/47 | 1947/48 | 1948/49 | 1949/50 | 1950/51 | 1951/52 | 1952/53 | 1953/54 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hmm | 810 | 1400 | 1630 | 460 | 465 | 585 | 725 | 605 | 545 |
| Qm³/s | 82.2 | 142. | 165. | 46.7 | 47.2 | 59.4 | 73.4 | 61.4 | 55.3 |
| Année | 54-55 | 55-56 | 56-57 | 57-58 | 58-59 | 59-60 | 60-61 | 61-62 | 62-63 |
| Hmm | 570 | 690 | 820 | 585 | 970 | 605 | 535 | 535 | 590 |
| Qm³/s | 57.8 | 69.8 | 83.2 | 59.4 | 98.4 | 61.2 | 54.3 | 54.3 | 59.9 |

1945-46 à 1947-48 d'après P
1948-49 à 1962-63 d'après IKOPA à BEVOMANGA

tableau 5.74.

Débits moyens mensuels et annuels

Station :1250902010 Tsinjoarivo
Rivière : Onive
Pays : Madagascar
Bassin : Mangoro

Latitude : 19.37.00
Longitude : 47.42.00

Aire : 3 200 km$^2$

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1962/63 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 27.0 | 20.3 | 19.2 | - |
| 1963/64 | 42.5 | 88.4 | 72.7 | 191 | 109 | 54.7 | 31.9 | 31.2 | 29.5 | 28.4 | 18.9 | 16.4 | 59.1 |
| 1964/65 | 38.5 | 183 | 220 | 188 | 161 | 136 | 47.0 | 33.4 | 35.7 | 36.2 | 28.1 | 26.8 | 94.1 |
| 1965/66 | 41.9 | 130 | 115 | 71.0 | 66.5 | 55.7 | 50.9 | 35.0 | 28.0 | 26.6 | 23.8 | 12.6 | 54.8 |
| 1966/67 | 12.0 | 39.3 | 126 | 74.6 | 186 | 70.1 | 34.4 | 27.2 | 24.6 | 21.1 | 21.3 | 23.3 | 55.1 |
| 1967/68 | 96.1 | 176 | 99.4 | 104 | 84.8 | 50.8 | 30.6 | 26.4 | 25.2 | 20.1 | 13.3 | 8.15 | 61.2 |
| 1968/69 | 24.4 | 124 | 134 | 208 | 93.0 | 88.2 | 62.6 | 36.1 | 29.5 | 29.6 | 20.6 | 14.8 | 71.3 |
| 1969/70 | 25.0 | 144 | 252 | 113 | 112 | 60.9 | 39.6 | 31.2 | 26.6 | 23.4 | 14.4 | 9.20 | 71.0 |
| 1970/71 | 43.8 | 81.5 | 147 | 238 | 166 | 66.3 | 38.6 | 29.9 | 27.3 | 22.2 | 22.2 | 10.7 | 73.5 |
| 1971/72 | 26.6 | 111 | 70.3 | 222 | 203 | 88.2 | 60.1 | 40.3 | 39.3 | 36.7 | 25.0 | 40.3 | 79.8 |
| 1972/73 | 76.7 | 137 | 188 | 210 | 311 | 104 | 50.3 | 42.4 | 34.6 | 32.0 | 23.0 | 11.8 | 101. |
| 1973/74 | 59.2 | 79.1 | 105 | 106 | 155 | 179 | 88.5 | 49.2 | 40.0 | 30.1 | 22.0 | 20.5 | 77.6 |
| 1974/75 | 47.1 | 116 | 131 | 251 | 247 | 119 | 55.1 | 39.4 | 32.4 | 27.5 | 21.5 | 16.7 | 91.1 |
| 1975/76 | 83.5 | 154 | 147 | 129 | 115 | 99.3 | 46.7 | 33.7 | 29.2 | 27.4 | 20.7 | 19.5 | 75.3 |
| 1976/77 | 18.2 | 113 | 145 | 327 | 245 | 118 | 54.6 | 40.0 | 32.3 | 27.1 | 19.9 | 15.7 | 94.9 |
| 1977/78 | 22.5 | 39.9 | 54.6 | 61.1 | 64.7 | 49.5 | 26.8 | 22.6 | 27.6 | 17.8 | 10.4 | 6.34 | 33.5 |
| 1978/79 | 22.2 | 51.7 | 106 | 219 | 99.4 | 90.8 | 40.2 | 31.0 | 30.7 | 26.8 | 18.2 | 10.2 | 61.1 |
| 1979/80 | 41.3 | 106 | 209 | 116 | 116 | 86.7 | 46.6 | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 42.4 | 110 | 137 | 166 | 149 | 89.2 | 47.3 | 34.3 | 30.8 | 27.1 | 20.2 | 16.6 | 72.1 |
| Ecart-type | 24.1 | 43.1 | 54.5 | 75.7 | 70.1 | 34.8 | 14.8 | 6.76 | 4.65 | 5.16 | 4.33 | 8.26 | |
| Max. | 96.1 | 183 | 252 | 327 | 311 | 179 | 88.5 | 49.2 | 40.0 | 36.7 | 28.1 | 40.3 | |
| Q1 | 53.2 | 141 | 168 | 221 | 195 | 111 | 54.9 | 39.7 | 33.5 | 29.9 | 22.6 | 20.0 | |
| Méd. | 41.3 | 113 | 131 | 188 | 116 | 88.2 | 46.7 | 33.5 | 29.5 | 27.1 | 20.7 | 15.7 | |
| Q3 | 23.3 | 80.3 | 102 | 105 | 96.2 | 58.3 | 36.5 | 30.4 | 27.4 | 22.8 | 18.5 | 10.4 | |
| Min. | 12.0 | 39.3 | 54.6 | 61.1 | 64.7 | 49.5 | 26.8 | 22.6 | 24.6 | 17.8 | 10.4 | 6.34 | |

Sur l'échantillon étendu (trente-quatre années 1945-1979), les relations avec les précipitations annuelles peuvent être précisées :

$H = .71\ (P - 583)$ $(R^2 = .86\ P > .995)$
$DE = 553\ \text{Log}P - 3190$ $(R^2 = .56\ P > .995)$

Les variations de H et DE en fonction de P sont représentées sur le graphe 5.41. Le déficit d'écoulement (équivalent à l'ETR) est d'environ 800 mm pour une pluviométrie de 1 250 mm et croît régulièrement avec P (environ 1 000 mm pour P = 2 000 mm) en tendant asymptotiquement vers une limite supérieure d'environ 1 100 mm (correspondant à l'ETP régionale).

Les quantiles de l'écoulement annuel calculés à partir de l'ajustement statistique effectué sur l'échantillon de trente-quatre valeurs observées ou calculées sont les suivants (tableau 5.75.).

tableau 5.75.

Onive à Tsinjoarivo
Apports annuels - Quantiles

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Réccurence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Hmm | 392 | 433 | 474 | 531 | 672 | 877 | 1025 | 1173 | 1380 |
| Q ($m^3/s$) | 39.7 | 43.9 | 48.1 | 53.8 | 68.1 | 88.9 | 104 | 119 | 140 |
| q ($l/s/km^2$) | 12.4 | 13.7 | 15.0 | 16.8 | 21.3 | 27.8 | 32.5 | 37.2 | 43.8 |

Loi de FRECHET (test Brunet-Moret : 5.22, échelle : 2 600 mm, position : 1 450 mm, forme : -0.082.
Centennales sèche et humide : 368 mm (37.3 $m^3/s$) et 1 546 mm (157 $m^3/s$).

## 6.2.3.3. Crues

### *6.2.3.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux*

La nature du contrôle (seuil et chute de TSINJOARIVO) garantit la stabilité de cette station dont la courbe d'étalonnage peut-être tracée sans grande extrapolation jusqu'à 3,44 m (plus fort jaugeage à 2,81 m pour 420 $m^3/s$).

tableau 5.76.

Onive à Tsinjoarivo
Maximums annuels de crues

| Année | $Qm^3/s$ | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1963-64 | 405 | 13/02/64 06h00 | 2,75 | 3rel |
| 1964-65 | 364 | 25/01/65 06h00 | 2,58 | 3rel |
| 1965-66 | 277 | 04/01/66 06h00 | 2,21 | 3rel |
| 1966-67 | 351 | 07/03/67 18h00 | 2,53 | 3rel |
| 1967-68 | 313 | 26/11/67 12h00 | 2,37 | 3rel |
| 1968-69 | 509 | 12/02/69 06h00 | 2,95 | 3rel |
| 1969-70 | 457 | 05/01/70 06h00 | 2,85 | 3rel |
| 1970-71 | 383 | 31/01/71 06h00 | 2,66 | 3rel |
| 1971-72 | 334 | 15/02/72 18h00 | 2,46 | 3rel |
| 1972-73 | 628 | 01/03/73 12h00 | 3,31 | 3rel |
| 1973-74 | 318 | 20/03/74 06h00 | 2,39 | 3rel |
| 1974-75 | 488 | 19/02/75 06h00 | 2,91 | 3rel |
| 1975-76 | 310 | 23/12/75 18h00 | 2,36 | 3rel |
| 1976-77 | 667 | 04/02/77 | 3,44 | 3rel |
| 1977-78 | 236 | 30/01/78 | 2,02 | 3rel |
| 1978-79 | 325 | 16/02/79 | 2,42 | 3rel |
| 1979-80 | 640 | 23/01/80 | 3,35 | 3rel |

### *6.2.3.3.2. Résultats de l'enquête historique*

Ils proviennent essentiellement des archives des Travaux publics et consistent en relevés et mesures réalisés entre 1924 et 1927.

Le recalage de l'ancienne échelle d'après les résultats de jaugeages, permet l'estimation des débits maximums pour les années 1924-25 (380 m³/s), 1925-26 (420 m³/s) et 1926-27 (610 m³/s).

Dans la quasi-totalité des cas, les débits maximaux de crue sont observés aux mêmes dates sur l'ONIVE et sur l'IKOPA à BEVOMANGA.

Entre les débits maximaux (11 valeurs concomitantes), la régression suivante peut être établie :

$QMax_{ONIVE} = 1.07\ QMax_{IKOPA} + 12 \quad (R^2 = .66 \quad P > .995)$

Cette relation permet d'évaluer des valeurs approchées des débits de pointe de l'ONIVE de 1949 à 1963. Le débit maximal de la crue cyclonique de 1959 serait voisin de 750 m³/s.

Une année sur deux, le débit maximal est observé entre le 24 janvier et le 18 février (date médiane : 5 février - dates extrêmes : 26 novembre et 20 mars).

| | | |
|---|---|---|
| QMax = 1.05 QJMax - 10 | ($R^2$ = .99) | QMax/QJMax = 1.63 |
| QJMax = 1.06 DCC + 85 | ($R^2$ = .77) | QJMax/DCC = 1.37 |
| QJMax = 1.22 DC1 - 145 | ($R^2$ = .37) | QJMax/DC1 = 2.03 |

Ajustée à l'échantillon des 17 valeurs observées, une distribution de Fréchet fournit les quantiles suivants :

tableau 5.77.

Onive à Tsinjoarivo
Débits maximaux annuels

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 380 | 496 | 585 | (820) | (940) |
| q l/s/km² | 120 | 155 | 183 | (255) | (295) |

Une distribution de Galton (log-normale) ajustée à l'échantillon étendu de 32 valeurs observées ou estimées fournit des valeurs peu différentes :

tableau 5.77. bis

Onive à Tsinjoarivo
Débits maximaux annuels

| Période de retour - T (ans) | 2 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 385 | 580 | (750) | (900) |
| q l/s/km² | 120 | 180 | (235) | (280) |

## 6.2.3.4. Basses eaux

En raison de l'intervention de fortes précipitations en saison sèche, les droites de tarissement ne peuvent être établies que sur neuf années.
On observe deux tarissements successifs. Pour un débit initial compris entre 25 et 45 m³/s, le premier tarissement de pente moyenne $\alpha 1$ = .0084 (Tc = 82 jours) conduit à un second débit charnière de base compris entre 10 et 20 m³/s situé en général entre le 15 septembre et le 15 octobre.

Puis entre ce débit et le débit minimal (4 à 9 m³/s) qui est observé fin octobre à mi-novembre, un tarissement plus rapide se produit de pente médiane α2 = .0275 (Tc = 25 jours).

Le graphe 5.42. représente les tarissements observés en 1974.

figure 5.41.

Onive à Tsinjoarivo

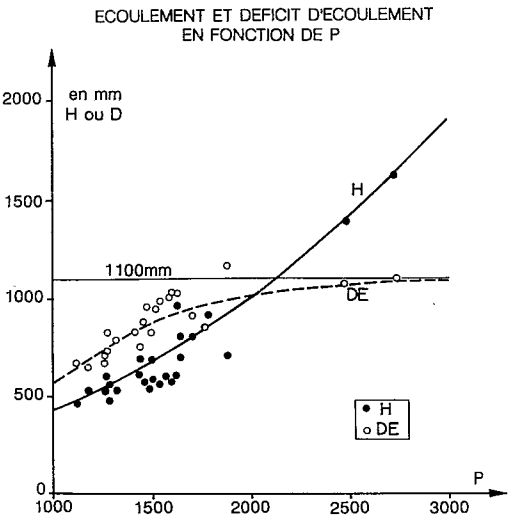



tableau 5.78.

Onive à Tsinjoarivo
Débits caractéristiques d'étiage (m³/s)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1963 | 26.2 | 19.2 | 14.4 | 12.7 | 04-10 |
| 1964 | 25.5 | 16.2 | 10.7 | 8.59 | 30-10 |
| 1965 | 30.9 | 24.4 | 20.2 | 17.7 | 05-11 |
| 1966 | 21.9 | 9.39 | 4.40 | 3.52 | 06-11 |
| 1967 | 24.4 | 19.2 | 15.9 | 10.0 | 28-10 |
| 1968 | 19.9 | 8.02 | 4.10 | 3.53 | 31-10 |
| 1969 | 26.9 | 16.5 | 9.38 | 5.80 | 23-10 |
| 1970 | 24.2 | 11.7 | 6.29 | 4.27 | 31-10 |
| 1971 | 22.3 | 10.2 | 6.05 | 3.57 | 12-11 |
| 1972 | 35.5 | 24.8 | 19.6 | 12.0 | 13-10 |
| 1973 | 31.4 | 18.6 | 6.08 | 5.27 | 01-11 |
| 1974 | 30.8 | 18.3 | 13.1 | 9.18 | 23-10 |
| 1975 | 28.9 | 20.5 | 13.5 | 6.64 | 26-10 |
| 1976 | 26.2 | 14.4 | 7.30 | 3.83 | 29-11 |
| 1977 | | | | 6.53 | |

suite

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1978 | | | | 3.50 | |
| 1979 | | | | 5.76 | 15-10 |
| Max. | 35.5 | 24.8 | 20.2 | 17.7 | 29-11 |
| Q1 | 30.8 | 19.2 | 14.4 | 9.59 | 05-11 |
| Méd. | 26.2 | 17.4 | 10.0 | 5.80 | 31-10 |
| Q3 | 24.2 | 11.7 | 6.10 | 3.70 | 23-10 |
| Min. | 19.9 | 8.02 | 4.10 | 3.50 | 04-10 |

DCE = 1.16 QJmin + 1.95 ($R^2$ = .85 P > .995)
DC11 = 1.02 QJmin + 8.8 ($R^2$ = .69 P > .99)
DC9 = .58 QJmin + 22.4 ($R^2$ = .34 P > .95)
QJmin = .005 Q 0809- 1.7* $e^{-.02\,T}$ ($R^2$ = .58 P > .99)

avec Q 0809 moyenne des débits d'août et septembre,
T intervalle en jours entre le 30 septembre et l'étiage.

tableau 5.79.

Onive à Tsinjoarivo
Quantiles de l'étiage
($m^3/s$ - 17 valeurs)

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Réccurence | 20 | 10 | 5 | 0 | 5 | 10 | 20 |
| Q ($m^3/s$) | 3.34 | 3.55 | 4.00 | 5.89 | 9.67 | 12.6 | 15.3 |
| q ($l/s/km^2$) | 1.05 | 1.11 | 1.25 | 1.84 | 3.02 | 3.94 | 4.84 |

Loi de GOODRICH (test Brunet-Moret : 2.81, échelle : 3.99 $m^3/s$, position 3.16 $m^3/s$, forme : 1.03).
Cinquantennales sèche et humide : 3.23 $m^3/s$ (1 $l/s/km^2$) et 19.4 $m^3/s$ (6.1 $l/s/km^2$).

### 6.2.3.5. Bilan hydrologique

Pour une pluviométrie interannuelle de l'ordre de 1 590 mm, la lame écoulée interannuelle (720 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 870 mm (Ke = 45 %).

Les valeurs du déficit d'écoulement (DE) se regroupent autour d'une courbe moyenne d'allure convexe entre 550 mm (pour P = 1 000 mm) et une valeur limite de 1 100 mm pour P ≥ 2 700 mm.

Les lames se regroupent autour d'une courbe symétrique entre H = 450 mm (pour P = 1 000 mm) et H = 1 600 mm (pour P = 2 700 mm). Pour des précipitations plus fortes, H = P - 1 100 mm (graphe 5.41.).

Les termes mensuel et annuel du bilan hydrologique sont présentés sur le tableau 5.80. et le graphe 5.43.

figure 5.42.

Onive à Tsinjoarivo

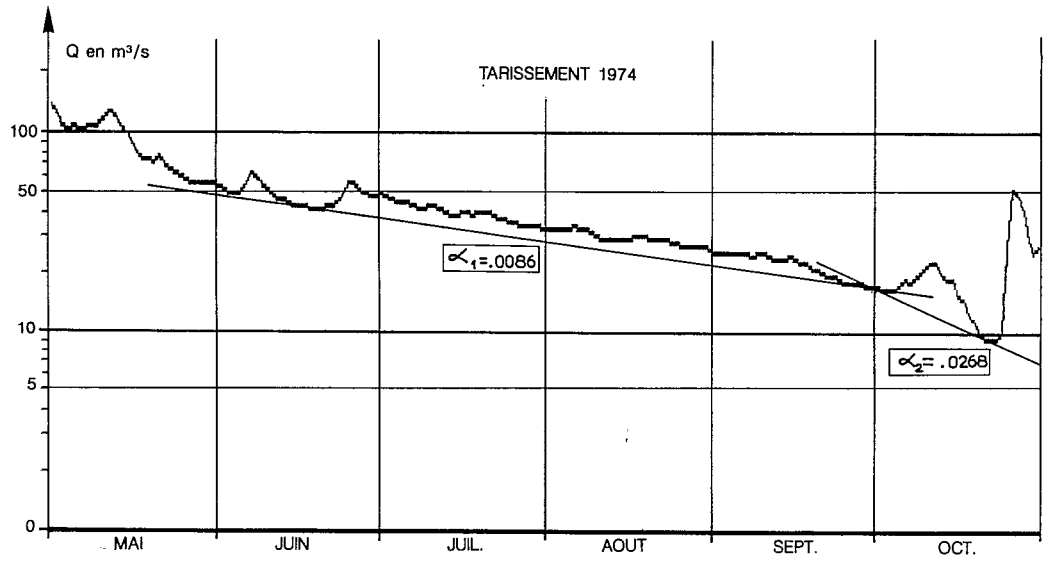


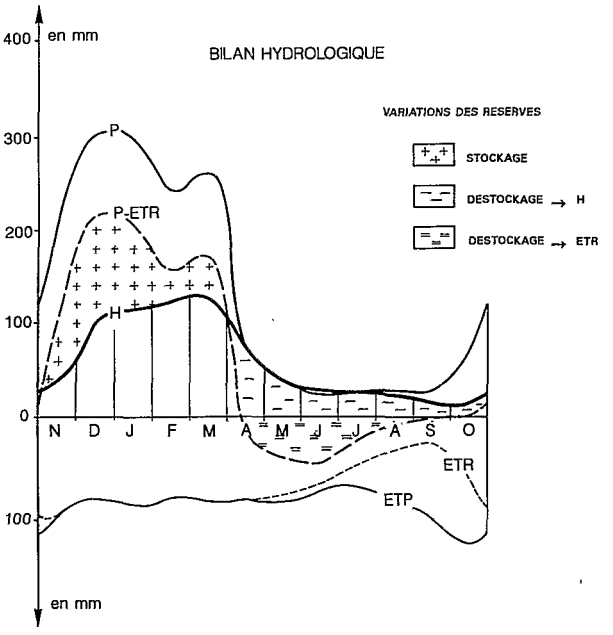

tableau 5.80.

Onive à Tsinjoarivo
Bilan hydrologique (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 203 | 301 | 298 | 241 | 261 | 75 | 39 | 23 | 27 | 25 | 27 | 70 | 1590 |
| ETP | 101 | 86 | 92 | 84 | 88 | 86 | 88 | 76 | 73 | 86 | 107 | 133 | 1100 |
| ETR | 101 | 86 | 92 | 84 | 88 | 86 | 80 | 70 | 51 | 35 | 27 | 70 | 870 |
| P-ETR | 102 | 215 | 206 | 157 | 173 | -11 | -41 | -47 | -24 | -10 | 0 | 0 | 720 |
| H | 36 | 99 | 115 | 122 | 128 | 72 | 40 | 28 | 25 | 23 | 17 | 15 | 720 |
| ΔR + | 66 | 116 | 91 | 35 | 45 | | | | | | | | +353 |
| ΔR- | | | | | | 83 | 81 | 75 | 49 | 33 | 17 | 15 | -353 |
| R | 66 | 182 | 273 | 308 | 353 | 270 | 189 | 114 | 65 | 32 | 15 | 0 | |

figure 5.43.

Onive à Tsinjoarivo




L'ETR (870 mm) correspond à près de 80 % de l'ETP évaluée à 1 100 mm. De novembre à mars, les précipitations (1304 mm) soit 82 % du total annuel) satisfont l'ETR = ETP (451 mm) et, déduction faite de l'écoulement (500 mm soit 69 % de la lame écoulée annuelle), constituent dans les magasins d'altérites et les réserves utiles des sols, un stock équivalent à 353 mm.

Les réserves drainables des aquifères représentent 220 mm qui s'écoulent d'avril à octobre. Le reliquat des réserves stockées dans la réserve utile des sols (133 mm) concourent à soutenir l'ETR jusqu'en août. Les écoulements de la mi-juin à la fin septembre représentent environ 80 mm soit :

(Qo = 40 m³/s - Qo' = 15 m³/s) / .0084 * 86.4 / 3 200 km²)

et correspondent au premier tarissement. En octobre, la lame écoulée :

15 mm = (15 m³/s / .0275 * 86.4 / 3 200 km²)

correspond au tarissement rapide de la fin de la saison sèche par épuisement des dernières réserves drainables.

On notera la dimension relativement faible des réserves d'altérites et l'importance de la réserve utile correspondant à un couvert forestier assez étendu. L'aspect du bilan diffère assez sensiblement de ceux présentés pour les bassins de la côte orientale et correspond à la position en retrait du bassin de l'ONIVE.

# 7. BASSIN DE LA MANANJARY

Le bassin de la MANANJARY, situé au niveau du 21e parallèle, entre les bassins du MANGORO et de la MANIA au nord-ouest, de la SAKALEONA au Nord et de la NAMORONA au Sud, draine les hauts plateaux du BETSILEO, entre AMBOSITRA et AMBOHIMAHASOA. Les formations géologiques ressortent des migmatites et migmatites granitoïdes du système des TAMPOKETSA à l'ouest, des gneiss et micaschistes du système du graphite à l'est. Les formations du socle sont profondément latérisées en sols ferralitiques rouge et rouge sur jaune. La couverture végétale est essentiellement représentée par la forêt ombrophile dense de l'est mais en voie de dégradation sur le nord et l'est du bassin (savoka et prairie humide).

La MANANJARY, de direction initiale Nord-Ouest/Sud-Est, reçoit la SAHANOFA en rive droite, l'AMPASARY en rive gauche, puis en rive droite son affluent principal, l'IVOANANA. A la hauteur d'AMBODIBAKOLY, le cours de la MANANJARY prend une direction ouest-est et rejoint l'océan au sud de MANANJARY.

## 7.1. La Mananjary à Antsindra

La station, d'accès difficile, est située dans la zone forestière de la falaise orientale, limitant les hauts plateaux du BETSILEO (20°59'S - 47°44'E), et contrôle un bassin versant de 2 260 km².

L'échelle installée en novembre 1955 a été détruite lors du cyclone de mars 1959. Une nouvelle échelle a été réinstallée à 1 km en amont en septembre 1960 et suivie jusqu'en février 1976.

Trente mesures de débit ont été effectuées (entre 30 et 361 m³/s). L'extrapolation a été conduite de façon très audacieuse jusqu'à 1 700 m³/s et ne peut conduire qu'à une estimation approchée des débits de hautes eaux. Les données sont de qualité relativement médiocre.

La pluviométrie est assez mal déterminée : un seul poste sur le bassin : AMBOHIMANGA sud (poids : .52) et quelques postes en bordure du bassin : AMBOSITRA (.27), FIADANANA (.12), etc. La pluviométrie calculée par la méthode de THIESSEN : 1 807 mm, beaucoup trop faible en regard des isohyètes générales, a été réévaluée à 2 850 mm, valeur beaucoup plus vraisemblable (coefficient de correction des pluies mensuelles : 1.58).

### 7.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 5.81.

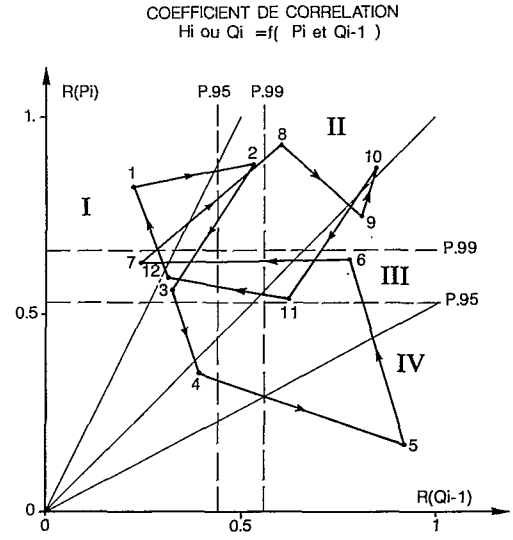
Coefficients de corrélation

| Hi ou Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .54 | .59 | .82 | .88 | .56 | (.39) | (.17) | .64 | .63 | .93 | .75 | .87 |
| Pi-1 | .70 | (.02) | (.13) | .61 | (.36) | (.15) | (.41) | (.21) | (.12) | .66 | .72 | .77 |
| Qi-1 | .62 | (.31) | (.22) | .53 | (.32) | (.35) | .92 | .78 | (.24) | .60 | .81 | .85 |

Le graphique 5.44. illustre ces relations : de décembre à mars, les précipitations du mois constituent le facteur principal avec une légère influence du débit ou des pluies antérieures. Avril, assez dispersé, tend vers une influence équivalente des deux facteurs antérieurs. En mai, le débit antérieur est prépondérant. De juin à novembre, les points tendent à se regrouper dans le secteur II, influence prédominante des précipitations du mois et secondaire mais forte des débits antérieurs. Pratiquement toute l'année, on doit observer un bon soutien des débits par les réserves d'altérites, avec de forts apports en écoulement de surface à partir des précipitations sur des terrains pratiquement saturés (ou des zones plus imperméables).

figure 5.44.

Mananjary à Antsindra




Les régressions obtenues sont présentées ci-dessous (tableau 5.82.).

tableau 5.82.

Mananjary à Antsindra
Relations hydropluviométriques mensuelles

| | |
|---|---|
| Saison des pluies | |
| Périodes décembre-mars : | |
| $Hi = .22\ Pi + .20\ P_{i-1} - 30.4$ | ($R^2 = .52$ P > .995) |
| H11 = .41 P10 + .9 P11 - 6.9 | ($R^2 = .77$ P > .995) |
| H12 = .29 P12 + .63 P111009 - 86.6 | ($R^2 = .65$ P > .995) |
| H01 = .30 P01 + .69 P12111009 - 84. | ($R^2 = .76$ P > .995) |
| H02 = .33 P02 + .10 P01 + 42.7 | ($R^2 = .84$ P > .995) |
| H03 = .37 P03 + .18 P02 + 31. | ($R^2 = .63$ P >.99) |
| H04 = .33 P04 +.32 H03 + 34.4 | ($R^2 = .39$ P > .95) |
| Q05 = .60 Q04 + 10.7 | ($R^2 = .85$ P > .995) |
| H06 = .58 H05 + .22 P06 + 9.1 | ($R^2 = .88$ P > .995) |
| *Juillet-août* | |
| $Hi = .30\ Pi + 18\ H_{i-1} + 47.7$ | ($R^2 = .63$ P > .995) |
| H07 = .25 P07 + .61 H06 + 6.8 | ($R^2 = .72$ P> .995) |
| H08 = .443 P08 + .47 H07 + 11.6 | ($R^2 = .90$ P> .(995) |

suite

| | |
|---|---|
| Septembre-novembre | |
| Hi = .58 Hi-17 + .16 Pi + 3.6 | ($R^2$ = .79 P > .995) |
| H09 = .52 H08 + .21 P09 + 7.9 | ($R^2$ = .85 P > .995) |
| H10 = .46 H09 + 11 P10 + 13.5 | ($R^2$ = .94 P > .995) |

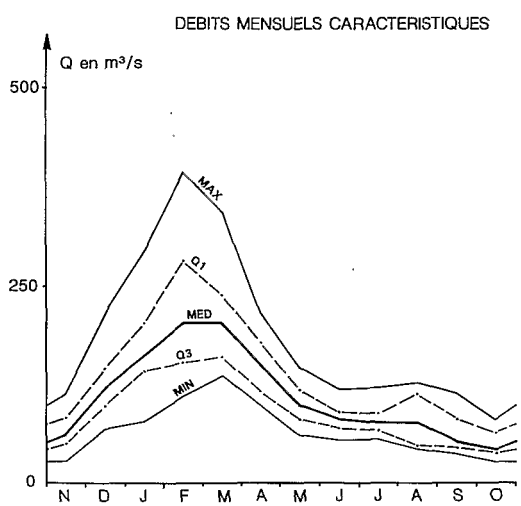
nota : P111009 = moyenne des précipitations de novembre + octobre + septembre, etc.

Les débits moyens mensuels et annuels observés, ainsi que les débits mensuels caractéristiques, sont présentés dans le tableau 5.83 et le graphe 5.45. En raison de leur nombre, nous n'avons pas tenté à ce stade de reconstituer les lacunes mensuelles de janvier 1959 à juin 1960.

Les graphes 5.46 et 5.47 représentent les hydrogrammes de la MANANJARY en année humide (1969-1970, Q = 157 m³/s) et déficitaire (1970-1971, Q = 87.3 m³/s). Sur ces hydrogrammes apparaît une "crue" annuelle des débits de base culminant en février-mars et traduisant l'importance des aquifères, sur laquelle se greffent, à l'occasion des épisodes pluvieux, des crues de ruissellement assez aigües. En saison "sèche", des précipitations encore importantes sont observées avec recharge des nappes et apparition de crues adventices.

figure 5.45.

Mananjary à Antsindra



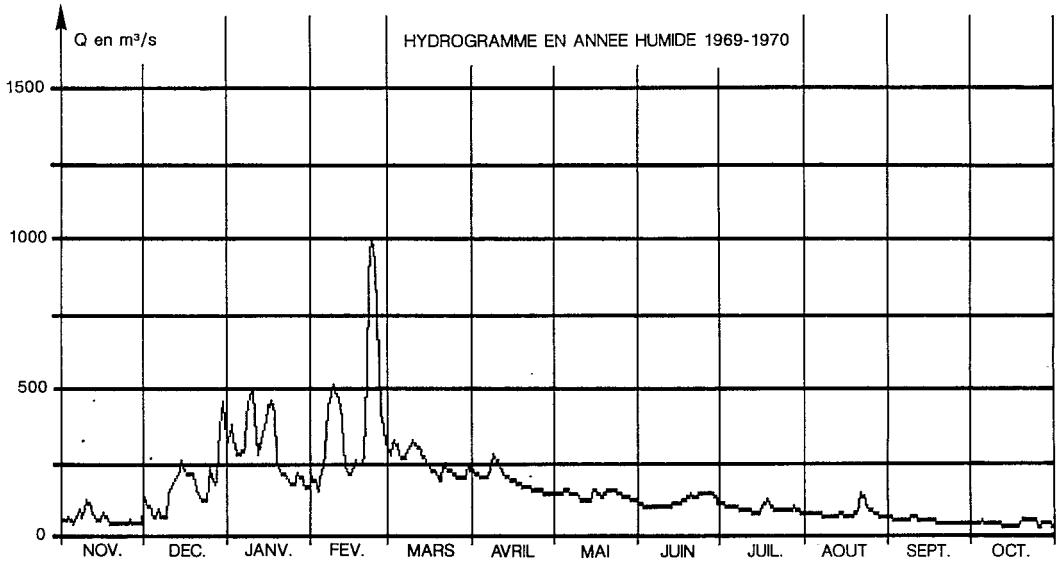



figure 5.46.

Mananjary à Antsindra

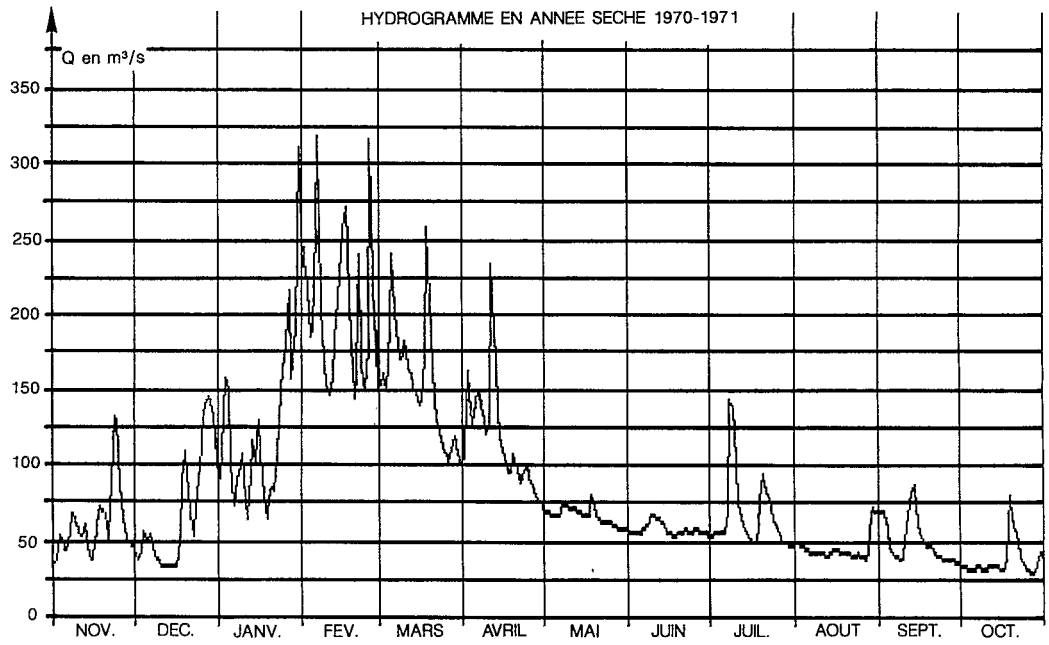



figure 5.47.

Mananjary à Antsindra

tableau 5.83.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1254500105 Antsindra
Rivière : Mananjary
Pays : Madagascar
Bassin : Mananjary

Latitude : 20.58.00
Longitude : 47.43.00
Aire : 2 260 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1955/56 | 30.9 | 114 | 270 | 300 | 210 | 124 | 81.9 | 66.3 | 56.5 | 46.9 | 37.1 | 28.4 | 113 |
| 1956/57 | 47.5 | 81.2 | 144 | 199 | 225 | 212 | 120 | 81.8 | 59.1 | 47.3 | 44.4 | 32.7 | 107 |
| 1957/58 | 30.5 | 98.7 | 144 | 209 | 343 | 132 | 94.7 | 75.4 | 98.1 | 106 | 88.7 | 67.6 | 124 |
| 1958/59 | 62.2 | 146 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1959/60 | - | - | - | - | - | - | - | - | 63.1 | 43.3 | 39.0 | 30.6 | - |
| 1960/61 | 28.5 | 80.6 | 179 | 111 | 138 | 102 | 60.8 | 55.0 | 82.3 | 129. | 81.1 | 54.2 | 91.9 |
| 1961/62 | 52.9 | 219 | 190 | 183 | 186 | 131 | 102 | 80.5 | 65.2 | 75.0 | 45.0 | 40.2 | 114 |
| 1962/63 | 64.0 | 80.7 | 203 | 281 | 186 | 166 | 119 | 120 | 77.6 | 60.9 | 48.1 | 38.7 | 119 |
| 1963/64 | 101 | 119 | 78.6 | 152 | 199 | 105 | 73.9 | 73.5 | 88.2 | 100 | 115 | 69.8 | 106 |
| 1964/65 | 66.9 | 124 | 279 | 217 | 240 | 197 | 121 | 83.0 | 109 | 123. | 98.9 | 66.2 | 144 |
| 1965/66 | 85.2 | 148 | 147 | 127 | 162 | 119 | 95.3 | 95.9 | 70.9 | 63.3 | 56.3 | 42.7 | 101 |
| 1966/67 | 41.4 | 101 | 160 | 138 | 225 | 163 | 100 | 81.9 | 86.5 | 115. | 103 | 81.8 | 116 |
| 1967/68 | 118 | 161 | 119 | 155 | 162 | 111 | 78.0 | 66.8 | 73.4 | 49.1 | 39.6 | 37.5 | 97.4 |
| 1968/69 | 55.8 | 116 | 162 | 319 | 151 | 140 | 98.8 | 81.8 | 72.8 | 123. | 78.6 | 50.3 | 119 |
| 1969/70 | 60.5 | 178 | 295 | 393 | 251 | 190 | 141 | 118 | 93.3 | 79.3 | 53.1 | 43.8 | 157 |
| 1970/71 | 61.3 | 69.2 | 128 | 204 | 153 | 117 | 66.4 | 57.6 | 67.1 | 45.4 | 50.8 | 37.4 | 87.3 |
| 1971/72 | 82.7 | 121 | 119 | 300 | 266 | 165 | 104 | 70.1 | 89.0 | 77.3 | 46.8 | 65.2 | 125 |
| 1972/73 | 113 | 127 | 241 | 245 | 256 | 169 | 114 | 91.2 | 88.6 | 128 | 69.7 | 44.2 | 140 |
| 1973/74 | 61.5 | 147 | 164 | 188 | 174 | 217 | 149 | 93.5 | 122 | 88.2 | 64.1 | 48.7 | 126 |
| 1974/75 | 63.8 | 174 | 186 | 211 | 219 | 179 | 121 | 86.3 | 67.1 | 68.0 | 51.0 | 43.0 | 122 |
| 1975/76 | 85.4 | 145 | 179 | 173 | - | - | | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 66.0 | 128 | 178 | 216 | 208 | 152 | 102 | 82.1 | 80.5 | 82.5 | 63.7 | 48.6 | 118 |
| Ecart-type | 25.5 | 38.1 | 58.0 | 73.9 | 51.5 | 37.0 | 24.3 | 17.5 | 17.3 | 30.9 | 23.9 | 15.0 | |
| Max. | 118 | 219 | 295 | 393 | 343 | 217 | 149 | 120 | 122 | 129 | 115 | 81.8 | |
| Q1 | 84.0 | 148 | 203 | 281 | 240 | 179 | 120 | 91.2 | 89 | 115 | 81.1 | 65.2 | |
| Méd. | 62.6 | 122 | 164 | 204 | 204 | 152 | 101 | 81.8 | 77.6 | 77.3 | 53.1 | 43.8 | |
| Q3 | 50.2 | 99.8 | 144 | 155 | 162 | 119 | 81.9 | 70.1 | 67.1 | 49.1 | 45.0 | 37.5 | |
| Min. | 28.5 | 69.2 | 78.6 | 111 | 138 | 102 | 60.8 | 55.0 | 56.5 | 43.3 | 37.1 | 28.4 | |

## 7.1.2. Apports annuels

Entre les lames écoulées annuelles et les précipitations corrigées sur le bassin ou les lames concomittantes observées sur les bassins voisins, les relations suivantes peuvent être établies :

$H = .38 (P + 1532)$ $(R^2 = .41 \quad P > .975)$

$H = .48 P + .73 (\sum_{8}^{10} P \text{ mens.ant.}) + 108$ $(R^2 = .55 \quad P > .975)$

$H = .36 IP 150 + 790$ $(R^2 = .49 \quad P > .99)$

IP150 = somme des précipitations mensuelles supérieures à 150 mm.

$H = .55$ Hivoanana + 1126 $(R^2 = .61 \quad P > .975)$

$H = 99 * HNAMO^{.41} + 4.6$ $(R^2 = .64 \quad P > .975)$

$H = 1.14$ HMANIA + 856 $(R^2 = .52 \quad P > .975)$

Ces régressions ont permis d'estimer les valeurs non observées de la période 1945-1976.

- À partir de IP 150

| Année | 1945/46 | 1946/47 | 1947/48 | 1948/49 | 1949/50 | 1950/51 | 1951/52 | 1952/53 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hmm | 1330 | 1575 | 2010 | 1660 | 1650 | 1745 | 1835 | 2035 |
| Q m³/s | 95.3 | 113 | 144 | 119 | 118 | 125 | 131 | 146 |

- À partir de NAMORONA

| Date | Hmm | Q m³/s |
|---|---|---|
| 1953/54 | 1915 | 137 |
| 1954/55 | 1430 | 102 |
| 1958/59 | 1985 | 142 |
| 1959/60 | 1260 | 90.0 |
| 1975/76 | 1350 | 96.5 |

L'ajustement statistique effectué sur l'échantillon de 31 années (1945-1976) observées et calculées, fournit les quantiles suivants :

tableau 5.84.

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Réccurence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Hmm | 1229 | 1283 | 1343 | 1430 | 1631 | 1863 | 1991 | 2099 | 2223 |
| Q (m³/s) | 80.0 | 91.9 | 96.2 | 102 | 117 | 133 | 143 | 150 | 159 |
| q (l/s/km²) | 30.9 | 40.7 | 42.6 | 45.1 | 51.8 | 58.8 | 63.3 | 66 | 70.4 |

Loi de GOODRICH (test Brunet-Moret : 2.13, échelle : 597 mm, position : 1 125 mm, forme : .447).
Centennales sèche et humide : 1201 mm (Q = 86.0 m³/s) et 2306 mm (Q = 165 m³/s).

## 7.1.3. Crues

### 7.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

Les deux échelles (aval puis amont des rapides) étant situées dans des biefs différents, la courbe de tarage de moyennes et hautes eaux de l'échelle amont n'a pu être déduite et deux extrapolations de type logarithmique ont dû être menées à partir des plus forts jaugeages réalisés pour chaque échelle.
- mesures de 0,99 m (Q = 79,0 m³/s) à 3,22 m (Q = 361 m³/s). Extrapolation assez importante de 3,22 à 10,80 m (Q = 1 670 m³/s).
- mesures de 0,60 m (Q = 64,5 m³/s) à 1,32 m (Q = 142 m³/s). Forte extrapolation de 1,32 à 8,00 m (Q = 1 030 m³/s).

tableau 5.85.

Mananjary à Antsindra
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1955-56 | 799 | 27/01/56 06h00 | 6,10 | 3rel |
| 1956-57 | 614 | 05/02/57 12h00 | 4,99 | 3rel |
| 1957-58 | 782 | 07/03/58 12h00 | 6,00 | 3rel |
| 1958-59 | (1670) | | 10,80 | PHE |
| 1959-60 | | | | |
| 1960-61 | 390 | 02/01/61 06h00 | 3,28 | 3rel |
| 1961-62 | 526 | 12/03/62 06h00 | 4,32 | 3rel |
| 1962-63 | 868 | 17/02/63 12h00 | 6,83 | 3rel |
| 1963-64 | 625 | 09/03/64 12h00 | 5,07 | 3rel |
| 1964-65 | 621 | 23/01/65 18h00 | 5,04 | 3rel |
| 1965-66 | 346 | 02/01/66 06h00 | 3,10 | 3rel |
| 1966-67 | 366 | 01/01/67 00h00 | 3,10 | 3rel |
| 1967-68 | 327 | 23/02/68 18h00 | 2,80 | 3rel |
| 1968-69 | ≥ (1030) | 05/02/69 06h00 | 8,00 | PHE |
| 1969-70 | 1030 | 23/02/70 06h00 | 8,00 | PHE |

suite

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1970-71 | 346 | 06/02/71 06h00 | 2,95 | 3rel |
| 1971-72 | 809 | 15/02/72 18h00 | 6,40 | 3rel |
| 1972-73 | 510 | 16/01/73 18h00 | 4,20 | 3rel |
| 1973-74 | 353 | 30/12/73 06h00 | 3,00 | 3rel |
| 1974-75 | 361 | 13/03/75 18h00 | 3,06 | 3rel |
| 1975-76 | ≥ 287 | 22/12/67 06h00 | 2,50 | Min |

### 7.1.3.2. Extension de l'échantillon de crues

En l'absence de relevés de mars 1959 à juin 1960, seul l'échantillon 1960-1976 a été traité, tout en admettant que les maximums annuels de 1958-59, 1968-69 et 1969-70 sont les plus importants de la période 1955-1976.

La valeur de mars 1959 (cyclone MANANARA nord) est approchée. Celle de 1969 (cyclone Dany) est évaluée par défaut. En février 1970, la crue est due au cyclone Geneviève.

Une année sur deux, le maximum est observé entre la mi-janvier et le 23 février (date médiane : 5 février - dates extrêmes : 27 décembre et 27 mars).

QMax = 1.06 QJMax + 7 ($R^2$ = .98)
QJMax = .25 DCC + 167 ($R^2$ = .63)
QJMax = .09 DC1 + 173 ($R^2$ = .33 P > .975)

En ajustant à l'échantillon 1961-76 (16 valeurs) une distribution de Goodrich et en complétant par un ajustement graphique, à partir de l'information historique, pour les récurrences plus rares, nous obtenons les quantiles suivants :

tableau 5.86.

Mananjary à Antsindra
Débits maximaux de crue

| Période de retour - T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Qm³/s | 467 | 713 | (900) | (1330) | (1520) |
| (Inf. histor.) Q m³/s | | | 935 | 1560 | 1870 |
| q 1/s/km² | 207 | 315 | 414 | 690 | 830 |

## 7.1.4. Basses eaux

Le tarissement, bien que perturbé par de fortes précipitations et alors indiscernable une année sur trois environ, peut être mis en évidence dans la majorité des cas.

Pour un débit de base initial Qo compris entre 60 et 70 m³/s et observé en général en juin, les droites de tarissement ont une pente médiane de coefficient .0060 (Tc = 115 jours) et comprise, dans la moitié des cas, entre .0056 et .0065).

Les réserves mobilisables peuvent être évaluées à $860.10^6$ m³ (ou 380 mm).

Le graphe 5.48. représente le tarissement observé en 1962.

Les débits d'étiage ont été observés de 1955 à 1958 et de 1960 à 1975.

figure 5.48.

Mananjary à Antsindra

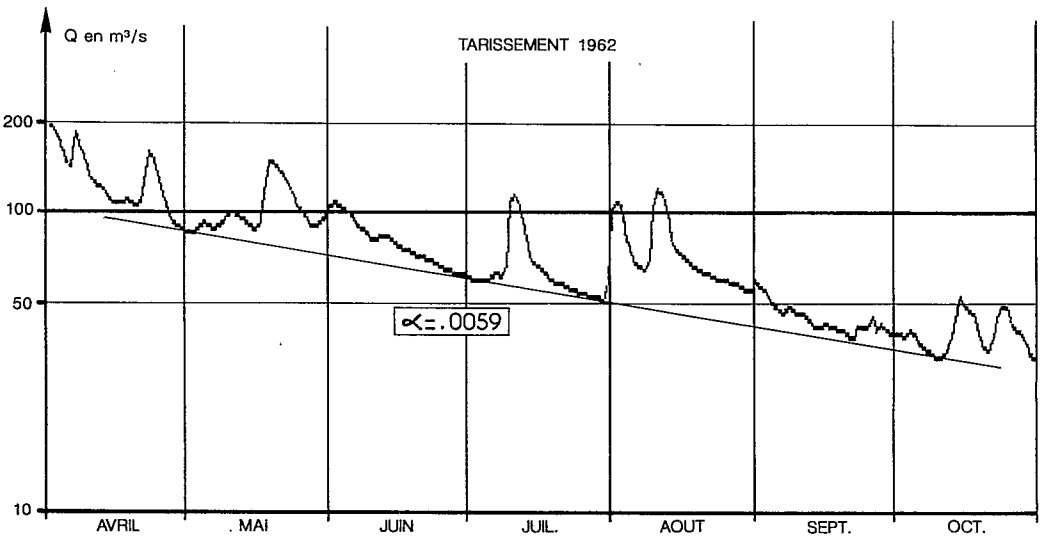



tableau 5.87.

Mananjary à Antsindra
Débits caractéristiques d'étiage (m³/s)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1955 | | | | (21.4) | 17-11 |
| 1956 | 41.0 | 28.8 | 24.8 | 23.7 | 06-11 |
| 1957 | 42.3 | 30.7 | 26.7 | 24.8 | 24-11 |
| 1958 | 67.7 | 50.3 | 39.3 | 32.9 | 01-12 |
| 1960 | 41.1 | 28.8 | 22.5 | 21.6 | 14-11 |
| 1961 | 55.4 | 46.5 | 40.2 | 37.1 | 09-11 |
| 1962 | 54.5 | 40.3 | 35.2 | 32.7 | 01-11 |
| 1963 | 62.5 | 40.6 | 36.9 | 31.5 | 27-10 |

suite

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1964 | 64.7 | 55.6 | 46.4 | 40.2 | 23-11 |
| 1965 | 83.5 | 63.1 | 50.7 | 46.7 | 02-11 |
| 1966 | 52.3 | 34.7 | 28.0 | 25.3 | 14-12 |
| 1967 | 83.4 | 68.7 | 59.9 | 54.2 | 26-10 |
| 1968 | 48.9 | 32.8 | 28.8 | 26.1 | 10-11 |
| 1969 | 69.3 | 50.8 | 41.8 | 39.6 | 24-11 |
| 1970 | 59.5 | 42.2 | 36.4 | 32.4 | 14-12 |
| 1971 | 49.1 | 36.8 | 32.0 | 29.8 | 27-10 |
| 1972 | 64.3 | 42.9 | 38.0 | 33.1 | 07-10 |
| 1973 | 75.6 | 48.1 | 38.7 | 34.5 | 05-11 |
| 1974 | 71.6 | 48.3 | 41.7 | 34.2 | 04-12 |
| 1975 | 63.4 | 48.2 | 37.7 | 32.7 | 26-10 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 83.5 | 68.7 | 59.9 | 54.2 | 14-12 |
| Q1 | 69.3 | 50.3 | 41.7 | 35.8 | 24-11 |
| Méd. | 62.5 | 42.9 | 37.7 | 32.7 | 10-11 |
| Q3 | 49.1 | 34.7 | 28.8 | 25.7 | 29-10 |
| Min. | 41.0 | 28.8 | 22.5 | 21.4 | 06-10 |

DCE = 1.13 QJmin ($R^2$ = .97 P > .995) DCE/QJmin = 1.13
DC11 = 1.33 QJmin ($R^2$ = .97 P > .995) DC11/QJmin = 1.33
DC = 1.42 QJmin + 13.4 ($R^2$ = .97 P > .995) DC9/QJMmin = 2.01

Le débit d'étiage QJmin est déterminé par le débit moyen d'août + septembre et l'intervalle T entre le 30 septembre et la date de son observation.

$QJmin = 3.38\ Q\ 0809^{.57} * e^{-.004\ T}$ ($R^2$ = .85 P > .995)

L'ajustement statistique sur vingt valeurs du débit d'étiage fournit les quantiles suivants :

tableau 5.88.

Mananjary à Antsindra
Quantiles de QJmin

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q (m³/s) | 22.0 | 23.7 | 26.0 | 31.4 | 38.7 | 43.5 | 48.1 |
| q (l/s/km²) | 9.7 | 10.5 | 11.5 | 13.9 | 17.1 | 19.2 | 21.3 |

Loi de GUMBEL (test Brunet-Moret : 2.56, échelle : 6.43 m³/s, position : 29.0 m³/s).
Cinquantennales sèche et humide : 20.2 m³/s (8.9 l/s/km²) et 54.1 m³/s (23.9 l/s/km²).

## 7.1.5. Bilan hydrologique

Pour une pluviométrie moyenne interannuelle de l'ordre de 2 850 mm, la lame écoulée inter-annuelle (1650 mm) correspond à un déficit d'écoulement d'environ 1 200 mm (Ke = 58 %).

Le tableau 5.89. et le graphe 5.49. présentent les termes mensuels et annuel du bilan hydrologique.

figure 5.49.

Mananjary à Antsindra

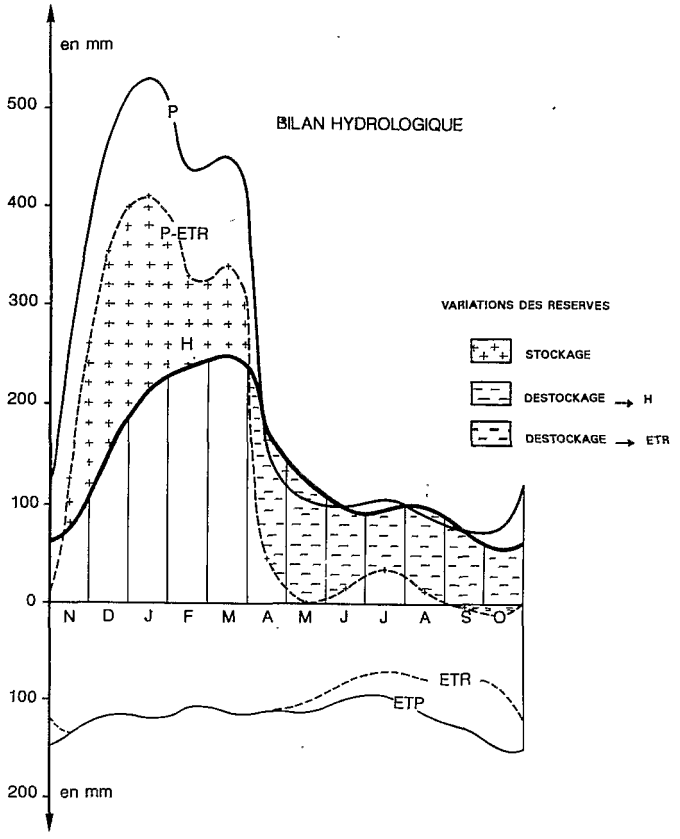


tableau 5.89.

Mananjary à Antsindra
Bilan hydrologique moyen (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 258 | 468 | 529 | 437 | 451 | 156 | 104 | 97 | 105 | 90 | 75 | 80 | 2850 |
| ETP | 133 | 115 | 118 | 108 | 113 | 111 | 113 | 100 | 95 | 115 | 126 | 153 | 1400 |
| ETR | 133 | 115 | 118 | 108 | 113 | 111 | 104 | 82 | 70 | 78 | 78 | 90 | 1200 |
| P-ETR | 125 | 353 | 411 | 329 | 338 | 45 | 0 | 15 | 35 | 12 | - 3 | - 10 | 1650 |
| H | 77 | 154 | 214 | 236 | 250 | 176 | 122 | 95 | 96 | 99 | 73 | 58 | 1650 |
| ΔR+ | 48 | 199 | 197 | 93 | 88 | | | | | | | | + 625 |
| ΔR- | | | | | | 131 | 122 | 80 | 61 | 87 | 76 | 68 | - 625 |
| R | 48 | 247 | 444 | 537 | 625 | 494 | 372 | 292 | 231 | 144 | 68 | 0 | |

Les fortes précipitations de novembre à mars (2 143 mm soit 75 % du total annuel) satisfont entièrement l'ETR = ETP (587 mm soit 42 % de l'ETP et 49 % de l'ETR annuelles), dégagent un excédent de 625 mm stocké dans les différentes réserves (nappes et réserves utiles des sols) et nourrissent par ruissellement et drainage les lames écoulées de la saison des pluies (931 mm soit 56 % du total annuel) .

D'avril à octobre, les réserves et les précipitations (707 mm) nourrissent l'écoulement (719 mm dont 625 mm par drainage des réserves et 94 mm à partir des précipitations : recharges partielles des nappes drainables et ruissellement) et l'ETR (613 mm) qui représente, pour cette période, 74 % de l'ETP (à l'échelle annuelle ETR/ETP = 86 %). On observe l'apparition de la tendance pseudo-équatoriale de la côte Est (recrudescence des précipitations en juillet et amorce de seconde "crue" annuelle en août) et un léger soutien de l'ETR à partir des réserves utiles en fin de saison sèche. Les réserves en fin mai (372 mm) correspondent au stock drainable calculé à partir de Qo et $\alpha$ (380 mm).

## 7.2. L'Ivoanana à Fatihita

Le bassin de l'IVOANANA, affluent rive droite de la MANANJARY, situé immédiatement au Sud de la branche principale repose sur les formations cristallines du socle (migmatites et migmatites granitoïdes à l'Ouest, gneiss et micaschistes à l'est) très profondément altérées en latérites ferralitiques. La forêt dense ombrophile, moins dégradée que sur le bassin supérieur de la MANANJARY, le recouvre entièrement.

La station (21°03'S - 47°45'E), située à l'altitude de 400 m en amont de la chute de FATIHITA, peu avant le confluent avec la MANANJARY, contrôle un bassin versant de 835 km².

L'échelle a été mise en place en juillet 1956 et doublée d'un limnigraphe en 1957. L'échelle a été déplacée en 1965 avec un décalage de 38 cm.

L'étalonnage a été effectué à partir de 63 jaugeages entre 12.5 et 136 m³/s. Deux courbes extrapolées jusqu'à 1 050 m³/s ont été utilisées.

Après complément et corrections de certaines valeurs journalières, les observations sont complètes de juillet 1956 à mai 1976 (lacune en février 1976).

La pluviométrie a été déterminée à partir de sept stations, dont une seule, FATIHITA (poids : .27) est située sur le bassin. Les autres stations principales sont AMBOHIMAHASOA (.37), AMBOHIMANGA Sud (.25) et RANOMAFANA (.10). La pluviométrie estimée par la méthode de THIESSEN est fortement sous-estimée (1 825 mm).

Une valeur moyenne de 3 200 mm a été évaluée d'après les isohyètes régionales (coefficient de correction des pluies mensuelles : 1.75).

## 7.2.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 5.90.

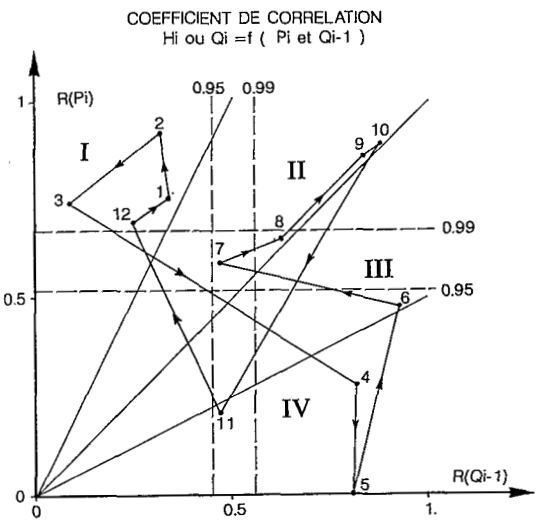
Ivoanana à Fatihita
Coefficients de corrélation

| Hi ou Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | (.21) | .69 | .75 | .92 | .74 | (.28) | - .05 | (.48) | .59 | .68 | .84 | .88 |
| Pi-1 | (.38) | - .01 | (.35) | (.38) | (.29) | .66 | .45 | (.12) | (.15) | .80 | .65 | .86 |
| Qi-1 | .47 | (.25) | (.34) | (.32) | (.09) | .82 | .81 | .83 | .47 | .63 | .86 | .89 |

Le graphe 5.50., où sont consignés les points représentatifs des corrélations, montrent les liaisons suivantes :

figure 5.50.

Ivoanana à Fatihita




Influence prépondérante des précipitations du mois pour la saison pluvieuse décembre-mars. D'avril à juin, les débits antérieurs déterminent les débits mensuels. De juillet à octobre, les précipitations du mois et les

débits antérieurs pèsent de façon équivalente. Le schéma est représentatif du fonctionnement d'un bassin de la côte orientale.

tableau 5.91.

Ivoanana à Fatihita
Régressions mensuelles (avec P corrigé)

| | | |
|---|---|---|
| Q11 = .85 Q10 + 8.9 | ($R^2$ = .22 | P > .95) |
| H12 = .39 P12 + .9H11 - 114 | ($R^2$ = .73 | P > .995) |
| H01 = .40 P01 + .67 H12 - 58 | ($R^2$ = .74 | P > .995) |
| H02 = .69 P02 - 34.3 | ($R^2$ = .85 | P > .995) |
| H03 = .43 P03 + .30 P0201 - 30.2 | ($R^2$ = .70 | P > .995) |
| H04 = .42 H03 + .33 P04 + 20 | ($R^2$ = .78 | P > .995) |
| Q05 = .37 Q04 + 17.2 | ($R^2$ = .66 | P > .995) |
| H06 = .55 H05 + .20 P06 + 5.4 | ($R^2$ = .87 | P > .995) |
| H07 = .54 H06 + .20 P07 + 14.1 | ($R^2$ = .67 | P > .995) |
| H08 = 1.49 H07 + .16 P08 -59 | ($R^2$ = .79 | P > .995) |
| H09 = .48 H08 + .24 P09 + 7.4 | ($R^2$ = .96 | P > .995) |
| H10 = .38 H09 + .24 P10 + 11.7 | ($R^2$ = .94 | P > .995) |

Le tableau 5.92. et le graphe 5.51. présentent les débits moyens mensuel et annuel (moyennes et quantiles).

Les graphes 5.52. et 5.53. donnent des exemples d'hydrogrammes annuels en année excédentaire (1964-1965, Q = 74.7 m³/s) et déficitaire (1959-60, Q = 28.5 m³/s).

On notera les crues de saison "sèche", typiques de la tendance pseudo-équatoriale de la côte est.

figure 5.51.

Ivoanana à Fatihita

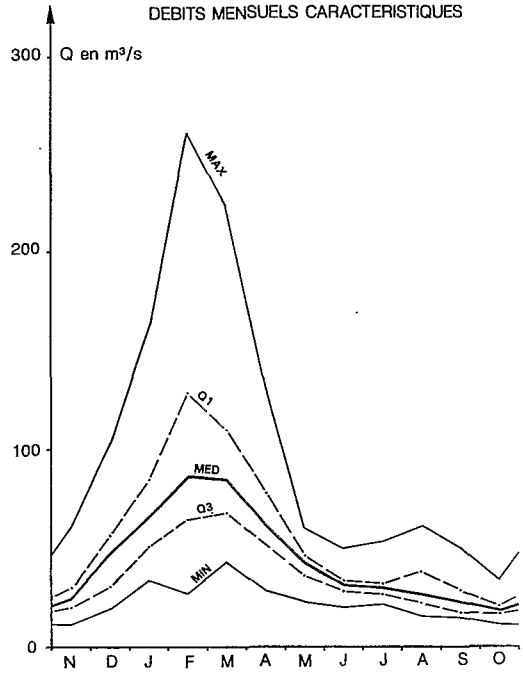


figure 5.52.

Ivoanana
à Fatihita

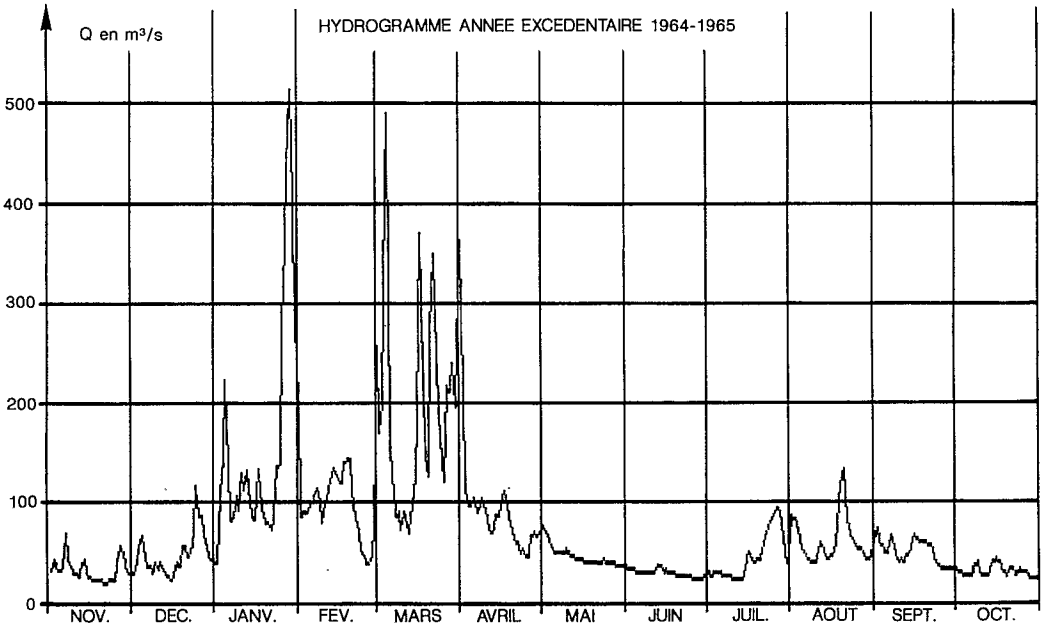



figure 5.53.

Ivoanana
à Fatihita

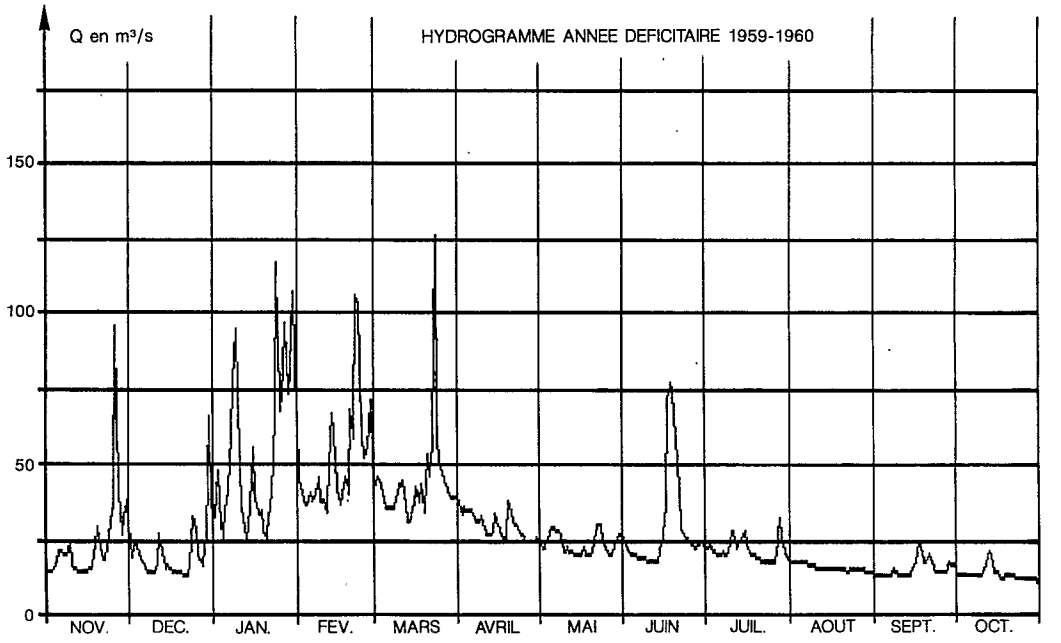


tableau 5.92.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1254502003 Fatihita
Rivière : Ivoanana
Pays : Madagascar
Bassin : Mananjary

Latitude : 21.03.00
Longitude : 47.45.00
Aire : 2 260 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1955/56 | - | - | - | - | - | - | - | - | 22.3 | 18.4 | 15.6 | 11.8 | . - |
| 1956/57 | 14.9 | 20.5 | 47.8 | 69.7 | 75.3 | 79.4 | 47.2 | 29.0 | 23.3 | 18.7 | 17.9 | 12.3 | 37.8 |
| 1957/58 | 12.8 | 34.2 | 45.9 | 79.0 | 125 | 51.7 | 33.1 | 27.8 | 33.6 | 34.8 | 26.0 | 24.0 | 43.9 |
| 1958/59 | 20.5 | 48.3 | 103 | 78.1 | 225 | 131 | 54.7 | 34.2 | 28.2 | 22.5 | 16.5 | 13.1 | 64.9 |
| 1959/60 | 23.5 | 20.8 | 52.7 | 51.8 | 44.2 | 29.6 | 23.7 | 29.5 | 21.8 | 16.0 | 15.7 | 13.6 | 28.5 |
| 1960/61 | 11.5 | 31.6 | 73.5 | 27.7 | 59.3 | 45.6 | 26.1 | 20.9 | 31.2 | 43.5 | 31.4 | 20.2 | 35.5 |
| 1961/62 | 20.4 | 104 | 90.0 | 103 | 84.3 | 55.9 | 41.0 | 31.8 | 24.5 | 26.3 | 17.4 | 17.7 | 51.2 |
| 1962/63 | 23.2 | 30.0 | 72.9 | 165 | 95.4 | 88.8 | 60.1 | 49.8 | 30.0 | 25.9 | 20.6 | 16.6 | 55.8 |
| 1963/64 | 60.9 | 54.2 | 34.7 | 49.6 | 58.6 | 43.4 | 29.9 | 28.4 | 33.1 | 49.4 | 43.8 | 35.2 | 43.4 |
| 1964/65 | 33.4 | 48.2 | 163 | 96.4 | 196 | 94.1 | 46.6 | 29.6 | 44.7 | 62.0 | 50.5 | 30.9 | 74.7 |
| 1965/66 | 33.8 | 53.7 | 57.3 | 61.1 | 66.9 | 54.4 | 40.7 | 32.7 | 27.0 | 26.8 | 21.3 | 16.2 | 40.9 |
| 1966/67 | 16.3 | 44.0 | 66.1 | 59.3 | 94.3 | 75.4 | 46.3 | 32.4 | 32.1 | 41.0 | 42.9 | 31.6 | 48.5 |
| 1967/68 | 42.7 | 60.0 | 49.0 | 71.4 | 73.0 | 42.7 | 30.5 | 24.1 | 28.9 | 19.9 | 16.2 | 18.0 | 39.6 |
| 1968/69 | 24.7 | 69.6 | 79.5 | 262 | 82.3 | 72.2 | 45.6 | 39.9 | 33.1 | 53.7 | 29.9 | 19.4 | 66.3 |
| 1969/70 | 26.7 | 66.3 | 128 | 218 | 118 | 87.0 | 56.7 | 48.2 | 39.6 | 37.5 | 25.9 | 19.7 | 71.7 |
| 1970/71 | 24.0 | 21.8 | 66.5 | 130 | 52.9 | 54.0 | 32.2 | 27.1 | 30.2 | 22.3 | 26.9 | 22.6 | 41.9 |
| 1971/72 | 32.6 | 49.4 | 50.2 | 129 | 70.1 | 58.3 | 44.5 | 34.1 | 33.1 | 22.5 | 17.8 | 18.7 | 46.4 |
| 1972/73 | 25.0 | 27.6 | 59.1 | 117 | 95.2 | 74.9 | 39.1 | 31.3 | 35.4 | 33.8 | 29.1 | 17.5 | 48.3 |
| 1973/74 | 19.9 | 45.7 | 58.9 | 93.2 | 104 | 77.7 | 57.7 | 50.4 | 54.2 | 37.5 | 20.6 | 21.0 | 53.2 |
| 1974/75 | 27.3 | 46.7 | 71.8 | 128 | 116 | 60.0 | 47.3 | 33.9 | 27.7 | 23.5 | 23.1 | 19.2 | 51.6 |
| 1975/76 | 25.9 | 74.5 | 93.7 | (77) | 86.2 | 65.0 | 41.9 | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 26.0 | 47.6 | 73.2 | 104 | 96.1 | 67.1 | 42.3 | 33.4 | 31.7 | 31.8 | 25.5 | 20.1 | 49.6 |
| Ecart-type | 11.2 | 20.8 | 30.7 | 57.8 | 45.1 | 22.9 | 10.6 | 8.20 | 7.70 | 12.9 | 10.1 | 6.20 | |
| Max. | 60.9 | 104 | 163 | 262 | 225 | 131 | 60.1 | 50.4 | 54.2 | 62.0 | 50.5 | 35.2 | |
| Q1 | 30.0 | 57.1 | 84.8 | 129 | 110 | 78.6 | 47.3 | 34.2 | 33.4 | 39.3 | 29.5 | 21.8 | |
| Méd. | 24.4 | 47.5 | 66.3 | 86.1 | 85.3 | 62.5 | 43.2 | 31.8 | 30.7 | 26.6 | 22.2 | 19.0 | |
| Q3 | 20.1 | 30.8 | 51.4 | 65.4 | 68.5 | 52.8 | 36.6 | 28.4 | 27.3 | 22.4 | 17.6 | 16.4 | |
| Min. | 11.5 | 20.5 | 34.7 | 27.7 | 44.2 | 29.6 | 23.7 | 20.9 | 21.8 | 16.0 | 15.6 | 11.8 | |

## 7.2.2. Apports annuels

Sur l'échantillon observé, on peut établir les régressions suivantes :

$H = .76\ (P - 567)$ $(R^2 = .63 \quad P > .995)$

et $HIVOA = 26.1\ HNAMO^{.63}$ $(R^2 = .72 \quad P > .995)$

Ces deux régressions permettent d'évaluer les valeurs non observées de la période 1945-1979.

| Année | 1945-46 | 1946-47 | 1947-48 | 1948-49 | 1949-50 | 1950-51 | 1951-52 | 1952-53 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hmm | 1940 | 2140 | 2280 | 1780 | 1870 | 2460 | 1735 | 1710 |
| Qm³/s | 51.4 | 56.7 | 60.2 | 47.1 | 49.5 | 65.1 | 45.8 | 45.3 |
| Année | 53-54 | 54-55 | 55-56 | | 75-76 | 76-77 | 77-78 | 78-79 |
| Hmm | 2260 | 1665 | 1850 | | 1660 | 2105 | 1020 | 1045 |
| Qm³/s | 59.8 | 44.1 | 48.8 | | 43.8 | 55.7 | 27.0 | 27.7 |

1945-46 à 1950-51 d'après P
1951-52 à 1955-56 et 1975-76 à 1978-79 d'après HNAMORONA
L'ajustement statistique, effectué sur l'échantillon de trente quatre valeurs annuelles observées et complétées, fournit les quantiles suivants :

tableau 5.93.
Ivoanana à Fatihita
Quantiles

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| H mm | 1015 | 1172 | 1315 | 1492 | 1845 | 2217 | 2418 | 2589 | 2786 |
| Q (m³/s) | 26.9 | 31.0 | 34.8 | 39.5 | 48.8 | 58.7 | 64.0 | 68.5 | 73.7 |
| q (l/s/km²) | 32.2 | 37.1 | 41.7 | 47.3 | 58.4 | 70.3 | 76.6 | 82.0 | 88.3 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 2.38, échelle : 7110 mm, position : - 5205 mm, forme : 0.060.
Centennales sèche et humide : 912 mm (Q = 24.1 m³/s) et 2920 mm (Q = 77.3 m³/s).

## 7.2.3. Crues

### 7.2.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

La nature du contrôle (seuil, chute) garantit la stabilité de cette station, mais l'extrapolation de type logarithmique qui a été menée à partir des jaugeages les plus importants est forte (de 2,41 à 9,55 m).

tableau 5.94.

Ivoanana à Fatihita
Maximums annuels
de crues

| Année | Q m³/s | Date | Hm* | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1956-57 | 175 | 04/02/57 12 h 00 | 2,80 | 3rel |
| 1957-58 | 364 | 05/03/58 12 h 00 | 4,54 | 3rel |
| 1958-59 | 872 | 28/03/59 12 h 00 | 8,70 | 3rel |
| 1959-60 | 202 | 23/03/60 06 h 00 | 3,08 | 3rel |
| 1960-61 | 333 | 02/01/61 06 h 00 | 4,26 | 3rel |
| 1961-62 | 335 | 28/12/61 06 h 00 | 4,28 | 3rel |
| 1962-63 | ≥ (281) | 24/01/63 18 h 00 | 3,80 | 3rel |
| 1963-64 | 374 | 14/11/63 18 h 00 | 4,63 | 3rel |
| 1964-65 | 529 | 28/01/65 18 h 00 | 5,96 | 3rel |
| 1965-66 | 232 | 02/01/66 12 h 00 | 3,36 | 3rel |
| 1966-67 | 221 | 19/02/67 12 h 00 | 3,26 | 3rel |
| 1967-68 | 288 | 18/02/68 06 h 00 | 3,86 | 3rel |
| 1968-69 | ≥ (807) | 08/02/69 06 h 00 | 9,10 | PHE |
| 1969-70 | 1030 | 24/02/70 09 h 00 | 9,55 | PHE |
| 1970-71 | 300 | 16/02/71 18 h 00 | 3,57 | 3rel |
| 1971-72 | 461 | 14/02/72 18 h 00 | 4,98 | 3rel |
| 1972-73 | 222 | 16/02/73 12 h 00 | 2,87 | 3rel |
| 1973-74 | 303 | 05/02/74 18 h 00 | 3,60 | 3rel |
| 1974-75 | 191 | 14/03/75 18 h 00 | 2,58 | 3rel |
| 1975-76 | 234 | 21/12/75 06 h 00 | 2,98 | Min |

* Hauteurs dans le système dit de l'ancienne échelle.

## 7.2.3.2. Extension de l'échantillon de crues

Les plus hautes eaux atteintes lors du cyclone Dany (08/02/1969) n'ayant pu être correctement identifiées, une valeur minimale a été retenue pour l'année 1968-69.

1959 cyclone MANANARA nord

1963 cyclone FANNY, débit maximal évalué à 750 m³/s d'après le MANANJARY

1969 cyclone DANY ( valeur par défaut)

1970 cyclone GENEVIEVE

Une année sur deux, le maximum est observé entre la mi-janvier et le 21 février (date médiane : 15 février - dates extrêmes : 14 novembre et 28 mars).

QMax = .84 QJMax + 11 ($R^2$ = .95)
DCC = .26 QJMax + 66 ($R^2$ = .69)
DC1 = .09 QJMax + 67 ($R^2$ = .53)

Ajustée à l'échantillon de 20 années, une distribution de Fréchet correspond aux quantiles suivants :

tableau 5.95.
Ivoanana à Fatihita
Débits maximaux de crue

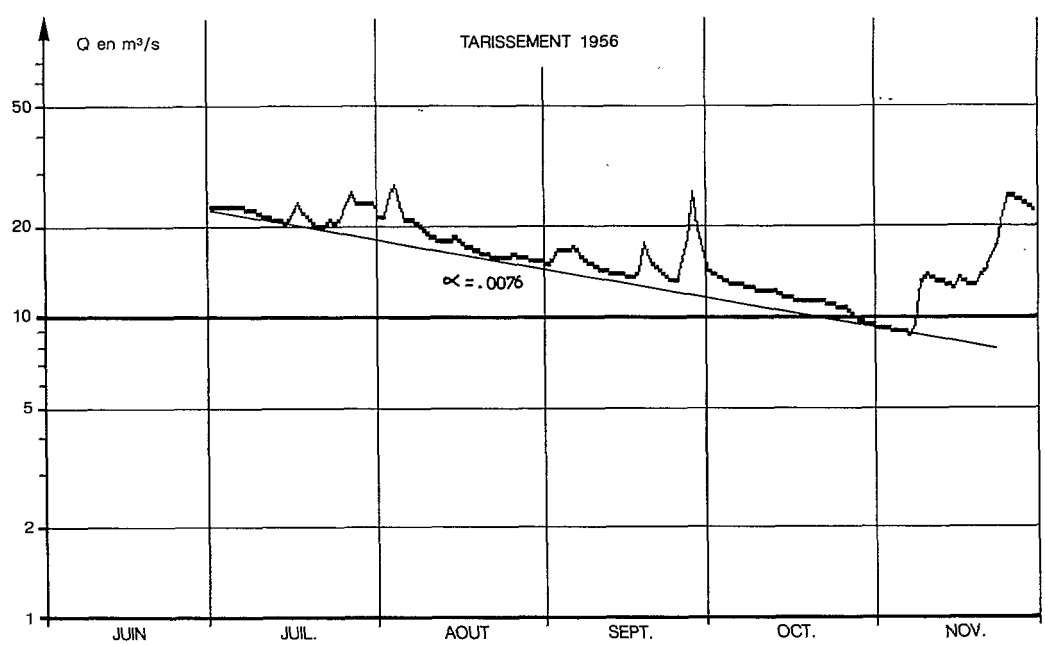
| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 295 | 475 | 682 | (1650) | (2450) |
| q l/s/km² | 353 | 570 | 815 | (1980) | (2930) |

## 7.2.4. Basses eaux

Très souvent perturbé par les recharges de nappes et les crues dues aux fortes précipitations de saison "sèche", le "tarissement" n'a pu être mis en évidence que six années sur seize. Les coefficients α sont compris entre .0060 et .0080 (Tc = 115 à 87 jours).

Le débit de base initial est compris entre 30 et 35 m³/s, généralement en juin ou juillet (graphe 5.54.. tarissement de 1956).

figure 5.54.
Ivoanana à Fatihita



Les réserves drainables sont d'environ 350.106 m³ (lame équivalente 415 mm) en fin mai.

tableau 5.96.

Ivoanana à Fatihita
Débits d'étiage
($m^3/s$)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1956 | 16.0 | 12.4 | 9.80 | 8.91 | 07-11 |
| 1957 | 16.6 | 11.7 | 10.9 | 9.91 | 16-10 |
| 1958 | 24.0 | 18.3 | 14.7 | 13.0 | 07-12 |
| 1959 | 19.1 | 14.9 | 14.1 | 13.6 | 05-10 |
| 1960 | 15.7 | 12.3 | 10.0 | 9.31 | 20-11 |
| 1961 | 21.8 | 18.3 | 15.9 | 15.0 | 26-11 |
| 1962 | 20.1 | 16.0 | 14.4 | 13.4 | 05-11 |
| 1963 | 26.2 | 18.0 | 16.0 | 14.1 | 27-10 |
| 1964 | 26.9 | 23.1 | 21.1 | 17.4 | 01-02 |
| 1965 | 33.4 | 25.8 | 22.3 | 20.3 | 21-11 |
| 1966 | 19.9 | 14.5 | 12.5 | 11.5 | 07-12 |
| 1967 | 32.2 | 27.7 | 25.4 | 20.2 | 27-10 |
| 1968 | 20.5 | 14.9 | 13.6 | 12.7 | 04-10 |
| 1969 | 27.9 | 20.1 | 17.5 | 16.2 | 23-10 |
| 1970 | 25.2 | 17.4 | 15.7 | 14.8 | 15-12 |
| 1971 | 25.2 | 20.8 | 18.8 | 17.9 | 31-10 |
| 1972 | 22.6 | 17.7 | 16.8 | 16.1 | 07-10 |
| 1973 | 27.0 | 16.9 | 15.2 | 13.8 | 05-11 |
| 1974 | 28.3 | 17.9 | 15.6 | 13.6 | 14-12 |
| 1975 | 24.0 | 20.3 | 17.1 | 13.5 | 26-10 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 33.4 | 27.7 | 25.4 | 21.1 | 15-12 |
| Q1 | 27.0 | 20.2 | 17.3 | 16.2 | 24-11 |
| Méd. | 24.0 | 17.8 | 15.6 | 13.7 | 05-11 |
| Q3 | 20.0 | 14.9 | 13.8 | 12.8 | 24-10 |
| Min. | 15.7 | 11.7 | 9.80 | 8.91 | 01-02 |

DCE = 1.20 QJmin - 1.4 ($R^2$ = .93 P > .995) DCE/QJmin = 1.10
DC11 = 1.25 QJmin + 1 ($R^2$ = .87 P > .995) DCE/QJmin = 1.25
DC9 = 1.36 QJmin + 4.2 ($R^2$ = .74 P > .995) DCE/QJmin = 1.67

$QJmin = 2.12, Q0809^{.62} * e^{-T/250}$ ($R^2$ = .75 P > .995)

T en jours (intervalle de temps entre le 30 septembre et l'étiage absolu).

Les quantiles du débit minimal journalier, calculés à partir de l'ajustement statistique sur l'échantillon de vingt valeurs, sont les suivants :

tableau 5.97.

Ivoanana à Fatihita
Débit minimal journalier

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q ($m^3/s$) | 9.48 | 10.4 | 11.6 | 14.1 | 17.1 | 18.9 | 20.5 |
| q ($l/s/km^2$) | 11.4 | 12.5 | 13.9 | 16.9 | 20.5 | 22.6 | 24.6 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 3.04, échelle : 17.3 $m^3/s$, position : - 3.18 $m^3/s$, forme : .190).
Cinquantennales sèche et humide : 8.54 $m^3/s$ (10.2 $l/s/km^2$) et 22.4 $m^3/s$ (26.8 $l/s/km^2$).

## 7.2.5. Bilan hydrologique

Pour une précipitation moyenne interannuelle de l'ordre de 3 200 mm, la lame écoulée : 1 860 mm correspond à un déficit d'écoulement de 1 340 mm (Ke = 58 %).

tableau 5.98.

Ivoanana à Fatihita
Termes du bilan hydrologique (mm)

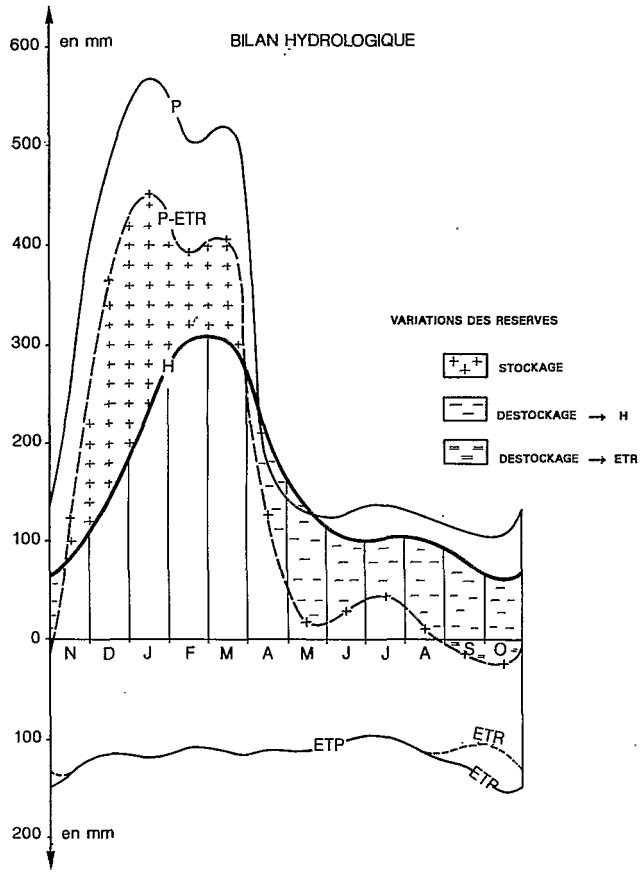
| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 256 | 480 | 568 | 502 | 518 | 176 | 130 | 128 | 137 | 125 | 93 | 87 | 3200 |
| ETP | 133 | 115 | 118 | 108 | 113 | 111 | 113 | 100 | 95 | 115 | 126 | 153 | 1400 |
| ETR | 133 | 115 | 118 | 108 | 113 | 111 | 113 | 100 | 95 | 115 | 106 | 113 | 1340 |
| P-ETR | 123 | 365 | 450 | 394 | 405 | 65 | 17 | 28 | 42 | 10 | -13 | -26 | 1860 |
| H | 80 | 150 | 233 | 303 | 304 | 206 | 135 | 103 | 101 | 101 | 80 | 64 | 1860 |
| ΔR+ | 43 | 215 | 217 | 91 | 101 | | | | | | | | + 667 |
| ΔR- | | | | | | 141 | 118 | 75 | 59 | 91 | 93 | 90 | - 667 |
| R | 43 | 258 | 475 | 566 | 667 | 526 | 408 | 333 | 274 | 183 | 90 | 0 | |

En saison des pluies (novembre à mars), les précipitations (cumul : 2 324 mm soit 73 % du total annuel), après avoir satisfait entièrement l'ETR (égale à l'ETP : 587 mm) et, par drainage inter-mensuel et ruissellement de surface, nourri les lames écoulées (1 070 mm soit 57 % du total annuel), permettent la constitution d'une importante réserve drainable (667 mm) dans les altérites, très profondes sur ce bassin (cf. graphe 5.55.).

D'avril à octobre, les écoulements (790 mm) sont dus essentiellement au drainage des altérites, mais avec le renfort non négligeable des précipitations de saison "sèche" (qui fournissent l'équivalent de 123 mm). Les réserves en fin mai correspondent (avec 408 mm) à la réserve calculée d'après Qo et $\alpha$ (415 mm). L'ETR de saison sèche est presque toujours équivalente à l'ETP et ne subit qu'une légère réduction en septembre et octobre, avec le soutien au cours de ces deux derniers mois, des réserves utiles du sol, pratiquement saturé 10 mois sur 12.

figure 5.55.

Ivoanana à Fatihita




# 8. BASSIN DE LA NAMORONA

Le bassin de la NAMORONA, entre ceux de la MANANJARY et de la FARAONY, draine la falaise de TANALA, un peu au Nord de FIANARANTSOA. Le bassin supérieur repose sur les gneiss et micaschistes de la série d'AMBOSITRA (système du graphite), le bassin inférieur est situé sur les roches basiques du VOHIBORY, puis plus à l'est sur les coulées crétacées. Les sols sont représentés, sur les gneiss et micaschistes, par les sols ferralitiques jaune sur rouge (latérites) puis, sur les roches volcaniques basiques, par des latérites rouges indurées.

La végétation est essentiellement représentée par la savane et la prairie avec forêt replantée et savoka et à l'Est du bassin par la forêt secondaire (avec des états résiduels de forêt primaire).

## 8.1. La Namorona à Vohiparara

La station de VOHIPARARA (21°14'S - 47°23'E) contrôle un bassin de 445 km² (bassin supérieur de la NAMORONA). L'altitude moyenne du bassin est de 1 250 m.

Une échelle avait été implantée en 1929 pour l'étude des débits à usage hydro-électrique. L'échelle ORSTOM a été installée en novembre 1951, en aval de la première, à 400 m en amont des premières chutes. Démontée en 1960, à l'occasion de la réfection de la route, elle a été réinstallée en octobre 1960, puis en janvier 1970, après le passage du cyclone JANE.

L'étalonnage de l'échelle repose sur soixante et une mesures de débit (entre 2.3 et 114 m³/s). Deux courbes d'étalonnage moyennes ont été établies, en fonction des détarages constatés à l'occasion des plus fortes crues. L'extrapolation a été menée jusqu'à 1 100 m³/s.

La pluviométrie moyenne sur le bassin a été établie à partir de sept stations pluviométriques dont la plupart hors du bassin : VOHIPARARA (poids : .63), AMBOHIMAHASOA (.26), VOHIMASINA (.04), SAHAMBAVA (.04), etc. La pluviométrie moyenne ainsi calculée : 1 803 mm a dû être corrigée (coef. 1.11) pour atteindre une valeur plus correcte, d'après les isohyètes régionales, évaluée à 2 000 mm. Le bassin, entièrement situé à l'ouest du rebord de la falaise, est moins arrosé que les autres bassins de la côte orientale et, certaines années, la saison "sèche" peut être bien marquée.

### 8.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 5.99.

Coefficients de corrélation

| Hi ou Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .47 | .68 | .76 | .70 | .47 | -.03 | (.04) | (.38) | (.25) | .61 | .70 | (.29) |
| Pi-1 | (.11) | - .39 | (.16) | .48 | (.06) | .47 | (.04) | (.07) | (.15) | (.37) | .46 | .64 |
| Qi-1 | .48 | - .28 | (.31) | .47 | (.35) | .89 | .88 | .76 | .58 | .62 | .84 | .84 |

Le schéma (graphe 5.56.) montre des corrélations assez nettes, en dépit d'une imprécision due à la sous-évaluation des valeurs de la pluviométrie de 1951 à 1959 (cf. ci-dessous), caractéristiques des régimes de la côte est : prédominance de l'influence des précipitations du mois de décembre à mars (avec influence secondaire des

jusqu'à la reprise de la saison des pluies, influence forte des débits antérieur et secondaire mais forte des précipitations du mois.

figure 5.56.

Namorona à Vohiparara

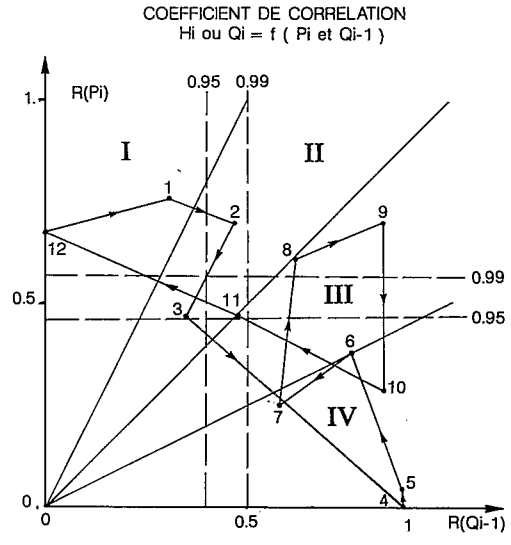



tableau 5.100.

Namorona à Vohiparara
Régressions
hydropluviométriques

| | |
|---|---|
| H11 = .81 H10 + .12 P11 - 5 | ($R^2$ = .52 P > .995) |
| H12 = .15 P12 + 33 | ($R^2$ = .46 P > .99) |
| H01 = .45 P01 + .84 H12 - 79 | ($R^2$ = .65 P > .995) |
| H02 = .60 P02 + .96 H01 - 139 | ($R^2$ = .72 P > .995) |
| H03 = .43 P03 + .27 H02 - 13 | ($R^2$ = .38 P > .995) |
| Q04 = .36 Q03 + 6 | ($R^2$ = .79 P > .995) |
| Q05 = .46 Q04 + 4 | ($R^2$ = .77 P > .995) |
| H06 = .70 H05 + .12 P06 + 7 | ($R^2$ = .68 P > .995) |
| H07 = .49 H06 + .09 P07 + 19 | ($R^2$ = .55 P > .995) |
| H08 = .95 H07 + .13 P08 - 7 | ($R^2$ = .76 P > .995) |
| H09 = .48 H08 + .13 P09 + 6 | ($R^2$ = .86 P > .995) |
| H10 = .60 H09 + .05 P10 + 3 | ($R^2$ = .91 P > .995) |

Ces relations ont permis d'évaluer les débits moyens mensuels de novembre 1951 et janvier 1953. Le tableau 5.101. rassemble les valeurs observées de novembre 1951 à décembre 1980, ainsi que les moyennes, écarts-type et quantiles des débits mensuels (graphe 5.57.).

Des hydrogrammes représentatifs d'une année excédentaire (1969-70, Q = 30.1 m³/s) et d'une année déficitaire (1959-60, Q = 7.34 m³/s) sont représentés sur les graphes 5.58. et 5.59.

figure 5.57.

Namorona à Vohiparara

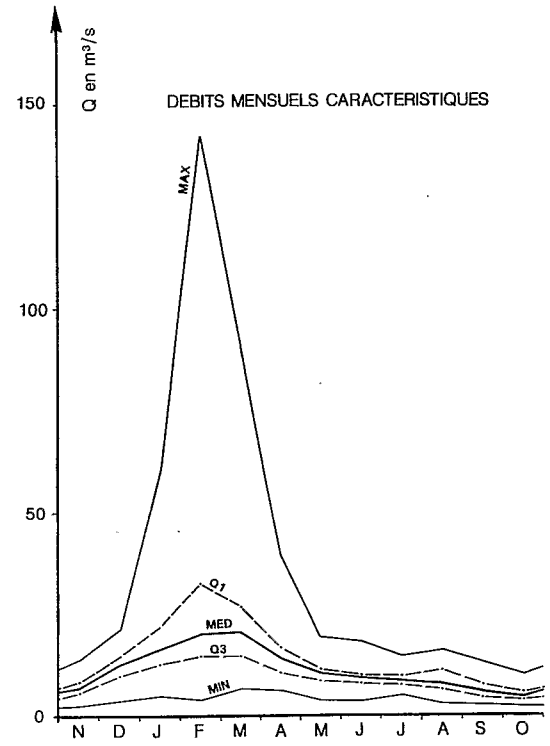



figure 5.58.

Namorona à Vohiparara

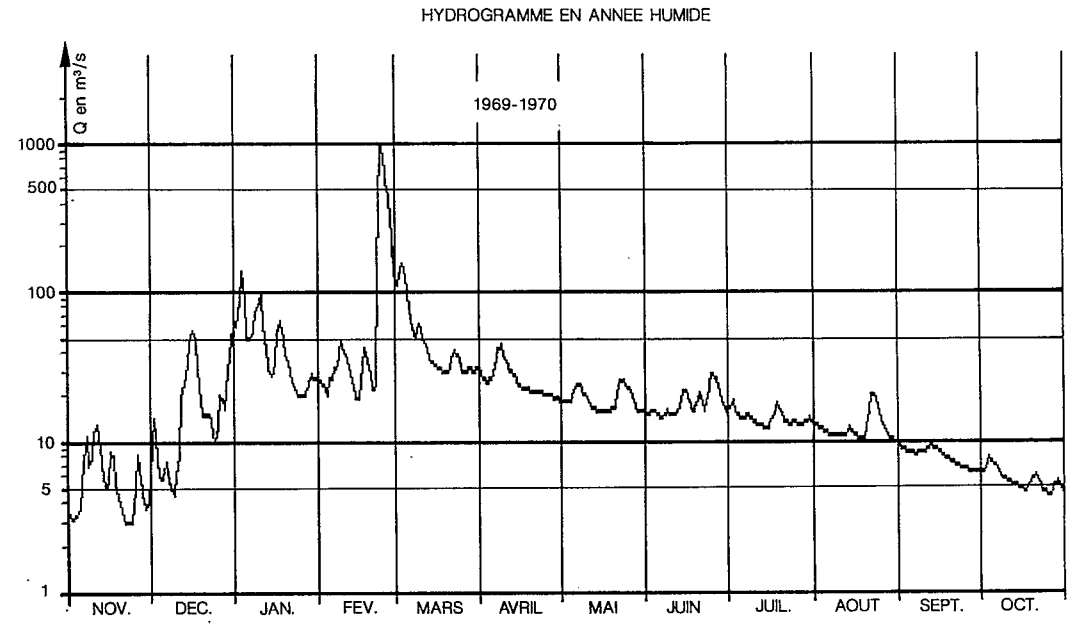


figure 5.59.

Namorona à Vohiparara

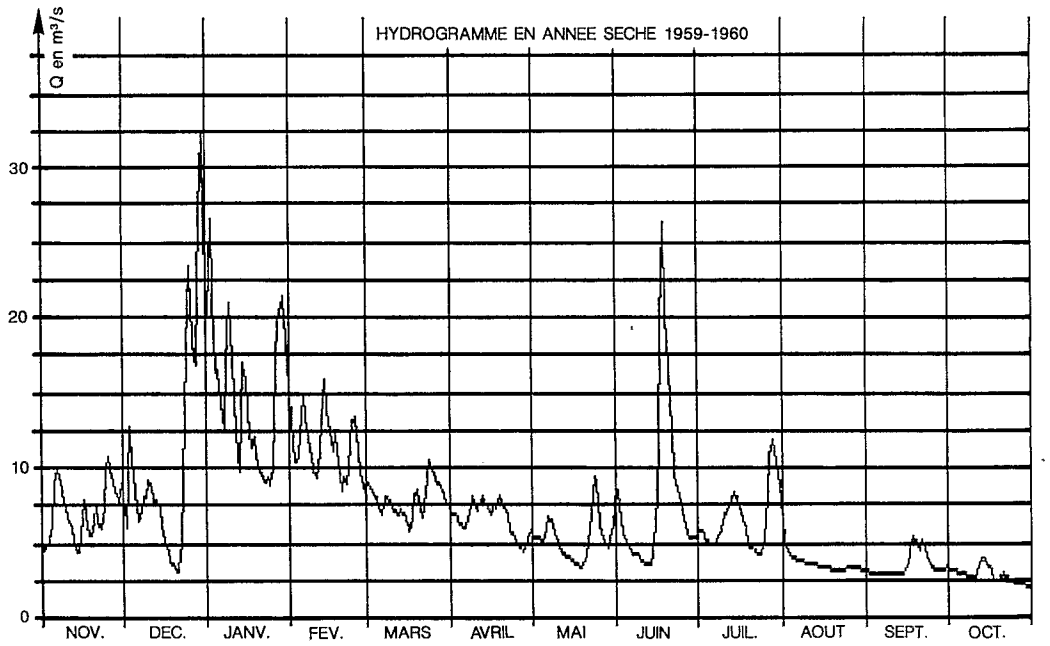



tableau 5.101.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1255600110 Vohiparara
Rivière : Namorona
Pays : Madagascar
Bassin : Nahorona
Débits en m³/s

Latitude : 21.14.00
Longitude : 47.23.00

Aire : 445 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1951/52 | (10.6) | 5.94 | 15.0 | 17.9 | 22.1 | 13.8 | 12.6 | 16.5 | 9.37 | 9.49 | 7.89 | 5.49 | 12.2 |
| 1952/53 | 13.3 | 10.4 | (8.9) | 13.0 | 21.6 | 15.2 | 9.71 | 16.6 | 11.2 | 16.0 | 12.8 | 7.61 | 13.0 |
| 1953/54 | 7.57 | 12.6 | 60.0 | 36.4 | 27.9 | 19.8 | 13.4 | 12.9 | 9.92 | 10.0 | 6.67 | 4.78 | 18.4 |
| 1954/55 | 7.73 | 12.3 | 24.8 | 13.6 | 18.2 | 12.3 | 11.0 | 9.77 | 9.62 | 6.90 | 4.48 | 3.47 | 11.2 |
| 1955/56 | 4.80 | 12.6 | 42.5 | 31.3 | 21.6 | 13.7 | 10.5 | 9.36 | 7.46 | 5.86 | 4.77 | 3.31 | 13.9 |
| 1956/57 | 5.91 | 9.27 | 20.3 | 15.7 | 19.1 | 17.7 | 10.3 | 8.93 | 7.03 | 5.86 | 5.77 | 4.76 | 10.9 |
| 1957/58 | 6.48 | 15.0 | 14.0 | 18.0 | 32.7 | 11.9 | 9.87 | 9.22 | 12.3 | 14.5 | 8.76 | 6.13 | 13.2 |
| 1958/59 | 5.37 | 20.0 | 28.8 | 22.8 | 90.3 | 39.4 | 18.8 | 13.6 | 12.1 | 10.4 | 6.89 | 5.81 | 22.9 |
| 1959/60 | 6.98 | 10.4 | 15.4 | 11.4 | 7.84 | 6.55 | 5.32 | 7.95 | 6.58 | 3.59 | 3.46 | 2.77 | 7.34 |
| 1960/61 | 2.12 | 9.27 | 19.4 | 5.84 | 13.6 | 7.30 | 3.96 | 3.76 | 7.07 | 10.1 | 6.17 | 4.54 | 7.84 |
| 1961/62 | 3.89 | 16.9 | 15.6 | 28.1 | 22.3 | 11.0 | 10.4 | 7.81 | 7.01 | 7.41 | 4.00 | 4.54 | 11.5 |
| 1962/63 | 7.42 | 10.8 | 23.4 | 41.6 | 18.5 | 15.6 | 11.5 | 13.1 | 8.46 | 8.23 | 5.79 | 4.13 | 13.9 |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1963/64 | 9.92 | 10.1 | 6.13 | 15.6 | 16.4 | 6.79 | 5.39 | 5.44 | 8.53 | 10.4 | 10.1 | 6.76 | 9.28 |
| 1964/65 | 6.09 | 13.7 | 32.7 | 21.9 | 30.5 | 17.7 | 12.9 | 9.80 | 14.4 | 14.7 | 10.6 | 7.86 | 16.1 |
| 1965/66 | 7.05 | 16.4 | 12.3 | 12.1 | 13.9 | 9.23 | 8.24 | 8.97 | 7.33 | 7.43 | 6.00 | 3.89 | 9.40 |
| 1966/67 | 4.06 | 14.5 | 16.3 | 12.5 | 25.0 | 17.1 | 11.3 | 9.71 | 9.20 | 14.2 | 11.8 | 9.21 | 12.9 |
| 1967/68 | 11.5 | 13.9 | 10.8 | 15.9 | 12.2 | 9.43 | 6.96 | 6.12 | 8.13 | 4.72 | 3.77 | 3.60 | 8.89 |
| 1968/69 | 5.27 | 9.24 | 12.6 | 61.1 | 18.3 | 12.8 | 9.73 | 9.89 | 7.70 | 14.3 | 6.62 | 3.93 | 14.0 |
| 1969/70 | 5.78 | 20.2 | 47.4 | 142. | 51.3 | 25.8 | 19.0 | 18.1 | 14.3 | 12.5 | 7.97 | 5.55 | 30.1 |
| 1970/71 | 10.2 | 8.19 | 18.9 | 33.6 | 14.8 | 14.1 | 8.21 | 7.53 | 8.13 | 5.71 | 6.55 | 4.18 | 11.5 |
| 1971/72 | 8.23 | 11.1 | 7.89 | 37.6 | 35.1 | 14.1 | 9.44 | 7.74 | 9.01 | 6.35 | 4.12 | 5.94 | 13.0 |
| 1972/73 | 6.44 | 10.6 | 17.8 | 29.9 | 23.8 | 16.2 | 10.1 | 9.95 | 8.19 | 11.8 | 6.13 | 3.98 | 12.8 |
| 1973/74 | 6.27 | 14.7 | 15.6 | 18.9 | 19.0 | 17.4 | 13.6 | 9.94 | 10.7 | 7.20 | 5.09 | 5.19 | 11.9 |
| 1974/75 | 8.81 | 11.9 | 15.5 | 26.1 | 29.6 | 14.4 | 11.0 | 9.20 | 7.13 | 7.38 | 5.21 | 3.98 | 12.4 |
| 1975/76 | 5.94 | 12.5 | 17.8 | 20.3 | 14.5 | 14.7 | 8.51 | 8.42 | 7.00 | 5.55 | 3.72 | 4.81 | 10.3 |
| 1976/77 | 4.21 | 13.8 | 16.4 | 45.8 | 21.1 | 15.1 | 10.4 | 9.66 | 8.64 | 8.44 | 5.11 | 4.40 | 13.4 |
| 1977/78 | 4.03 | 4.56 | 6.36 | 3.62 | 12.7 | 5.83 | 3.37 | 3.53 | 4.88 | 2.72 | 2.37 | 2.04 | 4.68 |
| 1978/79 | 3.92 | 3.50 | 4.83 | 19.5 | 6.47 | 6.14 | 5.19 | 5.06 | 6.68 | 7.55 | 4.13 | 2.61 | 6.21 |
| 1979/80 | 5.99 | 21.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 6.75 | 12.3 | 19.6 | 27.6 | 23.6 | 14.3 | 10.0 | 9.59 | 8.86 | 8.90 | 6.31 | 4.83 | 12.6 |
| Ecart-type | 2.54 | 4.23 | 12.7 | 25.8 | 16.0 | 6.71 | 3.70 | 3.58 | 2.30 | 3.59 | 2.58 | 1.63 | |
| Max. | 13.3 | 21.0 | 60.0 | 142. | 90.3 | 39.4 | 19.0 | 18.1 | 14.4 | 16.0 | 12.8 | 9.21 | |
| Q1 | 7.98 | 14.6 | 21.9 | 32.5 | 26.5 | 16.7 | 11.4 | 9.95 | 9.77 | 11.1 | 7.39 | 5.68 | |
| Méd. | 6.27 | 12.3 | 16.0 | 19.9 | 20.1 | 14.1 | 10.2 | 9.29 | 8.32 | 7.89 | 5.90 | 4.54 | |
| Q3 | 5.03 | 9.68 | 12.4 | 14.6 | 14.6 | 10.2 | 8.22 | 7.77 | 7.10 | 6.10 | 4.30 | 3.91 | |
| Min. | 2.12 | 3.50 | 4.83 | 3.62 | 6.47 | 5.83 | 3.37 | 3.53 | 4.88 | 2.72 | 2.37 | 2.04 | |

## 8.1.2. Apports annuels

La régression portant sur les valeurs communes (H, P) de l'échantillon 1951-1970 (dix-neuf couples) est de mauvaise qualité ($R^2$ = .11). Ceci est dû très probablement à la mauvaise détermination des données pluviométriques de la période 1951-52 à 1959-60, probablement très sous-estimées (valeurs du déficit d'écoulement anormalement faibles).

En effet, en comparant les précipitations sur les bassins de la NAMORONA et du MANANJARY, il est impossible de dégager une relation correcte. Les valeurs de la période douteuse se regroupe toutes très en-dessous de la droite de régression qui peut être évaluée sur la période 1960-1970.

$P_{NAMORONA} = .43\ P_{MANANJARY} + 1162$ $(R^2 = .22)$ $P > .925$

Par contre, entre les lames écoulées des deux stations, il est possible de dégager la relation suivante :

$H_{NAMO} = 1.05\ H_{MANANJ} - 803$ $(R^2 = .60 \quad P > .995)$

En éliminant la période pluviométrique douteuse, il est possible d'établir la relation suivante :

$H = .16\ P^{1.43} * KP^{1.27}$ $(R^2 = .81 \quad P > .995)$

où P est la précipitation moyenne sur le bassin et KP un indice de concentration des précipitations de décembre à mars (cf. FARAONY 9.1.2.).

Cette dernière relation a permis d'évaluer les apports annuels de la NAMORONA de 1945-46 à 1950-51.

| Année | 1945-46 | 1946-47 | 1947-48 | 1948-49 | 1949-50 | 1950-51 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| H mm | 785 | 740 | 950 | 650 | 940 | 1395 |
| Qm³/s | 11.1 | 10.4 | 13.4 | 9.17 | 13.3 | 19.7 |

L'ajustement statistique effectué sur l'échantillon de trente-quatre valeurs observées et calculées (1945-46 à 1978-79), fournit les quantiles suivants :

tableau 5.102.

Namorona à Vohiparara

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| H mm | 417 | 484 | 549 | 638 | 848 | 1129 | 1316 | 1495 | 1727 |
| Q (m³/s) | 5.88 | 6.82 | 7.74 | 9.00 | 12.0 | 15.9 | 18.6 | 21.1 | 24.4 |
| q (l/s/km²) | 13.2 | 15.3 | 17.4 | 20.2 | 27.0 | 35.7 | 41.8 | 47.4 | 54.8 |

Loi de GUMBEL (test Brunet-Moret : 8.24, échelle : 249 mm, position : 756 mm).
Centennales sèche et humide : 374 mm (Q = 5.27 m³/s) et 1900 mm (Q = 26.8 m³/s).

Cependant, ainsi que le montre le graphe 5.59.bis, l'ajustement de la loi retenue (GUMBEL, qui correspond au test le moins mauvais !) n'est pas très satisfaisant pour les valeurs des années excédentaires. Il semble préférable, pour cette station, de retenir un ajustement empirique avec deux distributions correspondant à la cassure qui apparaît nettement dans l'échantillon pour des lames supérieures à 1 000 mm (14.1 m³/s).

Les quantiles estimés sont alors les suivants :

tableau 5.103.

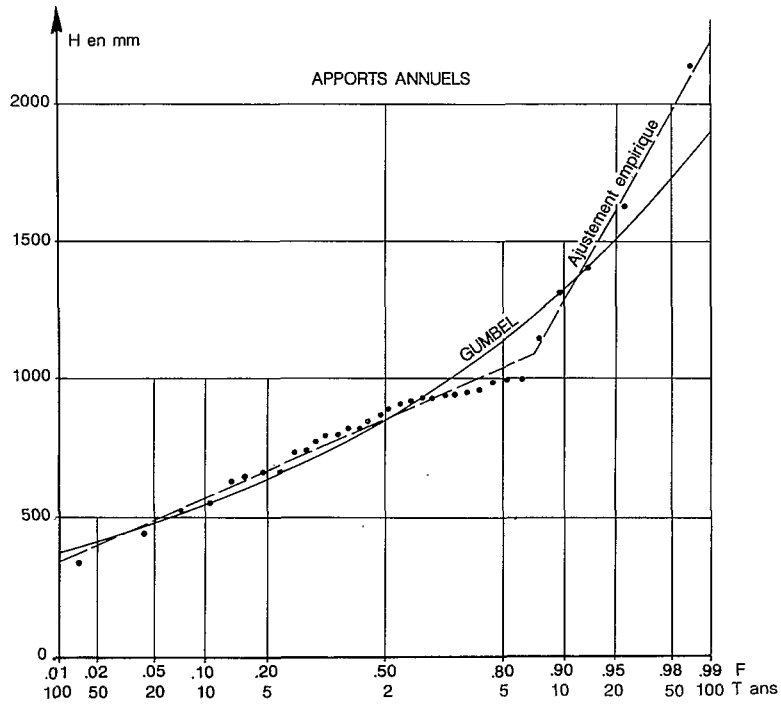
Namorona à Vohiparara

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| H mm | 400 | 490 | 570 | 670 | 850 | 1040 | 1280 | 1610 | 1970 |
| Q (m³/s) | 5.64 | 6.91 | 8.04 | 9.45 | 12.0 | 14.7 | 18.0 | 22.7 | 27.8 |
| q (l/s/km²) | 12.7 | 15.5 | 18.1 | 21.2 | 27.0 | 33.0 | 40.4 | 51.0 | 62.5 |

Centennale sèche : 340 mm (Q = 4.79 m³/s)
Centennale humide : 2 220 mm (Q = 31.3 m³/s)

figure 5.59 bis.

Namorona à Vohiparara




## 8.1.3. Crues

### 8.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

Si de légers détarages de basses eaux sont possibles, les conditions hydrauliques (faibles pentes en amont de la chute d'ANDRIAMANOVOKA) permettent l'évaluation des débits de hautes eaux suivant une formule de type $Q = m \beta 2gh$ avec $m = 0{,}0924$ mais l'extrapolation est extrêmement forte (de 3,19 à 8,65 m).

tableau 5.104.

Namorona à Vohiparara
Maximums annuels de crues

| Année | Q m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1951-52 | 54 | 20/02/52 12 h 00 | 2,35 | 3rel |
| 1952-53 | 51 | 21/06/53 12 h 00 | 2,20 | 3rel |
| 1953-54 | ≥ 357 | 15/01/54 12 h 00 | 5,00 | Min |
| 1954-55 | 46 | 29/03/55 12 h 00 | 2,10 | 3rel |
| 1955-56 | 212 | 28/01/56 12 h 00 | 4,00 | 3rel |
| 1956-57 | 54 | 24/01/57 06 h 00 | 2,25 | 3rel |
| 1957-58 | 155 | 05/03/58 18 h 00 | 3,50 | 3rel |
| 1958-59 | 470 | 29/03/59 06 h 00 | 5,60 | PHE |
| 1959-60 | 33 | 31/12/59 18 h 00 | 1,82 | 3rel |

suite

| Année | Q m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1960-61 | 71 | 19/03/61 06 h 00 | 2,62 | 3rel |
| 1961-62 | 112 | 22/02/62 12 h 00 | 3,15 | 3rel |
| 1962-63 | 210 | 18/02/63 12 h 00 | 4,09 | 3rel |
| 1963-64 | 69 | 10/03/64 12 h 00 | 2,59 | 3rel |
| 1964-65 | 126 | 23/01/65 18 h 00 | 3,30 | 3rel |
| 1965-66 | 31 | 11/01/66 06 h 00 | 1,86 | 3rel |
| 1966-67 | 46 | 21/12/66 18 h 00 | 2,20 | 3rel |
| 1967-68 | 42 | 19/02/68 12 h 00 | 2,12 | 3rel |
| 1968-69 | 357 | 05/02/69 12 h 00 | 5,10 | PHE |
| 1969-70 | 1100 | 23/02/70 12 h 00 | 8,65 | PHE |
| 1970-71 | 116 | 02/02/71 18 h 00 | 3,20 | 3rel |
| 1971-72 | 257 | 15/02/72 06 h 00 | 4,45 | 3rel |
| 1972-73 | 101 | 21/02/73 12 h 00 | 3,02 | 3rel |
| 1973-74 | 84 | 30/12/73 12 h 00 | 2,80 | 3rel |
| 1974-75 | 62 | 14/03/75 06 h 00 | 2,47 | 3rel |
| 1975-76 | 48 | 30/12/75 06 h 00 | 2,24 | 3rel |
| 1976-77 | 263 | | 4,50 | 3rel |
| 1977-78 | 27 | | 1,76 | 3rel |
| 1978-79 | 76 | | 2,69 | 3rel |

### 8.1.3.2. Résultats de l'enquête historique

Tant les résultats de l'enquête sur le terrain (mars 1970 - VOHIPARARA-RANOMAFANA) que la consultation des archives (Travaux publics) indiquent :

- qu'une crue de moindre ampleur que celle de 1969-70 (de l'ordre de 7,00 m) s'est produite en 1928 (arrachement des travées du pont de VOHIPARARA le 25/02/1928)

- que la crue de 1944-45 se situe entre les maximums de 1927-28 et 1958-59.

En l'absence d'éléments plus précis, les maximums des années 1969-70, 1927-28, 1944-45 et 1958-59 peuvent être considérés comme les plus importants de la période 1926-79.

Le débit maximal de janvier 1954 est évalué par défaut.

1959 cyclone MANANARA nord
1969 cyclone DANY
1970 cyclone JANE

Une année sur deux, le maximum est observé entre la mi-janvier et le 22 février (date médiane : 5 février - dates extrêmes : 21 décembre et 21 juin).

L'ajustement d'une loi de Galton à l'échantillon de 28 crues observées (1952-79) et la prise en compte des données historiques pour l'évaluation des crues de forte récurrence correspond aux quantiles suivants :

tableau 5.105.

Namorona à Vohiparara
Débits maximaux de crue

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 86 | 216 | 372 | (1000) | (1450) |
| avec infrm.historique | | | | 860 | 1100 |
| q l/s/km² | 193 | 485 | 835 | 1930 | 2470 |

## 8.1.4. Basses eaux

En dépit des fortes précipitations de saison sèche, qui six années sur vingt-huit ne permettent pas d'adapter aux débits de base une droite de tarissement, il est possible d'adapter aux débits de basses eaux un faisceau de droites dont les pentes $\alpha$ sont comprises entre .0088 et .0039 (50 % des valeurs comprises entre .0074 et .0049).

Le coefficient $\alpha$ est assez bien corrélé au débit initial de base Qo (compris entre 3.4 et 15 7 m³/s avec la moitié de l'échantillon comprise entre 6 et 8.5 m³/s) qui apparaît entre la mi-mai et la mi-juin.

$\alpha = (3.64\ Qo + 31) * 10^{-4}$ $(R^2 = .74$ $P > .995)$

Les valeurs médianes (Qo = 8 m³/s, $\alpha$ = .0062, Tc = 112 jours) correspondent à une lame stockée en fin mai de 250 mm (111. $10^6$ m³) (graphe 5.60.).

figure 5.60.

Namorona à Vohiparara

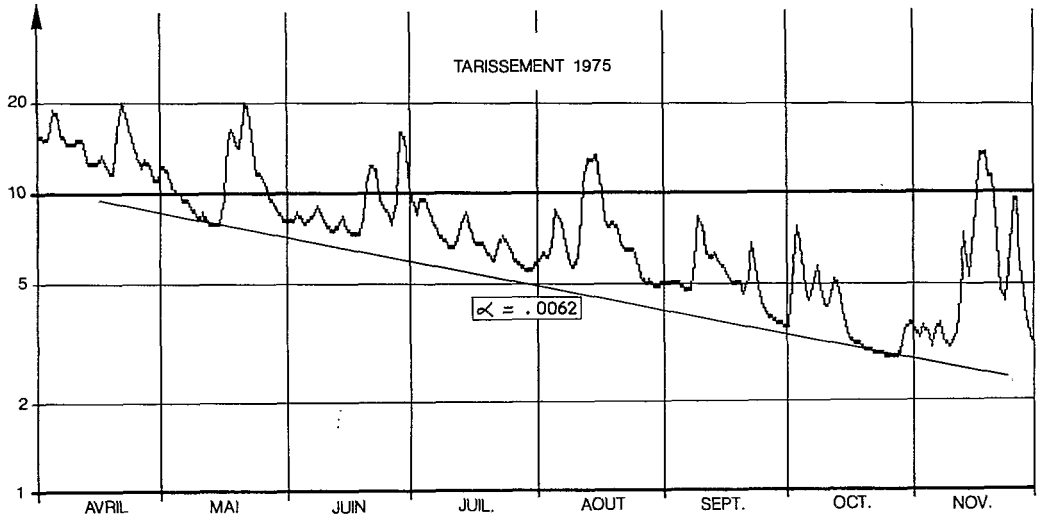


tableau 5.106.

Namorona à Vohiparara
Débits d'étiage ($m^3/s$)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1952 | 8.30 | 5.67 | 4.38 | 3.91 | 01-11 |
| 1953 | 9.62 | 7.61 | 5.81 | 4.92 | 23-11 |
| 1954 | 8.07 | 4.87 | 3.69 | 3.17 | 10-11 |
| 1955 | 5.53 | 3.35 | 2.92 | 2.42 | 18-11 |
| 1956 | 5.13 | 3.36 | 2.63 | 2.40 | 05-11 |
| 1957 | 5.93 | 3.46 | 2.98 | 2.58 | 26-11 |
| 1958 | 7.54 | 4.71 | 3.14 | 2.81 | 05-12 |
| 1959 | 7.79 | 5.51 | 4.50 | 3.16 | 11-12 |
| 1960 | 3.30 | 2.46 | 1.83 | 1.67 | 17-11 |
| 1961 | 3.74 | 3.07 | 2.76 | 2.49 | 02-11 |
| 1962 | 5.25 | 3.52 | 3.08 | 2.56 | 02-11 |
| 1963 | 6.69 | 4.61 | 3.67 | 3.05 | 26-10 |
| 1964 | 4.89 | 3.67 | 3.20 | 2.96 | 23-11 |
| 1965 | 9.43 | 6.93 | 4.76 | 4.21 | 21-11 |
| 1966 | 5.14 | 3.44 | 2.67 | 2.38 | 06-12 |
| 1967 | 8.48 | 7.12 | 5.92 | 4.36 | 14-11 |
| 1968 | 4.61 | 3.03 | 2.74 | 2.52 | 11-11 |
| 1969 | 6.54 | 3.94 | 3.15 | 2.86 | 23-11 |
| 1970 | 8.96 | 5.49 | 4.70 | 4.05 | 15-12 |
| 1971 | 5.56 | 4.05 | 3.53 | 3.21 | 09-10 |
| 1972 | 4.79 | 3.74 | 3.15 | 2.69 | 13-12 |
| 1973 | 6.67 | 4.20 | 3.49 | 3.20 | 02-11 |
| 1974 | 6.08 | 4.00 | 3.34 | 3.01 | 04-12 |
| 1975 | 5.54 | 3.33 | 2.96 | 2.82 | 26-10 |
| 1976 | 4.66 | 3.13 | 2.83 | 2.54 | 27-11 |
| 1977 | | | | 3.04 | 05-11 |
| 1978 | | | | 1.40 | 11-10 |
| 1979 | | | | 2.16 | 02-11 |

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 9.62 | 7.61 | 5.92 | 4.92 | 22-12 |
| Q1 | 7.93 | 5.18 | 4.04 | 3.19 | 28-11 |
| Méd. | 5.93 | 3.94 | 3.15 | 2.81 | 18-11 |
| Q3 | 5.01 | 3.35 | 2.87 | 2.50 | 02-11 |
| Min. | 3.30 | 2.46 | 1.83 | 1.40 | 09-10 |

DCE = 1.29 QJmin - 39 ($R^2$ = .93 P > .995) DCE/QJmin = 1.15
DC11 = 1.75 QJmin - 98 ($R^2$ = .90 P > .995) DC11/QJmin = 1.40
DC9 = 2.12 QJmin - 12 ($R^2$ = .79 P > .995) DC9/QJmin = 2.08

QJmin = .206 Q 0809 + 1.4 ($R^2$ = .67 P > .995)

L'ajustement statistique sur les vingt-huit valeurs (QJmin) observées fournit les quantiles suivants :

tableau 5.107.

Namorona à Vohiparara
QJmin

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q (m³/s) | 1.81 | 2.01 | 2.28 | 2.86 | 3.54 | 3.94 | 4.29 |
| q (l/s/km²) | 4.1 | 4.5 | 5.1 | 6.4 | 8.0 | 8.8 | 9.6 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 5.64, échelle : 3.95 m³/s, position : - 1.09 m³/s, forme : .188).
Cinquantennales sèche et humide : 1.59 m³/s (3.6 l/s/km²) et 4.72 m³/s (10.6 l/s/km²).

### 8.1.5. Bilan hydrologique

La pluviométrie moyenne interannuelle sur le bassin a été évaluée à 2 000 mm. Pour une lame moyenne interannuelle de 895 mm, le déficit d'écoulement est de l'ordre de 1 100 mm et le coefficient d'écoulement de 45 %.

# 9. BASSIN DU FARAONY

Le bassin du FARAONY, situé entre ceux de la NAMORONA et de la MATITANANA, est issu de la falaise orientale (TANALA) et repose sur les formations cristallines du socle (gneiss, micaschistes et migmatites du système du graphite) profondément altérés en latérites ferralli-tiques jaune sur rouge.

La forêt dense ombrophile, présente sur les contreforts de la falaise, est en voie de dégradation et la majeure partie du bassin est le domaine de la "savoka", forêt dégradée par défrichement.

## 9.1. Le Faraony à Vohilava

La station de VOHILAVA (21°46'S - 47°55'E), à l'altitude voisine de 8 m, est située un peu en amont du bac de la route IFANADIANA-MANAKARA, sur le FARAONY. Le bassin contrôlé a une superficie de 2 005 km².

Une première échelle, située en amont à SAHASINAKA, a été installée en décembre 1955, détruite en mars 1956, réinstallée en juin 1956 et endommagée en janvier 1959.

L'échelle de VOHILAVA, mise en place en juin 1960, a été suivie jusqu'en février 1976.

En raison du faible nombre de mesures de débit à SAHASINAKA, les relevés de hauteurs de cette station, d'ailleurs incomplets, n'ont pas été traduits en débits. A VOHILAHAVA, nous disposons de quarante trois mesures de débit (entre 24.8 et 593 m³/s). Ces jaugeages ont permis de tracer deux courbes d'étalonnage (1960-70 et 1970-76) extrapolées jusqu'à 1 750 m³/s pour les moyennes eaux.

Après complètement des lacunes journalières, nous disposons des débits journaliers de septembre 1960 à février 1976.

La pluviométrie sur le bassin a été évaluée (THIESSEN) à partir de dix postes, assez bien répartis, mais situés généralement en altitude moyenne.

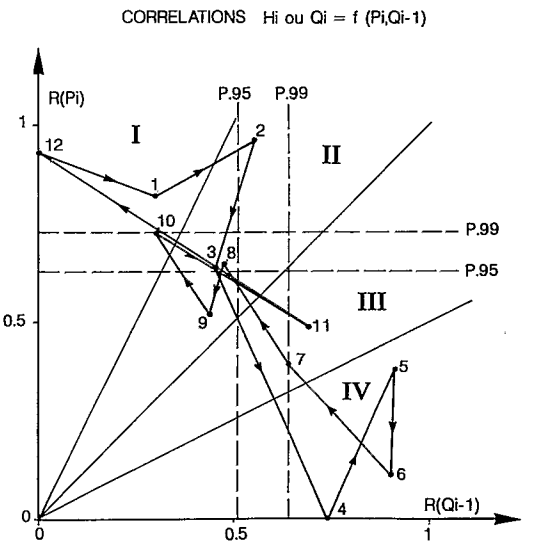
AMPAMAHERENA (poids : .13), ANDRAMBANVATO (.16), AMBINANY (.15), FORT-CARNOT (.08), MAHABAKO (.14), FENOMBY (.08), SAHASINAKA (.10), etc.

La pluviométrie ainsi déterminée (2 550 mm en moyenne interannuelle) est sous-estimée et d'après les isohyètes, nous l'avons évaluée à environ 3 000 mm (coefficient de correction des précipitations mensuelles : 1.20).

## 9.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

figure 5.61.

Faraony au bac de Vohilava




Le schéma (graphe 5.61.) est typique d'un bassin du versant oriental : nette prépondérance des précipitations du mois, avec influence du débit antérieur, pour la saison décembre-mars, influence prioritaire des forts débits antérieurs, masquant celle des précipitations pourtant encore fortes d'avril à juin, poids équivalent des précipitations du mois et des débits antérieurs, de juillet à novembre.

tableau 5.108.

Faraony au bac de Vohilava
Coefficients de corrélation mensuels

| Hi ouQi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | (.49) | .93 | .82 | .96 | .64 | (-.07) | (.38) | (.11) | (.39) | .65 | (.52) | .73 |
| Pi-1 | .69 | (-.24) | (.30) | (.30) | (.53) | (.57) | (-.11) | (.42) | (-.14) | (.52) | .91 | .82 |
| Qi-1 | .69 | (-.17) | (.30) | .55 | (.45) | .74 | .91 | .90 | .64 | (.47) | (.44) | (.30) |

nota : .93 (P > .99) .64 (P > .95) (.53) (P < .95)

tableau 5.109.

Faraony à Vohilava
Régressions
hydropluviométriques

| | | |
|---|---|---|
| Décembre à mars | $Hi = .555\ Pi + .23\ Pi\text{-}1 - 107$ | ($R^2 = .73$ P > .995) |
| Avril à juillet | $Hi = .49\ H_{i-1} + .16\ Pi + 16.6$ | ($R^2 = .86$ P > .995) |
| Août à novembre | $Hi = .40\ H_{i-1} + .17\ Pi + 19.6$ | ($R^2 = .58$ P > .995) |

tableau 5.110.

Débits moyens
mensuels et annuels

Station : 1252400115 Bac de Vohilava
Rivière : Faraony
Pays : Madagascar
Bassin : Faraony
Débits en m³/s

Latitude : 21.30.00
Longitude : 47.30.00
Aire : 2005 km²

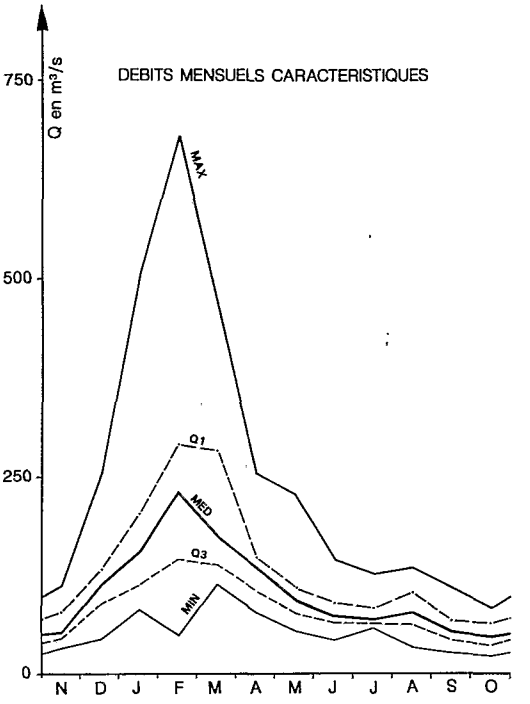
| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1959-60 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 37.4 | 30.3 | - |
| 1960/61 | 30.9 | 63.3 | 122 | 49.5 | 111 | 76.7 | 53.7 | 46.6 | 74.5 | 93.1 | 58.7 | 37.4 | 68.4 |
| 1961/62 | 43.1 | 255 | 218 | 219 | 184 | 118 | 109 | 73.4 | 61.7 | 70.7 | 42.6 | 46.3 | 120 |
| 1962/63 | 52.0 | 77.6 | 163 | 260 | 139 | 118 | 82.8 | 94.8 | 69.3 | 51.1 | 38.7 | 29.0 | 96.9 |
| 1963/64 | 83.3 | 110 | 80.3 | 152 | 150 | 86.9 | 63.2 | 64.6 | 68.8 | 112 | 44.0 | 82.2 | 91.3 |
| 1964/65 | 86.3 | 113 | 430 | 255 | 383 | 217 | 125 | 84.0 | 125 | 130 | 91.1 | 66.0 | 175 |
| 1965/66 | 72.9 | 128 | 86.2 | 84.7 | 133 | 103 | 86.5 | 78.2 | 59.8 | 62.4 | 55.4 | 36.9 | 82.3 |
| 1966/67 | 45.8 | 222 | 155 | 100 | 173 | 133 | 90.5 | 62.7 | 69.5 | 92.0 | 100 | 72.5 | 110 |
| 1967/68 | 111 | 120 | 98.6 | 138 | 158 | 84.0 | 56.2 | 43.1 | 57.8 | 33.6 | 25.7 | 21.3 | 78.8 |
| 1968/69 | 46.8 | 96.7 | 116 | 611 | 137 | 146 | 89.4 | 71.6 | 65.5 | 101 | 57.2 | 36.3 | 128 |
| 1969/70 | 51.6 | 208 | 506 | 677 | 476 | 255 | 227 | 144 | 123 | 98.7 | 68.2 | 50.8 | 238 |
| 1970/71 | 53.0 | 44.4 | 220 | 403 | 129 | 108 | 75.5 | 72.7 | 78.8 | 67.3 | 108 | 38.2 | 114 |
| 1971/72 | 66.3 | 120 | 114 | 281 | 411 | 141 | 92.9 | 66.4 | 70.0 | 71.6 | 41.9 | 72.9 | 129 |
| 1972/73 | 81.0 | 81.3 | 190 | 302 | 278 | 142 | 101 | 89.5 | 82.8 | 133 | 66.1 | 46.6 | 132 |
| 1973/74 | 44.1 | 134 | 111 | 222 | 208 | 227 | 141 | 89.6 | 125 | 77.4 | 50.9 | 48.6 | 123 |
| 1974/75 | 48.1 | 104 | 158 | 237 | 285 | 147 | 100 | 77.1 | 64.0 | 61.2 | 52.8 | 57.4 | 115 |
| 1975/76 | 75.3 | 106 | 155 | 181 | - | - | - | - | - | - | - | - | |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Moyenne | 62.0 | 124 | 183 | 261 | 224 | 140 | 99.6 | 77.2 | 79.7 | 83.7 | 58.7 | 48.3 | 119 |
| Ecart-type | 21.2 | 57.6 | 120 | 175 | 116 | 53.6 | 42.5 | 23.6 | 24.0 | 28.3 | 23.3 | 17.6 | |
| Max. | 111 | 255 | 506 | 677 | 476 | 255 | 227 | 144 | 125 | 133 | 108 | 82.2 | |
| Q1 | 78.2 | 131 | 204 | 292 | 285 | 147 | 109 | 89.5 | 82.8 | 101 | 67.2 | 61.7 | |
| Méd. | 52.5 | 112 | 155 | 230 | 173 | 133 | 90.5 | 73.4 | 69.5 | 77.4 | 54.1 | 46.5 | |
| Q3 | 46.3 | 89.0 | 112 | 145 | 137 | 103 | 75.5 | 64.6 | 64.0 | 62.4 | 42.2 | 36.6 | |
| Min. | 30.9 | 44.4 | 80.3 | 49.5 | 111 | 76.7 | 53.7 | 43.1 | 57.8 | 33.6 | 25.7 | 21.3 | |

figure 5.62.

Faraony au bac de Vohilava




Les quantiles caractéristiques des débits mensuels sont représentés sur le graphe 5.62.

Deux hydrogrammes en année humide (1964-65, Q = 175 m³/s) et sèche (1960-61, Q = 68.4 m³/s) sont représentés (graphe 5.63. et 5.64.).

figure 5.63.

Faraony au bac de Vohilava

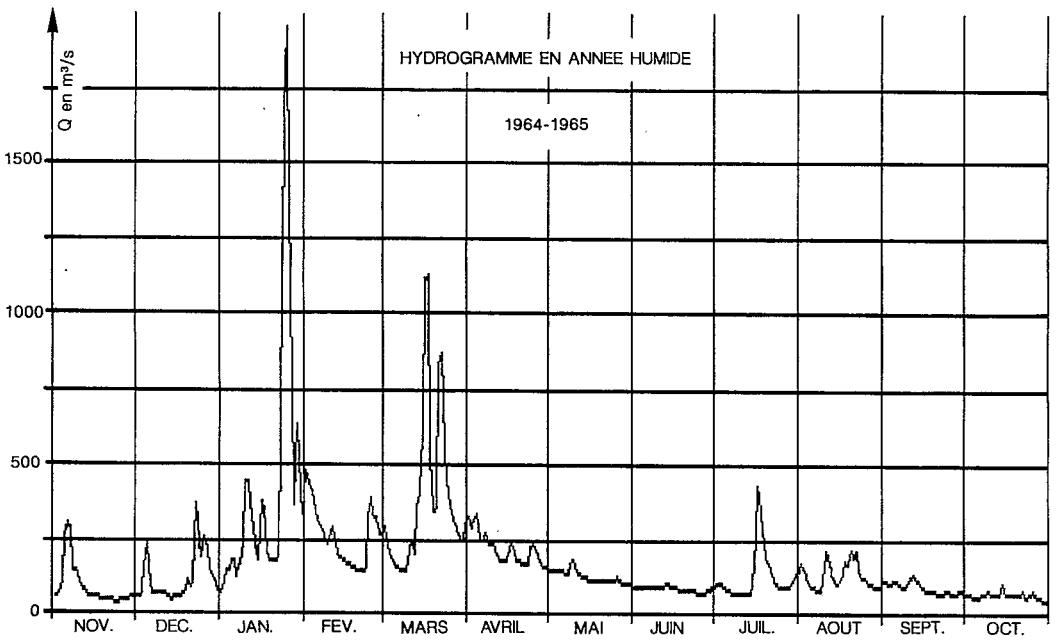
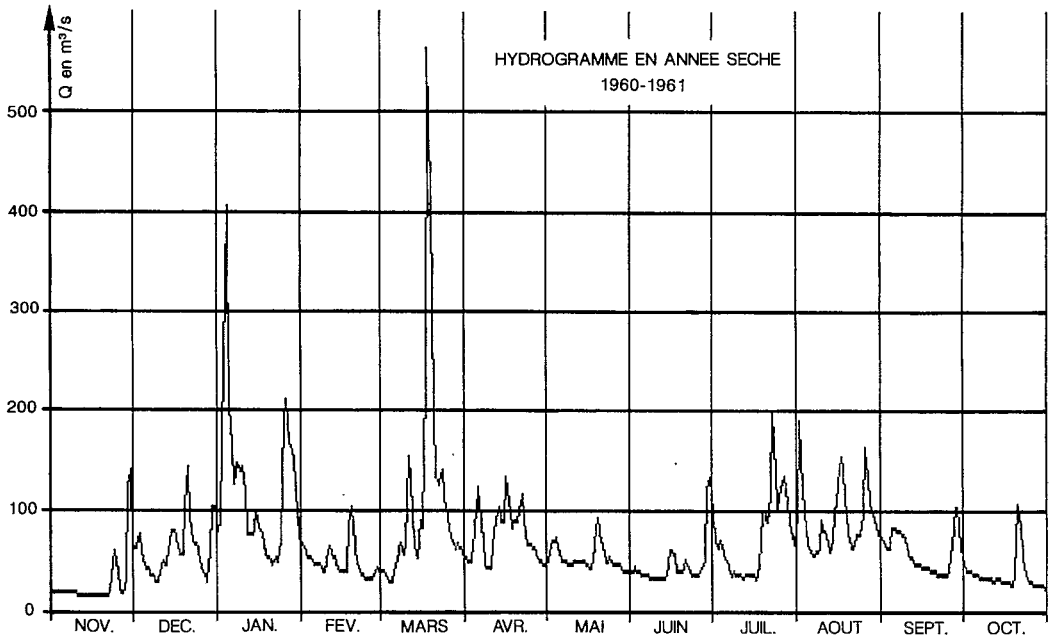



figure 5.64.

Faraony au bac de Vohilava



## 9.1.2. Apports annuels

Les lames écoulées annuelles présentent avec la pluviométrie annuelle sur le bassin et les lames du bassin voisin de la NAMORONA, les régressions suivantes :

$H = .66 (P - 250)$ $(R^2 = .41 \quad P > .975)$

$H = .61 P^{.84} * e^{8.8 KP}$ $(R^2 = .82 \quad P > .995)$

où KP est un indice de concentration des pluies mensuelles de saison des pluies tenant compte de l'effet cumulé (saturation des sols) :

$KP = (P12 + (P01P12)^{1/2} + (P02P01)^{1/2} + (P03P02)^{1/2}) / 4$ P an. (KP = .144)

Les valeurs maximale et minimale de KP sont respectivement de .186 et .109.

$H_{FARA} = 1.665 H_{NAMO} + 371$ $(R^2 = .87 \quad P > .995)$

Ces régressions ont permis d'évaluer les apports annuels de la période 1948-60 et de 1975-76 à 1978-79.

| Années | 48-49 | 49-50 | 50-51 | 51-52 | 52-53 | 53-54 | 54-55 | 55-56 | 56-57 | 57-58 | 58-59 | 59-60 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H mm | 1420 | 2005 | 1780 | 1660 | 1825 | 2605 | 1550 | 2135 | 1795 | 1950 | 3065 | 1145 |
| Q m³/s | 90.3 | 127 | 113 | 105 | 116 | 166 | 98.5 | 135 | 114 | 124 | 195 | 72.6 |
| Années | 75-76 | 76-77 | 77-78 | 78-79 | | | | | | | | |
| H mm | 1665 | 2055 | 915 | 1095 | | | | | | | | |
| Q m³/s | 106 | 131 | 58.2 | 69.6 | | | | | | | | |

1948-49 à 1950-51 d'après P et KP, autres années d'après NAMORONA.

Les quantiles des apports annuels calculés d'après l'ajustement statistique effectué sur l'échantillon de trente et une valeurs annuelles observées et calculées sont les suivants :

tableau 5.111.

Faraony au bac de Vohilava

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| H mm | 960 | 1081 | 1200 | 1363 | 1745 | 2260 | 2600 | 2927 | 3350 |
| Q (m³/s) | 61.0 | 68.7 | 76.2 | 86.6 | 111 | 144 | 165 | 186 | 213 |
| q (l/s/km²) | 30.4 | 34.3 | 38.0 | 43.2 | 55.4 | 71.8 | 82.3 | 92.8 | 106 |

Loi de Gumbel (test Brunet-Moret : 4.06, échelle : 454 mm, position : 1 578 mm).

Centennales sèche et humide : 886 mm (56.3 m³/s) et 3667 mm (233 m³/s).

## 9.1.3. Crues

### 9.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

Si la station peut présenter une certaine instabilité en basses eaux (détarage constaté jusqu'au 08/12/1971 suite à la crue du 23/02/1970 - cyclone Jane), les mesures réalisées entre 2,72 m (Q = 306 m³/s) et 4,10 m (Q = 593 m³/s) permettent d'adopter une seule courbe d'étalonnage de moyennes et de hautes eaux.

L'extrapolation de type logarithmique menée à partir de cette courbe est malheureusement très forte (de 593 à 3 800 m³/s).

tableau 5.112.

Faraony à Vohilava
Maximums annuels de crues

| Année | Q m³/s | Date | | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1958-59 | 2240 | 29/03/59 | | 9,97 | PHE |
| 1959-60 | | | | | |
| 1960-61 | 825 | 18/03/61 | 12 h 00 | 5,10 | 3rel |
| 1961-62 | 1040 | 30/12/61 | 12 h 00 | 5,95 | 3rel |
| 1962-63 | ≥ (1050) | 21/02/63 | 18 h 00 | 6,00 | Min |
| 1963-64 | 583 | 12/02/64 | 18 h 00 | 4,13 | 3rel |
| 1964-65 | (2000) | 24/01/65 | | | |
| 1965-66 | 384 | 11/01/66 | 06 h 00 | 3,15 | 3rel |
| 1966-67 | ≥ (1050) | 29/12/66 | 18 h 00 | 6,00 | Min |
| 1967-68 | 692 | 09/03/68 | 18 h 00 | 4,58 | 3rel |
| 1968-69 | 2650 | 05/02/69 | 12 h 00 | 11,20 | 3rel |
| 1969-70 | 3800 | 23/02/70 | 12 h 00 | 14,20 | 3rel |
| 1970-71 | 2220 | 02/02/71 | 18 h 00 | 9,92 | 3rel |
| 1971-72 | 1210 | 15/02/72 | 18 h 00 | 6,58 | 3rel |
| 1972-73 | 1020 | 21/02/73 | 06 h 00 | 5,87 | 3rel |
| 1973-74 | 560 | 30/12/73 | 18 h 00 | 4,03 | 3rel |
| 1974-75 | 875 | 15/03/75 | 06 h 00 | 5,30 | 3rel |
| 1975-76 | 433 | 23/01/76 | 06 h 00 | 3,43 | Min |

### 9.1.3.2. Résultats de l'enquête historique

Plusieurs échelles ont été suivies sur le FARAONY entre 1927 et 1959, sur un site plus amont (SAHASINAKA - A = 1 845 km²).

Malgré un faible nombre de jaugeages essentiellement de basses eaux, l'évaluation des débits de très hautes eaux a été permise après :

- l'établissement d'une courbe de tarage pour SAHASINAKA de 1954 à 1959, en admettant la conservation des débits entre SAHASINAKA et VOHILAVA (PHE 1958-59 connues aux deux stations),

- recalage de l'ancienne échelle, en s'appuyant sur les jaugeages de la période 1929-1931.

| Année | Q m³/s | Sahasinaka Échelle 1 | Sahasinaka Échelle 2 | Vohilava | Obs. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1927-28 | 3000 | | 16,00 | | PHE |
| 1929-30 | 850 | 6,00 | | | Mln |
| 1930-31 | 740 | 5,40 | | | |
| 1931-32 | 950 | 6,50 | | | |
| 1932-33 | 800 | 5,70 | | | |
| 1933-34 | 1570 | 9,60 | | | |
| 1944-45 | 4500 | | 21,52 | | PHE |
| 1955-56 | 970 | | 7,00 | | |
| 1956-57 | 970 | | 7,00 | | |
| 1957-58 | 1060 | | 7,50 | | |
| 1958-59 | 2240 | | 12,90 | 9,97 | PHE |

En l'absence d'autres éléments, les maximums annuels de 1944-45, 1969-70 et 1927-28 peuvent être considérés comme les plus importants de la période 1926-1976.

Nota : les débits de 1963, 1965 et 1967 sont estimés (lacunes) :

1959 cyclone MANANARA nord
1965 dépression IRIS
1969 cyclone DANY
1970 cyclone JANE
1971 cyclone FELICIE

La crue de 1960, non observée, pourrait être de l'ordre de 800 m³/s.

L'ajustement d'une loi de Fréchet, pour les récurrences inférieures à la cinquantenale et d'une distribution empirique à partir de l'information historique pour les récurrences plus rares correspond aux quantiles suivants :

tableau 5.113.

Faraony à Vohilava
Débits maximaux annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 995 | 1650 | 2260 | (4290) | (5550) |
| linfrm.histor. (50 années) | | | | 4150 | 5100 |
| q l/s/km² | 500 | 820 | 1130 | 2070 | 2540 |

## 9.1.4. Basses eaux

Le tarissement est perturbé par de fortes précipitations de saison "sèche" en 1961, 64, 65, 70. Pour les autres années, il est possible d'adapter une droite enveloppe aux débits de base entre mai et novembre.

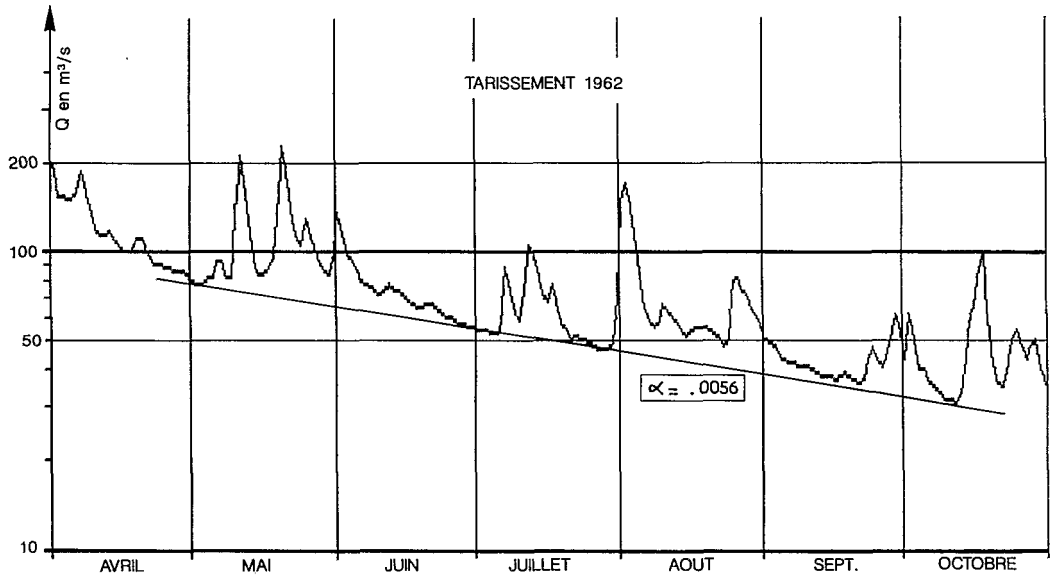
Le débit de base initial est observé en mai ou juin, et est compris généralement entre 50 et 80 m³/s. Les coef-

ficients de la droite de tarissement sont compris entre .0052 et .0078 (50 % des valeurs entre .0055 et .0065) (cf. graphe 5.65.).

$\alpha$ médian = .0059 (Tc = 117 jours).

figure 5.65.

Faraony au bac de Vohilava




Les réserves drainables représentent en moyenne 800.106 m³ (lame équivalente 400 mm) en fin mars.

tableau 5.114.

Faraony au bac de Vohilava
Débits caractéristiques d'étiage (m³/s)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1956 | | | | (21.4) | 05-11 |
| 1957 | | | | (25.4) | 26-11 |
| 1958 | | | | (28.3) | 07-12 |
| 1960 | 36.3 | 24.1 | 18.0 | 15.9 | 18-11 |
| 1961 | 39.3 | 32.5 | 26. | 22.5 | 03-11 |
| 1962 | 50.5 | 37.9 | 33.5 | 30.9 | 12-10 |
| 1963 | 54.0 | 33.2 | 27.6 | 23.9 | 27-10 |
| 1964 | 52.5 | 42.2 | 37.4 | 31.8 | 28-09 |
| 1965 | 82.3 | 62.7 | 47.1 | 41.0 | 21-11 |
| 1966 | 44.4 | 28.1 | 23.4 | 21.4 | 15-12 |
| 1967 | 66.6 | 53.0 | 50.1 | 46.1 | 09-10 |
| 1968 | 34.2 | 21.5 | 19.0 | 17.2 | 22-10 |
| 1969 | 55.6 | 34.7 | 29.1 | 24.6 | 04-11 |

suite

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1970 | 64.3 | 36.6 | 32.4 | 28.1 | 16-12 |
| 1971 | 65.1 | 35.9 | 28.8 | 24.7 | 02-11 |
| 1972 | 57.3 | 41.4 | 34.1 | 29.8 | 09-10 |
| 1973 | 63.4 | 41.3 | 36.1 | 30.2 | 20-12 |
| 1974 | 59.0 | 40.4 | 31.8 | 24.9 | 03-12 |
| 1975 | 56.3 | 41.7 | 34.0 | 22.5 | 25-10 |
| Max. | 82.3 | 62.7 | 50.1 | 46.1 | 20-12 |
| Q1 | 63.9 | 41.6 | 35.1 | 30.2 | 03-12 |
| Méd. | 56.0 | 37.3 | 32.1 | 24.9 | 04-11 |
| Q3 | 47.5 | 32.9 | 26.8 | 22.5 | 21-10 |
| Min. | 34.2 | 21.5 | 18.0 | 15.9 | 28-09 |

DCE = 1.06 QJmin + 3.0 ($R^2$ = .93 P > 995) DCE/QJmin = 1.18
DC11 = 1.15 QJmin + 6.7 ($R^2$ = .81 P > 995) DC11/QJmin = 1.42
DC9 = 1.20 QJmin + 22.3 ($R^2$ = .58 P > 995) DC9/QJmin = 2.09

Le débit d'étiage est lié au débit moyen mensuel d'août et septembre et à l'intervalle en jours T séparant le 30 septembre de la date d'observation du débit minimal par la régression :

$QJmin = 2.09\ Q\ 0809^{.64} * e^{-T/250}$ ($R^2$ = .72 P > .995)

L'ajustement statistique effectué sur l'échantillon de dix-neuf valeurs du débit minimal journalier fournit les quantiles suivants :

tableau 5.115.

Faraony au bac de Vohilava

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q ($m^3/s$) | 17.6 | 19.0 | 21.0 | 25.7 | 32.0 | 36.2 | 40.2 |
| q ($l/s/km^2$) | 8.8 | 9.5 | 10.5 | 12.8 | 16.0 | 18.1 | 20.1 |

Loi de GUMBEL (test Brunet-Moret : 2.29, échelle : 5.56 $m^3/s$, position : 23.7 $m^3/s$).
Cinquantennales sèche et humide : 16.1 $m^3/s$ (8.0 $l/s/km^2$) et 45.4 $m^3/s$ (22.6 $l/s/km^2$).

## 9.1.5. Bilan hydrologique

La pluviométrie moyenne interannuelle sur le bassin étant estimée à 3 000 mm, la lame écoulée moyenne (1 840 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 1 160 mm (Ke = 61 %).

Les termes du bilan (tableau 5.116. et graphe 5.66.) permettent les constatations suivantes :

figure 5.66.

Faraony au bac de Vohilava

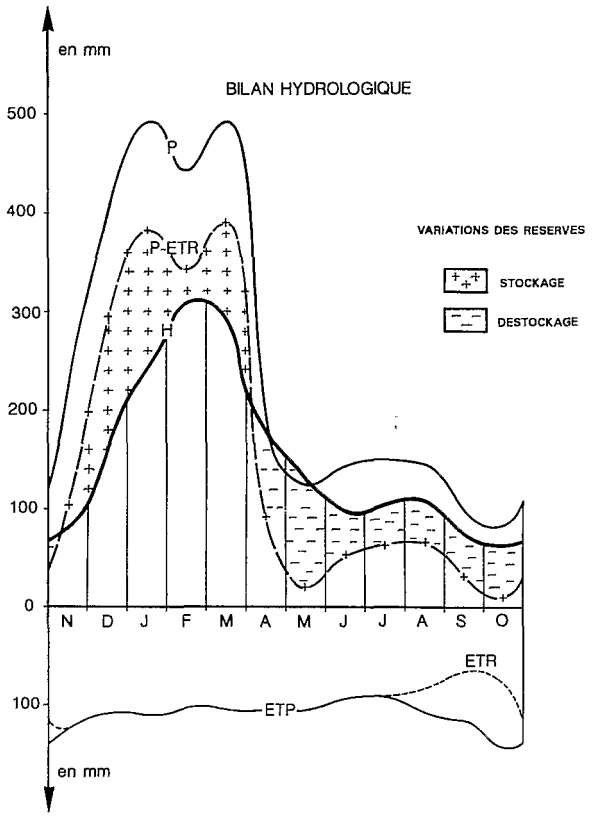



tableau 5.116.

Faraony au bac de Vohilava

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 227 | 401 | 492 | 442 | 495 | 185 | 127 | 147 | 151 | 149 | 98 | 86 | 3000 |
| ETP | 123 | 107 | 110 | 100 | 105 | 103 | 105 | 93 | 89 | 107 | 116 | 142 | 1300 |
| ETR | 123 | 107 | 110 | 100 | 105 | 103 | 105 | 93 | 89 | 82 | 66 | 77 | 1160 |
| P-ETR | 104 | 294 | 382 | 342 | 390 | 82 | 22 | 54 | 62 | 67 | 32 | 9 | 1840 |
| H | 78 | 162 | 240 | 312 | 293 | 177 | 130 | 98 | 104 | 109 | 74 | 65 | 1840 |
| ΔR+ | 26 | 132 | 142 | 30 | 97 | | | | | | | | + 427 |
| ΔR- | | | | | | 95 | 108 | 44 | 42 | 42 | 42 | 54 | - 427 |
| R | 26 | 158 | 300 | 330 | 427 | 332 | 224 | 180 | 138 | 96 | 54 | 0 | |

De novembre à avril (saison des pluies), les précipitations cumulées (2 242 mm soit 75 % du total annuel) satisfont entièrement les besoins en évapotranspiration (ETP = ETR = 648 mm) et nourrissent les écoulements par

ruissellement direct (sols saturés) et drainage intermensuel des aquifères. Les lames écoulées cumulées de la période représentent 1 262 mm (soit 69 % de la lame annuelle). Le reliquat des précipitations est stocké dans les nappes d'altérites (et en début de période en reconstituant à saturation la réserve utile des sols). Les réserves stockées atteignent 427 mm en fin mars et commencent à décroître en avril (- 95 mm).

De mai à octobre, l'ETR égale à l'ETP jusqu'en juillet, est réduite (d'environ 140 mm) pendant les trois derniers mois.

Les lames écoulées (578 mm) sont alimentées à raison de 60 % à partir des réserves et 40 % à partir des précipitations qui marquent une recrudescence en juillet et août (tendance pseudo-équatoriale de la côte Est). la lame stockée déterminée à partir de Qo et $\alpha$ (400 mm) correspond à la situation de début avril.

## 9.2. Bassins au sud du Faraony

### 9.2.1. La Matitanana à Mahasoabe

Le bassin de la MATITANANA, situé entre ceux du FARAONY au nord et de la MANAMPATRANA au sud, draine sur la cote est, le versant oriental de l'ANDRINGITRA et de son extension nord-est. La station de MAHASOABE (près d'ANDEMAKA) a pour coordonnées : 47°45'E et 22°16'22"S. Le bassin contrôlé a une superficie de 3 925 km².

Une enquête de crue réalisée en juillet 1971 a permis de retrouver 300 m en amont de l'échelle, des repères (CAIC) de plus hautes eaux pour la période 1939-73.

Le même étalonnage (avec extrapolation logarithmique au-delà de la cote 4,42 m) a été adopté sur cette station amont afin d'y évaluer les débits.

Maximums de la période 1939-1973

| Année | Q m³/s | Hm | Année | Q m3/s | Hm |
|---|---|---|---|---|---|
| 1944-45 | 4100 | 12,70 | 1946-47 | 2800 | 9,80 |
| 1969-70 | 3900 | 12,30 | 1940-41 | 2700 | 9,60 |
| 1968-69 | 3900 | 12,30 | 1951-52 | 2500 | 9,10 |
| 1964-65 | 3500 | 11,40 | 1942-43 | 2500 | 9,10 |
| 1955-56 | 3300 | 11,20 | 1939-40 | 2400 | 8,90 |
| 1970-71 | 3000 | 10,40 | | | |

Un ajustement empirique, sur la période historique, permet d'évaluer les crues de diverses récurrences.

| Période de retour T (ans) | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|
| Q m³/s | 3350 | 4200 | 5250 |
| q l/s/km² | 850 | 1070 | 1340 |

# 10. BASSIN DE LA MANANARA DU SUD

La MANANARA du Sud est formée de la réunion de trois affluents principaux dont les bassins sont situés à l'ouest de la prolongation méridionale de la grande falaise orientale. Ces trois affluents dont les directions sont déterminées par les axes structuraux tectoniques sont :

- au nord, la MENARAHAKA, issue de la façade occidentale du massif d'ANDRINGITRA, et qui s'écoule d'abord vers l'ouest en direction d'IHOSY, puis, après le confluent avec le SAHAMBANO, son principal affluent rive droite, oblique vers le Sud et le Sud-Est dans la plaine de RANOTSARA ;

- au sud, l'IONAIVO qui s'écoule du sud au nord dans la vallée délimitée à l'ouest par les massifs de l'IVAKOANY et de KALAMBATITRA, à l'est par le massif de MIDONGY ;

- et à l'est de l'IONAIVO, l'ITOMAMPY, issu de la façade occidentale du massif de l'ANOSY, et qui se dirige vers le nord dans une étroite vallée en bordure orientale du massif de MIDONGY.

Les trois formateurs se réunissent peu en amont du seuil de SOAKIBANY et la MANANARA se dirige ensuite vers le sud-est et se jette dans l'Océan Indien par une plaine marécageuse près de VANGAINDRANO.

Les formations géologiques de part et d'autre de la grande faille de RANOTSARA sont représentées au sud-ouest par les leptynites accompagnées de cipolins et quartzites du système androyen et les granites de l'ANOSY et de l'IVAKOANY, au nord-est par les roches basiques du système du VOHIBORY, les granites stratoïdes de la série des TAMPOKETSA et les micaschistes, gneiss et migmatites du système du graphite. Au contact de la faille, la vallée de RANOTSARA est occupée par des formations alluviales néogènes.

À l'exception des massifs granitiques où les sols sont peu évolués, les formations cristallines du socle sont altérées en latérites ferralitiques rouge et jaune sur rouge.

Les pentes sont occupées par la forêt dense ombrophile en zones résiduelles mais la majeure partie du bassin est du domaine de la "savoka" et de la savane à aristida.

La pluviométrie du bassin, en amont du seuil de SOAKIBANY, de l'ordre de 1 100 mm en moyenne, est nettement plus faible que sur la partie orientale du bassin comprise entre 2 000 et 2 500 mm.

## 10.1. La Mananara du sud à Marangaty

La station de MARANGATY (seuil de SOAKIMBANY) dont les coordonnées sont : 22°56'S - 46°58'E, est située immédiatement en amont du seuil, à une altitude un peu inférieure à 500 m.

Le bassin versant contrôlé a une superficie de 14 160 km².

L'échelle a été installée en octobre 1955 et les observations sont continues de novembre 1955 à juin 1976. Quarante huit mesures de débit ont été effectuées à cette station entre 43.7 et 631 m³/s. La section est stable et la dispersion autour de la courbe unique d'étalonnage est assez faible. L'extrapolation vers les hautes eaux (de 700 à 3 600 m³/s) est très forte et la connaissance des débits de crue est approximative.

La pluviométrie moyenne sur le bassin (1 150 mm) est assez bien déterminée à partir de quatorze stations pluviométriques bien réparties sur le bassin.

SAKALALINA (poids : .17), IVOHIBE (.12), IAKORA (.23), LAVARATY (.10), RANOTSARA (.15), MIDONGY-Sud (.09), BEFOTAKA (.07), etc.

## 10.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

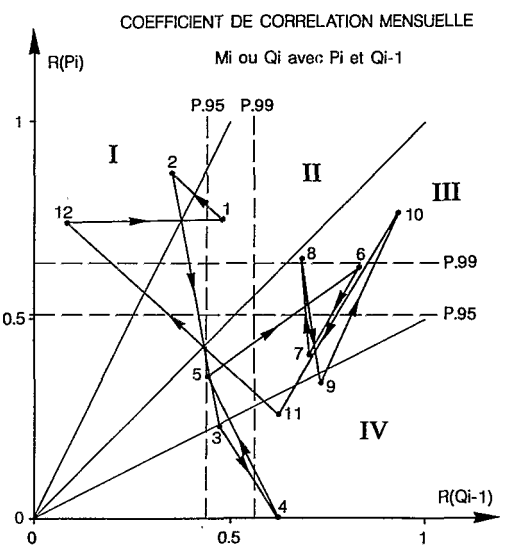
tableau 5.117.

Mananara sud à Marangaty
Coefficient de corrélation

| Hi ouQi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | (.26) | .74 | .75 | .87 | (.23) | -.11 | (.36) | .63 | (.41) | .65 | (.34) | .77 |
| Pi-1 | .63 | (.04) | .55 | .54 | (.47) | .58 | (.33) | (.20) | .76 | .58 | .70 | (.23) |
| Qi-1 | .62 | (.08) | .48 | (.35) | .47 | .62 | .44 | .83 | .70 | .68 | .73 | .93 |

figure 5.67.

Mananara du sud à Marangaty




Ces relations, représentées sur le graphe 5.67., correspondent partiellement au schéma des bassins de la côte orientale, mais avec un poids relatif moins important des réserves drainables qui sont certainement moins considérables en raison de la pluviométrie plus faible.

De décembre à janvier, prépondérance des précipitations du mois et du mois précédent. Mars a une position atypique, résultant, dans l'échantillon analysé, de crues (qui sont assez massives sur la MANANARA) à cheval sur février et mars. En avril, le poids de la précipitation du mois est "écrasé" par les forts débits de mars. Enfin de mai à novembre, les points sont regroupés dans le secteur III : influence prioritaire des débits antérieurs et influence secondaire mais forte des précipitations.

tableau 5.118.

Mananara sud à Marangaty
Régressions hydropluviométriques

| | |
|---|---|
| H11 = .74 H10 + .06 P11 + 2.5 | ($R^2$ = .62 P > .995) |
| H12 = .23 P12 + .43 P10 - 13.2 | ($R^2$ = .78 P > .995) |
| H01 = .46 P01 + .38 P12 - 94.4 | ($R^2$ = .77 P > .995) |
| H02 = .45 P02 + .26 P01 - 52.0 | ($R^2$ = .89 P > .995) |
| H03 = .39 H01 + .27 P0302 + 2.6 | ($R^2$ = .64 P > .995) |
| H04 = .38 H03 + 14.2 | ($R^2$ = .41 P > .99) |
| H05 = .27 H04 + .39 P05 + 2.3 | ($R^2$ = .61 P > .995) |
| H06 = .47 H05 + .20 P06 + 1.6 | ($R^2$ = .81 P > .995) |
| H07 = .62 H06 + .15 P07 + 2.0 | ($R^2$ = .51 P > .985) |
| H08 = .98 H07 + .27 P08 - 5.5 | ($R^2$ = .71 P > .995) |
| H09 = .69 H08 + .18 P09 - 4.7 | ($R^2$ = .74 P > .995) |
| H10 = .80 H09 + .06 P10 - 2.2 | ($R^2$ = .92 P > .995) |

Les régressions, satisfaisantes dans l'ensemble, n'ont pas permis (en l'absence d'informations sur les précipitations, de compléter les lacunes de juillet à octobre 1976. Avec prudence, en évaluant uniquement les débits de juillet à octobre 1976 par les relations entre débits mensuels, on peut estimer le module 1975-76 à une valeur minimale de 112 m³/s (H ≥ 250 mm).

tableau 5.119.

Débits moyens
mensuels et annuels

Station : 1250600105 Marangaty
Rivière : Mananara-sud
Pays : Madagascar
Bassin : Mananara-sud
Débits en m³/s

Latitude : 22.56.00
Longitude : 46.58.00

Aire : 14 160 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1955/56 | 61.9 | 325 | 554 | 773 | 609 | 390 | 129 | 95.9 | 69.3 | 49.3 | 46.9 | 41.0 | 260 |
| 1956/57 | 77.4 | 141 | 439 | 223 | 288 | 253 | 141 | 78.2 | 57.9 | 39.1 | 48.8 | 23.4 | 151 |
| 1957/58 | 27.2 | 108 | 269 | 347 | 453 | 97.5 | 60.0 | 48.2 | 50.9 | 120 | 105 | 49.6 | 144 |
| 1958/59 | 65.0 | 368 | 496 | 215 | 637 | 578 | 141 | 85.3 | 89.1 | 85.1 | 34.8 | 29.0 | 236 |
| 1959/60 | 124 | 189 | 352 | 388 | 285 | 139 | 81.7 | 80.8 | 56.4 | 41.9 | 32.1 | 31.4 | 140 |
| 1960/61 | 21.7 | 383 | 867 | 367 | 317 | 150 | 68.3 | 73.5 | 159 | 173 | 90.7 | 57.6 | 228 |
| 1961/62 | 79.8 | 567 | 438 | 332 | 208 | 144 | 168 | 91.6 | 70.7 | 74.9 | 39.9 | 40.6 | 188 |
| 1962/63 | 81.7 | 277 | 537 | 641 | 325 | 186 | 126 | 108 | 105 | 54.6 | 36.4 | 29.5 | 207 |
| 1963/64 | 124 | 215 | 141 | 358 | 484 | 161 | 111 | 123 | 108 | 216 | 103 | 108 | 187 |
| 1964/65 | 91.5 | 313 | 634 | 488 | 430 | 300 | 139 | 110 | 153 | 213 | 212 | 169 | 270 |
| 1965/66 | 146 | 404 | 238 | 302 | 291 | 222 | 160 | 146 | 111 | 95.6 | 72.8 | 55.3 | 186 |
| 1966/67 | 94.8 | 391 | 717 | 288 | 635 | 420 | 207 | 164 | 143 | 167 | 196 | 197 | 303 |
| 1967/68 | 249 | 310 | 187 | 335 | 192 | 122 | 73.5 | 82.1 | 67.4 | 50.6 | 29.3 | 23.4 | 143 |
| 1968/69 | 79.2 | 183 | 491 | 1560 | 492 | 260 | 197 | 116 | 107 | 175 | 78.1 | 75.0 | 310 |
| 1969/70 | 119 | 504 | 1490 | 1200 | 1040 | 338 | 203 | 178 | 138 | 111 | 56.5 | 33.1 | 448 |
| 1970/71 | 123 | 126 | 375 | 1270 | 436 | 238 | 122 | 103 | 116 | 59.9 | 51.5 | 36.4 | 248 |
| 1971/72 | 105 | 401 | 269 | 602 | 663 | 267 | 160 | 117 | 104 | 125 | 70.0 | 79.6 | 246 |

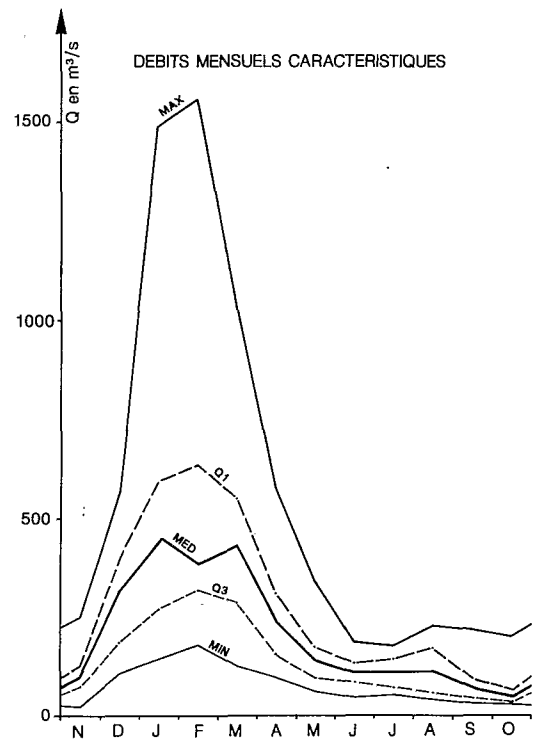
suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1972/73 | 181 | 158 | 303 | 636 | 447 | 320 | 183 | 147 | 178 | 225 | 92.1 | 45.7 | 240 |
| 1973/74 | 193 | 456 | 551 | 418 | 358 | 277 | 340 | 183 | 174 | 117 | 73.3 | 53.4 | 266 |
| 1974/75 | 131 | 328 | 833 | 530 | 414 | 196 | 151 | 123 | 108 | 107 | 66.3 | 60.0 | 253 |
| 1975/76 | 84.2 | 214 | 228 | 178 | 126 | 167 | 85.9 | 61.6 | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 108 | 303 | 496 | 545 | 435 | 249 | 145 | 110 | 108 | 115 | 76.8 | 61.9 | 228 |
| Ecart-type | 53.6 | 129 | 305 | 372 | 205 | 116 | 62.6 | 36.9 | 39.4 | 61.1 | 49.4 | 46.6 | |
| Max. | 249 | 567 | 1490 | 1560 | 1040 | 578 | 340 | 183 | 178 | 225 | 212 | 197 | |
| Q1 | 128 | 396 | 594 | 639 | 551 | 310 | 176 | 135 | 141 | 170 | 91.4 | 67.5 | |
| Méd. | 94.8 | 313 | 439 | 388 | 430 | 238 | 141 | 108 | 108 | 109 | 68.2 | 47.6 | |
| Q3 | 78.3 | 186 | 269 | 317 | 289 | 155 | 98.4 | 81.4 | 70.0 | 57.2 | 43.4 | 32.2 | |
| Min. | 21.7 | 108 | 141 | 178 | 126 | 97.5 | 60.0 | 48.2 | 50.9 | 39.1 | 29.3 | 23.4 | |

Le graphe 5.68. représente les débits mensuels pour différents quantiles de la MANANARA du sud.

figure 5.68.

Mananara du Sud à Marangaty



Des hydrogrammes annuels représentatifs d'une année excédentaire (1969-70, Q = 448 m³/s) et déficitaire (1959-60, Q = 149 m³/s) sont présentés sur les graphes 5.69. et 5.70.

figure 5.69.
Mananara du Sud à Marangaty

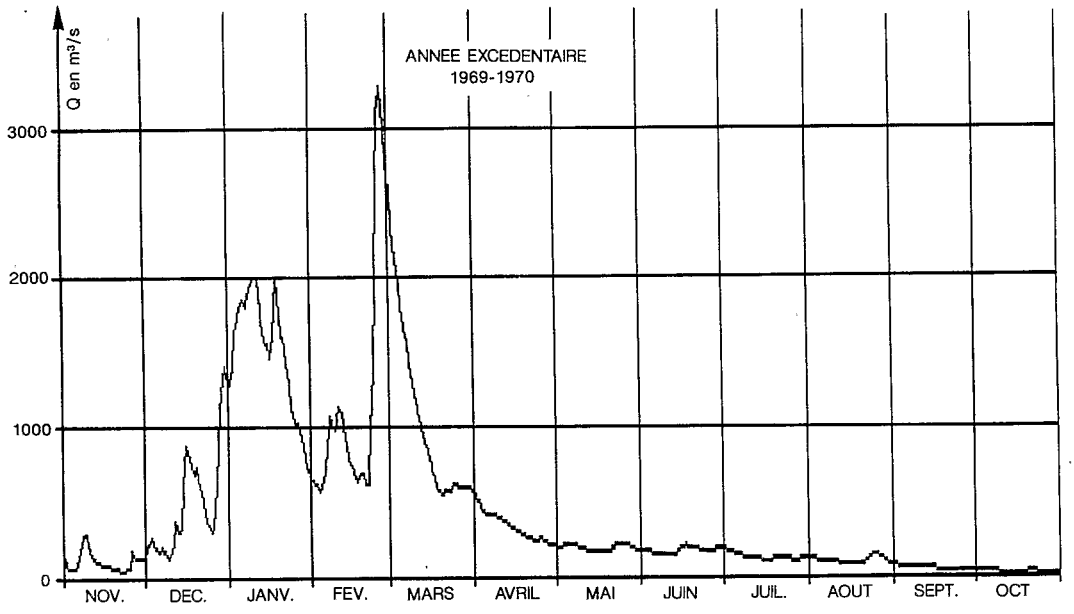
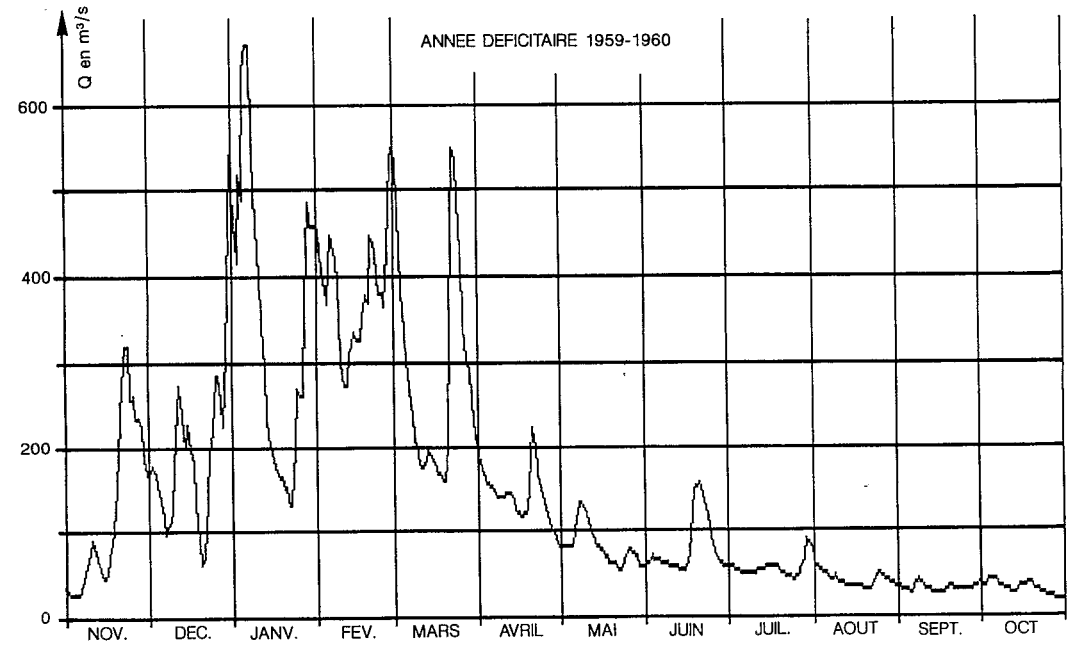



figure 5.70.
Mananara du Sud à Marangaty



## 10.1.2. Apports annuels

Les lames annuelles sont liées à la pluviométrie annuelle par la fonction de régression.

$H = .003 * P^{1.7}$ $(R^2 = .78 \quad P > .995)$

Le débit de novembre étant conditionné par les débits antérieurs, l'influence de l'état des réserves à l'issue de l'année antérieure est sensible, et l'équation de régression peut être améliorée par la prise en compte de la précipitation annuelle antérieure :

$H = 1.04 * 10^{-5} * P_i^{1.9} * P_{i-1}^{.6}$ $(R^2 = .85 \quad P > .995)$

Ces relations permettent d'évaluer les apports annuels de 1949-50 à 1954-55.

| Année | 1949-50 | 1950-51 | 1951-52 | 1952-53 | 1953-54 | 1954-55 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| H mm | 395 | 305 | 645 | 760 | 905 | 660 |
| Qm3/s | 177 | 137 | 289 | 341 | 406 | 296 |

L'ajustement statistique effectué sur l'échantillon (1949-1975) de vingt-six valeurs annuelles fournit les quantiles suivants :

tableau 5.120.

Mananara du sud à Marangaty
Apports annuels

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| H mm | 309 | 345 | 395 | 512 | 668 | 772 | 872 |
| Q ($m^3/s$) | 139 | 155 | 177 | 230 | 300 | 346 | 391 |
| q ($l/s/km^2$) | 9.8 | 10.9 | 12.5 | 16.2 | 21.2 | 24.4 | 27.6 |

Loi de GUMBEL (test Brunet-Moret : 2.77, échelle : 138 mm, position : 461 mm).
Cinquantennales sèche et humide : 272 mm (122 $m^3/s$) et 1000 mm (449 $m^3/s$).

## 10.1.3. Crues

Bien que la nature rocheuse du contrôle (seuil de SOAKABANY) garantisse la stabilité de cette station, l'extrapolation de type logarithmique n'a pu être menée qu'à partir des seules mesures (Météorologie nationale et ORSTOM) de hautes eaux, entre 1,45 m (Q = 326 $m^3/s$) et 2,48 m (Q = 756 $m^3/s$), et demeure très imprécise.

tableau 5.121.

Mananara du sud à Marangaty
Maximums annuels de crues

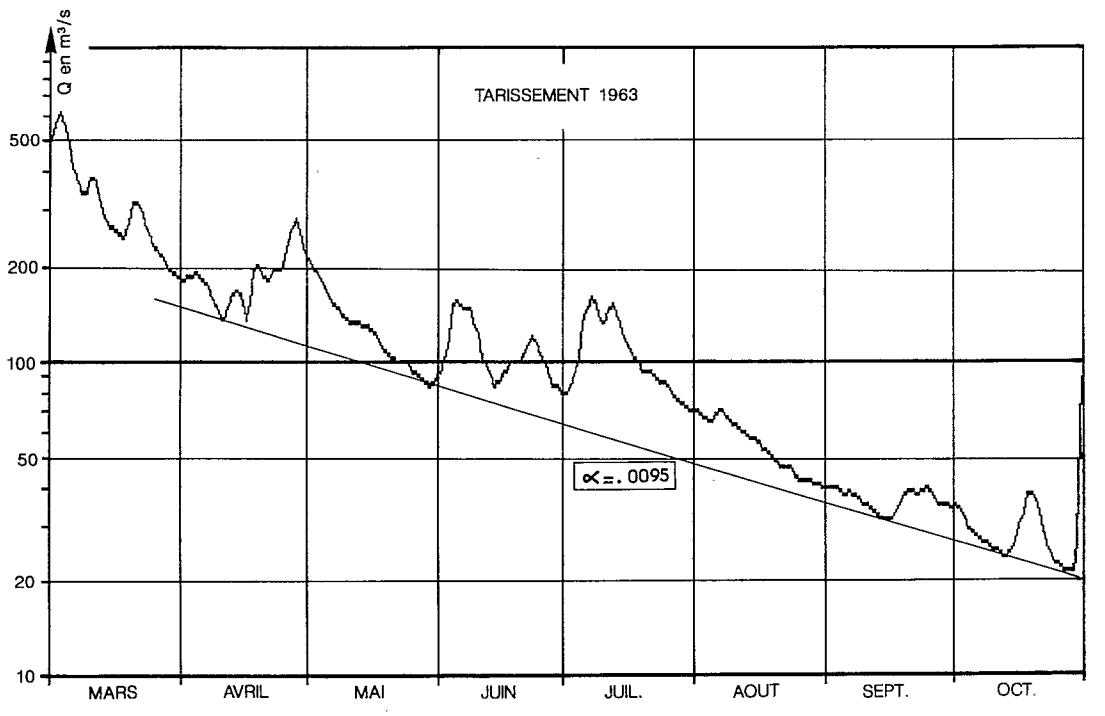
| Année | Q $m^3/s$ | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1955-56 | 1790 | 27/03/56 12 h 00 | 4,11 | 3rel |
| 1956-57 | 615 | 06/01/57 12 h 00 | 2,07 | 3rel |
| 1957-58 | 832 | 09/03/58 06 h 00 | 2,49 | 3rel |
| 1958-59 | 1980 | 28/03/59 18 h 00 | 4,42 | 3rel |
| 1959-60 | 703 | 08/01/60 06 h 00 | 2,25 | 3rel |

suite

| Année | Q m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1960-61 | 1280 | 27/01/61 12 h 00 | 3,28 | 3rel |
| 1961-62 | 1160 | 26/12/61 12 h 00 | 3,06 | 3rel |
| 1962-63 | 1210 | 05/02/63 15 h 00 | 3,15 | 3rel |
| 1963-64 | 1190 | 07/03/64 12 h 00 | 3,11 | 3rel |
| 1964-65 | 1440 | 25/01/65 06 h 00 | 3,54 | 3rel |
| 1965-66 | 766 | 09/12/65 18 h 00 | 2,37 | 3rel |
| 1966-67 | 1730 | 28/12/66 09 h 00 | 4,02 | 3rel |
| 1967-68 | 703 | 19/02/68 09 h 00 | 2,25 | 3rel |
| 1968-69 | 2570 | 14/02/69 21 h 00 | 5,51 | 3rel |
| 1969-70 | 3540 | 25/02/70 21 h 00 | 6,55 | PHE |
| 1970-71 | 2190 | 04/02/71 12 h 00 | 4,72 | 3rel |
| 1971-72 | 1280 | 11/03/72 12 h 00 | 3,28 | 3rel |
| 1972-73 | 1240 | 14/01/73 06 h 00 | 3,20 | 3rel |
| 1973-74 | 1530 | 21/12/73 18 h 00 | 3,70 | 3rel |
| 1974-75 | 1310 | 21/01/75 12 h 00 | 3,33 | Min |
| 1975-76 | 917 | 30/12/75 18 h 00 | 2,64 | 3rela |

figure 5.71.

Mananara du Sud à Marangaty



Une année sur deux, les maximums sont observés entre le 3 janvier et le 1er mars (date médiane : 27 janvier - dates extrêmes : 9 décembre et 28 mars).

QJMax = 1.56 DCC - 94 ($R^2$ = .93)
QJMax = 2.39 DC1 ($R^2$ = .76)

L'ajustement d'une loi de Fréchet à l'échantillon de 21 années correspond aux quantiles suivants :

tableau 5.122.

Mananara du sud à Marangaty
Débits maximaux annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1250 | 1850 | 2330 | 3720 | (4470) |
| q l/s/km² | 88 | 130 | 165 | 263 | (320) |

## 10.1.4. Basses eaux

Le tarissement est assez souvent perturbé par les précipitations de saison "sèche". Il ne peut être mis en évidence, par exemple, en 1958, 1960 et 1965.

Pour les autres années, une droite enveloppe peut être adaptée aux débits de base et permet d'estimer le coefficient médian à : $\alpha$ = .011 (Tc = 69 jours) pour un débit initial de base Qo voisin de 130 m³/s qui apparaît généralement entre le 15 avril et fin mai. Pour les années les moins perturbées par des précipitations de saison sèche importantes, le coefficient est d'environ .0117.

Les réserves drainables en fin mai peuvent ainsi être estimées à 1 120.$10^6$ m³ (lame équivalente 79 mm).

tableau 5.123.

Mananara du sud à Marangaty
Débits d'étiage (m³/s)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1950 | | | | (18.2) | |
| 1951 | | | | (11.2) | |
| 1952 | | | | (50.0) | |
| 1953 | | | | (58.3) | |
| 1954 | | | | (21.6) | |
| 1955 | | | | (14.7) | |
| 1956 | 49.4 | 29.3 | 22.1 | 19.7 | 03-11 |
| 1957 | 44.4 | 22.1 | 18.2 | 16.6 | 11-11 |
| 1958 | 50.1 | 40.2 | 34.0 | 27.6 | 04-12 |
| 1959 | 69.4 | 30.4 | 26.0 | 24.5 | 05-10 |
| 1960 | 37.4 | 23.8 | 14.5 | 12.7 | 19-11 |
| 1961 | 68.3 | 50.7 | 40.7 | 34.5 | 18-10 |
| 1962 | 60.5 | 35.3 | 29.8 | 24.0 | 12-10 |
| 1963 | 67.9 | 33.1 | 24.8 | 21.3 | 28-10 |
| 1964 | 86.5 | 63.0 | 45.5 | 40.4 | 22-11 |
| 1965 | 144 | 103 | 90.0 | 83.2 | 04-11 |
| 1966 | 73.9 | 43.0 | 31.1 | 25.0 | 08-11 |
| 1967 | 162 | 130 | 118 | 92.2 | 09-10 |

suite

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1968 | 48.1 | 24.1 | 21.1 | 19.8 | 17-10 |
| 1969 | 103 | 57.8 | 43.2 | 34.1 | 22-10 |
| 1970 | 83.6 | 36.6 | 29.2 | 25.8 | 01-11 |
| 1971 | 59.7 | 36.4 | 30.1 | 27.3 | 13-11 |
| 1972 | 93.3 | 57.3 | 38.2 | 34.5 | 08-10 |
| 1973 | 113 | 51.1 | 37.3 | 28.9 | 04-11 |
| 1974 | 114 | 56.0 | 44.5 | 40.2 | 11-10 |
| 1975 | 82.8 | 47.9 | 37.8 | 32.2 | 27-10 |

50 % des débits d'étiage absolus sont observés entre le 15 octobre et le 12 novembre (date médiane 1er novembre).

DCE = 1.20 QJmin - 1.2 ($R^2$ = .98 P > .995) DCE/QJmin = 1.17
DC11 = 1.30 QJmin + 5.4 ($R^2$ = .96 P > .995) DCE/QJmin = 1.47
DC9 = 1.47 QJmin + 31.8 ($R^2$ = .79 P > .995) DCE/QJmin = 2.45

$QJmin = 23.9 * Q09^{.79} * e^{-T/100}$ ($R^2$ = .91 P >995)

T date (en jours) du débit d'étiage.

Le débit d'étiage journalier peut être également déterminé à partir des réserves R (en mm) constituées en fin mars.

R est la somme des réserves constituées chaque mois et calculées de la façon suivante :
R12 = 2/3 (P12 - 75) avec ETR12 = 75 mm et H12 = 1/3 (P12 - ETR)
R01 = 1/3 (P01 - 75) avec ETR01 = 75 mm et H01 = 2/3 (P01 - ETR)
R02 = 1/5 (P02 - 75) avec ETR02 = 75 mm et H02 = 4/5 (P02 - ETR)
R03 = P03 - ETR03 - H03 avec ETR03 = 80 mm et H03 = .4H01 + .25 * (P02 + P03)/2

Ces équations étant déterminées par les relations hydro-pluviométriques établies ci-dessus.

avec R = R12 + R01 + R02 + R03
et IP = précipitations cumulées de juillet à octobre,

nous avons :

QJmin = .12 R + .285 (IP - 79) ($R^2$ = .62 P > .995)

On notera que .12 * R correspond aux réserves résiduelles de fin septembre :

R09 = R * Exp (- .0117 * 180 jours) = R * .120

R est également assez bien corrélé avec le débit moyen d'avril ($R^2$ = .65).

Ces relations ont permis d'évaluer les QJmin de 1950 à 1955.

De l'échantillon de vingt-six valeurs du débit d'étiage, observées et calculées, nous tirons les quantiles suivants :

tableau 5.124.

Mananara du sud à Marangaty

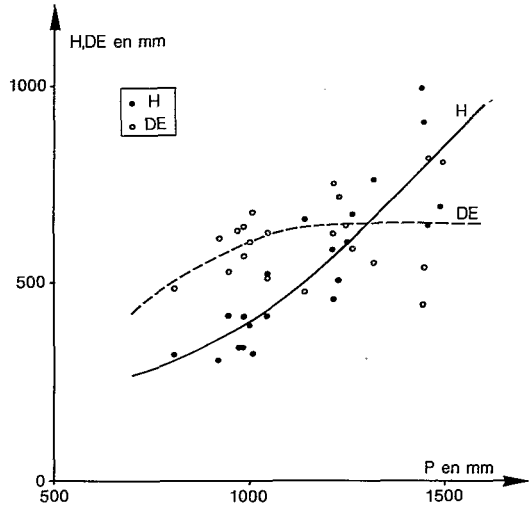
| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q (m³/s) | 13.3 | 15.1 | 18.0 | 26.8 | 42.7 | 55.6 | 69.7 |
| q (l/s/km²) | 0.9 | 1.1 | 1.3 | 1.9 | 3.0 | 3.9 | 4.9 |

Loi de FRECHET (test Brunet-Moret : 1.13, échelle : 34.6 m³/s, position : - 11.8 m³/s, forme : - .289).
Cinquantennales sèche et humide : 11.7 m³/s (0.8 l/s/km²) et 90.5 m³/s (6.4 l/s/km²).

## 10.1.5. Bilan hydrologique

figure 5.72.

Mananara du sud à Marangaty




Avec une pluviométrie moyenne interannuelle de 1 150 mm et une lame écoulée interannuelle de 535 mm, le déficit d'écoulement est de 615 mm (Ke = 47 %).

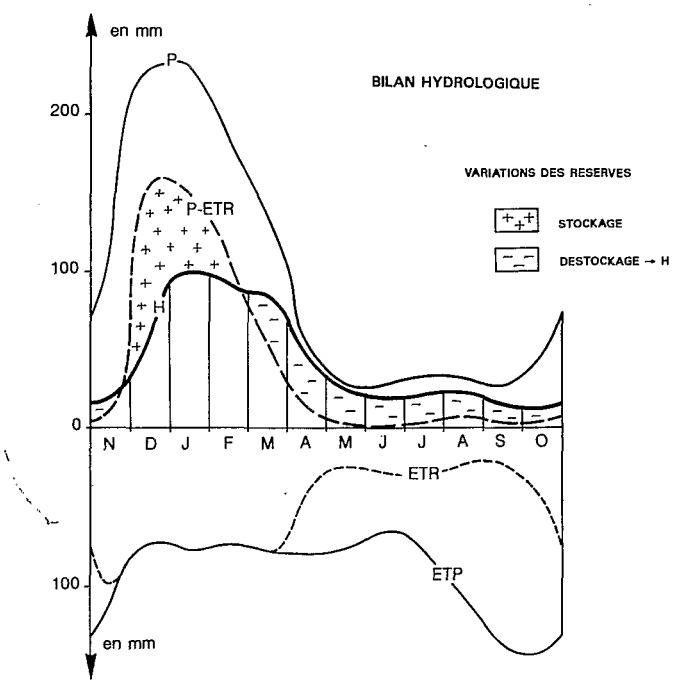
Nous avons reporté sur le graphe 5.72. les lames et déficits d'écoulement des années observées en fonction de la précipitation annuelle. En dépit d'une assez forte dispersion due à la non-prise en compte des facteurs secondaires (concentration mensuelle des précipitations, répartition spatiale des pluies sur ce bassin très allongé entre les 22e et 24e parallèles, influence des précipitations antérieures, etc.), il est possible de dégager les tendances suivantes :

- allure parabolique de la relation lames-précipitations ;
- croissance du déficit d'écoulement de 450 mm à 650 mm pour des précipitations annuelles comprises entre

- croissance du déficit d'écoulement de 450 mm à 650 mm pour des précipitations annuelles comprises entre 700 et 1 200 mm, puis comportement asymptotique de la relation DE/P. Le déficit d'écoulement DE semble, en moyenne, être limité à une valeur maximale de 650 mm, très inférieure à l'ETP régionale (environ 1 100 mm). Cette forte réduction est due à la relative faiblesse des précipitations de saison sèche, nettement inférieures à celles qui sont observées sur les bassins du versant oriental. C'est la conséquence de la position en retrait du bassin de la MANANARA (en amont du seuil de SOAKIMBANY), situé "sous le vent" du prolongement méridional de la grande falaise orientale.

figure 5.73.

Mananara du Sud à Marangaty




Les termes mensuels du bilan hydrologique (tableau 5.125. et graphe 5.73.) permettent les constatations suivantes :

tableau 5.125.

Bilan hydrologique (1955-70)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 110 | 229 | 228 | 183 | 135 | 51 | 27 | 28 | 31 | 30 | 26 | 46 | 1124 |
| ETP | 110 | 72 | 78 | 74 | 80 | 78 | 77 | 66 | 80 | 107 | 136 | 142 | 1100 |
| ETR | 100 | 72 | 78 | 74 | 80 | 40 | 26 | 28 | 29 | 24 | 24 | 43 | 618 |
| P-ETR | 10 | 157 | 150 | 109 | 55 | 11 | 1 | 0 | 2 | 6 | 2 | 3 | 506 |
| H | 18 | 59 | 99 | 90 | 84 | 46 | 25 | 19 | 19 | 21 | 14 | 12 | 506 |

suite

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H | 18 | 59 | 99 | 90 | 84 | 46 | 25 | 19 | 19 | 21 | 14 | 12 | 506 |
| ΔR+ | | 98 | 51 | 19 | | | | | | | | | + 168 |
| ΔR- | 8 | | | | 29 | 35 | 24 | 19 | 17 | 15 | 12 | 9 | - 168 |
| R | 0 | 98 | 149 | 168 | 139 | 104 | 80 | 61 | 44 | 29 | 17 | 8 | |

L'ETR annuelle représente 56 % de l'ETP.

De décembre à mars, les précipitations cumulées représentent 775 mm (69 % du total annuel). L'ETP (304 mm) est totalement satisfaite et après soustraction des lames écoulées (332 mm dont 29 mm par destockage en mars ; soit 66 % de l'écoulement annuel), les réserves cumulées représentent 139 mm, valeur nettement inférieure aux réserves observées sur les bassins du versant oriental.

D'avril à novembre, les lames cumulées représentent 174 mm (139 mm par drainage des nappes et 35 mm à partir des précipitations d'avril, juillet et août). L'ETR est fortement réduite (314 mm soit 39 % de l'ETP de la période).

Les réserves de fin mai (80 mm) correspondent aux réserves calculées d'après Qo et $\alpha$ et l'on retrouve la relation entre les réserves de fin septembre (17 mm) et de fin mars (139 mm) calculée ci-dessus.

R09 = .12 R03

Le bilan schématique du bassin de la MANANARA du sud diffère déjà sensiblement de ceux des bassins du versant oriental situés plus au nord et se rapproche de ceux des bassins du sud des hauts plateaux avec une saison sèche assez bien différenciée.

## 10.2. La Sahambano à Sahambano

La station de SAHAMBANO (46°17'E - 22°29'S. Superficie du bassin versant : 2 000 km²) est située sur un des affluents principaux de la MANANARA du sud.

Peu de données sont directement exploitables pour cette échelle, suivie de 1967 à 1975 et insuffisamment étalonnée.

Une (forte) extrapolation de type logarithmique conduirait à adopter, pour les deux plus importantes crues relevées, les valeurs suivantes :

| Année | Hm | Q m³/s | Obs |
|---|---|---|---|
| 1968-69 | 4,50 | 175 | Cyclone Dany |
| 1969-70 | 6,00 | 290 | Cyclone Jane |

Un ordre de grandeur de la crue décennale a été estimé à partir des résultats de l'étude statistique menée sur la station la plus proche (IHOSY à IHOSY).

Q = 200 m³/s  q = 100 l/s/km².

# 11. BASSIN DU MANAMPANIHY

Le bassin de MANAMPANIHY, une des dernières rivières côtières du versant oriental, draine une vallée tectonique située dans les chaînes Anosyennes entre le BEAMPINGARATRA et le VOHIMENA. D'orientation sud-ouest/nord-est, le bassin repose entièrement sur les granites anciens de l'ANOSY, plus ou moins altérés en lithosols peu évolués (arènes granitiques faiblement latérisées).

La pluviométrie du bassin doit être voisine de 2 500 mm.

## 11.1. Le Manampanihy à Elanary

Une station située au bac d'ELANARY, sur la route d'AMPASIMENA à RANOMAFANA (24°28'S - 47°04'E), a été suivie de novembre 1967 à octobre 1969. Le bassin contrôlé a une superficie de 1 087 km².

Débits moyens mensuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1967-68 | 58.0 | 32.7 | 32.9 | 32.4 | 21.7 | 15.4 | 14.9 | 9.21 | 6.85 | 9.37 | 4.84 | 9.70 | 20.6 |
| 1968-69 | 24.0 | 12.6 | 42.6 | 168 | 38.0 | 56.9 | 32.1 | 15.9 | 16.0 | 37.7 | 9.32 | 13.3 | 37.9 |

Par analogie (hydraulicité des années observées) avec le bassin de l'EFAHO, situé un peu plus au sud, le débit moyen interannuel peut être estimé sommairement à 52 m³/s (H # 1 500 mm).

L'étalonnage insuffisant de cette station, difficile d'accès et suivie de 1967 à 1975, ne permet malheureusement pas l'estimation des débits de certaines plus hautes eaux relevées au cours de cette période.

| Année | Hm | Episode cyclonique |
|---|---|---|
| 1968-69 | 5,80 | Cyclone Dany |
| 1969-70 | 5,90 | Cyclone Jane (26-27/02/70) |
| 1970-71 | 10,60 | Cyclone Félicie |

Les débits d'étiage observés sont les suivants :

29 octobre 1968 3.01 m³/s (2.8 l/s/km²)
20 octobre 1969 4.30 m³/s (3.9 l/s/km²)

Le débit d'étiage spécifique médian peut être évalué à 3 l/s/km².

# 12. BASSIN DE L'EFAHO

Le petit bassin de l'EFAHO est situé sur la façade orientale des chaînes Anosyennes, au nord-ouest de TOLANARO (FORT-DAUPHIN). Il repose sur les granites anciens de l'ANOSY, plus ou moins profondément altérés en lithosols peu évolués (arènes granitiques). Il est entièrement recouvert par la forêt ombrophile dense à sol humique.

## 12.1. L'Efaho à Fanjahira

La station de FANJAHIRA (24°54'36"S - 46°53'46"E) contrôle un bassin versant de 195 km². L'échelle installée en octobre 1962 en amont d'un seuil rocheux stable, a permis de contrôler en vue d'études hydro-électriques, les débits de l'EFAHO entre 1962 et 1974.

Soixante mesures de débit (entre .20 et 200 m³/s) ont permis d'établir une courbe de tarage stable et de bonne qualité jusqu'à 250 m³/s. L'extrapolation, très forte, a été menée jusqu'à 1 350 m³/s et ne permet d'évaluer les forts débits de crue qu'avec une certaine imprécision.

Quatre stations pluviométriques : EMINIMINY (poids : .17), ISAKA-IVONDRO (.50), IFARANTSA (.21) et NANAMPOANA (.12), donnent une estimation sommaire de la pluviométrie du bassin, de l'ordre de 1 800 mm. Fortement sous-estimée, en raison de l'absence de postes d'altitude, la pluviométrie peut être évaluée plus correctement à près de 3 100 mm (coefficient de correction 1.72).

### 12.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 5.126.

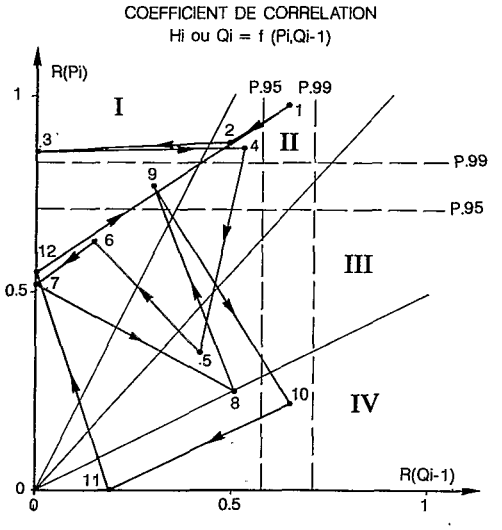
Efaho à Fanjahira
Coefficients de corrélation

| Hi ouQi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | -.12 | (.55) | .98 | .88 | .96 | .87 | (.35) | (.63) | .52) | (.25) | .77 | (.22) |
| Pi-1 | (.29) | (-.05) | (.55) | .84 | (.11) | .78 | .71 | (-.14) | (-.16) | (.42) | (.31) | (.58) |
| Qi-1 | (.19 | (-.12) | .64 | (.49) | (.02) | (.53) | (.42) | (.15) | (-.10) | (.51) | (.30) | .65 |

Les coefficients sont en général (à l'exception de janvier à avril) assez peu significatifs en raison de l'indétermination sur la pluviométrie, mais, ainsi que le montre le graphe 5.74., mettent en évidence l'influence prédominante des précipitations du mois sur des sols probablement saturés en saison des pluies, avec une influence nettement plus faible des débits antérieurs, ce qui peut laisser supposer un soutien par le nappes relativement beaucoup moins important que pour les autres bassins du versant oriental.

figure 5.74.

Efaho à Fanjahira




Les régressions suivantes (intermensuelles) peuvent être établies :

Décembre à avril Hi = .92 Pi + .17 Pi-1 - 148 ($R^2$ = .81 P > .995)

Mai à octobre Hi = .46 Pi + .22 Hi-1 + 7.3 ($R^2$ = .23 P > .995 pour 48 valeurs).

tableau 5.127.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1256201903 Fanjahira
Rivière : Efaho
Pays : Madagascar
Bassin : PBC Sud
Débits en m³/s

Latitude : 24.54.36
Longitude : 46.53.46

Aire : 196 km²

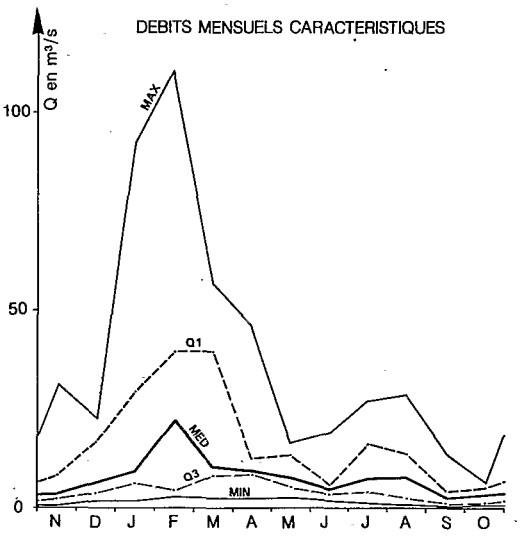
| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1962/63 | 3.30 | 4.80 | 47.0 | 24.2 | 9.84 | 6.63 | 2.66 | 2.00 | 2.67 | 714 | 766 | 1.00 | 8.73 |
| 1963/64 | 8.12 | 1.96 | 8.74 | 27.4 | 42.2 | 10.2 | 6.58 | 9.80 | 7.68 | 28.3 | 2.57 | 6.49 | 13.3 |
| 1964/65 | 2.03 | 18.7 | 31.8 | 48.5 | 28.5 | 17.5 | 8.06 | 3.34 | 20.6 | 5.79 | 9.81 | 5.25 | 16.5 |
| 1965/66 | 5.05 | 7.59 | 2.77 | 4.30 | 7.02 | 8.47 | 8.83 | 18.9 | 3.97 | 6.82 | 5.41 | 2.12 | 6.76 |
| 1966/67 | 3.66 | 17.6 | 27.0 | 7.10 | 52.7 | 45.9 | 14.1 | 6.33 | 27.0 | 19.0 | 14.0 | 6.47 | 20.2 |
| 1967/68 | 13.8 | 6.14 | 1.90 | 2.85 | 2.60 | 2.54 | 4.55 | 1.77 | 1.02 | 8.12 | 849 | 3.54 | 4.14 |
| 1968/69 | 8.39 | 2.99 | 8.20 | 30.0 | 9.50 | 11.9 | 15.1 | 4.70 | 9.80 | 9.28 | 1.74 | 3.38 | 9.36 |
| 1969/70 | 3.70 | 22.3 | 92.5 | 88.1 | 36.4 | 9.94 | 6.94 | 3.60 | 3.96 | 912 | 602 | 1.13 | 22.2 |
| 1970/71 | 626 | 2.81 | 10.0 | 111 | 10.2 | 8.44 | 3.16 | 4.85 | 5.39 | 862 | 788 | 993 | 12.6 |
| 1971/72 | 3.07 | 5.84 | 4.16 | 4.06 | 56.2 | 8.79 | 12.2 | 5.60 | 6.78 | 8.20 | 2.74 | 3.11 | 10.2 |
| 1972/73 | 31.2 | 8.25 | 9.23 | 20.1 | 10.8 | 13.4 | 6.02 | 4.07 | 21.4 | 27.6 | 3.12 | 4.77 | 13.3 |
| 1973/74 | 8.69 | 15.8 | 12.7 | 2.86 | 6.87 | 9.37 | 16.6 | 4.75 | 11.5 | 3.71 | 1.44 | 728 | 7.98 |
| 1974/75 | 2.45 | 5.51 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Moyenne | 7.24 | 9.25 | 21.3 | 30.9 | 22.7 | 12.8 | 8.73 | 5.81 | 10.2 | 9.86 | 3.65 | 3.25 | 12.0 |
| Ecart-type | 8.05 | 6.86 | 26.2 | 35.3 | 19.5 | 11.1 | 4.71 | 4.63 | 8.41 | 9.79 | 4.18 | 2.12 | |
| Max. | 31.2 | 22.3 | 92.5 | 111 | 56.2 | 45.9 | 16.6 | 18.9 | 27.0 | 28.3 | 14.0 | 6.49 | |
| Q1 | 8.54 | 16.7 | 29.4 | 39.3 | 39.3 | 12.7 | 13.2 | 5.97 | 16.1 | 13.6 | 4.27 | 5.01 | |
| Méd. | 3.70 | 6.14 | 9.62 | 22.2 | 10.5 | 9.65 | 7.50 | 4.72 | 7.23 | 7.47 | 2.16 | 3.25 | |
| Q3 | 2.76 | 3.89 | 6.18 | 4.18 | 8.26 | 8.45 | 5.28 | 3.47 | 3.96 | 2.31 | 818 | 1.06 | |
| Min. | 626 | 1.96 | 1.90 | 2.85 | 2.60 | 2.54 | 2.66 | 1.77 | 1.02 | 714 | 602 | 728 | |

Les débits caractéristiques (quantiles des débits mensuels) représentés sur le graphe 5.75. montrent la forte dispersion des valeurs mensuelles caractéristiques d'un bassin à tendance imperméable (saturation des altérites sableuses) sans régularisation notable par les nappes.

figure 5.75.
Efaho à Fanjahira




L'aspect très découpé (nombreuses crues individualisées et débit de base assez faible) des hydrogrammes annuels est bien visible sur les graphes 5.76. et 5.77. (année humide 1966-67, Q = 20.2 m³/s et année sèche 1965-66, Q = 6.76 m³/s).

figure 5.76.

Efaho à Fanjahira

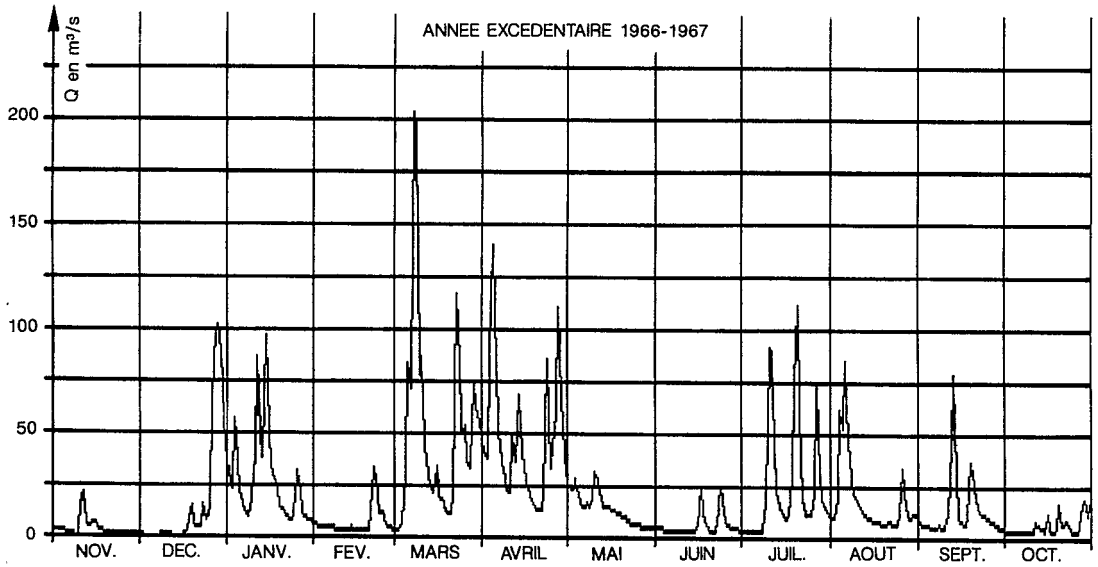
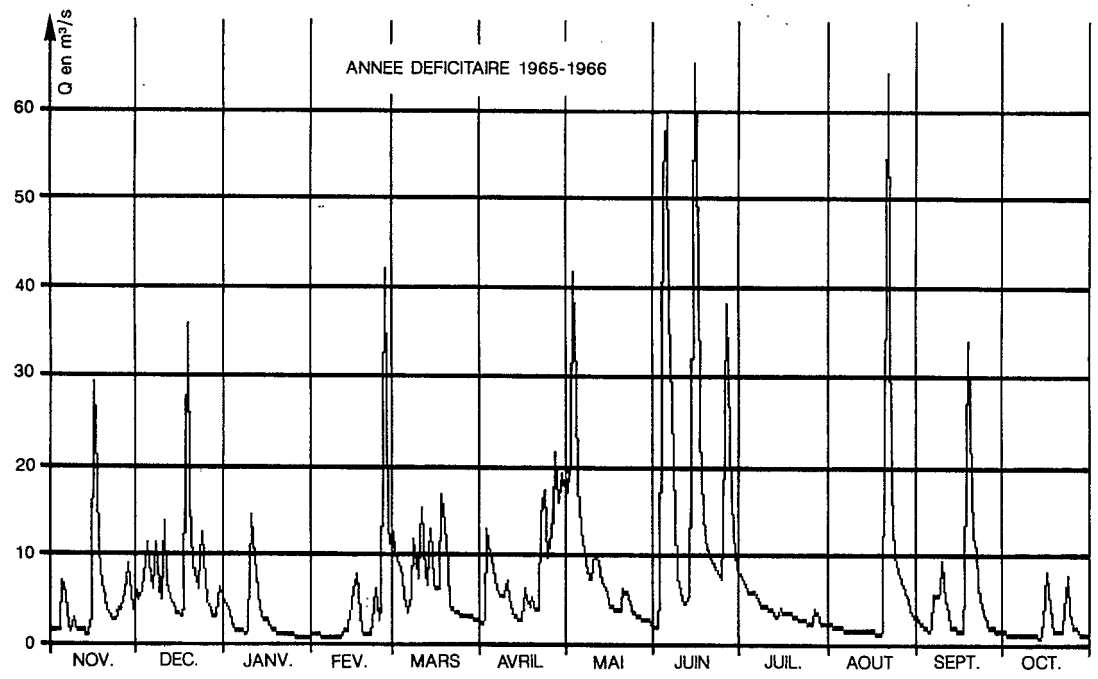



figure 5.77.

Efaho à Fanjahira



## 12.1.2. Apports annuels

Les lames écoulées et les précipitations annuelles sur le bassin (corrigées) présentent une régression assez correcte d'expression :

$H = 1.18 (P - 1321)$ $(R^2 = .81$ $P > .995)$

Les lames sont assez bien liées à celles des bassins côtiers situés plus au nord :

$H_{EFAHO} = 3.8\ H_{NAMORONA} - 207$ $(R^2 = .58$ $P > .99)$

$H_{EFAHO} = .89\ H_{FARAONY} + 196$ $(R^2 = .51$ $P > .99)$

Ces relations (H = f(P)) ont permis de compléter l'échantillon 1951 à 1961-62.

| Années | 51/52 | 52/53 | 53/54 | 54/55 | 55/56 | 56/57 | 57/58 | 58/59 | 59/60 | 60/61 | 61/62 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H mm | 2090 | 2055 | 2785 | 2185 | 2390 | 1090 | 2280 | 2055 | 1185 | 3710 | 2370 |
| Q m³/s | 12.9 | 12.7 | 17.2 | 13.5 | 14.7 | 6.74 | 14.1 | 12.7 | 7.31 | 22.9 | 14.7 |

L'échantillon de vingt-trois valeurs (1951-1974) ainsi constitué permet, par ajustement d'une fonction statistique, de déterminer les quantiles suivants :

tableau 5.128.

Efaho à Fanjihira

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Hmm | 912 | 1128 | 1408 | 2004 | 2691 | 3090 | 3443 |
| Q (m³/s) | 5.64 | 6.97 | 8.70 | 12.4 | 16.6 | 19.1 | 21.3 |
| q (l/s/km²) | 28.9 | 35.7 | 44.6 | 63.6 | 85.1 | 97.9 | 109 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 2.26, échelle : 4 532 mm, position : - 2 528 mm, forme : .168).
Cinquantennales sèche et humide : 684 mm (Q = 4.23 m³/s) et 3866 mm (Q = 23.9 m³/s).

## 12.1.3. Crues

tableau 5.129.

Efaho à Fanjihira
Maximums annuels de crues

| Année | Q m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1962-63 | 481 | 04/01/63 18 h 00 | 6,81 | 3rel |
| 1963-64 | 1210 | 02/03/64 18 h 00 | 11,28 | PHE |
| 1964-65 | 460 | 25/01/65 06 h 00 | 6,67 | 3rel |
| 1965-66 | 89 | 21/08/66 18 h 00 | 2,22 | 3rel |
| 1966-67 | 343 | 07/03/67 06 h 00 | 5,90 | 3rel |
| 1967-68 | 105 | 04/11/67 21 h 00 | 2,80 | 3rel |
| 1968-69 | 267 | 11/02/69 06 h 00 | 5,37 | 3rel |
| 1969-70 | 750 | 19/02/70 12 h 00 | 8,52 | 3rel |
| 1970-71 | 1160 | 02/02/71 12 h 00 | 11,00 | PHE |
| 1971-72 | 597 | 14/03/72 06h 00 | 7,57 | 3rel |
| 1972-73 | 505 | 19/11/72 21 h 00 | 6,97 | 3rel |
| 1973-74 | 445 | 31/12/73 21 h 00 | 6,57 | 3rel |
| 1974-75 | 209 | 25/01/75 12 h 00 | 4,89 | 3rel |

Le seuil rocheux qui assure un premier contrôle est largement noyé en hautes eaux et peu de mesures permettent de préciser l'étalonnage au-delà de 2,50 m.

L'extrapolation de type logarithmique qui a été admise est extrêmement forte (de 4,90 à 11,28 m) et n'a pu être menée qu'à partir de trois jaugeages réalisés en décrue le 08/03/1967.

Une année sur deux, le maximum est observé entre début janvier et début mars.

QMax = 1.35 QJMax + 91 ($R^2$ = .74)
QJMax = 4.65 DCC - 17 ($R^2$ = .49)

L'ajustement d'une distribution de Fréchet sur l'échantillon des 13 valeurs observées conduit aux quantiles suivants :

tableau 5.130.

Efaho à Fanjahira
Débits maximaux annuels

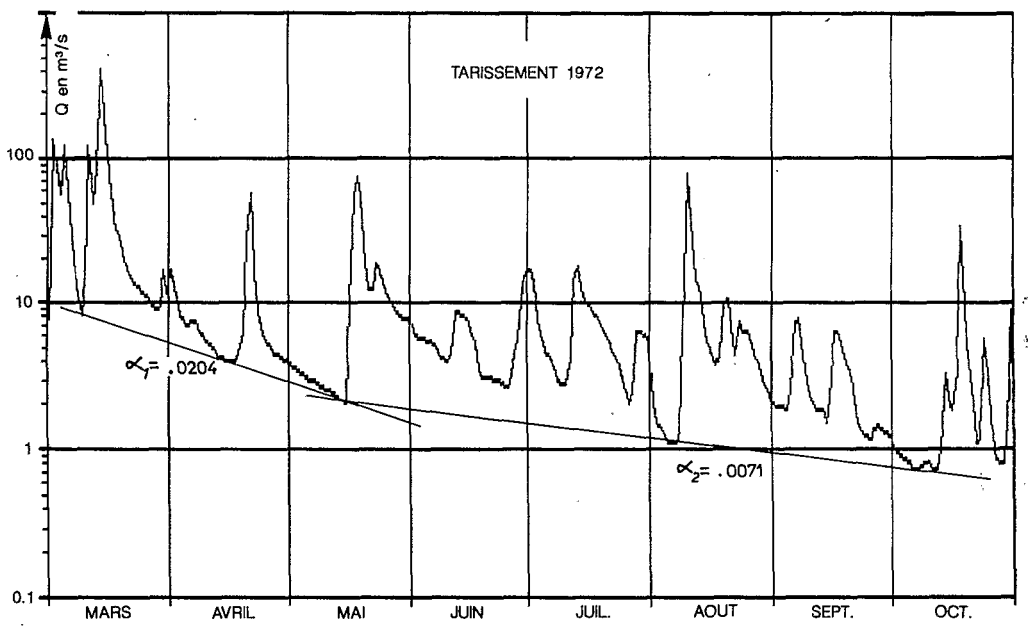
| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 430 | 735 | 960 | (1540) | (1820) |
| q l/s/km² | 2190 | 3750 | 4900 | (7860) | (9300) |

## 12.1.4. Basses eaux

Les crues de saison "sèche" sont toujours nombreuses et aiguës. En adaptant aux "débits de base", des droites de tarissement, il est possible d'observer dans la majeure partie des cas, deux alignements successifs.

figure 5.78.

Efaho à Fanjahira



Un premier "tarissement" rapide de mars-avril à mai-juin (avec des débits initiaux compris entre 5 et 12 m³/s) et de pentes α1 comprises entre .015 et .030.

Puis une décroissance des débits de base plus lente entre mai-juin à octobre, avec un débit initial compris entre 1.5 et 4 m³/s et de pentes α2 comprises entre .015 et .0070 (cf. graphe 5.78. tarissement 1972).

Les coefficients α sont influencés par le débit initial Qo selon la relation :

$\alpha = .0017\ Qo + .008$ (R2 = .49 P > .995)

soit : Qo = 10 α = .025, Qo = 5 α = .0165 Qo = 2, α = .0114

tableau 5.131.

Efaho à Fanjihira
Débits d'étiage (m³/s)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1962 | | | | (.275) | 06-10 |
| 1963 | .953 | .529 | .441 | .392 | 26-10 |
| 1964 | 2.44 | 1.21 | .895 | .547 | 11-01 |
| 1965 | 3.74 | 2.28 | 1.74 | 1.30 | 14-11 |
| 1966 | 1.63 | .934 | .748 | .643 | 10-02 |
| 1967 | 5.08 | 3.41 | 3.02 | 2.51 | 14-06 |
| 1968 | 1.00 | .736 | .641 | .575 | 24-09 |
| 1969 | 2.45 | 1.16 | .795 | .610 | 19-10 |
| 1970 | 679 | .504 | .413 | .335 | 09-12 |
| 1971 | 923 | .541 | .438 | .389 | 02-10 |
| 1972 | 2.23 | 1.08 | .795 | .712 | 22-01 |
| 1973 | 3.29 | 1.93 | 1.16 | .934 | 04-11 |
| 1974 | 1.13 | .641 | .541 | .446 | 11-12 |

Environ une fois sur trois, le débit minimal est observé avant le 15 septembre (parfois en pleine saison des pluies).

L'échantillon de treize valeurs observé, permet de déterminer les quantiles suivants :

tableau 5.132.

Efaho à Fanjihira
QJmin

| | Années sèches | | Médiane | Années humides | |
|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 |
| Q (m³/s) | .328 | .379 | .543 | .920 | 1.33 |
| q (l/s/km²) | 1.7 | 1.9 | 2.8 | 4.7 | 6.8 |

Loi de FRECHET (test Brunet-Moret : 74, échelle : 372 l/s/km², position : 90 l/s/km²,forme : - .535).
20 ans sèche et humide : .297 m³/s (1.5 l/s/km²) et 1.91 m³/s (9.8 l/s/km²).

Ces étiages spécifiques, nettement plus faibles que sur les bassins du versant oriental à fortes réserves d'altérites, montrent la rapidité de vidange des nappes d'arènes du massif granitique.

DCE = 1.22 QJmin (R2 = .99 P > .995) DCE/QJmin = 1.24
DC11 = 1.40 QJmin + .15 (R2 = .93 P > .995) DC11/QJmin = 1.66
DC9 = 2.02 QJmin + .54 (R2 = .82 P > .995) DC9/QJmin = 3

## 12.1.5. Bilan hydrologique

Avec une précipitation moyenne interannuelle évaluée à 3 100 mm, la lame écoulée moyenne (2 070 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 1 030 mm et un coefficient d'écoulement moyen de 67 %.

tableau 5.133.

Efaho à Fanjihira
Termes du bilan hydrologique
(mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 267 | 427 | 478 | 361 | 480 | 210 | 168 | 151 | 177 | 150 | 106 | 125 | 3100 |
| ETP | 123 | 107 | 110 | 100 | 105 | 103 | 105 | 93 | 89 | 107 | 116 | 142 | 1300 |
| ETR | 123 | 107 | 110 | 100 | 105 | 103 | 95 | 55 | 50 | 50 | 54 | 78 | 1030 |
| P-ETR | 144 | 320 | 368 | 261 | 375 | 107 | 73 | 96 | 127 | 100 | 52 | 47 | 2070 |
| H | 102 | 135 | 311 | 410 | 330 | 181 | 127 | 82 | 149 | 144 | 52 | 47 | 2070 |
| ΔR+ | 42 | 185 | 57 | | 45 | | | 14 | | | | | + 343 |
| ΔR- | | | | 149 | | 74 | 54 | | 22 | 44 | | | - 343 |
| R | 42 | 227 | 284 | 135 | 180 | 106 | 52 | 66 | 44 | 0 | 0 | 0 | |

La pluviométrie de novembre à avril représente 2 223 mm (soit 72 % du total annuel) et la lame écoulée de la même période 1 469 mm (soit 71 % du total annuel). Cette lame provient pour 223 mm du drainage rapide en février et avril des réserves accumulées dans les nappes d'arènes et pour 1 246 mm, du ruissellement de surface. Au cours de cette période, l'ETP (648 mm) est entièrement satisfaite. Après avoir atteint en fin janvier, un maximum équivalent à 284 mm, les réserves ne sont plus en fin avril que de 106 mm.

De mai à octobre, la lame écoulée (601 mm) provient pour plus de 80 % des écoulements par ruissellement. On note une légère recharge des nappes en juin. L'ETR (382 mm) marque une réduction sensible au cours de cette période (59 % ETP) malgré le soutien probable des réserves utiles stockées dans les sols humifères forestiers.

La pluviométrie de février (même corrigée de + 10 %, pour tenir compte du plus faible nombre de jours du mois) marque, ce qui a été également observé sur la côte est, un certain fléchissement par rapport à janvier et mars. Grâce à la vidange rapide des nappes perchées, le débit de février est cependant le plus fort de l'année.

On notera également la tendance "pseudo-équatoriale" qui apparaît en juillet-août, caractéristique du régime du versant oriental (graphe 5.79.).

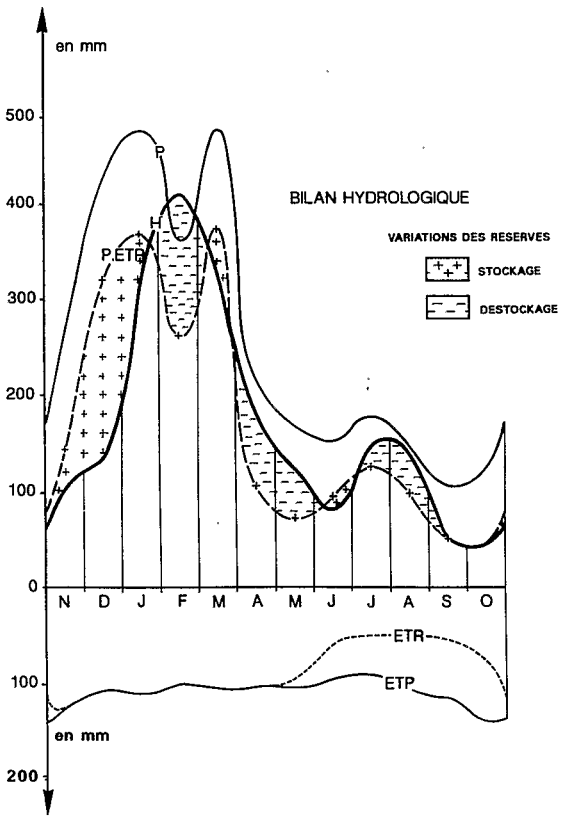



figure 5.79.

Efaho à Fanjahira

# Le sud

## Chapitre 6

Au sud du tropique du Capricorne et à l'ouest des chaînes Anosyennes, les bassins méridionaux de l'île totalisent une superficie globale d'environ 49 000 km$^2$ (8,2 % de Madagascar).

Les formations géologiques sont ainsi caractérisées :

- prolongation sud du socle précambrien avec d'est en ouest, les granites anciens de l'ANOSY, les leptynites, cipolins et quartzites du système Androyen, recouvertes partiellement (bassin du MANDRARE) par des coulées volcaniques crétacées, les leptynites du système du graphite et les amphibolites du système de VOHIBORY ;

- à l'ouest, les formations sédimentaires continentales du système du KAROO ;

- puis en auréole externe, et jusqu'au littoral, des formations sédimentaires marines jurasso-crétacées et éocènes à l'ouest, quaternaires au sud.

Les sols sont représentés par des sols ferrallitiques rouges assez peu épais, parfois indurés et imperméables, reposant sur des altérites cristallines (formations androyennes), des sols bruts d'érosions (lithosols) sur roches acides ou basiques et sur les formations calcaires de l'ouest et, principalement au sud, des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés (sables roux perméables) sur matériaux calcaires récents.

La forêt ombrophile dense est peu représentée, en lambeaux résiduels, sur l'ANOSY. La végétation dominante est la savane à hétéropogon et hyparrhénia, dans les parties amont du bassin, à cenchrus et evagrostes, sur les bassins moyens. Les zones les plus sèches sont le domaine des formations xérophiles (bush et tamariniers). Le long des cours d'eau, des galeries forestières sèches à baobabs sont présentes. Les hauteurs sont le plus souvent dénudées et propices au ruissellement.

Il est possible de distinguer trois ensembles hydrographiques (graphe 6.1.) :

- à l'est, drainant le cirque délimité par les chaînes anosyennes (BEAMPINGARATRA), le rebord Manambien de l'IVAKOANY (terminaison méridionale des hauts plateaux) et la petite dorsale du KELI HOROMBE de direction Nord-Sud, le bassin du MANDRARE, cours d'eau principal du Sud ;

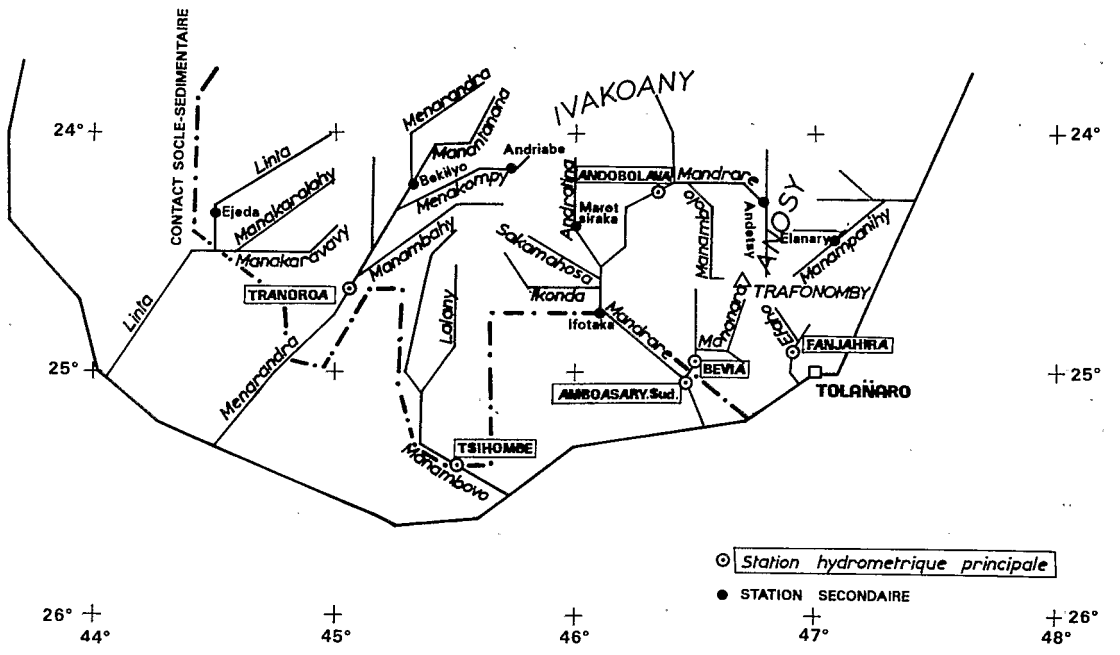
- au centre, entre la dorsale du KELI HOROMBE et le KAROO, un ensemble de bassin de direction nord-sud : MANAMBOVO, MENARANDRA et LINTA ;

- à l'ouest, entre la LINTA et l'ONILAHY, une zone aréïque sur les calcaires karstiques éocènes, avec une géomorphologie caractéristique : dépressions, gouffres, avens, grottes, etc.

La pluviométrie est la plus faible de l'île (avec l'extrême nord). Voisine de 1 000 mm au nord-est (contreforts de l'ANOSY et de l'IVAKOANY), elle décroît régulièrement vers le sud (500 mm vers BEHARA, cours inférieur du MANDRARE) et le sud-ouest (400 mm à l'embouchure de la LINTA).

figure 6.1.

Bassins du sud




# 1. BASSIN DU MANDRARE

Le bassin du MANDRARE, d'une superficie voisine de 13 000 km², draine un vaste cirque délimité par le rebord Manambien au nord et les chaînes anosyennes à l'est.

Le MANDRARE supérieur, issu des pentes nord du TRAFONOMBY (1 957 m), s'écoule au départ dans une étroite vallée tectonique orientée sud-nord, puis au contact des contreforts du MANAMBY, se dirige vers l'ouest, où il est rejoint, peu avant MAHALY, par son affluent rive gauche, le MANAMBOLO, puis par quelques affluents nord-sud drainant la façade méridionale du MANAMBY. Il se dirige ensuite vers le sud dans une large vallée alluviale et enfin, à hauteur de IFOTAKA, se dirige vers le sud-est et rejoint l'Océan Indien au sud d'AMBOASARY, après avoir reçu en rive gauche la MANANARA.

Sur près de 70 % de sa superficie, il repose sur les formations cristallines du socle (bassin supérieur) imperméables mais parfois arenisées. Son cours moyen repose sur des formations éruptives crétacées (basaltes et rhyolites) et fissurées assurant une certaine rétention. Au sud du bassin, des infiltrations se produisent dans les sables roux perméables.

La pluviométrie moyenne du bassin est voisine de 800 mm.

## 1.1. Le Mandrare à Andabolava amont

A une altitude voisine de 200 m, la station (24°13'S - 46°19'E) contrôle un bassin d'une superficie de 4 035 km².

L'échelle a été installée en 1951, mais les lectures défectueuses jusqu'en novembre 1953 n'ont pas été utilisées.

L'échelle, plusieurs fois restaurée, a été doublée d'un limnigraphe en 1970 (réinstallé en 1972) et d'une seconde échelle située à l'aval du seuil sur lequel était installée l'échelle amont, seule utilisée pour la détermination des débits.

Quarante neuf jaugeages à l'échelle amont et vingt-sept à l'échelle aval ont permis de tracer les différentes courbes d'étalonnage (huit en basses eaux) et une courbe d'étalonnage unique pour les moyennes eaux extrapolée jusqu'à 4 000 m³/s (les jaugeages compris entre 0,05 et 203 m³/s permettent de déterminer la courbe jusqu'à 300 m³/s). Les débits de pointe sont donc approchés.

Avec de nombreuses lacunes, dont certaines ont pu être complétées à l'échelle journalière à partir des relevés d'AMBOASARY (station située à l'aval du bassin), nous disposons des débits de novembre 1953 à février 1977.

La pluviométrie a été calculée (THIESSEN) à partir de neuf postes pluviométriques : TSIVORY (poids : .11), MAHALY (.31), RANOTSARA (.06), ESIRA (.23), MAROHOTRO (.12), ANDETSA (.12), etc.

Elle est assez correctement estimée à 820 mm.

### 1.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 6.1.

Mandrare à Andabolava
Coefficients de corrélation mensuels

| Hi ou Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .71 | .82 | .92 | .63 | .59 | (.08) | .71 | .63 | (.41) | .60 | .65 | .76 |
| Pi-1 | (-.14) | (-.21) | .67 | .58 | (.23) | (.34) | (.16) | (.19) | (.38) | .50 | .46 | (.18) |
| Qi- 1 | (.03) | -.05 | .58 | .65 | .56 | .49 | (.17) | (.35) | .86 | .56 | .61 | .48 |

nota : .71 (P > .99) 58 (P > .95) (.41) (P < .95)

Le graphe 6.2., où figurent les couples R (Pi) et R (Qi-1) des différents mois, montre l'importance prioritaire, même en saison sèche, des précipitations génératrices des ruissellements sur les secteurs imperméables du bassin. Les quelques formations d'altérites permettent un stockage momentané (vidange au cours du mois ou en début du mois suivant) avec report sur le débit du mois suivant.

figure 6.2.

Mandrare à Andabolava sud

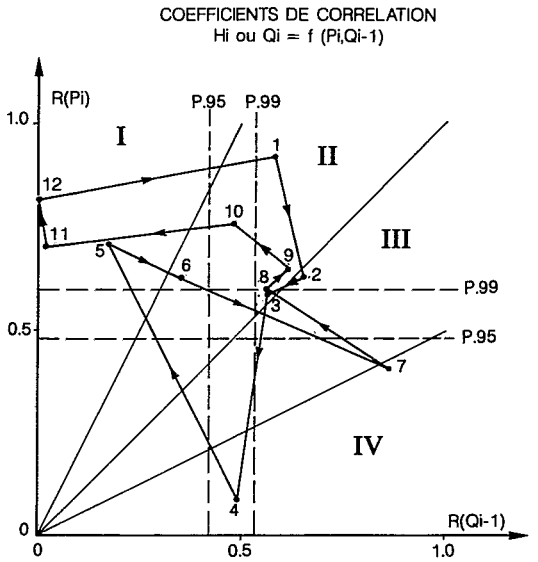



tableau 6.2.

Mandrare à Andabolava
Régressions intermensuelles

| | |
|---|---|
| H11 = .25 P11 - .64 | ($R^2$ = .51 P > .995) |
| H12 = .44 P12 - 23.2 | ($R^2$ = .68 P > .995) |
| H01 = .54 P01 + .26 P12 - 53.3 | ($R^2$ = .89 P > .995) |
| H02 = .49 P02 + .22 P01 - 41.1 | ($R^2$ = .64 P > .995) |
| H03 = .23 P03 + . 24 P020112 - 15.8 | ($R^2$ = .52 P > .995) |
| = .34 P03 + .34 H02 - 5.0 | ($R^2$ = .64 P > .995) |
| H04 = .23 (P04 à P12)/5 - 10.9 | ($R^2$ = .54 P > .995) |
| H05 = .48 P05 + 97 | ($R^2$ = .50 P > .995) |
| H06 = .17 P06 + .17 H014 + 82 | ($R^2$ = .57 P > .995) |
| H07 = .04 P07 + .83 H06 - 67 | ($R^2$ = .76 P > .995) |
| H08 = .22 P08 + .63 H07 - 1.03 | ($R^2$ = .62 P > .995) |
| H09 = .09 P09 + .43 H08 - 5 | ($R^2$ = .83 P > .995) |
| H10 = .09 P10 + .35 H09 - 14 | ($R^2$ = .66 P > .995) |

Entre les débits moyens mensuels du MANDRARE à ANDABOLAVA et AMBOASARY sont déterminées les régressions suivantes :

novembre à mars (113 valeurs), QANDA = .35 QAMBOA + 19.3, ($R^2$ = .80 P > .995)
avril à octobre (140 valeurs), QANDA = .57 QAMBOA + 2.74, ($R^2$ = .67 P > .995)

Ces régressions permettent d'évaluer les débits moyens mensuels manquants de février 1971 et février à avril 1975 et de compléter la chronique de débits mensuels présentée dans le tableau 6.3. (débits moyens mensuels et annuels, moyennes et écarts-type, quantiles mensuels également représentés sur le graphe 6.3.).

Les graphes 6.4. et 6.5. représentent des hydrogrammes en année humide (1962-1963, Q = 75.7 m³/s) et sèche (1967-68, Q = 10.7 m³/s). L'aspect très découpé des hydrogrammes et la faiblesse des débits de base entre les crues (en année humide, un certain soutien apparaît en janvier-février), correspond au caractère essentiellement imperméable du bassin.

figure 6.3.

Mandrare à Andabolava

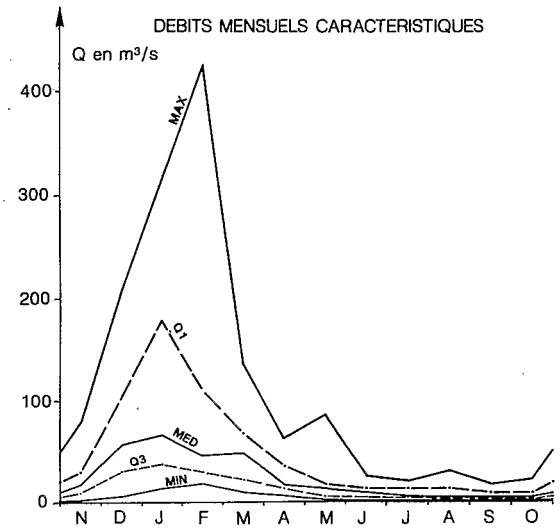



figure 6.4.

Mandrare à Andabolava

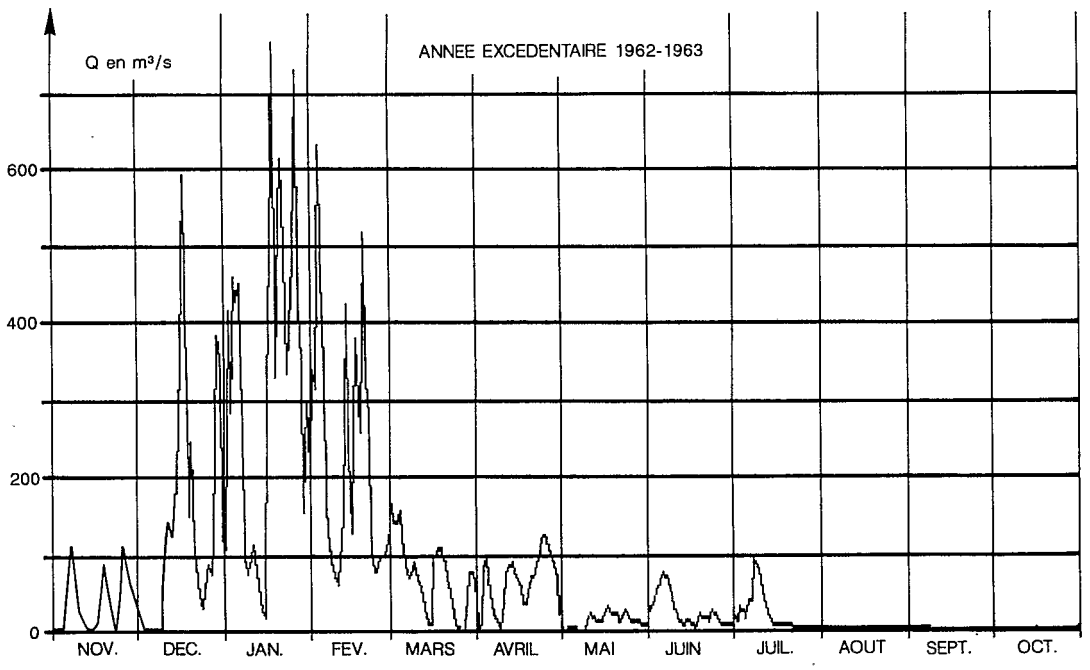


figure 6.5.

Mandrare à Andabolava

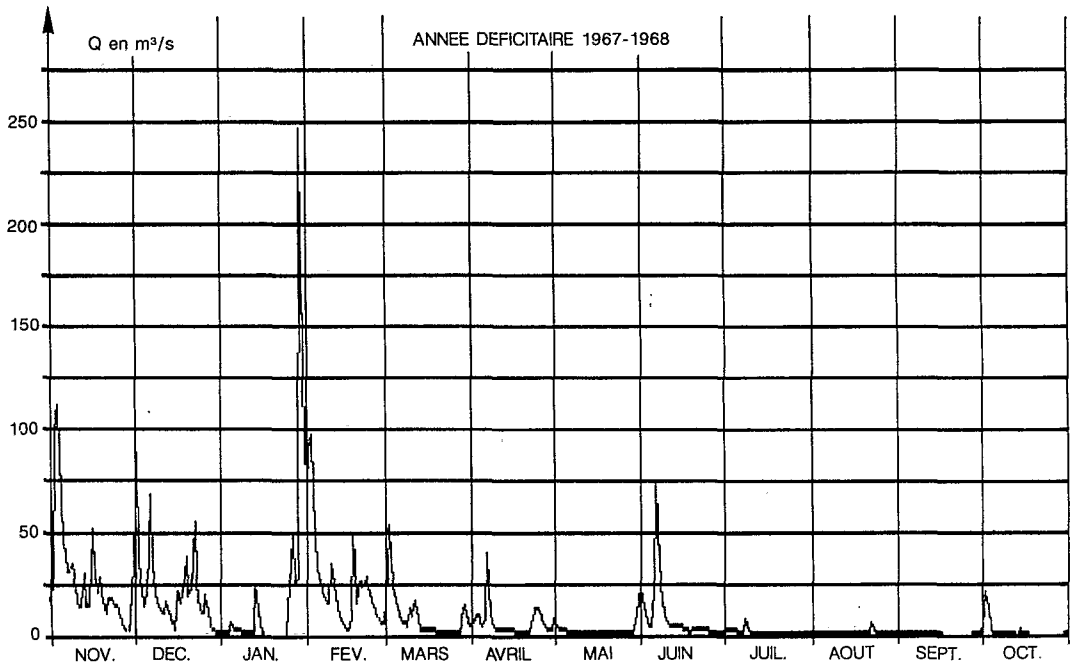



tableau 6.3.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1250700106 Andabolava-Sud amont Latitude : 24.00.00
Rivière : Mandrare Longitude : 46.30.00
Pays : Madagascar
Bassin : Mandrare Aire : 4 035 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1953/54 | 9.71 | 74.1 | 191 | 154 | 108 | 24.8 | 12.8 | 12.4 | 9.43 | 15.6 | 13.2 | 16.0 | 53.0 |
| 1954/55 | 45.2 | 51.4 | 253 | 19.2 | 27.2 | 16.4 | 9.47 | 6.36 | 5.02 | 5.82 | 4.50 | 9.29 | 38.1 |
| 1955/56 | 30.3 | 43.8 | 59.6 | 20.3 | 53.3 | 11.5 | 3.76 | 2.50 | 1.78 | 1.27 | 18.2 | 4.32 | 20.9 |
| 1956/57 | 10.6 | 31.4 | 127 | 31.6 | 59.3 | 13.3 | 10.7 | 8.53 | 5.88 | 3.61 | 4.03 | 1.43 | 25.7 |
| 1957/58 | 14. 2 | 22.5 | 14.7 | 86.4 | 34.7 | 15.1 | 7.61 | 2.07 | 4.54 | 22.3 | 16.9 | 2.87 | 19.9 |
| 1958/59 | 7.84 | 111 | 71.4 | 55.2 | 65.4 | 29.8 | 2.17 | 1.24 | 1.45 | 1.45 | .656 | .607 | 29.0 |
| 1959/60 | 80.5 | 79.5 | 67.4 | 68.8 | 21.5 | 9.03 | 3.54 | 2.29 | 2.06 | 1.29 | 2.26 | 8.83 | 28.8 |
| 1960/61 | 9.72 | 207 | 293 | 112 | 133 | 45.1 | 19.6 | 22.9 | 20.2 | 31.5 | 12.6 | 6.24 | 76.4 |
| 1961/62 | 10.7 | 165 | 60.3 | 41.4 | 17.0 | 24.2 | 88.3 | 15.4 | 6.80 | 3.50 | 2.65 | 2.04 | 36.7 |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1962/63 | 38.8 | 132 | 318 | 229 | 69.8 | 62.7 | 13.2 | 26.1 | 21.5 | 3.24 | 2.07 | 1.78 | 75.7 |
| 1963/64 | 44.0 | 69.4 | 64.1 | 117 | 137 | 12.5 | 13.8 | 20.6 | 19.2 | 16.8 | 4.85 | 12.5 | 41.2 |
| 1964/65 | 20.8 | 141 | 178 | 46.7 | 57.0 | 18.2 | 11.7 | 14.4 | 21.2 | 13.9 | 16.0 | 23.1 | 47.2 |
| 1965/66 | 16.8 | 87.7 | 16.4 | 44.9 | 13.6 | 14.6 | 20.7 | 14.4 | 6.17 | 4.74 | 2.62 | 3.90 | 20.4 |
| 1966/67 | 4.25 | 56.6 | 131 | 29.6 | 110 | 64.0 | 19.4 | 12.8 | 10.1 | 16.9 | 9.04 | 22.4 | 40.8 |
| 1967/68 | 27.9 | 22.8 | 18.6 | 26.6 | 8.99 | 6.39 | 3.00 | 8.94 | 2.23 | 1.45 | .867 | 2.28 | 10.7 |
| 1968/69 | 1.47 | 19.3 | 58.8 | 77.6 | 45.3 | 35.8 | 18.8 | 10.0 | 5.01 | 9.73 | 2.55 | 6.09 | 23.9 |
| 1969/70 | 5.30 | 106 | 286 | 281 | 112 | 35.6 | 16.9 | 11.6 | 7.96 | 4.63 | 2.45 | 1.16 | 71.5 |
| 1970/71 | 23.9 | 17.7 | 67.6 | (426) | 42.1 | 15.8 | 6.89 | 7.61 | 6.04 | 1.81 | 1.35 | 1.00 | (48.8) |
| 1971/72 | 13.0 | 35.1 | 26.0 | 21.9 | 45.0 | 13.4 | 7.10 | 8.14 | 4.21 | 3.71 | 3.85 | 4.92 | 15.6 |
| 1972/73 | 13.8 | 6.57 | 21.9 | 35.2 | 17.8 | 28.3 | 8.85 | 5.80 | 6.92 | 9.60 | 4.05 | 1.89 | 13.2 |
| 1973/74 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1974/75 | 25.6 | 90.4 | 179. | (88.5) | (60.5) | (19.3) | 13.1 | 17.3 | 13.8 | 14.3 | 10.1 | 10.3 | (45.1) |
| 1975/76 | 43.3 | 46.4 | 36.8 | 30.5 | 21.0 | 38.5 | 24.2 | 14.9 | 16.7 | 11.0 | 8.15 | 9.32 | 25.0 |
| 1976/77 | 20.1 | 58.8 | - | 29.4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 22.5 | 72.9 | 115. | 90.1 | 57.3 | 25.2 | 15.3 | 11.2 | 9.01 | 9.01 | 6.50 | 6.92 | 36.6 |
| Ecart-type | 18.2 | 51.7 | 98.9 | 99.5 | 39.4 | 16.1 | 17.8 | 6.78 | 6.66 | 8.05 | 5.59 | 6.60 | |
| Max. | 80.5 | 207 | 318 | 426 | 137 | 64.0 | 88.3 | 26.1 | 21.5 | 31.5 | 18.2 | 23.1 | |
| Q1 | 30.3 | 106 | 179 | 112 | 69.8 | 35.6 | 18.8 | 14.9 | 13.8 | 14.3 | 10.1 | 9.32 | |
| Méd. | 16.8 | 58.8 | 67.5 | 46.7 | 49.3 | 18.8 | 12.2 | 10.8 | 6.49 | 5.28 | 4.04 | 4.62 | |
| Q3 | 9.72 | 31.4 | 36.8 | 29.6 | 21.5 | 13.4 | 7.10 | 6.36 | 4.54 | 3.24 | 2.45 | 1.89 | |
| Min. | 1.47 | 6.57 | 14.7 | 19.2 | 8.99 | 6.39 | 2.17 | 1.24 | 1.45 | 1.27 | .656 | .607 | |

## 1.1.2. Apports annuels

Entre lames écoulées annuelles et précipitations moyennes annuelles sur le bassin, les relations (17 valeurs) sont les suivantes :

$H = .58 (P - 294)$ $(R^2 = .47\ P > .995)$

ou en prenant en compte la concentration des précipitations mensuelles de saison des pluies (indice KP), ci-dessus explicité (cf. NAMORONA 9.2)

$H = .5 (P - 1170 (1 - 2.37\ KP))$ $(R^2 = .76\ P > .995)$

$\overline{KP} = .18$, KPmax. = .235 (58-59), KPmin. = .130 (65-66).

Les débits moyens annuels des stations du MANDRARE présentent une régression très correcte ainsi explicitée :

QANDA = .34 QAMBOA + 12.3 $(R^2 = .73\ P > .995$, 22 valeurs).

Cette dernière relation permet d'évaluer les apports des années non observées.

1951-52 Q = 38.3 m³/s H = 300 mm
1952-53 Q = 32.0 m³/s H = 250 mm
1973-74 Q = 28.1 m³/s H = 220 mm

Nous obtenons ainsi un échantillon de vingt-cinq valeurs annuelles (1951-1952 à 1975-1976) dont les quantiles sont les suivants :

tableau 6.4.

Mandrare à Andabolava
Apports annuels

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Hmm | 107 | 131 | 165 | 254 | 384 | 475 | 566 |
| Q (m³/s) | 13.7 | 16.7 | 21.1 | 32.5 | 49.1 | 60.7 | 72.4 |
| q (l/s/km²) | 3.4 | 4.1 | 5.2 | 8.1 | 12.2 | 15 | 18 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 1.06, échelle 276 mm, position : - 22 mm, forme : .46).
Cinquantennales sèche et humide : 85 mm (Q = 10.9 m/s) et 688 mm (Q = 88 m³/s).

## 1.1.3. Crues

Les jaugeages réalisés au site amont (pour des cotes à l'échelle allant de 0,09 à 2,03 m) ne permettant qu'une évaluation très grossière des débits de très hautes eaux (PHE relevées lors du cyclone Félicie : 10,80 m), des observations complémentaires ont été effectuées à compter du 14/12/1972 à l'amont immédiat de la chute et en aval des deux plus anciennes échelles.
Les relations entre hauteurs de moyennes et hautes eaux établies, l'extrapolation logarithmique a porté sur la partie supérieure de la courbe d'étalonnage de cette dernière station.

tableau 6.5.

Mandrare à Andabolava
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | | Hm | Obs |
|---|---|---|---|---|---|
| 1948-49 | ≥ 513 | 05/06/49 | 18 h 00 | 2,70 | Min |
| 1949-50 | ≥ 599 | 14/12/49 | 12 h 00 | 2,90 | Min |
| 1950-51 | 4720 | 30/01/54 | 00 h 00 | 8,50 | PHE 9,64 Av. |
| 1951-52 | 621 | 07/03/52 | 12 h 00 | 2,95 | Min |
| 1952-53 | 291 | 13/02/53 | 12 h 00 | 2,00 | Min |
| 1953-54 | 965 | 27/01/54 | 06 h 00 | 4,10 | 3rel |
| 1954-55 | 1390 | 06/01/55 | 18 h 00 | 4,95 | 3rel |
| 1955-56 | 802 | 24/03/56 | 06 h 00 | 3,75 | 3rel |
| 1956-57 | 925 | 02/01/57 | 18 h 00 | 4,02 | 3rel |
| 1957-58 | 367 | 16/02/58 | 12 h 00 | 2,65 | Min |

suite

| Année | Qm³/s | Date | | Hm | Obs |
|---|---|---|---|---|---|
| 1958-59 | 828 | 30/12/58 | 18 h 00 | 3,81 | 3 rel |
| 1959-60 | 815 | 03/02/60 | 18 h 00 | 3,85 | 3rel |
| 1960-61 | 1590 | 21/01/61 | 18 h 00 | 5,39 | 3rel |
| 1961-62 | 808 | 28/12/61 | 18 h 00 | 3,83 | 3rel |
| 1962-63 | 867 | 26/01/63 | 18 h 00 | 3,97 | 3rel |
| 1963-64 | 4200 | 02/03/64 | | 8,48 | PHE |
| 1964-65 | 1360 | 25/01/65 | 06 h 00 | 4,95 | 3rel |
| 1965-66 | 381 | 03/12/65 | 18 h 00 | 2,77 | 3rel |
| 1966-67 | 664 | 03/01/67 | 06 h 00 | 3,50 | 3rel |
| 1967-68 | 332 | 30/01/68 | 06 h 00 | 2,60 | 3rel |
| 1968-69 | 534 | 11/02/69 | 06 h 00 | 3,20 | 3rel |
| 1969-70 | 2960 | 24/02/70 | 21 h 00 | 7,23 | 3rel |
| 1970-71 | 7200 | 03/02/71 | | 10,80 | PHE 11,8 Av. |
| 1971-72 | (291) | 31/01/72 | 06 h 00 | 2,45 | Min |
| 1972-73 | (226) | 12/01/73 | 12 h 00 | 2,17 | Min |
| 1973-74 | (465) | | | | Min 3,04 Av. |
| 1974-75 | 798 | 05/01/75 | 21 h 00 | | Lim 3,97 Av. |
| 1975-76 | 416 | 01/01/76 | 00 h 00 | | Lim 2,88 Av. |
| 1976-77 | 647 | 03/01/77 | 12 h 00 | | Lim 3,66 Av. |

Les crues de 1951, 1955 et 1961 sont dues à des épisodes dépressionnaires sur le canal de MOZAMBIQUE et le sud de Madagascar, ainsi que celles de 1964 (GISELE), 1965 (GINETTE), 1970 (JANE), 1971 (FELICIE).
Une année sur deux, le maximum est observé entre début janvier et la mi-février (date médiane : 26 janvier - dates extrêmes : 17 novembre et 5 juin).

QMax - 1.58 QJMax + 100 ($R^2$ = .92)

L'ajustement d'une loi de Fréchet à l'échantillon des 29 maximums annuels correspond aux quantiles suivants

tableau 6.6.

Mandrare à Andabolava
Débits maximaux annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 691 | 1490 | 2510 | 8110 | (13400) |
| q l/s/km² | 171 | 370 | 622 | 2000 | (3320) |

## 1.1.4. Basses eaux

Le tarissement apparaît dix années sur vingt-cinq, souvent très perturbée par des crues adventices. Le bassin, bien qu'à tendance principale imperméable, dispose de quelques petits aquifères dans les zones altérées du socle, alimentés en saison des pluies à travers les latérites indurées imperméables mais peu épaisses et souvent fissurées. Il est possible de mettre en évidence une tendance exponentielle des débits de base de coefficient a compris entre .011 et .018 (cf. graphe 6.6., tarissement 1970). Le coefficient moyen $\alpha$ = .0145 montre un épuisement rapide (Tc = 48 jours) des réserves d'altérites.

Les débits caractéristiques d'étiage observés sont présentés dans le tableau 6.7.

figure 6.6.

Mandrare à Andabolava

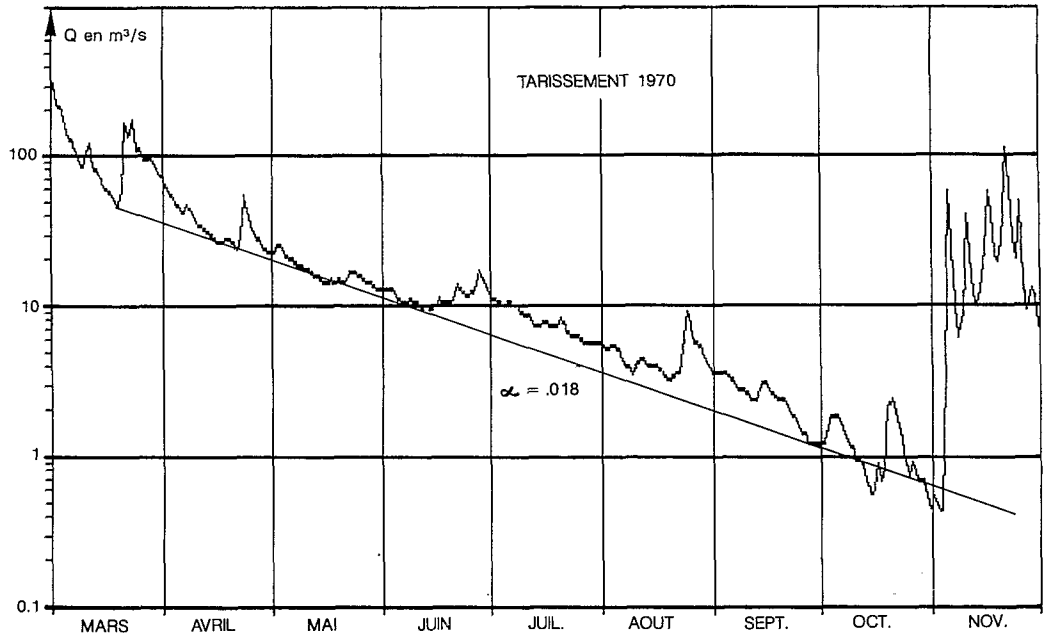



tableau 6.7.

Mandrare à Andabolava
Débits d'étiage (m³/s)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1953 | | | | .975 | 28-11 |
| 1954 | 12.5 | 10.7 | 7.74 | 7.22 | 18-07 |
| 1955 | 5.57 | 4.53 | 4.35 | 4.33 | 11-09 |
| 1956 | 1.93 | .850 | .265 | .092 | 13-11 |
| 1957 | 4.20 | 1.37 | .727 | .603 | 30-10 |
| 1958 | 3.18 | 1.13 | .888 | .619 | 21-10 |
| 1959 | 951 | .639 | .482 | .448 | 21-10 |
| 1960 | 1.30 | .678 | .424 | .424 | 02-11 |
| 1961 | 12.1 | 4.62 | 2.17 | 1.89 | 24-11 |
| 1962 | 3.73 | 1.84 | .978 | .795 | 30-10 |
| 1963 | 3.20 | 1.72 | 1.43 | .754 | 08-05 |
| 1964 | 6.13 | 3.66 | 2.94 | 2.66 | 17-11 |
| 1965 | 8.99 | 6.96 | 5.17 | 4.00 | 01-08 |
| 1966 | 3.41 | 1.36 | .499 | .306 | 19-12 |
| 1967 | 10.1 | 6.07 | 3.03 | 1.82 | 06-10 |

suite

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1968 | 1.15 | .815 | .524 | .294 | 27-10 |
| 1969 | 4.12 | 1.57 | 1.21 | .959 | 24-11 |
| 1970 | 4.05 | 1.40 | .710 | .444 | 03-11 |
| 1971 | 2.17 | .603 | .434 | .344 | 08-11 |
| 1972 | 3.18 | 1.78 | .931 | .480 | 05-01 |
| 1973 | | | | .657 | 29-10 |
| 1974 | | | | | |
| 1975 | | | | .020 | 14-05 |
| 1976 | 8.61 | 5.38 | 3.73 | 1.33 | 09-11 |

Sur vingt-trois années observées, le débit journalier minimal apparaît dix-sept fois (73 % des cas) entre le 10 septembre et le 30 novembre. Quatre fois sur vingt-cinq, l'étiage est précoce (mai à août) et deux fois il a été tardif (décembre, janvier).

L'échantillon de vingt-trois valeurs fournit les quantiles suivants :

tableau 6.8.

Mandrare à Andabolava
Débits minimaux QJmin

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q ($m^3/s$) | .109 | .187 | .314 | .747 | 1.80 | 3.01 | 4.82 |
| q ($l/s/km^2$) | .03 | .05 | .08 | .20 | .45 | .75 | 1.2 |

Loi de FRECHET (test Brunet-Moret : 1.90, échelle : 88 $m^3/s$, position : - 349 $m^3/s$, forme : - .595).
Cinquantennales sèche et humide : .042 $m^3/s$ (.01 $l/s/km^2$) et 8.65 $m^3/s$ (2.1 $l/s/km^2$).
Bien qu'ils semblent ne jamais s'annuler totalement, les débits d'étiage sont très faibles (moins de 1 $l/s/km^2$), dix-neuf années sur vingt environ).

DCE = 1.06 QJmin + 35 ($R^2$ = .92 P > .995) DCE/QJmin = 1.53

DC11 = 1.36 QJmin + 86 ($R^2$ = .92 P > .995)

DC9 = 1.45 QJmin + 2.87 ($R^2$ = .92 P > .995)

## 1.1.5. Bilan hydrologique

Calculé sur la période 1951-70, le bilan hydrologique du MANDRARE est le suivant : l'écoulement (300 mm) représente 37 % de la pluviométrie (820 mm) et le déficit d'écoulement est de 520 mm.

tableau 6.9.

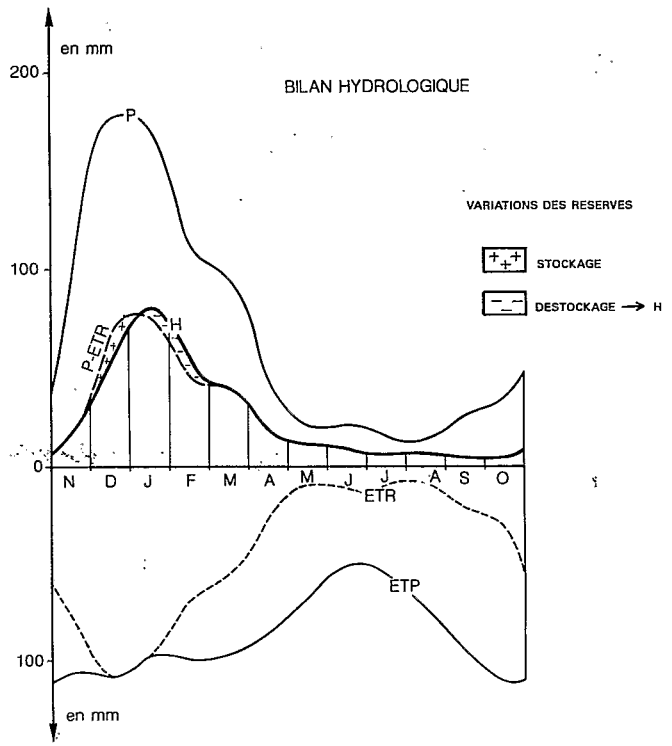
Mandrare à Andabolava
Termes mensuels et annuels du bilan hydrologique

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 91 | 177 | 172 | 112 | 96 | 44 | 20 | 230 | 14 | 14 | 26 | 34 | 820 |
| ETP | 106 | 109 | 96 | 100 | 97 | 85 | 68 | 51 | 54 | 76 | 95 | 110 | 1050 |
| ETR | 76 | 109 | 96 | 68 | 56 | 27 | 9 | 12 | 8 | 8 | 22 | 29 | 520 |
| P-ETR | 15 | 68 | 76 | 44 | 40 | 17 | 11 | 8 | 6 | 6 | 4 | 5 | 300 |
| H | 15 | 51 | 80 | 57 | 40 | 17 | 11 | 8 | 6 | 6 | 4 | 5 | 300 |
| ΔR+ | | 17 | | | | | | | | | | | 17 |
| ΔR- | | | 4 | 13 | | | | | | | | | 17 |
| R | 0 | 17 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

L'écoulement (300 mm) est presqu'entièrement alimenté par le ruissellement direct sur les secteurs imperméables et le drainage rapide au cours de chaque mois des petites nappes. On observe un report intermensuel assez faible (17 mm) du stockage de fin décembre sur janvier et février. L'ETR est réduite à 50 % de l'ETP et, au niveau mensuel, n'égale l'ETP que deux mois sur douze (décembre et janvier) (cf. graphe 6.7.).

figure 6.7.

Mandrare à Andabolava



## 1.2. Le Mandrare à Amboasary

La station d'AMBOASARY (25°03'S - 46°28'E) contrôle un bassin versant d'une superficie de 12 435 km² (altitude moyenne du bassin : 400 m).

L'échelle a été installée en juillet 1951 à 400 m en aval du radier, puis en octobre 1960 sur une pile du pont routier. Un premier limnigraphe installé en décembre 1968 a été détruit en janvier 1970, puis février 1971.

Le limnigraphe réinstallé en mars 1971 à l'aval d'une pile pour le protéger a subi des ensablements fréquents rendant son exploitation difficile.

Cent soixante mesures de débit (entre 8 l/s et 2 700 m³/s) ont été effectuées. L'étalonnage de la section de mesures est très délicat en raison de la très forte instabilité du lit en basses eaux et de la relative dispersion des mesures de hautes eaux. Vingt-quatre courbes ont été tracées pour les basses eaux, six entre 1 500 et 8 000 m³/s et trois au-dessus. L'extrapolation menée jusqu'à 15 000 m³/s ne peut fournir que des valeurs approximatives pour les plus fortes pointes de crue.

Après complètement et corrections de certaines valeurs douteuses, nous disposons d'une chronique de débit de juillet 1951 à décembre 1976.

La pluviométrie par le bassin est assez correctement estimée (790 mm) à partir de vingt stations pluviométriques bien réparties : MAHALY (poids : .14), EBELO-RANOMAINTY (.09), AMBATOMIKA (.10), IFOTAKA (.08), TSIVORY (.08), etc.

### 1.2.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 6.10.

Mandrare à Amboasary
Coefficients de corrélation

| Hi ou Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .90 | .87 | .92 | .64 | .77 | (.09) | .71 | .75 | .49 | .71 | .46 | .85 |
| Pi-1 | (.22) | (-.17) | .57 | .61 | (.15) | .76 | (.42) | (.13) | .71 | .72 | .68 | (.28) |
| Qi- 1 | (.21) | (-.09) | .67 | (.37) | (.31) | .51 | (.21) | (.39) | .74 | .65 | .82 | .57 |

Sur le graphe 6.8., on observe la forte prédominance du facteur précipitations (bassin à tendance imperméable) pour la quasi-totalité des mois (avril est déterminé par la pluviométrie de mars, report d'écoulement). En juillet, août et septembre, le débit antérieur (ou la précipitation du mois antérieur) pèse en facteur secondaire.

figure 6.8.

Mandrare à Amboasary

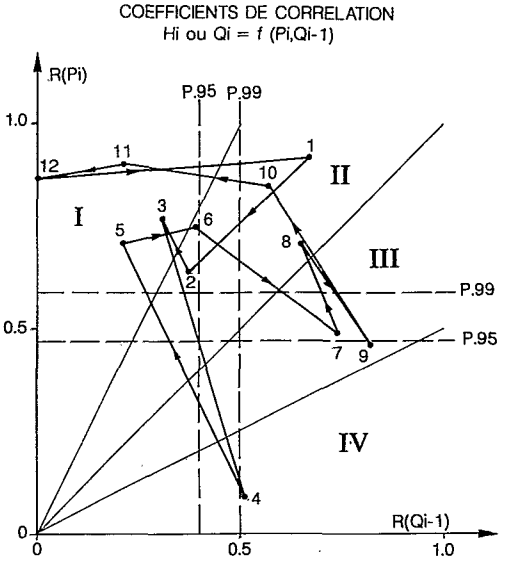



tableau 6.11.

Mandrare à Amboasary
Régressions intermensuelles

| | |
|---|---|
| H11 = .14 P11 + .03 P10 - 7.8 | ($R^2$ = .86 P > .995) |
| H12 = .42 P12 + 35 | ($R^2$ = .76 P > .995) |
| H01 = .51 P01 + .23 P1211 - 83 | ($R^2$ = .90 P > .995) |
| H02 = .31 P02 + .21 P01 - 35 | ($R^2$ = .66 P > .995) |
| H03 = .35 P03 + . 07 P0201 - 22 | ($R^2$ = .65 P > .995) |
| H04 = .07 P04 + .02 P0201- 4 | ($R^2$ = .71 P > .995) |
| H05 = .15 P05 + .02 P04 - 3 | ($R^2$ = .52 P > .995) |
| H06 = .08 P06 + .15 H05 + 4 | ($R^2$ = .72 P > .995) |
| H07 = .06 P07 + .79 H06 - 9 | ($R^2$ = .72 P > .995) |
| H08 = .13 P08 + .80 H07 - 1 | ($R^2$ = .81 P > .995) |
| H09 = .03 P09 + .60 H08 - .6 | ($R^2$ = .94 P > .995) |
| H10 = .07 P10 + .49 H09 - 1.2 | ($R^2$ = .78 P > .995) |

Le tableau 6.12 présente les débits mensuels et annuels observés de 1951 à 1976 ainsi que les moyennes interannuelles, écarts-type et quantiles des différent mois.

tableau 6.12.

Débits moyens mensuels et annuels

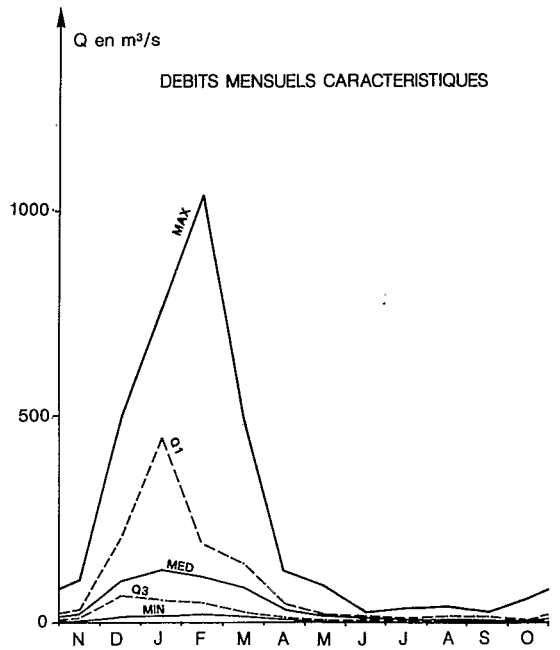
Station : 1250700103 Amboasary Latitude : 24.03.00
Rivière : Mandrare Longitude : 46.28.00
Pays : Madagascar
Bassin : Mandrare Aire : 12 435 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1950/51 | - | - | - | - | - | - | - | - | 12.1 | 5.53 | 7.68 | 1.79 | - |
| 1951/52 | 9.80 | 37.4 | 123 | 110 | 487 | 66.4 | (45) | (26) | 11.0 | 3.10 | 4.50 | 4.00 | (77.6) |
| 1952/53 | 20.1 | 83.1 | 69.2 | 179 | 142 | 44.9 | 14.4 | 21.8 | 18.8 | 13.5 | 13.8 | 9.90 | 52.5 |
| 1953/54 | 9.27 | 207 | 579 | 700 | 496 | 48.8 | 25.8 | 23.5 | 15.5 | 11.3 | 7.15 | 6.53 | 178 |
| 1954/55 | 102 | 181 | 768 | 51.1 | 41.0 | 26.8 | 16.4 | 12.0 | 8.85 | 6.12 | 2.35 | 2.29 | 102 |
| 1955/56 | 13.1 | 70.1 | 89.9 | 27.5 | 93.3 | 34.8 | 12.7 | 7.22 | 4.79 | 2.85 | 17.4 | 15.9 | 32.5 |
| 1956/57 | 28.1 | 62.8 | 299 | 49.4 | 122 | 16.4 | 6.27 | 5.87 | 1.65 | .254 | .501 | .002 | 49.4 |
| 1957/58 | 5.04 | 19.8 | 12.4 | 166 | 49.0 | 14.1 | 1.35 | .124 | 1.06 | 32.0 | 26.3 | 3.43 | 27.6 |
| 1958/59 | 23.3 | 278 | 123 | 33.8 | 48.1 | 28.1 | 1.17 | .760 | .586 | .735 | .066 | .053 | 44.8 |
| 1959/60 | 24.8 | 84.1 | 95.1 | 92.8 | 18.8 | 5.59 | 4.20 | 1.68 | 2.75 | 1.67 | 1.74 | 8.55 | 28.5 |
| 1960/61 | 10.3 | 501 | 712 | 221 | 296 | 80.8 | 14.5 | 24.8 | 34.8 | 40.8 | 21.3 | 9.76 | 164 |
| 1961/62 | 14.2 | 184 | 76.5 | 62.1 | 19.0 | 15.8 | 88.8 | 15.8 | 5.89 | 3.37 | .947 | 1.82 | 40.7 |
| 1962/63 | 18.8 | 412 | 505 | 391 | 60.7 | 20.5 | 13.2 | 19.0 | 12.4 | 5.21 | 1.77 | .354 | 122 |
| 1963/64 | 33.3 | 86.4 | 37.8 | 111 | 210 | 7.79 | 5.52 | 10.8 | 9.81 | 15.3 | 4.77 | 7.99 | 45.0 |
| 1964/65 | 29.5 | 266 | 256 | 64.8 | 67.1 | 19.6 | 4.70 | 6.44 | 14.9 | 22.2 | 19.4 | 37.3 | 67.3 |
| 1965/66 | 20.5 | 182 | 31.5 | 185 | 28.2 | 18.3 | 16.8 | 18.0 | 10.8 | 4.79 | 4.35 | 4.27 | 43.7 |
| 1966/67 | 15.2 | 180 | 388 | 122 | 251 | 128 | 35.1 | 18.7 | 20.5 | 29.6 | 19.7 | 65.9 | 106 |
| 1967/68 | 57.8 | 67.2 | 29.4 | 46.2 | 19.0 | 12.1 | 4.20 | 16.0 | 4.73 | 1.91 | .168 | 7.28 | 22.2 |
| 1968/69 | 2.87 | 23.3 | 159 | 144 | 88.6 | 55.1 | 32.6 | 15.5 | 9.42 | 11.5 | 6.04 | 9.61 | 46.5 |
| 1969/70 | 4.64 | 222 | 696 | 515 | 150 | 47.7 | 22.4 | 15.0 | 9.40 | 5.60 | 2.02 | .980 | 141 |
| 1970/71 | 44.0 | 33.1 | 215 | 1040 | 82.7 | 32.2 | 20.5 | 23.8 | 20.3 | 12.5 | 8.07 | 7.69 | 128 |
| 1971/72 | 34.5 | 101 | 64.1 | 51.3 | 94.8 | 29.6 | 19.8 | 17.5 | 11.1 | 10.4 | 12.5 | 18.3 | 38.7 |
| 1972/73 | 65.5 | 14.5 | 44.9 | 45.5 | 26.1 | 48.9 | 18.0 | 10.7 | 12.4 | 20.6 | 5.89 | 1.55 | 26.2 |
| 1973/74 | 73.6 | 126 | 127 | 19.5 | 13.6 | 21.1 | 29.2 | 20.1 | 10.5 | 6.07 | 3.86 | .677 | 37.6 |
| 1974/75 | 45.2 | 329 | 511 | 194 | 92.0 | 32.5 | 19.2 | 16.7 | 9.13 | 3.28 | .577 | .288 | 104 |
| 1975/76 | 8.47 | 94.7 | 45.6 | 50.2 | 24.2 | 68.5 | 19.1 | 4.05 | 5.92 | 3.34 | .988 | 7.50 | 27.9 |
| 1976/77 | 17.5 | 95.6 | - | - | - | - | - | - | - | | | | |
| Moyenne | 28.1 | 152 | 242 | 187 | 121 | 37.0 | 19.6 | 14.1 | 10.8 | 10.6 | 7.45 | 8.99 | 69.5 |
| Ecart-type | 24.1 | 124 | 244 | 241 | 134 | 27.5 | 18.6 | 7.82 | 7.57 | 10.5 | 7.64 | 14.0 | |
| Max. | 102 | 501 | 768 | 1040 | 496 | 128 | 88.8 | 24.8 | 34.8 | 40.8 | 26.3 | 65.9 | |
| Q1 | 34.5 | 207 | 447 | 190 | 146 | 48.9 | 21.5 | 18.9 | 13.7 | 14.4 | 13.2 | 9.69 | |
| Méd. | 20.3 | 99.2 | 123 | 110 | 82.7 | 29.6 | 16.6 | 15.6 | 9.81 | 6.07 | 4.77 | 6.53 | |
| Q3 | 10.3 | 67.2 | 54.8 | 49.8 | 27.1 | 17.3 | 5.89 | 6.83 | 5.34 | 3.31 | 1.36 | 1.26 | |
| Min. | 2.87 | 14.5 | 12.4 | 19.5 | 13.6 | 5.59 | 1.17 | .124 | .586 | .254 | .066 | .002 | |

Sur le graphique 6.9. où sont représentés ces quantiles, on note la très forte variance des différents mois dont les débits sont peu régularisés par le soutien de réserves assez faibles sur ce bassin.

figure 6.9.

Mandrare à Amboasary




Les graphes 6.10. et 6.11. montrent l'aspect des hydrogrammes annuels (année excédentaire : 1953-54, Q = 178 m³/s et année déficitaire : 1957-58, Q = 27.6 m³/s). On notera la faiblesse des débits de base, sauf en année très excédentaire où, de janvier à mars, un certain soutien est apporté par les quelques nappes d'altérites.

figure 6.10.

Mandrare à Amboasary

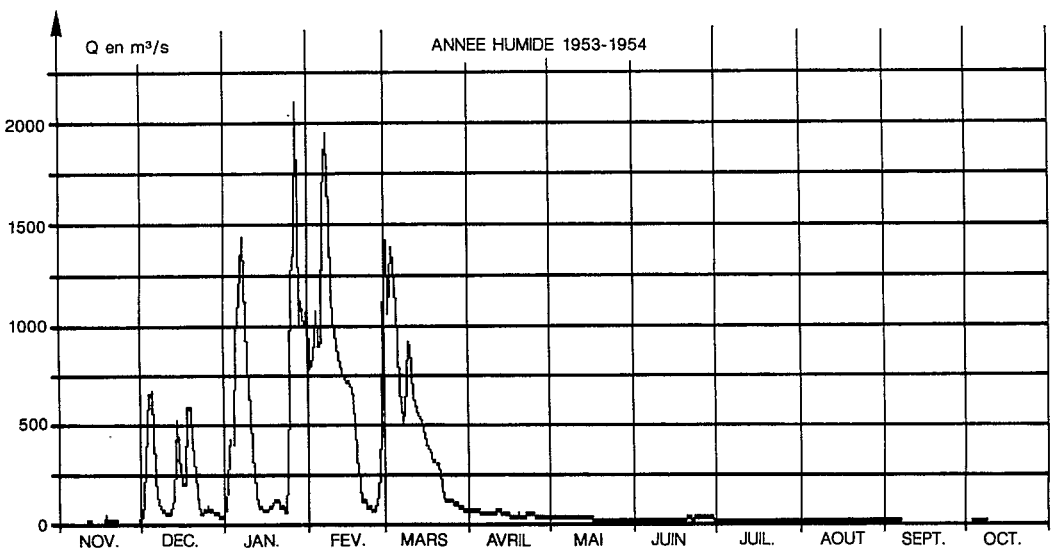
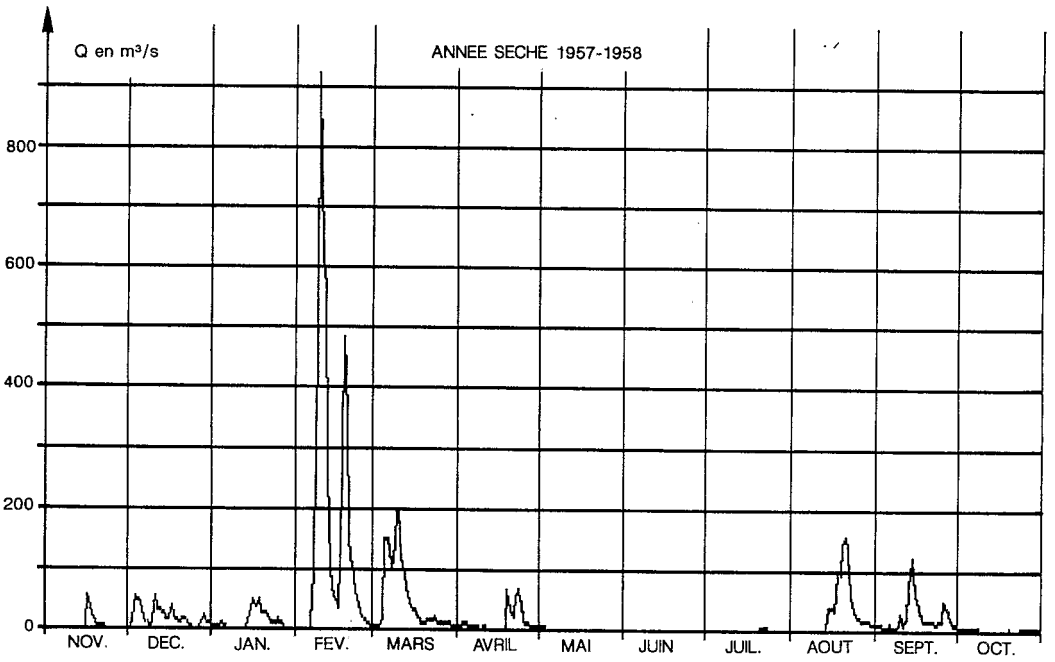


figure 6.11.

Mandrare à Amboasary




## 1.2.2. Apports annuels

Lames écoulées et précipitations annuelles sont liées par l'équation de régression :

$H = .46 (P - 391)$ $(R^2 = .53\ P > .995)$

ou mieux

$H = (1.6\ P^{2.07}) * 10^{-4}$ $(R^2 = .59)$

La prise en compte du coefficient de concentration des précipitations mensuelles Cp améliore la régression :

$H = 4.4 * 10^{-3} * P^{1.87} * Cp^{1.56}$ $(R^2 = .86\ P > .995)$

Cp (valeur moyenne .293) est compris entre .189 (1967-68 Ke = 8 %)

et .419 (1969-70 Ke = 38 %).

L'ajustement d'une fonction statistique à l'échantillon des vingt-cinq valeurs annuelles observées fournit les quantiles suivants :

tableau 6.13.

Mandrare à Amboasary
Apports annuels
(H moyen = 177 mm)

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Hmm | 60 | 67 | 81 | 139 | 251 | 336 | 421 |
| Q ($m^3/s$) | 23.3 | 26.4 | 31.9 | 54.8 | 98.9 | 132 | 166 |
| q ($l/s/km^2$) | 1.9 | 2.1 | .2.6 | 4.4 | 8.0 | 10.6 | 13.3 |

Loi de GOODRICH (test Brunet-Moret : 2.79, échelle : 122 mm, position : 54 mm, forme : 1.00).
Cinquantennales sèche et humide : 57 mm (Q = 22.5 $m^3/s$) et 533 mm (Q = 210 $m^3/s$).

## 1.2.3. Crues

### 1.2.3.1 Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

L'étalonnage de hautes eaux s'appuie sur les jaugeages du 1/12/1960 au 23/01/1961 et des 17 et 18/01/1970, réalisés dans des conditions assez difficiles (variations rapides du plan d'eau, équipements).

La réexploitation de ces mesures a permis d'adopter une seule courbe de hautes eaux entre 3,00 et 7,00 m. Au-delà, l'estimation des débits de très hautes eaux demeure imprécise, en raison d'un important débordement rive droite (sur plus de 2,5 km le 02/02/1971).

tableau 6.14.

Mandrare à Amboasary sud
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | | Hm | Obs |
|---|---|---|---|---|---|
| 1950-51 | 12000 | | | 7,30 | PHE |
| 1951-52 | 3000 | 19/03/52 | 12 h 00 | 4,60 | 3rel |
| 1952-53 | 1160 | 03/03/53 | 06 h 00 | 3,44 | 3rel |
| 1953-54 | 2250 | 07/01/54 | 12 h 00 | 4,20 | 3rel |
| 1954-55 | 4060 | 09/01/55 | 06 h 00 | 5,20 | 3rel |
| 1955-56 | 1340 | 24/03/56 | 12 h 00 | 3,72 | PHE |
| 1956-57 | 1710 | 04/01/57 | 12 h 00 | 4,00 | 3rel |
| 1957-58 | 1230 | 09/02/58 | 12 h 00 | 3,62 | 3rel |
| 1958-59 | 1810 | 31/12/59 | 12 h 00 | 6,06 | 3rel |
| 1959-60 | 1320 | 04/01/60 | 12 h 00 | 4,20 | 3rel |
| 1960-61 | 5270 | 15/12/60 | 06 h 00 | 5,90 | 3rel |
| 1961-62 | 970 | 08/05/62 | 06 h 00 | 3,95 | 3rel |
| 1962-63 | 5270 | 05/02/63 | 09 h 00 | 5,90 | 3rel |

suite

| Année | Qm³/s | Date | | Hm | Obs |
|---|---|---|---|---|---|
| 1963-64 | 5530 | 02/03/64 | 18 h 00 | 6,00 | 3rel |
| 1964-65 | 2890 | 19/12/64 | 09 h 00 | 4,65 | 3rel |
| 1965-66 | 2810 | 11/02/66 | 09 h 00 | 4,90 | 3rel |
| 1966-67 | 2510 | 03/01/67 | 18 h 00 | 4,76 | 3rel |
| 1967-68 | 490 | 05/11/67 | 06 h 00 | 3,17 | 3rel |
| 1968-69 | 820 | 12/02/69 | 06 h 30 | 3,83 | Lim |
| 1969-70 | 6860 | 25/02/70 | 12 h 00 | 6,43 | 3rel |
| 1970-71 | 15000 | 02/02/71 | 23 h 00 | 8,20 | PHE |
| 1971-72 | 767 | 31/01/72 | 21 h 00 | 3,55 | 3rel |
| 1972-73 | 689 | 12/01/73 | 22 h 00 | 3,45 | Lim |
| 1973-74 | 1180 | 03/01/74 | 06 h 00 | 4,10 | 3rel |
| 1974-75 | 2600 | 25/12/74 | 06 h 00 | 4,80 | 3rel |
| 1975-76 | 844 | 31/12/75 | 12 h 00 | 3,65 | 3rel |
| 1976-77 | 2810 | 03/01/77 | | 4,90 | 3rel |
| 1977-78 | 5270 | | | 5,90 | PHE |
| 1978-79 | 11800 | 27/12/78 | | 7,88 | PHE |

## 1.2.3.2 Résultats de l'enquête historique

Bien que les renseignements recueillis dans les dossiers d'archives des Travaux publics soient incomplets, trois crues supérieures au maximum de l'année 1950-51 sont signalées depuis 1921, dont une (1932-33) est comparable (très large débordement rive droite) à la crue consécutive au cyclone Félicie (février 1971).

En l'absence d'autres éléments, les maximums annuels de 1970-71, 1932-33, 1938-39, 1921-22 et de 1950-51 peuvent être considérés comme les plus importants de la période 1921-1979.

Une année sur deux, le maximum est observé entre début janvier et la mi-février (date médiane : 11 janvier - dates extrêmes : 5 novembre et 8 mai).

L'ajustement d'une loi de Fréchet à l'échantillon des 29 maximums annuels permet de déterminer les quantiles de récurrence inférieure à la décennale. Pour les récurrences plus rares, un ajustement graphique permet de déterminer les quantiles en tenant compte de l'information historique.

tableau 6.15.

Mandrare à Amboasary
Débits maximaux annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s (échantillon 50-79) | 2150 | 5070 | (8200) | (19500) | (26600) |
| Q m³/s (avec inform. histor.) | | | 8000 | 16000 | 19500 |
| q 1s/km² | 173 | 408 | 645 | 1290 | 1570 |

## 1.2.4. Basses eaux

En raison des nombreuses précipitations en saison sèche et des faibles débits de base souvent observés en saison sèche, il n'a été possible de déterminer des droites de tarissement que quatorze années sur vingt-cinq.

On observe le plus souvent deux droites de tarissement :

- la première correspond à une décroissance "lente" du coefficient $\alpha 1$ compris entre 0.01 (Tc = 69 jours) et 0.028 (Tc = 25 jours). Observé en général entre mai-juin et fin août pour un débit initial de 10 à 50 m³/s, ce tarissement assez rapide correspond à la vidange des principales nappes d'altérites du bassin supérieur d'extension assez limitée (125 à 250.10⁶ m³ soit une lame équivalente de 10 à 20 mm) ;

- la seconde, à décroissance rapide, ($\alpha 2$ compris entre 0.05 et 0.17 soit Tc compris entre quatre et quatorze jours) correspond à l'épuisement des dernières petites nappes, ainsi qu'aux pertes par infiltration dans le lit sableux et par évaporation. Ce tarissement est tardif (septembre-octobre) et correspond à un débit initial de 0.5 à 5 m³/s. Le graphe 6.12. donne un exemple de ces tarissements successifs (année 1962).

figure 6.12.

Mandrare à Amboasary

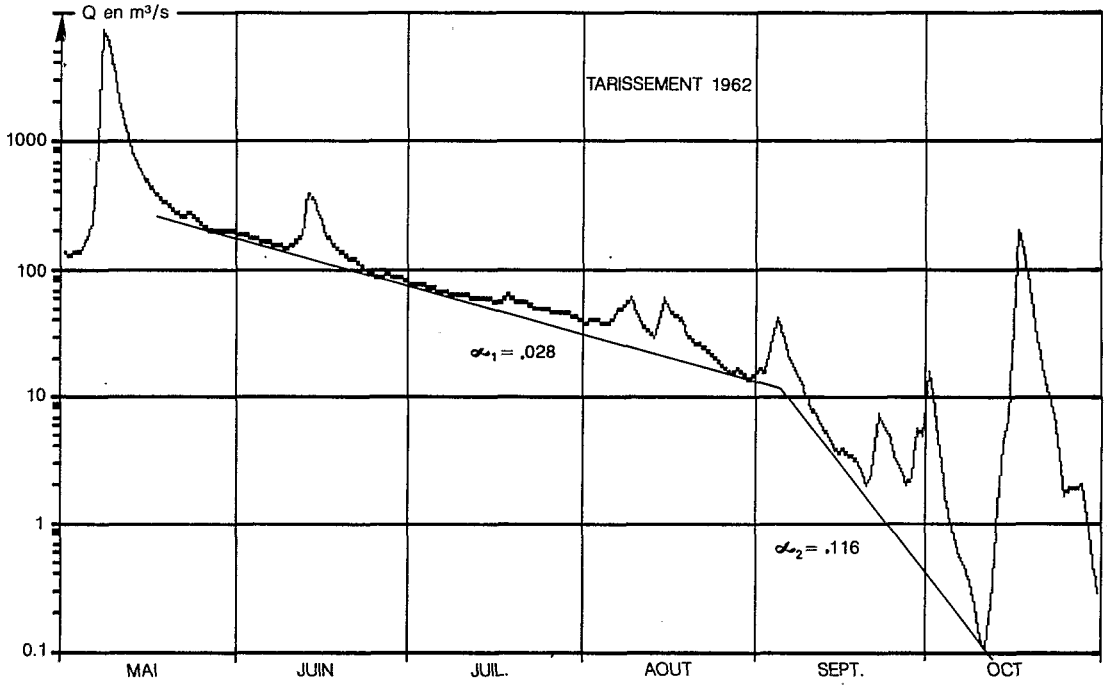


tableau 6.16.

Mandrare à Amboasary
Débits d'étiage ($m^3/s$)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1953 | 13.1 | 8.14 | 6.68 | 2.23 | 28-11 |
| 1954 | 12.1 | 6.15 | 4.22 | 2.78 | 31-10 |
| 1955 | 6.69 | 1.95 | 1.51 | .671 | 03-11 |
| 1956 | 5.19 | 2.76 | 1.81 | 1.24 | 02-09 |
| 1957 | .342 | .002 | .000 | .000 | 23-10 |
| 1958 | 1.28 | .101 | .044 | .023 | 07-06 |
| 1959 | .505 | .028 | .010 | .007 | 11-11 |
| 1960 | .773 | 0.80 | .042 | .032 | 21-11 |
| 1961 | 15.4 | 7.62 | 3.51 | 2.02 | 27-11 |
| 1962 | 3.76 | 340 | .038 | .011 | 11-10 |
| 1963 | 5.97 | .803 | .158 | .095 | 16-10 |
| 1964 | 5.94 | 4.23 | 3.15 | 2.39 | 03-10 |
| 1965 | 8.72 | 4.38 | 2.80 | 1.62 | 03-06 |
| 1966 | 4.67 | 1.26 | .320 | .089 | 17-10 |
| 1967 | 19.1 | 14.3 | 11.5 | 7.69 | 11-10 |
| 1968 | 1.89 | .245 | .030 | .019 | 23-09 |
| 1969 | 9.32 | 1.86 | .283 | .019 | 23-11 |
| 1970 | 6.36 | 1.15 | .554 | .320 | 02-11 |
| 1971 | 15.3 | 5.55 | 2.69 | 1.66 | 10-10 |
| 1972 | 7.10 | 3.25 | 1.54 | .667 | 13-10 |
| 1973 | 8.10 | 1.29 | .000 | .000 | 09-10 |
| 1974 | 5.92 | .424 | .126 | .051 | 16-10 |
| 1975 | 1.08 | .287 | .197 | .087 | 05-11 |
| 1976 | 2.17 | .310 | .102 | .015 | 17-10 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin |
|---|---|---|---|---|
| Max | 19.1 | 14.3 | 11.5 | 7.69 |
| Q1 | 9.02 | 4.30 | 2.75 | 1.64 |
| Méd. | 5.96 | 1.28 | .301 | .092 |
| Q3 | 2.03 | .299 | .043 | .019 |
| Min. | .342 | .002 | 0 | 0 |

L'étiage absolu s'est produit deux fois (en vingt-quatre ans) avant le 15 juin et vingt fois en octobre ou novembre (date médiane : 15 au 20 octobre). Bien que rarement à sec (deux fois en vingt-quatre ans), les débits d'étiage restent très faibles (inférieurs à 1 $m^3/s$) deux années sur trois.

L'échantillon de vingt-quatre valeurs observées présente les quantiles suivants :

tableau 6.17.

Mandrare à Amboasary (QJmin)

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q ($m^3/s$) | 0 | .001 | .022 | .264 | 1.34 | 2.66 | 4.38 |
| q ($l/s/km^2$) | 0 | - | - | 0.02 | .11 | .21 | .35 |

Loi de GOODRICH (test Brunet-Moret : 8.87, échelle : 547 l/s, position : - 9.5 l/s, forme : 1.90).
Cinquantennales sèche et humide : 0 $m^3/s$ et 7.28 $m^3/s$ (.59 $l/s/km^2$).

Les débits d'étiage en surface sont généralement très faibles mais l'inferoflux important est une ressource notable pour les riverains qui creusent des puits dans le lit sableux du MANDRARE.

## 1.2.5. Bilan hydrologique

Sur la période 1951-1970, le bilan hydrologique moyen (et non médian) est le suivant :

Pour une pluviométrie moyenne interannuelle de 790 mm, la lame écoulée moyenne (185 mm) correspond à un déficit moyen d'écoulement de 605 mm et un coefficient moyen d'écoulement Ke = 23 %.

Le graphe 6.13. représente les variations de la lame écoulée et du déficit d'écoulement en fonction des précipitations sur le bassin. Avec une assez forte dispersion due à la non-prise en compte des facteurs secondaires (répartition spatiale des précipitations sur le bassin, concentration des précipitations, températures, etc.), les lames écoulées s'organisent autour d'une courbe moyenne d'allure exponentielle. Le déficit d'écoulement croît avec les précipitations en tendant asymptomatiquement (mais sans jamais la rejoindre dans la gamme des précipitations probables) vers une limite correspondant à l'évapotranspiration potentielle régionale (1 100 mm).

figure 6.13.

Mandrare à Amboasary

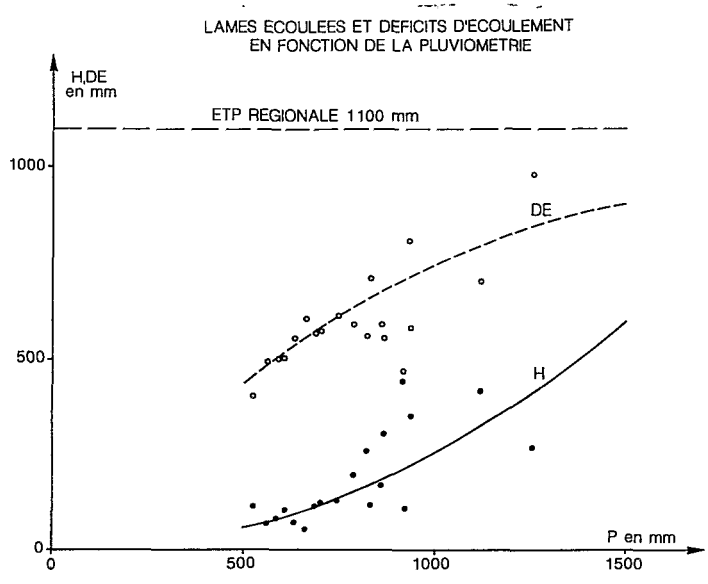


figure 6.14.

Mandrare à Amboasary

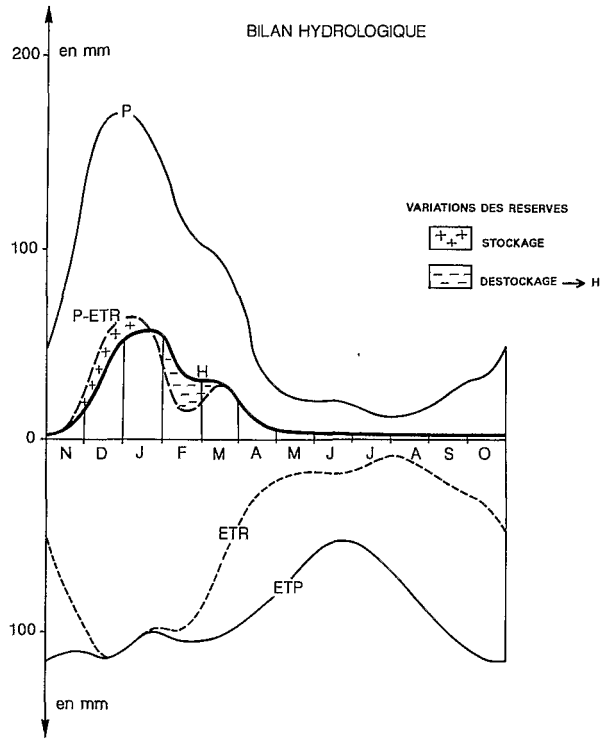



tableau 6.18.

Mandrare à Amboasary
Termes mensuels et annuels
du bilan hydrologique (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 81 | 167 | 163 | 114 | 95 | 39 | 22 | 20 | 14 | 13 | 25 | 37 | 790 |
| ETP | 111 | 114 | 101 | 105 | 102 | 89 | 71 | 53 | 60 | 80 | 99 | 115 | 1100 |
| ETR | 76 | 114 | 101 | 100 | 67 | 31 | 18 | 17 | 12 | 11 | 23 | 35 | 605 |
| P-ETR | 5 | 53 | 62 | 14 | 28 | 8 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 185 |
| H | 5 | 36 | 57 | 34 | 30 | 8 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 185 |
| ΔR+ | | 17 | 5 | | | | | | | | | | 22 |
| ΔR- | | | | 20 | 2 | | | | | | | | 22 |
| R | 0 | 17 | 22 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

Le schéma du bilan reproduit celui du bassin supérieur du MANDRARE avec un stockage en saison des pluies légèrement supérieur, drainé en février et mars, et des débits de saison sèche plus réduits en raison de l'infiltration dans les formations sableuses du lit. L'ETR est fortement réduite, 55 % de l'ETP qui n'est satisfaite que deux à trois mois sur douze.

## 1.3. La Mananara à Bevia

Le bassin de la MANANARA, dernier affluent important en rive gauche du MANDRARE, est situé sous le vent de la chaîne anosyenne, sur des formations imperméables appartenant principalement au système androyen (leptynites et cipolins) et, en bordure orientale, au granites anciens de l'ANOSY.

Les sols sont en général peu évolués (lithosols) et les formations altérées pouvant former magasin sont très peu importantes. À l'exception des crêtes, le bassin est boisé et recouvert d'une brousse xérophile dense, avec présence d'une galerie forestière de tamariniers. D'une altitude moyenne de 350 m, le bassin est drainé par deux émissaires principaux : la MANANARA d'orientation Est-Ouest et un affluent de même importance qui coule du Nord au Sud.

La pluviométrie est caractérisée par un gradient très prononcé sur les premières pentes (environ 1 100 mm sur les lignes de crêtes à 700 mm sur les piémonts) et ne dépasse pas 500 mm au niveau du confluent avec le MANDRARE.

La station de BEVIA (24°51S - 46°27'E) contrôle un bassin de 1 085 km². Elle est située sur un affleurement rocheux ensablé ce qui entraîne des remaniements de la section lors des fortes crues.

Cent sept mesures de débits (entre 3 l/s et 135 m³/s) ont permis d'établir un étalonnage approché (une courbe par année d'observation) avec une extrapolation importante entre 200 et 3 000 m³/s. Les observations (complétées ou corrigées) existent de juillet 1951 à mai 1973 (fermeture de la station).

La pluviométrie sur le bassin est estimée à 600 mm en moyenne annuelle. Les valeurs mensuelles établies par la méthode de THIESSEN (AMBATOMIKA (poids : .53), ISAKA-IVONDRO (.19), BEHARA (.11), EMINIMINY (.10), etc. sont surévaluées en raison du poids statistique trop élevé des stations situées hors du bassin et au vent de la chaîne anosyenne. Elles ont été corrigées d'un coefficient (.624) pour tenir compte de la valeur moyenne annuelle de la pluviométrie calculée à partir des isohyètes.

### 1.3.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 6.19.

Mananara à Bevia
Coefficients de corrélation mensuels

| Hi ou Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec PI | .67 | .69 | .82 | .84 | .82 | (.32) | .82 | .86 | (.40) | .81 | .70 | .75 |
| Pi-1 | -.001 | (.23) | (.23) | .54 | (.08) | .46 | .50 | (-.01) | .65 | .82 | (.43) | .48 |
| Qi- 1 | (.10) | (-.16) | .58 | .44 | (.0) | (.25) | (.02) | (-.02) | .78 | .57 | .52 | (.41) |

L'influence des précipitations du mois (et du mois précédent en juillet et août) est prédominante (graphe 6.15.) et atteste le caractère imperméable du bassin. L'influence des réserves éventuelles est négligeable.

figure 6.15.

Mananara à Bevia

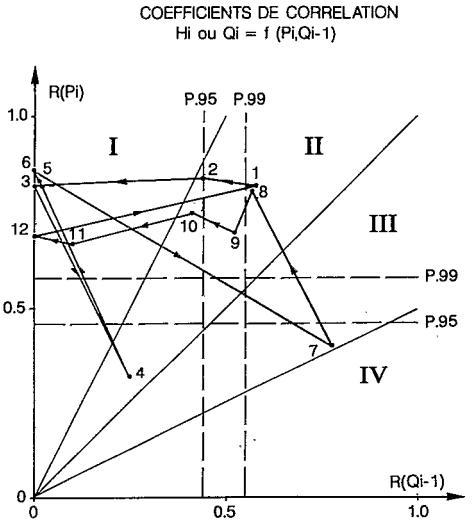



tableau 6.20.

Mananara à Bevia
Régressions intermensuelles

| | |
|---|---|
| H11 = .22 P11 - 6.47 | ($R^2$ = .45 P > .995) |
| H12 = .25 P12 + .165 P11 - 11.3 | ($R^2$ = .54 P > .995) |
| H01 = .62 P01 + .38 P1211 - 47.8 | ($R^2$ = .71 P > .995) |
| H02 = .43 P02 + .14 P01 - 22.2 | ($R^2$ = .78 P > .995) |
| H03 = .52 P03 + . 13 P0201 - 22.6 | ($R^2$ = .71 P > .995) |
| H04 = .19 P0403 - 1.75 | ($R^2$ = .31 P > .995) |
| H05 = .25 P05 + .11 P04 - 3.85 | ($R^2$ = .75 P > .995) |
| H06 = .37 P06 - 1.83 | ($R^2$ = .74 P > .995) |
| H07 = .20 P0706 + 14 | ($R^2$ = .40 P > .995) |
| H08 = .16 P08 + .19 P0706 - 1.7 | ($R^2$ = .82 P > .995) |
| H09 = .17 P09 + .15 P0807 - 2.7 | ($R^2$ = .68 P > .995) |
| H10 = .095 P10 + .06 P09 - 48 | ($R^2$ = .67 P > .995) |

Les relations ont permis de compléter ou corriger les valeurs de mars et mai 1961.

tableau 6.21.

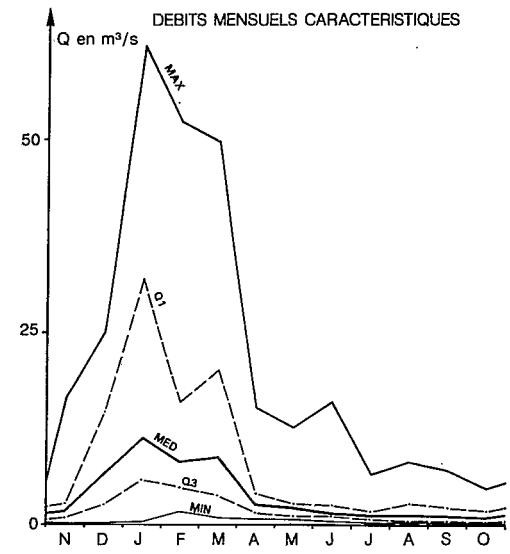
Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1250702206 Bevia Latitude : 24.51.00
Rivière : Mananara Longitude : 46.27.00
Pays : Madagascar
Bassin : Mandrare Aire : 1 085 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1950/51 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1.08 | 1.49 | 1.13 | - |
| 1951/52 | 4.71 | 3.75 | 6.04 | 8.02 | 50.0 | 4.84 | 3.11 | 3.67 | 1.71 | 1.47 | 1.73 | 1.26 | 7.56 |
| 1952/53 | 2.76 | 4.86 | 12.1 | 10.2 | 6.83 | 7.12 | 2.83 | 11.2 | 5.00 | 3.30 | 3.49 | 1.90 | 5.93 |
| 1953/54 | 1.23 | 5.06 | 35.3 | 19.1 | 20.4 | 2.67 | 1.44 | 1.97 | 1.37 | 1.26 | .944 | .980 | 7.61 |
| 1954/55 | 16.5 | 8.47 | 34.4 | 2.25 | 9.07 | 3.72 | 2.51 | 2.09 | 1.59 | 1.40 | .942 | .710 | 7.02 |
| 1955/56 | 1.29 | 3.62 | 10.2 | 4.83 | 9.48 | 5.22 | 2.82 | 1.16 | .808 | .532 | 5.27 | 1.29 | 3.88 |
| 1956/57 | 1.86 | 6.38 | 19.1 | 8.29 | 8.35 | 2.45 | 2.16 | 1.23 | .659 | .449 | .833 | .161 | 4.32 |
| 1957/58 | .056 | .277 | .325 | 16.1 | 5.48 | 1.52 | .588 | .710 | 1.32 | 6.78 | 7.05 | 2.13 | 3.44 |
| 1958/59 | 1.62 | 14.9 | 15.1 | 6.72 | 21.2 | 7.20 | .592 | .441 | .521 | .298 | .151 | .265 | 5.78 |
| 1959/60 | 3.24 | 14.7 | 6.88 | 8.18 | 3.75 | 1.89 | 2.42 | 1.07 | .701 | .346 | .174 | .275 | 3.63 |
| 1960/61 | .677 | 25.2 | 40.3 | 8.03 | (25.8) | 2.67 | (2.23) | 16.0 | 6.60 | 8.08 | 2.26 | 1.36 | (11.7) |
| 1961/62 | 1.65 | 13.8 | 2.83 | 1.92 | .876 | .896 | 12.6 | .436 | .275 | .363 | .482 | .410 | 3.08 |
| 1962/63 | .252 | 21.9 | 62.4 | 25.3 | 5.32 | 1.30 | .950 | 1.34 | 2.06 | .955 | .507 | .589 | 10.2 |
| 1963/64 | 1.92 | 6.75 | 6.22 | 7.64 | 24.3 | 1.56 | .598 | 1.25 | 1.06 | 5.57 | 1.55 | 2.11 | 5.07 |
| 1964/65 | 1.15 | 17.8 | 32.4 | 4.88 | 6.10 | 2.87 | 2.26 | 3.02 | 6.57 | 2.85 | 2.27 | 3.63 | 7.22 |
| 1965/66 | 2.17 | 17.0 | 2.00 | 12.5 | 3.83 | 1.58 | 2.32 | 3.11 | 1.46 | 1.21 | 1.34 | 1.00 | 4.08 |
| 1966/67 | 1.18 | 10.2 | 18.5 | 2.23 | 13.1 | 15.2 | 3.97 | 1.37 | 2.53 | 4.37 | 1.99 | 4.59 | 6.66 |
| 1967/68 | 4.17 | 2.53 | 5.68 | 6.68 | 2.18 | 1.79 | 1.27 | 1.52 | .761 | 1.26 | .411 | 2.34 | 2.53 |
| 1968/69 | 1.85 | 1.18 | 7.84 | 19.3 | 9.04 | 2.74 | 3.53 | 2.07 | .950 | 2.30 | .477 | .272 | 4.20 |
| 1969/70 | .328 | 13.5 | 59.1 | 52.5 | 21.3 | 4.15 | 1.32 | 1.00 | .669 | .447 | .219 | .170 | 12.7 |
| 1970/71 | .622 | .385 | 12.2 | 49.5 | 2.28 | 1.41 | .928 | 1.56 | 1.03 | .444 | .299 | .323 | 5.62 |
| 1971/72 | .458 | 1.37 | 1.01 | 2.40 | 18.4 | 2.73 | 2.45 | 1.75 | 1.22 | 1.28 | 2.92 | 1.00 | 3.10 |
| 1972/73 | 7.59 | 1.31 | 2.51 | 5.24 | 1.76 | 3.27 | - | | | - | - | - | - |
| Moyenne | 2.60 | 8.86 | 17.8 | 12.8 | 12.2 | 3.58 | 2.51 | 2.76 | 1.85 | 2.09 | 1.67 | 1.27 | 5.82 |
| Ecart-type | 3.56 | 7.41 | 18.3 | 13.8 | 11.6 | 3.13 | 2.51 | 3.78 | 1.86 | 2.21 | 1.74 | 1.15 | |
| Max. | 16.5 | 25.2 | 62.4 | 52.5 | 50.0 | 15.2 | 12.6 | 16.0 | 6.60 | 8.08 | 7.05 | 4.59 | |
| Q1 | 2.76 | 14.7 | 32.4 | 16.1 | 20.4 | 4.15 | 2.83 | 2.56 | 1.89 | 2.85 | 2.26 | 1.90 | |
| Méd. | 1.64 | 6.57 | 11.2 | 8.03 | 8.70 | 2.70 | 2.26 | 1.52 | 1.22 | 1.26 | 1.14 | 1.00 | |
| Q3 | .677 | 2.53 | 5.68 | 4.88 | 3.83 | 1.58 | 1.13 | 1.11 | .731 | .449 | .477 | .323 | |
| Min. | .056 | .277 | .325 | 1.92 | .876 | .896 | .588 | .436 | .275 | .298 | .151 | .161 | |

Les débits mensuels caractéristiques (quantiles) sont représentés sur le graphe 6.16. On notera la forte dispersion des valeurs mensuelles dont la distribution empirique est très dissymétrique (effet du caractère imperméable du bassin).

figure 6.16.
Mananara à Bevia




Les graphes 6.17. et 6.18. représentent les hydrogrammes annuels d'une année excédentaire (1962-63, Q = 10.2 m³/s) et d'une année déficitaire (1971-72, Q = 3.10 m³/s). Les crues sont bien individualisées, correspondant aux épisodes pluvieux, et entre les crues, les débits de base restent très faibles (bassin imperméable).

figure 6.17.
Mananara
à Bevia

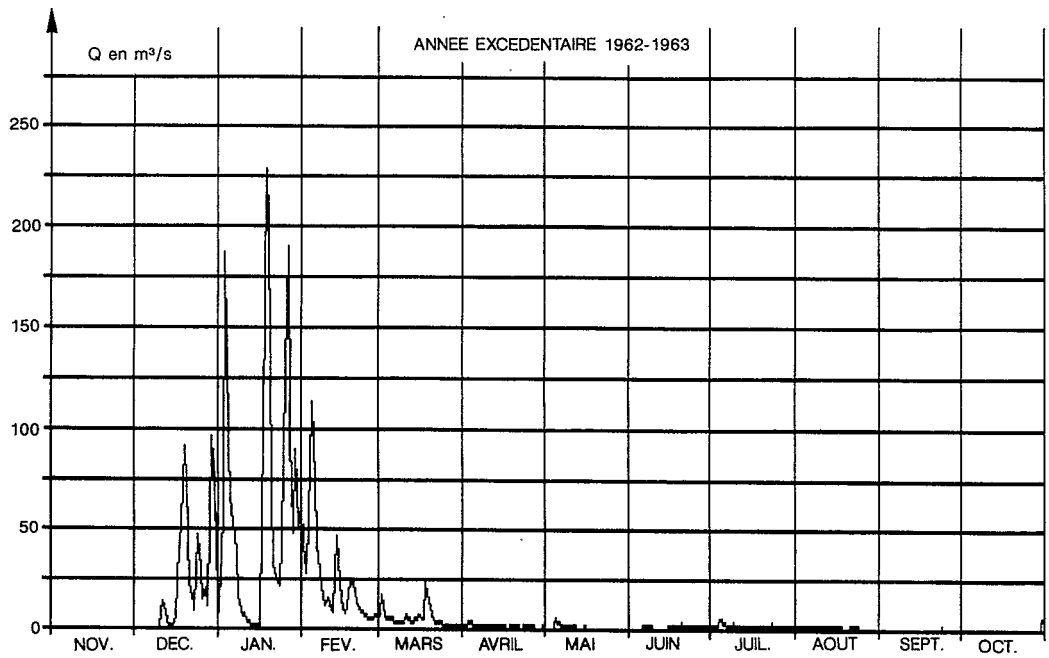
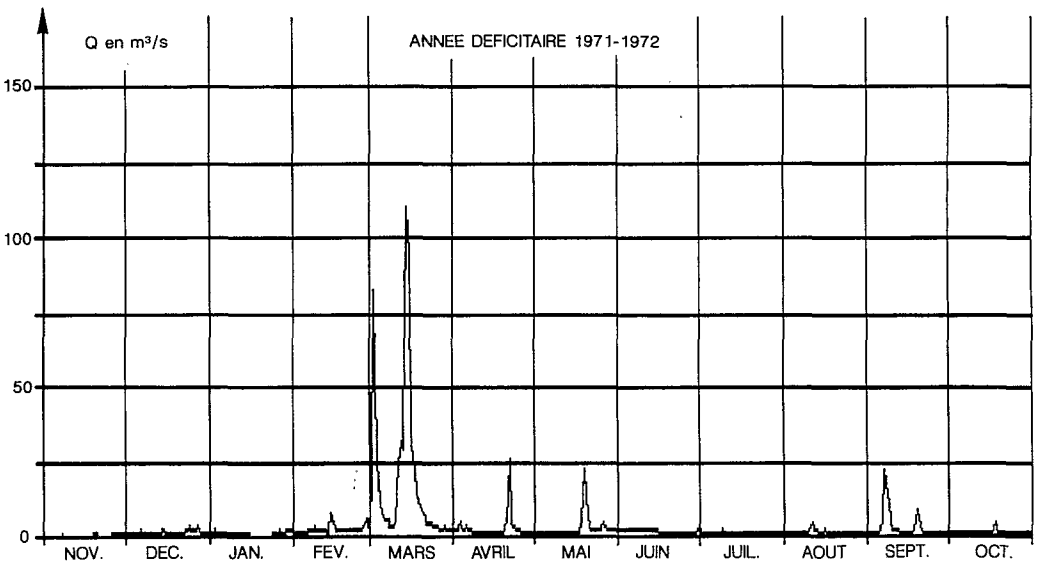


figure 6.18.

Mananara à Bevia




## 1.3.2. Apports annuels

Entre les lames annuelles et les précipitations moyennes sur le bassin, les relations sont les suivantes :

$H = .0011 * P^{1.86}$ $(R^2 = .60 \quad P > .995)$

ou, en prenant en compte un coefficient relatif à la concentration des précipitations de décembre à mars :

$KP = (P12 * P01 * P02 * P03)^{.25} / P$ ann.

KP moyenne géométrique des précipitations mensuelles sur total annuel :

$H = .0176 * P^{1.7} * KP^{.87}$ $(R^2 = .74 \quad P > .995)$

Les quantiles de la distribution statistique de l'échantillon de vingt et une valeurs annuelles observées sont les suivants :

tableau 6.22.

Mananara à Bevia

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Hmm | 83 | 92 | 107 | 150 | 226 | 287 | 353 |
| Q (m³/s) | 2.85 | 3.16 | 3.68 | 5.16 | 7.77 | 9.87 | 12.1 |
| q (1s/km²) | 2.6 | 2.9 | 3.4 | 4.8 | 7.2 | 9.1 | 11.1 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 1.09, échelle : 99.9 mm, position : 50 mm, forme : .675).

Cinquantennales sèche et humide : 75 mm (Q = 2.58 m³/s) et 449 mm (Q = 15.4 m³/s).

## 1.3.3. Crues

### 1.3.3.1 Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

En raison des détarages fréquents de basses et moyennes eaux liés à la remobilisation plus ou moins importante d'un banc de sable rive droite, l'extrapolation à partir des seuls résultats de jaugeages demeurait difficile.

Avec la réinstallation d'une station un peu plus en aval (prise de BERAKETA - A = 1 207 km²) et le relevé de quelques maximums de crue sur les deux sites au cours de la période 1973-79, les étalonnages de hautes eaux de ces stations ont pu être menés de pair, après :

- corrélation entre les hauteurs d'eau de BEVIA et de BERAKETA ;
- extrapolation des hautes eaux à BERAKETA (seuil déversant).

Plus hautes eaux relevées pour la période 1973-1979

| Année | BEVIA | BERAKETA* | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1974-75 | 3,59 | 3,14 | PHE cyclone Camille |
| 1977-76 | 7,65 | 6,68 | PHE |
| 1978-79 | 6,00 | 5,19 | PHE cyclone Angèle |

* Base de l'échelle limnigraphe calée 5,56 m sous la borne RC 45,42.

tableau 6.23.

Mandrare à Bevia

| Année | Qm³/s | Date | | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1950-51 | 2140 | | | 6,50 | PHE |
| 1951-52 | 394 | 19/03/52 | 12 h 00 | 3,20 | 3rel |
| 1952-53 | 156 | 26/01/53 | 18 h 00 | 2,10 | 3rel |
| 1953-54 | 215 | 05/01/54 | 18 h 00 | 2,50 | 3rel |
| 1954-55 | 274 | 05/01/55 | 18 h 00 | 2,74 | 3rel |
| 1955-56 | 122 | 22/03/56 | 18 h 00 | 1,80 | 3rel |
| 1956-57 | 111 | 13/02/57 | 21 h 00 | 1,70 | 3rel |
| 1957-58 | 183 | 06/02/58 | 18 h 00 | 2,34 | 3rel |
| 1958-59 | 159 | 21/03/59 | 18 h 00 | 2,13 | 3rel |
| 1959-60 | 190 | 28/12/59 | 18 h 00 | 2,40 | 3rel |
| 1960-61 | 2880 | 27/03/61 | 13 h 00 | 7,72 | PHE |
| 1961-62 | 343 | 07/05/62 | 18 h 00 | 2,70 | 3rel |
| 1962-63 | 362 | 19/12/62 | 21 h 00 | 2,76 | 3rel |
| 1963-64 | 795 | 02/03/64 | 06 h 00 | 3,90 | 3rel |
| 1964-65 | 330 | 26/01/65 | 18 h 00 | 2,65 | 3rel |
| 1965-66 | 231 | 22/02/66 | 21 h 00 | 2,27 | 3rel |
| 1966-67 | 173 | 09/01/67 | 21h00 | 2,00 | 3rel |
| 1967-68 | 171 | 30/01/68 | 21h00 | 1,99 | 3rel |
| 1968-69 | 179 | 30/01/69 | 21h00 | 2,03 | 3rel |

suite

| Année | Qm³/s | Date | | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1969-70 | 696 | 17/01/70 | 21h00 | 3,99 | 3rel |
| 1970-71 | 835 | 02/02/71 | 06h00 | 4,30 | 3rel |
| 1971-72 | 171 | 14/03/72 | 06h00 | 2,30 | 3rel |
| 1972-73 | 49 | 20/11/72 | 12h00 | 1,44 | 3rel |
| 1973-47 | 102 | | | 1,90 | Lim |
| 1974-75 | 536 | | | 3,59 | PHE |
| 1975-76 | | | | | |
| 1976-77 | | | | | |
| 1977-78 | 2850 | 29/01/78 | | 7,65 | PHE |
| 1978-79 | 1860 | 27/12/78 | | 6,00 | PHE |

### 1.3.3.2. Extension de l'échantillon de crues

S'il n'existe aucune donnée antérieure à l'année 1950-51 sur ces stations, les relevés à BERAKETA poursuivis jusqu'en 1984, permettent de considérer les maximums annuels de 1960-61, 1977-78 et 1950-51 comme les plus importants de la période 1950-1984.
Une année sur deux, le maximum est observé entre le 5 janvier et le 26 février (date médiane : 30 janvier - dates extrêmes : 20 novembre et 7 mai).

L'ajustement d'une loi de Fréchet à l'échantillon des 25 maximums annuels correspond aux quantiles suivants :

tableau 6.24.

Mandrare à Bevia
Débits maximaux annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 251 | 548 | 900 | 2620 | (4100) |
| q l/s/km² | 231 | 505 | 830 | 2415 | (3780) |

## 1.3.4. Basses eaux

En raison de la faiblesse (ou de l'absence) des formations magasins, les hydrogrammes de la MANANARA ne permettent pas de mettre en évidence le tarissement.

Le tableau 6.25. rassemble les valeurs caractéristiques des débits d'étiages observés.

tableau 6.25.

Mananara à Bevia
Débits d'étiage caractéristiques (l/s)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1952 | | | | 761 | 13-10 |
| 1953 | 1400 | 1030 | 720 | 509 | 28-10 |
| 1954 | 1930 | 1110 | 907 | 836 | 25-11 |
| 1955 | 1180 | 849 | 761 | 621 | 29-10 |
| 1956 | 1070 | 722 | 547 | 526 | 14-11 |
| 1957 | 783 | 404 | 265 | 218 | 13-11 |
| 1958 | 172 | 068 | 045 | 029 | 01-12 |

suite

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1959 | 871 | 559 | 550 | 499 | 02-06 |
| 1960 | 255 | 146 | 129 | 107 | 04-10 |
| 1961 | 331 | 115 | 078 | 057 | 20-11 |
| 1962 | | | | 610 | 08-11 |
| 1963 | 262 | 220 | 198 | 167 | 12-10 |
| 1964 | 784 | 399 | 321 | 311 | 25-10 |
| 1965 | 744 | 226 | 057 | 040 | 24-06 |
| 1966 | 1910 | 1410 | 300 | 148 | 02-67 |
| 1967 | 752 | 280 | 198 | 084 | 13-12 |
| 1968 | 924 | 404 | 155 | 052 | 01-69 |
| 1969 | 584 | 321 | 238 | 162 | 16-08 |
| 1970 | 678 | 251 | 155 | 117 | 29-11 |
| 1971 | 286 | 135 | 112 | 073 | 11-11 |
| 1972 | 448 | 195 | 147 | 115 | 06-11 |
| 1973 | 964 | 751 | 596 | 471 | 01-74 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 1930 | 1410 | 907 | 836 | 01-02 |
| Q1 | 1020 | 737 | 549 | 509 | 29-11 |
| Méd. | 768 | 360 | 218 | 165 | 10-11 |
| Q3 | 390 | 207 | 138 | 084 | 13-10 |
| Min. | 172 | 068 | 045 | 029 | 02-06 |

DCE = 1.085 QJmin + 45 ($R^2$ = .96)
DC11 = 1.12 QJmin + 192 ($R^2$ = .48)
DC9 = 1.42 QJmin + 451 ($R^2$ = .44)

Dans la moitié des cas, l'étiage absolu est observé entre le 13 octobre et le 29 novembre (date médiane : 10 novembre).

Trois fois sur vingt-deux années, l'étiage est précoce (juin à août) et également trois années sur vingt-deux, il est tardif (janvier ou février).

L'échantillon de vingt-deux valeurs observées fournit les quantiles suivants :

tableau 6.26.

Mananara à Bevia
QJmin

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q (l/s) | 33 | 48 | 81 | 211 | 465 | 657 | 849 |
| q (l/s/km²) | .03 | .04 | .07 | .19 | .43 | .61 | .78 |

Loi de GOODRICH (test Brunet-Moret : 3.42, échelle : 277 l/s, position 19 l/s, forme : 1.00).
Cinquantennales sèche et humide : 24 l/s (.02 l/s/km²) et 1.10 m³/s (1 l/s/km²).

Les débits d'étiage, bien que très faibles, semblent ne s'annuler que très rarement : précipitations de saison sèche provoquant des écoulements en surface, soutien possible des formations sableuses encaissantes du lit de la rivière.

## 1.3.5. Bilan hydrologique

En moyenne interannuelle, pour une pluviométrie moyenne sur le bassin d'environ 600 mm, la lame écoulée (175 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 425 mm et à un coefficient d'écoulement de 30 %.

L'évolution des lames écoulées et déficits d'écoulement en fonction des précipitations annuelles est représentée sur le graphe 6.19.

La courbe moyenne H = f(P) est exponentielle avec des coefficients d'écoulement compris entre 20 % (pour P = 400 mm) et 45 % (pour P = 1 000 mm). Les déficits d'écoulement croissent de 350 à moins de 600 mm et restent très largement inférieurs à l'ETP régionale estimée à 1 000 mm.

figure 6.19.

Mananara à Bevia

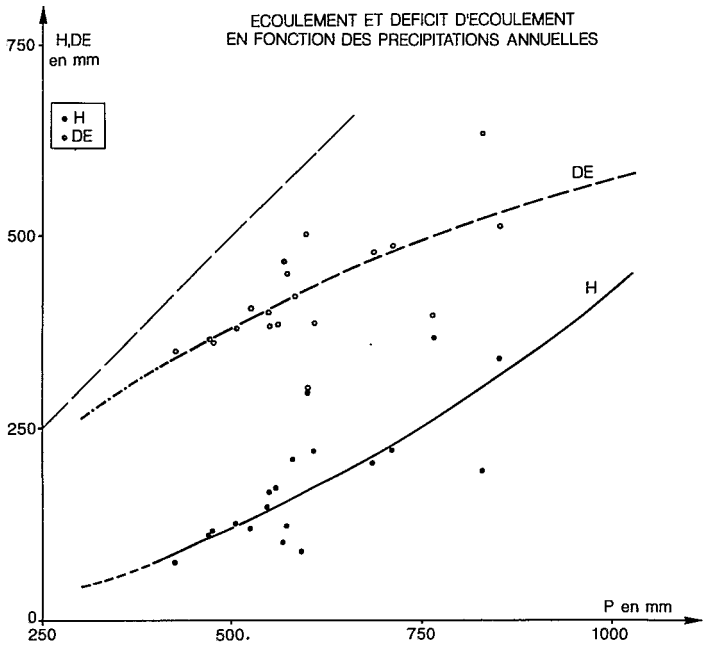



tableau 6.27.

Mananara à Bevia
Bilan hydrologique
(1952-1970) (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 58 | 105 | 107 | 79 | 82 | 33 | 26 | 24 | 22 | 18 | 21 | 25 | 600 |
| ETP | 100 | 104 | 92 | 95 | 93 | 81 | 65 | 48 | 55 | 72 | 90 | 105 | 1000 |

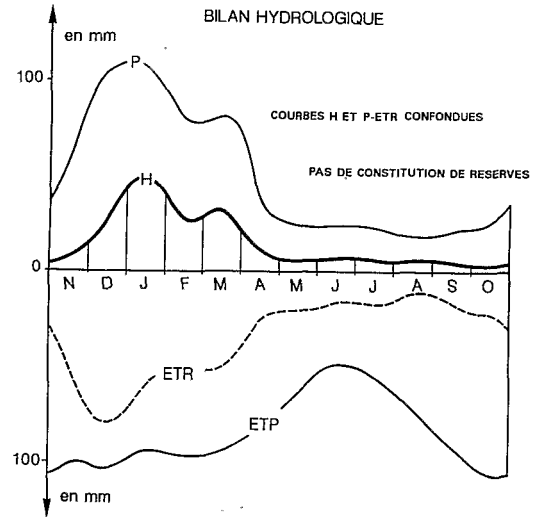
suite

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ETR | 52 | 80 | 58 | 52 | 50 | 24 | 20 | 17 | 17 | 12 | 17 | 22 | 421 |
| P-ETR | 6 | 25 | 49 | 27 | 32 | 9 | 6 | 7 | 5 | 6 | 4 | 3 | 179 |
| H | 6 | 25 | 49 | 27 | 32 | 9 | 6 | 7 | 5 | 6 | 4 | 3 | 179 |

Le mécanisme du bassin (graphe 6.20.) est très simple. L'ETR (qui représente 42 % de l'ETP régionale) est réduite douze mois sur douze. En l'absence de réserves mobilisables (bassin imperméable), l'écoulement est égal, pour chaque mois, à la fraction des précipitations mensuelles non évapotranspirées. L'hydrogramme annuel présente de ce fait un profil homothétique à la courbe des précipitations.

figure 6.20.

Mananara à Bevia




## 1.4. Autres stations du bassin

À l'occasion de différentes études (haut et moyen MANDRARE-Danloux 1974, étude d'hydrologie à usage agricole - Bauduin et Servat, 1984), un certain nombre de stations secondaires ont été étudiées sur des périodes de courte durée.

## 1.4.1. Mandrare à Andetsy

La station située sur le haut MANDRARE (24°17'S - 46°50'E) contrôle un bassin de 372 km². Les observations sont incomplètes. Avec prudence et par comparaison avec la station d'ANDABOLAVA située en aval, les valeurs suivantes peuvent être avancées.

Pluviométrie moyenne du bassin : 910 mm

Lame écoulée moyenne : 265 mm

Déficit d'écoulement : 645 mm

Ke : 29 %

Bien que stable (seuils rocheux) et assez correctement observée de 1950 à 1974, cette station n'a jamais pu être suivie ni étalonnée en raison des difficultés d'accès.

Afin de pouvoir évaluer un ordre de grandeur des débits de crue, une courbe d'étalonnage de type exponentiel a été admise, tracée à partir des quelques jaugeages réalisés, mais il est possible que ces débits soient largement sous estimés.

| Année | Q m³/s | Hm* | Année | Q m³/s | Hm* |
|---|---|---|---|---|---|
| 1949-50 | 245 | 3,27 | 1962-63 | 270 | 3,42 |
| 1950-51 | 300 | 3,57 | 1963-64 | 282 | 3,50 |
| 1951-52 | 310 | 3,67 | 1964-65 | 123 | 2,33 |
| 1952-53 | 80 | 1,87 | 1965-66 | 23 | 1,00 |
| 1953-54 | 43 | 1,50 | 1966-67 | 230 | 3,15 |
| 1954-55 | 45 | 1,54 | 1967-68 | 90 | 2,00 |
| 1955-56 | 175 | 2,75 | 1968-69 | 132 | 2,41 |
| 1956-57 | 43 | 1,50 | 1969-70 | 900 | 6,15 |
| 1957-58 | 43 | 1,50 | 1970-71 | 640 | 5,20 |
| 1958-59 | 93 | 2,03 | 1971-72 | 93 | 2,03 |
| 1959-60 | 23 | 1,00 | 1972-73 | 63 | 1,63 |
| 1960-61 | 91 | 2,01 | 1973-74 | 84 | 1,93 |
| 1961-62 | 23 | 1,00 | | | |

* Hauteurs dans le système dit de la nouvelle échelle.

Une distribution de Goodrich, ajustée à l'échantillon des 25 maximums annuels estimés correspond aux quantiles suivants :

Mandrare à Andetsy
Maximums annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 106 | 270 | 420 | (800) |
| q l/s/km² | 285 | 725 | 1130 | (2150) |

Le débit d'étiage médian non dépassé pendant six mois a été évalué à 2,3 m³/s (6 l/s/km²) et pendant deux mois (DC 305) à 0.8 m³/s (2,2 l/s/km²).

## 1.4.2. Mandrare à Ifotaka

La station d'IFOTAKA (24°48'S-46°09'E) est située en amont de la station principale d'AMBOASARY aval et contrôle un bassin de 10 050 km².

Les débits de 1968-69, presque tous supérieurs aux valeurs correspondantes du MANDRARE à AMBOASARY, sont très douteux (erreurs de lectures ou inadéquation du tarage). Ils se situent d'ailleurs au-dessus de la droite de régression des débits mensuels IFOTAKA-AMBOASARY, dont l'expression (trente-six valeurs 1965-1968) est :

$QIFOTAKA = .62\ QAMBOASARY + 3.2 \qquad (R^2 = .96 \qquad P > .995)$

Cette relation permet d'évaluer (à partir d'AMBOASARY) le module du bassin à 46.2 m³/s (H = 145 mm). La lame ainsi évaluée est inférieure à celle du bassin englobant (AMBOASARY) qui bénéficie des apports de la MANANARA.

tableau 6.28.

Mandrare à Ifotaka
Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 65/66 | 16.5 | 123 | 19.7 | 95.9 | 9.02 | 11.6 | 10.9 | 6.68 | 3.78 | 1.85 | 1.56 | 1.80 | (15.2) |
| 66/67 | 14.5 | 121 | 222 | 62.8 | 190 | 99.5 | 25.8 | 18.1 | (12) | (8) | (5) | 53.5 | 69.4 |
| 67/68 | 52.4 | 58.9 | 30.5 | 54.8 | 28.0 | 15.4 | 4.47 | 3.63 | 3.11 | 2.01 | 101 | 9.10 | 21.9 |
| 68/69 | 2.72 | 46.6 | 179 | 165 | 104 | 74.9 | 33.8 | 12.1 | 9.20 | 13.0 | 5.10 | 12.3 | 54.5 |

## 1.4.3. Andratina à Marotsiraka

L'ANDRATINA est un petit affluent rive droite du MANDRARE, issu du versant sud-ouest du rebord Manambien de l'IVOAKANY. La station (24°14'S - 45°58'E) contrôle un bassin de 340 km².

Les jaugeages de basses et moyennes eaux ont permis de retrouver les calages des différentes échelles installées en amont du seuil de prise.

L'étalonnage a été tracé en admettant une croissance quasi-linéaire au-delà de 100 m³/s, mais il est possible que les débits soient assez largement sous estimés. Ce qui permet d'évaluer les étiages suivants :

septembre 1981 .35 m³/s (1 l/s/km²)

octobre 1982 1.0 m³/s (3 l/s/km²)

octobre 1983 10 m³/s (0.3 l/s/km²)

ainsi que les valeurs approchées des maximums annuels :

| Année | Hm* | Q m³/s | Obs |
|---|---|---|---|
| 1960-61 | 4,00 | 670 | Mln |
| 1970-71 | 4,75 | 910 | PHE |
| 1981-82 | 5,27 | 1100 | PHE |
| 1982-83 | 2,69 | 326 | 3rel |

* Hauteurs dans le système de l'ancienne échelle.

## 1.4.4. Besaly à Amboasary est

La BESALY est un petit affluent de l'ANDRATINA. La station (24°21'S - 45°57'E) contrôle un bassin de 603 km². Bien étalonnée en raison de la stabilité du seuil de contrôle, les lectures (parfois douteuses) ont permis de calculer les débits annuels suivants :

1960-61 15.6 m³/s H = 808 mm

1961-62 2.09 m³/s H = 108 mm

1982-83 4.03 m³/s H = 208 mm

Par corrélation entre les débits trimestriels de la BESALY et du MANDRARE, les lames écoulées de la BESALY ont pu être évaluées sur la période 1951-1973.

Pour une pluviométrie moyenne interannuelle de 910 mm, la lame écoulée moyenne est de 265 mm (Ke = 29 %) et le déficit d'écoulement de 645 mm.

Le débit journalier non-dépassé pendant six mois (DC 180) a été évalué à 0.9 m³/s (1.5 l/s/km²).

Cette station suivie par le Génie rural entre 1960 et 1962 a été rééquipée en juin 1981. L'étalonnage de très hautes eaux s'apppuie sur une évaluation des vitesses superficielles à la cote 5,50 m.

| Année | Hm* | Q m³/s | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1959-60 | 5,50 | 2750 | PHE - 31/01/60 |
| 1970-71 | 4,62 | 2140 | PHE cyclone Félicle |
| 1981-82 | 3,00 | 1010 | PHE |
| 1982-83 | 1,75 | 235 | 3rel |

Sur le bassin du MANDRARE, un petit bassin représentatif (IANAMOLORO A = 1.85 km²) a été étudié par le CTFT de 1962 à 1967. Les maximums de crue ont été estimés à partir d'un étalonnage théorique :

Maximums annuels de crue

| Année | Q m³/s | Date |
|---|---|---|
| 1962-63 | 16,00 | 02/02/63 |
| 1963-64 | 6,85 | 08/02/64 |
| 1964-65 | 2,04 | 18/03/65 |
| 1965-66 | 16,8 | 24/11/65 |
| 1966-67 | 20,9 | 23/02/67 |

Dans le haut bassin du MANDRARE, les débits de crue relatifs au cyclone Félicie ont pu être évalués (profil et pente) pour deux petits affluents :

TSIVORY à AMBIA (A = 48 km²) QMax = 250 m³/s (5 200 l/s/km²)
RANOMAINTY à ANIVORANO (A = 24,5 km²) QMax = 160 m³/s (6 500 l/s/km²)

## 1.4.5. Conclusion

Les observations et mesures effectuées sur le bassin du MANDRARE, tant sur les stations de base longue durée que sur près de quarante stations ponctuelles ont permis d'établir les caractéristiques synthétiques du bassin (Danloux, 1974).

Le bassin, du point de vue hydrologique, peut être subdivisé en deux zones principales :

- la première correspond aux hauts bassins du MANDRARE et de ses affluents issus de la ceinture des hauts massifs de l'ANOSY et de l'IVOKOANY qui circonscrivent le bassin à l'est et au nord. Les cours d'eau de cette zone (MANDRARE supérieur, MANAMBOLO, MANANARA, ANDRANTINA, TSIVORY, etc.) se caractérisent par une pluviométrie moyenne supérieure à celle du bassin global (500 à 1 000 mm pour les petits bassins situés sur les pentes des massifs) en raison de l'altitude moyenne plus élevée, ce qui entraîne également une diminution des températures et de l'évapotranspiration potentielle. Bien que non mise en évidence, la nature des terrains peut jouer un rôle non négligeable (proportion accrue des zones imperméables). Les coefficients annuels d'écoulement se situent entre 20 et 40 % ; les débits spécifiques d'étiage, variables avec l'importance des nappes phréatiques stockées dans les secteurs d'altérites qui peuvent être négligeables et de toute façon d'extension limitée, peuvent atteindre, en moyenne, quelques litres/seconde au kilomètre carré (DC180) ;

- la seconde zone correspond aux petits bassins situés entièrement sur les piémonts, dans le secteur des formations volcaniques fissurées et de la cuvette centrale et ceux de la pénéplaine sud-ouest. Ces bassins sous pluviométrie faible (500 à 700 mm) et température moyenne plus élevée, ont des coefficients d'écoulement beaucoup plus réduits (10 % à moins de 5 % pour les secteurs les plus perméables). Les débits d'étiages (DC180) sont très faibles et souvent nuls.

Le MANDRARE et les plus grands affluents intègrent les caractéristiques des deux zones dans des proportions variant avec la situation du point de contrôle. Les coefficients d'écoulement (12 à 30 %) et les débits spécifiques d'étiage correspondent à des valeurs intermédiaires de celles observées sur les deux grandes zones du bassin.

# 2. BASSIN DU MANAMBOVO

Le bassin du MANAMBOVO, situé entre ceux du MANDRARE et de la MENARANDRA, repose presqu'entièrement sur les formations imperméables (car assez peu altérées) du socle : leptynites, cipolins, pyroxenites et migmatites du système Androyen (groupe d'AMPANDRANDAVA) et, à l'ouest, leptynites du système du graphite (groupe d'AMPANIHY). Les sables quaternaires sont représentés, à l'ouest, pour un petit affluent rive droite du MANAMBOVO, à écoulement très faible et intermittent, et en aval de la station de TSIHOMBE. La végétation est représentée par la savane à cenchrus typique du sud et la brousse xérophytique (bush).

## 2.1. Le Manambovo à Tsihombe

La station de TSIHOMBE (25°18'S - 45°30'E) contrôle la quasi-totalité du bassin (S = 2712 km²).

L'échelle a été installée en janvier 1956 au droit du radier de la RN 10, puis réinstallée en 1970 après la construction du pont et doublée d'un limnigraphe en mars 1970. Les observations sont pratiquement complètes de novembre 1956 à mai 1976.

Quarante-huit mesures de débit (entre 10.l/s et 105 m³/s) ont permis de tracer les différentes courbes d'étalonnage correspondant aux déplacements de l'échelle et aux modifications du radier. L'extrapolation vers les hautes eaux est très importante (200 à près de 3 000 m³/s) mais ne concerne que quelques jours par an.

La pluviométrie sur le bassin est assez bien déterminée à partir de huit postes (dont trois sur le bassin) : ANTANIMORA (poids : .33), TSIHOMBE (.21), BELINDO (.17), BEKITRO (.10), BELOHA (.10), etc. Elle est évaluée à 565 mm en moyenne interannuelle.

### 2.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

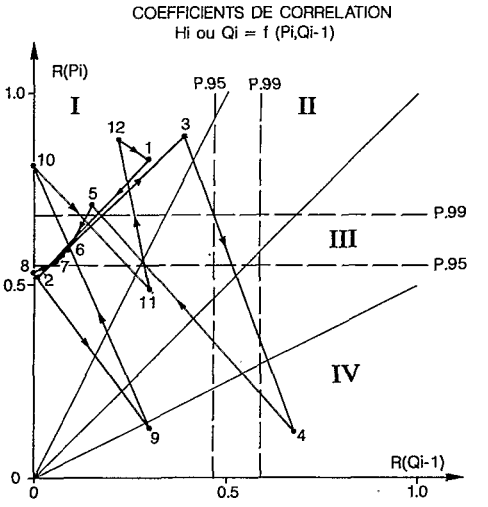
tableau 6.29.

Manambovo à Tsihombe
Coefficients de corrélation

| HI ou QI | | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec | PI | (.49) | .88 | .83 | (.52) | .89 | (.12) | .71 | .59 | .56 | (.53) | (.13) | .81 |
| | PI-1 | (.18) | (.40) | (.37) | (.22) | (.15) | .78 | (.12) | (.12) | (.04) | (.27) | (.02) | (-.09) |
| | QI-1 | (.30) | (22) | (.30) | (.01) | (.39) | .68 | (.15) | (.09) | (.06) | (.06) | (.30) | (-.09) |

figure 6.21.

Manambovo à Tsihombe




Le schéma des corrélations (graphe 6.21.) montre la tendance essentiellement imperméable du bassin, sans intervention des débits antérieurs (absence de réserves). Le mois d'avril est pratiquement déterminé par la pluviométrie de mars (précipitation des derniers jours du mois et fin des décrues de mars).

Les relations hydropluviométriques pour les mois les moins pluvieux sont assez lâches (dispersion spatiale des averses) et, pour ces mois, les régressions ont été déterminées graphiquement.

tableau 6.30.

Régressions intermensuelles

| | | |
|---|---|---|
| H11 = .06 (P11 - 25) | | |
| H12 = .14 (P12 - 41) | ($R^2$ = .78 | P > .995) |
| H01 = .19 (P01 - 20) | ($R^2$ = .69 | P > .995) |
| H02 = .25 (P02 - 57) | | |
| H03 = .16 (P03 - 24) | ($R^2$ = .79 | P > .995) |
| H04 = .02 (P03 - 27) | ($R^2$ = .61 | P > .995) |
| H05 = .02 (P05 - 12) | ($R^2$ = .51 | P > .99) |
| H06 = .09 (P06 - 19) | | |
| pas de relations déterminables | | |
| pour H07 à H09 | | |
| H10 = .04 (P10 - 16) | ($R^2$ = .66 | P > .995) |

tableau 6.31.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1253900115 Tsihombe
Rivière : *Manambovo*
Pays : Madagascar
Bassin : Manambovo
Débits en m³/s

Latitude : 25.18.00
Longitude : 45.30.00
Aire : 2 712 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1956/57 | 1.21 | 11.3 | 20.1 | 8.11 | 9.34 | .042 | 1.12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.28 |
| 1957/58 | 0 | .286 | 1.65 | 18.4 | .625 | .341 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.66 |
| 1958/59 | | | | | | | | | | | | | |
| 1959/60 | 1.80 | 14.3 | 14.1 | 24.4 | 5.57 | .001 | .269 | 0 | 0 | 0 | 2.94 | 0 | 5.22 |
| 1960/61 | .914 | 31.5 | 26.3 | 20.0 | 38.4 | 6.86 | .307 | .207 | 3.60 | .001 | 0 | .526 | 10.7 |
| 1961/62 | .395 | 2.32 | 4.96 | 5.38 | .218 | 0 | .977 | 0 | 0 | 0 | 0 | .550 | 1.21 |
| 1962/63 | 2.15 | 19.9 | 33.1 | 17.1 | 2.81 | 1.31 | 0 | 1.59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.47 |
| 1963/64 | 1.24 | 8.37 | 3.01 | 10.0 | 3.27 | .028 | 0 | 0 | 0 | .019 | 0 | .220 | 2.16 |
| 1964/65 | .094 | 8.56 | 14.2 | .123 | 5.06 | .322 | 0 | 0 | 0 | .360 | 1.20 | 0 | 2.54 |
| 1965/66 | 2.88 | 15.7 | 4.30 | 16.8 | .646 | .549 | .103 | .018 | 0 | 0.333 | 0 | 0.23 | 3.34 |
| 1966/67 | .447 | 6.38 | 19.2 | 36.2 | 28.7 | 2..07 | .809 | .783 | .609 | .064 | 0 | 5.68 | 8.87 |
| 1967/68 | 1.12 | 4.81 | 30.07 | 1.39 | 3.70 | .342 | 0 | 301 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3.58 |
| 1968/69 | 1.00 | 5.45 | 20.7 | 34.7 | 7.84 | 2.82 | .318 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5.89 |
| 1969/70 | .072 | 10.9 | 38.4 | 5.05 | .826 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.65 |
| 1970/71 | 8.65 | 2.88 | 14.5 | 39.4 | 1.54 | .108 | .006 | .092 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5.35 |
| 1971/72 | 1.23 | 13.7 | 10.2 | 1.83 | 2.90 | 1.29 | 1.89 | .473 | .007 | 0 | .244 | 3.45 | 3.18 |
| 1972/73 | 24.0 | .451 | 3.02 | .172 | .047 | .674 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.28 |
| 1973/74 | 16.7 | 46.8 | 18.2 | .838 | .116 | 1.34 | .222 | .273 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7.03 |
| 1974/75 | 4.84 | 26.9 | 12.8 | 16.8 | 2.87 | 1.18 | .309 | 0 | 0 | 0 | 0 | .248 | 5.37 |
| 1975/76 | .011 | 5.76 | .783 | 19.7 | 9.10 | 6.88 | 4.30 | (0) | (0) | (0) | (0) | (.25) | (3.51) |
| Moyenne | 3.62 | 12.4 | 15.3 | 14.5 | 6.51 | 1.38 | .356 | .207 | .222 | .025 | .231 | .576 | 4.57 |
| Ecart-type | 6.36 | 11.9 | 11.2 | 12.6 | 10.1 | 2.15 | .510 | .410 | .850 | .080 | .730 | 1.50 | |
| Max. | 24.0 | 46.8 | 38.4 | 39.4 | 38.4 | 6.88 | 1.89 | 1.59 | 3.60 | .609 | 2.94 | 5.68 | |
| Q1 | 2.88 | 15.7 | 20.7 | 20.0 | 7.84 | 1.89 | .430 | .273 | 0 | .001 | 0 | .248 | |
| Méd. | 1.21 | 8.56 | 14.2 | 16.8 | 2.90 | .322 | .222 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Q3 | .395 | 4.81 | 4.30 | 1.83 | .646 | .006 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Min. | 0 | .286 | .783 | .123 | .047 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

On notera que sur ce bassin, le mois le plus faible est août (année hydrologique septembre-août).

Les débits "observés" (?) de 1958-59, anormalement faibles (Q = 111 l/s soit H inférieur à 1 mm pour P = 173 mm au mois de décembre par exemple), n'ont pas été retenus car très douteux.

De juin à octobre 1976, les débits ont été estimés d'après le MANDRARE et la MENARANDRA.

Le graphe 6.22. représente les débits mensuels classés et permet d'observer la très grande variabilité des débits mensuels.

Les graphes 6.23. et 6.24. représentent les hydrogrammes annuels d'une année excédentaire (1966-67, Q = 8.27 m³/s) et d'une année sèche (1961-62, Q = 1.21 m³/s). On observe une succession de crues bien individualisées avec retour, entre les crues, à des débits très faibles ou nuls (bassin imperméable).

figure 6.22.

Manambovo à Tsihombe

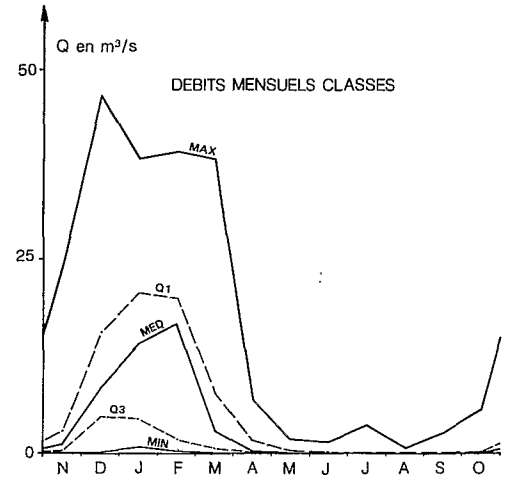



figure 6.23.

Manambovo à Tsihombe

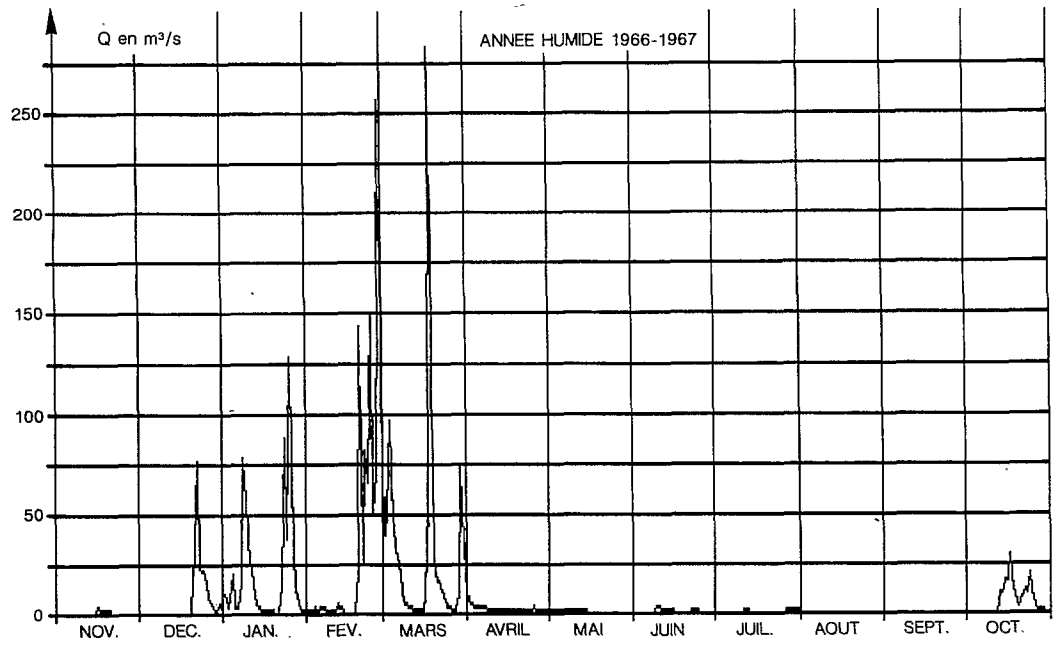
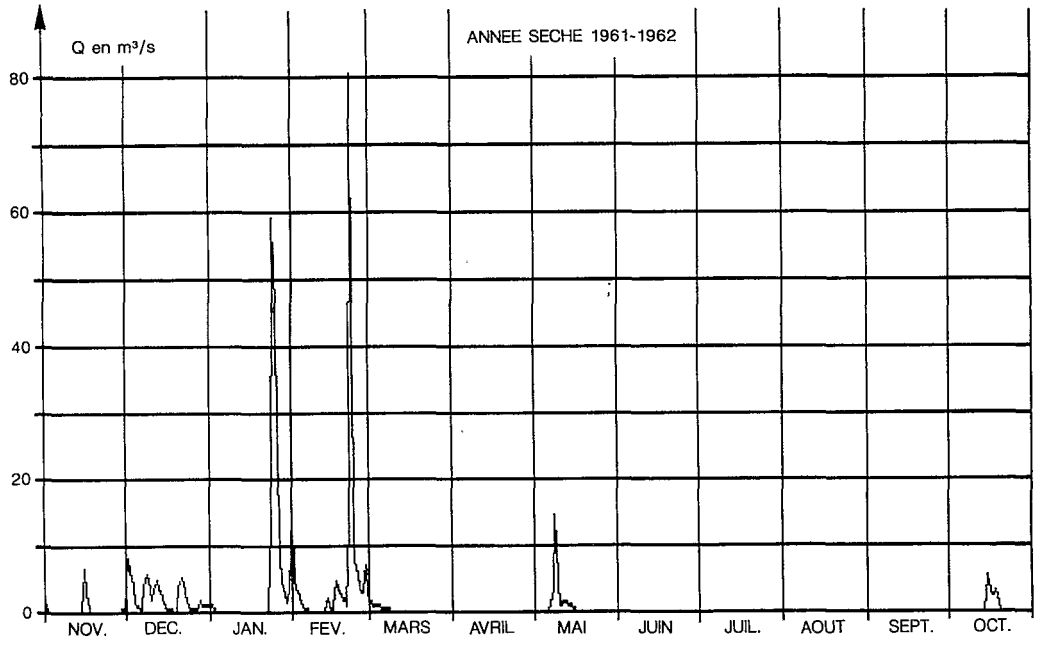


figure 6.24.

Manambovo à Tsihombe




## 2.1.2. Apports annuels

La relation entre lames écoulées annuelles et précipitations annuelles a pour expression :

$H = .16 (P - 247)$ $(R^2 = .73$ $P > .995)$

La prise en compte du coefficient de concentration des précipitations mensuelles Cp améliore la régression :

$H = .18 (P - 621 (1 - 1.8 Cp))$ $(R^2 = .87$ $P > .995)$

Coefficient moyen Cp = .312

Coefficient minimal Cp = .205 1964-65 Ke = 5 %

Coefficient maximal Cp = .511 1958-59 Ke = 15 % (estimation)

Cette régression a permis d'évaluer les apports annuels des années non observées de l'échantillon 1951-1976.

1951-52 Q = 3.95 m³/s H = 46 mm

1952-53 Q = 5.76 m³/s H = 67 mm

1953-54 Q = 3.27 m³/s H = 38 mm

1954-55 Q = 7.48 m³/s H = 87 mm

1955-56 Q = 1.97 m³/s H = 23 mm

1958-59 Q = 4.13 m³/s H = 48 mm

L'échantillon des vingt-cinq valeurs observées ou calculées fournit, après ajustement statistique, les quantiles suivants :

tableau 6.32.

Manambovo à Tsihombe
Apports annuels

| Récurrence | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Hmn | 18 | 24 | 31 | 48 | 72 | 87 | 102 |
| Q ($m^3/s$) | 1.55 | 2.06 | 2.66 | 4.13 | 6.19 | 7.48 | 8.77 |
| q ($l/s/km^2$) | .6 | .8 | 1.0 | 1.5 | 2.3 | 2.8 | 3.2 |

Loi de GUMBEL (test Brunet-Moret : .465, échelle : 20.5 mm, position : 40.8 mm).

Cinquantennales sèche et humide : 13 mm (Q = 1.12 $m^3/s$) et 121 mm (Q = 10.4 $m^3/s$).

## 2.1.3. Crues

### 2.1.3.1 Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

Si la station peut être considérée comme assez stable (radier aval, berges hautes), l'extrapolation de type logarithmique est extrêmement forte (de 1,00 à 4,00 m) et n'a pu être menée qu'à partir des jaugeages complets de 1967-68.

tableau 6.33.

Manambovo à Tsihombe
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm* | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1956-57 | 334 | 31/12/56 06 h 00 | 1,65 | 3rel |
| 1957-58 | 224 | 08/02/58 06h 00 | 1,40 | 3rel |
| 1958-59 | (2) ? | 26/11/58 12 h 00 | 0,20 ? | 3rel |
| 1959-60 | 334 | 04/01/60 06 h 00 | 1,65 | 3rel |
| 1960-61 | 461 | 17/02/61 18 h 00 | 1,90 | 3rel |
| 1961-62 | 190 | 22/02/62 06 h 00 | 1,30 | 3rel |
| 1962-63 | 1090 | 25/01/63 18 h 00 | 2,70 | 3rel |
| 1963-64 | 224 | 13/02/64 06 h 00 | 1,40 | 3rel |
| 1964-65 | 183 | 29/12/64 12 h 00 | 1,28 | 3rel |
| 1965-66 | 360 | 22/02/66 21 h 00 | 1,70 | 3rel |
| 1966-67 | 595 | 27/02/67 06 h 00 | 2,10 | 3rel |
| 1967-68 | 1170 | 29/01/68 15 h 00 | 2,80 | 3rel |
| 1968-69 | 1010 | 09/02/69 03 h 00 | 2,60 | 3rel |
| 1969-70 | 843 | 11/01/70 06 h 00 | 2,40 | 3rel |
| 1970-71 | 349 | 18/02/71 18 h 00 | | 1,95 Lim |
| 1971-72 | 273 | 22/12/71 06 h 00 | | 1,80 Lim |

suite

| Année | Qm³/s | Date | Hm* | Obs |
|---|---|---|---|---|
| 1972-73 | 426 | 19/11/72 . 18 h 00 | | |
| 1973-74 | 868 | 28/12/73 09 h 00 | | 2,10 Lim |
| 1974-75 | 299 | 28/12/74 09 h 00 | | 2,70 Lim |
| 1975-76 | 620 | 21/02/76 03 h 00 | | 1,85 Lim |

* Base de l'échelle rive droite calée 6,26 m sous le repère n° 17 coté 55,893 NGM.

nota : Le "maximum" de 1958-59 est pour le moins très douteux.

### 2.1.3.2 Résultats de l'enquête historique

Le maximum de l'année 1950-51 qui aurait au moins atteint la cote 4,00 m à l'échelle rive droite, constitue l'événement le plus marquant de la période 1950-1984 ($Q \geq 2\ 650$ km²).

Une année sur deux, le maximum est observé entre la fin décembre et la mi-février (date médiane : 27 janvier - dates extrêmes : 19 novembre et 27 février).

L'ajustement d'une loi de Fréchet jusqu'à la décennale (échantillon de 20 années) et une réévaluation empirique en tenant compte de l'information historique conduisent aux quantiles suivants :

tableau 6.34.

Manambovo à Tsihombe
Maximaux annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s (échantillon 20 ans) | 422 | 714 | (924) | (1440) | (1680) |
| Q m³/s (inform. historique) | | | 930 | 2010 | 2500 |
| q l/s/km² | 156 | 263 | 343 | 740 | 920 |

## 2.1.4. Basses eaux

Bien évidemment, aucun tarissement n'est observable en raison de l'absence de réserves drainables.

Les débits d'étiage sont nuls tous les ans au moins pendant trois mois (DC9). Les débits classés sont nettement inférieurs au m³/s au moins six mois par an. Sur la période observée (dix-neuf année), les débits classés sur six mois (DC6) sont nuls quatorze années sur dix-neuf, voisins de 5 l/s deux autres années et ne prennent des valeurs appréciables que trois années sur dix-neuf.

1960-61 DC6 = 340 l/s
1966-64 DC6 = 813 l/s
1971-72 DC6 = 510 l/s

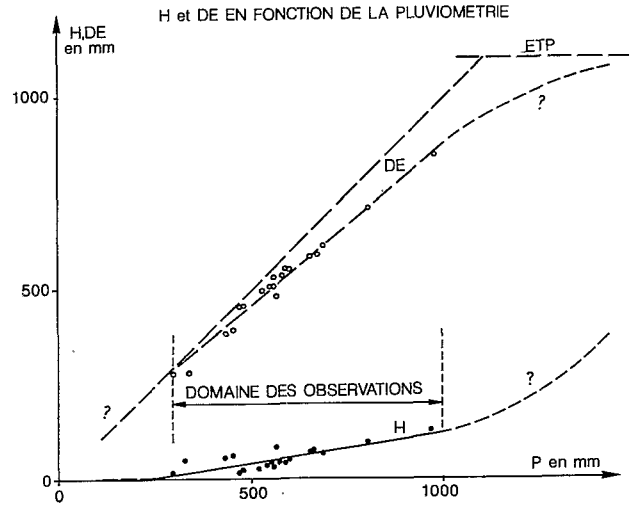
## 2.1.5. Bilan hydrologique

Pour des précipitations sur le bassin évaluées à 565 mm en année moyenne, la lame écoulée interannuelle est de 50 mm et correspond à un déficit d'écoulement (ETR) d'environ 515 mm (Ke = 9 %).

Sur le graphe 6.25 sont reportés les points représentatifs (et les courbes moyennes) de l'écoulement H et du déficit DE. Dans le domaine observé (P compris entre 300 et 1 000 mm), les lames varient de 15 à 125 mm (Ke variant de 3 à 15 %) et le déficit d'écoulement (évapo-transpiration réelle) croît linéairement de 280 à 850 mm, avec les précipitations.

figure 6.25.

Manambovo à Tsihombe




En-dessous de 250 mm de précipitations annuelles, les apports doivent être faibles (inférieurs à 10 mm/an) et le déficit d'écoulement très proche des précipitations. Au-dessus de 1 000 mm, il est probable que la courbe H/P prend une allure exponentielle (H = 200 mm pour P = 1 200 mm) et que la courbe DE/P s'infléchisse pour tendre asymptotiquement vers l'ETP régionale évaluée à 1 100 mm. Dans l'un comme dans l'autre cas, il s'agit d'événements très rares.

tableau 6.34. bis

Manambovo à Tsihombe
Termes mensuels et annuels
du bilan hydrologique (mm)

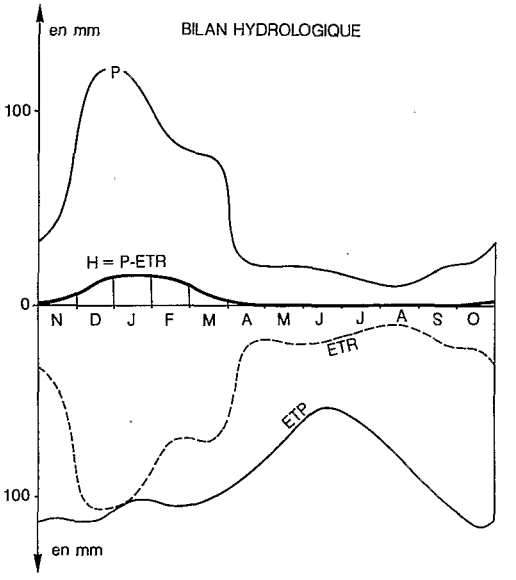
| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 44 | 119 | 115 | 85 | 77 | 22 | 20 | 18 | 14 | 10 | 18 | 23 | 565 |
| ETP | 111 | 114 | 101 | 105 | 102 | 89 | 71 | 53 | 60 | 80 | 99 | 115 | 1100 |
| ETR | 42 | 107 | 100 | 71 | 72 | 21 | 20 | 18 | 14 | 10 | 18 | 22 | 515 |
| P-ETR | 2 | 12 | 15 | 14 | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 50 |
| H | 2 | 12 | 15 | 14 | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 50 |

Le mécanisme est très simple sur ce bassin imperméable et ne disposant pas de réserves drainables appréciables, l'écoulement est réduit à la fraction non évapotranspirée des précipitations mensuelles. L'ETR n'approche l'ETR qu'en janvier et est fortement réduite le reste de l'année (ETR/ETP = 47 %).

Le bilan analogue à celui de la MANANARA à BEVIA, s'en distingue par une pluviométrie légèrement plus faible et un coefficient d'écoulement beaucoup plus réduits (1/3 de celui de la MANANARA) en raison de la reprise par évapotranspiration nettement plus forte en raison d'une température moyenne sur le bassin plus élevée (graphe 6.26.).

figure 6.26.

Manambovo à Tsihombe




# 3. BASSIN DE LA MENARANDRA

De direction générale nord-est/sud-ouest, le bassin de la MENARANDRA, situé entre ceux du MANAMBOVO à l'est et de la LINTA à l'ouest, draine dans sa partie supérieure les hauteurs du KELHOROMBE, terminaison sud des hauts plateaux et la pénéplaine de l'ANDROY. Au niveau de TRANOROA, le bassin repose entièrement sur les formations cristallines à tendance imperméable des systèmes androyens et du graphite (lytynites, cipolins, etc.). Le bassin, très peu boisé, est recouvert d'une savane à tendance xérophile vers le sud-ouest.

## 3.1 La Menarandra à Tranoroa

La station de TRANOROA (24°42'S - 45°04'E) contrôle un bassin de 5 330 km².

L'échelle a été installée en juillet 1951, puis avec un décalage de 24 cm, réinstallée en juillet 1953. Un limnigraphe a été installé en 1965. Les lectures jusqu'en 1960 sont de qualité assez médiocre.

Quatre cent trois mesures de débit ont été effectuées entre 186 l/s et 1 400 m³/s (téléphérique de jaugeage). L'instabilité de la section a conduit à tracer sur la période étudiée quarante-cinq courbes d'étalonnage de basses eaux se raccordant à une courbe unique au-dessus de 900 m³/s. La courbe a été extrapolée jusqu'à 7 200 m³/s.

La pluviométrie sur le bassin est assez bien déterminée à partir de huit stations pluviométriques : BEKILY (poids : .24), AMBAHITA (.17), BEKITRO (.17), BERAKETA (1.2), etc.

La pluviométrie moyenne interannuelle du bassin est de 760 mm.

### 3.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 6.34. ter

Menarandra à Tranoroa Coefficients

| Hi ou Qi | | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec | Pi | .72 | .87 | .72 | .67 | .95 | (.40) | (.35) | (16) | (.28) | .57 | .53 | .70 |
| | Pi-1 | (- .06) | (.30) | .88 | .49 | (.07) | .79 | (.17) | (- .07) | .57 | (.46) | (.06) | (.26) |
| | Qi-1 | (.18) | (.21) | .55 | (.13) | .40 | (.34) | .42 | .81 | .74 | .42 | .67 | (.28) |

nota : signification des coefficients de corrélation : .72 (P > .99), .57 (P > .95), (.40) (P < .95).

Le graphe 6.27., où sont reportés les points représentatifs des coefficients de corrélation, montre, pour les mois de saison des pluies, le poids quasi-exclusif de la précipitation du mois (bassin imperméable). Pour les mois de faible pluviométrie (avril à septembre), les débits des différents mois, à des degrés variables, sont interdépendants (influence des faibles réserves, ressuyage du bassin).

figure 6.27.

Menarandra à Tranoroa

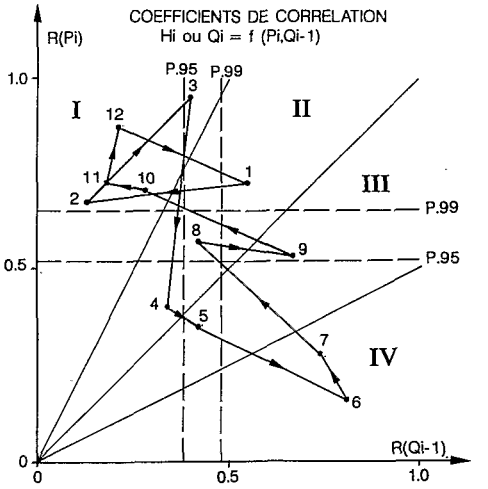


tableau 6.35.

Régressions intermensuelles

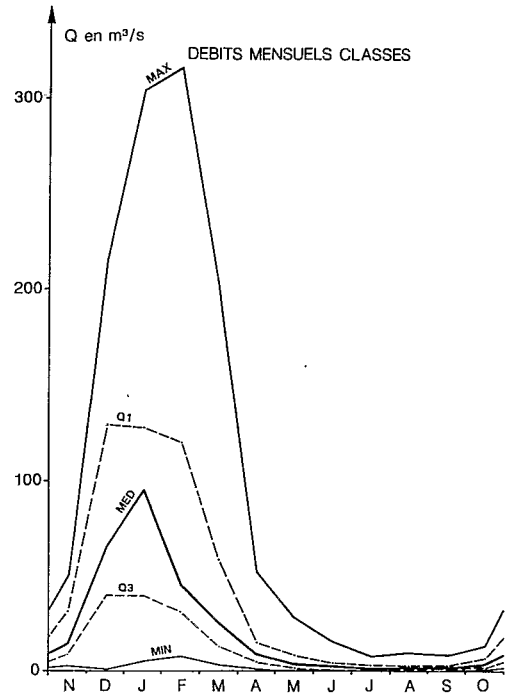
| | |
|---|---|
| H11 = .12 p1 + .5 | ($R^2$ = .52 P > .995) |
| H12 = .38 P12 - 21.9 | ($R^2$ .76 P > .995) |
| H01 = .16 P01 +. 54 P12 - 61.3 | ($R^2$.78 P > .995) |
| H02 = .21 P02 + .11 P01 - 6 | ($R^2$ = .54 P > .995) |
| H03 = .34 P03 - 3.6 | ($R^2$ = .90 P > .995) |
| H04 = .03 P03 + .05 P04 + .3 | ($R^2$ = .74 P > .995) |
| H05 = .12 H04 + .06 P05 - 1.2 | ($R^2$ = .82 P > .995) |
| Q06 = .44 Q05 + .6 | ($R^2$ = .66 P > .995) |
| Q07 = .55 Q06 + .4 | ($R^2$ = .55 P > .995) |
| H08 = .41 H07 + .07 P08 - .1 | ($R^2$ = .51 P > .99) |
| H09 = .49 H08 + .03 P09 + .1 | ($R^2$ = .57 P > .995) |
| H10 = .06 P10 + .2 | ($R^2$ = .49 P > .995) |

Les relations ont permis de corriger les valeurs suspectes (erreurs de lectures ?) de mars et août 1952 et de compléter les valeurs manquantes du tableau 6.36.

Les différents quantiles des valeurs classées des débits mensuels sont représentés sur le graphe 6.28. On notera la forte dispersion des distributions caractéristique d'un bassin imperméable.

figure 6.28.

Menarandra à Tranoroa




Les graphes 6.29. et 6.30. représentent les hydrogrammes d'un année excédentaire (1969-70, Q = 42.8 m³/s) et d'une année déficitaire (1967-68, Q = 11 m³/s). La quasi-totalité de l'écoulement est concentré de novembre à mars (maximum en janvier). Entre les crues bien individualisées, les débits retombent à des valeurs très faibles.

figure 6.29.

Menarandra à Tranoroa

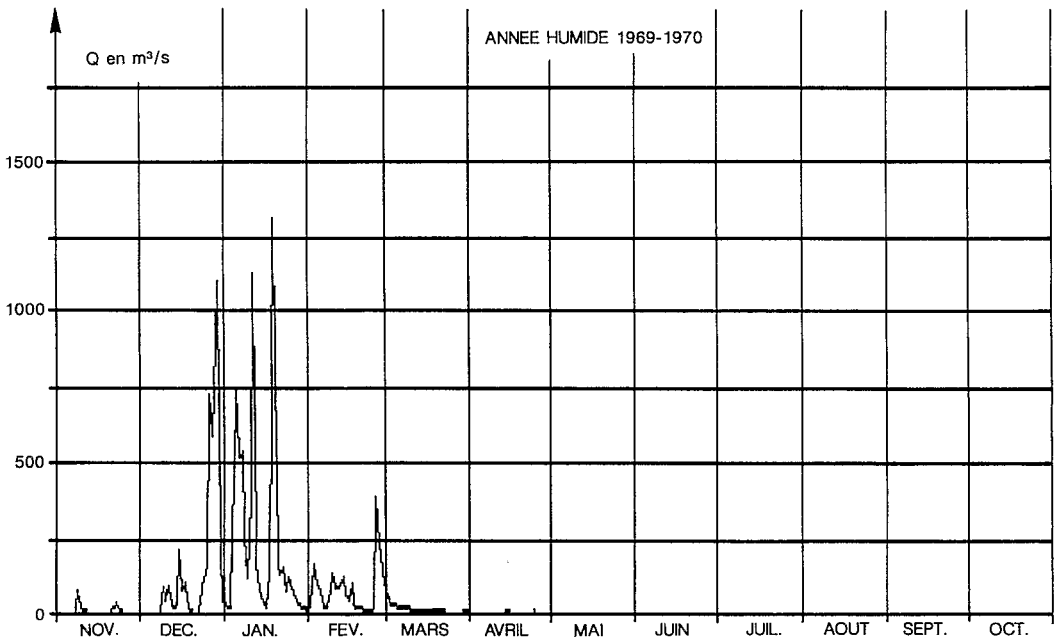
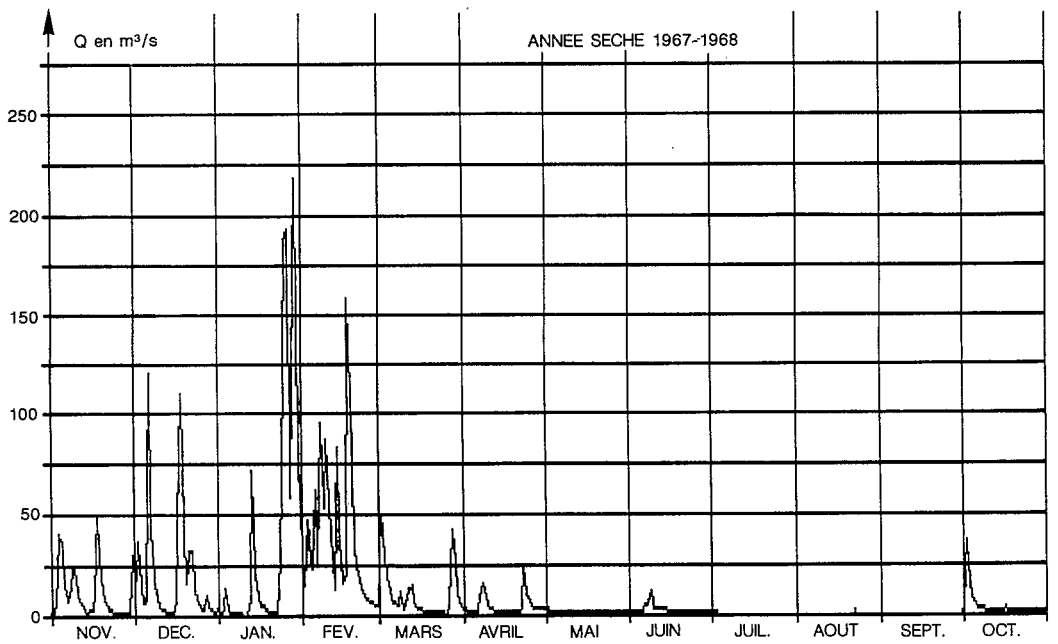



figure 6.30.

Menarandra à Tranoroa



## 3.1.2. Apports annuels

Les lames annuelles et précipitations annuelles sur le bassin présentent la régression suivante :

$H = .36\ (P - 234)$ $(R^2 = .47$ $P > .995)$

La relation statistique est linéaire mais l'aspect du corrélogramme laisse supposer que des valeurs observées plus nombreuses en années très humides permettraient de déterminer la relation logarithmique caractéristique des bassins imperméables du sud.

La prise en compte du coefficient de concentration KP,

$KP = P12 + (P01.P12)^{1/2} + (P02.P01)^{1/2} + (P03.P02)^{1/2} / 4P$

(P = pluie annuelle) permet d'améliorer significativement la régression :

$H = 9.2 * P^{1.015} * KP^{2.25}$ $(R^2 = .74$ $P > .995)$
$\overline{KP} = .188$ KPmax = .237 en 1958-59 (Ke = 45 %)
KPmin = .152 en 1951-52 (Ke = 14 %)

Cette régression permet de compléter l'échantillon des valeurs annuelles 1951-1983.

1954-55 H = 197 mm Q = 33.3 m³/s
1962-63 H = 254 mm Q = 42.9 m³/s

tableau 6.36.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1255400121 Tranoroa Latitude : 24.42.00
Rivière : Menarandra Longitude : 45.04.00
Pays : Madagascar
Bassin : Menarandra Aire : 5 330 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1951/52 | 8.85 | 19.9 | 16.0 | 16.3 | (116) | 16.2 | 2.37 | 1.63 | .678 | (.500) | 5.59 | .540 | (17.1) |
| 1952/53 | 12.2 | 69.1 | 80.4 | 108 | 33.8 | 8.53 | 1.61 | 2.28 | 3.56 | 1.60 | 1.57 | (2.65) | (26.7) |
| 1953/54 | (31.6) | 135 | 219 | 142 | 58.4 | 5.01 | 2.17 | 2.45 | 2.07 | 3.03 | 2.64 | 5.11 | (50.4) |
| 1954/55 | 40.7 | 91.7 | - | - | - | - | - | 1.86 | 933 | 981 | 1.87 | .803 | - |
| 1955/56 | 10.2 | 26.8 | 70.3 | 26.9 | 69.9 | 10.6 | 1.04 | .790 | .732 | .924 | 7.12 | 11.7 | 19.8 |
| 1956/57 | 37.1 | 82.9 | 108 | 47.8 | 105 | 6.32 | 14.8 | 1.74 | 1.01 | 2.08 | 1.12 | 1.20 | 34.2 |
| 1957/58 | 5.32 | 15.0 | 13.5 | 123 | 12.7 | 2.18 | .196 | .159 | 1.19 | .755 | .292 | .320 | 13.8 |
| 1958/59 | 36.3 | 109 | 248 | 33.0 | 2.76 | .489 | .510 | .366 | .324 | .347 | .280 | .259 | 36.3 |
| 1959/60 | 28.5 | 89.4 | 100 | 132 | 23.5 | 6.29 | 3.74 | .776 | (.800) | (.870) | (3.66) | (1.83) | (32.3) |
| 1960/61 | (12.7) | 215 | 295 | 231 | 199 | 17.5 | 28.3 | 15.6 | (9.0) | 9.13 | 8.09 | 10.0 | (87.2) |
| 1961/62 | 14.7 | (73.4) | (82.0) | 17.0 | 4.13 | 5.54 | 10.1 | 1.06 | .637 | .517 | 2.09 | 12.5 | (18.8) |
| 1962/63 | 34.6 | 146 | - | - | - | - | - | 6.91 | 1.58 | .662 | 2.27 | .406 | - |
| 1963/64 | 31.4 | 99.3 | 31.8 | 104 | 18.3 | 3.23 | 1.37 | 1.26 | 1.24 | 4.09 | .503 | 2.26 | 24.6 |
| 1964/65 | 11.8 | 64.9 | 100 | 44.6 | 28.2 | 9.92 | .688 | .737 | .857 | 9.51 | 4.88 | 4.72 | 23.4 |
| 1965/66 | 14.1 | 70.0 | 41.4 | 117 | 9.62 | 8.02 | 1.20 | .729 | .486 | .729 | 4.34 | 3.23 | 22.0 |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1966/67 | 7.24 | 51.7 | 76.7 | 138 | 114 | 19.7 | 5.97 | 3.56 | 2.77 | 1.65 | 1.39 | 9.67 | 35.5 |
| 1967/68 | 10.7 | 22.2 | 37.6 | 38.3 | 10.1 | 4.53 | 1.48 | 2.69 | .711 | .620 | .508 | 3.73 | 11.0 |
| 1968/69 | 5.59 | 69.6 | 135 | 113 | 68.2 | 15.0 | 10.4 | 2.98 | 2.19 | 1.45 | 1.17 | 4.50 | 35.4 |
| 1969/70 | 7.84 | 145 | 252 | 82.9 | 15.3 | 3.99 | 1.76 | 1.39 | 1.03 | .661 | .509 | .521 | 42.8 |
| 1970/71 | 50.1 | 36.0 | 116 | 316 | 29.8 | 9.05 | 5.29 | 4.27 | 3.11 | 1.80 | 1.50 | 3.00 | 46.1 |
| 1971/72 | 9.82 | 61.8 | 120 | 37.2 | 17.5 | 8.71 | 8.98 | 7.45 | 2.74 | 1.23 | .812 | 13.3 | 24.2 |
| 1972/73 | 30.0 | .239 | 27.0 | 9.94 | 3.36 | 4.56 | 2.92 | 2.49 | 2.33 | 1.86 | 1.59 | 5.26 | 7.59 |
| 1973/74 | 38.3 | 189 | 96.7 | 32.2 | 9.37 | 24.8 | 8.26 | 4.29 | .789 | .569 | .440 | .278 | 33.9 |
| 1974/75 | 9.08 | 175 | 110 | 105 | 50.0 | 17.2 | 4.38 | 3.21 | 3.19 | 2.22 | 1.74 | 3.47 | 40.2 |
| 1975/76 | 6.84 | 40.0 | 5.48 | 41.2 | 25.3 | 15.6 | 3.13 | 2.03 | .751 | .668 | .265 | 3.44 | 12.0 |
| 1976/77 | 3.60 | 130 | 304 | 7.38 | 33.2 | 8.86 | 6.01 | (3.26 | (2.18) | .878 | .528 | 7.77 | (43.0) |
| 1977/78 | 13.0 | 55.6 | 92.2 | 18.6 | 25.3 | 13.0 | 5.41 | 3.62 | 4.75 | 2.92 | 2.19 | 11.5 | 20.8 |
| 1978/79 | 22.4 | 210 | 47.6 | 34.9 | 21.9 | 12.3 | 9.77 | 9.64 | 7.90 | 6.13 | 6.96 | 4.27 | 33.0 |
| 1979/80 | 24.5 | 72.0 | 93.9 | 29.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1980/81 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | .225 | .699 | 4.30 | - |
| 1981/82 | (23.8) | 50.6 | 204 | 46.0 | 62.5 | 51.7 | 12.4 | 4.46 | 3.72 | 2.95 | 2.21 | 1.46 | (39.0) |
| 1982/83 | 14.8 | 5.83 | 6.80 | 137 | 14.8 | 3.54 | .342 | .386 | .159 | .140 | .126 | 4.43 | 14.8 |
| Moyenne | 19.6 | 84.6 | 108 | 80.3 | 42.2 | 11.2 | 5.52 | 3.13 | 2.12 | 1.99 | 2.23 | 4.47 | 30.3 |
| Ecart-type | 13.0 | 59.7 | 86.8 | 70.8 | 43.5 | 9.91 | 6.02 | 3.28 | 1.75 | 2.35 | 2.25 | 4.05 | |
| Max. | 50.1 | 215 | 304 | 316 | 199 | 51.7 | 28.3 | 15.6 | 7.90 | 9.51 | 8.09 | 13.3 | |
| Q1 | 30.7 | 130 | 128 | 120 | 58.4 | 15.3 | 8.62 | 3.95 | 2.77 | 2.57 | 2.27 | 6.52 | |
| Méd. | 14.1 | 69.8 | 95.3 | 46.0 | 25.3 | 8.79 | 3.44 | 2.28 | 1.19 | 1.23 | 1.54 | 3.73 | |
| Q3 | 8.96 | 40.0 | 39.5 | 30.6 | 12.7 | 4.78 | 1.43 | .925 | .732 | .661 | .509 | 1.00 | |
| Min. | 3.60 | .239 | 5.48 | 7.38 | 2.76 | .489 | .196 | .159 | .159 | .140 | .126 | .259 | |

L'ajustement statistique effectué sur les trente valeurs observées ou calculées de 1951-52 à 1982-83 fournit les quantiles suivants :

tableau 6.37.

Menarandra à Tranoroa
Apports annuels

| Récurrence | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Hmn | 47 | 65 | 84 | 109 | 167 | 246 | 299 | 349 | 414 |
| Q ($m^3/s$) | 7.9 | 11.0 | 14.2 | 18.4 | 28.2 | 41.5 | 50.5 | 58.9 | 69.9 |
| q ($l/s/km^2$) | 1.5 | 2.1 | 2.7 | 3.5 | 5.3 | 7.8 | 9.5 | 11.1 | 13.1 |

Loi de Gumbel (test Brunet-Moret : 3.34, échelle : 69.8 mm, position : 141.8 mm).
Centennales sèche et humide : 35 mm (Q = 5.9 $m^3/s$) et 463 mm (Q = 78.2 $m^3/s$).

## 3.1.3. Crues

### 3.1.3.1 Mode d'évaluation des débits de hautes eaux à l'échelle village

Bien qu'une réorganisation du lit sableux puisse se produire à la moindre crue, les berges hautes, la roche subaffleurante dans le bief aval et les résultats des jaugeages de moyennes et de hautes eaux sont autant d'éléments qui militent en faveur du tracé d'une seule courbe de tarage pour l'évaluation des débits en hautes eaux.

L'extrapolation de type logarithmique a été menée à partir des plus forts jaugeages.

tableau 6.38.

Menarandra à Tranoroa
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm* | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1951-52 | 201 | 28/01/53 06h 00 | 2,30 | 3rel |
| 1952-53 | 968 | 03/12/53 18 h 00 | 3,80 | 3rel |
| 1953-54 | 3230 | 08/01/55 06 h 00 | 6,40 | 3rel |
| 1954-55 | 2610 | 08/03/56 06 h 00 | 5,80 | 3rel |
| 1955-56 | 626 | 10/03/57 06 h 00 | 3,55 | 3rel |
| 1956-57 | 695 | 07/02/58 18 h 00 | 3,65 | 3rel |
| 1957-58 | 1290 | 01/01/59 00 h 00 | 4,46 | 3rel |

suite

| Année | Qm³/s | Date | Hm* | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1958-59 | 1830 | 01/01/60 00 h 00 | 5,06 | 3rel |
| 1959-60 | 1340 | 27/03/61 18 h 00 | 4,52 | 3rel |
| 1960-61 | 3900 | 25/01/62 06 h 00 | 7,00 | 3rel |
| 1961-62 | 303 | 12/12/63 06 h 00 | 2,90 | 3rel |
| 1962-63 | 2920 | 23/12/63 06 h 00 | 6,10 | 3rel |
| 1963-64 | 1330 | 07/01/65 12 h 00 | 4,50 | 3rel |
| 1964-65 | 1200 | 17/01/66 06 h 00 | 4,35 | 3rel |
| 1965-66 | 1510 | 21/02/67 06 h 00 | 4,72 | 3rel |
| 1966-67 | 1850 | 26/01/68 18 h 00 | 5,08 | 3rel |
| 1967-68 | 315 | 26/01/68 18 h 00 | 3,06 | 3rel |
| 1968-69 | 1200 | 09/02/69 12 h 00 | 4,35 | 3rel |
| 1969-70 | 1980 | 11/01/70 06 h 00 | 5,20 | 3rel |
| 1970-71 | 7200 | 18/02/71 | 9,75 | PHE |
| 1971-72 | 2030 | 29/01/72 06 h 00 | 5,25 | 3rel |
| 1972-73 | 742 | 12/01/73 12 h 00 | 3,77 | 3rel |
| 1973-74 | 2660 | 27/12/73 00 h 00 | 5,85 | 3rel |
| 1974-75 | 2460 | 31/01/75 | 5,66 | PHE |
| 1975-76 | 550 | 13/02/76 06 h 00 | 3,50 | 3rel |
| 1976-77 | 2080 | 30/12/76 06 h 00 | 5,30 | 3rel |
| 1977-78 | 1110 | 14/01/78 06 h 00 | 4,24 | 3rel |
| 1978-79 | 3930 | 27/12/78 06 h 00 | 7,00 | 3rel |
| 1979-80 | 1900 | 08/01/80 06 h 00 | 5,12 | Min |
| 1980-81 | | | | |
| 1981-82 | 1770 | 22/01/82 06 h 00 | 5,00 | Min |
| 1982-83 | 3370 | 21/02/83 06 h 00 | 6,50 | 3rel |

### 3.1.3.2 Résultats de l'enquête historique

Bien que très imprécis quant à la hauteur maximale atteinte fin janvier 1951, tous les témoignages concordent pour placer ces PHE très largement au-dessus du maximum du 18/02/1971 (cyclone Joëlle).

En l'absence d'autres renseignements, un débit de 10 000 m³/s a été retenu pour le maximum annuel de l'année 1950-51, considéré comme le plus important de la période 1950-84.

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 1er janvier et le 9 février (date médiane : 17 janvier - dates extrêmes : 3 décembre et 27 mars).

L'ajustement d'une loi de Fréchet à l'échantillon des 29 maximums annuels observés et la réévaluation de la crue centennale en tenant compte de l'estimation du maximum de 1951, correspondent aux quantiles suivants :

tableau 6.39.

Menarandra à Tranoroa
Maximaux annuels

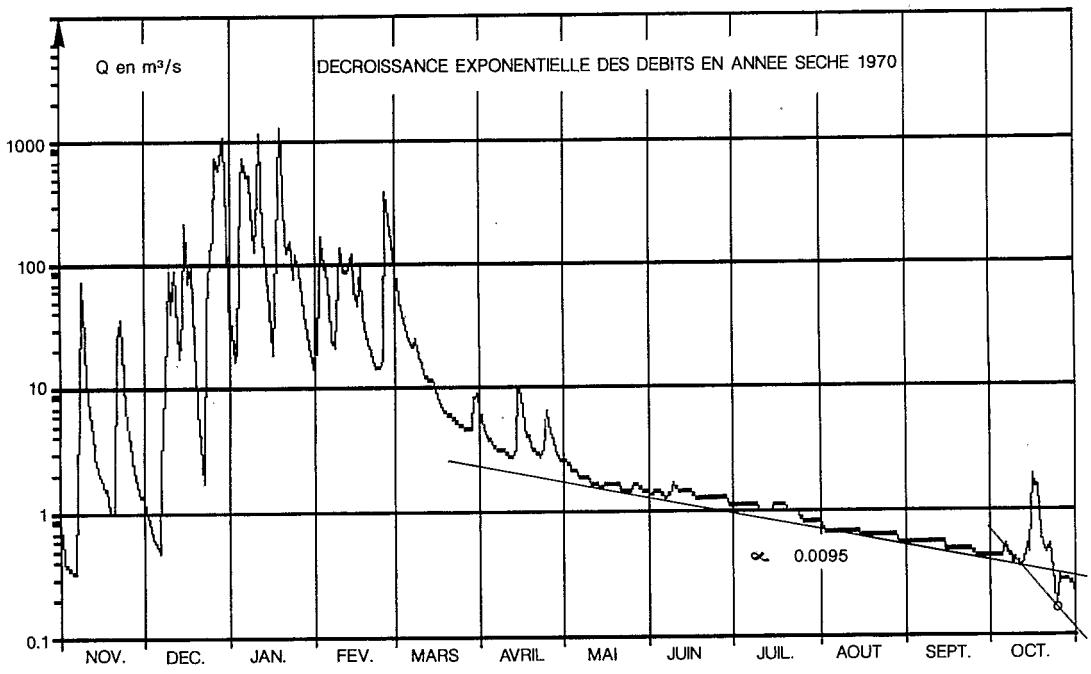
| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s (échantillon 52-53) | 1510 | 2670 | 3590 | 6130 | (7450) |
| Q m³/s (inform. historique) | | | | | 8250 |
| q l/s/km² | 283 | 500 | 675 | 1150 | 1550 |

## 3.1.4. Basses eaux

En l'absence d'aquifères importants, il n'est pas possible de parler vraiment de tarissement sur ce bassin. On observe toutefois une décroissance rapide des débits minimums (entre les crues) en fin de saison des pluies, où ils diminuent de deux à un en 30 jours, suivie entre mai et octobre d'une décroissance exponentielle des débits (graphe 6.31.) de pente moyenne $\alpha$ = .009 (Tc = deux mois et demi à trois mois).

figure 6.31.

Menarandra à Tranoroa




Cette décroissance correspond à l'effet conjugué de l'épuisement des quelques magasins d'altérites (zones fissurées du socle), de l'évaporation dans le lit et de l'infiltration dans les formations sableuses du lit (alimentation de l'inferoflux).

Les débits caractéristiques d'étiage sont présentés dans le tableau 6.40.

L'étiage absolu (QJmin.) est observé, six années sur dix, entre fin septembre et fin novembre, (date médiane : 10 octobre), mais, une année sur quatre, l'étiage est précoce et est observé avant la fin mai.

tableau 6.40.

Menarandra à Tranoroa
Débits caraxtéristiques d'étiage (l/s)

| Année | DC 9 | DC 11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1952 | - | - | 110 | 049 | 25-11 |
| 1953 | - | - | - | - | - |
| 1954 | 2360 | 2070 | 1960 | 1870 | 28-07 |
| 1955 | - | 404 | 260 | 202 | 13-11 |
| 1956 | 755 | 646 | 282 | 081 | 29-10 |
| 1957 | 758 | 325 | 049 | 013 | 31-01 |
| 1958 | 170 | 145 | 108 | 079 | 04-02 |
| 1959 | 325 | 262 | 229 | 229 | 01-10 |
| 1960 | - | - | - | - | - |
| 1961 | - | - | - | - | - |
| 1962 | - | - | 434 | 346 | 20-05 |
| 1963 | - | - | 298 | 210 | 23-10 |
| 1964 | 1040 | 428 | 322 | 173 | 23-10 |
| 1965 | 730 | 630 | 261 | 190 | 19-11 |
| 1966 | 535 | 462 | 263 | 109 | 11-01 |
| 1967 | 1970 | 1290 | 1080 | 929 | 10-10 |
| 1968 | 707 | 601 | 387 | 309 | 21-09 |
| 1969 | 1660 | 1080 | 780 | 329 | 05-11 |
| 1970 | 700 | 435 | 274 | 097 | 27-12 |
| 1971 | 1710 | 1280 | 949 | 122 | 31-01 |
| 1972 | 600 | 091 | 056 | 050 | 01-73 |
| 1973 | 1840 | 1590 | 1520 | 1000 | 10-03 |
| 1974 | 638 | 322 | 272 | 234 | 09-10 |
| 1975 | 2160 | 1330 | 460 | 098 | 28-11 |
| 1976 | 527 | 239 | 140 | 128 | 10-10 |
| 1977 | - | - | 369 | 253 | 28-09 |
| 1978 | 3370 | 2160 | 1900 | 1750 | 08-11 |
| 1979 | 6250 | 4210 | 3580 | 545 | 14-01 |
| 1980 | - | - | - | - | - |
| 1981 | - | - | 144 | 102 | 06-09 |
| 1982 | 2210 | 893 | 568 | 291 | 22-12 |
| 1983 | 196 | 053 | 043 | 034 | 30-09 |

| | DC 9 | DC 11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 6250 | 4210 | 3580 | 1870 | 03-01 |
| Q1 | 1970 | 1290 | 780 | 329 | 13-11 |
| Méd. | 757 | 601 | 298 | 202 | 10-10 |
| Q3 | 600 | 322 | 229 | 097 | 20-05 |
| Min. | 170 | 053 | 043 | 013 | 11-01 |

tableau 6.41.

*Menarandra à Tranoroa*
Distribution des débits journaliers minimaux

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q (l/s) | 33 | 50 | 79 | 183 | 467 | 826 | 1400 |
| q (l/s/km²) | < .01 | < .01 | < .01 | .03 | .08 | .15 | .26 |

Loi de Frechet (test Brunet-Moret : 1.44, échelle : 181 l/s, position : - 51.3 l/s, forme : - 0.70).
Cinquantennales sèche et humide : 18 l/s (< .01 l/s/km²) et 2.74 m³/s (.5 l/s/km²).

Réserve faite sur la précision des valeurs (en raison des difficultés d'étalonnage pour les très basses eaux), on notera la faiblesse des débits spécifiques d'étiage de la MENARANDRA. Bien que la station soit située sur le socle cristallin et son haut bassin relativement bien arrosé pour la région, les débits de basses eaux, en raison essentiellement de l'infiltration dans le lit mais aussi de la faiblesse des réserves drainables, décroissent rapidement d'amont en aval pour s'annuler presque totalement en aval d'AMPOTAKA.

Entre les différents débits caractéristiques, les relations sont les suivantes :

DCE = 1.2 QJmin + .19 ($R^2$ = .54 P > .995) DCE/QJmin = 223 %
DC11 = 1.16 QJmin + .47 ($R^2$ = .42 P > .99) DC11/QJmin = 373 %
DC9 = 1.47 QJmin + .83 ($R^2$ = .33 P > .99) DC9/QJmin = 600 %

Alors que les débits journaliers décroissent assez lentement jusqu'en septembre (de deux à un en deux à trois mois), la fin des basses eaux est marquée par une décroissance très rapide des débits jusqu'à l'étiage minimal (cf. graphe 6.31.) sous l'effet de l'infiltration et de l'évaporation.

## 3.1.5. Bilan hydrologique

Pour une pluviométrie moyenne de 760 mm, la lame écoulée interannuelle (190 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 570 mm (Ke = 25 %). Le bassin, par son bilan, se rapproche du régime du MANDRARE.

Nous avons reporté sur le graphe 6.32., les variations de la lame et du déficit d'écoulement en fonction de la pluviométrie annuelle.

nota : les points représentatifs correspondent aux valeurs corrigées des observations pour un coefficient de concentration des pluies mensuelles KP = .188. La correction utilisée a pour expression :

$\Delta H = (2.18\ KP - .395) * 10^3$

Dans le domaine des valeurs observées, les lames sont comprises entre 80 mm (pour P = 400 mm, Ke = 20 %) et 430 mm (pour P = 1 300 mm, Ke = 33 %), avec une croissance exponentielle caractéristique d'un bassin imperméable.

Le déficit d'écoulement, dont la courbe moyenne s'infléchit pour les plus fortes valeurs de la pluviométrie, est compris entre 320 mm (pour P = 400 mm) et 870 mm (pour P = 1 300 mm).

Par extrapolation, on peut évaluer la lame écoulée à près de 600 mm pour une précipitation de 1 500 mm (valeur très rare sur le bassin). On notera que le déficit d'écoulement reste très en deçà (même pour de fortes précipitations annuelles sur le bassin) de l'évapotranspiration potentielle régionale évaluée à 1 100 mm.

figure 6.32.

Menarandra à Tranoroa

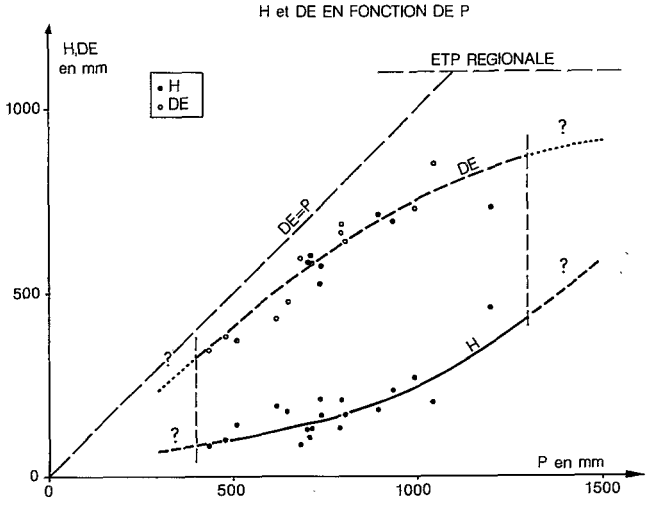


figure 6.33.

*Menarandra à Tranoroa*

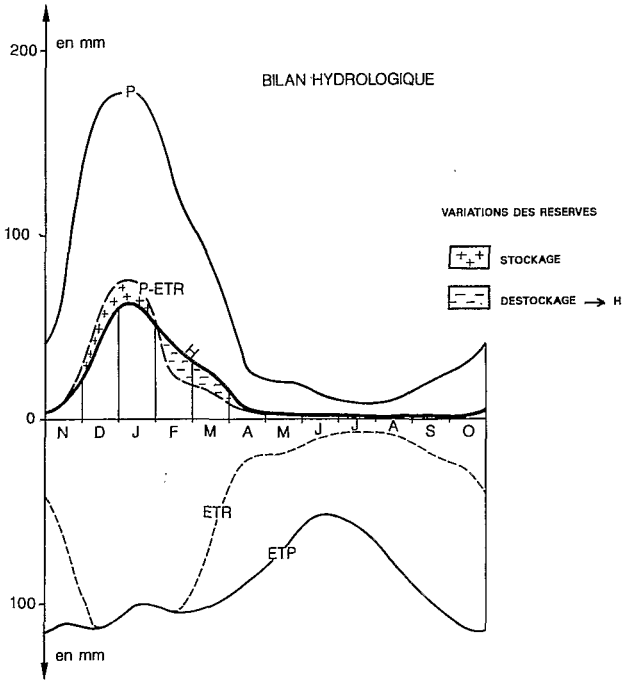



tableau 6.42.

Menarandra à Tranoroa
Termes du bilan
hydrologique (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 73 | 171 | 176 | 128 | 84 | 26 | 20 | 12 | 9 | 10 | 21 | 30 | 760 |
| ETP | 111 | 114 | 101 | 105 | 102 | 89 | 71 | 53 | 60 | 80 | 99 | 115 | 1100 |
| ETR | 64 | 114 | 101 | 105 | 70 | 22 | 18 | 11 | 8 | 9 | 20 | 28 | 570 |
| P-ETR | 9 | 57 | 75 | 23 | 14 | 4 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 190 |
| H | 9 | 42 | 62 | 40 | 25 | 4 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 190 |
| ΔR+ | | 15 | 13 | | | | | | | | | | + 28 |
| ΔR- | | | | 17 | 11 | | | | | | | | - 28 |
| R | 0 | 15 | 28 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

De décembre à mars, la pluviométrie avec 559 mm représente 74 % du total annuel ; les lames cumulées de la même période avec 169 mm représentent près de 90 % du total annuel. L'ETP est entièrement satisfaite de décembre à février et les précipitations relativement fortes de décembre et janvier permettent un stockage limité (28 mm) dans les magasins d'altérites du socle et le soutien des débits de février et mars. Puis l'écoulement est réduit à la fraction non évapotranspirée des précipitations mensuelles. L'ETR marque une forte réduction sur l'ETP (ETR/ETP = 52 %). Le bilan et assez semblable à celui du MANDRARE avec un stockage un peu plus important.

## 3.2. Autres observations sur le bassin

Des observations et mesures, effectuées en différents points du bassin, permettent de compléter la connaissance du régime hydrologique.

### 3.2.1. La Menarandra à Bekily

La MENARANDRA à BEKILY (24°13'S - 45°19'E), avec un bassin contrôlé d'une superficie de 1 735 km², a été observée de 1963 à 1969.

tableau 6.43.

Menarandra à Bekily
Débits moyens mensuels
(m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 65-66 | 6.19 | 28.8 | 17.5 | 69.3 | 3.43 | 2.36 | .973 | .879 | .339 | .226 | 4.84 | .220 | 11.3 |
| 66-67 | 2.03 | 16.9 | 39.8 | 40.2 | 42.7 | 7.24 | 1.26 | 0.67 | .42 | .19 | .57 | 4.02 | 12.9 |
| 67-68 | 7.41 | 19.9 | 18.5 | 20.9 | 5.26 | 1.97 | (.25) | (.50) | (.20) | (.10) | (.02) | 3.38 | (6.53) |
| 68-69 | 8.52 | - | - | 52.4 | 42.7 | 6.67 | 5.16 | .75 | .62 | .42 | .16 | 2.83 | - |

Les débits présentent une bonne corrélation avec ceux de la station principale de TRANOROA.

QBEKILY = .43 QTRANOROA ($R^2$ = .90 P > .995)

Cette régression permet d'estimer les débits mensuels et annuels-interannuels (en m³/s).

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8.4 | 36.4 | 46.4 | 34.5 | 18.1 | 4.82 | 2.37 | 1.35 | .91 | .86 | .96 | 1.92 | 13 |

Le module médian est de 12.1 m³/s (H = 220 mm).

Suivie depuis mai 1963, cette station a été entièrement étalonnée à la suite des mesures de janvier et de février 1971 (cyclones Félicie et Joëlle), la cote (5,48 m) du plus fort jaugeage (3 500 m³/s) correspondant au maximum connu de la période 1963-1974.

Un ordre de grandeur du débit maximal de l'année 1950-51 a été retenu après enquête (cote en amont du pont supérieure de "1 à 2 m" aux PHE de l'année 1970-71).

| Année | Q m³/s | H amont | H pont | Obs |
|---|---|---|---|---|
| 1950-51 | (5200) | | | |
| 1963-64 | 590 | 4,87 | | 3rel |
| 1964-65 | 630 | 5,00 | | Min |
| 1965-66 | 630 | 5,00 | | Min |
| 1966-67 | 630 | 5,00 | | Min |
| 1967-68 | 276 | 3,35 | | |
| 1968-69 | 800 | 5,60 | | |
| 1969-70 | 630 | 5,00 | | Min |
| 1970-71 | 3500 | 7,75 | 5,48 | PHE |
| 1971-72 | 1750 | | 5,10 | |
| 1972-73 | 530 | | 4,10 | |
| 1973-74 | 326 | | 3,18 | |

Une évaluation empirique des quantiles a été effectuée en tenant compte de l'information historique :

tableau 6.43.bis

Menarandra à Bekily
Maximaux annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 626 | 1140 | 1710 | (4200) | (6200) |
| q l/s/km² | 360 | 660 | 990 | (2400) | (3600) |

Les étiages suivants ont été observés :

| | | |
|---|---|---|
| 1966 | 42 l/s | 10 octobre |
| 1967 | 40 l/s | octobre |
| 1968 | 50 l/s | 19 novembre |
| 1969 | 100 l/s | 26 octobre |

Les débits minimaux ne représentent que 5 à 30 % des débits correspondants de la MENARANDRA à TRANOROA.

Des observations ont également été faites à RIAMBE, sur un seuil rocheux situé à environ 30 km au sud-ouest de TRANOROA (24°55'S - 44°52'E). Le bassin a une superficie de 6 140 km².

Les mesures de débit effectuées en basses eaux montrent que les débits d'étiage sont dans un rapport de 88 % avec ceux observés à TRANOROA.

Le débit minimal journalier médian peut être estimé à 160 l/s (.025 l/s/km²). Bien que les inferoflux soient contrôlés en surface (seuil rocheux), on observe une diminution du débit d'étiage dûe à l'évaporation. Les débits de basses eaux continuent à décroître plus en aval, par infiltration et évaporation et s'annulent au contact des sables quaternaires.

## 3.2.2. Le Menakompy

Le principal affluent, rive gauche de la MENARANDRA, le MENAKOMPY, a fait l'objet de mesures et observations à la station d'ANDRIABE (24°18'5( - 45°26'E) pour un bassin de 775 km².

tableau 6.44.

Menakompy à Andriabe
Débits mensuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 67-68 | (15,3) | 3.42 | (7.78) | - | (7.33) | - | .62 | 1.18 | .61 | .45 | .31 | 1.30 | - |
| 68-69 | .80 | 38.7 | 40.8 | 31.2 | 10.0 | 4.06 | 11.2 | 1.52 | .60 | .42 | .46 | 2.99 | 11.9 |

Ces débits représentent en moyenne 34 % de ceux de la MENARANDRA à TRANOROA, ce qui en année médiane correspond à un module de 9,6 m³/S (H = 390 mm).

En amont (site d'ANDRIAMBE) et au niveau du radier d'ANKILIMIHAZO, plusieurs échelles ont été suivies sur cette rivière, à différentes périodes entre 1962 et 1983.

L'extrapolation de hautes eaux à l'échelle d'ANDRIAMBE s'appuie sur la série de jaugeages réalisée du 25/01 au 06/02/71 (cyclone Félicie), allant de 2,56 à 766 m³/s pour des cotes à l'échelle entre 1,69 m et 4,90 m.

Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm* | Obs |
|---|---|---|---|---|
| 1951-52 | (1920) | 18/11/67 | 4,60 | |
| 1967-68 | 640 | 03/02/69 | 5,90 | |
| 1968-69 | 1270 | 28/12/69 | 5,30 | PHE |
| 1969-70 | 970 | 18/02/71 | 7,00 | |
| 1970-71 | 1920 | 29/12/71 | 3,96 | PHE |
| 1971-72 | 386 | 12/01/73 | 5,88 | |
| 1972-73 | 1260 | | 2,50 | |
| 1973-74 | 58 | | | Min |
| 1974-75 | (980) | | | |
| 1975-76 | 300 | | 4,47 | |
| 1976-77 | 583 | | | Min |

Sur la base de l'information historique, les quantiles suivants ont été estimés :

tableau 6.44.bis

Menakompy à Andriabe
Maximaux annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 760 | 1250 | 1560 | (2200) |
| q l/s/km² | 980 | 1610 | 2010 | (2840) |

Les mesures d'étiage ont fourni les résultats suivant (QJmin.).

| | | | |
|---|---|---|---|
| 5 | novembre | 1968 | 40 l/s |
| 10 | août | 1969 | 300 l/s |
| | septembre | 1981 | 150 l/s |
| | septembre | 1982 | 700 l/s |
| | octobre | 1983 | 30 l/s |

L'étiage spécifique median peut être évalué à 0.30 l/s/km².

On notera que la majeure partie des débits d'étiage de la MENARANDRA à TRANOROA proviennent de la MENAKOMPY.

## 3.2.3. Le Manambahy

Sur le MANAMBAHY à BEKITRO (24°33' - 45°18E, S =.395 km²), affluent rive gauche de la MENARANDRA, situé en aval de la MENAKOMPY, les mesures des débits effectuées permettent d'estimer le rapport des débits de basses eaux de cet affluent et de la MENARANDRA à 2.5 %.

Le QJmin médian est de l'ordre de 5 l/s (1/100 l/s/km²).

## 3.2.4. Bassin versant de Tranoroa

Un petit bassin versant (68 km²) a fait l'objet de mesures sur le ruissellement en 1968. Ce petit bassin, situé près de TRANOROA (24°43'S - 45°05'E), repose sur des gneiss faiblement altérés recouverts de steppe succulente dense. Les coefficients de ruissellement sont déterminés par l'intensité des précipitations (du type des averses tropicales avec des pointes de 80 mm/h en 5 minutes) et le degré de saturation préalable des sols (pluies antérieures). La plus fortes crue mesurée en 1968 (28 au 30 janvier) avait les caractéristiques suivantes :

P = 68 mm (précédée d'épisodes de 10 et de 16 mm)
LR = 26 mm
KR = 38 %
Qmax = 2,52 m³/s (3 720 l/s/km²) cyclone Georgette

avec de bonnes conditions de saturation préalable, les coefficients de ruissellement peuvent rester relativement élevés, même sous faible averse (ex. : cinquième épisode pluvieux du 30 janvier avec KR = 32 % pour P = 5 mm).

# 4. BASSIN DE LA LINTA

Le bassin de la Linta, situé à l'ouest de celui de la MENARANDRA, repose jusqu'au confluent avec le MANAKARALAHY sur les formations cristallines du socle (amphibolites, cipolins et leptynites du système du VOHIBORY) constituant le plateau du MAHAFALY. Le bassin inférieur correspond à la carapace sableuse quaternaire, puis au nord-ouest aux formations calcaires éocènes et aux formations dunaires anciennes du littoral.

Le bassin est très peu boisé (brousse clairsemée). Le bassin est peu arrosé (environ 750 mm en tête de bassin - BEKILY - jusqu'à environ 400 mm à l'exutoire - ANDROKA).

La station d'EJEDA (24°22'S - 44°31'E), située à une quinzaine de kilomètres au nord du confluent avec l'affluent principal de la LINTA, le MANAKARALAHY, contrôle un bassin versant assez imperméable (socle peu altéré) de 1 700 km².

Des observations et mesures ont été effectuées à cette station de 1951 à 1962, avec de nombreuses lacunes.

tableau 6.45.

Linta à Ejeda
Débits mensuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1951/52 | | | 11.7 | 3.4 | 16.8 | | | | | | | | |
| 1952/53 | | | 13.2 | 14.7 | 2.6 | .38 | .11 | .16 | .27 | .19 | .16 | 1.02 | |
| 1953/54 | 4.33 | 7.32 | 34.9 | 23.4 | 3.77 | 1.54 | .47 | .74 | .23 | .09 | | | |
| 1954/55 | | | | | | | 1.21 | .31 | .38 | .39 | .10 | 1.0 | |
| 1955/56 | 3.0 | 19 | 4.3 | 5.6 | 5.3 | .36 | .05 | .05 | .05 | | | | |
| 1959/60 | | | | | | | | | (0) | (0) | (0) | .155 | |
| 1960/61 | 1.49 | 30.0 | 35.2 | 26.3 | 15.0 | 1.96 | .26 | .31 | .44 | .61 | .07 | .34 | 9.28 |
| 1961/62 | .11 | 9.35 | 4.03 | 2.01 | .17 | 3.05 | 3.72 | .01 | .01 | .10 | .01 | .19 | 1.91 |
| Moyenne. | 2.23 | 16.4 | 17.2 | 12.6 | 7.27 | 1.46 | .97 | .26 | .20 | .23 | .07 | .54 | 4.95 |

Les débits mensuels de la LINTA présentent une assez bonne liaison statistique avec ceux de la MENARANDRA :

QLINTA = .12 QMENARANDRA ($R^2$ = .84 P > .995) pour soixante et un couples.

ce qui permet une évaluation (prudente) des débits moyens interannuels de la LINTA (en m³/s).

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.35 | 10.2 | 13.0 | 9.64 | 5.1 | 1.34 | .66 | .38 | .25 | .24 | .27 | .54 | 3.64 |

Le module médian peut être estimé à 3.4 $m^3/s$ (2 $l/s/km^2$) ce qui correspond à une lame de 65 mm.

La pluviométrie moyenne sur le bassin étant évaluée à 650 mm, le déficit d'écoulement moyen peut être estimé à 585 mm (Ke = 10 %).

Les débits d'étiage sont très faibles : 150 l/s en 1953, inférieurs à 50 l/s en 1961, nuls en 1954,1955, 1956, 1960, 1962 et 1964 (mois d'août en général).

# Le versant occidental

Chapitre 7

S'étendant entre le 15e et le 24e parallèle sud, sur une largeur moyenne de 250 à 380 km, le versant occidental, avec une superficie globale d'environ 365 000 km², représente à peu près 61 % de la superficie de Madagascar. C'est sur ce versant que se situent les bassins des plus grands fleuves malgaches : Betsiboka, Tsiribihina, Mangoky, etc.

La géologie (et le relief) joue un rôle important dans l'hydrographie et la caractérisation des régimes hydrologiques des cours d'eau. Elle permet de différencier les bassins supérieurs des grands fleuves situés sur le socle ancien cristallin très altéré et sous pluviométrie relativement forte, et les bassins inférieurs des grands fleuves ainsi que les bassins des rivières cotières moins importantes situés sur les formations sédimentaires à sols moins évolués et sous pluviométrie plus réduite. La ligne de contact entre le socle et les formations sédimentaires suit une direction sensiblement parallèle au littoral, entre 100 et 150 km à l'est de la côte (cf. graphes 7A à 7E).

À l'est de cette ligne de contact, se situent les formations cristallines du socle ancien : leptinytes, cipolins et quartzites du système androyen au sud, puis au centre, roches éruptives basiques à faciès amphiboliques du système du VOHIBORY et pour l'essentiel (centre et nord), micaschistes, gneiss, migmatites et migmatites granitoïdes du système du graphite ainsi que granites stratoïdes et migmatites des Tampoketsa.

À l'ouest, reposent sur le socle, les formations sédimentaires qui se présentent successivement, d'est en ouest, ainsi : séries gréseuses, gréso-calcaires et parfois schisteuses du Karroo (Isalo, Sakamena, Sakoa) et du jurassique inférieur, séries calcaires et marno-calcaires du jurassique supérieur, du crétacé marin et de l'éocène, séries gréseuses du crétacé continental et du pliocène. On notera encore dans le secteur sédimentaire, les formations volcaniques du crétacé et sur le littoral (particulièrement dans les deltas des grands fleuves) des sables et formations alluviales.

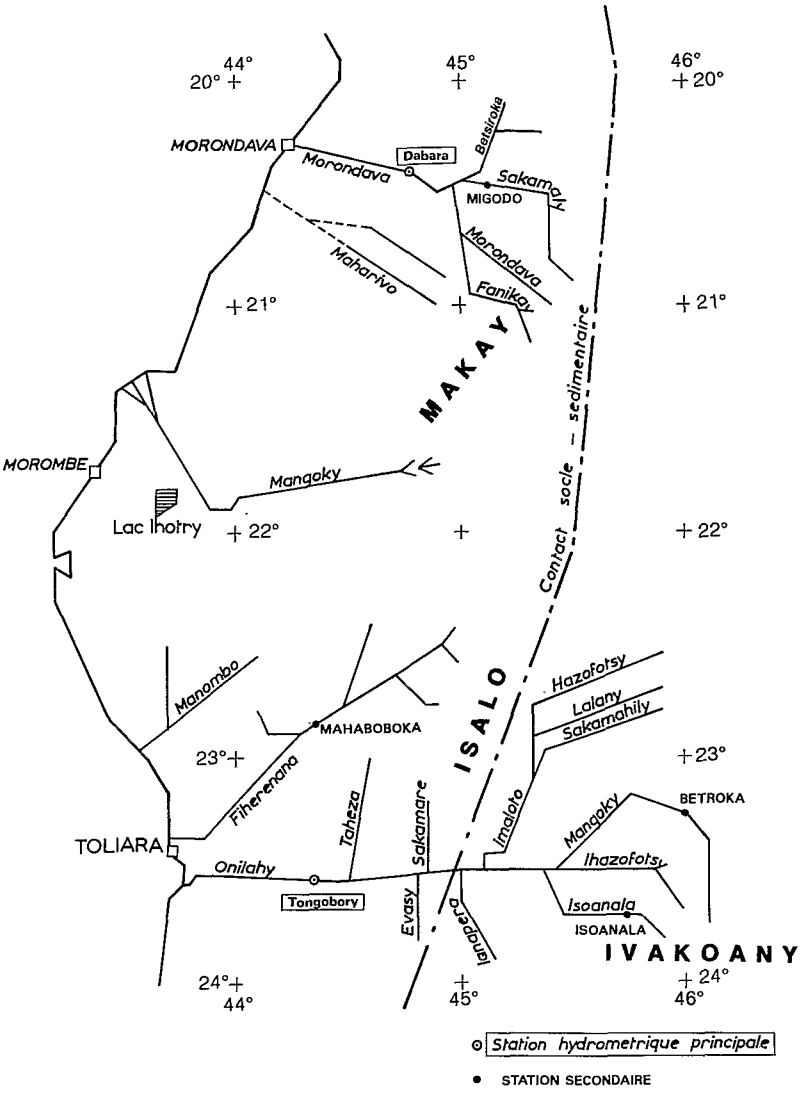
Sur le socle, les formations superficielles correspondent à une altération profonde, plus prononcée à l'est, soumise à l'influence lithologique sur les bordures occidentales et dans le sud au climat moins humide. Le faciès principal est, sur les hauts plateaux du Centre, représenté par des sols ferralitiques typiques (latérites rouges profondes) sur roches cristallines diverses. En bordure du socle (ouest et sud), l'altération est moins sensible (sols faiblement ferrallitiques de types hydromorphes ou ferrisoliques associés à des sols ferrugineux tropicaux).

Sur les formations sédimentaires, on distingue les sols ferrugineux tropicaux correspondant à une altération plus ou moins prononcée des grandes coulées crétacées basiques et des matériaux d'érosion sableux ou sablo-argileux (Karroo, jurassique inférieur, crétacé continental, pliocène) et les sols minéraux bruts (lithosols bruts ou peu évolués) correspondant aux formations calcaires ou marno-calcaires.

Les formations végétales dominantes sont la steppe et la savane. À l'est du versant occidental (hauts plateaux), sur les sols lessivés et appauvris, les steppes à graminées basses xéromorphes (aristida) sans peuplement arbustif sont largement prédominantes. À l'ouest et au sud-ouest, sur des sols moins dégradés, la savane

figure 7.A.

Côte ouest (entre 20° et 24°S)



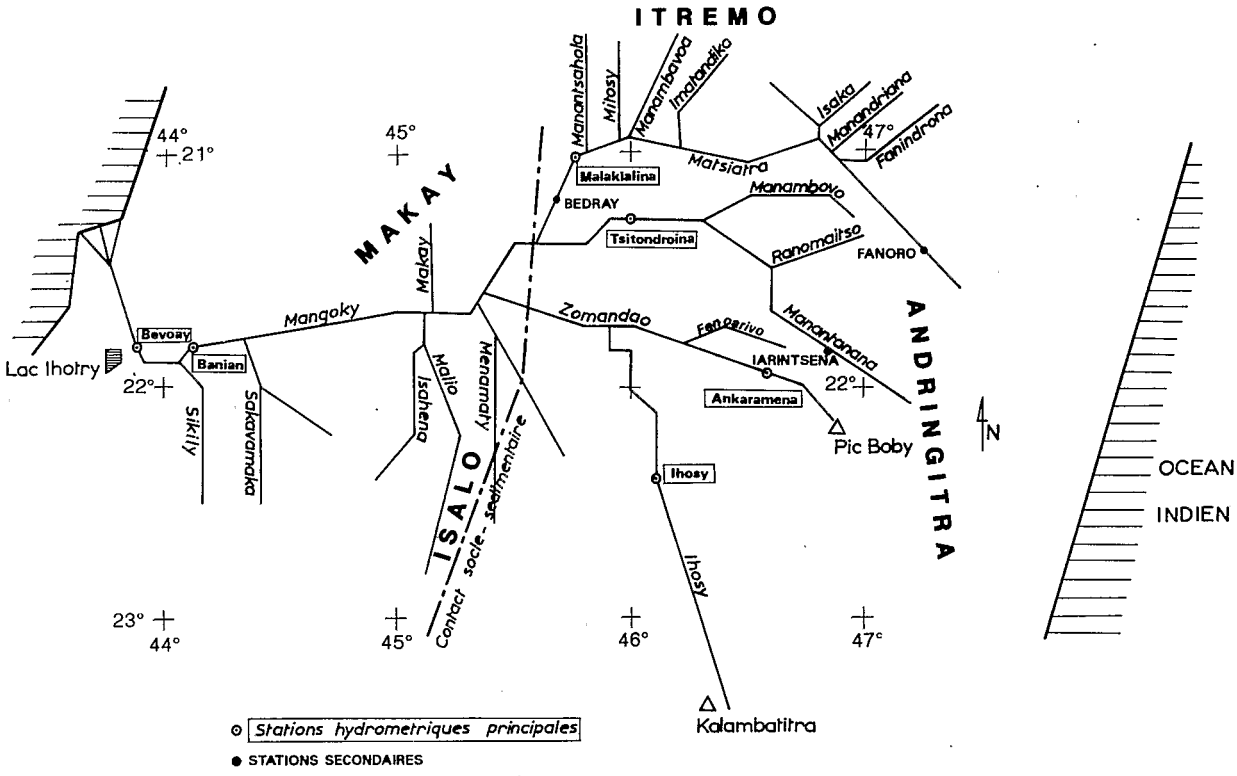

à graminées plus hautes (hétéropogon, hyparrhénia) avec développement, en arrière du littoral, de strates arbustives. Cette savane, à l'extrême sud-ouest, passe à une végétation plus xérophile (bush).

Il est possible de distinguer sommairement sur le versant, deux grandes régions climatiques :

- au nord, une zone comprise entre 2 000 mm (ligne de crêtes séparant les versants occidentaux et orientaux) et 1 000 mm (l'isohyète 1 000 mm quitte le littoral près de Maintirano, se dirige vers le sud jusqu'à la latitude de Fianarantsoa pour s'infléchir vers l'est puis prend une direction nord-sud jusqu'à l'Anosy, après avoir contourné par l'ouest le massif de l'Ivakoany). L'isohyète 1 500 mm correspond grossièrement à la limite du socle jusqu'au 20e parallèle puis prend une direction ouest-est au sud du massif de l'Ankaratra. Les températures

figure 7.B.

Bassin du Mangoky




dans ce secteur croissent régulièrement de l'est (hauts plateaux) vers l'ouest (littoral) : climat mésothermique à mégathermique ;

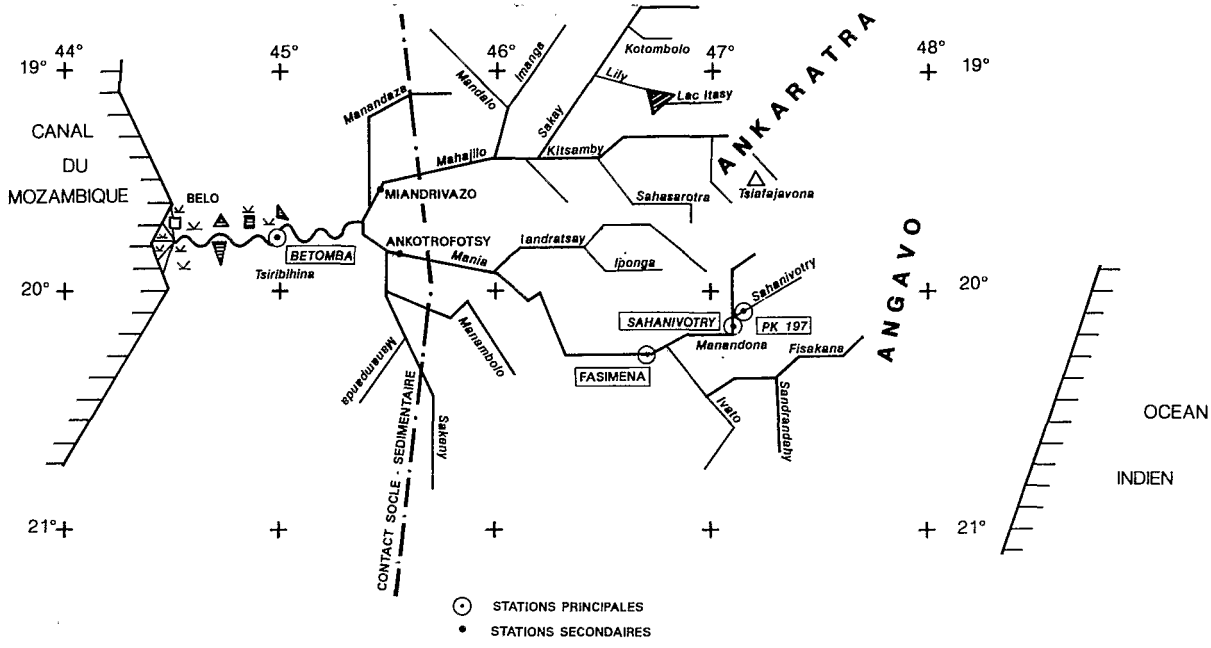
- au sud et à l'ouest de l'isohyète 1 000 mm, la pluviométrie décroît régulièrement jusqu'à 400 mm au niveau de l'embouchure de l'Onilahy. Toute la zone est en climat mégathermique.

Du point de vue hydrologique, on distingue deux grands ensembles (graphes 7A à 7E) :

- celui des grands fleuves malgaches : Onilahy (32 000 km²), Mangoky (55 700 km²), Tsiribihina (49 800 km²), Manambolo (14 000 km²), Mahavavy du Sud (16 500 km²), ensemble Betsiboka-Mahajamba (63 500 km² dont 49 000 km² pour la Betsiboka), Sofia (27 300 km²). L'ensemble représente 71 % du versant occidental. Ces grands

figure 7.C.

Bassin de la Tsiribihina




fleuves, ayant leurs bassins supérieurs (dans des proportions diverses) situés sur le socle cristallin altéré et relativement bien arrosé, bénéficient de réserves accumulées en saison des pluies qui soutiennent les débits d'étiage en dépit d'une faible pluviométrie de saison sèche. On notera le contraste entre les hauts bassins où les cours d'eau (avec des biefs à pente modérée entrecoupés de rapides à fortes pentes) ont une pente générale de l'ordre de 10 m par km et les bassins inférieurs à faible pente (moins de 1 m par km). La rupture (dans un rapport moyen de 10 à 1) se produit brutalement au contact entre le socle et les formations sédimentaires ;

- celui des petits fleuves cotiers du versant occidental dont les plus importants (Sambao, Manambaho, Morondava, Maharivo, Firehana) ont des bassins compris entre 5 et 10 000 km². Leurs bassins sont essentiellement situés sur les formations sédimentaires et recueillent des précipitations nettement plus réduites, avec une saison sèche très marquée. Les débits d'étiage sont faibles et les cours d'eau des bassins inférieurs à 1 000 km² s'assèchent complètement d'avril à novembre. Les profils de ces cours d'eau sont réguliers, sans rapides et de pente modérée.

figure 7.D.

Côte ouest (entre 16° et 20°S)

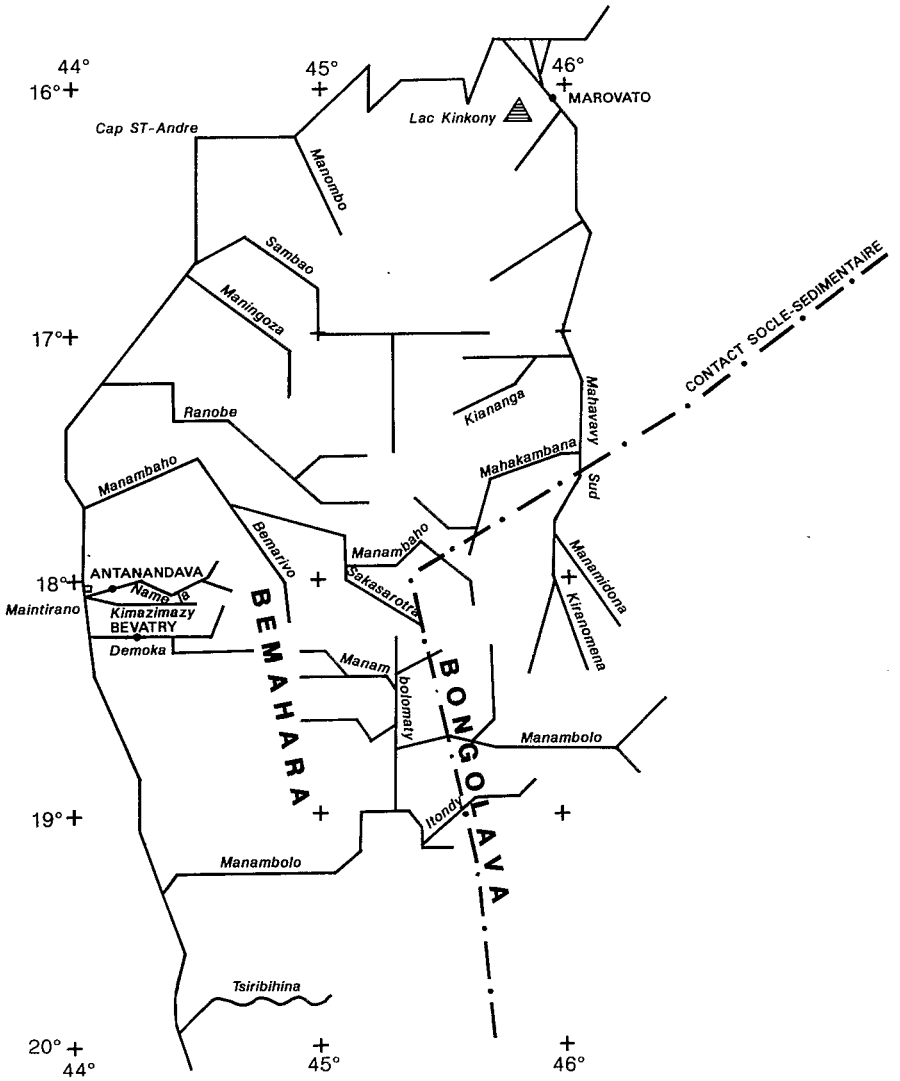
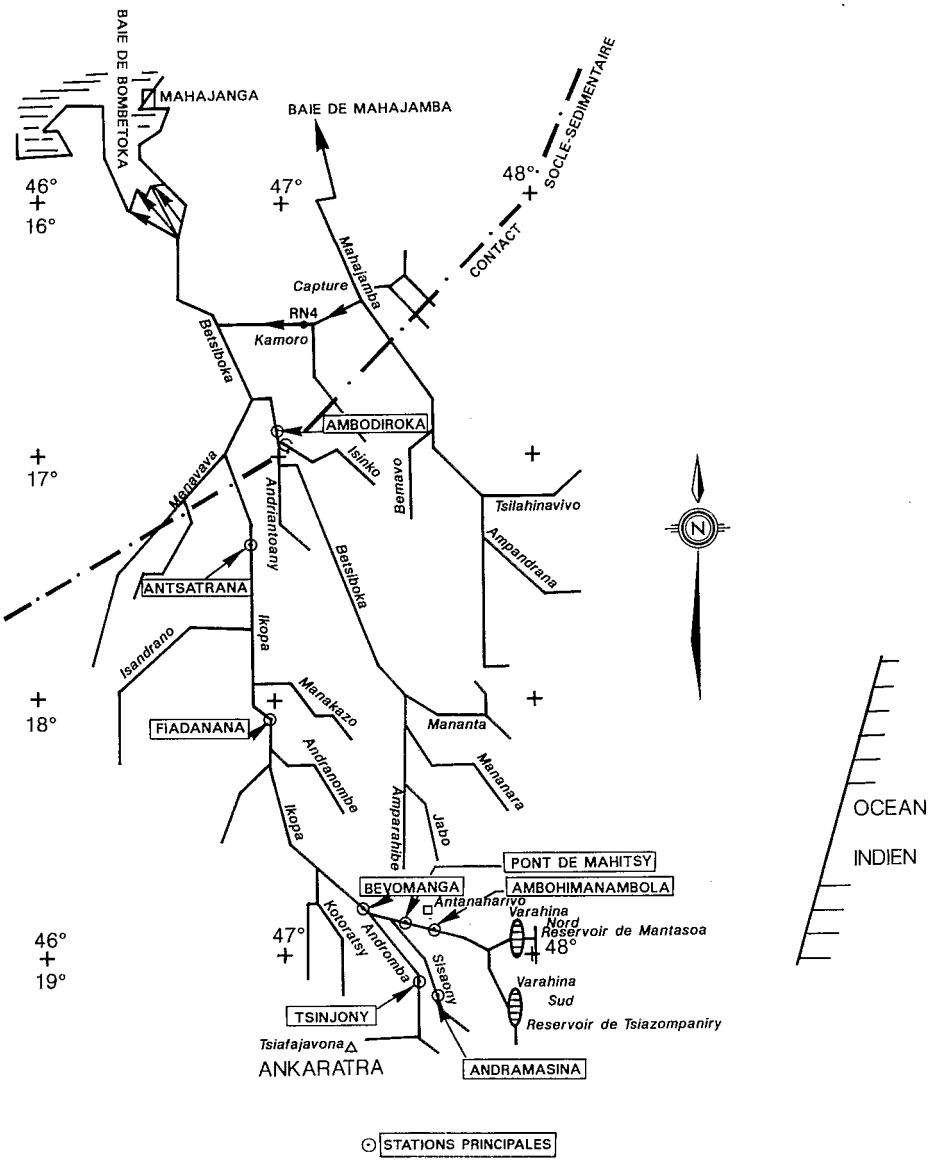


figure 7.E.

Bassin de la Betsiboka



# 1. BASSIN DE L'ONILAHY

Le bassin de l'Onilahy s'étend entre les latitudes 22 et 24° S et les longitudes 43°30' et 46°30'E sur une superficie voisine de 32 000 km². Les deux formateurs principaux, situés sur le socle cristallin, drainent, au nord-est le plateau de l'Horombe pour l'Imaloto, au sud-est, la façade nord-ouest du massif de l'Ivakoany, pour le Mangoky. Sur le sédimentaire, l'Onilahy, après le confluent de l'Imaloto et du Mangoky, ne reçoit plus que quelques petites affluents peu actifs (Janagera, Sakamare, Taheza, etc.).

Le bassin supérieur de l'Onilahy est situé entièrement sur le socle cristallin : leptynites, cipolins, quartzites et migmatites du système androyen, micaschistes et migmatites du système du graphite avec quelques dômes granitiques plus anciens dans la région de Betroka. Le socle est plus ou moins altéré et peut comporter une épaisseur variable d'altérites (sols rouges ferralli-tiques typiques ou bien lithosols fissurés) pouvant former un magasin. Dans l'Horombe, on note également la présence de latérites indurées en carapaces ou cuirasses assez peu perméables.

Après le confluent, le bassin est entièrement situé sur des formations sédimentaires constituées de la série du Karroo (schistes à intrusions calcaires du Sakamena, calcaires gréseux de l'Isalo), puis des calcaires et marno-calcaires du jurassique et du crétacé, enfin, des calcaires nummulitiques de l'éocène et de l'oligocène marin. Ces formations à dominantes calcaires et sableuses (altération des grès) présentent des phénomènes karstiques (infiltrations en grand et en petit, résurgences, etc.). On note également quelques formations volcaniques : coulées du crétacé, basaltes néogènes et quaternaires près de Toliara, ainsi que des dépôts marins, vases et sables, sur le littoral.

Les formations superficielles sont représentées par des sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés sur les grès jurassiques et crétagés, par des sols bruts calcimorphes sur les formations éocènes. La basse vallée de l'Onilahy est occupée par des sols peu évolués alluvionnaires.

Sur la majeure partie du bassin, le domaine végétal est représenté par la pseudo-steppe, savane à Hétéropogon et Hyparrhenia sur les pentes occidentales et le bassin supérieur, avec plus à l'ouest présence d'arbustes et palmiers ainsi que de galeries forestières le long des cours d'eau. Près de Toliara, on aborde le "bush" constitué de fourrés xérophiles à Euphorbia, Didiereacées et plantes ligneuses et épineuses, ainsi qu'au nord-est de Toliara, quelques reliques de forêt caducifoliée tropophile. La faible densité du couvert végétal dans le haut bassin favorise le ruissellement. Les formations végétales, bien que le plus souvent clairsemées, du bassin inférieur, sont grandes consommatrices d'eau dont elles se gorgent en saison des pluies.

Le bassin, d'est en ouest, passe du climat sub-humide (1 000 mm de pluie sur le haut bassin du Mangoky) au climat semi-aride, puis au climat aride sur le littoral (400 mm à Toliara). Tous ces climats sont mégathermiques (température moyenne annuelle comprise entre 24 et 25°C). Le bassin de l'Onilahy (à la station de Tongobory) reçoit environ 800 mm en moyenne inter-annuelle.

## 1.1. L'Onilahy à Tongobory

La station de TONGOBORY (23°32'S - 44°19'E), située près de l'ouvrage routier de la RN 10, contrôle un bassin versant de 27 700 km² (87 % du bassin total).

Les observations limnimétriques ont été effectuées de 1951 à 1974, avec des lacunes (1958, 1960, 1961, 1962). Soixante quatre mesures de débit (entre 20 et 910 m³/s) ont permis d'établir un étalonnage provisoire (neuf courbes d'étalonnage correspondent à douze périodes de validation). Le lit est instable en basses eaux et l'extrapolation a été conduite jusqu'à 1 600 m³/s. Les données sont de qualité médiocre à moyenne. Elles donnent une assez bonne évaluation des débits moyens, mais les valeurs correspondant aux très basses eaux et aux maximums de crue doivent être considérées avec prudence (Lamagat, 1990).

Le tableau 7.1. rassemble les débits moyens mensuels et annuels de la période 1951-1974, ainsi que les moyennes, écarts-type et quantiles de la distribution des débits moyens mensuels classés. Le graphe 7.1. qui représente ces quantiles montre une irrégularité des débits mensuels nettement moins accentuée que sur les bassins imperméables du versant méridional.

tableau 7.1.

Débits moyens mensuels et annuels

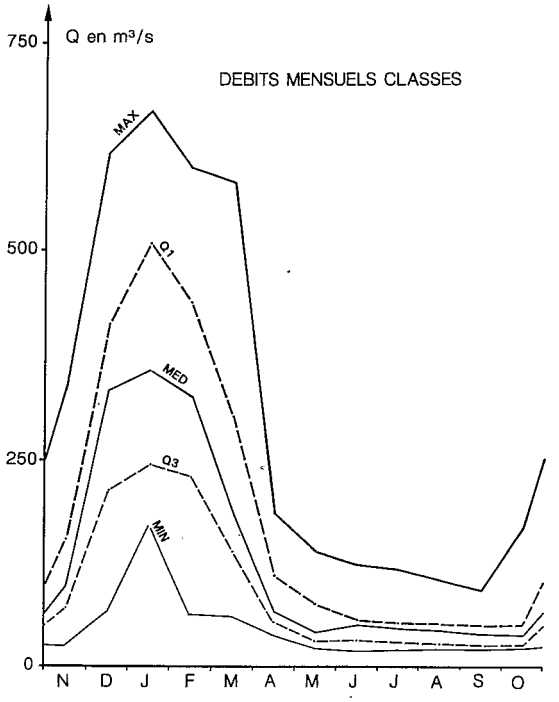
Station : 1251100140 Tongobory
Rivière : Onilahy
Pays : Madagascar
Bassin : Onilahy

Latitude : 23.32.00
Longitude : 44.19.00
Aire : 27 700 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1951-52 | 106. | 135. | 465. | 251. | 405. | 55.5 | 30.0 | 30.1 | 27.4 | 26.0 | 26.3 | 26.6 | 132. |
| 1952/53 | 51.4 | 121 | 188 | 279 | 261 | 112 | 40.5 | 51.6 | 47.4 | 47.0 | 50.9 | 50.8 | 107 |
| 1953/54 | 89.0 | 268 | 329 | 350 | 170 | 65.7 | 48.4 | 51.2 | 48.5 | 43.5 | 35.9 | 39.0 | 127 |
| 1954/55 | 138 | 270 | 510 | 91.2 | 89.3 | 41.6 | 44.8 | 51.1 | 48.0 | 48.8 | 41.7 | 43.1 | 119 |
| 1955/56 | 64.1 | 215 | 310 | 63.6 | 206 | 46.0 | 26.7 | 22.8 | 22.6 | 22.1 | 28.1 | 37.6 | 89.4 |
| 1956/57 | 87.6 | 202 | 396 | 167 | 235 | 73.5 | 72.8 | 65.1 | 66.7 | 63.7 | 61.9 | 55.8 | 129 |
| 1957/58 | 64.3 | 202 | 282 | 456 | - | - | - | 36.4 | 34.5 | 47.7 | 41.2 | 30.7 | - |
| 1958/59 | 96.5 | 409 | 380 | 165 | 146 | 39.1 | 33.3 | 34.3 | 31.0 | 28.4 | 24.1 | 25.2 | 118 |
| 1959/60 | 140 | 320 | 246 | 439 | 165 | 68.3 | - | - | 35.4 | 31.8 | 31.4 | 41.9 | - |
| 1960/61 | 26.1 | 412 | 516 | 293 | 303 | 186 | - | - | - | - | - | - | - |
| 1961/62 | - | 618 | 357 | 296 | 61.6 | 62.0 | 83.5 | - | - | - | - | - | - |
| 1962/63 | 231 | 492 | 423 | 493 | 244 | 58.9 | 32.4 | 59.6 | 49.2 | 31.7 | 29.1 | 24.4 | 179 |
| 1963/64 | 227 | 487 | 197 | 478 | 102 | 48.6 | 38.6 | 50.9 | 46.5 | 63.3 | 24.8 | 25.9 | 148 |
| 1964/65 | 107 | 396 | 420 | 429 | 153 | 81.9 | 22.3 | 20.0 | 21.1 | 28.0 | 40.4 | 46.1 | 146 |
| 1965/66 | 95.3 | 404 | 268 | 433 | 104 | 53.5 | 31.3 | 30.9 | 27.7 | 31.0 | 39.7 | 37.3 | 128 |
| 1966/67 | 71.4 | 334 | 545 | 326 | 583 | 161 | 63.1 | 58.5 | 55.1 | 50.3 | 49.9 | 170 | 206 |
| 1967/68 | 154 | 226 | 214 | 369 | 159 | 61.4 | 54.7 | 59.9 | 39.5 | 27.0 | 22.2 | 28.5 | 117 |
| 1968/69 | 76.6 | 434 | 551 | 448 | 312 | 163 | 84.6 | 48.5 | 40.8 | 34.6 | 29.2 | 34.8 | 187 |
| 1969/70 | 44.7 | 361 | 668 | 421 | 341 | 144 | 123 | 126 | 119 | 106 | 94.1 | 88.2 | 219 |
| 1970/71 | 338 | 346 | 545 | 599 | 451 | 111 | 28.9 | 31.8 | 27.7 | 25.5 | 24.5 | 36.0 | 211 |
| 1971/72 | 97.6 | 236 | 350 | 231 | 274 | 94.2 | 141 | 74.4 | 56.6 | 55.6 | 52.6 | 87.6 | 146 |
| 1972/73 | 165 | 68.5 | 175 | 185 | 132 | 66.9 | 39.9 | 48.2 | 54.9 | 49.6 | 44.2 | 39.6 | 88.4 |
| 1973/74 | 184 | 560 | 242 | 268 | 140 | 125 | 89.3 | 80.6 | 62.9 | 57.9 | 54.3 | 53.6 | 159 |
| Moyenne | 121 | 327 | 373 | 327 | 229 | 87.2 | 56.5 | 51.6 | 45.8 | 43.8 | 40.3 | 48.7 | 145 |
| Ecart-type | 73.4 | 142 | 138 | 138 | 130 | 43.7 | 33.1 | 24.0 | 21.3 | 19.4 | 16.9 | 34.6 | |
| Max. | 338 | 618 | 668 | 599 | 583 | 186 | 141 | 126 | 119 | 106 | 94.1 | 170 | |
| Q1 | 154 | 412 | 510 | 439 | 303 | 112 | 78.2 | 59.8 | 55.0 | 53.0 | 50.4 | 50.8 | |
| Méd. | 97.1 | 334 | 357 | 326 | 188 | 67.6 | 42.7 | 51.0 | 46.5 | 43.5 | 39.7 | 37.6 | |
| Q3 | 71.4 | 215 | 246 | 231 | 140 | 55.5 | 31.8 | 33.0 | 29.3 | 28.2 | 27.2 | 28.5 | |
| Min | 26.1 | 68.5 | 175 | 63.6 | 61.6 | 39.0 | 22.3 | 20.0 | 21.1 | 22.1 | 22.2 | 24.4 | |

figure 7.1.

Onilahy à Tongobory




En complétant les débits journaliers manquants des mois de mars à mai 1958, mai et juin 1960, mai et novembre 1961, juin 1962, et en estimant les autres débits mensuels non observés à partir des relations statistiques inter-mensuelles (cf. tableau 7.2.), il est possible de compléter l'échantillon des valeurs annuelles :

1957-58 Q = 117 m³/s (H = 132 mm) 1959-60 Q = 133 m³/s (H = 152 mm)
1960-61 Q = 164 m³/s (H = 186 mm) 1961-62 Q = 138 m³/s (H = 157 mm)

tableau 7.2

Relations entre les débits moyens mensuels

| | | | |
|---|---|---|---|
| Q04 = .21 | Q03 + 39.4 | R = .62 | P > .99 |
| Q05 = .44 | Q04 + 20.2 | R = .52 | P > .98 |
| Q06 = .59 | Q05 + 19.8 | R = .81 | P > .995 |
| Q07 = .87 | Q06 + 1.5 | R = .96 | P > .995 |
| Q08 = .85 | Q07 + 4.9 | R = .93 | P > .995 |
| Q09 = .75 | Q08 + 7.5 | R = .86 | P > .995 |
| Q10 = 1.09 | Q09 + 4.6 | R = .56 | P > .99 |

Les relations entre débits mensuels établies de juin à septembre montrent l'existence de réserves drainables significatives. La décroissance exponentielle des débits a un cœfficient $\alpha$ = .003 (Tc = 230 jours) qui doit être assez proche du tarissement (décroissance des débits de base).

## 1.1.1. Apports annuels

L'ajustement statistique effectué sur les vingt-trois valeurs de l'échantillon 1951-1974 (débits annuels observés ou estimés) fournit les valeurs suivantes :

tableau 7.3.

Onilahy à Tongobory
Apports annuels

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| H mm | 95 | 104 | 116 | 143 | 175 | 195 | 213 |
| Q ($m^3/s$) | 83.7 | 91.6 | 102 | 126 | 154 | 172 | 188 |
| q ($l/s/km^2$) | 3.0 | 3.3 | 3.7 | 4.5 | 5.5 | 6.2 | 6.8 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 1.75, échelle : 149 mm, position : - 6.27, forme : .234).

Cinquantennales sèche et humide : 86 mm (Q = 75.8 $m^3/s$) et 235 mm (Q = 207 $m^3/s$).

Le module spécifique de l'Onilahy est assez faible, inférieur à ceux du Mandrare et de la Ménarandra. Cela peut s'expliquer par l'importance des pertes par évapotranspiration dues à une température moyenne élevée et une faible hygrométrie. Le rapport des lames décennales (K3) est lui aussi assez faible (1.88), inférieur de moitié à ceux des bassins du sud aux modules comparables. Cette régularité est probablement due à des phénomènes de rétention et régularisation interannuelle liés à la géomorphologie karstique du bassin inférieur et aux apports des affluents issus des grès de l'ISALO.

## 1.1.2. Crues

tableau 7.4.

Onilahy à Tongobory
Débits maximum de crues ($m^3/s$)

| Date | Q max. | Date | Q max. |
|---|---|---|---|
| 08/01/52 | 924 | 13/02/64 | 1180 |
| 03/03/53 | 1160 | 09/01/65 | 1070 |
| 27/01/54 | 1220 | 24/02/66 | 1130 |
| 07/01/55 | 1160 | 26/12/66 | 1290 |
| 24/03/56 | 990 | 19/02/68 | 961 |
| 09/01/57 | 1130 | 31/12/68 | 1450 |
| 19/02/58 | 1280 | 29/12/69 | 1330 |
| 15/12/58 | 1220 | 18/02/71 | 1550 |
| 13/02/60 | 1120 | 29/01/72 | 1040 |
| 10/01/61 | 1590 | 14/01/73 | 805 |
| 28/12/61 | 1200 | 23/12/73 | 1020 |
| 06/02/63 | 1380 | | |

Une année sur deux, le maximum est observé entre la fin décembre et la mi-février (date médiane : 14 janvier - dates extrêmes : 15 décembre et 24 mars).

Les quantiles de cet échantillon sont les suivants :

tableau 7.5.

Onilahy à Tongobory
Débits maximum annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1180 | 1350 | 1450 | 1530 | (1680) |
| q l/s/km² | 43 | 49 | 52 | 55 | (61) |

nota : loi exponentielle généralisée

Cependant, les débits de hautes eaux sont probablement sous-estimés du fait que l'on ne connaît pas l'amplitude des débordements à l'amont de la station du pont de TONGOBORY. En attribuant (pour la crue décennale) un ordre de grandeur de 900 à 1 000 m³/s pour ces débordements, il est possible de réévaluer la crue décennale à 2 300 m³/s (83 l/s/km²). On notera que, dans le cadre d'une étude spécifique de l'ONILAHY (LAMAGAT, 1990) la crue de projet (décennale) a été estimée provisoirement, et par prudence, à 3 200 m³/s (115 l/s/km²) par comparaison avec le MANGOKY au BANIAN.

Les débits spécifiques de crue de l'Onilahy, faibles pour un bassin de cette taille, semblent refléter les conditions géologiques de ce bassin (atténuation des crues au passage des zones karstiques).

## 1.1.3. Basses eaux

tableau 7.6.

Onilahy à Tongobory
Débits journaliers minimums
(m³/s)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1951 | 52.2 | 36.0 | 36.0 | 35.4 | 26/10 |
| 1952 | 26.8 | 25.3 | 23.8 | 23.5 | 14/10 |
| 1953 | 46.0 | 39.9 | 37.0 | 35.3 | 15/05 |
| 1954 | 46.0 | 35.0 | 31.6 | 28.6 | 22/10 |
| 1955 | 43.1 | 39.0 | 36.8 | 35.0 | 02/11 |
| 1956 | 22.8 | 22.1 | 21.4 | 20.0 | 17/06 |
| 1957 | 60.7 | 54.0 | 51.0 | 51.0 | 30/10 |
| 1958 | 35.9 | 32.6 | 28.6 | 27.1 | 18/10 |
| 1959 | 29.7 | 23.5 | 23.0 | 22.4 | 31/10 |
| 1960 | 32.5 | 28.0 | 24.7 | 24.3 | 07/11 |
| 1961 | | | | (21.2) | 15/11 |
| 1962 | | | | (7.59) | 11/10 |
| 1963 | 33.6 | 26.4 | 20.7 | 19.8 | 23/10 |
| 1964 | 34.2 | 24.3 | 22.9 | 21.3 | 05/10 |
| 1965 | 21.9 | 18.3 | 17.8 | 17.2 | 07/07 |
| 1966 | 27.8 | 25.7 | 22.6 | 21.7 | 07/10 |
| 1967 | 54.4 | 47.7 | 46.7 | 35.0 | 29/04 |
| 1968 | 27.6 | 21.5 | 19.2 | 17.3 | 31/10 |

suite

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1969 | 35.3 | 28.3 | 25.5 | 18.0 | 31/03 |
| 1970 | 109 | 87.9 | 79.9 | 74.3 | 04/11 |
| 1971 | 26.4 | 22.0 | 20.9 | 18.8 | 06/10 |
| 1972 | 49.6 | 41.4 | 37.3 | 34.0 | 17/12 |
| 1973 | 44.1 | 37.5 | 35.5 | 34.4 | 20/10 |
| 1974 | 57.9 | 49.7 | 43.5 | 35.4 | 06/04 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 109 | 87.9 | 79.9 | 74.3 | 17/12 |
| Q1 | 49.6 | 39.9 | 37.0 | 35.0 | 31/10 |
| Méd. | 35.6 | 30.5 | 27.1 | 23.9 | 12/10 |
| Q3 | 27.8 | 24.3 | 22.6 | 19.9 | 07/07 au 05/10 |
| Min. | 21.9 | 18.3 | 17.8 | 7.59 | 31/03 |

tableau 7.7.

Onilahy à Tongobory
Distribution des étiages

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence (ans) | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q (m3/s) | 12.7 | 15.0 | 18.2 | 25.9 | 36.8 | 44.4 | 51.9 |
| q (l/s/km2) | .46 | .54 | .65 | .93 | 1.32 | 1.60 | 1.87 |

Loi de Fréchet (test Brunet-Moret : 6.32, échelle : 184 m³/s, position : - 162, forme : - 0.50).

Cinquantennales sèche et humide : 10.4 m³/s (.37 l/s/km²) et 62.1 m³/s (2.23 l/s/km²).

DCE = 1.06 QJmin. + .89 $R^2$ = .96 DCE/QJmin. = 1.13
DC11 = 1.14 QJmin. + 1.16 $R^2$ = .95 DC11/QJmin. = 1.23
DC9 = 1.38 QJmin. + .96 $R^2$ = .92 DC9/QJmin = 1.47

Les débits spécifiques relativement élevés (près d'un l/s/km² pour la médiane) pour un bassin de cette dimension situé dans le sud de l'île et régularisé (K3 = 3) attestent l'importance des résurgences karstiques ainsi qu'un emmagasinement sans doute significatif dans les formations perméables (ISALO).

## 1.1.4. Bilan hydrologique

La lame écoulée moyenne (165 mm), pour une pluviométrie moyenne de 800 mm, correspond à un déficit d'écoulement de 635 mm (KE = 21 %).

Faute d'avoir pu établir la pluviométrie moyenne sur le bassin pour les années observées, il n'est pas possible de déterminer avec précision les mécanismes du bassin. L'aspect des hydrogrammes et la régularité des débits interannuels laissent supposer une assez forte rétention dans le bassin : emmagasinement annuel dans les formations perméables (altérites du socle cristallin du haut bassin et surtout formations sédimentaires de l'ISALO) et probablement régulation interannuelle dans les formations karstiques dont les résurgences alimentent également les étiages. La relative perméabilité du bassin et son relief général peu prononcé expliquent probablement la modération des débits de crue.

## 1.2. Autres observations sur le bassin

Des observations fragmentaires ont été effectuées en différents points du bassin.

### 1.2.1. Le Mangoky à Betroka

Dans le haut bassin de l'Onilahy, entièrement situé sur le socle cristallin, la station de BETROKA (23°16' S - 46°05' E), sur le MANGOKY, contrôle un bassin d'une superficie de 2 345 km².

Des observations limnimétriques ont été effectuées à cette station de septembre 1967 à décembre 1974. Trente-deux mesures de débit ont été réalisées au cours de cette période (entre 2.76 et 217 m³/s) et permettent d'établir une courbe d'étalonnage de bonne qualité (Lamagat, 1990).

tableau 7.8.

Mangoky à Betroka
Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1967/68 | (16.2) | 20.8 | 16.5 | 35.1 | 13.8 | 6.46 | 4.61 | 6.07 | 4.15 | 3.20 | 2.20 | 2.61 | 10.9 |
| 1968/69 | 4.53 | 17.0 | 75.1 | 63.3 | 45.9 | 24.5 | 13.8 | 8.10 | 5.83 | 4.42 | 2.71 | 6.05 | 22.4 |
| 1969/70 | 8.09 | 50.8 | 222 | 92.1 | 55.1 | 25.5 | 16.0 | 8.50 | 5.04 | 4.47 | 2.74 | 1.75 | 40.9 |
| 1970/71 | 37.4 | 16.3 | 65.2 | 140 | 50.8 | 13.8 | 7.59 | 6.22 | 4.49 | 3.24 | 3.50 | 2.04 | 28.5 |
| 1971/72 | 7.53 | 47.3 | 32.2 | 33.3 | 32.3 | 17.2 | 10.4 | 10.4 | 5.98 | 4.47 | 3.49 | 6.72 | 17.6 |
| 1972/73 | 26.9 | 8.80 | 11.4 | 22.9 | 21.8 | 8.36 | 4.48 | 3.47 | 3.33 | 2.73 | - | - | - |
| 1973/74 | - | 63.4 | 41.7 | 16.5 | 10.6 | 10.1 | 7.17 | 8.38 | 4.19 | 2.90 | - | - | - |
| Moyenne | 16.8 | 32.1 | 66.3 | 57.6 | 32.9 | 15.1 | 9.15 | 6.25 | 4.72 | 3.63 | 2.93 | 3.83 | 20.8 |

La lame écoulée moyenne de la période 1967-74 est de 280 mm. Cette séquence comporte quatre années nettement excédentaires pour l'Onilahy à Tongobory (1966-67, 1968-69, 1969-70 et 1970-71, égales ou supérieures à l'année humide de récurrence une année sur vingt, et une année déficitaire (1967/68) proche de la quinquennale sèche. L'hydraulicité de la période est d'environ 110 %. La lame écoulée médiane du MANGOKY à Bétro-

ka peut être sommairement évaluée à 250 mm (Q = 18.6 m³/s) soit, pour une pluviométrie moyenne interannuelle comprise entre 900 et 1 100 mm, un coefficient d'écoulement annuel compris entre 23 et 28 %.

Les débits de crue maximaux, observés au cours de la période, sont les suivants :

| | | |
|---|---|---|
| 21/02/68 | 176 m³/s | ( 75 l/s/km²) |
| 12/02/69 | 231 m³/s | ( 99 l/s/km²) |
| 10/01/70 | 525 m³/s | (224 l/s/km²) |
| 03/02/71 | 525 m³/s | (224 l/s/km²) |
| 27/12/71 | 160 m³/s | (68 l/s/km²) |
| 29/12/73 | 319 m³/s | (136 l/s/km²) |

Les débits minimaux journaliers sont les suivants :

| | | |
|---|---|---|
| 15/10/1968 : | 1.30 m³/s | (.55 l/s/km²) |
| 18/10/1969 : | 1.70 m³/s | (.72 l/s/km²) |
| 03/11/1970 : | 1.39 m³/s | (.59 l/s/km²) |
| 10/11/1971 : | .359 m³/s | (.15 l/s/km²) |
| 10/10/1972 : | (1.36 m³/s) | (.58 l/s/km²) |
| ≥25/09/1974 : | (≤1.28 m³/s) | (.55 l/s/km²) |

Le débit spécifique médian doit être proche de .50 l/s/km².

## 1.2.2. L'Isoanala

L'ISOANALA est un petit affluent du Mangoky issu de la façade occidentale du Kelhorombé. La station située près du village d'Isoanala (23°50'S - 45°43'E) contrôle un bassin de 459 km².

tableau 7.9.

Isoanala à Isoanala
Débits moyens mensuels
(m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1980/81 | | | | | | | | | .844 | .826 | 1.35 | - | |
| 1981/82 | 3.56 | 1.70 | 21.4 | 8.35 | 23.3 | 16.8 | 7.69 | 4.06 | 2.94 | 2.18 | 1.35 | 1.23 | 7.89 |
| 1982/83 | 2.34 | 2.02 | .806 | 4.14 | 2.10 | 1.11 | .588 | .636 | .564 | .424 | .429 | 1.10 | 1.33 |
| 1983/84 | 1.29 | 8.62 | | | | | | | | | | | |

Sur le bassin voisin de la Ménarandra, l'année 1981-82 était excédentaire (proche de la quinquennale humide), l'année 1982-83 plutôt déficitaire (décennale sèche). En tenant compte de l'hydraulicité moyenne de l'échantillon, on peut estimer la lame médiane interannuelle de l'Isoalana à environ 360 mm (Q = 5.2 m³/s). La pluviométrie moyenne du bassin étant sommairement estimée à 1 000-1 100 mm, le coefficient d'écoulement médian correspondant serait compris entre 32 et 36 %.

Les débits d'étiage observés sont voisins de un l/s/km².

| | | |
|---|---|---|
| 10/11/1981 | Q min. = .456 m³/s | (.99 l/s/km²) |
| 09/11/1982 | Q min. = .721 m³/s | (1.57 l/s/km²) |
| 14/10/1983 | Q min. = .250 m³/s | (.54 l/s/km²) |

### 1.2.3. La Taheza

La TAHEZA est un affluent rive droite de l'Onilahy et rejoint le fleuve près de Bézaha (en amont de la station de Tongobory). Le bassin est situé sur les grès de l'Isalo avec une pluvio-métrie moyenne voisine de 700 mm. A Ambarinakoho (23°21'S - 44°34'E, SBV = 1 590 km2), des mesures ont été effectuées en amont du barrage-seuil. Les débits d'étiage absolus ont été sommairement estimés à 10 m³/s (6.3 l/s/km²) en 1982 et 1983.

Les débits d'étiage de la Tahéza (juste en amont du confluent), et après avoir traversé les casiers rizicoles de la basse Tahéza, avaient été estimés à 5 m³/s en 1963 et 6.5 m³/s en 1964 (2.5 à 3.3 l/s/km²). Ces mesures fragmentaires permettent d'apprécier les débits spécifiques élevés d'un bassin situé sur les grès de l'Isalo et qui fournit près du tiers des débits d'étiage de l'Onilahy à Tongobory.

## 2. BASSIN DE LA FIHERENANA

Le bassin de la Fiherenana, situé au nord de l'Onilahy, draine dans son bassin supérieur les formations gréseuses de l'Isalo, avant de traverser les formations gréseuses, calcaires et marno-calcaires du jurassique, du crétacé et de l'éocène. La végétation est essentiellement constituée de savane à hautes herbes sur la majorité du bassin. On rencontre le "bush" dans la région de Toliara.

La station de Mahaboboka (22°53'S - 44°21'E) contrôle un bassin d'environ 4 020 km² situé entièrement sur les grès et calcaires de l'Isalo.

Les débits ont été observés de 1952 à 1956.

tableau 7.10.

Fiherenana à Mahaboboka
Débits moyens mensuels
($m^3/s$)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1952/53 | | | 12.3 | | 13.5 | | | | 9.02 | 12.2 | 16.3 | 19.2 | |
| 1953/54 | 21.9 | 31.9 | 89 | 86.9 | 77.6 | 33.2 | 12.5 | 12.6 | 26.0 | 26.8 | 26.9 | 31.2 | |
| 1954/55 | 62.4 | 135 | 150 | 89.1 | 92.1 | 24.2 | 37.5 | 21.8 | 24.6 | 29.2 | 25.8 | (24) | |
| 1955/56 | 23.6 | 23.6 | 37.4 | 26.2 | 33.0 | 3.51 | 3.78 | 3.58 | 4.24 | 5.16 | 24.2 | | |
| Moyenne | 36.0 | 63.5 | 72.2 | 67.4 | 54.1 | 20.3 | 17.9 | 15.7 | 16.0 | 18.3 | 23.3 | 24.8 | 35.4 |

Ces débits sont donnés sous toute réserve en raison d'un étalonnage approximatif (lit très instable) et de lectures jugées fantaisistes par le gestionnaire. La lame écoulée correspondant au module de la période (280 mm) semble assez nettement surestimée pour un bassin dont la pluviométrie moyenne ne doit pas dépasser les 800 mm.

Plus en aval, au niveau de la RN 9, l'ordre de grandeur du maximum de crue de l'année 1978-79 (cyclone Angèle, décembre 1978) a été évalué à 10 000 $m^3/s$ pour un bassin de 7 500 $km^2$.

Les débits d'étiage à MAHABOBOKA ont été évalués d'après les mesures de débit à :

6 à 8 $m^3/s$ en octobre 1952, 5,5 $m^3/s$ en octobre 1953, 11.5 $m^3/s$ en mai 1954, 6 à 7 $m^3/s$ en 1955, 4.9 $m^3/s$ en octobre 1956, 3.8 $m^3/s$ en mai 1957 et 6 $m^3/s$ en juin 1958 (moyenne 6.5 $m^3/s$).

L'étiage moyen (1.6 $l/s/km^2$) est vraisemblable à la sortie des resurgences de l'Isalo.

Les débits d'étiage décroissent assez rapidement d'amont en aval : de l'ordre de 4.1 $l/s/km^2$ dans le haut bassin (Ranoména), ils passent de 1 à 2 $l/s/km^2$ au niveau de Mahaboboka, puis s'annulent presqu'entièrement 30 km en aval, au sortir des chutes. Un sous-écoulement doit subsister dans les sables. Il a été généralement observé que la Fihérénana n'arrivait à la mer qu'à l'occasion des fortes crues et durant seulement quelques heures (Pelleray, 1953).

# 3. BASSIN DU MANGOKY

Délimité, au sud, par les bassins de la Fihérénana et de l'Onilahy, à l'est, par ceux du versant oriental, de la Mananara au Mananjary, au nord, par ceux de la Tsiribihina et de la Morondava, le bassin du Mangoky est, par sa superficie totale (55 000 km²), le plus vaste bassin malgache (avant ceux de la Betsiboka et de la Tsiribihina).

Du point de vue géomorphologique, on distingue classiquement quatre unités d'est en ouest :

- les hauts plateaux du Betsiléo, entièrement situés sur le socle cristallin : migmatites et gneiss du système du graphite, à l'est, gneiss, migmatites et micaschistes du Vohibory à l'ouest, granites plus récents de l'Andringitra au sud, quartzites de l'Itrémo au nord-ouest, granites de Midongy au centre. Les hauts plateaux du Betsiléo, délimités par l'Itrémo au nord, le rebord de la falaise orientale (Tanala) à l'est, le massif de l'Andringitra au sud, offrent un relief très varié, plaines et dépressions marécageuses d'altitude, collines et dômes à une altitude moyenne de 1 000 à 1 200 m, dominés par les sommets de l'Itrémo (2 052 m) et du pic Boby (2 658 m). Les formations superficielles les plus représentées, sont d'une part des lithosols (sols squelettiques et rankers) sur les reliefs granitiques de l'Andringitra et les quartzites de l'Itrémo, sols ferrallitiques typiques rouges sur roches cristallines diverses partout ailleurs ;

- les plaines du socle cristallin (plaines d'Ikalamavony, de Tsitondroina et du Zomandao) reposant sur les gneiss et micaschistes du Vohibory pour les deux premières, du système androyen pour la troisième, où apparaissent également des affleurements granitiques. Ces trois plaines, d'une altitude moyenne comprise entre 600 et 900 m, sont délimitées au nord par une ligne de crête (Janjina, plateau de Mandrosonoro, bordure occidentale de l'Itrémo), au sud par les rebords de l'Horombé et de l'Andringitra, à l'ouest par la prolongation sud du Bongolava. Les formations superficielles appartiennent principalement aux sols faiblement ferrallitiques rouges, particulièrement épais dans la plaine du Zomandao ;

- la série des "cuestas" sédimentaires d'orientation sud-nord déterminant une série de plaines et plateaux délimités par des falaises plus ou moins abruptes de regard est. D'est en ouest, se superposent les formations sédimentaires suivantes : groupe du Karoo avec à la base les formations schisto-gréseuses et gréso-argileuses de la dépression de la Sakaména, puis les différentes et puissantes formations gréseuses stratifiées de l'Isalo (massifs de l'Isalo et du Makay, côtes de Lambosina), marno-calcaires et cuesta gréseuse du jurassique supérieur, formations gréseuses et gréso-calcaires du crétacé (massif de l'Analavélona couronné de coulées basaltiques crétacées), calcaires compacts de l'éocène formant une cuesta bien marquée (seuil de Nosy-Ambositra). Les formations superficielles prédominantes correspondent à des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés avec des carapaces sableuses étendues (Isalo et crétacé) ;

- enfin, et à l'aval du seuil de Nosy-Ambositra, une vaste région de faible relief constituée d'alluvions anciennes sablo-argileuses à sable grossier rubefié et d'alluvions récentes limoneuses. Les sols sont peu évolués et passent à la mangrove dans le delta.

À l'exception d'une auréole de forêt dégradée en savaka sur les bordures d'altitude du Betsiléo, le bassin est recouvert par les formations végétales de steppes et savanes : sur la majeure partie du socle, steppe à végétation herbacée courte et peu dense des domaines du Centre et des pentes occidentales à aristida puis, sur le bas-

sin moyen sédimentaire savanes à herbes hautes (Hétéropogon) du domaine de l'ouest passant, vers l'ouest, à la savane arbustive puis à la savane arborée et à la forêt dense sèche.

La pluviométrie décroît régulièrement d'est en ouest. En moyenne interannuelle, elle est comprise entre 1 500 et 1 000 mm sur le Betsiléo (près de 2 000 mm sur le rebord de la falaise orientale et l'Andringitra), entre 900 et 1 000 mm sur les plaines du socle, entre 700 et 900 mm sur les "cuestas" sédimentaires, et approche les 500 mm dans le delta.

Le bassin supérieur du Mangoky, sur le socle cristallin, est constitué de trois formateurs principaux : au nord la Matsiatra (nord du Betsiléo et plaine d'Ikalamavony, au centre la Mananantanana (centre du Betsiléo et plaine de Tsitondroina) et au sud le Zomandao (sud du Betsiléo et plaine du Zomandao) grossi de l'Ihosy qui draine une étroite vallée tectonique entre l'Anamaléno et le plateau de l'Horombe.

Ces trois formateurs se réunissent dans la dépression de Sakamena pour former le Mangoky qui coule ensuite vers l'ouest, perpendiculairement aux cuestas et est grossi de différents tributaires des formations sédimentaires d'orientation tectonique sud-nord et nord-sud (Malio, Sakamavaka, Sakamare, Sikily, etc.). Après le seuil de Nosy-Ambositra, le Mangoky prend une direction sud-est/nord-ouest avec un réseau anostomosé qui se termine par un vaste delta.

## 3.1. Bassin de l'Ihosy

Le bassin de l'IHOSY, affluent du ZOMANDAO, allongé en direction SSE-NNO, occupe une étroite vallée tectonique dans la socle cristallin (gneiss, leptynites et pyroxénites du groupe d'Ampandrandava - système androyen). La couverture latéritique est assez peu épaisse. Les pentes latérales sont fortes mais on note un important remblaiement alluvial dans le cours inférieur de la rivière. La steppe plus ou moins arborée (forêt basse sèche) occupe l'ensemble du bassin, avec une galerie forestière sèche (tamariniers). Sur les pentes rocheuses, on note une végétation buissonante xérophile.

La station d'IHOSY (22°23'S - 46°07'E) située sur l'ouvrage routier de la RN 7, contrôle un bassin de 1 500 km² d'une altitude moyenne de 1 070 m. Une première échelle installée en juin 1953 sur le radier a été remplacée en 1965, après la construction du pont, par une nouvelle échelle calée 22 cm plus haut.

Cent dix-neuf mesures de débit (entre 230 l/s et 286 m³/s) ont été effectuées de 1952 à 1976. La relation hauteur-débit est stable en basses eaux mais non univoque (une courbe d'étalonnage basses eaux chaque année) en raison des variations de contrôle dues à la construction de diguettes en saison sèche. L'extrapolation pour les hautes eaux a été menée jusqu'à 800 m /s.

Les relevés sont complets de juillet 1953 à février 1976 mais les traductions ont dû faire l'objet de quelques reconstitutions et de nombreuses corrections. Les résultats sont acceptables mais les valeurs journalières doivent être appréciées avec prudence.

La pluviométrie sur le bassin a été déterminée à partir de quatre postes pluviométriques (dont un seul sur le bassin à Ihosy) : Ihosy (poids : .25), Iakora (.35), Bétroka (.36), Kélivondraka (.04). Elle est estimée à 935 mm en moyenne interannuelle.

## 3.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 7.11.

Ihosy à Ihosy
Coefficients de corrélation

| Hi, Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .79 | .72 | .72 | .73 | (.42) | (.21) | (.14) | (.17) | (.28) | .54 | (.19) | .69 |
| Pi - 1 | (.14) | (.29) | .48 | (.38) | .64 | .54 | (.04) | (.10) | (.28) | .47 | .61 | (.07) |
| Qi - 1 | .42 | (.31) | (.31) | .54 | .60 | .78 | .67 | .72 | .77 | .88 | .78 | .71 |

Ces valeurs, représentées sur le graphe 7.2., correspondent aux influences suivantes : en saison des pluies (novembre à février), les précipitations du mois jouent le rôle principal mais avec une influence sensible du mois antérieur (saturation des sols et transferts à partir des nappes). En mars, les précipitations cumulées antérieures pèsent davantage que les précipitations du mois. D'avril à septembre, les débits sont déterminés par l'importance des réserves stockées dans les altérites avec (sauf en août) une influence faible des précipitations de saison sèche. En octobre, débits antérieurs et précipitations du mois ont le même poids.

figure 7.2.

Ihosy à Ihosy

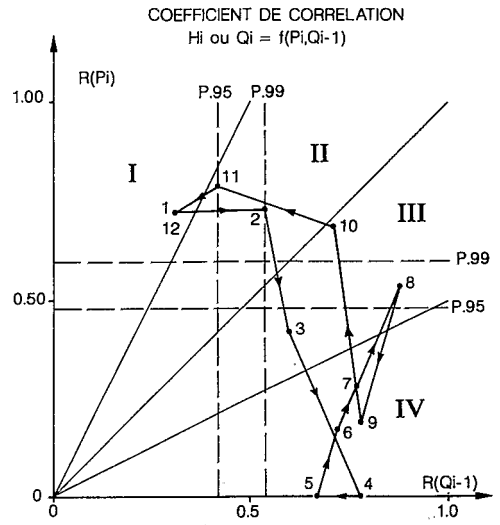



tableau 7.12.

Ihosy à Ihosy
Régressions intermensuelles

| | | |
|---|---|---|
| Q11 = .43 | Q10+.09 P11 - 5 | $R^2$ = .70 P >.995) |
| H12 = .20 | P12 + .28 P11 - 27 | $R^2$ = .61 P > .99) |
| H01 = .45 | P01+.38 P12 - 91 | $R^2$ = .76 P >.995) |

suite

| | |
|---|---|
| H02 = .53 P02+.22 P01 - 66 | $R^2$ = .74 P > .995) |
| Q03 = .42 P120102+.25 P03 - 59 | $R^2$ = .77 P > .995) |
| Q04 = .34 Q03 + 3.6 | $R^2$ = .61 P > .99) |
| Q05 = .25 Q04+4 | $R^2$ = .45 P > .99) |
| ou H05 = .07 P12010203 | $R^2$ = .56 P > .99) |
| Q06 = .56 Q05 + 1.6 | $R^2$ = .52 P > .99) |
| Q07 = .62 Q06 + .02 p07 + .5 | $R^2$ = .70 P > .99) |
| Q08 = .73 Q07 + .03 p08 + .2 | $R^2$ = .77 P > .995) |
| Q09 = .88 Q08 + .02 P09 - .6 | $R^2$ = .74 P > .995) |
| Q10 = .83 Q09 + .05 P10 -.9 | $R^2$ = .89 P > .995) |

Les débits mensuels classés sont représentés sur le graphe 7.3. Des hydrogrammes représentatifs d'une année excédentaire (1953-54, Q = 34,3 m³/s) et d'une année déficitaire (1957-58, Q = 8,72 m³/s) sont représentés sur les graphes 7.4. et 7.5.

L'influence des réserves drainables se traduit par des débits de base bien soutenus en saison des pluies et encore relativement abondants en saison sèche, malgré la faiblesse des précipitations.

figure 7.3.
Ihosy à Ihosy

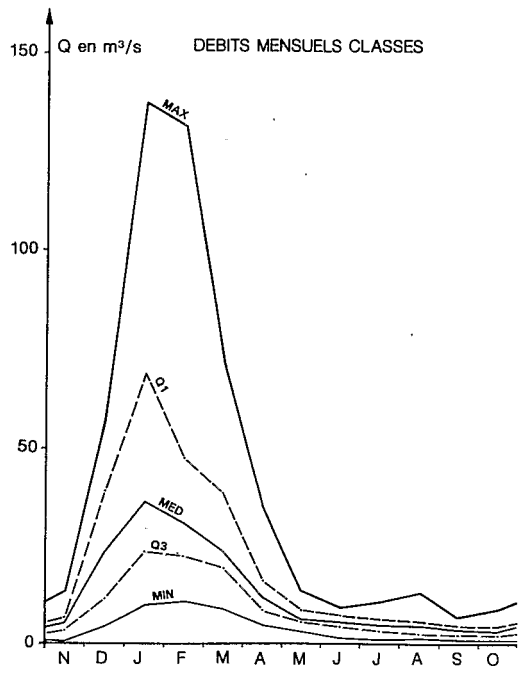


figure 7.4.

Ihosy à Ihosy

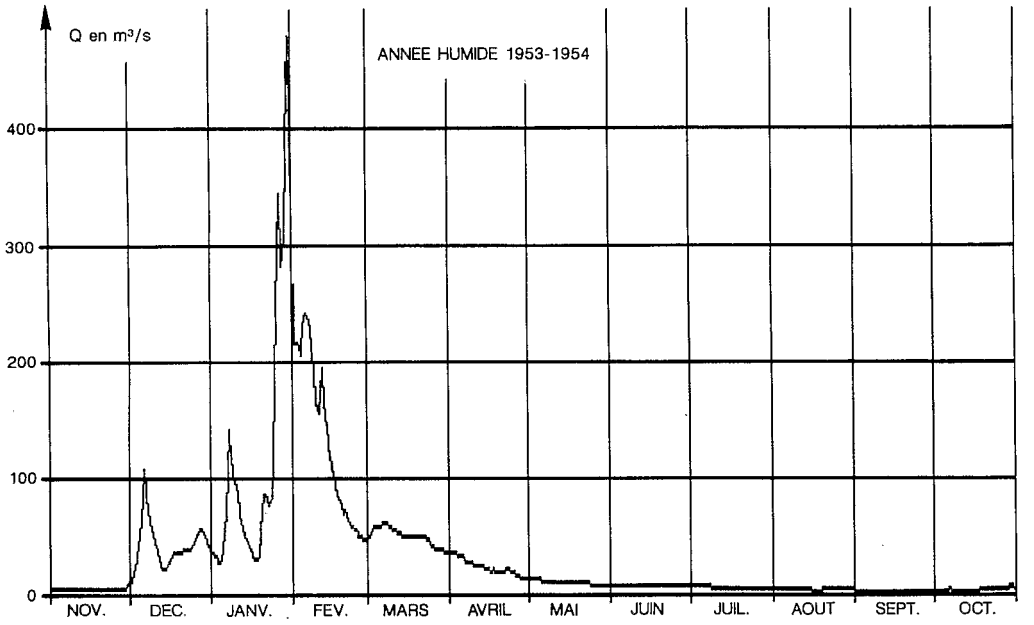
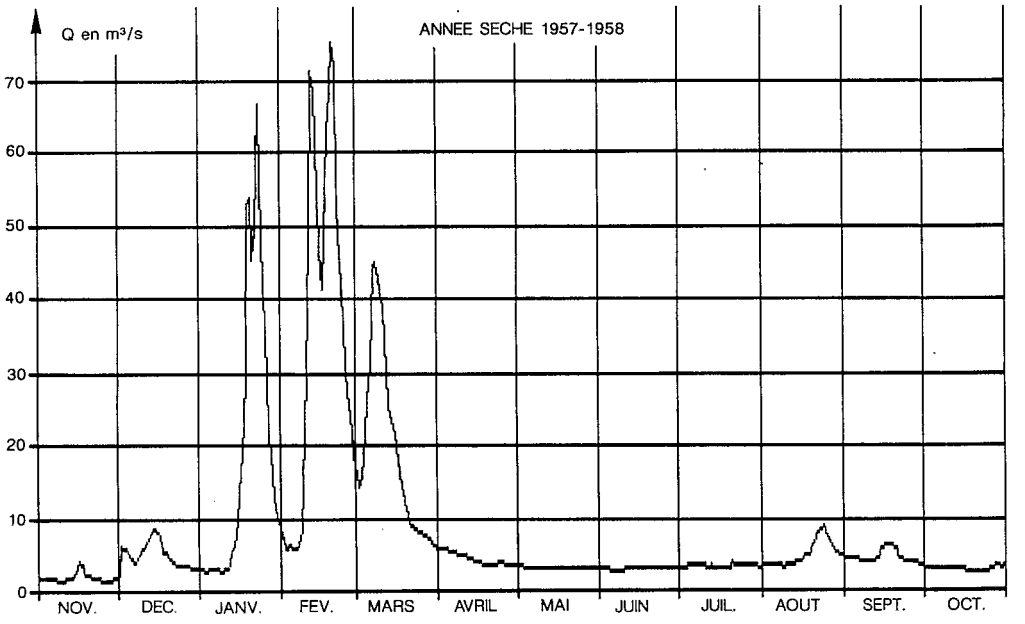



figure 7.5.

Ihosy à Ihosy



## 3.1.2. Apports annuels

La liaison entre les lames écoulées annuelles et les précipitations sur le bassin s'exprime par la relation :
$H = .765\ (P - 488)$ $(R^2 = .68\ P > .995)$

Un plus large échantillon de fortes lames se traduirait probablement par une relation légèrement parabolique.

La prise en compte du coefficient Cp de concentration des précipitations mensuelles améliore la relation :
$H = .715\ (P - 817\ (1 - 1.26\ Cp))$ $(R^2 = .76\ P > .995)$

tableau 7.13.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1250804005 Ihosy
Rivière : Ihosy
Pays: Madagascar
Bassin: Mangoky
Débits en m³/s

Latitude : 22°23'00
Longitude : 46°07'00

Aire : 1 500 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1952/53 | - | - | - | - | - | - | - | - | 7.40 | 6.06 | 6.48 | 5.89 | - |
| 1953/54 | 6.24 | 42.6 | 126 | 131 | 50.0 | 23.5 | 11.0 | 8.66 | 6.43 | 4.61 | 3.62 | 4.23 | 34.3 |
| 1954/55 | 3.38 | 29.3 | 101 | 25.4 | 13.3 | 9.18 | 5.82 | 1.27 | 1.08 | 1.49 | 1.23 | 1.13 | 16.6 |
| 1955/56 | 1.02 | 8.34 | 25.5 | 24.7 | 24.3 | 14.0 | 6.43 | 5.11 | 2.69 | 2.08 | 2.18 | 1.81 | 9.81 |
| 1956/57 | 2.49 | 20.2 | 47.0 | 10.6 | 21.5 | 8.86 | 6.03 | 4.50 | 3.68 | 2.88 | 3.26 | 1.92 | 11.1 |
| 1957/58 | 1.91 | 5.04 | 18.8 | 35.3 | 19.1 | 4.37 | 3.03 | 3.04 | 3.39 | 4.93 | 4.58 | 3.04 | 8.72 |
| 1958/59 | 4.84 | 38.9 | 61.9 | 22.1 | 13.9 | 19.0 | 8.60 | 6.25 | 5.78 | 5.34 | 2.87 | 2.29 | 16.0 |
| 1959/60 | 13.2 | 21.2 | 28.6 | 31.1 | 24.1 | 8.59 | 4.15 | 3.15 | 2.41 | 1.38 | 1.02 | .657 | 11.6 |
| 1960/61 | .703 | 15.5 | 96.1 | 26.4 | 23.4 | 14.1 | 5.60 | 4.46 | 4.25 | 4.04 | 2.74 | 4.88 | 16.9 |
| 1961/62 | 6.27 | 56.7 | 36.0 | 20.4 | 8.20 | 6.74 | 7.25 | 4.48 | 2.28 | 1.82 | 1.45 | 2.08 | 12.8 |
| 1962/63 | 4.25 | 23.8 | 32.3 | 47.3 | 21.3 | 10.3 | 7.58 | 8.64 | 5.25 | 3.37 | 2.50 | 1.97 | 13.9 |
| 1963/64 | 6.67 | 31.0 | 23.4 | 34.1 | 27.6 | 8.62 | 5.67 | 5.72 | 4.81 | 6.03 | 2.73 | 3.02 | 13.2 |
| 1964/65 | 3.81 | 25.4 | 39.3 | 36.4 | 25.8 | 15.7 | 6.92 | 5.78 | 6.27 | 6.09 | 6.74 | 8.15 | 15.4 |
| 1965/66 | 5.29 | 26.6 | 16.6 | 20.8 | 22.7 | 12.3 | 6.42 | 6.22 | 3.60 | 2.51 | . 888 | 3.08 | 10.5 |
| 1966/67 | .948 | 33.9 | 62.7 | 24.8 | 71.8 | 35.1 | 11.4 | 7.25 | 5.72 | 4.56 | 4.24 | 8.25 | 22.7 |
| 1967/68 | 10.6 | 17.8 | 9.84 | 23.6 | 11.4 | 5.56 | 3.75 | 4.03 | 2.82 | 1.56 | .810 | .844 | 7.66 |
| 1968/69 | 3.52 | 6.31 | 68.7 | 107 | 48.9 | 19.1 | 9.09 | 5.82 | 3.73 | 4.35 | 2.53 | 3.20 | 23.0 |
| 1969/70 | 6.33 | 40.8 | 137 | 92.6 | 52.2 | 16.0 | 7.33 | 5.75 | 4.72 | 4.88 | 4.31 | 2.27 | 30.9 |
| 1970/71 | 7.05 | 10.1 | 31.1 | 101 | 39.7 | 9.94 | 6.64 | 5.73 | 6.04 | 3.16 | 3.30 | 2.80 | 18.3 |
| 1971/72 | 6.88 | 44.8 | 25.0 | 39.9 | 38.8 | 16.1 | 8.19 | 9.01 | 6.39 | 7.07 | 4.35 | 5.08 | 17.6 |
| 1972/73 | 6.89 | 4.44 | 16.4 | 19.7 | 20.4 | 14.8 | 10.7 | 8.25 | 10.5 | 12.3 | 6.06 | 3.51 | 11.1 |
| 1973/74 | 12.4 | 47.6 | 49.3 | 31.5 | 18.4 | 11.2 | 13.1 | 7.34 | 4.81 | 4.72 | 3.84 | 3.34 | 17.3 |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1974/75 | 5.08 | 11.5 | 78.6 | 52.1 | 26.6 | 8.99 | 6.90 | 6.37 | 5.46 | 5.57 | 4.35 | 3.72 | 17.8 |
| 1975/76 | 4.66 | 11.5 | 18.5 | 11.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 5.63 | 24.9 | 50.0 | 42.1 | 28.3 | 13.3 | 7.35 | 5.77 | 4.76 | 4.38 | 3.31 | 3.36 | 16.0 |
| Ecart-type | 3.34 | 15.1 | 36.2 | 33.0 | 15.7 | 6.82 | 2.52 | 1.97 | 2.03 | 2.40 | 1.70 | 2.01 | |
| Max. | 13.2 | 56.7 | 137 | 131 | 71.8 | 35.1 | 13.1 | 9.01 | 10.5 | 12.3 | 6.74 | 8.25 | |
| Q 1 | 6.89 | 38.9 | 68.7 | 47.3 | 38.8 | 16.0 | 8.60 | 7.25 | 6.04 | 5.57 | 4.35 | 4.23 | |
| Méd. | 5.29 | 23.8 | 36.0 | 31.1 | 23.8 | 11.8 | 6.91 | 5.77 | 4.81 | 4.56 | 3.26 | 3.04 | |
| Q 3 | 3.52 | 11.5 | 23.4 | 22.1 | 19.1 | 8.86 | 5.82 | 4.48 | 3.39 | 2.51 | 2.18 | 1.97 | |
| Min | .703 | 4.44 | 9.84 | 10.6 | 8.20 | 4.37 | 3.03 | 1.27 | 1.08 | 1.38 | .810 | .657 | |

Les estimations, d'après cette relation, des valeurs non observées de 1949 à 1953, sont les suivantes :

1949/50 H = 300 mm Q = 14.3 m³/s
1950/51 H = 180 mm Q = 8.56 m³/s
1951/52 H = 355 mm Q = 16.8 m³/s
1952/53 H = 420 mm Q = 20 m³/s

L'échantillon des valeurs observées et calculées (vingt-six valeurs de 1949-50 à 1974-75) correspond aux quantiles suivants, après ajustement statistique.

tableau 7.14.

Ihosy à Ihosy
Apports annuels

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| H mm | 180 | 203 | 234 | 310 | 425 | 506 | 589 |
| Q max. (m³/s) | 8.56 | 9.65 | 11.1 | 14.7 | 20.2 | 24.0 | 28.0 |
| q max. (l/s/km²) | 5.7 | 6.4 | 7.4 | 9.8 | 13.5 | 16.0 | 18.7 |

Loi de Fréchet (test Brunet-Moret = 1.63, échelle : 1060 mm, position : - 783 mm, forme : - 0.087).
Cinquantennales sèche et humide : 158 mm (Q = 7.5 m³/s) et 705 mm (Q = 33.5 m³/s).

Les lames observées sur le bassin de l'Ihosy sont en bonne corrélation avec celles du bassin adjacent de la Mananara du sud.

$Q_{Ihosy} = .684\ H_{Mananara} - 32$ $(R^2 = .81\ P > .995)$

## 3.1.3. Crues

### 3.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

La station peut être considérée comme stable en moyennes et hautes eaux (endiguement rive gauche, radier et pont routiers).

L'extrapolation de type logarithmique, s'appuie sur les plus forts jaugeages des années 1953-54 et a été menée de 3,47 m à 4,46 m (système de l'ancienne échelle).

L'échelle ayant été décalée et déplacée le 27/09/1965, un doute subsiste quant à la validité de la courbe de tarage déduite (légère surestimation des débits ?).

tableau 7.14.bis

Ihosy à Ihosy
Débits maximum de crues

| Année | Q m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1952-53 | ≥ 140 | | 2,90 | Min |
| 1953-54 | 521 | 30/01/54 12 h 00 | 4,10 | 3rel |
| 1954-55 | 326 | 15/01/55 12 h 00 | 3,58 | 3rel |
| 1955-56 | 93 | 26/03/56 12 h 00 | 2,61 | 3rel |
| 1956-57 | 121 | 26/12/56 06 h 00 | 2,80 | 3rel |
| 1957-58 | 76 | 20/02/58 12 h 00 | 2,46 | 3rel |
| 1958-59 | 151 | 01/01/59 00 h 00 | 2,96 | 3rel |
| 1958-60 | 83 | 01/03/60 12 h 00 | 2,53 | 3rel |
| 1960-61 | 253 | 11/01/61 06 h 00 | 3,35 | 3rel |
| 1961-62 | 197 | 26/12/61 18 h 00 | 3,15 | 3rel |
| 1962-63 | 146 | 07/02/63 12 h 00 | 2,93 | 3rel |
| 1963-64 | 70 | 19/12/63 06 h 00 | 2,40 | 3rel |
| 1964-65 | 89 | 22/03/65 12 h 00 | 2,58 | 3rel |
| 1965-66 | (91) | 26/02/66 06 h 00 | 2,39 | 3rel |
| 1966-67 | (250) | 27/12/66 06 h 00 | 3,12 | 3rel |
| 1967-68 | (53) | 22/02/68 18 h 00 | 1,93 | 3rel |
| 1968-69 | (354) | 12/02/69 12 h 00 | 3,45 | 3rel |
| 1969-70 | (618) | 25/02/70 18 h 00 | 4,14 | 3rel |
| 1970-71 | (344) | 19/02/71 18 h 00 | 3,42 | 3rel |
| 1971-72 | (250) | 26/12/71 06 h 00 | 3,12 | 3rel |
| 1972-73 | (63) | 15/01/73 06 h 00 | 2,08 | 3rel |
| 1973-74 | (218) | 29/12/73 06 h 00 | 3,01 | 3rel |
| 1974-75 | (369) | 21/01/75 06 h 00 | 3,49 | 3rel |
| 1975-76 | ≥ (141) | 01/01/76 12 h 00 | 2,70 | Min |

### 3.1.3.2. Résultats de l'enquête historique

Les dossiers d'archives des Travaux publics ne font mention que d'une seule crue très importante en février 1941 de l'ordre de 6,00 m.

Évaluée à près de 1 500 m³/s, cette crue a été retenue comme l'événement le plus remarquable de la période 1939-80.

Une année sur deux, le débit maximal est observé entre le 29 décembre et le 22 février (date médiane : 21 janvier - dates extrêmes : 19 décembre et 26 mars).

Ajustée à l'échantillon des 24 années observées, une distribution de Goodrich et, en tenant compte de l'information historique, une distribution empirique pour les récurrences plus rares, fournissent les quantiles suivants :

tableau 7.14.ter

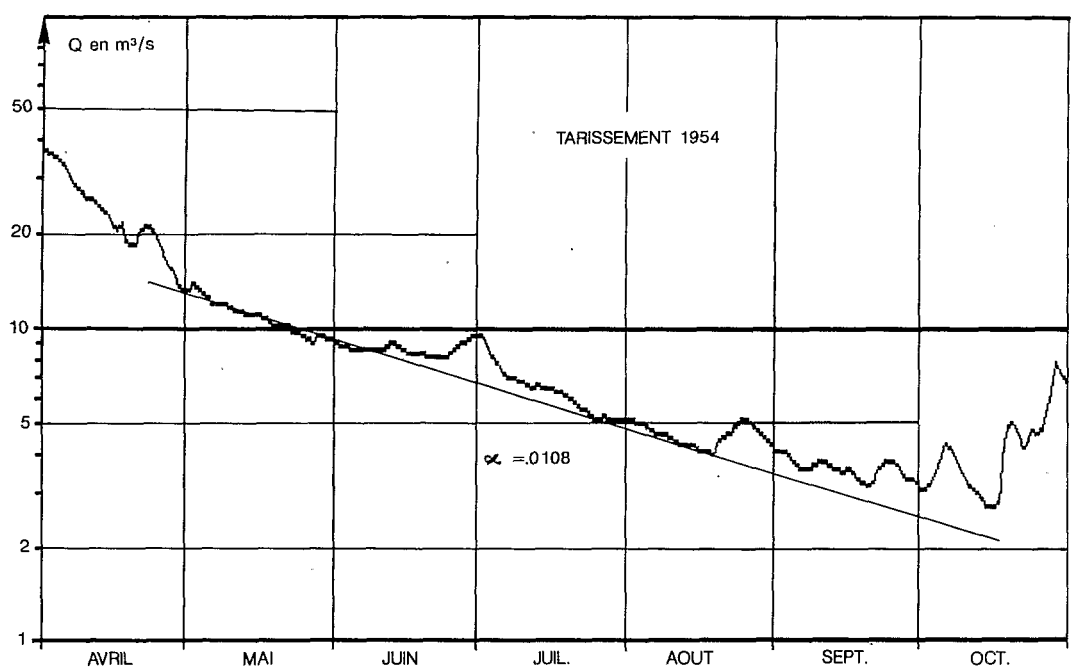
Ihosy à Ihosy
Débits maximaux annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s (échantillon 29 ans) | 161 | 305 | 415 | (670) | (780) |
| Q m³/s (Inform. historique) | | | | 845 | 1140 |
| q l/s/km² | 107 | 203 | 277 | 563 | 760 |

## 3.1.4. Basses eaux

figure 7.6.

Ihosy à Ihosy



Treize années sur vingt-trois, on peut observer un tarissement pas trop perturbé par les précipitations (crues adventices et recharges de nappes). La pente moyenne de la droite de tarissement a pour coefficient $\alpha = .0107$ (Tc = 65 jours) (cf. graphe 7.6.).

Les débits de base initiaux, observés en avril ou mai, ont des valeurs comprises entre 5 et 15 m³/s. Pour un débit initial moyen de 8.6 m³/s (fin avril), les réserves drainables représentent en moyenne 69.106 m³ (45 mm).

tableau 7.15.

Ihosy à Ihosy
Débits caractéristiques de basses eaux

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1953 | 6.65 | 5.60 | 5.30 | 4.90 | 20.10 |
| 1954 | 5.19 | 3.72 | 3.20 | 2.70 | 15.10 |
| 1955 | 1.25 | .824 | .559 | .203 | 14.11 |
| 1956 | 2.3 | 1.33 | .662 | .209 | 29.10 |
| 1957 | 3.00 | 1.80 | 1.60 | 1.45 | 27.11 |
| 1958 | 3.20 | 2.94 | 2.82 | 2.77 | 22.10 |
| 1959 | 4.40 | 2.45 | 2.20 | 2.15 | 12.10 |
| 1960 | 1.16 | .551 | .295 | .266 | 05.11 |
| 1961 | 3.99 | 2.87 | 2.50 | 2.04 | 19.09 |
| 1962 | 2.20 | 1.40 | 1.22 | 1.20 | 23.09 |
| 1963 | 3.80 | 2.20 | 1.85 | 1.70 | 29.10 |
| 1964 | 3.89 | 2.32 | 1.85 | 1.60 | 31.10 |
| 1965 | 5.59 | 4.65 | 3.70 | 3.29 | 25.11 |
| 1966 | 1.85 | .582 | .240 | .220 | 27.09 |
| 1967 | 5.59 | 4.19 | 3.46 | 3.19 | 07.10 |
| 1968 | 2.05 | .753 | .715 | .708 | 28.10 |
| 1969 | 3.85 | 2.60 | 1.95 | 1.67 | 26.10 |
| 1970 | 4.44 | 2.42 | 2.10 | 2.00 | 30.10 |
| 1971 | 3.50 | 2.72 | 2.35 | 2.10 | 10.11 |
| 1972 | 5.12 | 3.17 | 2.60 | 2.53 | 10.11 |
| 1973 | 7.40 | 3.95 | 3.00 | 2.48 | 03.11 |
| 1974 | 4.70 | 3.39 | 2.85 | 2.55 | 10.10 |
| 1975 | 4.80 | 3.40 | 2.75 | 2.50 | 10.11 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 7.40 | 5.60 | 5.30 | 4.90 | 27.11 |
| Q1 | 5.12 | 3.40 | 2.85 | 2.55 | 10.11 |
| Méd. | 3.89 | 2.60 | 2.20 | 2.04 | 29.10 |
| Q3 | 2.30 | 1.40 | 1.22 | 1.20 | 12.10 |
| Min. | 1.16 | .551 | .240 | .203 | 19.09 |

DCE = 1.054 QJmin + 13 ($R^2$ = .98) DCE/QJmin = 1.12
DC99 = 1.124 QJmin + 43 ($R^2$ = .93) DC11/QJmin = 1.35
DC9 = 1.24 QJmin + 1.5 ($R^2$ = .75) DC9/QJmin = 2.03

Débit d'étiage journalier et débit moyen mensuel de juillet sont assez bien corrélés.

QJmin = .40 Q 07 ($R^2$ = .51 P > .995)

L'ajustement statistique effectué sur les vingt-trois valeurs de l'échantillon 1953-1975 fournit les quantiles suivants :

tableau 7.16.

Ihosy à Ihosy
Débits journaliers minimums

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence (ans) | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q ($m^3/s$) | .19 | .53 | .97 | 1.87 | 2.85 | 3.40 | 3.88 |
| q ($l/s/km^2$) | .13 | .35 | .65 | 1.25 | 1.9 | 2.3 | 2.6 |

Loi log-normale (test Brunet-Moret : 4.55, échelle : 10 $m^3/s$, position = - 8.19 $m^3/s$, forme : .111).
Cinquantennales sèche et humide : 0 et 4.43 $m^3/s$ (3 $l/s/km^2$).

## 3.1.5. Bilan hydrologique

La lame moyenne interannuelle du bassin (340 mm) correspond, avec une pluviométrie moyenne estimée à 935 mm, à un déficit d'écoulement moyen de 595 mm (Ke = 36 %).

Sur le graphe 7.7., où sont figurés les lames écoulées H et déficits d'écoulement DE en fonction des précipitations P sur le bassin, on observe que l'écoulement H est compris entre 200 et 650 mm (avec une courbe d'aspect parabolique) pour des précipitations moyennes comprises entre 650 et 1 360 mm (Ke varie de 31 à 48 %). Le déficit d'écoulement DE varie entre 470 mm (pour les valeurs les plus basses de P) à environ 700 mm pour P = 1 350, restant ainsi nettement en deça de l'ETP régionale dont l'ordre de grandeur est de 1 100 mm (climat sub-humide). La dispersion des points autour des courbes moyennes s'explique en partie par la répartition des précipitations mensuelles dans l'année (Cp) et pour le reste par la répartition spatiale des pluies, les températures, etc.

figure 7.7.

Ihosy à Ihosy

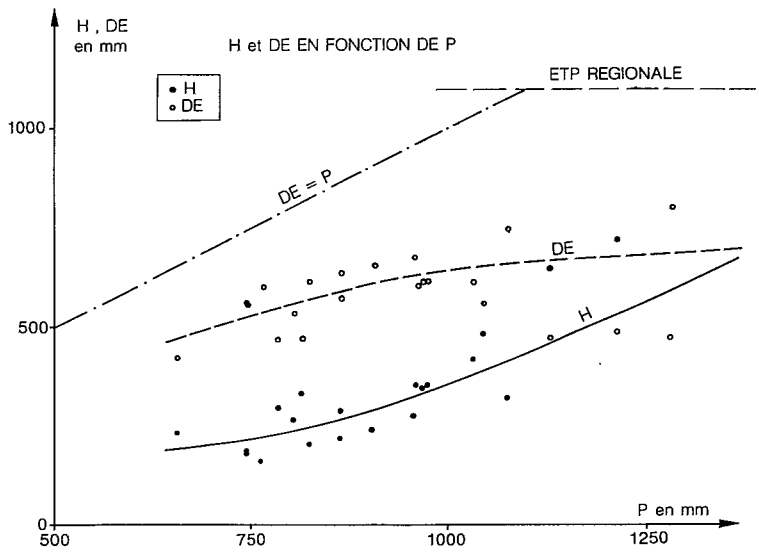


figure 7.8.

Ihosy à Ihosy

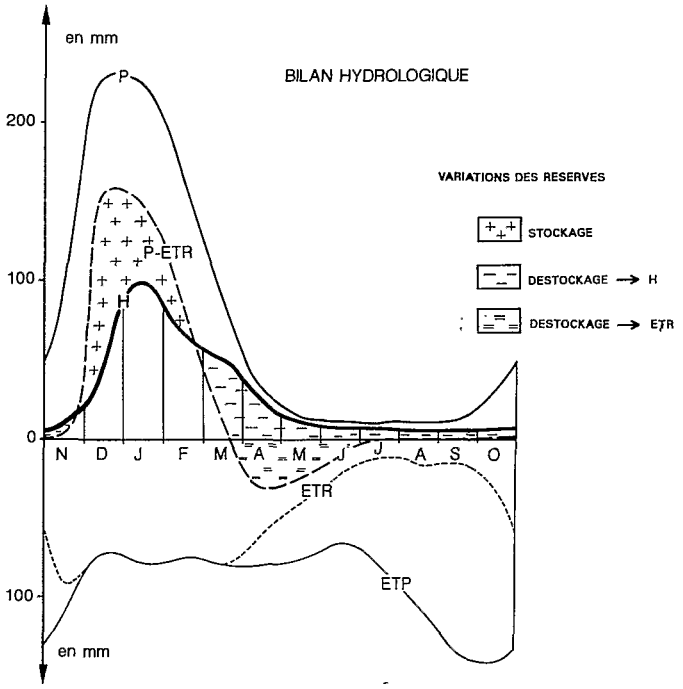



tableau 7.17.

Ihosy à Ihosy
Termes mensuels du bilan hydrologique 1953-70 (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 96 | 230 | 226 | 160 | 94 | 30 | 15 | 11 | 11 | 15 | 15 | 32 | 935 |
| ETP | 110 | 72 | 78 | 74 | 80 | 78 | 77 | 66 | 80 | 107 | 136 | 142 | 1100 |
| ETR | 92 | 72 | 78 | 74 | 80 | 60 | 42 | 23 | 11 | 15 | 15 | 31 | 593 |
| P-ETR | 4 | 158 | 148 | 86 | 14 | - 30 | - 27 | - 12 | 0 | 0 | 0 | 1 | 342 |
| H | 9 | 47 | 98 | 68 | 50 | 23 | 12 | 9 | 8 | 7 | 5 | 6 | 342 |
| ΔR + | | 111 | 50 | 18 | | | | | | | | | 179 |
| ΔR - | 5 | | | | 36 | 53 | 39 | 21 | 8 | 7 | 5 | 5 | 179 |
| R | 0 | 111 | 161 | 179 | 143 | 90 | 51 | 30 | 22 | 15 | 10 | 5 | |

En saison des pluies (décembre à mars), les précipitations mensuelles cumulées : 709 mm (76 % de P annuelle) satisfont entièrement l'ETP (304 mm). Avant de nourrir l'écoulement (263 mm soit 77 % du total annuel), les excédents de précipitations permettent un stockage dans les nappes et la réserve utile du sol de 143 mm en fin mars (stockage maximum 179 mm en fin février et déstockage en mars).

D'avril à novembre, les réserves drainables des nappes d'altérites fournissent l'essentiel des débits écoulés avec une contribution modique des précipitations (respectivement 74 et 5 mm). L'ETR (287 mm) montre une assez nette réduction sur l'ETP malgré le soutien (d'avril à juin) des réserves utiles du sol (63 mm). Cette réduction est due à la faiblesse des précipitations de saison sèche (inférieures ou égales à 15 mm pendant cinq mois). Sur l'année, l'ETR ne représente que 54 % de l'ETP.

## 3.2. Bassin du Zomandao

Le bassin du ZOMANDAO, issu du massif de l'ANDRINGITRA (pic Boby), draine la plaine du ZOMANDAO et, après avoir reçu en rive gauche l'IHOSY, rejoint le MANGOKY au sortir du socle cristallin.

La station d'ANKARAMENA (21°56'41"S - 49°39E) contrôle un bassin de 610 km² entièrement situé dans le sud BETSILEO (granites de l'ANDRINGITRA).

Une première échelle (échelle "radier") a été installée en septembre 1952, puis en raison de la mauvaise qualité de la section très instable en raison des débris charriés par la rivière, a été réinstallée en mars 1959, plus en aval (échelle "village"). Les échelles ont été à nouveau déplacées en mars 1970, puis en avril 1973. Toutes ces modifications, la mauvaise qualité de la première section, l'instabilité du lit et des lacunes importantes dans les lectures confèrent aux observations une certaine imprécision.

Quatre-vingt dix-neuf mesures de débits ont été effectuées de 1952 à 1976 (entre 350 l/s et 644 m³/s). Huit courbes d'étalonnage ont été tracées pour les basses eaux et trois pour les moyennes et hautes eaux avec une extrapolation jusqu'à près de 2 500 m³/s.

Les débits ainsi obtenus ont dû faire l'objet de nombreuses corrections et reconstitutions notamment pour les étiages assez mal connus (1958, 1959, 1961, 1962, 1964, 1966, 1968, 1970 et 1971). En raison de ces corrections, plus ou moins arbitraires, et des nombreuses lacunes qui n'ont pu être complétées, les résultats de cette station restent approchés et les débits journaliers qui sont fournis devront être considérés avec prudence.

Un seul poste pluviométrique existe sur le bassin (ANTANIFOTSY) et la pluviométrie estimée à 1 300 mm environ, reste approchée.

### 3.2.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 7.18.

Zomandao à Ankaramena

| HI, QI | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec PI | .76 | .76 | .80 | .79 | .74 | (.18) | (.37) | (-.01) | .69 | (.44) | .98 | (.18) |
| PI-1 | .70 | (-.18) | (.02) | (.05) | (-.51) | (.42) | - | - | - | .71 | (.40) | .86 |
| QI-1 | (.21) | (.24) | (.0) | (.17) | .47 | (.38) | .85 | .93 | .83 | .83 | .92 | .91 |

En raison des imprécisions sur les débits antérieurs à 1959, les corrélations ont été élaborées sur la période 1959-1970 (pour les précipitations).

Ces relations (dix années) sont acceptables et (graphe 7.9.) montrent un comportement analogue à celui de l'ISOHY (sud des hauts plateaux).

figure 7.9.

Zomandao à Ankaramena

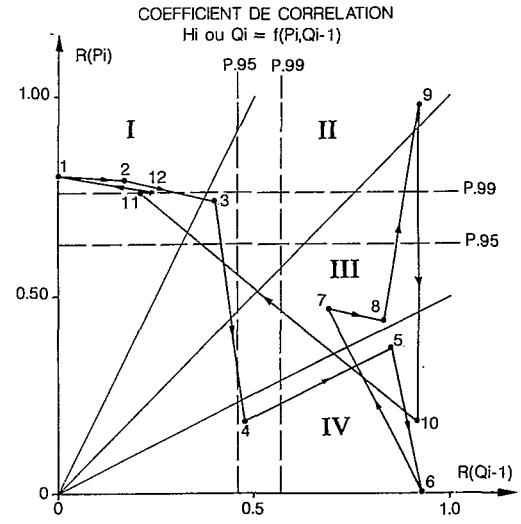



tableau 7.19.

Zomandao à Ankaramena
Régressions

| | | |
|---|---|---|
| H11 = .12 | P11 + .14 P10 - 4 | ($R^2$ = .71 P >.995) |
| H12 = .38 | P12 + 4 | ($R^2$ = .58 P > .99) |
| H01 = .50 | P01 + 6 | ($R^2$ = .64 P > .99) |
| H02 = .83 | P02 - 38 | ($R^2$ = .63 P > .99) |
| Q03 = .11 | P03 + .01 Q02 + 1.9 | ($R^2$ = .91 P >.995) |
| Q05 = .44 | Q04 | ($R^2$ = .69 P > .99) |
| Q06 = .54 | Q05 + 5 | ($R^2$ = .81 P >.995) |
| Q07 = .50 | Q06 | ($R^2$ = .6 |
| Q08 = 1.05 | Q07 + .03 P08 - 7 | ($R^2$ = .93 P >.995) |
| Q09 = .89 | Q08 | ($R^2$ = .83 P >.995) |
| Q10 = .84 | Q09 | ($R^2$ = .79 P >.995) |

tableau 7.20.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1250802805 Ankaramena
Rivière : Zomandao
Pays: Madagascar
Bassin: Mangoky
Débits en m³/s

Latitude : 21°56'41
Longitude : 46°39'00
Aire : 610 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1952/53 | 8.43 | 9.32 | 33.5 | 42.5 | 48.4 | 7.86 | 2.65 | 3.45 | 1.66 | 1.99 | 2.03 | .938 | 13.4 |
| 1953/54 | .714 | 7.96 | 65.3 | 47.6 | 30.9 | 5.32 | 1.28 | 1.11 | .624 | .516 | .465 | .700 | 13.4 |
| 1954/55 | 5.57 | 12.6 | 62.6 | 6.81 | 5.83 | 2.48 | 1.31 | 1.17 | .879 | .756 | .436 | .391 | 8.19 |
| 1955/56 | 1.04 | 11.6 | 25.6 | 19.1 | 22.6 | 6.80 | 2.62 | 2.05 | 1.74 | 1.37 | 1.50 | 1.35 | 8.77 |
| 1956/57 | 1.81 | 12.5 | 32.3 | 6.18 | 19.0 | 6.31 | 3.57 | 2.62 | 2.18 | 1.46 | 1.38 | 1.21 | 7.60 |
| 1957/58 | .912 | 21.4 | 11.4 | - | - | | - | - | - | - | - | - | - |
| 1958/59 | - | - | + | | + | 10.63 | 3.68 | 2.56 | 2.14 | 1.63 | 1.06 | .672 | - |
| 1959/60 | 3.96 | 9.80 | 11.5 | 14.5 | 11.3 | 3.69 | 2.23 | 1.60 | 1.24 | .805 | .541 | .437 | 5.11 |
| 1960/61 | .514 | 18.0 | 45.4 | 23.3 | 19.4 | 5.54 | 2.36 | 1.94 | 1.47 | 2.11 | .626 | .598 | 10.1 |
| 1961/62 | 4.42 | 38.2 | 10.6 | 15.3 | 10.5 | 3.06 | 2.29 | 1.26 | 948 | 1.31 | .430 | 1.59 | 7.49 |
| 1962/63 | 7.18 | 21.9 | 47.0 | 32.8 | 11.4 | 2.63 | 1.32 | 2.10 | 1.69 | .761 | .375 | .272 | 10.7 |
| 1963/64 | 4.92 | 21.5 | 25.4 | 59.0 | 26.9 | 4.54 | 2.38 | 2.38 | 2.36 | 4.15 | 2.00 | 1.48 | 12.9 |
| 1964/65 | 4.89 | 20.6 | 58.5 | 16.2 | 13.8 | 7.87 | 3.16 | 2.23 | 6.47 | 7.07 | 6.91 | 6.20 | 12.9 |
| 1965/66 | 3.79 | 29.2 | 12.3 | 25.0 | 9.07 | 6.17 | 6.01 | 2.81 | 2.00 | 1.93 | 2.53 | 1.93 | 8.45 |
| 1966/67 | 2.61 | 33.9 | 39.6 | 18.1 | 28.8 | 11.9 | 4.08 | 2.32 | 1.91 | 2.08 | 1.58 | 3.50 | 12.6 |
| 1967/68 | 10.0 | 10.4 | 11.4 | 35.0 | 13.2 | 5.54 | 3.18 | 2.75 | 2.14 | 1.51 | .897 | .682 | 7.99 |
| 1968/69 | 2.09 | 19.4 | 31.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | 1.45 | - |
| 1969/70 | 2.16 | 10.2 | - | - | - | - | - | 4.04 | 2.28 | 1.67 | .642 | .389 | - |
| 1970/71 | 6.82 | 8.53 | 30.4 | 58.1 | 12.6 | 4.52 | 2.15 | 1.20 | .859 | .446 | .628 | .807 | 10.3 |
| 1971/72 | - | - | - | - | | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1972/73 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1973/74 | 24.7 | 39.9 | 22.3 | 37.3 | 25.4 | 19.9 | 10.3 | 6.61 | 3.99 | 1.55 | 1.01 | 1.03 | 16.1 |
| 1974/75 | 4.80 | 53.0 | 64.1 | 57.6 | 31.8 | 6.53 | 3.13 | 2.03 | 1.38 | 1.19 | .780 | .930 | 18.8 |
| 1975/76 | 7.83 | 26.5 | 7.14 | 16.2 | 12.5 | 9.43 | 2.40 | 1.19 | 1.20 | 1.38 | .620 | 1.32 | 7.29 |
| 1976/77 | 1.26 | 37.6 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 5.02 | 21.6 | 32.4 | 29.5 | 19.6 | 6.86 | 3.16 | 2.37 | 1.96 | 1.78 | 1.32 | 1.33 | 10.5 |
| Ecart-type | 5.17 | 12.5 | 19.4 | 17.5 | 10.8 | 4.05 | 2.05 | 1.27 | 1.30 | 1.48 | 1.45 | 1.32 | |
| Max. | 24.7 | 55 | 65.3 | 59 | 48.4 | 19.9 | 10.3 | 6.61 | 6.47 | 7.07 | 6.91 | 6.2 | |
| 75 % | 6.82 | 29.2 | 46.2 | 42.5 | 26.9 | 7.87 | 3.57 | 2.69 | 2.16 | 1.96 | 1.54 | 1.47 | |
| Méd. | 4.19 | 20.0 | 31.1 | 24.2 | 16.4 | 6.17 | 2.62 | 2.17 | 1.72 | 1.49 | .839 | .938 | |
| 25 % | 1.81 | 10.4 | 11.9 | 16.2 | 11.4 | 4.52 | 2.23 | 1.43 | 1.22 | .998 | .580 | .635 | |
| Min. | .514 | 7.96 | 7.14 | 6.18 | 5.83 | 2.48 | 1.28 | 1.11 | .624 | .446 | .375 | .272 | |

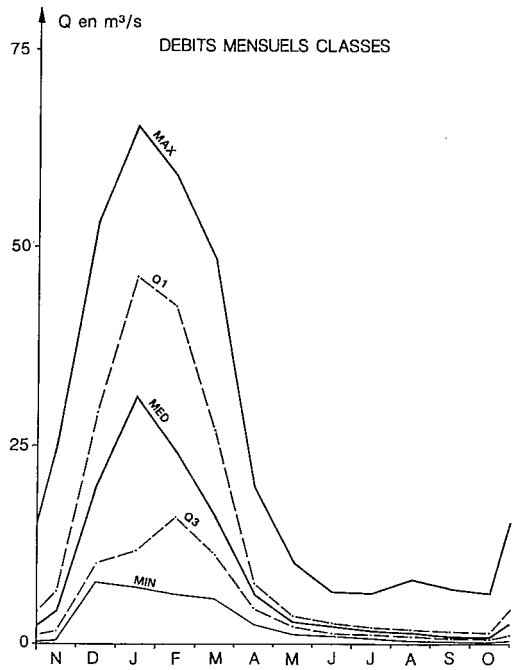



figure 7.10.

Zomandao à Ankaramena

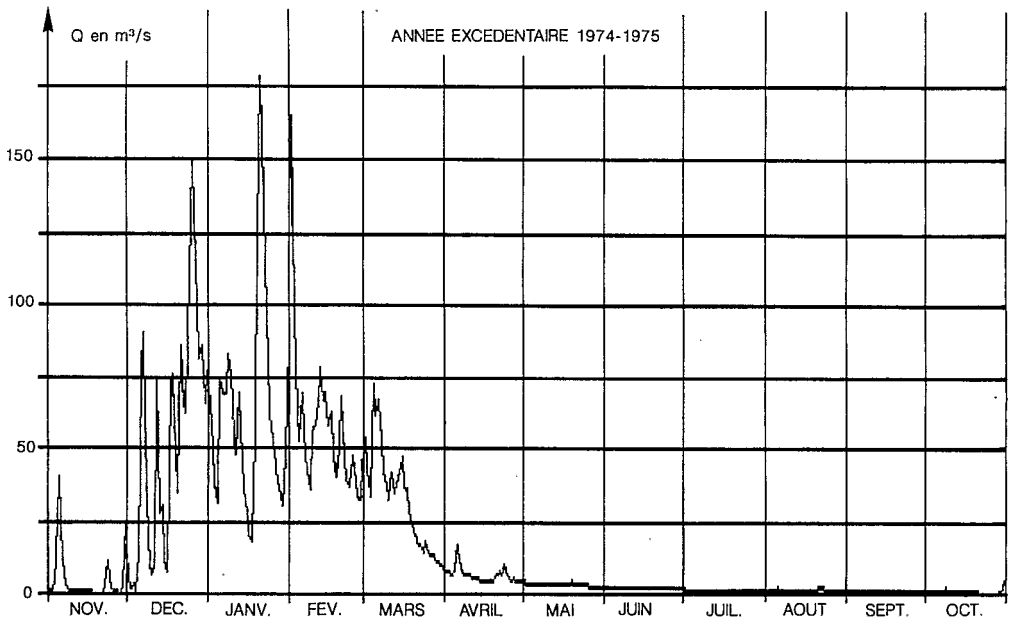
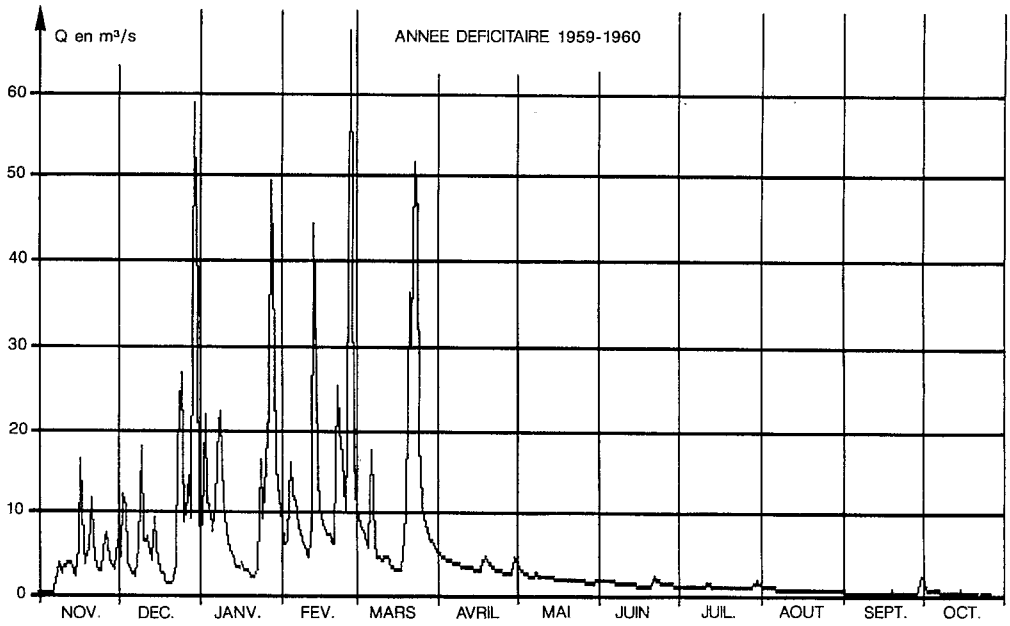



figure 7.11.

Zomandao à Ankaramena

figure 7.12.

Zomandao à Ankaramena




Les débits moyens mensuels classés sont représentés sur le graphe 7.10. Une année excédentaire (1974-75, Q = 18.8 m³/s, graphe 7.11.) et une année déficitaire (1959-60, Q = 5.11 m³/s, graphe 7.12.) permettent d'apprécier l'aspect des écoulements annuels : nombreuses crues assez bien individualisées correspondant à un bassin de superficie moyenne et assez imperméable, mais débits de base entre les crues et en saison sèche assez soutenus, attestant la présence de nappes d'altérites d'une certaine importance.

## 3.2.2. Apports annuels

La relation hydropluviométrique à l'échelle annuelle, établie sur treize valeurs de l'échantillon commun 1952-1968 (sauf 1955-56 qui reste hors de la corrélation) est la suivante :

$H = .59\ (P-312)$ $(R^2 = .69$ $P > .995)$,

ce qui permet d'estimer les apports de 1949-50 à 1951-52 et ceux des années incomplètes (1957-58, 1958-59, 1968-69 et 1969-70)

| | | |
|---|---|---|
| 1949-1950 | H = 510 mm | Q = 9.86 m³/s |
| 1950-1951 | H = 340 mm | Q = 6.58 m³/s |
| 1951-1952 | H = 645 mm | Q = 12.4 m³/s |
| 1957-1958 | H = 515 mm | Q = 9.96 m³/s |

1958-1959 H = 920 mm Q = 17.8 m³/s
1968-1969 H = 690 mm Q = 13.3 m³/s
1969-1970 H = 980 mm Q = 19.0 m³/s

Ainsi complété et après ajustement statistique, l'échantillon des valeurs annuelles 1949-50 à 1975-76 présente les quantiles suivants :

tableau 7.21.

Zomandao à Ankaramena
Apports annuels

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| H mm | 319 | 365 | 426 | 566 | 741 | 850 | 950 |
| Q m³/s | 6.17 | 7.05 | 8.23 | 10.9 | 14.3 | 16.4 | 18.4 |
| Q l/s/km² | 10.1 | 11.6 | 13.5 | 17.9 | 23.4 | 26.9 | 30.2 |

Loi log-normale (test B.M. : 2.27, échelle : 693 mm, position : - 127 mm, forme : .268).
Cinquantennales sèche et humide : 273 mm (Q = 5.28 m³/s) et 1074 mm (Q = 20.8 m³/s).

## 3.2.3. Crues

### 3.2.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux de l'échelle village

Les tarages de hautes eaux s'appuient sur les résultats des jaugeages réalisés les 26 et 27/01/1965 et le 02/02/1971 qui montrent une modification importante du contrôle principal aval (dégagements de blocs ou d'un barrage d'accumulation) survenue selon toute vraisemblance le 06/02/1969 (cyclone Dany).

L'extrapolation de type logarithmique a été menée à partir des deux plus forts jaugeages et permet l'évaluation des maximums de crues dus aux cyclones Dany et Geneviève (17/01/1970).

tableau 7.22

Zomandao à Ankaramena
Maximums annuels de crue

| Année | Q m³/s | Date | | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1952-53 | (703) | 11/02/53 | 06 h 00 | 5,10 | 3rel |
| 1953-54 | (464) | 15/01/54 | 06 h 00 | 4,10 | 3rel |
| 1954-55 | (364) | 13/01/55 | 12 h 00 | 3,60 | 3rel |
| 1955-56 | ≥ (680) | 23/03/56 | 06 h 00 | 5,00 | Min |
| 1956-57 | (250) | 14/03/57 | 06 h 00 | 3,00 | 3rel |
| 1957-58 | (345) | 04/03/58 | 06 h 00 | 3,50 | 3rel |
| 1958-59 | ≥ (548) | 25/12/58 | 06 h 00 | 4,45 | Min |
| 1958-60 | 171 | 30/12/59 | 18 h 00 | 3,70 | 3rel |
| 1960-61 | 355 | 18/02/61 | 18 h 00 | 4,95 | 3rel |
| 1961-62 | 179 | 25/12/61 | 18 h 00 | 3,77 | 3rel |
| 1962-63 | ≥ 201 | 16/12/62 | 06 h 00 | 3,96 | Min |
| 1963-64 | 448 | 15/02/64 | 12 h 00 | 4,48 | PHE |
| 1964-65 | 759 | 24/01/65 | 18 h 00 | 6,40 | PHE |

suite

| Année | Q m³/s | Date | | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1965-66 | 167 | 09/12/65 | 06 h 00 | 3,68 | 3rel |
| 1966-67 | 291 | 25/12/66 | 06 h 00 | 4,60 | 3rel |
| 1967-68 | 280 | 20/02/68 | 19 h 00 | 4,55 | 3rel |
| 1968-69 | 2140 | | | 10,00 | PHE |
| 1969-70 | 2460 | | | 10,80 | PHE |
| 1970-71 | 865 | | | 6,10 | PHE |
| 1971-72 | | | | | |
| 1972-73 | 525 | 12/01/73 | 18 h 00 | 4,76 | 3rel |
| 1973-74 | 162 | 26/12/73 | 06 h 0 | 2,34 | 3rel |
| 1974-75 | 326 | 25/12/74 | 18 h 00 | 3,40 | 3rel |
| 1975-76 | 284 | 28/12/75 | 06 h 00 | 3,18 | 3rel |
| 1976-77 | ≥ 158 | 24/12/76 | 06 h 00 | 2,30 | Min |
| 1977-78 | 218 | 30/01/78 | 06 h 00 | 2,77 | 3rel |
| 1978-79 | 795 | 25/12/78 | 06 h 00 | 5,50 | 3rel |
| 1979-80 | 546 | 11/01/80 | 06 h 00 | 4,44 | 3rel |

### 3.2.3.2. Extension de l'échantillon de crues

Les PHE 1968-69 et 1969-70 relevées au pont de la RN 7 ont permis, malgré un nombre insuffisant de jaugeages de moyennes eaux :

- d'estimer les maximums annuels de la période 1972-80 à cette nouvelle station ;

- d'avoir un ordre de grandeur des débits à l'ancienne station radier, située directement en aval du franchissement actuel et suivie de 1952 à 1959.

Pour l'année 1971-72, et au vu de l'échantillon de crues de l'IHOSY à IHOSY la station la plus proche, il a été admis que le maximum de crue se situait entre les valeurs de 1970-71 et 1972-73 soit de l'ordre de 750 m³/s.

Une année sur deux, le débit maximal est observé entre le 25 décembre et le 11 février (date médiane : 13 janvier - dates extrêmes : 9 décembre et 23 mars).

Ajustée à l'échantillon des 28 valeurs maximales annuelles, une distribution de Goodrich correspond aux quantiles suivants :

tableau 7.23.

Zomandao à Ankaramena
Débits maximaux annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 363 | 783 | 1160 | 2180 | (2660) |
| q l/s/km² | 595 | 1280 | 1900 | 3570 | (4360) |

La période de retour de la plus forte crue observée (1970) serait comprise entre 70 et 80 années.

## 3.2.4. Basses eaux

Il est possible, bien que certaines années des perturbations soient entraînées par des précipitations de saison sèche, de dégager un coefficient moyen pour la droite de tarissement :

$\alpha = .012$ (TC = 58 jours).

Le débit charnière initial de base est voisin de 3 m³/s et est observé entre la mi-avril et la fin mai. Le volume moyen des réserves drainables peut être estimé à 35.106 m³ ou 40 mm en lame équivalente - (cf. graphe 7.13.).

figure 7.13.

Zomandao à Ankaramena

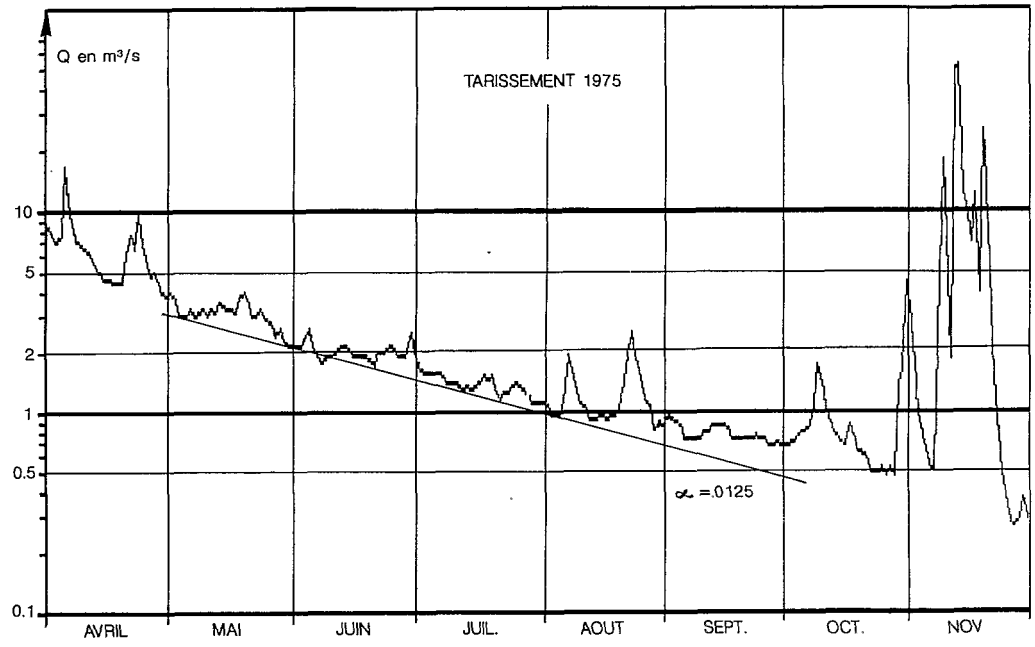



tableau 7.24.

Zomandao à Ankaranema
Débits caractéristiques
de basses eaux (m³/s)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1953 | 1.49 | .724 | .350 | .262 | 13.11 |
| 1954 | .612 | .386 | .350 | .290 | 30.10 |
| 1955 | .691 | .318 | .290 | .262 | 15.11 |
| 1956 | 1.48 | .906 | .512 | .350 | 17.11 |
| 1957 | 1.38 | .850 | .666 | .512 | 24.11 |

suite

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1958 | | | | | |
| 1959 | 1.55 | .530 | .355 | .330 | 02.11 |
| 1960 | | | | (.280) | 13.11 |
| 1961 | 1.29 | .433 | .261 | .232 | 17.10 |
| 1962 | 1.03 | .417 | .268 | .182 | 09.10 |
| 1963 | 916 | .311 | .585 | .120 | 29.10 |
| 1964 | 1.77 | 1.16 | .793 | .741 | 23.10 |
| 1965 | 2.85 | 2.02 | 1.61 | 1.37 | 05-11 |
| 1966 | 1.38 | .766 | .524 | .429 | 08-11 |
| 1967 | 1.79 | 1.30 | 1.10 | .769 | 05-10 |
| 1968 | 1.12 | .460 | .440 | .420 | 13-10 |
| 1969 | | | .403 | .350 | 24-11 |
| 1970 | 1.61 | .439 | .365 | .330 | 30-10 |
| 1971 | (.700) | .369 | .317 | .245 | 13-11 |
| 1972 | | | | | |
| 1973 | | | | | |
| 1974 | 1.48 | .655 | .538 | .433 | 21-11 |
| 1975 | 1.48 | .698 | .488 | .264 | 03-12 |
| 1976 | 730 | .419 | .247 | .174 | 01-12 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 2.85 | 2.02 | 1.61 | 1.37 | 03.12 |
| Q1 | 1.55 | .850 | .531 | .431 | 19.11 |
| Méd. | 1.38 | .530 | .384 | .330 | 08.11 |
| Q3 | .916 | .417 | .303 | .253 | 21.10 |
| Min. | .612 | .311 | .185 | .120 | 05.10 |

tableau 7.25.

Zomandao à Ankaramena
Étiages (QJmin)

| Récurrence | 20 | 10 | 5 | Médiane | 5 | 10 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q ($m^3/s$) | .156 | .181 | .218 | .323 | .510 | .673 | .867 |
| q ($l/s/km^2$) | .26 | .30 | .36 | .53 | .84 | 1.10 | 1.42 |

Loi de FRECHET (test B.M. : 2.29, échelle : 433 l/s, position : - 159 l/s, forme : - .291).
Cinquantennales sèche et humide : .132 $m^3/s$ (.22 $l/s/km^2$) et 1.19 $m^3/s$ (1.95 $l/s/km^2$)

Le débit journalier minimal QJmin est assez bien déterminé à partir du débit moyen mensuel de juillet :

QJmin = .18 Q07 + .05 ($R^2$ = .68 P > .995)

Cette relation permet d'estimer la valeur du débit minimal de 1960 (la valeur "observée", très en dehors de la corrélation, paraissant suspecte).

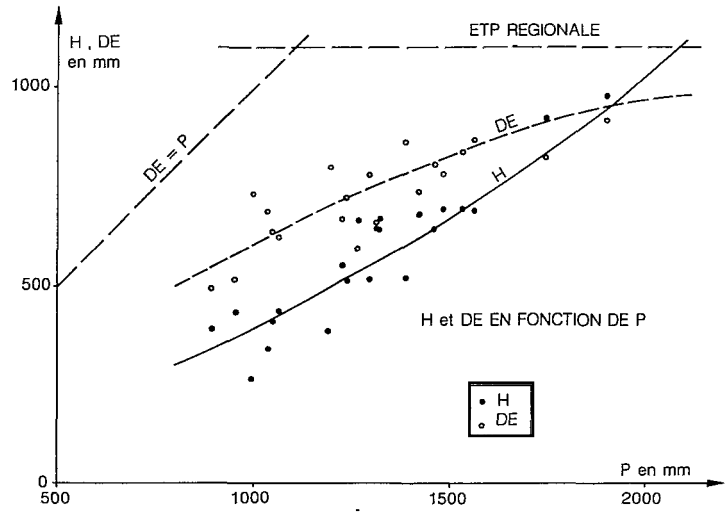
Les relations entre les différents débits caractéristiques sont les suivantes :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Q minimum instantané | = .80 QJmin + .04 | ($R^2$ = .98 | P > .995) | |
| DCE | = 1.17 QJmin + .03 | ($R^2$ = .97 | P > .995) | DCE /QJmin = 1.27 |
| DC11 | = 1.37 QJmin + .14 | ($R^2$ = .90 | P > .995) | DC11/QJmin = 1.75 |
| DC9 | = 1.53 QJmin + .71 | ($R^2$ = .73 | P > .99) | DC9 /QJmin = 3.35 |

## 3.2.5. Bilan hydrologique

figure 7.14.

Zomandao à Ankaramena




Pour une pluviométrie moyenne interannuelle estimée à 1 300 mm, la lame écoulée moyenne (575 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 725 mm avec un coefficient d'écoulement de 44 %.

Les lames écoulées et déficits annuels d'écoulement en fonction des précipitations sur le bassin sont représentées sur le graphe 7.14. Les écoulements annuels sont compris entre 300 mm (pour P = 800 mm) et 1 100 mm (pour P = 2 100 mm), soit des coefficients d'écoulement allant de 38 à 52 %. Le déficit d'écoulement varie entre 500 mm pour les années déficitaires à près de 1 000 mm pour les précipitations excédentaires. La courbe moyenne tend à être asymptotique à une valeur limite de 1 000 à 1 050 mm (à comparer à l'ETP régionale voisine de 1 100 mm).

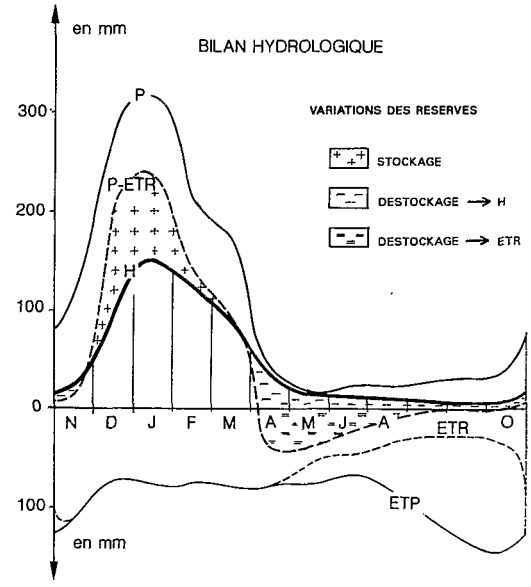
tableau 7.26.

Zomandao à Ankaramena
Termes mensuels du bilan hydrologique (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 122 | 280 | 315 | 213 | 175 | 40 | 17 | 22 | 22 | 27 | 29 | 38 | 1300 |
| ETP | 110 | 72 | 78 | 74 | 80 | 78 | 77 | 66 | 80 | 107 | 136 | 142 | 1100 |
| ETR | 108 | 72 | 78 | 74 | 80 | 78 | 55 | 47 | 36 | 30 | 30 | 37 | 725 |
| P-ETR | 14 | 208 | 237 | 139 | 95 | - 38 | - 38 | - 25 | - 14 | - 3 | - 1 | - 1 | 575 |
| H | 23 | 100 | 151 | 125 | 91 | 30 | 15 | 11 | 9 | 8 | 6 | 6 | 575 |
| ΔR + | | 108 | 86 | 14 | 4 | | | | | | | | + 212 |
| ΔR - | 9 | | | | | 68 | 53 | 36 | 23 | 11 | 7 | 5 | - 212 |
| R | 0 | 108 | 194 | 208 | 212 | 144 | 91 | 55 | 32 | 21 | 14 | 9 | |

figure 7.15.

Zomandao à Ankaramena




Les précipitations de saison des pluies (décembre à mars) qui représentent 983 mm (et 76 % du total annuel) permettent la satisfaction totale des besoins en ETP (304 mm) et, après avoir effectué la reconstitution des réserves drainables (nappes d'altérites) et de la réserve utile du sol (212 mm au total), alimentent les écoulements (467 mm soit 81 % du total annuel). D'avril à novembre, les réserves drainables (93 mm) assurent, avec le faible concours des précipitations (octobre et novembre : 15 mm), les écoulements de saison sèche. L'évapotranspiration (ETR = 421 mm) est réduite par rapport à l'ETP (ETR/ETP = 66 % en total annuel et pour la seule

saison sèche : ETR/ETP = 53 %), malgré le soutien d'avril à début août de la réserve utile des sols (119 mm). D'août à octobre, l'ETR est pratiquement réduite aux précipitations.

## 3.3. Bassin de la Manantanana

La MANANTANANA draine dans son cours supérieur une vallée perchée, située entre le rebord oriental et le flanc nord-est de l'ANDRINGITRA. En aval d'AMBALAVAO, la MANANTANANA franchit une gorge dominée par le VOHIBE avant d'entrer dans la plaine de TSITONDROINA (où elle est rejointe par ses deux principaux affluents de rive droite : RANOMAITSO et MANAMBOVONA). Au sud de la chaîne du VOHIDABA , la MANANTANANA conflue avec la MATSIATRA puis forme, avec le ZOMANDAO, le MANGOKY.

La station de TSITONDROINA (21°19'S - 45°59'32"E) contrôle un bassin versant de 6 510 km². La station est à une altitude voisine de 600 m (altitude moyenne du bassin : environ 1 000 m).

L'échelle, située à l'ouest du village, a été installée en septembre 1952 et plusieurs fois réamé-nagée sans changement de calage (sauf en 1970 où un nouvel élément de basses eaux a été installée 94 cm au-dessous du zéro de 1952).

Par contre, une nouvelle batterie d'échelles, installée en juin 1972, présente un décalage de 50 cm vers le bas (par rapport à 1952).

Quarante-six mesures de débit (entre 6.88 et 900 m³/s) ont été effectuées à cette station, d'accès parfois difficile. En raison des décalages successifs du zéro et de l'instabilité du lit, l'étalonnage de cette station est délicate principalement en basses eaux où l'extrapolation vers les faibles débits est assez approximatives. Quatre courbes moyennes ont été tracées et l'extrapolation vers les débits de hautes eaux est forte, jusqu'à 2 520 m³/s. Ces difficultés jointes à la qualité médiocre des lectures d'échelle confèrent aux valeurs de débits journaliers établies une imprécision certaine dont il faudra tenir compte.

Onze stations pluviométriques situées sur ou à proximité du bassin ont permis d'établir la pluviométrie annuelle avec une précision acceptable (P interannuelle voisine de 1 100 mm).

Les stations principales utilisées sont : TSITONDROINA (poids : .20), AMBALAVAO (.20), SOLILA (.26), IKALAMAVONY (.12), SENORISOA (.08), etc.

### 3.3.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 7.27.

Manantanana à Tsitondroina
Coefficients
de corrélation

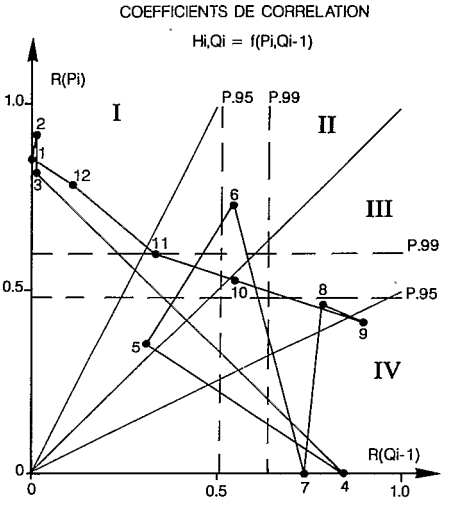
| HI, QI | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .60 | .79 | .86 | .92 | .82 | (-.10) | (.35) | .73 | (-.15) | (.46) | (.42) | .53 |
| Pi-1 | (.25) | (-.35) | (-.50) | (.04) | (-.07) | .63 | (0) | (-.04) | (.35) | (.31) | (.27) | (.11) |
| Qi-1 | (.33) | (.11) | (-.10) | (.01) | (.01) | .84 | (.31) | .54 | .74 | .78 | .89 | .55 |

Nota : en mars et avril les relations sont affectées par la prise en compte des valeurs de 1957 (très douteuses pour Qi) et en 1959 où la très forte précipitation de fin de mois entraîne un report de débit sur avril.

Le coefficient (.82) entre Qi et Pi de mars est établi sans 1957 et 1959.

figure 7.16.

Manantanana à Tsitondroina




Le graphe 7.16. où sont reportés les coefficients de corrélation montre le poids prédominant des précipitations du mois en saison des pluies (décembre-mars), sans influence établie de de la précipitation du mois antérieur ainsi que l'influence des débits antérieurs en saison sèche (juillet à septembre). Les mois intermédiaires de transition (mai-juin et octobre-novembre) sont caractérisés par une influence comparable des précipitations du mois et des débits antérieurs.

tableau 7.28.

Manantanana à Tsitondroina
Régressions
hydropluviométriques

| | |
|---|---|
| H11 = .21 P11 - 6.2 | ($R^2$ = .36 P > .95) |
| H12 = .40 P12 - 17.3 | ($R^2$ = .62 P > .995) |
| H01 = .41 P01 - 2.6 | ($R^2$ = .74 P > .995) |
| H02 = .69 P02 - 39.8 | ($R^2$ = .85 P > .995) |
| H03 = .69 P03 - 26.9 | ($R^2$ = .67 P > .995) sans 1957 et 1959 |
| H04 = .23 P0403 + 4.3 | ($R^2$ = .45 P > .95) sans 1957 |
| Q05 = .48 P05 + .11 Q04 + 16.6 | ($R^2$ = .44 P > .95) |
| Q06 = .68 P06 + .46 Q05 + 2.5 | ($R^2$ = .77 P > .995) |
| Q07 = .56 Q06 + 5.2 | ($R^2$ = .55 NP > .95) |

suite

| | |
|---|---|
| Q08 = .80 Q07 + .34 P08 - 2 | ($R^2$ = .83 P > .995) |
| Q09 = .85 Q08 - 1.6 | ($R^2$ = .79 P > .995) |
| Q10 = .63 Q09 + .22 P10 - 4.5 | ($R^2$ = .56 P > .995) |

À partir de ces regressions ont été corrigées les valeurs suspectes de mars et avril 1957, avril et mai 1964 et complétées les lacunes mensuelles de septembre à novembre 1956 et janvier 1968. Par contre nous n'avons pas tenté de corriger les valeurs assez douteuses de 1953-54 qui paraissent surestimées.

Le tableau 7.29 présente les valeurs mensuelles des débits (ainsi que les moyennes, écarts-types et quantiles caractéristiques) de 1952 à 1969.

Le graphe 7.17 représente les courbes des débits mensuels classés, les graphes 7.18 et 7.19, les hydrogrammes d'une année excédentaire (1952-53 Q = 118 m³/s) et d'une année déficitaire (1959-60 Q = 63.1 m³/s).

figure 7.17.

Manantanana à Tsitondroina

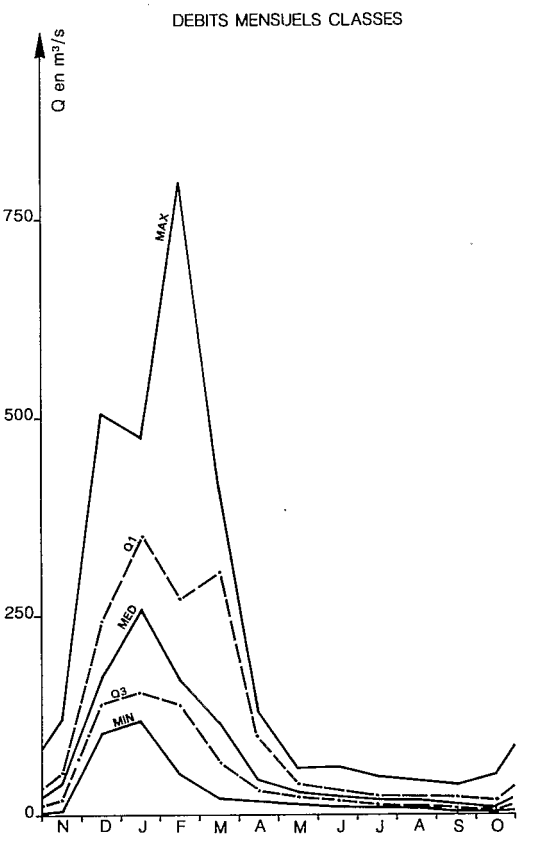


figure 7.18.

Manantanana
à Tsitondroina

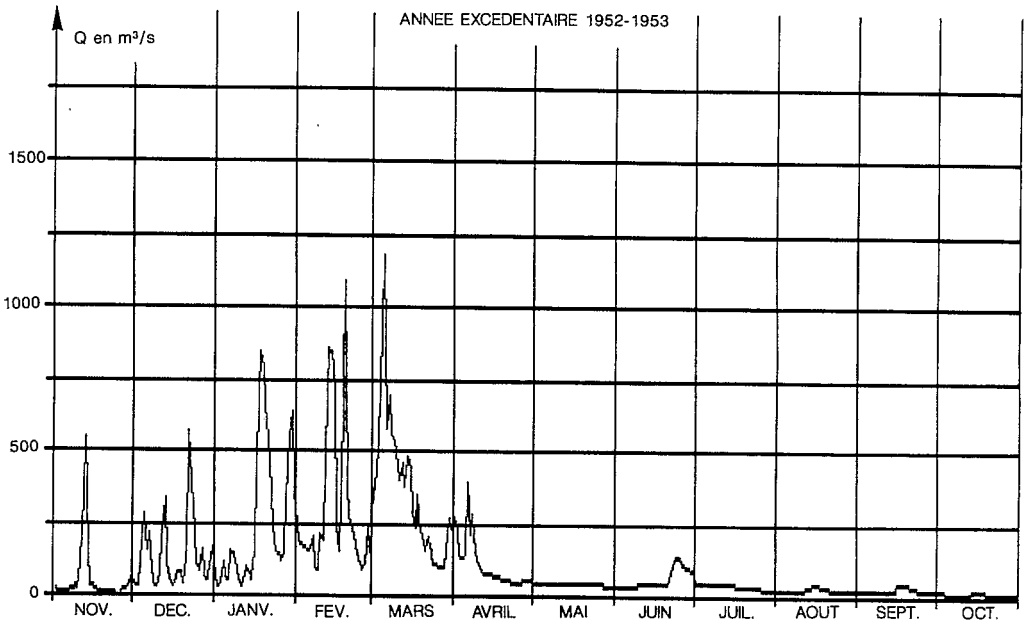
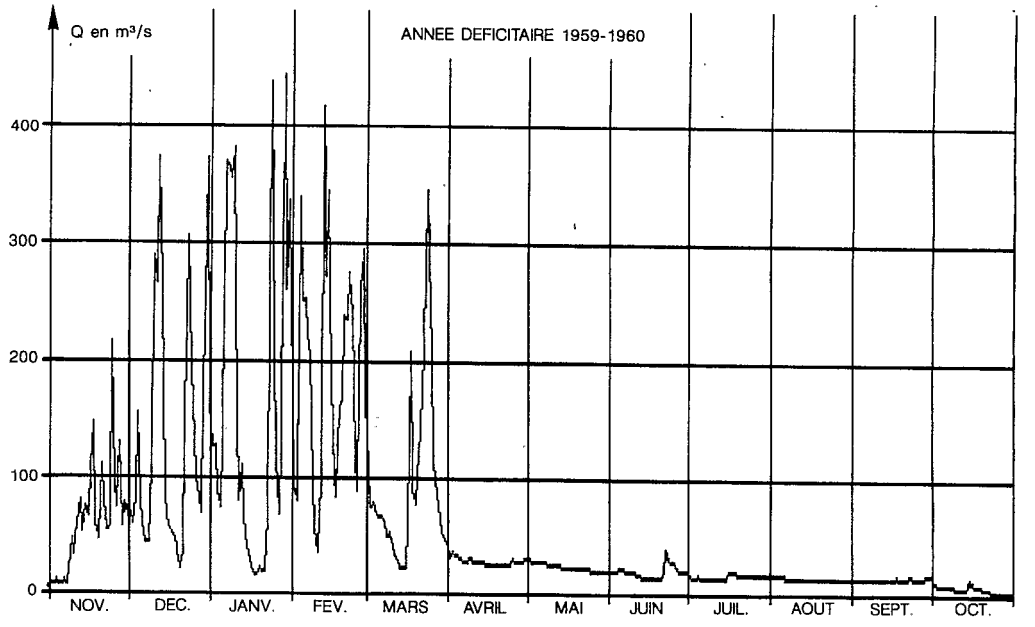



figure 7.19.

Manantanana
à Tsitondroina



## 3.3.2. Apports annuels

La corrélation entre les lames écoulées annuelles et les précipitations moyennes annuelles sur le bassin montre que l'année 1953-1954 se situe nettement en dessous de la regression ($R^2$ = .49). En retirant la valeur suspecte (1953-54), la regression est la suivante :

H = .60 P - 229 ($R^2$ = .63 P > .995)

La régression est améliorée si l'on prend en compte (facteur secondaire) le coefficient CP ( CP moy. = .345) de concentration des précipitations mensuelles.

H = .60 (P + 695 (1 - 1.36 CP)) ($R^2$ = .71 P > .995)

Cette relation permet de corriger la valeur annuelle de 1953-54 et d'estimer les années manquantes de l'échantillon 1949-1970.

| | | |
|---|---|---|
| 1949-1950 | H = 385 mm | Q = 79.5 m³/s |
| 1950-1951 | H = 340 mm | Q = 70.2 m³/s |
| 1951-1952 | H = 470 mm | Q = 97.3 m³/s |
| 1953-1954 | H = 580 mm | Q = 120 m³/s |
| 1969-1970 | H = 725 mm | Q = 150 m³/s |

tableau 7.29.

Station : 1250801510 Tsitondroina — Latitude : 21°19'00
Rivière : Mananantanana — Longitude : 45°59'32
Pays: Madagascar
Bassin: Mangoky — Aire : 6 510 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1953/53 | 55.2 | 134. | 259. | 303. | 364. | 108. | 42.3 | 61.0 | 37.0 | 27.5 | 26.9 | 14.0 | 118. |
| 1953/54 | 17.7 | 176. | 442. | 394. | 409. | 96.1 | 51.9 | 51.1 | 48.4 | 42.0 | 36.6 | 29.2 | 149. |
| 1954/55 | 121. | 337. | 411. | 67.4 | 35.7 | 35.1 | 25.0 | 20.8 | 16.3 | 14.5 | 9.26 | 5.45 | 92.2 |
| 1955/56 | 39.0 | 233. | 476. | 165. | 81.6 | 33.3 | 28.2 | 26.3 | 20.0 | 10.9 | (7.65) | (8.76) | (94.5) |
| 1956/57 | (41.4) | 173. | 265. | 172. | (372) | (119) | 34.6 | 28.4 | 23.1 | 20.5 | 16.9 | 17.3 | (107.) |
| 1957/58 | 20.9 | 282. | 221. | 300. | 52.4 | 29.2 | 22.0 | 16.6 | 13.2 | 20.2 | 9.86 | 9.37 | 82.0 |
| 1958/59 | 45.1 | 505. | 165. | 52.4 | 237. | 129. | 47.2 | 34.4 | 26.9 | 20.6 | 12.7 | 7.04 | 108. |
| 1959/60 | 60.5 | 131. | 160. | 191. | 95.5 | 28.6 | 23.6 | 19.5 | 15.6 | 14.6 | 14.8 | 6.63 | 63.1 |
| 1960/61 | 5.70 | 173. | 334. | 171. | 254. | 39.3 | 14.5 | 9.87 | 11.2 | 18.8 | 10.0 | 9.77 | 87.7 |
| 1961/62 | 26.0 | 241. | 128. | 149. | 133. | 39.2 | 35.3 | 17.5 | 10.4 | 7.53 | 3.83 | 5.65 | 66.2 |
| 1962/63 | 92.2 | 153. | 369. | 196. | 144. | 98.2 | 16.1 | 40.9 | 10.1 | 7.29 | 2.51 | 1.09 | 93.8 |
| 1963/64 | 46.8 | 172. | 147. | 237. | 20.9 | (29.) | (23.) | 21.1 | 10.3 | 11.9 | 3.61 | 11.0 | (60.6) |
| 1964-65 | 47.1 | 121. | 304. | 215. | 118. | 85.0 | 27.8 | 22.0 | 25.6 | 42.6 | 28.9 | 16.2 | 87.2 |
| 1965/66 | 19.5 | 224. | 139. | 120. | 48.4 | 62.5 | 60.2 | 29.9 | 20.0 | 23.0 | 22.3 | 11.1 | 64.9 |
| 1966/67 | 16.7 | 139. | 277. | 152. | 350. | 88.1 | 28.1 | 16.0 | 21.1 | 13.3 | 18.1 | 48.9 | 97.6 |
| 1967/68 | 67.9 | 147. | (118) | 127. | 95.0 | 29.2 | 22.2 | 21.8 | 16.1 | 13.8 | 9.15 | 7.39 | (56.1) |
| 1968/69 | 21.9 | 103. | 225. | 795. | 102. | 44.7 | 27.3 | 21.8 | 20.6 | 20.8 | 20.5 | 20.3 | 114. |
| Moyenne | 42.4 | 208. | 261. | 224. | 172 | 64.3 | 31.2 | 27.0 | 20.4 | 19.4 | 14.9 | 13.5 | 91.1 |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ecart-type | 30.3 | 98.7 | 112. | 170. | 169. | 52.7 | 13.3 | 13.3 | 10.1 | 10.2 | 9.77 | 11.6 | |
| Max. | 121. | 505. | 476. | 795. | 409. | 129. | 60.2 | 61.0 | 48.4 | 42.6 | 36.6 | 48.9 | |
| Q1 | 55.2 | 241. | 352. | 269. | 302. | 97.2 | 38.8 | 32.2 | 24.4 | 21.9 | 21.4 | 16.8 | |
| Méd. | 40.2 | 173. | 259. | 172. | 118. | 44.7 | 27.8 | 21.8 | 20.0 | 18.8 | 12.7 | 9.77 | |
| Q3 | 19.9 | 139. | 153. | 138. | 67.0 | 31.2 | 22.6 | 18.5 | 12.2 | 12.6 | 8.40 | 6.83 | |
| Min. | 5.70 | 103. | 118. | 52.4 | 20.9 | 28.6 | 14.5 | 9.87 | 10.1 | 7.29 | 2.51 | 1.09 | |

L'ajustement statistique effectué sur l'échantillon de 21 valeurs annuelles observées ou estimées fournit les quantiles suivants :

tableau 7.30.

Manantanana à Tsitondroina
Apports annuels

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence (ans) | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| H mm | 284 | 310 | 345 | 425 | 528 | 592 | 651 |
| Qm³/s | 58.6 | 63.9 | 71.2 | 87.7 | 109 | 122 | 134 |
| ql/s/km² | 9.0 | 9.8 | 10.9 | 13.5 | 16.7 | 18.7 | 20.6 |

Loi log-normale (test B.M. : 1.88, échelle : 376 mm, position : 49 mm, forme : .286)
Cinquantennales sèche et humide : 258 mm (cl = 53.2 m³/s) et 725 mm (cl = 150 m³/s)

## 3.3.3. Crues

### 3.3.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

La station peut être considérée comme très stable en moyennes et hautes eaux, comme le montrent les séries de mesures du 9 au 12/02/1953, du 16 au 23/01/1956 et du 29 au 30/01/1965.

L'extrapolation de type logarithmique qui s'appuie sur ces jaugeages a été menée de 2,69 à 5,30 m (système de l'ancienne échelle).

tableau 7.31

Manantanana à Tsitondroina
Maximums annuels de crues

| Année | Q m³/s | Date | | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1952-53 | 1450 | 18/02/53 | 06 h 00 | 3,66 | 3rel |
| 1953-54 | 1340 | 29/01/54 | 06 h 00 | 3,48 | 3rel |
| 1954-55 | 1220 | 05/01/55 | 18 h 00 | 3,28 | 3rel |
| 1955-56 | 1850 | 10/01/56 | 12 h 00 | 4,21 | 3rel |
| 1956-57 | 1910 | 15/03/57 | 06 h 00 | 4,28 | 3rel |
| 1957-58 | 526 | 27/01/58 | 06 h 00 | 1,99 | 3rel |
| 1958-59 | 1020 | 18/12/58 | 18 h 00 | 2,95 | 3rel |
| 1958-60 | 613 | 30/12/59 | 18 h 00 | 2,20 | 3rel |
| 1960-61 | 1380 | 21/01/61 | 21 h 00 | 3,54 | 3rel |
| 1961-62 | 821 | 14/12/61 | 18 h 00 | 2,62 | 3rel |
| 1962-63 | 1570 | 03/02/63 | 06 h 00 | 3,82 | 3rel |
| 1963-64 | 1480 | 14/01/64 | 06 h 00 | 3,70 | 3rel |
| 1964-65 | 1700 | 25/01/65 | 18 h 00 | 4,00 | 3rel |
| 1965-66 | 1040 | 09/12/65 | 06 h 00 | 2,98 | 3rel |
| 1966-67 | 1450 | 06/01/67 | 06 h 00 | 3,65 | 3rel |
| 1967-68 | 530 | 11/12/67 | 06 h 00 | 2,00 | 3rel |
| 1968-69 | 1920 | 06/02/69 | 12 h 00 | 4,30 | 3rel |
| 1969-70 | ≥ 1630 | 04/01/70 | 18 h 00 | 3,90 | Min |
| 1970-71 | | | | | |
| 1971-72 | | | | | |
| 1972-73 | (2900) | 15/01/73 | 06 h 00 | 4,80 | 3rel |
| 1973-74 | (1820) | 30/12/73 | 06 h 00 | 3,66 | 3rel |
| 1974-75 | ≥ (892) | 24/12/74 | 12 h 00 | 2,25 | Min |
| 1975-76 | ≥ (651) | 19/12/75 | 06 h 00 | 1,79 | Min |

## 3.3.3.2. Extension de l'échantillon de crues

Malgré l'absence de relevés de moyennes et hautes eaux du 05/01/1970 au 16/06/1972, et de contrôles et de mesures après le 17/06/1972, la crue du 15/01/1973, consécutive à la dépression Dorothée, peut être considérée comme la plus forte de la période 1952-1976.

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 24 décembre et le 27 janvier (date médiane : 6 au 10 janvier - dates extrêmes : 9 décembre et 15 mars).

Une distribution de Gumbel, adaptée à l'échantillon des 18 valeurs observées de 1953 à 1970 correspond aux quantiles suivants :

tableau 7.32.

Manantanana à Tsitondroina
Maximums annuels

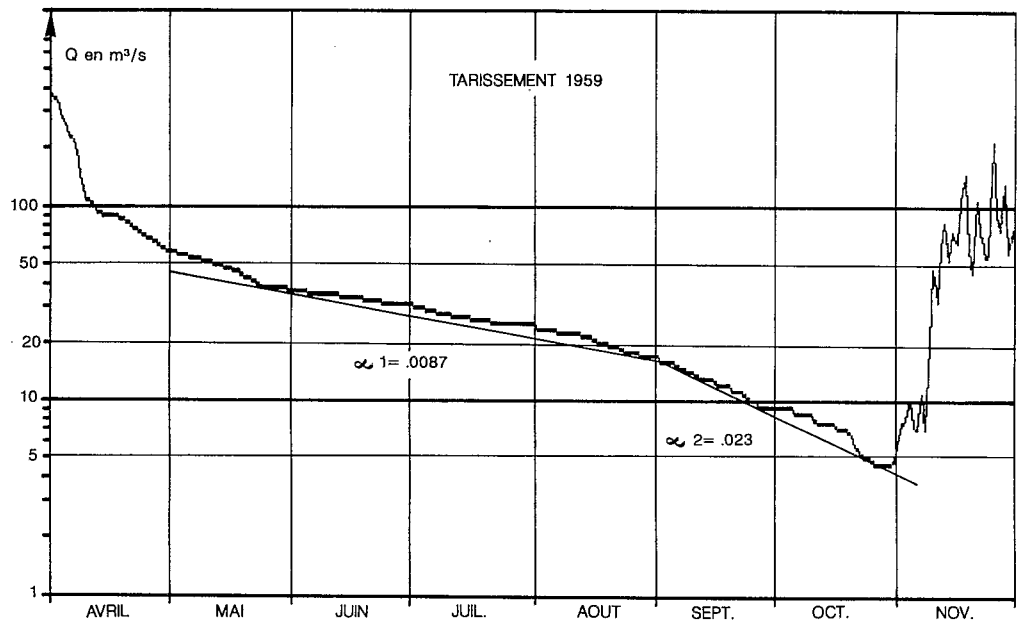
| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1380 | 1690 | 1820 | (2010) | (2070) |
| q l/s/km² | 212 | 260 | 280 | (310) | (320) |

## 3.3.4. Basses eaux

Le graphe 7.20 représente un exemple du tarissement observé deux années sur trois à la station de TSITONDROINA.

figure 7.20.

Manantanana à Tsitondroina




Une première décroissance est observée d'avril-mai à fin août. Le débit de base initial est voisin de 30 m³/s et le coefficient $\alpha 1$ de la droite de tarissement est de l'ordre de .0085 (Tc = 82 jours). Il est suivi d'un tarissement plus rapide (Tc = 28 jours) du débit initial de 10 m³/s et de pente $\alpha 2$ = .025. Le volume total des réserves ainsi drainées est voisin de 240.106 m³. La recharge des nappes intervient en moyenne à partir de la mi-novembre.

Les débits caractéristiques d'étiage observés de 1953 à 1969 sont consignés dans le tableau 7.33.

tableau 7.33.

Manantanana à Tsitondroina
Débits de basses eaux ($m^3/s$)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1953 | 23.9 | 15.9 | 7.94 | 5.77 | 07.11 |
| 1954 | (43.7) | (32.8) | (23.9) | (22.9) | 30.10 |
| 1955 | 13.5 | 5.08 | 4.04 | 4.04 | 28.10 |
| 1956 | | | | | |
| 1957 | 20.3 | 14.8 | 13.6 | 12.8 | 07.11 |
| 1958 | | | | | |
| 1959 | 22.3 | 8.55 | 5.64 | 4.56 | 27.10 |
| 1960 | 14.0 | 4.16 | 1.60 | 1.10 | 16.1 |
| 1961 | 10.6 | 7.00 | 2.97 | 2.00 | 11.11 |
| 1962 | 9.33 | 3.96 | 2.13 | 1.07 | 05.10 |
| 1963 | 7.19 | 1.49 | .966 | .812 | 31.10 |
| 1964 | (8.77) | (2.03) | (.664) | (.447) | 28.10 |
| 1965 | 21.2 | 11.9 | 7.00 | 4.82 | 19.11 |
| 1966 | 16.8 | 7.49 | 5.06 | 1.81 | 05.11 |
| 1967 | 16.2 | 11.2 | 8.07 | 6.28 | 02.11 |
| 1968 | 12.1 | 6.35 | 4.78 | 4.62 | 10.10 |
| 1969 | 20.7 | 19.0 | 7.16 | 5.29 | 01.11 |

La date médiane d'apparition de l'étiage absolu est le 1er novembre (50 % des étiages entre le 28 octobre et le 9 novembre).

Les débits caractéristiques sont liés par les relations suivantes :

DCE = QJMIN + 1.3 ($R2 = .97$)
DC11 = 1.26 QJMIN + 3.5 ($R2 = .81$)
DC9 = 1.38 QJMIN + 9.9 ($R^2 = .77$)

Le débit journalier minimum est assez bien déterminé par le débit moyen de juillet ou même par le débit moyen annuel :

QJMIN = .44 Q 07 - 3.72 ($R^2 = .66$ $P > .99$)
QJMIN = .16 Q ann - 9.9 ($R^2 = .65$ $P > .99$)

relations établies sans les valeurs de 1954 assez douteuses. La valeur de l'étiage 1954 (22.9 $m^3/s$) apparaît assez surestimée et serait plus vraisemblablement voisine de 14 à 15 $m^3/s$.

L'ajustement statistique effectué sur l'échantillon de 16 valeurs de QJMIN fournit les quantiles suivants :

tableau 7.34.

Manantanana à Tsitondroina
Débits journaliers minimaux

| | Années sèches | | Médiane | Années humides | |
|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence (ans) | 20 | 5 | 2 | 5 | 10 |
| Q ($m^3/s$) | .85 | 1.35 | 3.35 | 7.25 | 10.2 |
| q ($l/s/km^2$) | .13 | .20 | .51 | 1.1 | 1.6 |

Loi de Goodrich (test B.M. : 3.1, échelle : 4.26 $m^3/s$, position : .40 $m^3/s$, forme : 1.0)
Vicennales 1/20 sèche et humide : .62 $m^3/s$ (.09 $l/s/km^2$) et 13.2 $m^3/s$ (2 $l/s/km^2$).

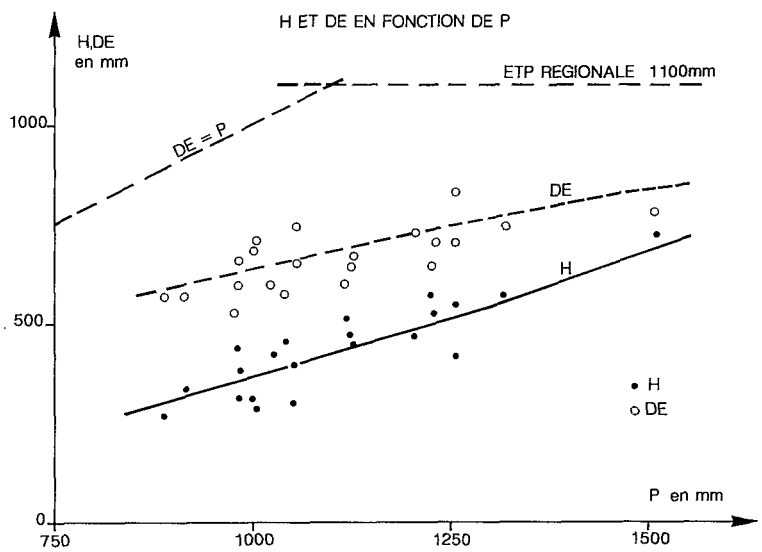
## 3.3.5. Bilan hydrologique

La pluviométrie moyenne interannuelle sur le bassin est estimée à 1 100 mm et la lame moyenne écoulée interannuelle à 440 mm soit un déficit d'écoulement de 660 mm (Ke : 40 %).

Les lames écoulées (et déficits d'écoulement correspondant) sont représentées, en fonction des précipitations annuelles, sur le graphe 7.21.

figure 7.21.

Manantanana à Tsitondroina




Les lames observées sont comprises entre 280 et 710 mm pour des précipitations comprises entre 850 et 1 550 mm (Ke compris entre 33 et 46%) autour d'une courbe légèrement parabolique.

Les déficits d'écoulement, compris entre 570 et 850 mm se regroupent autour d'une courbe moyenne légèrement convexe (amorce d'une tendance asymptotique) qui reste dans les limites de l'échantillon observé nettement en deça de l'évapotranspiration potentielle régionale (1 100 mm).

Ainsi que le montre le tableau 7.35 et le graphe représentatif 7.22, on note sur ce bassin l'opposition caractéristique de la saison des pluies et de la saison sèche bien différenciées. 78 % des précipitations annuelles (856 mm) sont observées de décembre à mars. L'ETP (304 mm) est entièrement satisfaite et, une fois déduite la part de l'écoulement (347 mm soit près de 80 % du total annuel), les réserves stockées en fin mars dans les altérites et la tranche superficielle des sols s'élèvent à 205 mm. D'avril à novembre, l'écoulement (93 mm) est presqu'entièrement (94 %) assuré par le drainage des altérites. L'ETR (356 mm soit 45 % de l'ETP de la période) est alimenté pour un tiers à partir de la réserve utile des sols (d'avril à juillet) et pour la majeure partie à partir des précipitations. La reconstitution des réserves s'effectue dès le début de décembre.

tableau 7.35.

Manantanana à Tsitondroina
Bilan hydrologique mensuel
et annuel (valeurs en mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 106 | 250 | 280 | 175 | 151 | 30 | 17 | 14 | 12 | 14 | 15 | 36 | 1100 |
| ETP | 110 | 72 | 78 | 74 | 80 | 78 | 77 | 66 | 80 | 107 | 136 | 142 | 1100 |
| ETR | 101 | 72 | 78 | 74 | 80 | 78 | 54 | 36 | 23 | 14 | 15 | 35 | 660 |
| P-ETR | 5 | 178 | 202 | 101 | 71 | - 48 | - 37 | - 22 | - 11 | 0 | 0 | 1 | 440 |
| H | 17 | 85 | 107 | 84 | 71 | 25 | 13 | 11 | 8 | 8 | 6 | 5 | 440 |
| ΔR+ | | 93 | 95 | 17 | | | | | | | | | + 205 |
| ΔR- | 12 | | | | | 73 | 50 | 33 | 19 | 8 | 6 | 4 | - 205 |
| R | 0 | 93 | 188 | 205 | 205 | 132 | 85 | 49 | 30 | 22 | 16 | 12 | |

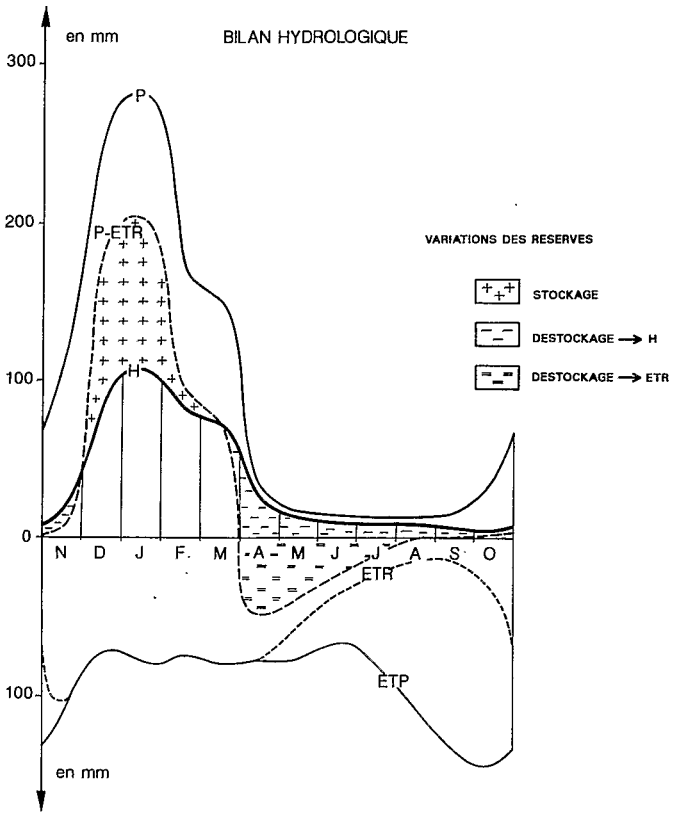



figure 7.22.

Manantanana à Tsitondroina

### 3.3.6. Mananantana à Iarintsena

La station installée en janvier 1981 au pont de la MANANANTANA sur la RN7 (21°50'S - 46°55'E) contrôle un bassin de 1 260 km² correspondant au bassin supérieur du cours d'eau (cuvette d'AMBALAVAO) d'une altitude moyenne de 1 140 mm.

La station a été suivie de 1981 à décembre 1983 et un étalonnage provisoire assez fortement extrapolé a été établi à partir de 36 jaugeages (1.53 à 147 m³/s).

tableau 7.35.

Manantanana à Iarintsena
Débits moyens en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1980/81 | - | - | - | - | 45.1 | 20.5 | 15.3 | 11.3 | 8.28 | 5.57 | 6.48 | 6.43 | - |
| 1981/82 | 8.85 | 16.9 | 108. | 90.6 | 99.0 | 35.2 | 21.4 | 16.0 | 16.3 | 11.9 | 8.02 | 12.8 | 37.1 |
| 1982/83 | 10.7 | 7.06 | 8.19 | 16.3 | 9.30 | 10.1 | 6.80 | 6.57 | 6.69 | 4.20 | 3.18 | 4.04 | 7.76 |
| 1983/84 | 7.53 | 36.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 9.03 | 20.1 | 58.1 | 53.5 | 51.1 | 21.9 | 14.5 | 11.3 | 10.4 | 7.22 | 5.89 | 7.76 | 22.4 |

L'année 1981-1982 (928 mm) correspond à une année très excédentaire (recurrence supérieure à 20 ans), 1982-83 (194 mm) à une année sèche mais moins rare. Sous toute réserve, la lame interannuelle de ce bassin doit être comprise entre 400 et 500 mm.

Les pointes de crues journalières ont été estimées à :

98.4 m³/s (78 l/s/km²) le 4 mars 1981
441 m³/s (350 l/s/km²) le 26 janvier 1982
29.6 m³/s (23.5 l/s/km²) le 7 janvier 1983

Les débits d'étiage observés sont les suivants :

QJMIN : 2.11 m³/s (1.67 l/s/km²) le 1/10/81 DCE = 3.17 m³/s
QMIN : 5.84 m³/s (4.63 l/s/km²) le 9/11/82 DCE = 6.96 m³/s
QJMIN : 1.63 m³/s (1.29 l/s/km²) le 10/10/83 DCE = 1.96 m³/s

Bien que difficilement comparables aux débits d'étiage à TSITONDROINA (non observés en 1981-1983), les débits spécifiques semblent nettement plus élevés qu'à la station aval.

## 3.4. Bassin de la Matsiatra

La MATSIATRA, issue du rebord oriental des hauts plateaux du BETSILEO, draine dans son cours supérieur, des vallées assez peu développées sur le socle ancien mais assez largement aménagées en casiers rizicoles (petites retenues) dans la région de FIANARANTSOA.

Elle se dirige initialement du sud au nord et est rejointe par d'assez nombreux affluents (FANINDRONA, MANANDRIANA, etc).

Au contact du massif de l'ITREMO, la MATSIATRA oblique vers l'ouest et après avoir franchi un seuil bien marqué, rejoint la plaine d'IKALAMAVONY où elle reçoit, en rive droite, les apports de l'IMATANDIKA puis, toujours sur le socle, de la MANAMBAROA, du MITODY et de la MANANTSAHALA. Au sortir du socle, elle se dirige vers le sud, dans la dépression de la SAKAMENA et, après avoir été rejointe par la MANANANTANANA et le ZOMANDAO, forme le MANGOKY.

La station de MALAKIALINA (21°01'S - 45°48'E), située à une altitude voisine de 400 m, est voisine du bac de la piste MANDROSONORO-MALAKIALINA, dans une petite gorge par laquelle la MATSIATRA quitte le socle. Le bassin de la MATSIATRA, à la station, a une superficie de 11 715 km² et une altitude moyenne voisine de 1 100 m.

L'échelle installée en septembre 1952 en aval du village a été complétée en octobre 1960 d'une seconde batterie dont le zéro était situé 118 cm plus bas que le précédent. Pour faciliter les mesures de débit en hautes eaux, une seconde station a été installée et suivie de novembre 1953 à août 1956 près du village de BEDRAY à 40 km en aval. La station, difficilement accessible, a été abandonnée en 1963.

Le nombre de mesures de débit est faible (4 jaugeages entre 25 et 84 m3/s à MALANKIALINA et 9 mesures aux flotteurs entre 40 et 3 300 m³/s à BEDRAY). L'étalonnage est donc sommaire mais heureusement la station est stable en basses eaux.

L'extrapolation vers les forts débits est forte jusqu'à 6 250 m³/s. Après complètement des lacunes (juin à décembre 1954, mai à septembre 1955, 15 avril au 16 mai 1956, avril à juin 1959) d'après les hydrogrammes du MANGOKY à BANIAN, nous disposons de données hydrologiques sur la période novembre 1952 à décembre 1963. La qualité de ces données est assez moyenne et les valeurs journalières doivent être utilisées avec prudence.

La pluviométrie du bassin a été établie à partir de 15 postes pluviométriques : AMBOMIMA-MASOA (poids : .14), AMBATOMAINTY (.18), AMBOROMPOTSY (.10), MANDRO-SONORO (.09), IKALAMAVONY (.10), MANANDRAY (.07), etc. Elle a été évaluée par la méthode de THIESSEN à 1300 mm environ, valeur qui semble assez correcte.

## 3.4.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 7.37.

Matsiatra à Malakialina

| Hi, Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | 0.73 | (.50) | (.66) | .75 | .70 | (- .32) | (- .43) | .70 | (.05) | (.44) | .71 | (.25) |
| Pi-1 | (.16) | (.12) | (.02) | (.22) | (.43) | .74 | (- .02) | (- .34) | (.53) | (.10) | .63 | .80 |
| Qi-1 | (.10) | (.40) | (.58) | (.23) | (.17) | .83 | .75 | .81 | .95 | .92 | .86 | .79 |

Le graphe 7.23. représente ces relations qui à l'exception des relations $Q_i/Q_{i-1}$ de saison sèche, restent assez laches tout en respectant le schéma général des bassins des hauts plateaux : poids dominant des précipitations

du mois en saison des pluies (novembre à mars) et influence principale des débits antérieurs en saison sèche avec influence secondaire des précipitations du mois en juin, et août à octobre.

figure 7.23.

Matsiatra à Malakialina

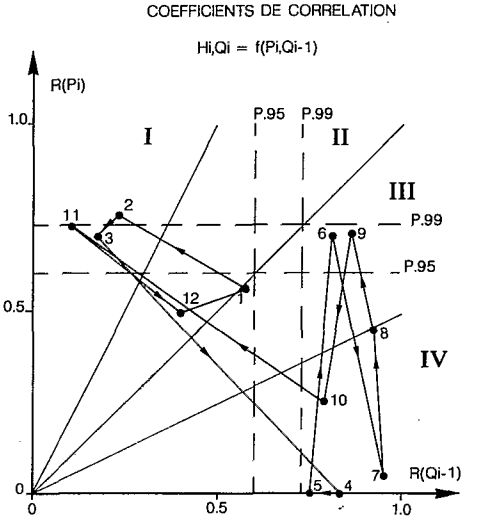



tableau 7.38.

Régressions hydropluviométriques

| | | | |
|---|---|---|---|
| H11 = | .20 | P11 - 2.7 | ($R^2$= .53 P > .95) |
| Q12 = | 1.19 | P12 + 1.62 Q11 - 101 | ($R^2$= .48 P > .95) |
| H01 = | 3.14 | P01 + 1.37 Q12 - 888 | ($R^2$= .91 P > .99) |
| H02 = | 1.04 | P02 + .46 P01 - 255 | ($R^2$= .91 P > .99) |
| H03 = | .50 | P03 + .47 P02 - 91 | ($R^2$= .71 P > .99) |
| Q04 = | .23 | Q03 + 60 | ($R^2$= .69 P > .99) |
| Q05 = | .33 | Q04 + 35 | ($R^2$= .91 P > .99) |
| Q06 = | .55 | Q05 + .61 P06 + 16 | ($R^2$= .78 P > .99) |
| Q07 = | .67 | Q06 + 13 | ($R^2$= .90 P > .99) |
| Q08 = | .89 | Q07 + .23 P08 - 2 | ($R^2$= .88 P > .99) |
| Q09 = | .70 | Q08 + .56 P09 - 4 | ($R^2$= .92 P > .99) |
| Q10 = | .37 | Q09 + .18 P10 + 14 | ($R^2$= .85 P > .99) |

Ces relations permettent de corriger le débit suspect de février 1961 (Q = 390 m³/s au lieu de 110 m³/s "observé").

On notera d'ailleurs que les débits de l'année 1960-61 apparaissent beaucoup trop faibles en regard de la pluviométrie (lectures douteuses).

tableau 7.39.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1250802015 Malakialina
Rivière : Matsiatra
Pays: Madagascar
Bassin: Mangoky
Débits en m³/s

Latitude : 20°57'00
Longitude : 45°51'07

Aire : 11 715 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1952/53 | 135. | 297. | 475. | 521. | 863. | 252. | 149. | 133. | 101. | 89.4 | 83.1 | 53.6 | 263. |
| 1953/54 | 56.3 | 261. | 801. | 1170. | 639. | 175. | 87.6 | 70.7 | 54.1 | 49.4 | 35.1 | 38.1 | 286. |
| 1954/55 | 85.9 | 448. | 985. | 185. | 241. | 173. | 101. | 91.0 | 75.1 | 72.4 | 42.7 | 30.4 | 211. |
| 1955/56 | 74.9 | 484. | 998. | 481. | 401. | 196. | 102. | 73.3 | 64.8 | 52.2 | 44.3 | 44.1 | 251. |
| 1956/57 | 57.2 | 310. | 615. | 481. | 586. | 201. | 119. | 75.4 | 64.3 | 51.7 | 46.4 | 41.4 | 221. |
| 1957/58 | 102. | 223. | 374. | 436. | 429. | 104. | 75.1 | 68.7 | 65.3 | 72.4 | 79.1 | 49.4 | 173. |
| 1958/59 | 115. | 640. | 776. | 275. | 661. | 321. | 127. | 96.0 | 80.5 | 85.1 | 59.4 | 34.8 | 273. |
| 1959/60 | 136. | 560. | 792. | 738. | 173. | 72.7 | 48.3 | 43.4 | 38.1 | 31.1 | 25.8 | 28.0 | 224. |
| 1960/61 | 24.0 | 187. | 385. | (390.) | 338. | 114. | 61.5 | 49.5 | 48.3 | 49.2 | 36.1 | 37.6 | (142.) |
| 1961/62 | 47.8 | 403. | 303. | 337. | 150. | 87.5 | 67.7 | 52.6 | 44.1 | 40.1 | 31.0 | 37.7 | 134. |
| 1962/63 | 158. | 361. | 669. | 831. | 261. | 125. | 79.8 | 97.3 | 67.8 | 53.3 | 39.0 | 34.5 | 231. |
| Moyenne | 90.2 | 380. | 652. | 531. | 431. | 166. | 92.6 | 77.4 | 64.0 | 58.8 | 47.3 | 39.1 | 232. |
| Ecart-type. | 42.6 | 143. | 243. | 282. | 230. | 65.0 | 29.0 | 25.5 | 17.9 | 18.5 | 18.8 | 7.68 | |
| Max. | 158. | 640. | 998. | 1170. | 863. | 321. | 149. | 133. | 101. | 89.4 | 83.1 | 53.6 | |
| Q1 | 135. | 484. | 801. | 738. | 639. | 201. | 119. | 96.0 | 75.1 | 72.4 | 59.4 | 44.1 | |
| Méd. | 85.9 | 361. | 669. | 481. | 401. | 173. | 87.6 | 73.3 | 64.8 | 52.2 | 42.7 | 37.7 | |
| Q3 | 56.3 | 261. | 385. | 337. | 241. | 104. | 67.7 | 52.6 | 48.3 | 49.2 | 35.1 | 34.5 | |
| Min. | 24.0 | 187. | 303. | 185. | 150. | 72.7 | 48.3 | 43.4 | 38.1 | 31.1 | 23.5 | 28.0 | |

Les débits mensuels classés (quantiles) sont représentés sur le graphe 7.24.

figure 7.24.

Matsiatra à Malakialina

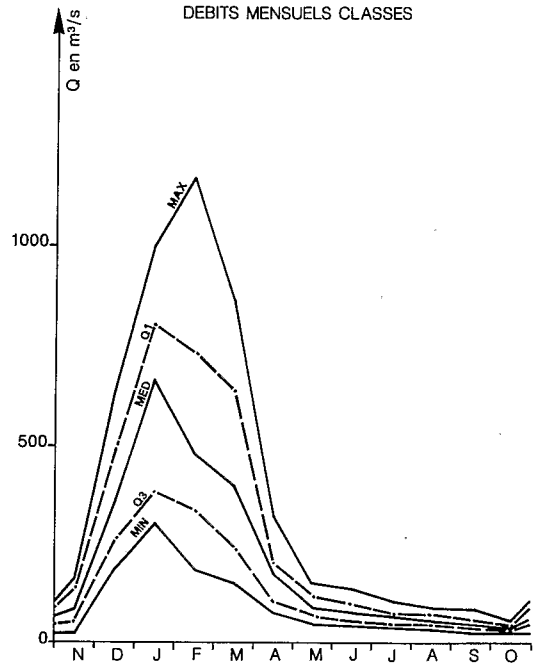
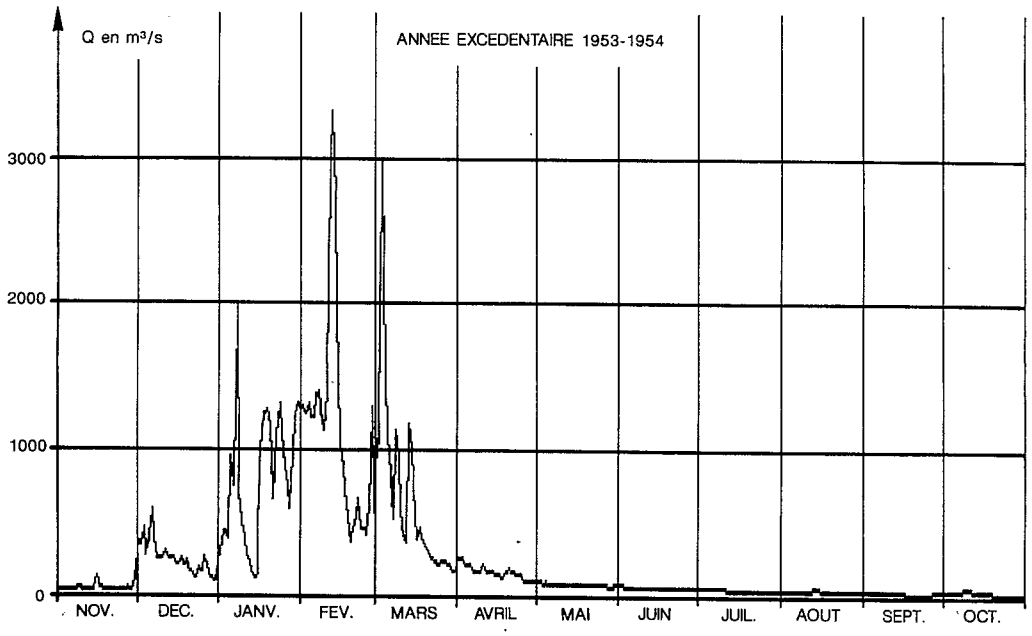



figure 7.25.

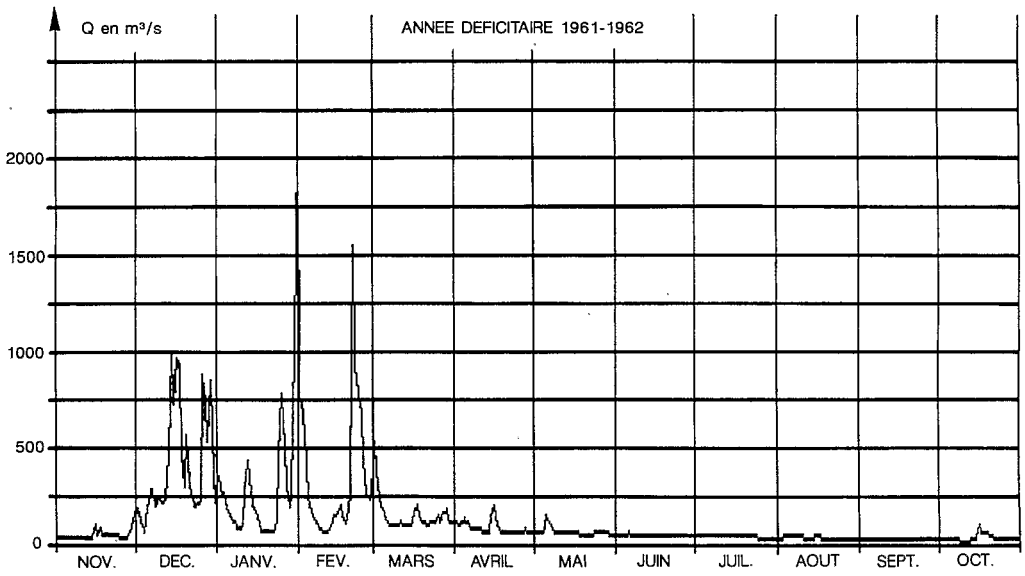
Matsiatra à Malakialina



Les hydrogrammes annuels de l'année excédentaire 1953-54 (Q = 286 m³/s) et de l'année déficitaire 1961-62 (Q = 134 m³/s) sont représentés sur les graphes 7.25 et 7.26.

figure 7.26.

Matsiatra à Malakialina




## 3.4.2. Apports annuels

La corrélation entre les lames écoulées annuelles et les précipitations correspondantes sur le bassin (échantillons 1952-1963 sans 1960-61 douteux) est assez lache ($R^2$ = .40, P # .95).

H = .85 (P - 545)

Nous avons cependant, afin d'étendre l'échantillon des valeurs annuelles, estimé les lames des années non observées de la période 1949-1970 (et corrigé l'année 1960-61).

| | 49.50 | 50.51 | 51.52 | 60.61 | 63.64 | 64.65 | 65.66 | 66.67 | 67.68 | 68.69 | 69.70 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hmm | 460 | 520 | 620 | 675 | 450 | 835 | 365 | 840 | 360 | 905 | 1030 |
| Qm³/s | 171 | 193 | 230 | 251 | 167 | 310 | 136 | 312 | 133 | 336 | 383 |

La loi de distribution de l'échantillon observé et complété (1949-1970) fournit les quantiles suivants :

tableau 7.40.

Matsiatra à Malakialina
Apports annuels

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| H mm | 360 | 418 | 470 | 608 | 770 | 867 | 954 |
| Q m³/s | 134 | 151 | 174 | 226 | 286 | 322 | 354 |
| q l/s/km² | 11.4 | 12.9 | 14.9 | 19.3 | 24.4 | 27.5 | 30.2 |

Loi log-normale (test B.M. : 1.45, echelle : 873 mm, - 265 mm, forme : . 203)
Cinquantennales sèche et humide : 310 mm (Q = 115 m³/s ) et 1060 mm (Q = 393 m³/s)

Les résultats de cette distribution doivent être considérés avec prudence, la taille de l'échantillon observé étant d'une dizaine d'années, et les valeurs les plus fortes des lames obtenues par extension à partir des précipitations. Cependant les valeurs utilisées sont assez cohérentes avec les valeurs observées (ou reconstituées) sur les sous-bassins du MANGOKY situés sur les hauts plateaux. Les regressions effectuées sur les lames annuelles présentent en effet des liaisons significatives.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| H MATSIATRA | =1.35 | H MANANTANANA | + 31 | ($R^2$ = .69 | P > 995) |
| H MATS. | = .73 | H ZOMANDAO | + 210 | ($R^2$ = .51 | P > 995) |
| H MATS. | = .93 | H IHOSY | + 313 | ($R^2$ = .55 | P > 995) |
| H MANANT | = .46 | H ZOM. | + 176 | ($R^2$ = .54 | P > 995) |
| H MANANT | = .60 | H IHOSY | + 238 | ($R^2$ = .61 | P > 995) |
| H ZOM. | = .79 | H IHOSY | + 310 | ($R^2$ = .41 | P > 995) |

## 3.4.3. Crues

L'étalonnage de hautes eaux s'appuie essentiellement sur une série de jaugeages par flotteurs réalisés en janvier-février 1954, 40 km plus aval (station de BEDRAY).

L'extrapolation de type logarithmique, que permet la nature du contrôle (rapides et chute), a été menée de 5,40 à 7,15 m (système de l'ancienne échelle).

tableau 7.41.

Matsiatra à Malakialina
Maximums annuels de crues

| Année | Q m³/s | Date | | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1952-53 | 2080 | 18/02/53 | 06 h 00 | 4,55 | 3rel |
| 1953-54 | 3600 | 03/03/54 | 16 h 00 | 5,46 | 3rel |
| 1954-55 | 1900 | 06/01/55 | 12 h 00 | 4,40 | Min |
| 1955-56 | 2590 | 08/01/56 | 00 h 00 | 4,90 | Min |
| 1956-57 | 2370 | 14/03/57 | 06 h 00 | 4,76 | 3rel |
| 1957-58 | 1490 | 25/01/58 | 06 h 00 | 4,02 | 3rel |
| 1958-59 | 6950 | 08/01/59 | 18 h 00 | 7,15 | 3rel |
| 1958-60 | 1950 | 26/12/59 | 18 h 00 | 4,44 | 3rel |
| 1960-61 | 1690 | 20/03/61 | 12 h 00 | 5,40 | 3rel |
| 1961-62 | 3860 | 31/01/62 | 12 h 00 | 6,78 | 3rel |
| 1962-63 | 4020 | 02/02/63 | 21 h 00 | 6,87 | 3rel |

Le maximum a été observé, une année sur deux, en janvier ou février (date médiane : 31 janvier).

Ajustée à l'échantillon des 11 valeurs observées du maximum annuel, une distribution de Goodrich correspond aux quantiles suivants :

tableau 7.42.

Matsiatra à Malakialina
Maximums annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 2460 | 3870 | 4970 | (7600) | (8700) |
| q l/s/km² | 210 | 330 | 425 | (650) | (740) |

En tête de bassin, la station de FANORO (47°12'30"E - 21°33'50"S) contrôle un bassin de 1 160 km².

Installée par le service des Mines en juillet 1968, cette station a été intégrée au réseau hydrologique de base en septembre 1972.

L'extrapolation de type logarithmique menée de 4,41 à 8,70 m, grâce à une mesure en hautes eaux réalisée le 18/01/70 (cyclone Geneviève), permet une évaluation des crues les plus importantes de la période 1958-1980.

| Année | Hm | Q m³/s | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1958-59 | | 670 | 9,00 m PHE Anc. éch. |
| 1968-69 | | 780 | 9,50 m PHE Anc.éch. |
| 1969-70 | | 900 | |
| 1975-76 | 7,65 | 816 | |
| 1976-77 | 8,70 | 1070 | |

La crue décennale a été évaluée à 780 m³/s (672 l/s/km²).

## 3.4.4. Basses eaux

Les tarissements sont le plus souvent perturbés par des précipitations en saison sèche mais présentent cependant une allure commune. La droite moyenne de tarissement à les caractéristiques suivantes :

$Q_o$ voisin de 85 m³/s (mai)
$\alpha$ = . 0065
TC = 107 jours

Le volume des réserves drainables est de l'ordre de 1 130.106 m³ soit une lame équivalente de 96 mm.

tableau 7.43.

Matsiatra à Malakialina
Débits caractéristiques
de basses eaux

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1953 | 81.9 | 48.0 | 38.8 | 36.7 | 25-11 |
| 1954 | 50.0 | 33.5 | 27.0 | 24.5 | 27-10 |
| 1955 | 59.4 | 30.3 | 25.4 | 24.6 | 20-10 |
| 1956 | 49.7 | 40.1 | 32.5 | 27.0 | 29-10 |
| 1957 | 54.9 | 40.3 | 33.3 | 31.3 | 10-11 |

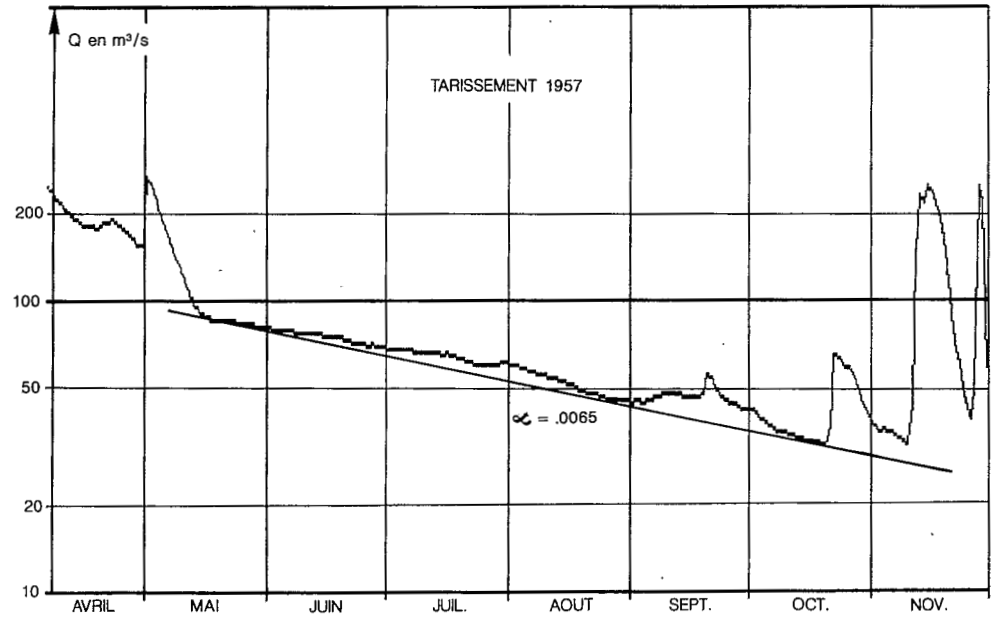
suite

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1958 | 65.0 | 45.4 | 38.8 | 34.8 | 05-12 |
| 1959 | 76.0 | 37.3 | 31.4 | 30.8 | 29-10 |
| 1960 | 29.4 | 22.3 | 19.2 | 18.2 | 02-11 |
| 1961 | 95.9 | 31.6 | 26.8 | 25.1 | 18-10 |
| 1962 | 92.6 | 31.6 | 26.4 | 24.1 | 12-10 |
| 1963 | 57.0 | 36.0 | 33.4 | 30.1 | 30-10 |

L'étiage est observé entre début octobre et début décembre, la date médiane d'observation du débit minimal étant la fin d'octobre.

figure 7.27.

Matsiatra à Malakialina




Les relation entre débits caractéristiques sont les suivantes :

DCE = 1.08 QJ MIN ($R^2$ = .94)
DC 11 = 1.29 QJ MIN ($R^2$ = .91)
DC 9 = 2.41 QJ MIN ($R^2$ = .76)

QJ MIN = 3.9 Q06 $e^{.45}$

L'échantillon de 11 valeurs du débit minimal journalier correspond aux quantiles suivants :

tableau 7.44.

Matsiatra à Malakialina
QJ Min

| | Années sèches | | Médiane | Années humides | |
|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence (ans) | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 |
| Q (m³/s) | 21.7 | 23.8 | 27.9 | 32.0 | 34.2 |
| q (l/s/km²) | 1.85 | 2.03 | 2.38 | 2.73 | 2.92 |

Loi de Gauss (test B.M. : 1.38, echelle 4.89 m³/s, position 27.9 m³/s)
Vicennales sèche et humide : 19.9 m³/s (1.7 l/s/km²) et 36 m³/s (3.1 l/s/km²)

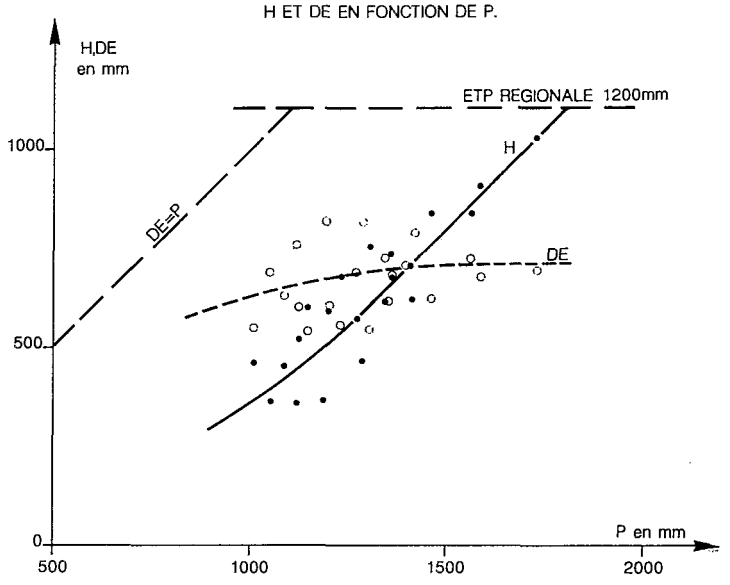
Les débits spécifiques d'étiage de la MATSIATRA sont sensiblement plus élevés que ceux observés sur les bassins voisins (environ 2 fois ceux de l'IHOSY et près de cinq fois supérieurs à ceux du ZOMANDAO supérieur et de la MANANTANANA) Cela tient à l'effet de réserves souterraines plus importantes et d'un drainage plus lent caractérisant des formations géologiques assez différentes des autres bassins (quartzites de l'ITREMO et sols ferralitiques de "savoka" sur roches acides du bassin supérieur).

## 3.4.5. Bilan hydrologique

Pour une pluviométrie moyenne interannuelle d'environ 1300 mm, la lame écoulée est de 625 mm avec un déficit d'écoulement de 675 mm (Kc = 48 %).

figure 7.28.

Matsiatra à Malakialina




Les lames écoulées et déficits d'écoulement de la période 1944-1970 sont représentées sur le graphe 7.28.

Les lames sont comprises entre 300 et 1 100 mm (pour une pluviométrie comprise entre 900 et 1 800 mm) soit des coefficients d'écoulement compris entre 30 et 60 %. La courbe moyenne tend, pour les années très humides, à être asymptotiques à une droite d'expression : H = P - 700 mm. Le déficit d'écoulement compris entre 600 et 700 mm semble plafonner à une valeur limite de 700 mm correspondant à une ETR réduite à 64 % de l'ETP régionale et évoluant peu avec la pluviométrie dès qu'elle dépasse 800 mm.

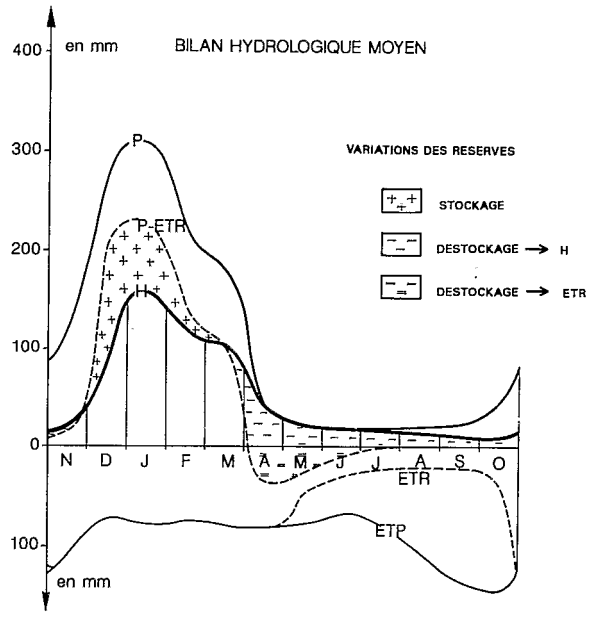
tableau 7.45.

Matsiatra à Malakialina
Bilan hydrologique (en mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 124 | 280 | 308 | 220 | 182 | 40 | 21 | 19 | 20 | 21 | 21 | 14 | 1300 |
| ETP | 110 | 72 | 78 | 74 | 80 | 78 | 77 | 66 | 80 | 107 | 136 | 142 | 1100 |
| ETR | 109 | 72 | 78 | 74 | 80 | 78 | 47 | 29 | 23 | 21 | 21 | 43 | 675 |
| P-ETR | 15 | 208 | 230 | 146 | 102 | - 38 | - 26 | - 10 | - 3 | 0 | 0 | 1 | 625 |
| H | 22 | 92 | 158 | 118 | 105 | 40 | 21 | 18 | 16 | 14 | 11 | 10 | 625 |
| ΔR+ | | 116 | 72 | 28 | | | | | | | | | + 216 |
| ΔR- | 7 | | | | 3 | 78 | 47 | 28 | 19 | 14 | 11 | 9 | - 216 |
| R | 0 | 116 | 188 | 216 | 213 | 135 | 88 | 60 | 41 | 27 | 16 | 7 | |

figure 7.29.

Matsiatra à Malakialina



Le bilan saisonnier (graphe 7.29.) montre que la saison des pluies (décembre à mars) représente 76 % des précipitations (990 mm) et 76 % des écoulements (473 mm). L'ETR égale à l'ETP est de 304 mm et les réserves stockées sont, en fin mars de 213 mm. En saison sèche (avril-novembre), les lames écoulées proviennent essentiellement du drainage des réserves (152 mm) et de façon très secondaire des précipitations de la seconde quinzaine de novembre (15 mm).

L'ETR de saison sèche est fortement réduite (294 mm soit 47 % de l'ETP de la saison. Elle est soutenue d'avril à juin par les réserves utiles du sol puis limitée aux précipitations de juillet à octobre (106 mm).

Si l'on compare ce bilan à ceux des autres sous-bassins du MANGOKY supérieur, on peut effectuer les constatations suivantes :

- débits de saison sèche plus importants (25 % de la lame annuelle contre 20 % pour les autres bassins) avec un étiage nettement plus soutenu traduisant des réserves d'altérites plus importantes que sur les autres bassins ;

- réserve utile des sols nettement plus faible que sur les autres bassins (environ les 2/3) avec pour conséquence, une réduction plus importante de l'ETR sur l'ETP qui se traduit par un plafonnement à environ 700 mm de l'ETR. Les sols squelettiques et rankers sur quartzite de l'ITREMO, sableux et plus ou moins tourbeux, sont moins propices à la culture, avec des paturages et des formations arborées très pauvres.

Le bassin de la MATSIATRA présente ainsi des coefficients d'écoulement sensiblement plus élevés que ceux des autres bassins du MANGOKY.

## 3.5. Le Mangoky au Banian

Trois stations équipées et observées entre 1951 et 1984 ont permis de connaître les débits du MANGOKY pour la quasi-totalité du bassin (50 000 et 53 900 km² pour un bassin total de 55 000 km²).

La première station a été installée à proximité du bac de VONDROVE (21°48'43"S - 44°08'32"E) sur la piste ANKAZOABO-MANZA. Installée en 1950, elle a été suivie de 1951 à 1955 en station principale puis en lectures de contrôle jusqu'à 1965 (date de l'installation d'une nouvelle échelle). 21 mesures de débit entre 70 et 2 700 m³/s ont permis un étalonnage assez sommaire de cette station en raison du faible nombre de jaugeages et de la très grande mobilité du lit sableux.

En raison de ces difficultés, la seconde station a été installée, à 7 km en amont, dans une section rétrécie et rectiligne, au BANIAN (21° 48' 43"5 - 44° 12' 25" E). Cette station a été suivie de novembre 1953 à octobre 1965.

En dépit du choix d'une section supposée plus stable, l'étalonnage de cette station a été laborieux en raison d'une grande mobilité du lit mineur sableux, des nombreux déplacements des échelles de contrôle devant permettre une meilleure appréciation des hauteurs limnimétriques et des vitesses très élevées du courant lors des crues. 647 mesures de débit ont été effectuées à cette station entre 15 et 14 180 m³/s (jaugeage aux flotteurs).

L'installation d'un téléphérique en févier 1959 a permis d'effectuer un jaugeage au moulinet pour 4 160 m³/s (cote maximale jaugée en raison de l'absence de crues majeures entre 1959 et 1965).

En basse eaux, les déplacements des bancs de sables nécessitent le tracé de plusieurs courbes d'étalonnage par an, plus ou moins précises selon le nombre de jaugeages effectués.

En hautes eaux, l'extrapolation est forte jusqu'à 32 000 m³/s, valeur estimée du maximum atteint par la crue du 18 janvier 1970 (BILLON, 1970).

La troisième station, mise en place en fin avril 1961, a été installée près du bac de BEVOAY (21°50'S - 43°52'E), en aval de VONDROVE. Cette station contrôle un bassin de 53 810 km² (contre 50 000 km² pour le BANIAN). En saison sèche, on peut considérer que les apports sur le bassin intermédiaire sont pratiquement nuls et restent faibles en saison des pluies. Les volumes annuels écoulés aux deux stations sont sensiblement les mêmes mais en crue, l'étalement de l'onde entre la station du BANIAN, dans les gorges, et celle de BEVOAY, beaucoup plus large, aboutit à une atténuation de la forme des crues.

L'échelle installée en 1961 a été plusieurs fois restaurée et doublée d'un limnigraphe en 1967, posé près de la prise d'eau du canal de la SAMANGOKY.

L'étalonnage s'appuie sur 33 mesures de débit (entre 59,6 et 765 m³/s) effectuées en 1964-70 et 1981-83, ainsi que sur 164 mesures de débit effectuées sur le site d'AMBOHIMENAFIFY (à 6 km en aval de BEVOAY) entre 1963 et 1966 (jusqu'à 4 200 m³/s) et, par correspondance, sur l'étalonnage du BANIAN. L'étalonnage reste assez sommaire et fournit des débits journaliers de moins bonne qualité que sur le BANIAN.

La pluviométrie moyenne sur le bassin est assez correctement estimée à partir de 35 postes pluviométriques. Elle est de l'ordre de 1 000 mm en moyenne interannuelle.

## 3.5.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 7.46.

Mangoky au Banian
Coefficients de corrélation

| Hi, Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .84 | .74 | .79 | .84 | .79 | (.37) | .46 | .54 | (-.18) | .50 | .72 | .70 |
| Pi - 1 | (.36) | (.21) | (.27) | (.38) | (.36) | .72 | .57 | (.40) | .53 | (.28) | .61 | .63 |
| Qi - 1 | (.14) | .43 | (.15) | (.11) | (.27) | .69 | .72 | .88 | .94 | .87 | .80 | .53 |

Le graphe 7.30 représente la position des coefficients de corrélation relatifs aux différents mois. L'influence prioritaire des précipitations du mois (principalement sur le haut bassin) est bien établie pour la saison des pluies (décembre - mars) avec une influence encore notable des précipitations du mois, mais un poids prioritaire des débits antérieurs pour la saison sèche (avril - septembre).

figure 7.30.

Mangoky au Banian

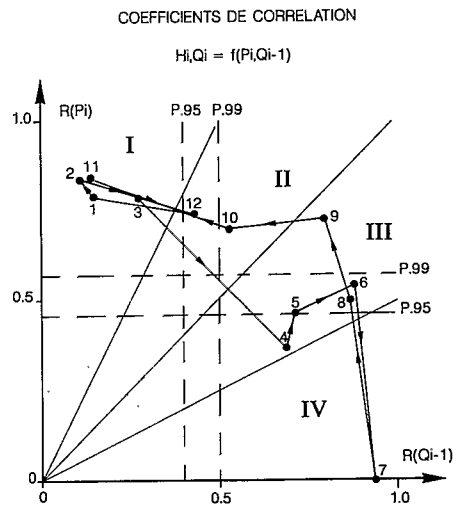



tableau 7.47.

Mangoky au Banian
Régressions hydropluviométriques mensuelles

| | | |
|---|---|---|
| H11 = .14 | P11 + .05 P10 - 5 | ($R^2$ = .75 P>.995) |
| Q12 = 5.53 | P12 + 1.55 Q11 - 757 | ($R^2$ = .72P>.995) |
| H01 = .41 | P01 - 23.5 | ($R^2$ = .62 P>99) |
| H02 = .42 | P02 + .11 P01 - 44 | ($R^2$ = .83 P>995) |
| H03 = .32 | P03 + .28 P02 - 40 | ($R^2$ = .87 P>.995) |
| H04 = .11 | P03 + .27 P04 -1 | ($R^2$ = .68 P>.995) |
| Q05 = .24 | Q04+ 1.9 P05 + 91 | ($R^2$ = .61 P>.995) |
| Q06 = .62 | Q05+ 43.6 | ($R^2$ = .77 P>.99) |
| Q07 = .77 | Q06+ 14.3 | ($R^2$ = 88 P>.995) |
| Q08 = .64 | Q07+ 1.52 P08 + 16 | ($R^2$ = .86 P>.995) |
| Q09 = .78 | Q08+ 1.3 P09 - 16 | ($R^2$ = .86 P>.995) |
| Q10 = 1.09 | P10 + .58 Q09 - 6 | ($R^2$ = .87 P>.995) |

Le tableau 7.48 rassemble les valeurs mensuelles des débits de MANGOKY au BANIAN (VONDROVE pour 1951-52 et 1952-53) de 1951-52 à 1964-65.

Le tableau 7.49 rassemble les débits mensuels du MANGOKY à BEVOAY de 1960-61 à 1975-76 ainsi que de 1981-82 et 1982-83.

La corrélation entre les débits mensuels du MANGOKY au BANIAN et à BEVOAY est excellente ($R^2$ = .98 pour 46 valeurs concomitantes de la période 1960-1965)

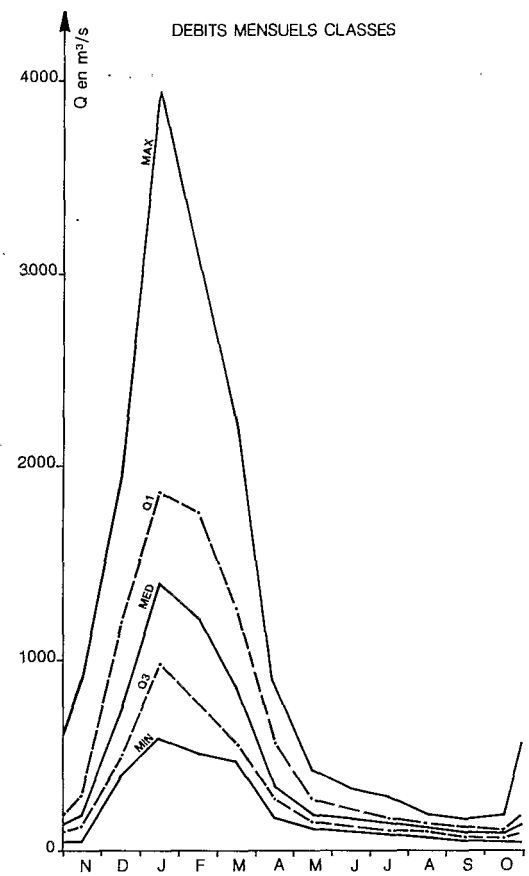
Q BANIAN = .944 Q BEVOAY + 25.9

La relation a permis d'évaluer les débits mensuels au BANIAN pour la période 1965-66 à 1975-76, 1981-82 et 1982-83 (tableau 7.50). Les valeurs non observées de décembre à février 1967-68 et de février et mars 1969 ont été estimées d'après les régressions du tableau 7.47.

Les valeurs mensuelles moyennes, écart-type et débits mensuels classés ont ainsi pu être établis de 1951 à 1976, 1981 à 1983, tableau 7.50 et graphe 7.31).

figure 7.31.

Mangoky au Banian



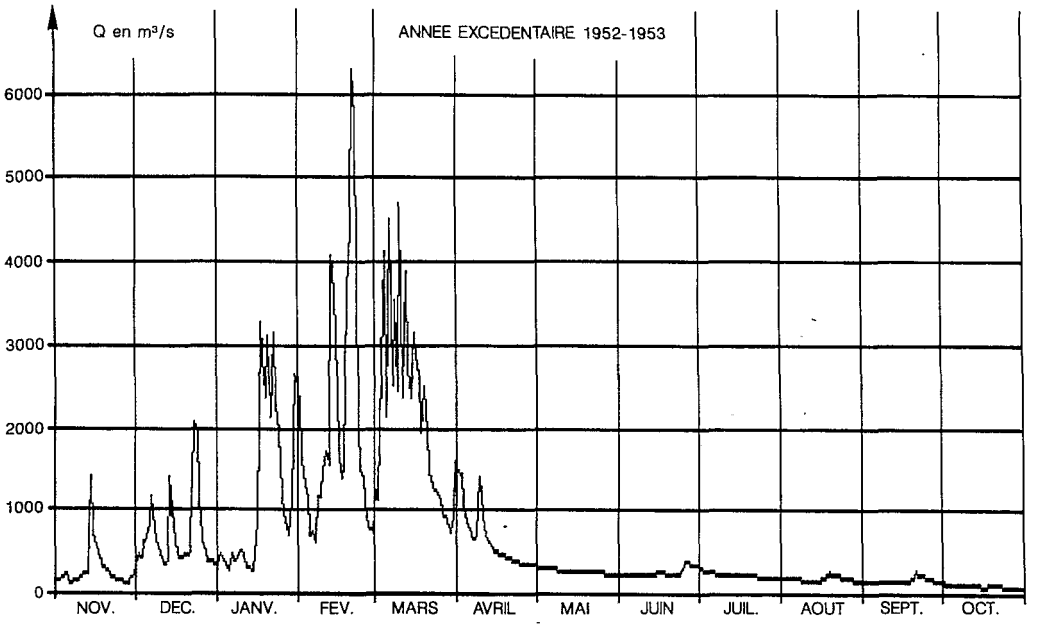



figure 7.32.
Mangoky au Banian

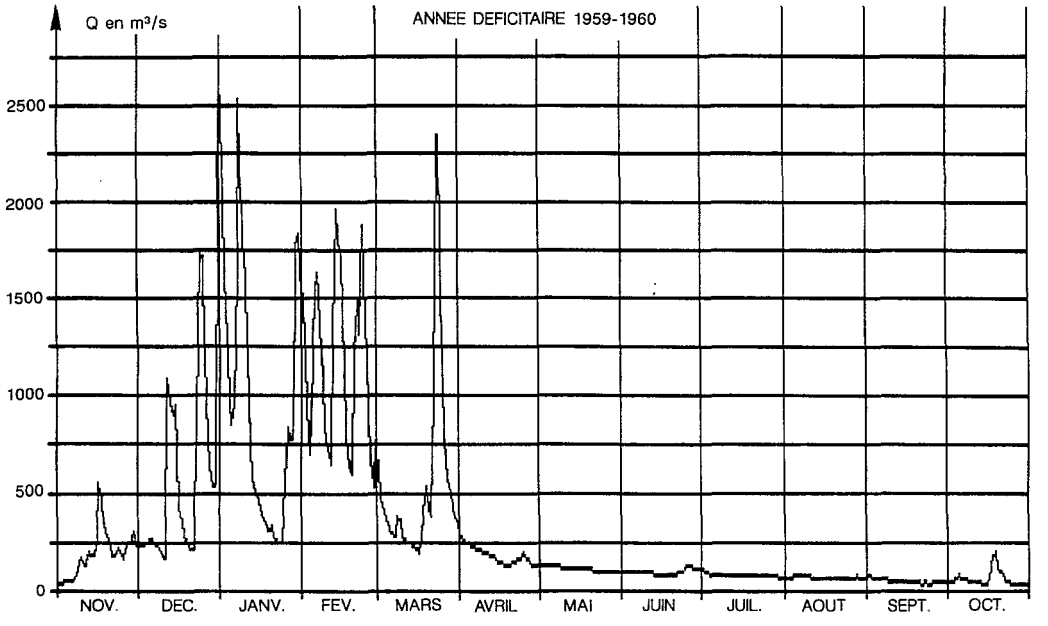



figure 7.33.
Mangoky au Banian

tableau 7.48.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1250800105 Banian
Rivière : Mangoky
Pays: Madagascar
Bassin: Mangoky
Débits en m³/s

Latitude : 21°49'00
Longitude : 44°15'00

Aire : 50 000 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1951/52 | 192. | 487. | 1750. | 955. | 1490. | 885. | 271. | 249. | 173. | 122. | 111. | 102. | 566. |
| 1952/53 | 281. | 683. | 1290. | 2010. | 2190. | 640. | 276. | 268. | 233. | 194. | 172. | 105. | 688. |
| 1953/54 | 82.1 | 934. | 1870. | 2120. | 1450. | 437. | 236. | 215. | 180. | 129. | 78.0 | 64.6 | 642. |
| 1954/55 | 187. | 755. | 2260. | 510. | 534. | 276. | 165. | 146. | 121. | 111. | 68.0 | 50.0 | 434. |
| 1955/56 | 119. | 731. | 2340. | 765. | 682. | 254. | 164. | 138. | 126. | 107. | 73.1 | 70.8 | 466. |
| 1956/57 | 109. | 467. | 1080. | 714. | 1020. | 334. | 166. | 119. | 111. | 87.3 | 67.4 | 69.3 | 361. |
| 1957/58 | 81.3 | 393. | 780. | 1070. | 850. | 245. | 156. | 150. | 147. | 140. | 138. | 100. | 351. |
| 1958/59 | 151. | 1390. | 1680. | 535. | 980. | 584. | 213. | 134. | 112. | 85.9 | 62.8 | 54.0 | 501. |
| 1959/60 | 186. | 537. | 999. | 1160. | 547. | 183. | 115. | 100. | 86.0 | 73.0 | 52.2 | 61.8 | 340. |
| 1960/61 | 47.2 | 590. | 2070. | 720. | 869. | 323. | 151. | 117. | 113. | 111. | 66.4 | 53.6 | 437. |
| 1961/62 | 111. | 1470. | 754. | 1120. | 513. | 283. | 193. | 124. | 93.0 | 79.8 | 56.1 | 105. | 406. |
| 1962/63 | 341. | 871. | 1530. | 1630. | 678. | 250. | 181. | 201. | 146. | 105. | 71.1 | 53.2 | 499. |
| 1963/64 | 358. | 1180. | 992. | 1190. | 500. | 178. | 123. | 128. | 107. | 134. | 81.2 | 78.8 | 419. |
| 1964/65 | 249. | 829. | 1550. | 1230. | 618. | 354. | 158. | 131. | 139. | 165. | 158. | 149. | 474. |

* Nota : 1951-1952, observations effectuées à la station de Vondrove.

tableau 7.49.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1250800115 Bevoay
Rivière : Mangoky
Pays: Madagascar
Bassin: Mangoky
Débits en m³/s

Aire : 55810.0 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1960/61 | - | - | - | - | - | - | 157. | 99.0 | 89.7 | 100. | 82.8 | 68.3 | - |
| 1961/62 | 118. | 1410. | 867. | 1140. | 406. | 137. | 112. | 63.7 | 63.2 | 64.9 | 49.0 | 122. | 379. |
| 1962/63 | 404. | 1190. | 1640. | 1690. | - | - | 161. | - | - | - | - | - | - |
| 1963/64 | - | 1310. | 872. | 1160. | 390. | 106. | 77.5 | 85.9 | 75.4 | 111. | 60.7 | 62.7 | - |
| 1964/65 | 235. | 898. | 1520. | 1190. | 653. | 417. | 178. | 140. | 162. | 200. | 156. | 146. | 491. |
| 1965/66 | 116. | 914. | 1010. | 810. | 511. | 406. | 333. | 195. | 153. | 117. | 133. | 80.2 | 398. |
| 1966/67 | 175. | 670. | 1490. | 629. | 1730. | 658. | 256. | 179. | 159. | 99.3 | 105. | 176. | 527. |
| 1967/68 | 266. | - | - | - | 476. | 224. | 169. | 207. | 136. | 115. | 72.0 | 56.8 | - |
| 1968/69 | 85.3 | 499. | 1850. | - | - | 600. | 374. | 233. | 158. | 149. | 95.7 | 58.2 | - |
| 1969/70 | 130. | 1270. | 4160. | 1980. | 887. | 316. | 244. | 207. | 180. | 141. | 111. | 81.0 | 809. |
| 1970/71 | 508. | 405. | 1050. | 1850. | 1050. | 297. | 107. | 92.0 | 79.4 | 64.9 | 60.8 | 59.1 | 469. |
| 1971/72 | 250. | 1040. | 762. | 2020. | 1310. | 491. | 230. | 167. | 113. | 92.0 | 63.1 | 149. | 557. |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1972/73 | 123. | 421. | 1200. | 1490. | - | - | - | 158. | 149. | 132. | 95.3 | 75.6 | - |
| 1973/74 | 931. | 2040. | 1450. | 1720. | 894. | 575. | 437. | 321. | 274. | 183. | 106. | 69.5 | 750. |
| 1974/75 | 239. | 1740. | 2410. | 2720. | 967. | 284. | 162. | 129. | 110. | 88.2 | 65.8 | 68.3 | 749. |
| 1975/76 | 316. | 1220. | 682. | 1580. | 1070. | 821. | 352. | 256. | 236. | 175. | 96.8 | 137. | 579. |
| 1976/77 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1981/82 | 273. | 447. | 3510. | 1420. | 2110. | 857 | 241. | 180. | 175. | 137. | 106. | 138. | 783. |
| 1982/83 | 289. | 418. | 818. | 1740. | 571. | 337. | 142. | 130. | 116. | 96.6 | 78.2 | 108. | 395. |
| 1983/84 | 206. | 1500. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

tableau 7.50.

Mangoky au Banian
Débits mensuels d'après Bevoay

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1965/66 | 165. | 889. | 979. | 790. | 508. | 409. | 340. | 210. | 170. | 136. | 151. | 102. | 400. |
| 1966/67 | 191. | 658. | 1430. | 620. | 1660. | 647. | 268. | 195. | 176. | 120. | 125. | 192. | 525. |
| 1967/68 | 277. | (497.) | (592.) | (1110.) | 475. | 237. | 185. | 221. | 154. | 134. | 93.9 | 79.5 | (335.) |
| 1968/69 | 106. | 497. | 1770. | (2840.) | (1840.) | 592. | 379. | 246. | 175. | 167. | 116. | 80.8 | (722.) |
| 1969/70 | 149. | 1220. | 3950. | 1900. | 863. | 324. | 256. | 221. | 196. | 159. | 131. | 102. | 787. |
| 1970/71 | 505. | 408. | 1020. | 1770. | 1020. | 306. | 127. | 113. | 101. | 87.2 | 83.3 | 81.7 | 460. |
| 1971/72 | 262. | 1010. | 745. | 1930. | 1260. | 489. | 243. | 184. | 133. | 113. | 85.5 | 167. | 548. |
| 1972/73 | 142. | 423. | 1160. | 1430. | - | - | - | 175. | 167. | 151. | 116. | 97.3 | |
| 1973/74 | 905. | 1950. | 1390. | 1650. | 870. | 569. | 438. | 329. | 285. | 199. | 126. | 91.5 | 729. |
| 1974/75 | 252. | 1670. | 2300. | 2590. | 939. | 294. | 179. | 148. | 130. | 109. | 88.0 | 90.4 | 723. |
| 1975/76 | 324. | 1180. | 670. | 1520. | 1040. | 801. | 358. | 268. | 249. | 191. | 117. | 155. | 570. |
| 1981/82 | 284. | 448. | 3340. | 1370. | 2020. | 646. | 253. | 196. | 191. | 155. | 126. | 156. | 765. |
| 1982/83 | 299. | 420. | 798. | 1670. | 565. | 344. | 160. | 149. | 135. | 117. | 99.7 | 129. | 399. |
| 1983/84 | 220. | 1440. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 234. | 858. | 1520. | 1370. | 999. | 419. | 221. | 181. | 154. | 129. | 101. | 97.8 | 521. |
| Ecart-type | 167. | 431. | 807. | 610. | 496. | 194. | 84.2 | 58.2 | 48.1 | 34.8 | 33.0 | 38.0 | - |
| Max. | 905. | 1950. | 3950. | 2840. | 2190. | 885. | 438. | 329. | 285. | 199. | 172. | 192. | - |
| Q1 | 283. | 1180. | 1870. | 1770. | 1260. | 584. | 268. | 221. | 176. | 155. | 126. | 105. | - |
| Méd. | 192. | 743. | 1390. | 1230. | 870. | 339. | 189. | 175. | 146. | 122. | 93.9 | 91.5 | - |
| Q3 | 127. | 492. | 979. | 790. | 565. | 276. | 160. | 131. | 113. | 107. | 71.1 | 69.3 | - |
| Min. | 47.2 | 393. | 592. | 510. | 475. | 178. | 115. | 100. | 86.0 | 73.0 | 52.2 | 50.0 | - |

*Nota : moyenne, écart-type et débits mensuels classés sur la période 1951-1984.

## 3.5.2. Apports annuels

Entre les lames écoulées annuelles et les précipitations annuelles sur le bassin, la régression

$H = .54\ (P-435)$ $(R^2 = .70$ $P>.995)$

peut être améliorée en prenant compte, le coefficient Cp de concentration des précipitations mensuelles
Cp moy. = .345

$H = .52\ (P- 885\ (1-1.5\ Cp\ ))$ $(R^2 = .81$ $P>.995)$

Sur le bassin du MANGOKY, l'influence interannuelle du volume des réserves antérieures peut-être mise en évidence (facteur secondaire : précipitation annuelle Pi-1 ou débit mensuel d'octobre Q10)

$H = .55\ \{Pi + .25\ Pi - 1 - 1120\ (1 - 1.1\ Cp)\}$ $(R^2 = .85)$
$H = .54\ \{Pi + Q10 - 1060\ (1 - 1.5\ Cp)\}$ $(R^2 = .85)$

Après avoir évalué, à partir des précipitations sur le bassin, les apports de 1949-50 et 1950-51 :

1949-1950 H = 225 mm Q = 357 m³/s
1950-1951 H = 160 mm Q = 254 m³/s

nous disposons d'un échantillon de 28 valeurs annuelles dont les quantiles, après ajustement d'une loi de distribution, sont les suivants :

tableau 7.51.
Mangoky au Banian
Apports annuels

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| H mm | 170 | 192 | 214 | 243 | 309 | 393 | 444 | 492 | 552 |
| Q m³/s | 269 | 304 | 339 | 385 | 490 | 623 | 703 | 780 | 875 |
| q l/s/km² | 5.4 | 6.1 | 6.8 | 7.7 | 9.8 | 12.5 | 14.0 | 15.6 | 17.5 |

Loi log-normale (test B.M : 2.62, échelle : 325 mm, position - 16 mm, forme : 0.27
Centennales sèche et humide : 157 mm (249 m³/s) et 595 mm ( 943 m³/s)

## 3.5.3. Crues

### 3.5.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

Préférée à une section plus large sur VONDROVE, la station du BANIAN (8 km amont VONDROVE) s'est rapidement révélée des plus instables (fond du lit extrêmement mobile).

Malgré un nombre important de jaugeages, seul un étalonnage moyen, s'appuyant sur les mesures (par flotteurs) de 1956 et l'extrapolation des courbes des vitesses moyennes de surface et des sections mouillées en fonction de la hauteur, a été adopté pour la traduction des hautes eaux.

tableau 7.52.

Mangoky au Banian
Maximums annuels
de crues

| Année | Q m3/s | Date | Hm* | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1950-51 | 6460 | | | 4,20 Aval |
| 1951-52 | 6460 | 20/02/53 | | 4,20 Aval |
| 1952-53 | 15700 | 20/02/53 | | 5,00 Aval |
| 1953-54 | 18300 | 12/02/54 | | 5,21 Aval |
| 1954-55 | 7120 | 14/01/55 | | 4,26 |
| 1955-56 | 13600 | 09/01/56 18h00 | 6,46 | PHE |
| 1956-57 | 6500 | 15/03/57 20h00 | 4,78 | Lim |
| 1957-58 | 4060 | 11/02/58 06h00 | 4,85 | Lim |
| 1958-59 | 9560 | 08/01/59 18h00 | 5,81 | Lim |
| 1959-60 | 4700 | 01/01/60 22h00 | 5,00 | PHE |
| 1960-61 | 10700 | 09/01/61 06h00 | 6,00 | Lim |
| 1961-62 | 6020 | 30/12/61 12h00 | 5,22 | Lim |
| 1962-63 | 9260 | 31/03/63 20h00 | 5,76 | PHE |
| 1963-64 | 9500 | 13/01/64 06h00 | 5,80 | Lim |
| 1964-65 | 6200 | 26/01/65 12h00 | 5,25 | Lim |
| 1965-66 | 2770 | 13/12/65 | | 3,68 Aval |
| 1966-67 | 8220 | 07/01/67 | | 4,36 Aval |
| 1967-68 | 4450 | 05/03/68 | | 4,01 Aval |
| 1968-69 | 22000 | 07/02/69 | 7,70 | PHE |
| 1969-70 | 32000 | 17/01/70 | 9,10 | PHE |
| 1970-71 | (7300) | 18/02/71 | | |
| 1971-72 | 10900 | 24/12/71 | 6,30 | PHE |
| 1972-73 | (8900) | 13/01/73 | | |
| 1973-74 | (10200) | 31/12/73 | | |
| 1974-75 | (9300) | 20/01/75 | | |
| 1975-76 | (9400) | 29/02/76 | | |

* Échelle et limnigraphe rive gauche/ Base calée à 71,42 NGM.

## 3.5.3.2. Échantillon des crues et enquête historique

Les corrélations entre les maximums de crue relevés au BANIAN et aux stations plus aval de VONDROVE et de BEVOAY s'avérant très satisfaisantes, l'échantillon de crue a été complété par les données acquises aux deux autres stations (1950-1955 et 1965-1968 avec VONDROVE et 1970-76 avec BEVOAY).

En l'absence de renseignements dans le delta du MANGOKY, l'enquête menée en 1970 s'est poursuivie en amont des gorges, entre BEROROHA et IHAVIRY où depuis 1930, une crue (1945-46) aux PHE légèrement inférieures à celles du cyclone Jane (1969-70) a été signalée.

## 3.5.3.3. Le Mangoky à Bevoay : mesure des crues maximales

L'étalonnage de moyennes et de hautes eaux s'appuient sur les jaugeages de 1972, réalisés en aval de la prise de BEVOAY (station de pompage de TANANDAVA).

Au-delà de la cote 3,00 une courbe moyenne de hautes eaux a été admise, la corrélation établie entre les hauteurs de crue relevées aux stations du BANIAN et de BEVOAY permettant son extrapolation jusqu'à la cote 6,90 m.

tableau 7.52 (bis)

Mangoky à Bevoay
Maximums annuels
de crues

| Année | Q m3/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1961-62 | 4420 | 28/12/60 06H00 | 3,93 | 3rel |
| 1962-63 | 3920 | 01/02/63 06H00 | 3,80 | 3rel |
| 1963-64 | 4110 | 13/01/64 06h00 | 3,85 | 3rel |
| 1964-65 | 4920 | 26/01/65 12h00 | 4,06 | 3rel |
| 1965-66 | 2550 | 13/12/65 12h00 | 3,19 | 3rel |
| 1966-67 | 5120 | 07/01/67 18h00 | 4,10 | 3rel |
| 1967-68 | 1550 | 05/03/68 12h00 | 2,74 | Lim |
| 1968-69 | 20600 | 07/02/69 13h00 | 5,90 | PHE |
| 1969-70 | 30200 | 18/01/70 00h00 | 6,90 | PHE |
| 1970-71 | 4760 | 18/02/71 12h00 | 4,01 | Lim |
| 1971-72 | 8590 | 24/12/71 11h00 | 4,66 | Lim |
| 1972-73 | 6350 | 13/01/73 06h00 | 4,33 | Lim |
| 1973-74 | 7710 | 31/12/73 18h00 | 4,53 | 3rel |
| 1974-75 | 6810 | 20/01/75 06h00 | 4,40 | 3rel |
| 1975-76 | 6880 | 29/02/76 18h00 | 4,41 | 3rel |
| 1976-77 | | | | |
| 1977-78 | | | | |
| 1978-79 | | | | |
| 1979-80 | | | | |
| 1980-81 | | | | |
| 1981-82 | 8190 | 05/01/82 18h00 | 4,60 | 3rel |
| 1982-83 | 7640 | 17/02/83 06h00 | 4,52 | 3rel |
| 1983-84 | 4240 | 14/12/83 15h00 | 3,88 | Min |

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 7 janvier et le 12 février (date médiane : 15 janvier - dates extrêmes : 13 décembre et 15 mars).

L'ajustement d'une distribution de FRECHET à l'échantillon du 26 crues observées ou estimées au BANIAN correspond aux quantiles suivants :

tableau 7.53.

Mangoky au Banian
Maximums annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 8410 | 13100 | 16900 | 27800 | (34000) |
| q l/s/$km^2$ | 168 | 262 | 338 | 556 | (680) |

## 3.5.4. Basses eaux

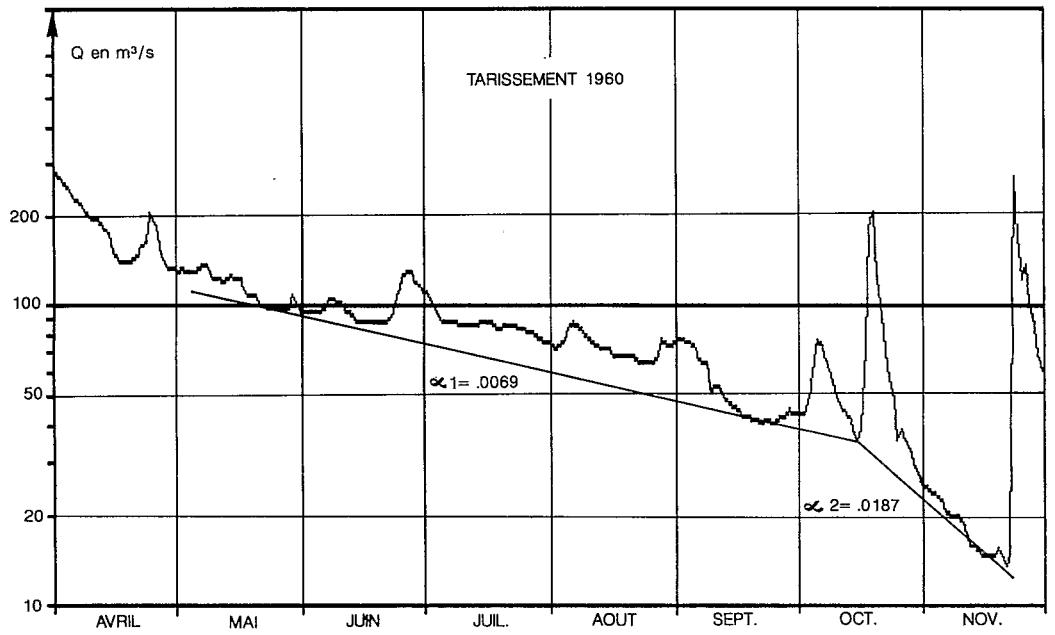



figure 7.34.
Mangoky
au Banlan

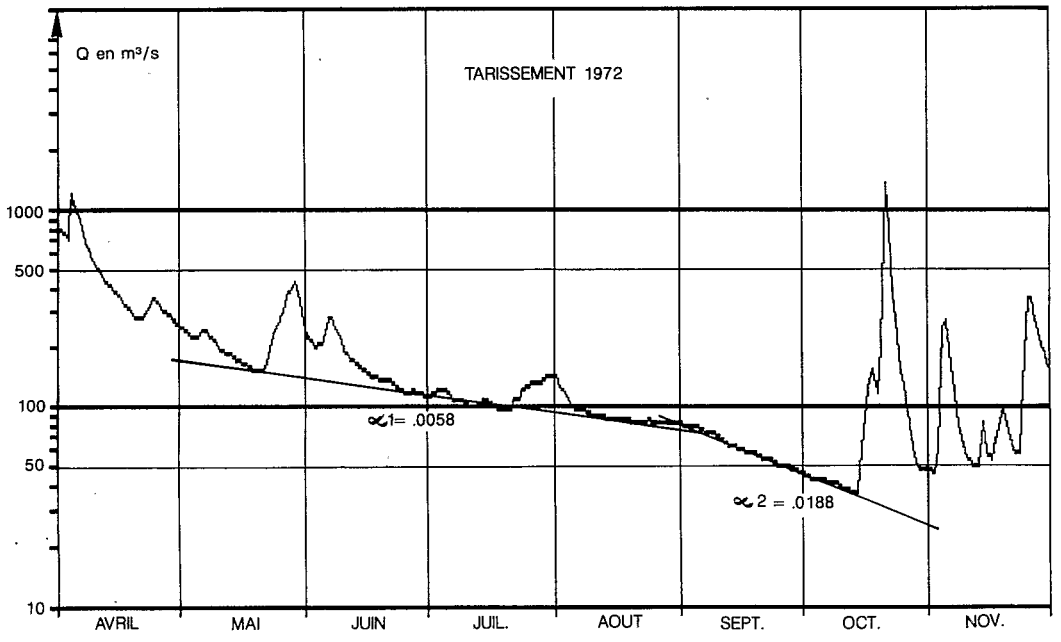



figure 7.35.
Mangoky
à Bevoay

Ainsi que le montrent les graphes 7.34 et 7.35, on observe, aussi bien à la station du BANIAN qu'à BEVOAY et ceci, 3 années sur 4, deux décroissances exponentielles des débits.

Le premier tarissement correspond à un débit de base initial voisin de 180 m³/s, observé en général pendant le mois de mai, et une droite de tarissement de pente $\alpha$ 1 = .0063 (Tc = 110 jours). Le second, à un débit initial voisin de 100 m³/s, observé entre la mi-août et la fin octobre, et un tarissement plus rapide de pente $\alpha$ 2 = .019 (Tc = 36 jours).

Les réserves ainsi drainées correspondent en année moyenne, à un stock de $1550.10^6$ m³ (lame équivalente : 31 mm).

Les débits minimaux journaliers observés de 1952 à 1964 sur la station du BANIAN, de 1965 à 1976, 1982 et 1983 à BEVOAY sont présentés dans les tableaux 7.54 et 7.55.

tableau 7.54.

Mangoky au Banian
Débits caractéristiques de basses eaux (m³/s)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1952 | 142. | 102. | 88. | 66. | 31-10 |
| 1953 | 175. | 90. | 64. | 50. | 9-11 |
| 1954 | 186. | 65. | 40. | 36. | 31-10 |
| 1955 | 105. | 45. | 31. | 25. | 11-11 |
| 1956 | 96. | 67. | 60. | 47. | 31-10 |
| 1957 | 90.5 | 59. | 49. | 40. | 19-10 |
| 1958 | 132. | 99. | 87. | 65. | 15-11 |
| 1959 | 95. | 60.5 | 45. | 40. | 28-10 |
| 1960 | 71. | 39. | 16. | 13.5 | 21-11 |
| 1961 | 105. | 49. | 43. | 38. | 22-10 |
| 1962 | 92. | 60. | 42. | 39. | 30-09 |
| 1963 | 120. | 59.5 | 51. | 43. | 31-10 |
| 1964 | 110. | 73. | 56.5 | 42. | 31-10 |

tableau 7.55.

Mangoky au Bevoay
(en m³/s)

| QJmin | Date | QJmin | Date |
|---|---|---|---|
| 75.6 | 27-11-65 | 37.0 | 13-10-72 |
| 55.5 | 23-10-65 | 54.6 | 18-10-73 |
| 42.8 | 11-10-67 | 44.3 | 23-10-74 |
| 37.9 | 19-11-68 | 46.1 | 28-10-75 |
| 31.4 | 06-11-69 | 56.2 | 19-10-76 |
| 57.2 | 03-11-70 | 83.8 | 18-10-82 |
| 40.1 | 08-10-71 | 51.6 | 17-10-83 |

Sur la période commune 1960-1965, on observe une bonne correspondance de date entre les débits minimaux aux deux stations.

La relation entre les jaugeages (J) effectués en basses eaux à BEVOAY et les débits minimaux journaliers (QJ) du MANGOKY du BANIAN est de bonne qualité.

QJ BANIAN = 1.06 J BEVOAY - 1.9 ($R^2$ = .71 P> .995)

Cette relation permet d'estimer les débits minimaux journaliers des années 1965 à 1983 à la station du BANIAN et de constituer un échantillon de 27 valeurs minimales annuelles.

tableau 7.56.

Mangoky au Banian
QJ Min (en m³/s)

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q m³/s | 24 | 29 | 34 | 46 | 59 | 67 | 73 |
| q l/s/km² | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.9 | 1.2 | 1.3 | 1.5 |

Loi log-normale (test B.M. : 4,95, échelle : 116 m³/s, portion : - 70 m³/s, forme : .128)

Cinquantennales sèche et humide : 19 m³/s (0.4 l/s/km²)

Les relations entre les différents débits spécifiques sont les suivantes :

DCE = 1.4 QJ MIN - 7.5 ($R^2$ = .97)
DCE = 1.3 QJ MIN +12.6 ($R^2$ = .86)
DCE = 1.26 QJ MIN + 60 ($R^2$ = .43)

Le débit minimal journalier est assez bien déterminé à partir du débit mensuel de septembre et de la date d'apparition du débit minimal (T compte en jours calendaires)

$QJ\ min = 8.2\ Q09^{.75} * e^{(-T/167)}$ ($R^2$ = .53)
(P>.995)

L'étiage se produit généralement (une année sur deux) entre le 11 et le 31 octobre.

## 3.5.5. Bilan hydrologique

La précipitation annuelle moyenne sur le bassin est voisine de 1 000 mm (moyenne interannuelle 1949-1970 : 994 mm).

Avec une lame moyenne interannuelle de 330 mm (médiane : 509 mm), le déficit moyen d'écoulement est de 670 mm (Ke = 33 %)

Le graphe 7.36 représente les variations de la lame écoulée et du déficit d'écoulement DE en fonction de la précipitation P. Avec une certaine dispersion due à la non prise en compte dans ce graphe de l'influence de la concentration des pluies mensuelles et du report interannuel des réserves, les points représentatifs de H et DE s'organisent autour de deux courbes.

H est compris entre 160 mm (Ke = 23 % ) et 500 mm (Ke = 38 %) dans l'intervalle des précipitations observées sur le bassin (700 à 1300 mm). Le déficit d'écoulement est compris entre 550 et 800 mm environ (en conditions moyennes) ; moins de 880 mm pour une année (66-67) à concentration des pluies mensuelles inférieure à la

moyenne et précédée d'une année déficitaire (quinquennale sèche). En croissant,la courbe DE s'infléchit vers l'asymptote DEMAX # 850 mm, nettement inférieure à l'ETP régionale voisine de 1 200 mm. C'est la conséquence d'une pluviométrie plus réduite sur le bassin inférieur du MANGOKY (900 à 600 mm vers le BANIAN) avec des précipitations faibles en saison sèche réduisant l'ETP.

figure 7.36.

Mangoky au Banian

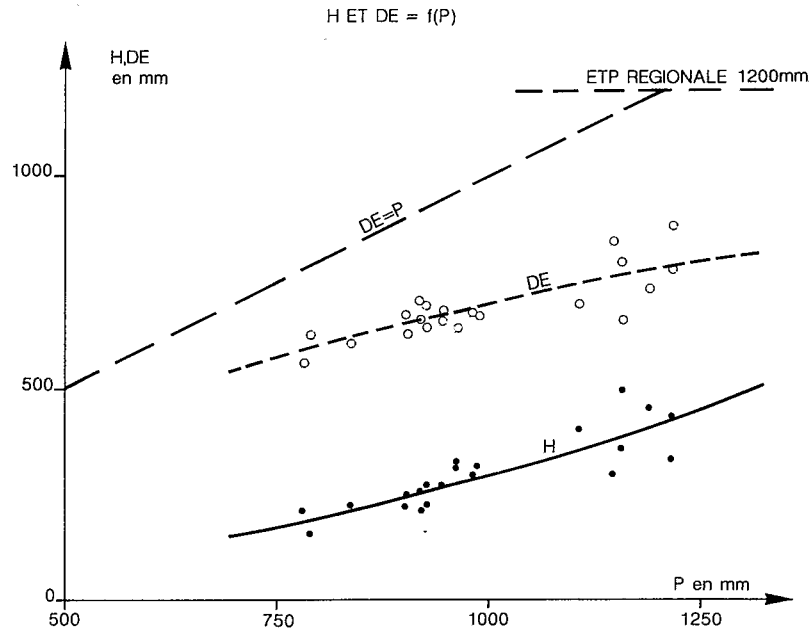



tableau 7.57.

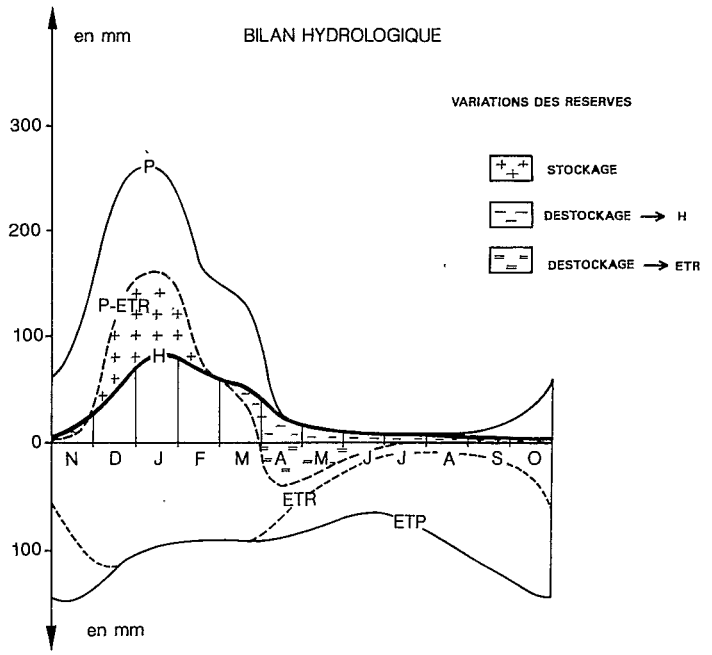
Mangoky au Banian
Bilan hydrologique
(valeurs en mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 91 | 230 | 260 | 169 | 135 | 27 | 13 | 10 | 9 | 10 | 13 | 33 | 1000 |
| ETP | 146 | 115 | 98 | 91 | 93 | 88 | 77 | 66 | 72 | 95 | 118 | 141 | 1200 |
| ETR | 85 | 115 | 98 | 91 | 93 | 67 | 40 | 19 | 9 | 10 | 13 | 30 | 670 |
| P-ETR | 6 | 115 | 162 | 78 | 42 | -40 | -27 | -9 | 0 | 0 | 0 | 3 | 330 |
| H | 12 | 46 | 82 | 68 | 54 | 22 | 12 | 9 | 8 | 7 | 5 | 5 | 330 |
| DR+ | - | 69 | 80 | 10 | - | - | - | - | - | - | - | | +159 |
| DR- | 6 | - | - | | 12 | 62 | 39 | 18 | 8 | 7 | 5 | 2 | -159 |
| R | 0 | 69 | 149 | 159 | 147 | 85 | 46 | 28 | 20 | 13 | 8 | 6 | - |

L'ETR annuelle (égale au déficit d'écoulement en moyenne interannuelle) représente 56 % de l'ETP moyenne sur le bassin (graphe 7.37).

figure 7.37.

Mangoky au Banian




L'ETP (397 mm) est entièrement satisfaite à partir des précipitations de décembre à mars (794 mm soit 79 % du total annuel). Après déduction de l'écoulement (250 mm soit 76 % de la lame annuelle), les réserves (stockage dans les altérites et la réserve utile des sols) représente 147 mm en fin mars (après un léger déstockage).

En saison sèche (avril à octobre), la lame écoulée (68 mm ) est presque entièrement produite par le déstockage des nappes d'altérites (essentiellement dans le haut bassin sur le socle). L'ETR (188 mm) de saison sèche est satisfaite à partir des précipitations (112 mm) et d'avril à juin, par l'assèchement de la réserve utile des sols (76 mm). Sur la période, l'ETR ne représente que 29 % de l'ETP.

En octobre, la reprise des précipitations permet une remontée de l'ETR. L'écoulement (12 mm) est assuré, pour moitié, par les précipitations et les ultimes réserves drainables.

## 3.5.6. Bilan global du bassin

En comparant le bilan global du bassin à ceux des formateurs du MANGOKY, on note le contraste entre les écoulements des cours d'eau du socle cristallin latéritisé mais comportant des nombreuses zones à tendance imperméable sur fortes pentes, et ceux du bassin inférieur situe sur la couverture sédimentaire (aux pentes faibles) recouvertes de croûtes sableuses perméables.

Sur la période commune d'observation (1949-1970), les débits cumulés des formateurs du bassin supérieur représentent 350 m³/s (en moyenne) contre 474 m³/s pour le bassin total (au BANIAN). La régression entre les débits du MANGOKY supérieur et ceux du bassin global est la suivante :

Q BANIAN = 1.20 Q MANG. SUP. + 53 ($R^2$ = .70)

La lame écoulée moyenne du bassin supérieur est de 545 mm (pour une pluviométrie moyenne de 1 200 mm sur 20 335 km²) soit un coefficient d'écoulement de 45 %.

Le bassin inférieur du MANGOKY (29665 km²) a une lame de 130 mm (pour une pluviométrie moyenne d'environ 850 mm) soit un coefficient d'écoulement moyen de 15 %.

Les apports du MANGOKY supérieur représentent ainsi près de 75 % des apports globaux du MANGOKY au BANIAN (et probablement plus de 80% au sortir du socle).

On retrouve les mêmes proportions au niveau des débits d'étiage.

Débit cumulé d'étiage des formateurs : 33.4 m³/s (médiane).

Débit d'étiage au BANIAN : 46 m³/s, ce qui représente un débit spécifique médian d'environ 1.6 l/s/km² pour le haut bassin et 0.4 l/s/km² pour le bassin inférieur.

La forte perméabilité des formations sédimentaires du MANGOKY inférieur peut être illustré par les résultats des observations effectuées de 1959 à 1964 sur le petit bassin représentatif du BANIAN, situé à 3 km au sud de la station principale (21°49'S - 44°11'E). Ce bassin, de taille réduite (47 km²) est situé sur les "sables roux" des formations gréseuses fissurées du jurassique supérieur, à une altitude d'environ 200 m et avec un relief assez prononcé (indice de pente global Ig = 40 m/km). Il a fait l'objet d'observations sur les crues, montrant des coefficients de ruissellement très modérés de l'ordre de 1 à 5 % pour des précipitations comprises entre 30 et 100 mm. Les coefficients maximaux observés ont été de 8%, le 17 décembre 1964, pour une précipitation moyenne de 111 mm et, trois jours après, de 28% pour une forte précipitation de 155 mm, survenue sur des sols non encore totalement réssuyés (Q MAX = 6 m³/s ou 12750 l/s/km²).

## 3.5.7. Transports solides

De 1951 à 1955, des mesures de transports solides en suspension ont été effectuées sur le MANGOKY au BANIAN.

Les charges mesurées s'échelonnent entre 120 g/m³ en moyennes eaux et 4000 g/m³ en crue.

Une équation de correspondance a pu être établie (T en g/m³ et Q en m³/s)
T < 100 g/m³ au-dessous de Q = 300 m³/s
T = .82 Q - 62 (entre 300 et 3000 m³/s)

L'évaluation des transports en suspension est de :

5.5 millions de tonnes en 1951-52
19.2 millions de tonnes en 1952-53
17.3 millions de tonnes en 1953-54
8.9 millions de tonnes en 1954-55

soit une érosion moyenne comprise entre 100 et 360 tonnes par km² et une ablation moyenne annuelle de 0.15 mm.

Ces transports ne correspondent qu'aux particules fines en suspension et provenant en grande majorité des bassins du socle. La composition moyenne des suspensions était la suivante :

- sables grossiers : 0 à 2 % (sans doute sous estimée)
- sables fins : 60 %
- argiles : 20 %
- limons : 20 %

Les transports de fonds (charriage et saltation) correspondant aux sables grossiers et graviers provenant en majorité des formations altérées sableuses du sédimentaire n'ont pu être mesurés.

# 4. BASSIN DE LA MORONDAVA

Le bassin de la MORONDAVA, petit fleuve côtier de la côte ouest, est situé entre ceux du MANGOKY au sud et de la TSIRIBIHINA au nord. La MORONDAVA et ses principaux affluents, la SAKAMALY et la FANIKAY, drainent la façade nord-ouest du massif du MAKAY et par un petit affluent de la SAKAMALY, la BERITSOKA, le plateau incliné de la BETSABORA, à l'est de la falaise de TSIANDAVA. Après les gorges, la MORONDAVA se dirige vers le canal du MOZAMBIQUE, en s'anostomosant dans la plaine de MAHABO. Le bassin est entièrement situé sur les formations sédimentaires greso-calcaires de l'ISALO, du jurassique et de crétacé. Ces sols sont représentés par des formations peu évoluées (lithosols et rankers en cuirasse gréseuse assez imperméables) et principalement par des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés. La végétation est représentée par la savane arbustive et, vers l'ouest, par la forêt tropophile.

La pluviométrie moyenne sur le bassin, compris entre l'isohyète 1100 au nord-est et l'isohyète 750 au sud-est, est voisine de 950 mm.

## 4.1. La Morondava à Dabara

La station de DABARA (20° 24' S - 44° 47' E) est située près de la prise d'eau de DABARA, en bordure de la RN 35. Le bassin versant contrôlé a une superficie de 4640 km².

La première échelle a été installée en septembre 1951 et restaurée en 1958. Une seconde échelle a été installée plus en aval en 1963 et doublée d'un limnigraphe en 1969.

Quatre-vingt-deux mesures de débit ont été effectuées de 1951 à 1983, entre 6 et 1 700 m³/s. L'extrapolation a été menée jusqu'à 6 000 m³/s en s'appuyant sur une bonne corrélation avec les relevés de la station de TSIANDAVA située dans les gorges en amont de DABARA (débit maximal mesuré aux flotteurs : 2 000 m³/s. La courbe unique d'étalonnage reste approximative (un seul jaugeage au dessus de 300 m³/s)

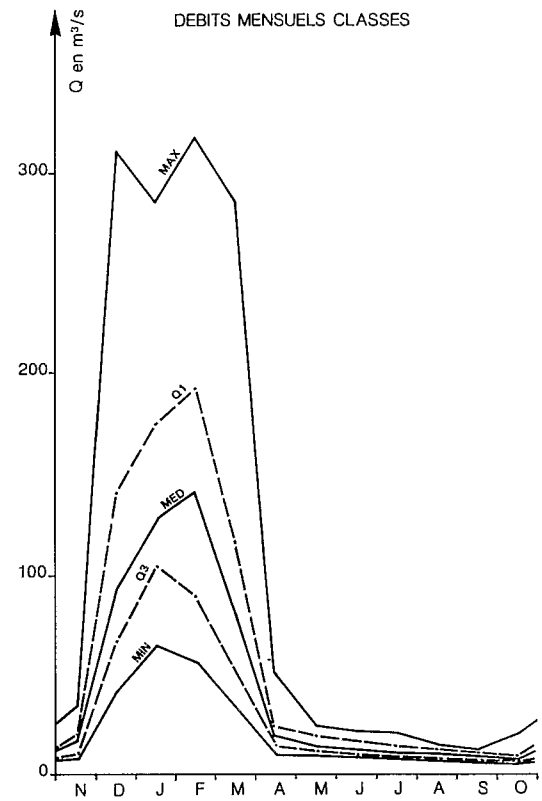
## 4.1.1. Débits observés et calculés

La construction d'un barrage provisoire en début de chaque saison sèche rend impossible la traduction des hauteurs d'eau d'avril à octobre. Cependant, à partir des mesures de débits effectués au cours de cette période, il est possible de déterminer pour chaque année une droite moyenne de décroissance exponentielle des débits d'expression $Q = Q_o$ e $^{.005Tj}$ à partir de laquelle les débits moyens mensuels peuvent être sommairement estimés. Les débits d'octobre et novembre, perturbés par les premières précipitations de la saison des pluies, ont été évalués d'après les quelques observations afin de compléter les données hydrologiques. Les débits moyens cumulés de décembre à mars représentant en général 80 % des apports annuels, les imprécisions sur les débits de saison sèche (de l'ordre de 25 %) n'affectent pas trop l'évaluation du débit moyen annuel.

Les valeurs des débits moyens mensuels et annuels observés et calculés sont consignées dans le tableau 7.58, ainsi que les débits moyens interannuels et quantiles des débits classés (graphe 7.38).

figure 7.38.

Morondava à Dabara

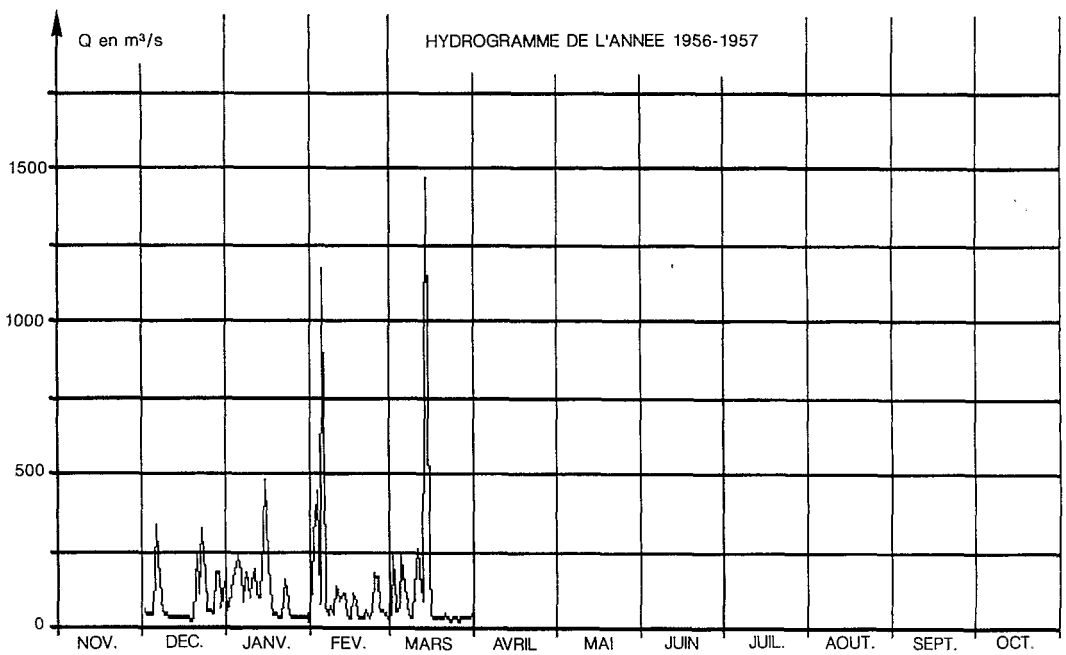



Le graphe 7.39 représente l'hydrogramme de l'année 1956-57 (Q = 45.5 m³/s) Seuls les mois observés sont

représentés. Les nombreuses crues assez bien individualisées correspondent au ruissellement sur les secteurs imperméables du bassin. Le débit de base (30 à 10 m³/s) reste relativement soutenu.

figure 7.39.

Morondava à Dabara




## 4.1.2. Apports annuels

L'ajustement d'une loi de distribution à l'échantillon des valeurs annuelles estimées donne les quantiles suivants :

tableau 7.58.

Morondava à Dabara
Apports annuels

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| H mm | 216 | 248 | 282 | 336 | 379 | 398 | 412 |
| Q m³/s | 31.7 | 36.5 | 41.5 | 49.4 | 55.7 | 58.5 | 60.6 |
| q l/s/km² | 6.8 | 7.9 | 8.9 | 10.6 | 12.0 | 12.6 | 13.1 |

Loi de Goodrich (test B.M. 4.68, échelle : 815 mm, position : - 460 mm, forme : .062)
Cinquantennales sèche et humide : 178 mm (Q = 26.2 m³/s) et 427 mm (62.8 m³/s)

tableau 7.59.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1255500105 Dabara
Rivière : Morondava
Pays: Madagascar
Bassin: Morondava
Débits en m³/s

Latitude : 21°00'00
Longitude : 45°00'00

Aire : 4640 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1951/52 | (31.) | (106) | 141. | 67.6 | 76.0 | (21.8) | (12.7) | (11.6) | (10.5) | (9.8) | (8.7) | (7.9) | (42.) |
| 1952/53 | (7.9) | 68.9 | 129. | 97.1 | 77.5 | (16.) | (14.4) | (13.1) | (11.9) | (10.8) | (9.7) | (8.9) | 39. |
| 1953/54 | - | - | - | - | - | (24.) | (20.) | (17.) | (15.) | (12.) | (10.8) | (9.) | - |
| 1954/55 | - | - | 166. | 167. | 99.8 | (27.) | (22.6) | (19.3) | (17.) | (14.) | (12.) | (10.) | - |
| 1955/56 | 20. | 56.3 | 65.3 | 55.9 | 50.2 | (17.) | (14.5) | (12.5) | (10.3) | (8.7) | (7.3) | (6.2) | (27.) |
| 1956/57 | (9.) | 93.2 | 117. | 132. | 120. | (24.8) | (10.5) | (10.) | (9.3) | (8.8) | (8.3) | (7.8) | 45.5 |
| 1957/58 | - | 94.0 | 183. | - | - | (19.) | (16.) | (13.5) | (11.5) | (9.6) | (8.1) | (6.3) | - |
| 1958/59 | (17.6) | 179. | 93.1 | 73.2 | 37.2 | (12.4) | (11.4) | (10.4) | (9.5) | (8.8) | (7.8) | (7.2) | 39. |
| 1959/60 | (33.1) | 87.4 | 105. | 170. | 64.6 | (10.9) | (10.) | (9.) | (8.2) | (7.4) | (6.8) | (6.2) | 43. |
| 1960/61 | (8.) | 125. | 196. | 91.0 | 96.0 | (14.) | (12.7) | (11.6) | (10.5) | (9.6) | (8.8) | (8.0) | 49. |
| 1961/62 | - | 310. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1962/63 | - | - | - | - | - | (16.) | (13.7) | (11.5) | (9.5) | (7.9) | (6.7) | (7.0) | - |
| 1963/64 | (24.) | 168. | 136. | 192. | 113. | (17.6) | (12.5) | (11.5) | (10.5) | (9.6) | (8.8) | (8.0) | 59 |
| 1964/65 | (34.3) | 67.5 | 268 | 98.0 | 103. | (12.6) | (11.5) | (10.4) | (9.5) | (8.6) | (7.8) | (7.2) | 53 |
| 1965/66 | (15.) | 102. | 73.0 | 130. | 34.3 | (27.8) | (12.5) | (11.4) | (10.3) | (9.5) | (8.6) | (7.8) | 36. |
| 1966/67 | (11.6) | 68.6 | 146. | 45.5 | 286. | (23.6) | (12.5) | (11.4) | (10.3) | (9.5) | (8.6) | (7.8) | 54. |
| 1967/68 | (15.9) | 68.2 | 121. | 318. | 67.0 | (15.5) | (14.) | (12.6) | (11.3) | (10.4) | (9.5) | (8.6) | 55. |
| 1968/69 | (16.7) | 141. | 149. | 226. | 50.6 | 34. | (22.5) | (19.) | (16.3) | (13.7) | (11.8) | (9.8) | 58. |
| 1969/70 | (20.) | 163. | 286. | 60.9 | 46.5 | (24.) | (20.) | (17.) | (15.) | (13.3) | (11.3) | (9.5) | 58. |
| 1970/71 | (19.) | 41.5 | 123. | 264. | 142. | (25.) | (22.6) | (17.4) | (16.9) | (15.5) | (13.0) | (20.1) | 59. |
| 1971/72 | (20.9) | 68.2 | 129. | 188. | 108. | 24.7 | (20.) | (17.) | (15.) | (12.) | (10.8) | (9.) | 52. |
| 1972/73 | - | 104. | - | - | 150. | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1973/74 | (20.) | 164. | 101. | 220. | 57.3 | (20.4) | (17.5) | (15.1) | (13.) | (11.2) | (9.8) | (8.3) | 54. |
| 1974/75 | - | - | 106. | - | 97.5 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1975/76 | (7.98) | 59.7 | 70.6 | 149. | 84.2 | (20.4) | (17.5) | (15.1) | (13.) | (11.2) | (9.6) | (8.3) | 38. |
| 1981/82 | - | - | 225. | 254. | 183. | 51.1 | 20.2 | 22.0 | 20.9 | 12.3 | 11.6 | 16.6 | - |
| 1982/83 | 17.3 | 54.6 | 129. | 129. | 77.3 | 19.9 | 15.0 | 18.1 | 15.1 | 13.5 | 11.9 | 12.0 | 42.4 |
| 1983/84 | 10.4 | 44.0 | 195. | 187. | 128. | 37.2 | (25.) | (21.5) | (18.) | (15.) | (12.8) | (10.8) | 58. |
| Moyenne. | 18. | 106. | 144. | 151. | 95.4 | 21.9 | 16.1 | 19.4 | 12.4 | 10.9 | 9.63 | 9.13 | 50.4 |
| Ecart-type. | 8 | 61.2 | 57.5 | 75.1 | 56.2 | 9.13 | 4.60 | 3.75 | 3.88 | 2.28 | 1.87 | 3.14 | |
| Max. | 34.3 | 310. | 286. | 318. | 286. | 51.1 | 25.0 | 22.0 | 20.9 | 15.5 | 13.0 | 20.1 | |
| Q1 | 20.5 | 141. | 175. | 192. | 117. | 24.9 | 20.0 | 17.2 | 15.6 | 12.8 | 11.5 | 9.65 | |
| Méd. | 17.5 | 93.2 | 129. | 141. | 80.9 | 20.4 | 14.4 | 13.1 | 11.3 | 10.4 | 9.50 | 8.30 | |
| Q3 | 11. | 67.5 | 105. | 91.0 | 54.0 | 15.7 | 12.5 | 11.4 | 9.90 | 9.15 | 8.20 | 7.50 | |
| Min. | 7.9 | 41.5 | 65.3 | 78.8 | 34.3 | 9.9 | 10.0 | 9.00 | 8.20 | 7.40 | 6.70 | 6.20 | |

## 4.1.3. Crues

### 4.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux

Jusqu'en 1968, aucune exploitation des relevés de cette station n'était permise, en raison d'une forte instabilité des basses et des moyennes eaux (fond du lit extrêmement mobile) et d'un nombre très insuffisant de jaugeages.

Les mesures (moulinet, flotteur, pente de ligne d'eau) réalisées dans les gorges de TSIANDAVA, 20 km en amont de DABARA (bassin versant de 4280 km) entre 1968 et 1970 ont permis :

- un étalonnage assez complet de cette station amont ;
- la corrélation entre les hauteurs des deux stations.

En admettant la conservation des débits (jaugeage de contrôle par flotteurs du 6/02/1969 à DABARA), un étalonnage moyen de hautes eaux a été tracé pour l'échelle de l'ancienne prise du Génie rural.

Les tarages de hautes eaux des différentes échelles suivies jusqu'en 1976, ont été déduits de ce premier étalonnage, après recalage des échelles (base et niveau des plus hautes eaux du 12/01/73 consécutif à la dépression Dorothée).

| | Limnigraphe amont ORSTOM | Ancienne échelle pont | Second limnigraphe | Échelle ancienne prise |
|---|---|---|---|---|
| PHE 1972-73 | | | | |
| H éch. | 5,13 | (4,36) | 5,09 | 4,60 |
| H NGM | 82,21 | (8220) | 82,18 | 82,15 |

tableau 7.60.
Morondava à Dabara

| Année | Q m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1951-52 | (2160) | 07/01/52 12H00 | 3,20 | 3rel |
| 1952-53 | (1100) | 13/01/53 12h00 | 1,96 | 3rel |
| 1953-54 | | | | |
| 1954-55 | (1270) | 05/02/55 12h00 | 2,10 | 3rel |
| 1955-56 | (4120) | | 3,80 | |
| 1956-57 | (2220) | 14/03/57 09h00 | 2,90 | 3rel |
| 1957-58 | (1440) | 06/01/58 12h00 | 2,25 | 3rel |
| 1958-59 | (1260) | 27/02/59 06h00 | 2,09 | 3rel |
| 1959-60 | (1440) | | 2,25 | 3 rel |
| 1960-61 | (1130) | 23/03/61 21h00 | 1,98 | 3rel |
| 1961-62 | (1450) | 18/12/61 06h00 | 2,26 | Min |
| 1962-63 | | | | |
| 1963-64 | (1830) | 12/01/64 03h00 | 2,70 | 3rel |
| 1964-65 | (1830) | 11/01/65 09h00 | 2,70 | 3rel |
| 1965-66 | (2400) | 21/02/66 21h00 | 3,20 | 3rel |
| 1966-67 | (1600) | 30/03/67 21h00 | 2,50 | 3rel |

suite

| Année | Q m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1967-68 | (1330) | 14/02/68 09h00 | 2,25 | 3rel |
| 1968-69 | (2430) | 06/02/69 03h00 | 3,22 | 3rel |
| 1969/70 | (5940) | 17/01/70 09h00 | 4,50 | 3rel |
| 1970-71 | (1240) | 08/02/71 12h00 | 2,16 | 3rel |
| 1971-72 | (1560) | 07/02/72 03h00 | 2,46 | 3rel |
| 1972-73 | (6380) | 12/01/73 | 4,60 | 3rel |
| 1973-74 | (1380) | 19/12/73 09h00 | 2,86 | 3rel |
| 1974-75 | (3830) | 01/02/75 21h00 | 4,40 | 3rel |
| 1975-76 | (1220) | 05/01/76 03h00 | 2,72 | 3rel |

### 4.1.3.2. Résultats de l'enquête historique

D'une enquête effectuée en 1969 sur la basse-MORONDAVA en aval de DABARA (MAHABO-MAHABOKELY), il ressort que les crues de 1916-17 et de 1917-18 dépassent largement (1,00 m) la crue de 1955-56, comparable à celle de 1934-35 (?).

En l'absence d'autres renseignements, les crues des années 1972-73 (dépression Dorothée - Q = 6 380 m³/s), 1916-17 et 1917-18 (Q = 6 000 m³/s) et 1969-70 (cyclone Geneviève - Q = 5 490 m³/s) peuvent être considérées comme les crues les plus importantes de la période 1915-16.

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 12 janvier et le 24 février (date médiane : 6 février - date extrêmes : 19 décembre et 30 mars).

Une distribution de Frechet a été ajusté à l'échantillon des 22 maximums annuels (1951-1976) et, après réévaluation en tenant compte de l'information historique, nous obtenons les quantiles suivants :

tableau 7.61.

Morondava à Dabara

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s (échant.) | 1580 | 2500 | (3820) | (12400) | |
| Q m³/s (inf. histor.) | | | 3600 | 8300 | (11000) |
| q l/s/km² | 340 | 540 | 775 | 1790 | (2370) |

## 4.1.4. Basses eaux

Le tarissement a été assez sommairement évalué à partir des jaugeages. Il semble assez constant d'une année sur l'autre et correspond à une droite de pente $\alpha = 0.05$ (Tc = 138 jours)

Les étiages absolus ont été rarement déterminés en raison de l'impossibilité d'utiliser les hauteurs limnimétriques en saison sèche. Les plus faibles mesures de débit sont les suivantes :

| | |
|---|---|
| 05.11.1957 | 7.5 m³/s |
| 22.09.1960 | 6.6 m³/s |
| 22.10.1963 | 6.4 m³/s |
| 23.09.1968 | 9.3 m³/s |
| 30.09.1971 | 11.8 m³/s |
| 30.10.1972 | 11.1 m³/s |
| 17.12.1981 | QJ MIN = 7.50 m³/s |
| 13.10.1982 | QJ MIN = 9.86 m³/s |
| 13.11.1983 | QJ MIN = 8.00 m³/s |

Avec prudence on estimera l'étiage médian (QJ MIN) à 8 m³/s soit 1.7 l/s/km².

## 4.1.5. Bilan hydrologique

La lame moyenne interannuelle (330 mm) en regard de la pluviométrie moyenne interannuelle sur le bassin estimée à 950 mm, correspond à un déficit moyen d'écoulement de 620 mm (Ke =35 %)

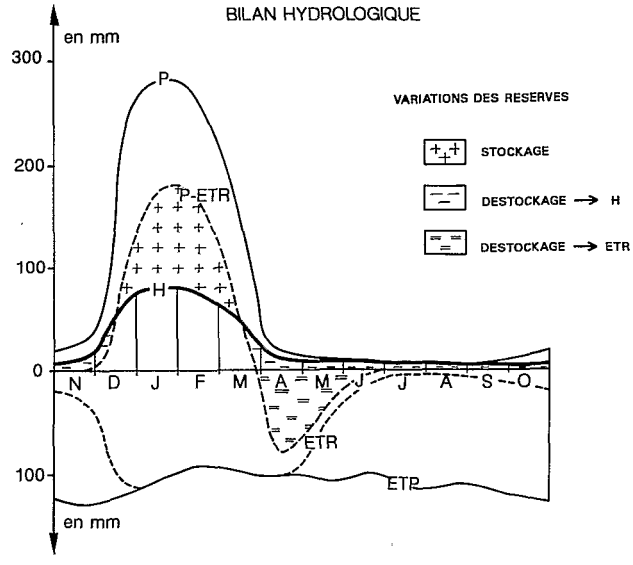
Le coefficient d'écoulement paraît assez élevé pour un bassin côtier du sud-ouest mais est vraisemblable en raison de la pluviométrie plus élevée (bordure de l'isohyète 1000 mm), du relief assez prononcé du bassin et de la présence de zones assez peu perméables (cuirasses gréseuses) favorisant les fortes crues en saison des pluies.

Le tableau 7.62 et le graphe 7.40 représente la tentative de bilan hydrologique du bassin.

L'ETR est réduite à 48 % de l'ETP annuelle, en raison de la sévérité de la saison sèche (6 mois en dessous de 15 mm).

figure 7.40.

Morondava à Dabara



De décembre à mars, les précipitations (815 mm) représentent 89 % du total annuel. L'ETR (392 mm) est proche de l'ETP (95 % ) et, déduction faite des écoulements (268 mm soit 81 % de la lame annuelle), une réserve de 185 mm est constituée en fin mars dans les zones d'altérites et la réserve utile du sol. En saison sèche (avril à novembre), l'ETR est fortement réduite (228 mm soit 26 % de l'ETP) malgré le soutien en avril et mai de la réserve utile des sols (123 mm).

Les lames écoulées de saison sèche (62 mm) correspondent au drainage lent des nappes d'altérites assez peu développées.

tableau 7.62.

Morondava à Dabara
Bilan hydrologique (en mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 25 | 160 | 280 | 258 | 147 | 20 | 15 | 10 | 5 | 5 | 10 | 15 | 950 |
| ETP | 128 | 123 | 105 | 90 | 96 | 98 | 105 | 98 | 111 | 110 | 114 | 122 | 1300 |
| ETR | 25 | 101 | 105 | 90 | 96 | 98 | 55 | 15 | 5 | 5 | 10 | 15 | 620 |
| P-ETR | 0 | 59 | 175 | 168 | 51 | -78 | -40 | -5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 330 |
| H | 10 | 59 | 80 | 76 | 53 | 12 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 5 | 330 |
| DR+ | | | 95 | 92 | | | | | | | | | +187 |
| DR- | 10 | | | | 2 | 90 | 49 | 13 | 7 | 6 | 5 | 5 | -187 |
| R | 0 | 0 | 95 | 187 | 185 | 95 | 46 | 33 | 26 | 20 | 15 | 10 | |

## 4.2. La Sakamaly à Migodo

La station de MIGODO (20° 25' - 45° 05') est située sur la SAKAMALY, à 200 m en amont du barrage et contrôle un bassin versant de 790 km². Des observations limnigraphiques ont été effectuées de février 1969 à avril 1972 et traduites au débit à partir d'une courbe d'étalonnage stable établie à partir de 42 mesures du débit (entre 3.1 et 13.3 m³/s). À partir d'une formule hydraulique appliquée au barrage déversant, l'étalonnage a pu être conduit jusqu'à 2 600 m³/s (maximum de la crue de 1969-70).

tableau 7.63.

Sakamaly à Migodo
Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1968/69 | - | - | - | 46.5 | 11.9 | 8.8 | 4.5 | 4.4 | 3.4 | 3.7 | 3.3 | 3.0 | - |
| 1969/70 | 4.3 | 27.2 | 51.0 | 18.8 | 12.1 | 7.7 | 4.7 | 4.0 | 4.0 | 3.9 | 3.8 | 4.5 | 12.2 |
| 1970/71 | 7.4 | 8.7 | 19.3 | 27.5 | 16.9 | 2.5 | 5.4 | 5.1 | 4.9 | 4.5 | 3.9 | 3.6 | 9.24 |
| 1971/72 | 6.1 | 11.6 | 18.5 | 19.7 | 10.9 | 4.8 | - | - | - | - | - | - | - |

Sur la période d'observation, les débits mensuels à MIGODO et DABARA présentent une assez bonne corrélation d'expression

Q MIGODO = .165 Q DABARA + .8

Cette relation permet d'estimer, avec prudence, les débits moyens interannuels de la SAKAMALY :

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3.7 | 18.2 | 24.5 | 25.7 | 16.5 | 4.4 | 3.4 | 3.1 | 2.8 | 2.6 | 2.3 | 2.3 | 9 |

Ce qui correspond à une lame moyenne interannuelle voisine de 360 mm pour une pluviométrie comprise entre 950 et 1 000 mm. De façon plus approchée, on peut estimer les lames decennales sèche et humide à 275 et 420 mm.

L'extrapolation de la courbe de tarage de cette station installée directement en amont d'un seuil de prise, s'appuie sur quelques jaugeages et les caractéristiques du déversoir.

| Année | m³/s | Hm | |
|---|---|---|---|
| 1968-69 | 1100 | 4,00 | Anc. échelle |
| 1969-70 | 2600 | 4,51 | Anc. échelle |
| 1970-71 | 770 | | |
| 1971-72 | 350 | 2,70 | Anc. échelle |
| 1982-83 | 483 | 2,54 | Nouv. échelle |

Les résultats de l'étude statistique menée sur la MORONDAVA à DABARA ont été utilisés pour une évaluation de la crue décennale, estimée à 1 700 m³/s (2 150 l/s/km²).

Le débit d'étiage médian doit-être voisin de 3 à 4 m³/s (3.8 à 5 l/s/km²).

## 4.3. La Betsiroka au barrage

Une station limnimétrique installée en amont d'un seuil déversant naturel (site de barrage) a été suivie de mars 1970 à juin 1972. La station (20° 21' S - 45° 05' E) contrôle un bassin versant de 577 km².

tableau 7.64.

Betsiroka au barrage

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1969/70 | | | | | 4.0 | 0.3 | 0 | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | |
| 1970/71 | 4.5 | 6.8 | 15.8 | 33.0 | 7.1 | 0.5 | 0.1 | (0) | (0) | (0) | (0) | 0 | 5.5 |
| 1971/72 | 0.1 | 4.8 | 12.6 | 13.5 | 12.1 | 0.3 | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | 3.6 |

Entre les débits mensuels de la BETSIROKA et de la MORONDAVA, la relation peut s'exprimer par la formule :

Q BETS = .11 Q MORON -1

Ce qui permet d'évaluer sommairement les débits en année moyenne ($m^3/s$) :

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | 10.7 | 14.8 | 15.6 | 9.5 | 1.4 | .5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.4 |

La lame annuelle moyenne (240 mm) est sensiblement inférieure a celle du bassin principal pour une pluviométrie voisine de 1 000 à 1 100 mm. L'ordre de grandeur des lames décennales sèche et humide est de 165 et 300 mm. Les débits s'annulent à partir du juin- juillet (absence de nappes).

Cette rivière a été suivie très épisodiquement entre 1979 et 1983, au pont de la RN35 et au site de barrage.

Un étalonnage complet de cette dernière station a été établi par AGRAR (jaugeages du 27/01/71) permettant une évaluation correcte des débits maximums de la période 1969-1973.

| Année | $m^3/s$ | Date | H Barrage | H RN35 |
|---|---|---|---|---|
| 1968-69 | | | | 5,00 |
| 1969-70 | 650 | 27/12/69 | 4,40 | |
| 1970-71 | 485 | 27/01/71 | | |
| 1971-72 | 385 | 13/01/72 | 3,58 | |
| 1982-83 | (600) | 12/01/73 | 4,25 | |

Un ordre de grandeur de la crue décennale a été estimé à partir des résultats de l'étude statistique menée sur la MORONDAVA à DABARA.

Le débit maximal décennal est évalué à 500 $m^3/s$ (870 $l/s/km^2$).

# 5.BASSIN DE LA TSIRIBIHINA

La TSIRIBIHINA est, par la superficie de son bassin (49800 $km^2$), le troisième système fluvial malgache et, par l'abondance annuelle de ses apports, le second fleuve de l'île après la BETSIBOKA.

La TSIRIBIHINA est constituée de la réunion dans la dépression permo-triasique sakamenienne au sortir du socle, de la SAKENY, au sud, issue du nord du massif du MAKAY, de la MANIA, au centre, issue du rebord oriental des hauts plateaux du BETSILEO et de la MAHAJILO, au nord, qui draine la façade occidentale de l'ANKARATRA.

L'organisation géomorphologique du bassin rappelle, mais avec une répartition assez nettement différente des ensembles, celle du bassin du MANGOKY.

Les bassins supérieurs de la MANIA et de la MAHAJILO drainent les hauts plateaux du socle, ici beaucoup plus importants que sur le MANGOKY. Migmatite et gneiss du système du graphite pour la partie orientale de la MANIA puis, plus à l'est, cipolins, granites et schisto-quartzites et pour la MAHAJILO, migmatites et gneiss du graphite avec une présence très importantes des épanchements néogènes et quaternaires du massif de l'ANKARATRA (dômes de trachytes et ryolites et coulées basaltiques plus récentes).Les bassins inférieurs de la MANIA et de la MAHAJILO drainent, sur les migmatites et michaschistes du VOHIBORY, des pénéplaines (MANDOTO, BELOBAKA) de superficie plus réduite que sur le bassin du MANGOKY.

Les deux formateurs, rejoints par la SAKENY dans la dépression des formations schisto-greseuses de la SAKAMENA, constituent la TSIRIBIHINA qui, par un parcours sinueux, franchit d'est en ouest les "cuestas" sédimentaires beaucoup moins développés que sur le bassin de la MANGOKY, le socle n'étant éloigné du littoral que de 130 km, contre 210 pour le bassin situé au sud : formations gréseuses de l'ISALO constituant le plateau au rebord oriental très escarpé du BEMARAHA, marno-calcaires et barre gréseuse du jurassique marin, formations gréseuses et gréso-calcaire du crétacé, calcaires compacts de l'éocène.

Le bassin se termine sur les formations récentes du pliocène recouvertes d'alluvions anciennes sablo-argileuses et récentes à prédominance limoneuse.

Les sols se rattachent, à l'est, aux formations d'altérites ferrallitiques typiques (latérites profondes) avec en auréole autour de l'ANKARATRA, des sols rouges sur matériaux basiques, puis passent à des sols squelettiques sur roches cristallines et des sols faiblement ferrallitiques de type hydromorphe à taches ou concrétions et, plus au nord, de type ferrisoliques associés à des sols ferrugineux tropicaux.

Sur les formations sédimentaires se sont constitués des sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés sur matériaux sableux ou sablo-argileux et des lithosols sur les calcaires.

La végétation dominante est la savane :

- pseudo-steppe du domaine au centre à aristida (est du bassin) ;

- pseudo-steppe des pentes occidentales à hyparrhenia et aristida, et sur tout le bassin inférieur, pseudo-steppe de l'ouest plus ou moins arborée. La forêt dense tropophile ne subsite qu'en lambeaux sur l'ouest du bassin. La pluviométrie, nettement plus abondante que sur le MANGOKY, décroît d'est en ouest : supérieure à 2 000 mm sur le haut bassin de la MAHAJILO (pentes de l'ANKARATRA) et à 1800 mm sur le bassin supérieur de la MANIA, elle est encore voisine de 1200 à 1300 mm au contact du sédimentaire, de 1000 mm, sur le bassin inférieur, entre BEREVO et BELO. À l'exutoire, passe l'isohyète 800 mm.

## 5.1. Bassin de la Mania

Nous analyserons d'abord les observations recueillies sur les trois stations principales de la MANIA supérieure, puis celles recueillies sur quelques années en un certain nombre de stations récentes.

### 5.1.1. Sahanivotry au PK 197

La SAHANIVOTRY est un petit affluent rive gauche de la MANANDONA, elle même affluent rive droite de la MANIA.

La station est située à 1300 m d'altitude, à proximité du PK 197 de la RN 7, entre ANTSIRABE ET AMBOSITRA (20° 07' S - 47 ° 05' E) Elle contrôle un bassin versant de 430 km².

Équipée en novembre 1963, elle a fait l'objet d'observations jusqu'à ce jour. Les données disponibles pour cette étude couvrent, avec des lacunes (juin 1965, juin 1977 à mars 1978), la période novembre 1963 à avril 1980.

Cinquante-huit mesures de débit ont été effectuées (1.42 à 78 m³/s) et permettent d'établir une courbe d'étalonnage stable jusqu'à 80 m³/s (extrapolation jusqu'à 260 m³/s) Les données sont de bonne qualité.

La pluviométrie est assez sommairement déterminée à partir de deux postes situés hors du bassin (SOANINDRARINY, poids : .65 et MANANDONA, .35). La moyenne (1945-70) de ces deux postes est de 1 350 mm, mais on peut estimer la pluviométrie moyenne du bassin à 1700 mm, d'après les isohyètes.

## 5.1.1.1. Débits moyens mensuels et annuels

En raison du faible nombre d'années concomitantes, les liaisons hydropluviométriques mensuelles sont peu significatives. Les relations débits-débits sont assez bien marquées pour la saison sèche.

tableau 7.65.

Sahanivotry au PK 197
Régressions mensuelles

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Novembre à mars | HI = | .11 | PI + .13 PI-1 | + | 27.6 | ($R^2$ = .32 | P> .995) |
| Q04 | = | .45 | Q03 | + | 4.9 | ($R^2$= .42 | P>.99) |
| Q05 | = | .59 | Q04 | + | .8 | ($R^2$ = .76 | P> 995) |
| Q06 | = | .47 | Q05 | + | 2.3 | ($R^2$ = .88 | P>.995) |
| Q07 | = | .62 | Q06 | + | 1.7 | ($R^2$ = .90 | P> 995) |
| Q08 | = | .80 | Q07 | + | .25 | ($R^2$ = .88 | P> 995) |
| Q09 | = | .58 | Q08 | + | 1. | ($R^2$ = .61 | P>.995) |

tableau 7.66.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1251306505 PK 197,5 Latitude : 20°07'00
Rivière : Sahanivotry Longitude : 47°05'00
Pays: Madagascar
Bassin: Tsiribihina Aire : 430 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1963/64 | 17.9 | 15.7 | 8.85 | 19.0 | 12.6 | 7.31 | 5.33 | 4.98 | 5.06 | 4.03 | 3.03 | 3.06 | 8.86 |
| 1964/65 | 5.98 | 16.6 | 26.3 | 19.6 | 17.4 | 15.2 | 8.54 | 6.53 | 6.23 | 5.75 | 5.25 | 5.30 | 11.5 |
| 1965/66 | 4.27 | 16.2 | 16.1 | 10.4 | 9.72 | 9.55 | 6.84 | 5.11 | 4.32 | 3.89 | 3.83 | 2.95 | 7.77 |
| 1966/67 | 4.10 | 6.54 | 16.3 | 9.13 | 20.2 | 10.4 | 6.42 | 5.15 | 4.64 | 3.77 | 3.77 | 4.98 | 7.96 |
| 1967/68 | 12.9 | 18.0 | 8.91 | 11.6 | 8.93 | 6.58 | 4.99 | 4.17 | 4.04 | 3.39 | 2.70 | 3.56 | 7.47 |
| 1968/69 | 5.46 | 15.4 | 22.5 | 33.5 | 17.2 | 14.2 | 10.5 | 7.20 | 6.10 | 3.53 | 3.85 | 4.20 | 12.0 |
| 1969/70 | 4.49 | 16.8 | 38.5 | 27.6 | 18.5 | 11.6 | 8.74 | 6.71 | 5.75 | 4.64 | 3.37 | 2.81 | 12.4 |
| 1970/71 | 11.9 | 10.9 | 20.1 | 22.6 | 19.6 | 11.9 | 7.08 | 5.62 | 5.18 | 4.05 | 3.73 | 2.92 | 10.4 |
| 1971/72 | 4.99 | 9.12 | 7.74 | 20.0 | 18.3 | 10.7 | 7.43 | 5.56 | 5.74 | 5.10 | 3.61 | 7.14 | 8.75 |
| 1972/73 | 7.46 | 15.5 | 22.9 | 30.2 | 37.3 | 19.9 | 9.63 | 8.31 | 6.81 | 5.77 | 4.49 | 3.26 | 14.2 |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1973/74 | 13.0 | 16.1 | 12.1 | 11.3 | 19.4 | 21.6 | 17.2 | 9.76 | 7.46 | 6.03 | 4.41 | 4.89 | 11.9 |
| 1974/75 | 8.45 | 13.2 | 18.8 | 33.1 | 23.6 | 15.4 | 9.13 | 6.90 | 6.02 | 4.79 | 3.71 | 3.47 | 12.1 |
| 1975/76 | 12.0 | 15.7 | 15.4 | 19.2 | 15.3 | 16.6 | 8.82 | 6.29 | 5.60 | 4.93 | 3.95 | 5.71 | 10.8 |
| 1976/77 | 5.76 | 16.3 | 19.1 | 44.6 | 29.2 | 16.2 | (10.3) | (7.15) | (6.11) | (5.16) | (4.05) | (5.3) | (13.9) |
| 1978/79 | - | - | - | - | - | 7.29 | 4.33 | 3.94 | 4.89 | 3.10 | 2.32 | 2.19 | - |
| 1978/79 | 3.17 | 7.58 | 7.46 | 14.0 | 8.14 | 6.96 | 4.51 | 3.99 | 4.02 | 3.79 | 3.06 | 2.81 | 5.48 |
| 1979/80 | 8.04 | 14.7 | 28.5 | 17.1 | 15.1 | 12.5 | (8.10) | (6.10) | (5.46) | (5.5) | (4.25) | (4.20) | (10.8) |
| Moyenne. | 8.12 | 13.8 | 18.1 | 21.4 | 18.2 | 12.6 | 8.11 | 6.09 | 5.50 | 4.66 | 3.73 | 4.04 | 10.3 |
| Ecart-type | 4.23 | 3.95 | 8.49 | 9.99 | 7.45 | 4.50 | 3.04 | 1.55 | .95 | .91 | .70 | 1.33 | |
| Max. | 17.9 | 18.0 | 38.5 | 44.6 | 37.3 | 21.6 | 17.2 | 9.76 | 7.46 | 6.03 | 5.25 | 7.14 | |
| Q1 | 12.0 | 16.3 | 22.7 | 28.9 | 19.9 | 15.8 | 9.38 | 7.03 | 6.11 | 5.52 | 4.15 | 5.14 | |
| Méd. | 6.72 | 15.6 | 17.6 | 19.4 | 17.9 | 11.9 | 8.10 | 6.10 | 5.60 | 4.79 | 3.77 | 3.56 | |
| Q3 | 4.74 | 12.0 | 10.5 | 12.8 | 13.8 | 8.43 | 5.87 | 5.05 | 4.76 | 3.84 | 3.21 | 2.93 | |
| Min. | 3.17 | 4.58 | 7.46 | 9.13 | 8.14 | 6.58 | 4.33 | 3.94 | 4.02 | 3.10 | 2.32 | 2.19 | |

Les valeurs manquantes, entre parenthèses, ont été estimées d'après les régressions du tableau 7.65 et des observations faites sur la MANIA .

Le graphe 7.41 représente les débits mensuels classés de la SAHANIVOTRY (maximum en février). Des hydrogrammes annuels en année excédentaire (1972-73, Q = 14.2 m³/s) et déficitaire (1967-68, Q = 7.47 m³/s sont représentés (graphes 7.42 et 7.43)

figure 7.41.

Sahanivotry au PK 197

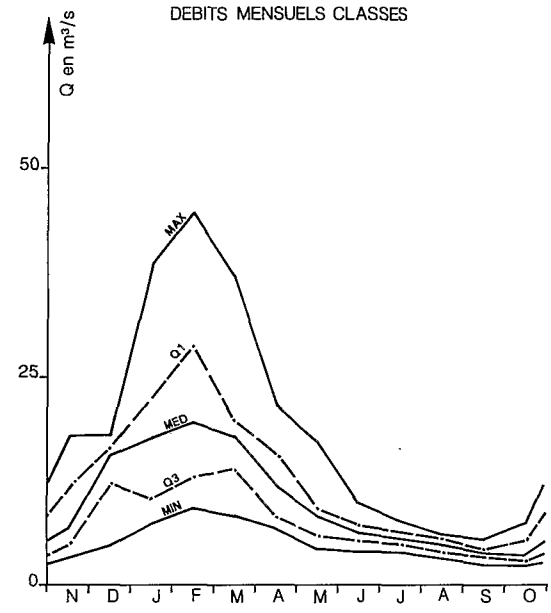


figure 7.42.

Sahanivotry au PK 197

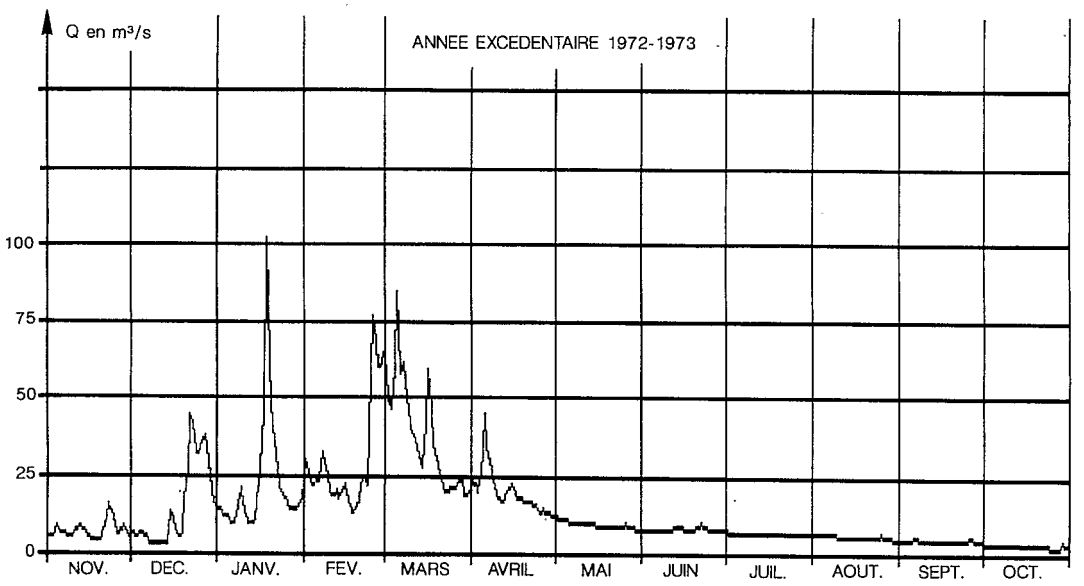
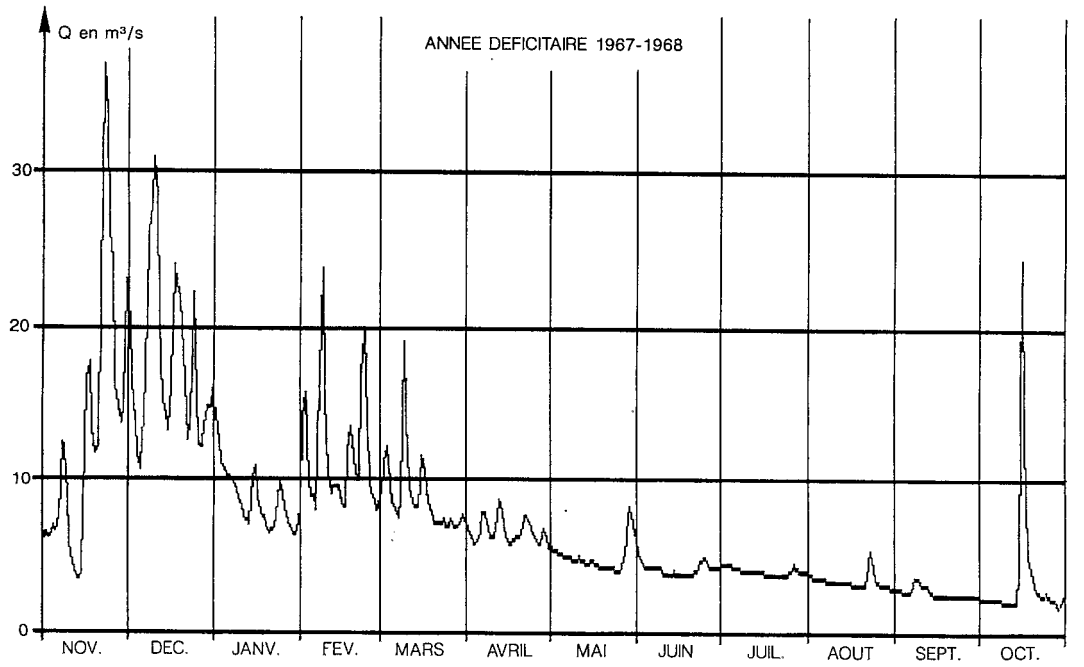



figure 7.43.

Sahanivotry au PK 197



## 5.1.1.2. Apports annuels

En raison du faible nombre de couple H,P la liaison entre lame écoulées et précipitations annuelles [P = 1.25 (.65 P SOANIND. + .35 P MANDONA) ] est peu significative.

Par contre, les relations entre les lames écoulées de la SAHANIVOTRY et celles des bassins emboîtants (MANANDONA et MANIA à FASIMENA) sont de bonne qualité.

H SAHAN. = 1.05 H MANAND. + 84 ($R^2$ = .92 P> .995)
H SAHAN. = 084 H MANIA + 122 ($R^2$ = .60 P> .995)

On peut observer que la lame 78.79 de la SAHANIVOTRY est très en dehors de la régression avec la MANIA. Mais sa valeur (401 mm) est très voisine de celle observée la même année sur la MANANDONA (415 mm).

Il est possible que les précipitations de cette année aient été centrées sur le haut du bassin de la MANIA ou bien que les débits de saison des pluies soient surestimés cette année sur la MANIA.

À partir de la régression avec la MANANDONA, il est possible d'évaluer les valeurs 1945-1963 et 1979 à 1983.

tableau 7.67.

| Année | 45.46 | 46.47 | 47.48 | 48.49 | 49.50 | 50.51 | 51.52 | 52.53 | 53.54 | 54.55 | 55.56 | 56.57 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hmm | 560 | 950 | 980 | 445 | 500 | 635 | 900 | 740 | 655 | 635 | 665 | 600 |
| Qm³/s | 7.64 | 13.0 | 13.3 | 6.07 | 6.82 | 8.66 | 12.2 | 10.1 | 8.93 | 8.66 | 9.04 | 8.18 |
| Année | 57.58 | 58.59 | 59.60 | 60.61 | 61.62 | 62.63 | | 77.78 | | 80.81 | 81.82 | 82.83 |
| Hmm | 595 | 710 | 575 | 535 | 520 | 780 | | 630 | | 815 | 1295 | 660 |
| Qm³/s | 8.11 | 9.68 | 7.82 | 7.29 | 7.09 | 10.6 | | 8.59 | | 11.1 | 17.7 | 9.00 |

L'ajustement d'une loi ou distribution à l'échantillon de 38 valeurs observées et calculées correspond aux quantiles suivants :

tableau 7.68.

Sahanivotry au PK 197
Apports annuels

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| H mm | 470 | 510 | 566 | 698 | 870 | 979 | 1023 |
| Q m³/s | 6.40 | 6;95 | 7.71 | 9.51 | 11.9 | 13.3 | 14.8 |
| q l/s/km² | 14.9 | 16.2 | 17.9 | 22.1 | 27.7 | 30.9 | 34.4 |

Loi log-normale (test B.M : 1.68, échelle : 563 mm, position : 135 mm, forme : .316)
Cinquantennales sèche et humide : 429 mm (Q = 5.85 m³/s) et 1213 mm (Q = 16.5 m³/s)

## 5.1.1.3. Crues

La nature du contrôle (seuil rocheux, chute) permet l'évaluation correcte des débits de très hautes eaux.

L'extrapolation de type logarithmique a été menée de 8,46 m (cote du plus fort jaugeage réalisé lors du cyclone Geneviève - Q = 78,03 m³/s) à 10,65 m (PHE cyclone Emilie).

tableau 7.69

Sahanivotry au PK 197
Maximums annuels
de crues

| Année | Q m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1963-64 | 75 | 09/11/63 18h00 | 8,40 | 3rel |
| 1964-65 | 85 | 23/01/65 12h00 | 8,58 | 3rel |
| 1965-66 | 57 | 08/01/66 18h00 | 8,05 | 3rel |
| 1966-67 | 62 | 13/03/67 18h00 | 8,15 | 3rel |
| 1967-68 | 52 | 16/10/68 18h00 | 7,95 | 3rel |
| 1968-69 | 97 | 09/02/69 06h00 | 8,78 | 3rel |
| 1969-70 | 90 | 16/01/70 06h00 | 8,66 | 3rel |
| 1970-71 | 102 | 06/03/71 21h00 | 8,86 | 3rel |
| 1971-72 | 58 | 14/02/72 18h00 | 8,07 | 3rel |
| 1972-73 | 130 | 05/03/73 12h00 | 9,29 | 3rel |
| 1973-74 | 57 | 18/03/74 06h00 | 8,06 | 3rel |
| 1974-75 | 107 | 15/02/75 18h00 | 8,94 | 3rel |
| 1975-76 | 77 | 14/02/76 18h00 | 8,45 | 3rel |
| 1976-77 | 255 | 03/02/77 | 10,65 | PHE |
| 1977-78 | 28 | | 7,43 | 3rel |
| 1978-79 | 40 | | 7,68 | 3rel |
| 1979-80 | 105 | 22/01/80 | 8,90 | PHE |

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 16 janvier et le 5 mars (date médiane : 9 février - dates extrêmes : 16 octobre et 18 mars).

Après ajustement d'une distribution de Frechet à l'échantillon de 17 maximums annuels, nous obtenons les quantiles suivants :

tableau 7.70

Sahanivotry au PK 197
Maximums annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 76 | 113 | 143 | (220) | (260) |
| q l/s/km² | 177 | 263 | 333 | (510) | (605) |

## 5.1.1.4. Basses eaux

Le tarissement s'établit à partir de mai. Parfois perturbées par des précipitations de saison sèche, les décroissances exponentielles peuvent être observées chaque année (année 1967 graphe 7.44). Les coefficients de la droite de tarissement affectent des valeurs comprises entre .0049 et .0088 (la moitié des observations sont comprises entre .0053, Tc = 131 jours et .0071, Tc = 98 jours avec $\alpha$ médian = .0062, Tc = 112 jours).

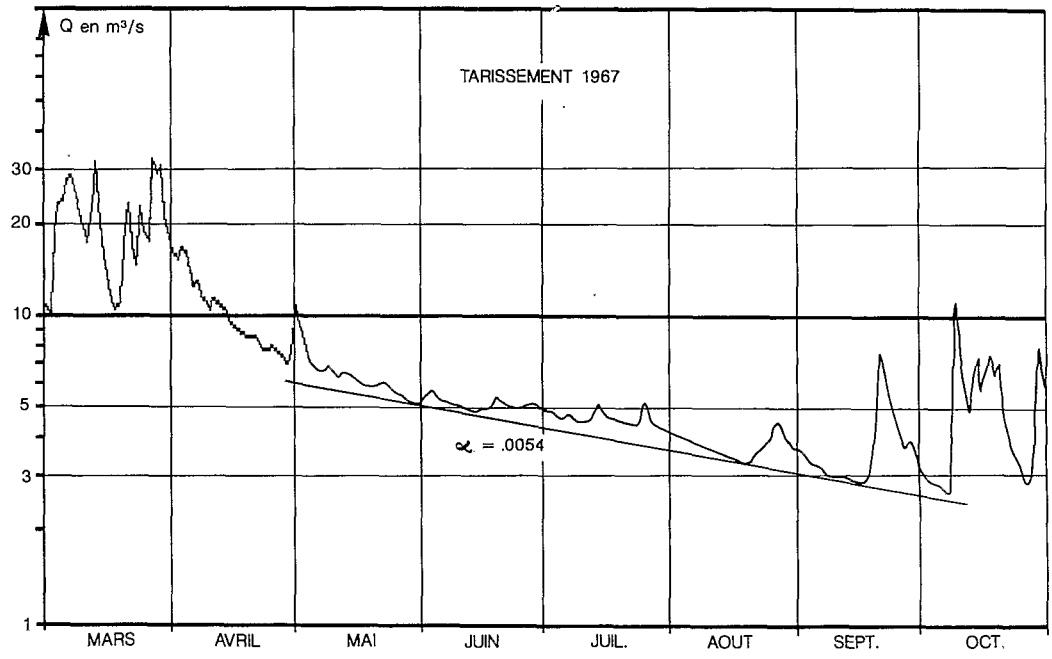
Le coefficient de tarissement est lié au potentiel des nappes en fin de saison des pluies par la relation :
$\alpha = 6.10^{-4} Q0 + .0022$ ($R^2 = .79$ $P > .995$)

Q0 étant le débit de base initial compris entre 4 et 10 m³/s (Q0 moyen : 6.6 m³/s).

En année médiane le stock des réserves drainables peut être estimé à 92.106 m³ (lame équivalente 215 mm).

figure 7.44.

Sahanivotry au PK 197




| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1963 | 4.10 | 2.68 | 2.27 | 1.95 | 04-11 |
| 1964 | 5.43 | 3.93 | 2.92 | 2.40 | 22-11 |
| 1965 | 3.58 | 2.51 | 1.62 | 1.44 | 06-11 |
| 1966 | 4.63 | 3.37 | 2.92 | 2.64 | 07-10 |
| 1967 | 3.52 | 2.40 | 2.04 | 1.34 | 10-11 |
| 1968 | 5.20 | 3.45 | 2.62 | 2.05 | 23-11 |
| 1969 | 4.97 | 3.13 | 2.62 | 2.38 | 26-10 |
| 1970 | 3.93 | 2.82 | 2.08 | 1.33 | 14-11 |
| 1971 | 4.93 | 3.55 | 3.14 | 2.99 | 05-10 |
| 1972 | 6.22 | 3.67 | 3.04 | 2.22 | 03-11 |
| 1973 | 5.97 | 3.91 | 3.53 | 3.04 | 03-12 |
| 1974 | 5.04 | 3.55 | 2.70 | 2.46 | 23-10 |
| 1975 | 5.13 | 3.37 | 2.88 | 2.33 | 27-11 |
| 1978 | - | 2.92 | 2.43 | 1.48 | 05-11 |
| 1979 | 3.46 | 2.43 | 1.97 | 1.58 | 03-11 |

tableau 7.71

Sahanivotry au PK 197
Débits caractéristiques
de basses eaux (m³/s)

Le débit minimal journalier est observé une année sur deux au cours de la première quinzaine de novembre. Les relations entre débits classés sont les suivantes :

DCE = .85 QJ MIN + 7.9 ($R^2$ = .84 P> .995)
DC11 = .74 QJ MIN + 1.63 ($R^2$ = .87 P> .995)
DC9 = 1.09 QJ MIN + 2.41 ($R^2$ = .54 P> .995)
et
DC9 = .9 Q 0809 + .16 ($R^2$ = .89)

L'ajustement statistique sur les 15 valeurs observées correspond aux quantiles suivants :

tableau 7.72

| | Années sèches | | Médiane | Années humides | |
|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 |
| Q m³/s | 1.42 | 1.66 | 2.11 | 2.56 | 2.80 |
| q l/s/km² | 3.3 | 3.9 | 4.9 | 6.0 | 6.5 |

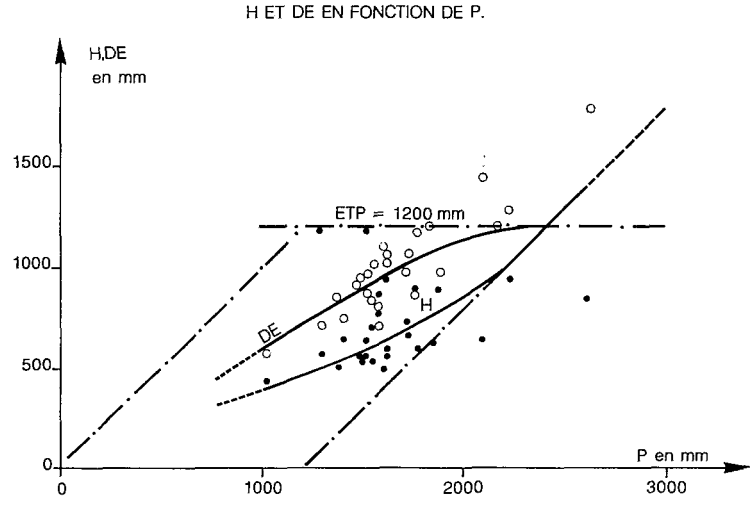
Loi log-normale (test B.M. : 2.80, échelle : .54 m³/s, portion : 2.11 m³/s)
Vicennales sèche et humide : 1.23 m³/s (2.9 l/s/km²) et 2.99 m³/s ( 7 l/s/km²).

## 5.1.1.5. Bilan hydrologique

Avec des précipitations moyennes interannuelles estimées à 1 700 mm, la lame écoulée interannuelle (730 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 970 mm (Ke = 43 %)

Nous avons représenté sur le graphe 7.45 les lames et déficits d'écoulement en fonction des précipitations. La large dispersion des valeurs autour des courbes moyennes tient à l'approximation sur les précipitations annuelles et au fait que la majeure partie des lames ont été évaluées d'après la MANANDONA. Il est possible cependant de mettre en évidence les tendances.

figure 7.45.
Sahanivotry au PK 197



Le déficit d'écoulement voisin de 500 mm pour une pluviométrie de 800 mm croît régulièrement jusqu'à près de 1 100 mm (pour P voisin de 1 900 mm). La courbe s'inflèchit ensuite pour rejoindre (dans des conditions moyennes de températures et de distribution des précipitations) l'ETP régionale évaluée à 1 200 mm quand P dépasse les 2 000 mm. Par symétrie, la courbe moyenne de l'écoulement croît de 350 à 1 000 mm, puis au dessus de P = 2 200 mm, peut être assimilée à un droite P - 1 200 mm.

Ce petit bassin des hauts plateaux du centre a un comportement intermédiaire entre ceux des bassins de la côte est et ceux de la partie méridionale de l'île. L'ETP annuelle peut-être satisfaite dans la gamme des précipitations observables (pour P> 2 200 mm) mais s'écarte sensiblement de l'ETP lorsque la pluviométrie décroît et que la sévérité de la saison sèche est plus prononcée. Les bilans mensuels du bassin doivent être sensiblement analogues à ceux qui seront exposés pour la MANIA à FASIMENA.

## 5.1.2. Manandona à Sahanivotry

Emboîtant le bassin précédent, le bassin de la MANANDONA draine la région d'ANTSIRABE et rejoint la MANIA, en rive droite, en aval d'AMBOSIFASIKA.

La station de SAHANIVOTRY(20° 08'S - 47 ° 05' E), est située en bordure de la RN7, en aval du village de SAHANIVOTRY et du confluent avec la rivière du même nom. Le bassin versant de la MANANDONA est de 1 450 km² à la station (1 300 m d'altitude).

L'échelle a été installée en novembre 1963 et n'a subi aucune modification pendant la durée des observations.

Soixante et une mesures de débits ont été effectuées entre 2.3 m³/s et 305 m³/s (de 1963 a 1970) et ont permis le tracé d'une courbe d'étalonnage unique et stable extrapolée jusqu'à 512 m³/s. Les débits obtenus sont de bonne qualité.

La pluviométrie est obtenue à partir d'une dizaine de stations (MANANDONA, ANDRANOMANELATRA, SOANINDRARINY, ANTSIRABE, AMBOHIMIARIVO, etc.). Les valeurs obtenues par la méthode de THIESSEN doivent être corrigées (coefficient 1.11) pour correspondre à la moyenne interannuelle évaluée d'après les isohyètes (1 530 mm).

### 5.1.2.1. Débits moyens mensuels et annuels

L'échantillon des valeurs hydrométriques et pluviométriques concomitantes est trop faible (7 années) pour établir des liaisons significatives à l'échelle mensuelle. Le tableau 7.73 consigne les régressions intermensuelles utilisables pour le complètement des lacunes.

tableau 7.73.
Manandona à Sahanivotry
Régressions intermensuelles

| | | |
|---|---|---|
| Novembre | Hi = .27 Pi + .27 Pi-1 - 45 | ($R^2$ = .70 P>.995, 34 val) |
| à Mars | Q04= .42 Q03 + 14 | ($R^2$ = .46 P> .99) |
| | Q05= .55 Q04 + 1.2 | ($R^2$ = .76 P> .995) |
| | Q06= .43 Q05 + 5.6 | ($R^2$ = .88 P> .995) |
| | Q07= .65 Q06 + 3.1 | ($R^2$ = .88 P> .995) |
| | Q08= .85 Q07 - 0.2 | ($R^2$ = .92 P> .995) |
| | Q09= .58 Q08 + 2.1 | ($R^2$ = .66 P> .995) |
| | Q10= 1.05 Q09 - 0.4 | ($R^2$ = .36 P> .995) |

Après complètement des lacunes (novembre 1963, juin 1977, juillet à octobre 1980), nous disposons d'une chronique de débits mensuels sur 17 années (1963-64 à 1979-80) dont les valeurs sont consignées dans le tableau 7.74.

tableau 7.74.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1251305005 Sahanivotry Latitude : 20°08'00
Rivière : Manandona Longitude : 47°05'00
Pays: Madagascar
Bassin: Tsiribihina Aire : 1450 km²
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1963/64 | (25.) | 41.2 | 26.2 | 72.6 | 33.5 | 20.5 | 12.8 | 12.4 | 11.7 | 9.40 | 6.57 | 6.41 | (23.0) |
| 1964/65 | 12.7 | 57.2 | 89.0 | 58.2 | 50.3 | 45.6 | 20.6 | 13.9 | 14.5 | 13.6 | 11.9 | 12.3 | 33.2 |
| 1965/66 | 11.2 | 47.7 | 36.1 | 21.1 | 20.3 | 19.4 | 15.8 | 10.2 | 8.57 | 7.22 | 8.01 | 5.38 | 17.6 |
| 1966/67 | 7.17 | 15.5 | 48.1 | 24.6 | 73.9 | 31.3 | 14.8 | 10.2 | 9.22 | 7.44 | 7.35 | 8.77 | 21.6 |
| 1967/68 | 26.9 | 54.7 | 22.9 | 36.3 | 29.8 | 19.5 | 12.2 | 10.1 | 9.05 | 7.18 | 5.13 | 5.36 | 19.9 |
| 1968/69 | 8.94 | 44.6 | 56.9 | 106. | 52.3 | 38.4 | 25.8 | 16.5 | 13.6 | 11.9 | 8.55 | 7.85 | 32.2 |
| 1969/70 | 9.10 | 42.7 | 133. | 74.0 | 54.3 | 29.6 | 19.1 | 13.2 | 11.0 | 8.79 | 5.83 | 4.35 | 33.6 |
| 1970/71 | 30.1 | 30.0 | 60.1 | 80.0 | 58.3 | 34.0 | 18.4 | 13.6 | 11.7 | 9.46 | 8.68 | 6.32 | 29.7 |
| 1971/72 | 13.0 | 32.0 | 26.2 | 67.2 | 52.3 | 32.6 | 20.1 | 15.4 | 14.2 | 12.9 | 8.35 | 15.6 | 25.7 |
| 1972/73 | 19.0 | 48.0 | 83.7 | 91.8 | 119. | 59.2 | 26.8 | 20.3 | 16.0 | 13.0 | 9.93 | 6.33 | 42.5 |
| 1973/74 | 32.9 | 46.9 | 39.9 | 46.5 | 61.9 | 67.3 | 49.0 | 25.3 | 18.4 | 13.9 | 9.89 | 10.3 | 35.1 |
| 1974/75 | 23.4 | 35.7 | 49.2 | 97.3 | 75.5 | 45.6 | 23.3 | 16.4 | 13.7 | 11.0 | 8.30 | 7.46 | 33.5 |
| 1975/76 | 29.7 | 48.7 | 50.5 | 65.0 | 56.2 | 51.9 | 26.5 | 18.2 | 16.4 | 14.6 | 10.8 | 12.3 | 33.3 |
| 1976/77 | 11.8 | 39.5 | 45.7 | 145. | 81.3 | 44.6 | 22.6 | (15.3) | 12.0 | 9.60 | 7.60 | 10.0 | 36.4 |
| 1977/78 | 11.9 | 13.2 | 29.2 | 28.2 | 26.5 | 24.5 | 12.6 | 10.2 | 11.6 | 7.60 | 5.20 | 5.10 | 15.4 |
| 1978/79 | 10.1 | 13.5 | 26.5 | 54.4 | 34.7 | 27.7 | 15.6 | 12.1 | 11.8 | 10.2 | 8.14 | 6.92 | 19.1 |
| 1979/80 | 18.5 | 38.4 | 88.4 | 55.1 | 43.4 | 34.1 | 21.7 | 13.5 | (11.9) | (9.9) | (7.9) | (7.9) | 29.2 |
| Moyenne | 17.7 | 38.2 | 53.6 | 66.1 | 54.3 | 36.8 | 21.0 | 14.5 | 12.7 | 10.5 | 8.12 | 8.16 | 28.3 |
| Ecart-type | 8.58 | 13.6 | 29.7 | 32.1 | 24.1 | 13.9 | 8.66 | 4.03 | 2.68 | 2.47 | 1.85 | 3.06 | |
| Max. | 32.9 | 57.2 | 133. | 145. | 119. | 67.3 | 49.0 | 25.2 | 18.4 | 14.6 | 11.9 | 15.6 | |
| Q1 | 25.9 | 47.8 | 71.9 | 85.9 | 67.9 | 45.6 | 24.6 | 16.5 | 14.4 | 13.0 | 9.29 | 10.2 | |
| Méd. | 13.0 | 41.2 | 48.1 | 65.0 | 52.3 | 34.0 | 20.1 | 13.6 | 11.9 | 9.90 | 8.14 | 7.46 | |
| Q3 | 10.6 | 31.0 | 27.8 | 41.4 | 34.1 | 26.1 | 15.2 | 11.1 | 11.3 | 8.19 | 6.96 | 9.85 | |
| Min. | 7.17 | 13.2 | 22.9 | 21.1 | 20.3 | 19.4 | 12.2 | 10.1 | 8.57 | 7.18 | 5.13 | 4.35 | |

Les débits mensuels classés sont représentés sur le graphe 7.46 Les graphes 7.47 et 7.48 donnent des exemples d'hydrogrammes annuels en année humide (1972-73, Q = 42.5 m³/s et sèche (1965-66, Q = 17.6 m³/s). Sur les hydrogrammes, on notera en saison humide un débit de base, bien soutenu entre les crues, qui se prolonge en saison sèche et atteste la présence de nappes d'altérites de bonne dimension mais probablement moins importantes que sur le bassin de la SAHANIVOTRY.

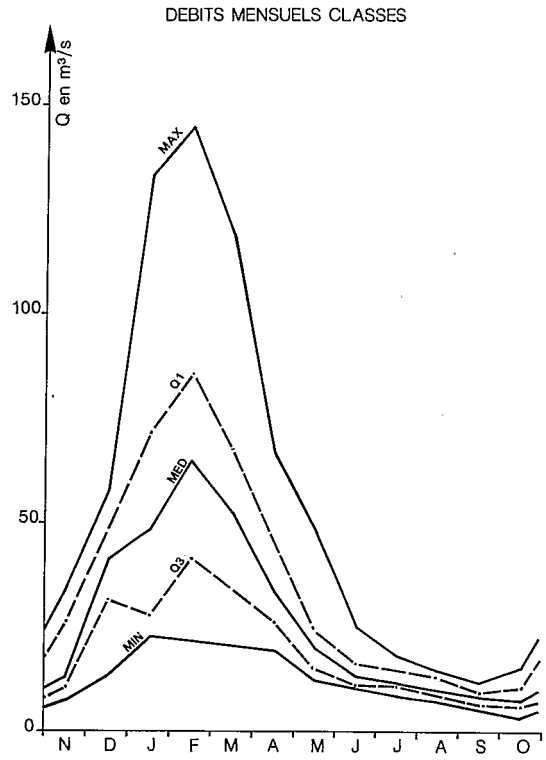



figure 7.46.

Manandona à Sahanivotry

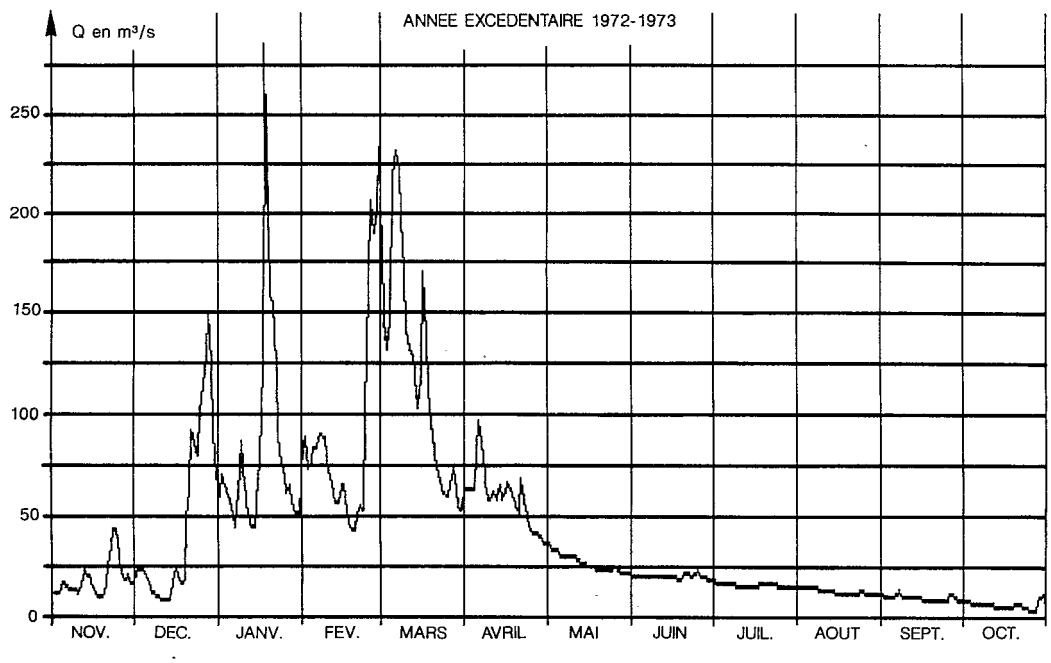
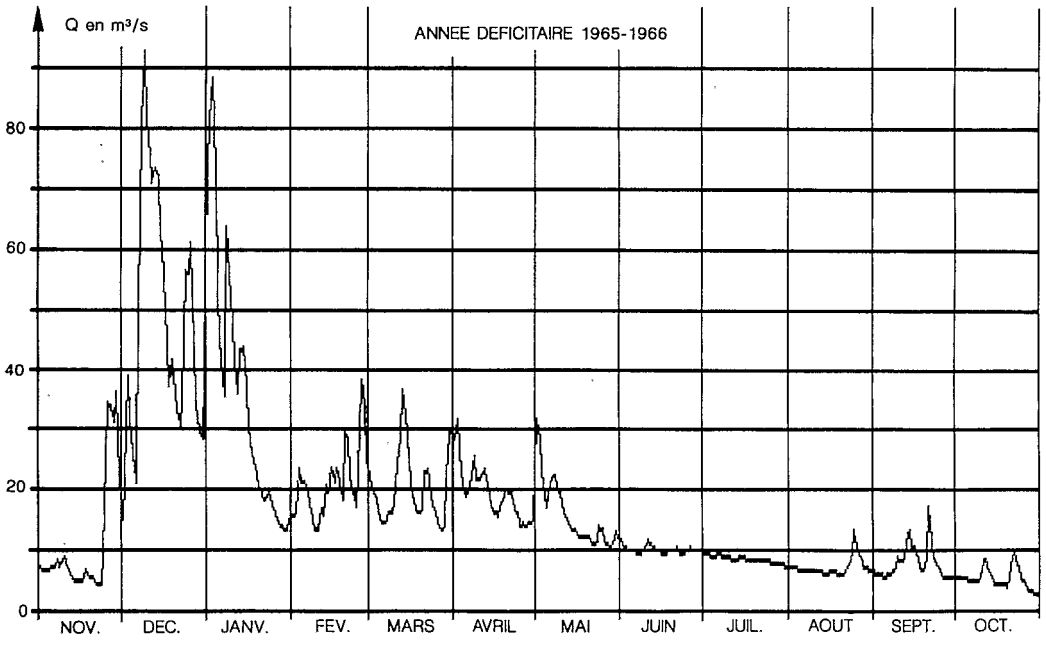



figure 7.47.

Manandona à Sahanivotry

figure 7.48.

Manandona à Sahanivotry




## 5.1.2.2. Apports annuels

Afin de compléter l'échantillon des valeurs annuelles observées, nous utiliserons d'une part la relation établie graphiquement entre le déficit d'écoulement DE et les précipitation annuelles P.

Elle est sommairement estimée à :

DE = .55 P + 100 ± 100 mm  1 000 <P < 2 000
DE = 1 200 mm  pour P> 2 000 mm

Et d'autre part la régression entre les lames écoulées de la MANANDONA et celles de la MANIA à FASIMENA.

H MANANDONA = .71 H MANIA + 88  ($R^2$ = .64  P > .995)

Les valeurs évaluées de 1945 à 1960 d'après DE = f (p) et de 1960 à 1983 d'après la MANIA sont les suivantes (tableau 7.75)

tableau 7.75.

Manandona à Sahanivotry
Valeurs annuelles estimées

| Année | 45.46 | 46.47 | 47.48 | 48.49 | 49.50 | 50.51 | 51.52 | 52.53 | 53.54 | 54.55 | 55.56 | 56.57 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hmm | 405 | 760 | 860 | 310 | 370 | 520 | 650 | 710 | 590 | 585 | 565 | 545 |
| Qm³/s | 18.6 | 34.9 | 39.4 | 14.3 | 17.0 | 23.9 | 29.8 | 32.6 | 27.1 | 26.9 | 25.9 | 25.1 |
| Année | 57.58 | 58.60 | 60.61 | 61.62 | 62.63 | | | | | 80.81 | 80.82 | 82.83 |
| Hmm | 460 | 655 | 580 | 390 | 535 | | | | | 585 | 1130 | 565 |
| Qm³/s | 21.2 | 30.1 | 26.7 | 17.9 | 24.6 | | | | | 26.9 | 52.0 | 26.0 |

L'ajustement statistique effectue sur l'échantillon de 38 valeurs observées et calculées correspond aux quantiles suivants :

tableau 7.76.

Manandona à Sahanivotry
Apports annuels

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| H mm | 356 | 397 | 451 | 576 | 731 | 826 | 914 |
| Q m³/s | 16.4 | 18.2 | 20.7 | 26.5 | 33.6 | 38.0 | 42.0 |
| q l/s/km² | 11.3 | 12.6 | 14.3 | 18.3 | 23.2 | 26.2 | 29.0 |

Loi log-normale (test B.M : 1.73, échelle : 625 mm, portion : -49.5, forme : .263)
Cinquantennales sèche et humide : 314 mm ( 14.4 m³/s) et 1024 mm (47.1 m³/s)

## 5.1.2.3. Crues

### *5.1.2.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux*

Dans la cuvette et en amont de la chute de TALAVIANA, cette station peut être considérée comme stable en moyennes et hautes eaux, comme le montrent les mesures réalisées entre 6,03 (Q = 2,32 m³/s) et 9,71 (Q = 305 m³/s).

L'extrapolation de type logarithmique qui a été utilisée pour la traduction des débits jusqu'à la cote 10,50 m, s'appuie sur les deux plus forts jaugeages effectués lors du passage du cyclone Geneviève (16-17/01/1970).

tableau 7.77.

Manandona à Sahanivotry

| Année | Q m3/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1963-64 | 163 | 13/02/64 18h00 | 8,85 | 3rel |
| 1964-65 | 256 | 23/01/65 12h00 | 9,48 | 3rel |
| 1965-66 | 108 | 09/12/65 06h00 | 8,22 | 3rel |
| 1966-67 | 154 | 13/03/67 18h00 | 8,77 | 3rel |
| 1967-68 | 91 | 11/12/67 12h00 | 7,97 | 3rel |
| 1968-69 | 242 | 09/02/69 06h00 | 9,40 | 3rel |
| 1969-70 | 329 | 16/01/70 06h00 | 9,80 | 3rel |
| 1970-71 | 205 | 30/01/71 12h00 | 9,17 | 3rel |
| 1971-72 | 133 | 19/02/72 06h00 | 8,52 | 3rel |
| 1972-73 | 361 | 17/01/73 12h00 | 9,94 | 3rel |
| 1973-74 | 125 | 15/03/74 06h00 | 8,43 | 3rel |
| 1974-75 | 262 | 18/02/75 12h00 | 9,51 | 3rel |
| 1975-76 | 187 | 27/02/76 18h00 | 9,05 | 3rel |
| 1976-77 | 512 | 03/02/77 | 10,50 | PHE |
| 1977-78 | 102 | 29/01/78 | 8,13 | 3rel |
| 1978-79 | 81 | 13/02/79 | 7,83 | 3rel |
| 1979-80 | ≥ 336 | 23/01/80 | 9,83 | Min |

#### *5.1.2.3.2. Résultats de l'enquête historique*

D'une rapide enquête, il ressort que seule la crue de l'année 1944-45 aurait atteint un niveau comparable à celui du cyclone Emilie (3/02/77).

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 17 janvier et le 18 février (date médiane : 3 février - dates extrêmes : 9 décembre et 15 mars).

Les quantiles suivants sont obtenus à partir d'une distribution Gamma-incomplète ajustée à l'échantillon des 17 valeurs du maximum annuel.

tableau 7.78.

Manandona à Sahanivotry

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 186 | 205 | 370 | (540) | (610) |
| q $l/s/km^2$ | 128 | 203 | 255 | (370) | (420) |

### 5.1.2.4. Basses eaux

Parfois perturbé par des précipitations de saison sèche, le tarissement est cependant toujours observable.

La pente de la droite de tarissement varie avec le potentiel initial des nappes d'altérites. Le coefficient $\alpha$ est compris entre .0063 (Tc = 180 j) et 0.114 (Tc = 60 j). Le coefficient $\alpha$ médian est évalué à .0087 (Tc = 80 jours).

$\alpha$ présente une bonne liaison avec le débit initial de base $Q_o$

$\alpha = (2.7\ Qo + 42)\ 10^{-4}$ $\quad (R^2 = .50 \quad P > .995)$

Le débit initial médian est de l'ordre de 16 m³/s ( 10.5 à 22.7 m³/s) et est observé généralement en mai. En année médiane le stock des réserves drainables est estimé à 159.106 m³ (lame équivalente : 110 mm)

tableau 7.79.

Manandona à Sahanivotry
Débits caractéristiques
de basses eaux (m³/s)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1964 | 9.62 | 5.47 | 4.55 | 3.87 | 29-10 |
| 1965 | 12.8 | 8.91 | 5.65 | 4.40 | 23-11 |
| 1966 | 6.80 | 4.16 | 2.80 | 2.55 | 04-11 |
| 1967 | 9.11 | 6.71 | 4.96 | 4.75 | 13-09 |
| 1968 | 7.06 | 4.20 | 3.35 | 2.98 | 09-11 |
| 1969 | 11.3 | 7.00 | 4.95 | 4.51 | 23-11 |
| 1970 | 9.87 | 5.01 | 3.91 | 3.29 | 26-10 |
| 1971 | 9.33 | 6.10 | 3.97 | 2.81 | 12-11 |
| 1972 | 12.8 | 8.39 | 6.94 | 6.06 | 11-10 |
| 1973 | 13.5 | 7.66 | 5.50 | 3.70 | 27-10 |
| 1974 | 14.4 | 8.67 | 7.44 | 6.70 | 04-10 |
| 1975 | 12.1 | 7.94 | 5.63 | 4.34 | 26-10 |
| 1976 | 14.4 | 9.02 | 7.17 | 5.18 | 27-11 |
| 1977 | - | - | - | 4.90 | - |
| 1978 | - | - | - | 3.20 | - |
| 1979 | 10.5 | 6.00 | 4.33 | 3.50 | 02-11 |

Le débit d'étiage minimum journalier se produit une année sur deux entre le 20 octobre et le 12 novembre (date médiane 1 novembre).

DCE = 1.08 QJ MIN + .56 (R2 = 8.5 P> .995)
DC11 = 1.11 QJ MIN + 2.15 (R2 = .62 P> .995)
DC09 = 1.58 QJ MIN + 4.33 (R2 = .57 P> 995)
DC9 = .89 Q 0708 + .5 (R2 = .95 P> 995)

tableau 7.80.

Manandona à Sahanivotry
QJ Min.

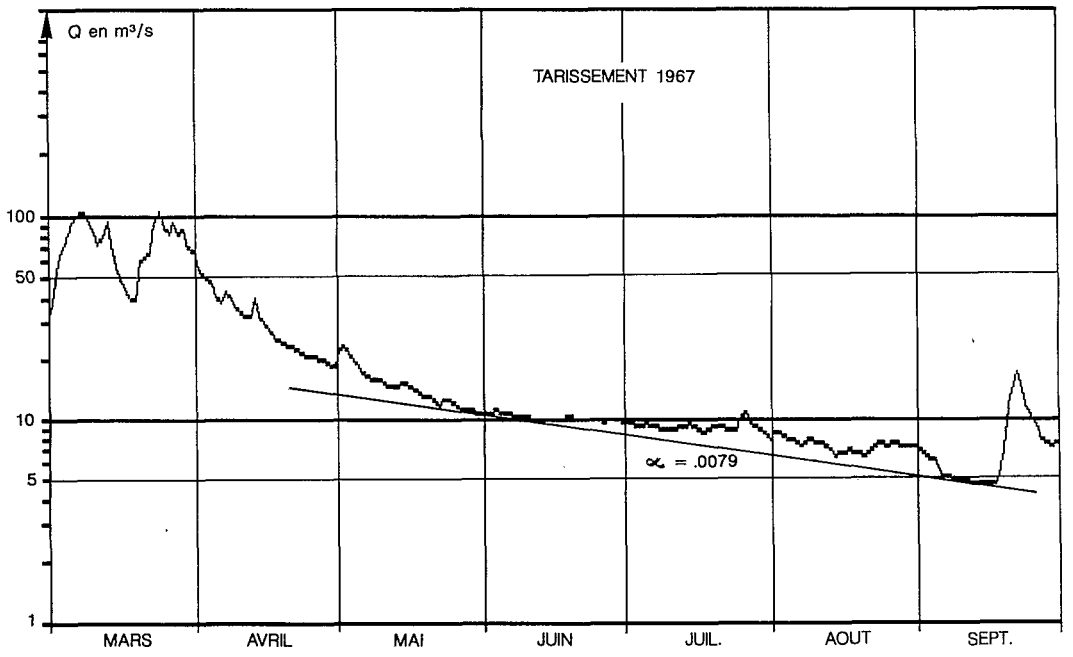
| | Années sèches | | Médiane | Années humides | |
|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence (ans) | 20 | 5 | 2 | 5 | 10 |
| Q (m³/s) | 2.81 | 3.21 | 3.98 | 5.00 | 5.69 |
| q (l/s/km²) | 1.99 | 2.21 | 2.75 | 3.45 | 3.92 |

Loi de Gumbel (test B.M. : .54, échelle : .91 m³/s, position : 3.64 m³/s
Vicennales sèches et humides : 2.65 m³/s ( 1.83 l/s/km²) et 6.34 m³/s (4.37 l/s/km²)

Correspondant au drainage de nappes moins développées sur le bassin supérieur de la MANANDONA, ainsi qu'à un tarissement plus rapide, les débits d'étiage spécifiques sont plus faibles que sur le bassin de la SAHANIVOTRY.

figure 7.49.

Manandona à Sahanivotry



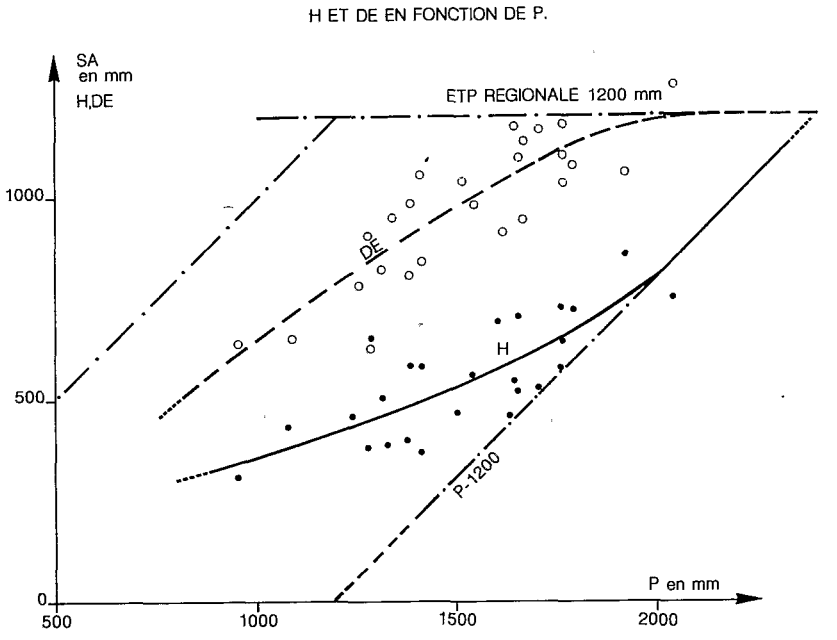

## 5.1.2.5. Bilan hydrologique

La lame écoulée interannuelles (600 mm) pour des précipitations moyennes interannuelles évaluées à 1 530 mm correspond à un déficit moyen de 930 mm (Kc = 39 %).

Le graphe 7.50 représente les lames et déficits annuels observés et calculés en fonction des précipitations annuelles. Le déficit d'écoulement, entre P = 800 mm et P = 2 000 mm, croît de 500 à près de 1 200 mm et correspond à une courbe d'allure convexe qui rejoint asymptotiquement l'ETP régionale (1 200 mm) pour des précipitations annuelles supérieures à 2 000 mm. Les lames annuelles, entre P = 800 mm et P = 2 000 mm, croissent de 300 à 800 mm, puis, au-delà de P = 2 000 mm, doivent correspondre à la relation H = P - 1 200, pour des conditions moyennes de température et de répartition des précipitations mensuelles. Le mécanisme mensuel du bilan hydrologique doit être assez proche du schéma présenté pour la MANIA à FASIMENA (cf. ci-dessous).

figure 7.50.

Manandona à Sahanivotry




## 5.1.3. La Mania à Fasimena

La station de FASIMENA (20 ° 17' S - 46° 48' E) contrôle un bassin versant de 6795 km2, d'une altitude moyenne de 1500 m, situé entièrement sur les formations cristallines du socle, essentiellement des migmatites, migmatites granitoïdes, granites, gneiss et micaschistes. À l'ouest, on note la présence de schistes et quartzites et au nord, sur le bassin de la MANANDONA, de basaltes et formations sédimentaires lacustres récentes. La latérisation est assez prononcée. La majeure partie du bassin est recouverte de prairie des hauts-plateaux avec quelques forêts galeries.

L'échelle a été mise en place en décembre 1955 et sans que le calage ne subisse de changement, a fait l'objet de plusieurs remises en état.

Trente-six mesures de débit ont été effectuées de 1956 à 1970 entre 43 et 450 m³/s. En raison d'un contrôle aval assuré par une chute, la courbe d'étalonnage est stable et a été extrapolée jusqu'à 4000 m³/s pour la cote maximale connue : 8.50 m ( mars 1959). Les lectures sont de qualité médiocre et de nombreuses reconstitutions ont du être effectuées à partir des stations voisines. Les données obtenues sont de qualité assez moyenne. Dix-sept stations pluviométriques (FANDRIANA, poids : .12, SOAVINA, .13, AMBOSITRA, .17, ILAKA, .10, etc.) permettent d'estimer les précipitations annuelles. La moyenne interannuelle, évaluée à 1325 mm, a dû être corrigée par la prise en compte des isohyètes interannuelles. La pluviométrie moyenne interannuelle (1 680 mm) correspond à une correction des précipitations mensuelles et annuelles de 1.27.

## 5.1.3.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

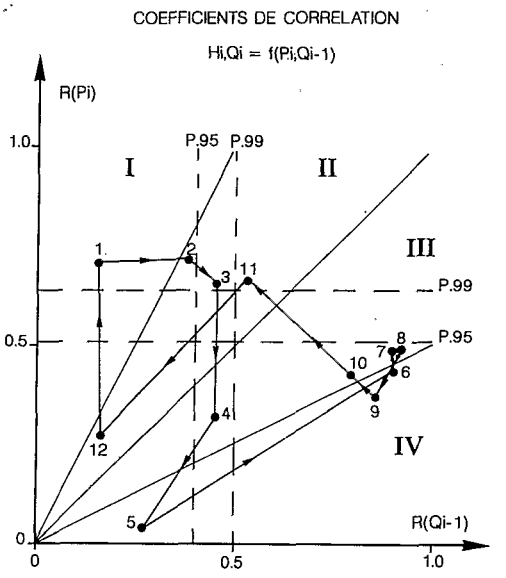
tableau 7.81.

Mania à Fasimena
Coefficients de corrélation

| Hi, Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .67 | (.27) | .71 | .72 | .66 | (.32) | (.04) | (.44) | .(.49) | (.49) | (.37) | (.42) |
| Pi - 1 | (.14) | (.48) | (..38) | (.42) | .20 | (.60) | (.25) | (.09) | (.25) | (.39) | .56 | (28) |
| Qi - 1 | .63 | (16) | (15) | (.38) | .45 | .70 | (.27) | .90 | .90 | .92 | .86 | .80 |

figure 7.51.

Mania à Fasimena




Ainsi que le montre le graphe 7.51, les relations restent de qualité assez médiocre en saison des pluies, probablement en raison de certaines valeurs erronées des débits et d'un nombre important dans l'échantillon (de taille réduite 13 valeurs) de crues à cheval sur deux mois. Pour la saison sèche (juin à octobre) les liaisons entre débits sont fortes, démontrant un drainage important des nappes d'altérites.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Q11 = .28 | P11 | + 1.27 | Q10-15 | ($R^2$=.85 P> .995) |
| HI* = .28 | PI | + .24 | PI-1-71 | ($R^2$=.55 P> .995) |
| HI** = .38 | PI | + .15 | PI-1-32 | ($R^2$= 54 P> .995) |
| H12 = .36 | P1211 - | 25 | (sans 59) | ($R^2$=.45 P> .99) |
| H01 = .52 | PO112- | 69 | | ($R^2$=.46 P= .99) |
| H02 = .54 | PO201- | 59 | | ($R^2$= 53 P> .995) |
| H03 = .62 | P0302 - | 47 | | ($R^2$=.51 P> .995) |
| Q04 = .64 | Q03 | + 10.6 | (sans 59) | ($R^2$=.49 P> .995) |
| Q05 = .28 | Q0304 | + 58 | | ($R^2$=.49 P> .995) |
| Q06 = .61 | Q05 | + 28.2 | | ($R^2$= .81 P>.995) |
| Q07 = .72 | Q06 | + 22.3 | | ($R^2$=.81 P> .995) |
| Q08 = .81 | Q07 | + 10.7 | | ($R^2$=.85 P> .995) |
| Q09 = .79 | Q08 | + 5.4 | | ($R^2$=.74 P> .995) |
| Q10 = .95 | Q09 | + .5 | | ($R^2$=.64 P> .995) |

tableau 7.82.

Mania à Fasimena
Régressions mensuelles

* décembre et janvier
** février et mars

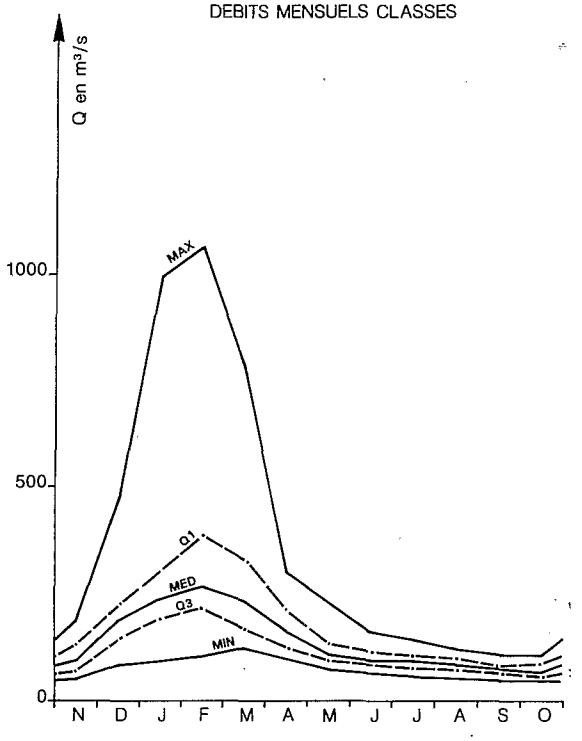



figure 7.52.

Mania à Fasimena

figure 7.54.
Mania à Fasimena

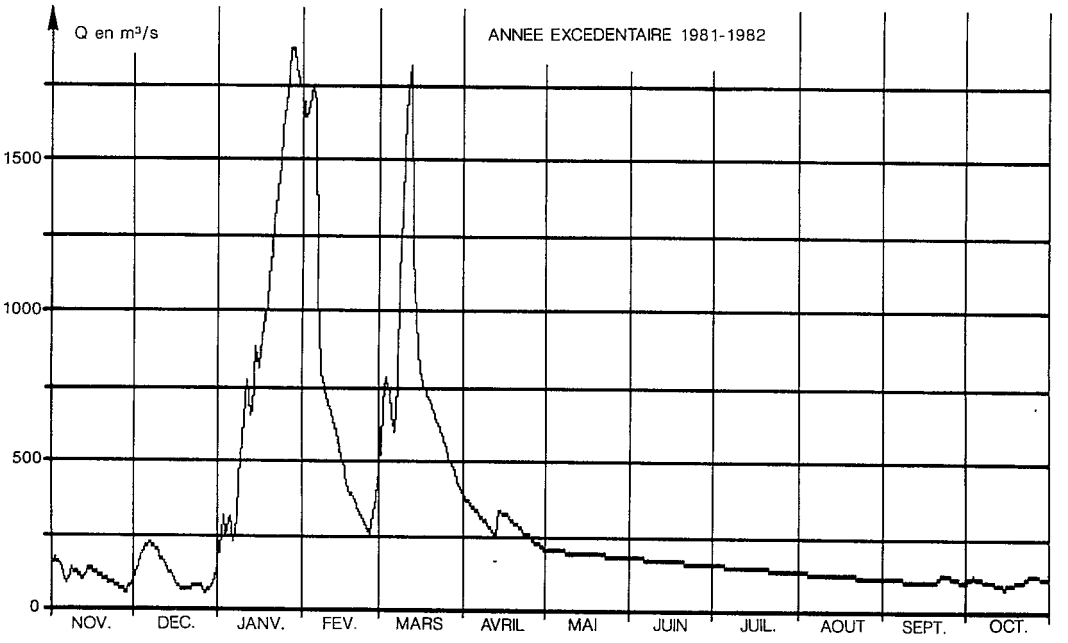
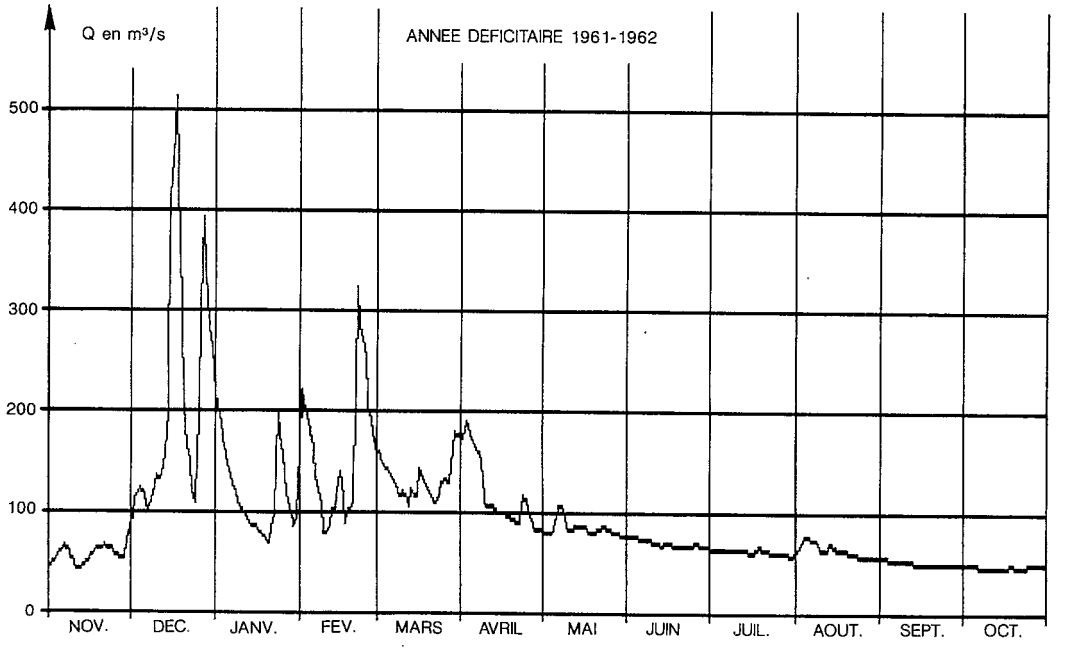



figure 7.55.
Mania à Fasimena



Les relations ont permis de corriger les valeurs douteuses de novembre 1958 à avril 1959, de novembre 1959 à avril 1960 et de compléter les lacunes d'observations (novembre et décembre 1955)

Le tableau 7.83 rassemble les valeurs observées et calculées de novembre 1959 à décembre 1983.

Les quantiles des débits mensuels classés sont représentés sur le graphe 7.52. Des hydrogrammes annuels d'une année humide (1981-82, Q = 318 m³/s) et d'une année sèche (1961-62, Q = 98.2 m³/s) sont représentés sur les graphes 7.54 et 7.55. Les crues sont relativement massives et le débit de base soutenu.

tableau 7.83.

Mania à Fasimena
Débits moyens mensuels
et annuels

Débits en m³/s
Aire : 6795 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1955/56 | (75.) | (203.) | 277. | 245. | 157. | 111. | 90.1 | 80.5 | 78.4 | 70.0 | 58.3 | 49.4 | (124.) |
| 1956/57 | 50.9 | 208. | 188. | 203. | 232. | 192. | 100. | 86.0 | 77.2 | 73.2 | 60.2 | 54.2 | 127. |
| 1957/58 | 64.0 | 160. | 230. | 267. | 360. | 103. | 80.5 | 76.9 | 72.4 | 69.8 | 67.0 | 54.1 | 133. |
| 1958/59 | (56.5) | (188.) | (304.) | (253.) | (452.) | (301.) | 110. | 79.2 | 81.4 | 84.8 | 81.2 | 75.4 | (172.) |
| 1959/60 | (114.) | (160.) | (229.) | (245.) | (140.) | (100.) | 86.5 | 67.5 | 58.2 | 51.5 | 44.1 | 50.1 | (112.) |
| 1960/61 | 57.4 | 134. | 350. | 103. | 232. | 162. | 91.7 | 75.0 | 79.2 | 81.3 | 60.5 | 53.5 | 124. |
| 1961/62 | 57.7 | 214. | 119. | 158. | 134. | 117. | 85.0 | 70.0 | 62.4 | 64.0 | 51.6 | 48.1 | 98.2 |
| 1962/63 | 96.1 | 177. | 314. | 385. | 201. | 151. | 111. | 111. | 92.7 | 80.9 | 64.8 | 62.8 | 153. |
| 1963/64 | 94.1 | 177. | 112. | 258. | 184. | 98.7 | 76.6 | 85.3 | 92.3 | 85.7 | 70.5 | 57.2 | 115. |
| 1964/65 | 102. | 219. | 354. | 263. | 224. | 193. | 114. | 95.2 | 115. | 103. | 96.1 | 88.4 | 164. |
| 1965/66 | 119. | 263. | 204. | 147. | 136. | 122. | 104. | 85.8 | 77.1 | 73.6 | 67.8 | 55.2 | 121. |
| 1966/67 | 59.4 | 107. | 242. | 152. | 322. | 144. | 98.5 | 85.5 | 81.3 | 76.3 | 77.3 | 73.4 | 127. |
| 1967/68 | 147. | 229. | 118. | 169. | 129. | 99.4 | 79.7 | 75.7 | 72.6 | 61.7 | 52.5 | 51.7 | 107. |
| 1968/69 | 58.9 | 165. | 286. | 639. | 240. | 166. | 139. | 105. | 93.1 | 101. | 77.2 | 67.3 | 175. |
| 1969/70 | 76.2 | 239. | 700. | 572. | 317. | 201. | 155. | 128. | 111. | 97.3 | 77.9 | 63.2 | 226. |
| 1970/71 | 153. | 128. | 253. | 349. | 254. | 153. | 107. | 92.6 | 88.1 | 74.2 | 71.9 | 57.0 | 147. |
| 1971/72 | 85.9 | 172. | 95.4 | 332. | 279. | 172. | 114. | 96.7 | 99.4 | 91.9 | 70.3 | 87.0 | 141. |
| 1972/73 | 110. | 197. | 299. | 327. | 453. | 246. | 133. | 123. | 103. | 102. | 94.6 | 78.1 | 188. |
| 1973/74 | 184. | 257. | 227. | 260. | 289. | 217. | 230. | 146. | 122. | 101. | 80.9 | 95.9 | 184. |
| 1974/75 | 133. | 217. | 257. | 460. | 337. | 227. | 162. | 137. | 125. | 114. | 100. | 94.4 | 195. |
| 1975/76 | 149. | 170. | 234. | 248. | 217. | 219. | 133. | 113. | 105. | 100. | 72.1 | 104. | 155. |
| 1976/77 | 106. | 251. | 193. | 1060. | 467. | 299. | 167. | 128. | 115. | 111. | 99.2 | 107. | 253. |
| 1977/78 | 126. | 86.1 | 160. | 151. | 157. | 144. | 95.3 | 93.7 | 99.5 | 80.6 | 72.0 | 69.0 | 111. |
| 1978/79 | 76.4 | 81.9 | 152. | 398. | 295. | 161. | 115. | 103. | 105. | 100. | 93.0 | 79.9 | 145. |
| 1979/80 | 139. | 281. | 648. | 377 | 163. | 129. | 100. | 84.3 | 101. | 106. | 65.0 | 54.3 | 187. |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1980/81 | 79.3 | 190. | 207. | 228. | 362. | 253. | 153. | 112. | 97.6 | 86.1 | 77.9 | 85.4 | 161.1 |
| 1981/82 | 108. | 122. | 992. | 708. | 790. | 288. | 188. | 165. | 142. | 120. | 107. | 105. | 318. |
| 1982.83 | 147. | 123. | (238) | 281. | 213. | 134. | 106. | 112. | 95.7 | 79.8 | 64.2 | 67.3 | 138 |
| 1983.84 | 77.3 | 475. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 100. | 193. | 285. | 330. | 276. | 175. | 119. | 100. | 94.4 | 87.2 | 74.1 | 71.0 | 158. |
| Ecart-type. | 36. | 752 | 194. | 205. | 141. | 61.7 | 36.1 | 24.4 | 19.5 | 17.1 | 15.7 | 18.7 | |
| Max. | 184. | 475. | 992. | 1060 | 790. | 301. | 230. | 165. | 142. | 120. | 107. | 107. | |
| 75% | 130. | 224. | 302. | 381. | 330. | 218. | 136. | 113. | 105. | 101. | 81.0 | 86.2 | |
| 50% | 96.1 | 188. | 236. | 262. | 236. | 162. | 109. | 94.5 | 94.4 | 85.3 | 72.0 | 67.3 | |
| 25" | 69.5 | 147. | 190. | 215. | 173. | 125. | 93.5 | 82.4 | 78.8 | 73.9 | 64.5 | 54.2 | |
| Min. | 50.9 | 81.9 | 95.4 | 103. | 129. | 98.7 | 76.6 | 67.5 | 58.2 | 51.5 | 44.1 | 48.1 | |

## 5.1.3.2. Apports annuels

L'échantillon 1955-1970 (15 valeurs) de lames écoulées et précipitations annuelles correspond à la relation.

H = .62 (P-660) ($R^2$ = .65 P> .995)

Les lames écoulées de 1945 à 1955 peuvent être évaluées à partir de cette relation.

| Années | 45.46 | 46.47 | 47.48 | 48.49 | 49.50 | 50.51 | 51.52 | 52.53 | 53.54 | 54.55 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hmm | 500 | 930 | 1100 | 370 | 445 | 695 | 875 | 775 | 700 | 585 |
| Qm³/s | 108. | 200. | 236. | 79.7 | 95.9 | 150. | 188. | 167. | 151. | 126. |

La loi de distribution ajustée à l'échantillon de 38 valeurs observées et calculées correspond aux quantiles suivants :

tableau 7.84.
Mania à Fasimena
Apports annuels

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| H mm | 398 | 442 | 486 | 545 | 684 | 872 | 996 | 1115 | 1270 |
| Q m³/s | 85.7 | 95.2 | 105. | 117. | 147. | 188 | 214 | 240 | 273 |
| q l/s/km² | 12.6 | 14.0 | 15.5 | 17.2 | 21.6 | 27.7 | 31.5 | 35.3 | 40.2 |

Loi de Gumbel (test B.M. : 1.27, échelle : 165 mm, position : 624 mm.

Centennales sèche et humide : 371 mm (Q= 79.9 m³ /s) et 1 385 mm (298 m³/s).

## 5.1.3.3. Crues

### *5.1.3.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux*

Les conditions hydrauliques (chute) permettent une évaluation correcte des débits de très hautes eaux.

L'extrapolation de type logarithmique a été menée de 3,05 m (cote du plus fort jaugeage réalisé le 9/01/1956 - Q = 450 m³/s) à 8,50 m.

tableau 7.85.

Mania à Fasimena
Maximums annuels de crues

| Année | Q m3/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1955-56 | 797 | 16/01/56 | | 3rel |
| 1956-57 | 373 | 10/02/57 | 2,79 | 3rel |
| 1957-58 | 688 | 07/03/58 06h00 | 3,70 | 3rel |
| 1958-59 | 3900 | 31/03/59 | PHE à MAHAZINA | |
| 1959-60 | 777 | 03/02/60 06H00 | 3,92 | 3rel |
| 1960-61 | 475 | 05/01/61 | 3,13 | 3rel |
| 1961-62 | 526 | 17/12/62 | 3,28 | 3rel |
| 1962-63 | 829 | 31/03/63 | 4,05 | 3rel |
| 1963-64 | 664 | 13/02/64 | 3,64 | 3rel |
| 1964-65 | 616 | 23/01/65 | 3,52 | 3rel |
| 1965-66 | 801 | 11/12/65 06h00 | 3,98 | 3rel |
| 1966-67 | 628 | 28/03/67 | 3,55 | 3rel |
| 1967-68 | 454 | 24/11/67 | 3,07 | 3rel |
| 1968-69 | 1430 | 06/02/69 | 5,25 | 3rel |
| 1969-70 | 2000 | 25/02/70 | 6,15 | 3rel |
| 1970-71 | 882 | 30/01/71 | 4,18 | 3rel |
| 1971-72 | 765 | 17/12/72 | 3,89 | 3rel |
| 1972-73 | 862 | 16/03/73 | 4,13 | 3rel |
| 1973-74 | 624 | 01/01/74 | 3,54 | 3rel |
| 1974-75 | 805 | 20/02/75 | 3,99 | 3rel |
| 1975-76 | 636 | 07/01/76 | 3,57 | 3rel |
| 1976-77 | 2850 | 05/02/77 | 7,25 | PHE |
| 1977-78 | 345 | 13/03/78 12h00 | 2,87 | 3rel |
| 1978-79 | 700 | 23/02/79 12h00 | 3,73 | 3rel |
| 1979-80 | 2420 | 23/01/80 | 6,72 | PHE |
| 1980-81 | 801 | 27/02/81 06h00 | 3,98 | 3rel |
| 1981-82 | ≥ 1880 | 27/01/82 12h00 | 5,99 | Min |
| 1982-83 | 560 | 16/02/83 12h00 | 3,38 | 3rel |
| 1983-84 | ≥ 765 | 18/12/83 06h00 | 3,89 | Min |

### *5.1.3.3.2. Résultats de l'enquête historique*

Aucune observation n'ayant pu être faite lors (échelle largement submergée) ou à la suite (nivellement des

hautes eaux) des crues de mars 1959, le maximum annuel (8,50 m) a été déduit (corrélation) des observations effectuées par le Génie rural entre 1957 et 1960, sur une échelle (MAHAZINA) installée quelques kilomètres en amont de FASIMENA et de la confluence avec la MANANDONA.

Une année sur deux de maximum est observé entre le 6 janvier et le 24 février (date médiane - dates extremes : 11 décembre et 31 mars).

Une distribution de Frechet, ajustée à l'échantillon des 29 maximums annuels observés, correspond aux quantiles suivants :

tableau 7.86.

Mania à Fasimena
Maximums annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 758 | 1260 | 1770 | 3800 | (5300) |
| q l/s/km² | 112 | 185 | 260 | 560 | (780) |

## 5.1.3.4. Basses eaux

Le tarissement est observable tous les ans. Les débits initiaux Q0 sont compris entre 62 et 200 m³/s (la moitié des valeurs comprises entre 81 et 115 m³/s). Les coefficients $\alpha$ de la droite de tarissement sont compris entre .0032 et .0060 (la moitié des valeurs comprises entre .0038 et .0049). Le coefficient $\alpha$ est influencé par le débit initial Qo représentant le potentiel des nappes en début de tarissement.

$\alpha = (.144\ Q0 + 30)\ 10^{-4}$ $\quad (R^2 = .35 \quad P > .995)$

Pour un débit médian de 100 m³/s, $\alpha$ = .0043 (Tc = 161 jours) et la valeur des réserves peut être évaluée à 200.106 m³ (lame équivalente : 295 mm).

figure 7.56.

Mania à Fasimena

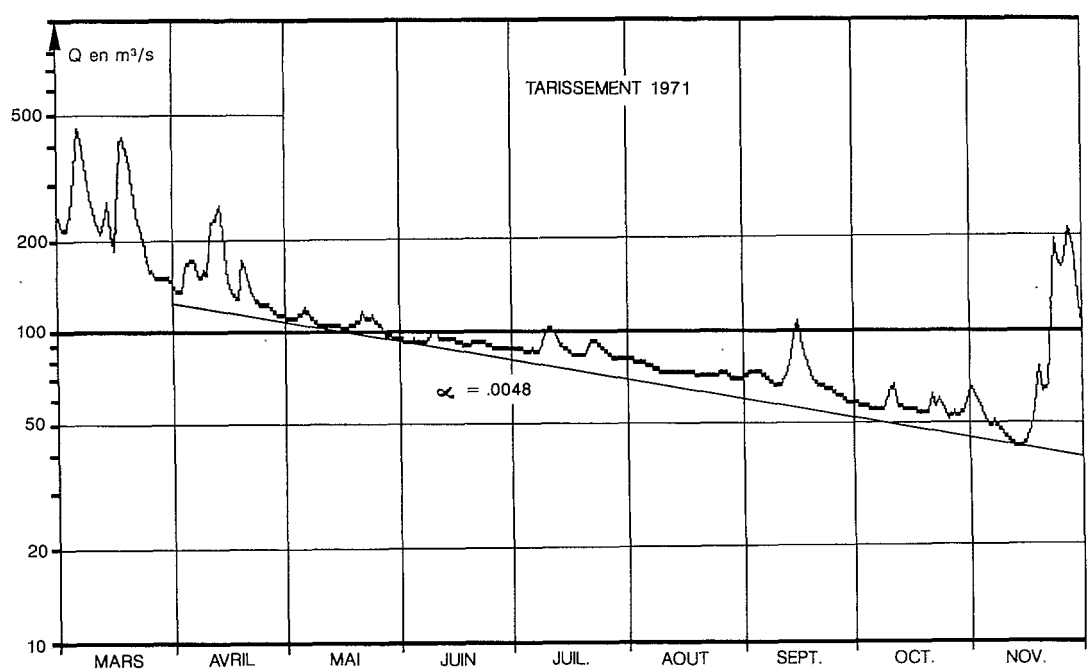


tableau 7.87.

Mania à Fasimena
Débits caractéristiques
de basses eaux (en $m^3$)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1956 | 63.4 | 45.7 | 41.4 | 39.9 | 14-11 |
| 1957 | 65.7 | 56.0 | 52.0 | 48.3 | 24-11 |
| 1958 | 70.3 | 55.9 | 41.3 | 38.3 | 17-10 |
| 1959 | 81.8 | 76.6 | 73.7 | 71.6 | 27-10 |
| 1960 | 52.9 | 43.4 | 35.7 | 30.5 | 15-11 |
| 1961 | 71.8 | 53.0 | 49.0 | 44.0 | 31-10 |
| 1962 | 61.7 | 49.9 | 46.5 | 45.8 | 09-10 |
| 1963 | 81.2 | 62.3 | 57.3 | 52.2 | 26-10 |
| 1964 | 72.3 | 60.9 | 55.0 | 45.4 | 29-10 |
| 1965 | 94.7 | 76.5 | 71.7 | 66.2 | 11-11 |
| 1966 | 66.4 | 49.3 | 41.3 | 38.3 | 07-12 |
| 1967 | 79.7 | 66.8 | 60.4 | 53.4 | 28-10 |
| 1968 | 60.2 | 45.7 | 42.6 | 40.0 | 10-11 |
| 1969 | 89.3 | 65.9 | 53.3 | 45.8 | 24-11 |
| 1970 | 94.5 | 69.3 | 59.4 | 55.8 | 26-10 |
| 1971 | 73.5 | 56.1 | 48.4 | 42.0 | 14-11 |
| 1972 | 86.2 | 67.6 | 62.1 | 56.0 | 03-10 |
| 1973 | 101. | 85.6 | 61.1 | 55.6 | 28-10 |
| 1974 | 102. | 83.2 | 72.8 | 70.3 | 02-10 |
| 1975 | 117. | 97.8 | 92.0 | 86.4 | 27-10 |
| 1976 | 99.3 | 69.2 | 60.8 | 53.0 | 18-10 |
| 1977 | 100. | 87.1 | 81.9 | 74.5 | 23-10 |
| 1978 | 78.8 | 68.7 | 48.5 | 39.1 | 05-11 |
| 1979 | 97.0 | 80.3 | 72.6 | 47.3 | 06-11 |
| 1980 | 82.3 | 54.9 | 48.9 | 44.0 | 14-11 |
| 1981 | 88.7 | 74.0 | 64.5 | 60.3 | 28-11 |
| 1982 | 118. | 103. | 92.2 | 82.9 | 15-10 |
| 1983 | 81.4 | 61.3 | 53.7 | 49.6 | 14-10 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 118. | 103. | 92.2 | 86.4 | 07.12 |
| Q1 | 95.9 | 76.6 | 68.1 | 58.2 | 15.11 |
| Méd. | 81.6 | 66.4 | 56.2 | 49.0 | 29.10 |
| Q3 | 71.0 | 55.4 | 48.4 | 43.0 | 20.10 |
| Min. | 52.9 | 43.4 | 35.7 | 30.5 | 02.10 |

DCE = 1.01 QJ MIN + 5.46 ($R^2$ = .91 P> .995)
DC11 = .98 QJ MIN + 15. ($R^2$ = .79 P> .995)
DC9 = .99 QJ MIN + 31. ($R^2$ = .69 P> .995)

QJ MIN = 4.1 Q06 $^{.75}$ e $^{-.003\ T}$ ($R^2$ = .59 P> .995)

tableau 7.88.

Mania à Fasimena
Débits d'étiage QJ Min.
Ajustement sur 28 valeurs observées

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q m³/s | 35.0 | 37.2 | 41.2 | 50.2 | 62.7 | 71.1 | 79.3 |
| q l/s/km² | 5.2 | 5.5 | 6.1 | 7.4 | 9.2 | 10.5 | 11.7 |

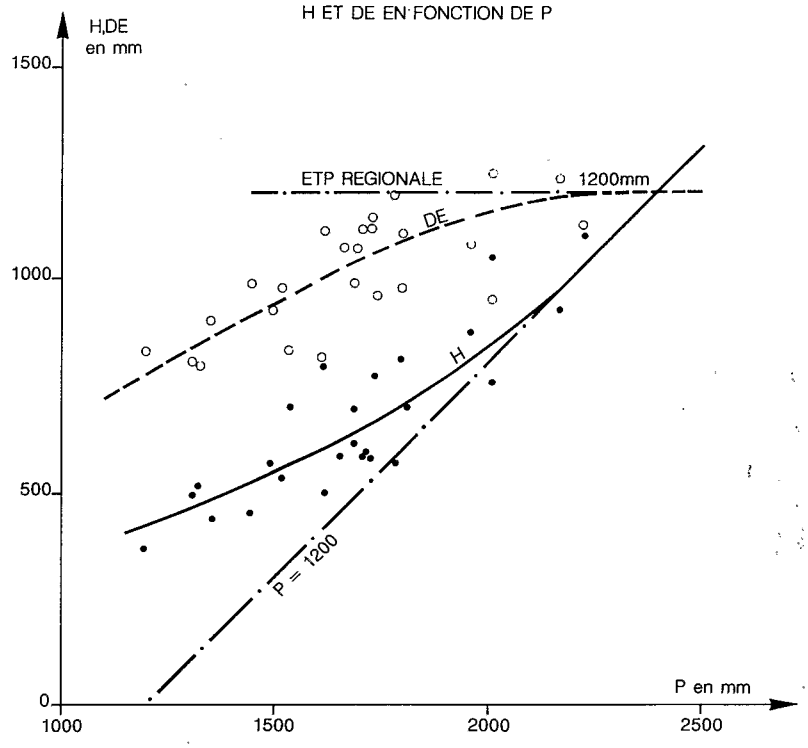
Loi log-normale (test B.M : 2.08, échelle : 31.7 m³/s, position : 18.5m³/s , forme : .396)
Cinquantennales sèche et humide : 32.5 m³/s (4.8 l/s/km²) et 90 m³/s (13.2 l/s/km²)

Les débits d'étiage sont nettement plus soutenus que sur le bassin de la MANANDONA. Les formations altérées du haut bassin forment un magasin plus important (295 mm contre 110 mm sur la MANANDONA et le tarissement est plus lent (Tc = 161 jours contre 80 jours pour la MANANDONA)

## 5.1.3.5. Bilan hydrologique

figure 7.57.

Mania à Fasimena



Les précipitations moyennes interannuelles sont estimées à 1680 mm sur le bassin. La lame annuelle moyenne (720 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 960 mm (Ke = 43 %)

En année moyenne, le déficit d'écoulement (équivalent à l'ETR) représente 80 % de l'ETP régionale (1 200 mm). Cette réduction, plus forte pour les années sèches, diminue régulièrement avec l'accroissement des précipitations annuelles et, pour P > 2 200 mm, on peut considérer que le déficit d'écoulement, dans des conditions moyennes de températures et répartition des pluies, est voisin de l'ETP régionale (graphe 7.57). Les lames écoulées, croissent régulièrement de H = 400 mm (pour P voisin de 1 100 mm) à H = 1 000 mm (pour P = 2 200 mm). Au delà de cette valeur de P, la courbe moyenne de l'écoulement est assimilable à une droite d'expression H = P- 1 200.

La saison des pluies (novembre-mars) totalise 83 % des précipitations et le stock constitué par les excédents pluviométriques représente en fin mars 468 mm. Ces réserves sont utilisés en saison sèche (avril-octobre) pour assurer la quasi-totalité des écoulements (269 mm, plus 4 mm à partir des précipitations d'octobre) et pour soutenir l'ETR d'avril à juillet à partir de la réserve utile des sols. L'ETR peut-être ainsi voisine de l'ETR jusqu'à fin juin puis subit une réduction due à l'épuisement de la réserve utile des sols et à la faiblesse des précipitations de saison sèche. Sur la période l'ETR ne représente que 66 % de l'ETP (graphe 7.58).

figure 7.58.
Mania à Fasimena

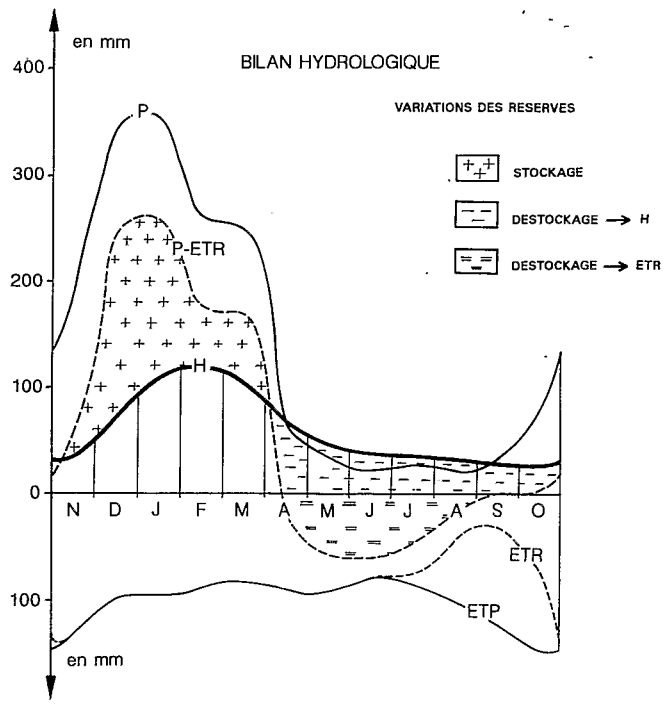


tableau 7.89.

Mania à Fasimena
Bilan hydrologique
(lames en mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 190 | 343 | 355 | 261 | 251 | 74 | 34 | 21 | 27 | 21 | 29 | 74 | 1680 |
| ETP | 129 | 96 | 94 | 84 | 82 | 89 | 91 | 82 | 84 | 102 | 121 | 146 | 1200 |
| ETR | 129 | 96 | 94 | 84 | 82 | 89 | 91 | 80 | 75 | 41 | 29 | 70 | 960 |
| P-ETR | 61 | 247 | 261 | 177 | 169 | -15 | -57 | -59 | -48 | -20 | 0 | 4 | 720 |
| H | 37 | 74 | 111 | 118 | 107 | 66 | 46 | 38 | 36 | 32 | 28 | 27 | 720 |
| ΔR+ | 24 | 173 | 150 | 59 | 62 | - | - | - | - | - | - | - | +468 |
| ΔR- | - | - | - | - | - | 81 | 103 | 97 | 84 | 52 | 28 | 23 | -468 |
| R | 24 | 197 | 347 | 406 | 468 | 387 | 284 | 187 | 103 | 51 | 23 | 0 | - |

## 5.1.4. La Sandrandahy à Sandrandahy

La SANDRANDAHY est un petit affluent rive gauche de la MANIA. Son bassin constitué de roches éruptives et métamorphiques est formé d'un vaste plateau d'altitude (altitude moyenne : 1300 m) bordé par des reliefs culminant à 1600 mètres. La basse vallée alluviale est occupée par des cultures rizicoles. La vallée de faible relief, avec quelques rares hauteurs résiduelles, assure, comme celle de la SAHANIVOTRY, un drainage assez médiocre. Les précipitations annuelles moyennes sont voisines de 1800 mm. 80% des précipitations sont observées entre le 25 novembre et le 20 juin.

La station (20° 20' S - 47° 18' E) contrôle un bassin versant de 286 km². Elle a été installée en février 1980 et des observations effectuées jusqu'en décembre 1983. Trente et une mesures de débit ont été effectuées entre 1.6 m³/s et 25.6 m³/s. La courbe d'étalonnage a été extrapolée jusqu'à 100 m³/s.

tableau 7.90.

Sandrandahy à Sandrandahy
Débits moyens mensuels
et annuels en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1979/80 | - | - | - | - | 7.63 | 5.48 | 4.82 | 3.85 | 4.15 | 3.81 | 2.82 | 2.15 | - |
| 1980/81 | 2.85 | 6.18 | 5.29 | 8.30 | 15.7 | 10.1 | 5.47 | 4.13 | 4.14 | 3.58 | 2.67 | 3.51 | 6.02 |
| 1981/82 | 3.54 | 4.65 | 28.5 | 30.1 | 27.1 | 9.06 | 6.72 | 6.61 | 5.82 | 5.04 | 4.23 | 3.71 | 11.2 |
| 1982/83 | 5.22 | 4.26 | 6.90 | 9.64 | 5.19 | 3.74 | 3.26 | 2.88 | 3.26 | 2.35 | 1.77 | 1.47 | 4.12 |
| 1983/84 | 2.86 | 17.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne. | 3.78 | 6.94 | 10.1 | 11.6 | 9.76 | 6.33 | 4.43 | 3.78 | 3.59 | 3.34 | 2.90 | 2.79 | 5.75 |

Les débits mensuels à la station présentent une bonne corrélation avec ceux de la MANIA à FASIMENA (46 couples).

Q SAND. = .034 Q FASIM. + .38 ($R^2$ = .95 P> .995)

Cette régression permet d'évaluer les débits moyens interannuels (moyennes de l'échantillon étendu du tableau 7.90).

Pour une pluviomètrie interannuelle de 1 800 mm, la lame moyenne (635 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 1165 mm (Ke = 35 %) reflètant le drainage médiocre de ce bassin.

Les lames décennales sèche et humide peuvent, par comparaison avec la MANIA, être estimées à 440 mm (Q= 4 m³/s) et 845 mm (Q = 7.65 m³/s).

Equipée en février 1980, cette station a fait l'objet d'un étalonnage assez complet pour le lit mineur (jaugeages et extrapolation par la formule de Manning-Strickler).

Pour l'évaluation du débit maximum connu (cyclone Hyacinthe), il a été admis que transitait par la plaine d'inondation rive droite un débit au moins équivalent au chenal principal.

| Année | Q m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1979-80 | (235) | 22/01/80 | 6,30 | |
| 1980-81 | 49 | 01/03/81 02h00 | 3,42 | |
| 1981-82 | (95) | 04/02/81 07h00 | 4,30 | |
| 1982-83 | 33 | 25/02/83 19h00 | 3,00 | |
| 1983-84 | 54 | 16/12/83 21h00 | | Min |

Un ordre de grandeur de la crue décennale a été estimé à partir des résultats de l'étude statistique menée sur la MANIA à FASIMENA : 150 m³/s (525 l/s/km²).

Les débits d'étiages observés sont les suivants :

29.11.80 Q MIN = 1.39 m³/s (4.86 l/s/km²) DCE = 1.59 m³/s
26.12.81 Q MIN = 1.56 m³/s (5.45 l/s/km²) DCE = 1.92 m³/s
16.10.82 Q MIN = 2.07 m³/s (7.24 l/s/km²) DCE = 2.37 m³/s
07.10.83 Q MIN = .673 m³/s (2.36 l/s/km²) DCE = .944 m³/s

L'étiage médian peut-être évalué à 1.5 m³/s (5.2 l/s/km²).

## 5.1.5. La Mania à Sandrandahy

Le bassin de la MANIA à SANDRANDAHY est situé sur les hauts-plateaux migmato-gneissiques du socle (région d'AMBOSITRA). Son altitude moyenne est de 1490 m. Le relief reste relativement modéré (6.8 m/km).

La station de SANDRANDAHY (20° 21' S- 47° 17' E) est située au pont de la MANIA, à l'ouest du village et contrôle un bassin de 1 770 km².

L'échelle, installée en février 1980, a été observée de février 1980 à décembre 1984. Vingt jaugeages, entre 13.4 et 178 m³/s, permettent en raison de la stabilité de la section (seuil rocheux) d'établir une courbe d'étalonnage

univoque et précise qui a été extrapolée jusqu'à 1450 m³/s. La pluviométrie moyenne du bassin a été évaluée à 2 080 mm d'après les isohyètes.

tableau 7.91.

Mania à Sandrandahy

Débits moyens mensuels et annuels

Débitsen m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1979/80 | - | - | - | - | 65.3 | 47.0 | 40.7 | 33.0 | 37.7 | 32.9 | 23.7 | 20.3 | - |
| 1980/81 | 33.7 | 43.6 | 41.3 | 53.1 | 105. | 80.7 | 51.4 | 39.0 | 33.5 | 30.4 | 26.5 | 33.5 | 47.6 |
| 1981/82 | 28.5 | 49.2 | 172. | 216. | 211. | 81.9 | 60.7 | 52.1 | 46.6 | 38.4 | 33.0 | 31.9 | 84.4 |
| 1982/83 | 38.1 | 34.9 | 52.2 | 59.7 | 43.5 | 39.7 | 30.2 | 28.9 | 30.1 | 23.3 | 17.9 | 18.1 | 34.6 |
| 1983/84 | 30.0 | 120. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 33.6 | 53.9 | 74.1 | 84.0 | 72.1 | 50.0 | 37.7 | 33.6 | 32.4 | 30.8 | 27.9 | 27.2 | 46.3 |

Les débits mensuels à la station présentent une bonne corrélation avec ceux de la MANIA à FASIMENA (46 couples)

Q MANIA/SAND = .22 Q FASIM. + 11.7 ($R^2$ = .90 P> .995)

Cette régression a permis d'évaluer les débits moyens interannuels (moyennes sur l'échantillon étendu du tableau 7.91) .

Pour une pluviométrie interannuelle de 2 080 mm, la lame moyenne (825 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 1 255 mm (Ke = 40 %).

Les lames décennales sèche et humide peuvent être évaluées, par comparaison avec la MANIA à FASIMENA, à 620 mm (34.8 m³/s) et 1050 mm (59 m³/s).

L'extrapolation (formule de Manning-Strickler) menée entre 2,98 et 7,63 m, a permis l'évaluation des débits maximaux annuels de la période 1979-84 et de 1958-59 (plus forte crue connue entre 1958 et 1984).

Maximums annuels de crues

| Année | Q m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1958-59 | (1450) | | 7,63 | PHE |
| 1979-80 | 1270 | | 7,00 | PHE |
| 1980-81 | 238 | 03/03/81 17h00 | 3,60 | |
| 1981-82 | 446 | 04/02/82 18h00 | 5,07 | |
| 1982-83 | 259 | 25/01/83 18h00 | 3,15 | |
| 1983-84 | 232 | 21/12/83 06h00 | 3,55 | Min |

Comme pour la SANDRANDAHY, les résultats de l'étude statistique menée sur la MANIA à FASIMENA ont été utilisés pour une évaluation de la crue décennale : 620 m³/s, soit 422 l/s/km².

les débits d'étiage suivants ont été observés :

09.10.80 Q MIN = 16.0 m³/s (9.04 l/s/km²) DCE = 18.3 m³/s

27.11.81 Q MIN = 18.1 m³/s (10.2 l/s/km²) DCE = 19.8 m³/s

04.11.82 Q MIN = 23.3 m³/s (13.2 l/s/km²) DCE = 26.2 m³/s

03.11.83 Q MIN = 11.6 m³/s (6.55 l/s/km²) DCE = 11.9 m³/s

Par comparaison avec la station de FASIMENA l'étiage médian peut-être estimé à 16 m³/s (9 l/s/km²).

## 5.1.6. L'Ivato à Ivato

L'Ivato est un affluent rive gauche de la MANIA et la rejoint entre les stations de SANDRANDAHY et de FASIMENA. Son bassin, d'altitude moyenne de 1 580 m, présente un relief assez modéré (pente globale 7.7. m/km).

La station d'IVATO (20°37'S - 47°12'E) contrôle un bassin d'une superficie de 215 km².

L'échelle installée en mai 1981 a été suivie jusqu'en décembre 1983 et 27 jaugeages ont été effectués entre .45 et 30.8 m³/s. La station, située sur un seuil rocheux, est stable et une courbe d'étalonnage relativement précise et univoque a été extrapolée jusqu'à 50 m³/s.

tableau 7.92.

Ivato à Ivato
Débits moyens mensuels et annuels
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1981/82 | 1.99 | 4.74 | - | - | - | - | 5.53 | 3.82 | 3.01 | 2.36 | 1.92 | 2.47 | - |
| 1982/83 | 2.29 | 1.89 | 2.70 | 4.63 | 2.32 | 2.01 | 1.50 | 1.33 | 1.32 | 1.07 | .849 | 1.10 | 1.92 |
| 1983/84 | 1.44 | 9.40 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 1.8 | 3.6 | 5.4 | 6.2 | 5.2 | 3.3 | 2.2 | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.3 | 1.3 | 2.9 |

En raison de la trop faible fréquence des observations limnimétriques (une lecture par jour) pour un bassin de cette taille, les débits de saison des pluies sont approchés. Les débits mensuels calculés présentent cependant une assez bonne liaison avec ceux de la MANIA.

Q IVATO = .019 Q FASIMENA - .06 ($R^2$ = .76 P>.995)

Cette relation permet d'évaluer, avec prudence, l'ordre de grandeur des débits mensuels interannuels (moyennes du tableau 7.92).

La pluviométrie moyenne sur le bassin peut être évaluée très sommairement à environ 1 400 mm. La lame inter-annuelle (430 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 970 mm (Ke = 31 %).

## 5.1.7. La Mania à Ankotrofotsy

La station d'ANKOTROFOTSY (19°48'S - 45°32'E) est située à 100 m d'altitude, peu avant la confluence de la MANIA et de la SAKENY. Le bassin versant, d'une superficie de 17 990 km², correspond à la quasi-totalité du bassin de la MANIA, au sortir du socle. L'altitude moyenne du bassin est de 1 325 m et présente une pente globale modérée (4.3 m/km).

L'échelle a été installée en août 1980 et les observations ont été effectuées jusqu'en décembre 1983. Treize mesures de débit, entre 90 et 1 744 m³/s ont été effectuées sur cette station, ce qui est insuffisant pour rendre compte de tous les détarages survenus au cours de la période d'observation en raison des importants remaniements du lit lors des fortes crues. Quatre courbes d'étalonnage ont été tracées pour la détermination des débits et extrapolées jusqu'à 5 250 m³/s. Les débits de basses eaux sont assez correctement estimés mais il ne faut pas s'attendre à une très grande précision pour les débits de crue.

tableau 7.93.

Mania à Ankotrofotsy
Débits moyens
mensuels et annuels
Débits en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1979/80 | | | | | | | | | | | 159. | 159. | - |
| 1980/81 | 303. | 491. | 615. | 1040. | 842. | 447. | 308. | 211. | 170. | 167. | 155. | 182. | 407. |
| 1981/82 | 290. | 305 | 1780. | 1600. | 1560. | 758. | 387. | 298. | 239. | 194. | 171. | 316. | 653. |
| 1982/83 | 317. | 398. | 691. | 1110. | 818. | 467. | 259. | 197. | 159 | 128. | 110. | 142. | 395. |
| 1983/84 | 130. | 687. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 262. | 459. | 712. | 900. | 651. | 405. | 276. | 259. | 231. | 221. | 205. | 205. | 396. |

nota : moyennes interannuelles de l'échantillon étendu d'après BETOMBA et FASIMENA.

Les débits moyens mensuels observés présentent des corrélations assez serrées avec les débits mensuels correspondants de la MANIA à FASIMENA et de la TSIRIBIHINA à BETOMBA.

Q ANKO = 1.94 Q FASIM. + 77 ($R^2$= .85 P> .995)
Q ANKO = .276 Q BETOMBA + 135 ($R^2$ = .95 P> .995)

Les relations permettent d'évaluer les débits moyens mensuels interannuels à la station présentés dans le tableau 7.93.

La lame moyenne interannuelle est de 695 mm et pour une pluviométrie moyenne interannuelle de l'ordre de 1 400 mm correspond à un déficit d'écoulement de 705 mm (Ke = 50 %)

Les lames décennales sèche et humide peuvent être estimées à 510 mm (Q = 290 m³/s) et 880 mm (Q = 500 m³/s).

Les jaugeages des campagnes 1980-83 ont permis le tracé d'une courbe moyenne d'étalonnage et l'évaluation (extrapolation de type logarithmique de 3.74 à 7.08 m) des débits de très hautes eaux.

Maximums annuels de crues

| Année | Q m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1976-77 | 5230 | | 7,08 | PHE |
| 1980-81 | 2660 | 27/02/81 12h00 | 4,96 | 3rel |
| 1981-82 | 3120 | 02/02/82 06h00 | 5,40 | 3rel |
| 1982-83 | 2060 | 15/02/83 18h00 | 4,47 | 3rel |
| 1983-84 | 1770 | 14/12/83 06h00 | 4,20 | Min |

Un ordre de grandeur de la crue décennale a été estimé à partir des résultats de l'étude statistique menée sur la MANIA à FASIMENA : 3 700 m³/s (206 l/s/km²).

Les débits d'étiages de la période d'observation sont :

143 m³/s (7.95 l/s/km²) le 17.10.80 DCE = 147 m³/s
101 m³/s (5.61 l/s/km²) le 26.12.81 DCE = 107 m³/s
108 m³/s (6.00 l/s/km²) le 08.12.82 DCE = 158 m³/s
69.4 m³/s (3.86 l/s/km²) le 12.12.83 DCE = 80.6 m³/s

Avec beaucoup de prudence, on évaluera le débit d'étiage médian à 80 m³/s (4.4 l/s/km²).

## 5.2. Bassin de la Mahajilo

### 5.2.1. La Bizy à Ifanja

La BIZY est un petit affluent rive gauche de la KOTOMBOLO, elle-même affluent rive gauche de la SAKAY. Le bassin de taille réduite, 21 km², s'étend sur des formations gneissiques latérisées aux pentes très fortes (38 m/km). L'altitude moyenne du bassin est de 1 230 m.

La station d'IFANJA (18° 54' S - 46° 44° E) est située au débouché de la rivière BIZY dans la cuvette marécageuse d'IFANJA au nord du lac ITASY. Un limnigraphe et une échelle ont permis de recueillir les informations limnimétriques de mars 1980 à décembre 1983. Vingt-cinq jaugeages de basses eaux (entre 102 l/s et 1.37 m³/s) ont permis de tracer cinq courbes d'étalonnage pour sept périodes de validité, le bief sableux aux pentes fortes étant remanié après chaque crue importante. L'extrapolation pour les hautes eaux a été menée jusqu'à 160 m³/s.

tableau 7.94.

La Bizy à Ifanja
Débits moyens mensuels et annuels
en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1979/80 | - | - | - | - | - | .335 | .184 | .144 | .141 | .113 | .096 | .088 | - |
| 1980/81 | .087 | .672 | 1.34 | .601 | 1.68 | .300 | .252 | .210 | .202 | .204 | .191 | .198 | .497 |
| 1981/82 | .246 | 1.89 | 2.30 | .497 | 1.43 | .379 | .715 | .370 | .202 | .167 | .133 | .148 | .713 |
| 1982/83 | .335 | .457 | 1.32 | 1.60 | .951 | .414 | .293 | .256 | .235 | .212 | .191 | .171 | .530 |
| 1983/84 | .255 | .876 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | .231 | .974 | 1.65 | .900 | 1.35 | .357 | .361 | .245 | .195 | .174 | .153 | .151 | .560 |

Par correction d'hydraulicité, il est possible d'évaluer le module interannuel à .46 m³/s. La lame écoulée moyenne (690 mm) pour une pluviométrie moyenne de l'ordre de 1 500 mm, correspond à un déficit d'écoulement de 810 mm (Ke = 46 %)

Les débits de pointes des crues maximales annuelles ont atteint les valeurs suivantes :

86.6 m³/s (4100l/s/km²) le 22.03.81
137 m³/s (6500l/s/km²) le 28.12.81
77.8 m³/s (3700 l/s/km²) le 22.01.83

Les débits d'étiage observés sont les suivants :

Q MIN = .076 m³/s (3.62 l/s/km²) le 11.11.80 DCE = .082 m³/s
Q MIN = .185 m³/s (6.29 l/s/km²) le 27.09,81 DCE = .185 m³/s
Q MIN = .117 m³/s (4.19 l/s/km²) le 21.02.82 DCE = .117 m³/s

Nota : le débit minimal de fin de saison sèche (03.10.82 était de 114 l/s)

Q MIN = .091 m³/s (4.33 l/s/km²) le 04.12.83 DCE = .131 m³/s

Avec prudence on évaluera le débit d'étiage médian entre 4 et 5 l/s/km² (.08 à .10 m³/s).

## 5.2.2. La Kotombolo à Ifanja

La KOTOMBOLO, affluent de la SAKAY, draine la plaine marécageuse d'IFANJA au milieu de laquelle est située la station de contrôle (18° 52' S- 46° 45' E, superficie du bassin contrôlé : 151 km²).

Son bassin est situé sur des roches éruptives et métamorphiques laterisées et une vaste zône alluviale dépressionnaire (10 % du bassin) correspond à l'assèchement d'un ancien lac quaternaire après érosion du verrou constitué par une coulée basaltique.

L'échelle a été installée en mars 1980. L'étalonnage de la station repose sur 22 jaugeages (entre .175 et 8.81 m³/s) et trois courbes (pour quatre périodes de validité). L'extrapolation pour les hautes eaux a été menée jusqu'à 50 m³/s.

tableau 7.95.

Kotombolo à Ifanja
Débits moyens mensuels et annuels en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1979/80 | - | - | - | - | - | 3.57 | 1.01 | .745 | 1.73 | .480 | .334 | .550 | - |
| 1980/81 | .382 | (4.64) | (9.25) | (4.15) | 7.24 | 4.25 | 2.63 | 1.21 | .929 | .686 | .490 | .838 | (3.06) |
| 1981/82 | 2.19 | 7.78 | 18.3 | 7.07 | 11.4 | 3.59 | 1.92 | 1.46 | 1.29 | .618 | .530 | .598 | 4.74 |
| 1982/83 | 2.63 | 5.39 | 10.2 | 14.6 | 4.61 | 2.59 | 1.19 | .834 | .693 | .523 | .371 | .447 | 3.61 |
| 1983/84 | 2.68 | 10.4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 1.97 | 7.05 | 12.6 | 8.61 | 7.75 | 3.50 | 1.69 | 1.06 | 1.16 | .574 | .431 | .608 | 3.90 |

Les débits mensuels de décembre 1980 à février 1981 (non observés) ont été évalués à partir de la régression entre les débits mensuels de la KOTOMBOLO et ceux de la BIZY.

Q KOTOM = 6.9 Q BIZY. + .38 ($R^2$ = .81 P> .995)

En dépit de la différence considérable de taille des bassins, les débits de la KOTOMBOLO et ceux de la MAHAJILO (à MIANDRIVAZA) présentent une corrélation significative.

Q KOTOM = .009 Q MAHA. + .38 ($R^2$ = .76 P> .995)

Cette relation permet d'apprécier l'hydraulicité des années observées sur la KOTOMBOLO (et sur la BIZY) et d'estimer le module interannuel à 3.2 m³/s. La lame écoulée interannuelle (660 mm) pour une pluviométrie de l'ordre de 1 500 mm correspond à un déficit d'écoulement moyen de 840 mm (Ke = 44 %).

Les débits de pointes des crues annuelles sont les suivants :

41.7 m³/s (276 l/s/km²) le 10.03.82
45.5 m³/s (301 l/s/km²) le 22.11.83

Débits d'étiage :

≤.199 m³/s (1.32 l/s/km²) fin octobre 80
.406 m³/s (2.69 l/s/km²) 01.10.81 DCE = .435 m³/s
.350 m³/s (2.32 l/s/km²) 23.09.82 DCE = .424 m³/s
.285 m³/s (1.89 l/s/km²) 30.09.83 DCE = .309 m³/s

De l'ordre de .3 m³/s (2 l/s/km²), les débits d'étiage spécifiques sont faibles et nettement inférieurs à ceux des petits affluents (comme la BIZY). Cela peut s'expliquer par la rétention des apports dans les vastes zones marécageuses et, dans une moindre mesure, par les prélèvement opérés à l'amont de la station pour l'irrigation des petits périmètres agricoles.

## 5.2.3. La Mahajilo à Miandrivazo

La MAHAJILO est formée de la réunion dans son cours supérieur de deux branches mères : La SAKAY qui draine à l'est de TSIROANOMANDIDY un plateau marécageux situe à 1400 m d'altitude et la KITSAMBY qui prend sa source sur la façade occidentale de l'ANKARATRA, près du mont TSIAFAJAVONA à 2 500 m d'altitude. Après la jonction des deux branches, la MAHAJILO coule vers l'ouest jusqu'à MIANDRIVAZO, avec une forte pente, particulièrement accentuée dans la traversée de la falaise de BONGALAVA (200 m de dénivelée sur 12 km). L'altitude moyenne des bassin est de 1050 m et en raison des fortes précipitations sur le haut bassin de la KITSAMBY, la pluviométrie moyenne sur le bassin est supérieur à celle du bassin total de la MANIA. Elle peut être estimée à 1 600 mm en moyenne interannuelle.

La station avait été initialement implantée à ANTSAKOAMADINIKA, à l'aval de MIANDRIVAZO, mais en raison de nombreuses erreurs de lecture et lacunes d'observation, les résultats de cette station sont difficilement crédibles. La station de MIANDRIVAZO (19° 31' S - 45° 26' E), située à une altitude de 150 m contrôle un bassin d'une superficie de 14 375 km². Elle a été équipée en août 1980 d'un limnigraphe difficilement surveillable et submergé dès les premières fortes crues, puis à partir d'octobre 1981 d'une batterie d'échelles située à l'extrémité est de la digue protégeant le village. L'étalonnage est basé sur 13 mesures de débit (entre 45.5 et 1 303 m³/s) ; on observe des détarages en basses eaux, mais en raison du faible nombre de jaugeages, une seule courbe moyenne a été tracée avec une extrapolation jusqu'à 4.43 m à l'échelle (débit calculé : 4 190 m³/s). En raison de l'imprécision de l'étalonnage et de la qualité parfois douteuse des relevés, les débits restent approchés.

tableau 7.96.

Mahajilo à Miandrivazo
Débits moyens mensuels et annuels
en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1981/82 | 198. | 318. | 1530. | 1470. | 1180. | 845. | 201. | 156. | 105. | 82.3 | 64.6 | 84.9 | 514. |
| 1982/83 | 195. | 296. | 988. | 1160. | 770. | 437. | 118. | 104. | 89.5 | 67.6 | 53.2 | 57.0 | 357. |
| 1983/84 | 112. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 188. | 402. | 730. | 1010. | 627. | 329. | 181. | 153. | 139. | 132. | 127. | 133. | 343. |

En dépit d'une certaine imprécision, les débits mensuels présentent des liaisons significatives avec ceux des stations sur les bassins voisins : MANIA à FASIMENA et TSIRIBIHINA à BETOMBA.

Q MIANDR = 1.74 Q FASIMENA + 42 ($R^2$ = .76 P> .995)
Q MIANDR = .275 Q BETOMBA + 72 ($R^2$ = .93 P> .995)

En utilisant ces régressions, il est possible d'évaluer les débits interannuels de la MAHAJILO (moyennes du tableau 7.54).

La lame moyenne interannuelle (755 mm) correspond, pour une pluviométrie interannuelle évoluée à 1 600 mm, à un déficit d'écoulement de 845 mm (Ke = 47 %).

Les lames décennales sèche et humide peuvent être estimées respectivement à 530 mm (Q = 240 m³/s et 950 mm (Q = 430 m³/s).

Deux stations ont été réinstallées sur la MAHAJILO en 1980, à proximité ou au niveau des anciennes échelles mises en place par l'ORSTOM pour le compte du Génie rural en 1969.

Les jaugeages réalisés de 1980 à 1983 ont permis le tracé des étalonnages de moyennes eaux et l'évaluation des débits de hautes eaux (extrapolations de type logarithmique) jusqu'à 9 500 m³/s.

Mahajilo à Antsakoamadinika

| Année | Q m³/s | Anc. éch. | Nlle éch. | Hm | Q m³/s |
|---|---|---|---|---|---|
| 1968-69 | 1690 | 3,15 | | | |
| 1969-70 | 2710 | 3,70 | | | |
| 1970-71 | 2090 | 3,40 | | | |
| 1971-72 | 3460 | 4,00 | | | |
| 1972-73 | 3080 | 3,86 | | | |
| 1973-74 | 3730 | 4,10 | | | |
| 1974-75 | 2670 | 3,68 | | | |
| 1975-76 | | | | | |
| 1976-77 | 9500 | 5,70 | (5,85) | (5,55) | |
| 1977-78 | | | | | |
| 1978-79 | | | | | |
| 1979-80 | | | | | |
| 1980-81 | 1890 | | 3,43 | | |
| 1981-82 | 4190 | | 4,42 | 4,12 | 3520 |
| 1982-83 | 3030 | | 3,99 | 3,50 | 2680 |

Des crues au moins aussi importantes que celle de 1976-77 ont été signalées pour 1936 et 1956.

Comme pour ANKOTROFOTSY, un ordre de grandeur de la crue décennale a été estimé à partir des résultats de l'étude statistique menée sur la MANIA à FASIMENA.

Le débit décennal est estimé à 5 750 m³/s (400 l/s/km²).

Débit d'étiage

53.3 m³/s (3.71 l/s/km²) le 26.09.82 DCE = 60.2 m³/s
36.2 m³/s (2.52 l/s/km²) du 04 au 14.10.83 DCE = 96.2 m³/s

Ces débits d'étiage représentent environ la moitié des débits d'étiage des mêmes années de la MANIA à ANKOTROFOTSY et l'on peut, avec prudence, évaluer le débit d'étiage médian à 40 m³/s (2.8 l/s/km²).

## 5.3. Bassin de la Sakeny

La SAKENY est un affluent rive gauche de la MANIA, dont le bassin est presque entièrement situé sur les formations sédimentaires.

La SAKENY coule du sud au nord dans la dépression permotriasique dite sakaménienne. Elle est rejointe sur sa rive droite par la MANAMBOLO dont le bassin est situé sur le rebord occidental du socle, à l'ouest du massif de

l'ITREMO, et sur sa rive gauche, par la MANAMPANDA et la LOHAZY qui drainent les formations gréseuses (rattachées au système de l'ISALO) prolongeant vers le nord le massif du MAKAY.

Des observations et mesures ont été effectuées, de 1980 à 1983, sur :

- La SAKENY à ANDRAKETA (20° 21' S - 45° 32 E - bassin versant : 3 138 km²)
- La MANAMBOLO à AMBATOLAHY (20° 01' s - 45° 32 E - bassin versant 1 893 km²)
- La MANAMPANDA à MALAIMBANDY (20° 21' - 45° 33' E - bassin versant : 545 km²)

Une quinzaine de mesures de débit ont été effectuées sur chacune de ces stations, mais la mauvaise qualité des observations ainsi que la forte instabilité des lits sableux ne permettent pas un étalonnage suffisamment précis des hauteurs limnimétriques et un bon calcul des débits journaliers. À titre d'exemple, la traduction en débits journaliers de l'année 1980-81 sur la MANANBOLO fournit un débit moyen annuel de 95.2 m³/s (1 590 mm). Cette valeur correspondant à une année d'hydraulicité moyenne sur la MANIA, paraît très fortement surestimée, la pluviométrie moyenne sur le bassin ne dépassant pas 1 400 mm.

Sur la base des mesures de débit et par comparaison entre les différents bassins, nous pouvons avancer les valeurs approchées suivantes, qu'il convient d'apprécier avec beaucoup de prudence.

## 5.3.1. Manambolo à Ambatolahy

Les débits de basses et moyennes eaux (jusqu'à 40 m³/s sur la MANAMBOLO et 600 m³/s sur la MANIA à ANKOTROFOTSY) sont dans un rapport de 5 à 7 % entre les deux stations. Puis pour les hautes eaux, les débits de la MANAMBOLO représentent de l'ordre de 10 % de ceux de la MANIA, puis 20 % (200 m³/s pour 1 000 m³/s) et 30 % pour les plus forts débits (450 m³/s pour 1 500 m³/s).

Sur ces bases très sommaires, nous estimerons le module interannuel de la MANAMBOLO à une valeur voisine de 40 m³/s (680 mm) ce qui correspond pour une pluviométrie moyenne d'environ 1 400 mm à un déficit d'écoulement de 720 mm et un coefficient d'écoulement de l'ordre de 50 %.

Comme pour la MANIA à ANKOTROFOTSY, les mesures réalisées de 1980 à 1982 ont permis une évaluation des débits de très hautes eaux et une estimation de la crue décennale : 4 800 m³/s (2 530 l/s/km²).

Maximums annuels de crues

| Année | Q m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1976-77 | 7900 | | 6,59 | PHE |
| 1980-81 | 1590 | 22/01/1981 | 2,79 | PHE |
| 1981-82 | 2060 | | 3,10 | |

Le débit d'étiage (QJ MIN) médian peut être sommairement estimé à 4 ou 5 m³/s (2.1 à 2.6 l/s/km²)

## 5.3.2. Sakeny à Andraketa

Les débits de la SAKENY sont, en basses eaux et au-dessous de 40 m³/s, de l'ordre de 40 % de ceux de la MANAMBOLO. En moyennes et hautes eaux, ils sont en moyenne de 30 % supérieur aux débits de la MANAMBOLO.

L'ordre de grandeur du module pourrait être de 45 m³/s (H = 450 mm). Pour une pluviométrie de l'ordre de 1 200 mm, cette estimation correspond à un déficit d'écoulement de 750 mm (Ke voisin de 37 %)

L'extrapolation de type logarithmique utilisée pour l'évaluation des débits de hautes eaux est extrêmement forte, les jaugeages des campanges 1981-83 ne permettant que le tracé d'une courbe moyenne jusqu'à la cote 2,55 m.

Maximums annuels de crues

| Année | Hm | Qm³/s | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1976-77 | 3,51 | 2440 | PHE |
| 1980-81 | 2,96 | 1060 | 3rel |
| 1981-82 | 3,71 | 3300 | 3rel |
| 1982-83 | 3,00 | 1120 | 3rel |

Un ordre de grandeur de la crue décennale a été estimé à partir des résultats de l'étude statistique menée sur la TSIRIBIHINA à BETOMBA : 3100 m³/s (990 l/s/km²)

Les étiages sont nettement moins soutenus que sur la MANAMBOLO, dont le bassin est situé sur le socle latéritise. En moyenne, ils peuvent être estimés à 1 à 2 m³/s (0.3 à 0.6 l/s/km²).

### 5.3.3. Manampanda à Malaimbandy

Les débits de basses eaux de la MANAMPANDA, bien soutenus par les résurgences des formations gréseuses du système de l'ISALO, représente environ la moitié de ceux de la MANAMBALO (pour un bassin d'une superficie égale au quart). En moyennes et hautes eaux, ils sont de l'ordre de 5 % à 10 % de ceux de la MANAMBALO.

L'ordre de grandeur vraisemblable du module est de 8 à 10 m³/s (lame écoulée voisine de 500 mm) pour une pluviométrie de l'ordre de 1 000 à 1 100 mm.

Les débits d'étiages médians sont compris entre 2 et 3 m³/s (3.7 à 5.5 l/s/km²).

## 5.4. La Tsiribihina à Betomba

La station de BETOMBA (19 ° 43' S - 44° 58' E), située près du village au même nom à l'entrée des gorges de la TSIRIBIHINA, contrôle un bassin de 45 000 km² (soit 90 % du bassin total du fleuve).

La station est située a environ 15 m d'altitude. Une première station (8 m échelle) a été installée sur un seuil rocheux à l'aval de BEREVO en novembre 1957 mais fut emportée par les premières crues de décembre. Une nouvelle échelle installée en juin 1958 près de BETOMBA fut à nouveau détruite en avril 1960 puis réinstallée plus solidement en septembre 1960. Les lectures sont complètes d'octobre 1960 à juin 1983.

Les difficultés d'accès à la station en saison des pluies font que 6 jaugeages seulement ont pu être effectués de 1960 à 1982 (entre 137 et 698 m³/s). A partir de mesures de débit effectuées en amont de BETOMBA sur les principaux formateurs (MANIA, MAHAJILO, SAKENY) et des correspondances d'observations, le débit pour la cote 5 m à BETOMBA à pu être estimé à 4000 m³/s.

Jusqu'à cette cote en raison de la stabilité de la section, les traductions peuvent être considérées comme fiables et les débits de basses et moyennes eaux assez bien déterminés. L'extrapolation logarithmique a du être menée jusqu'à 12 m à l'échelle. Le débit maximal (1958) a été estimé à 27 500 m³/s. Les débits

moyens journaliers de hautes eaux doivent être considérés comme approximatifs et les débits mensuels correspondants (février 1969, février 1977 par exemple) appréciés avec prudence.

La détermination des précipitations moyennes annuelles sur le bassin est délicate à l'échelle annuelle en raison de la faible densité des stations et des nombreuses lacunes. En moyenne interannuelle elle peut être évaluée d'après les isohyètes à 1 400 mm. Les précipitations annuelles de la période d'observation ont été évaluées à partir de l'hydraulicité moyenne des différents stations.

## 5.4.1. Débits moyens mensuels et annuels

Le tableau 7.98 consigne les valeurs observées. Pour les débits d'étiage, les corrélations intermensuelles assez significatives ont permis d'évaluer les débits mensuels de juillet à octobre 1982 et de déterminer le débit moyen annuel de l'année.

tableau 7.97.

Tsiribihina à Betomba
Corrélations intermensuelles

| | | |
|---|---|---|
| Q06 = .39 Q05 + 143 | ($R^2$ = .50) | P> .99 |
| Q07 = .59 Q06 + 76 | ($R^2$ = .74) | P> .99 |
| Q08 = .50 Q07 + 108 | ($R^2$ = .31) | P> .99 |
| Q09 = .80 Q08 + 25 | ($R^2$ = .79) | P> .99 |
| Q10 = .55 Q09 + 111 | ($R^2$ = .18) | P> .95 |

tableau 7.98.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1251300110 Betomba
Rivière : Tsiribihina
Pays: Madagascar
Bassin: Tsiribihina

Latitude : 19°43'S
Longitude : 44°58'E
Aire : 45 000 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1957/58 | - | - | - | - | - | - | - | - | 202. | 192. | 182. | 171. | - |
| 1958/59 | 273. | 1670. | 2250. | 1240. | 2220. | 700. | 233. | 219. | 213. | 196. | 177. | 166. | 798. |
| 1959/60 | 340. | 637. | 1700. | 2090. | 1440. | - | - | - | - | - | - | 159. | - |
| 1960/61 | 165. | 712. | 3250. | 1400. | 1530. | 677. | 269. | 258. | 162. | 154. | 140. | 132. | 737. |
| 1961/62 | 149. | 2260. | 1470. | 1770. | 1490. | 549. | 268. | 171. | 164. | 161. | 153. | 194. | 730 |
| 1962/63 | 484. | 1380. | 1990. | 4350. | 1750. | 833. | 386. | 391. | 265. | 226. | 193. | 209. | 1020. |
| 1963/64 | 464. | 1510. | 1250. | 3030. | 946. | 430. | 251. | 229. | 203. | 271. | 193. | 198. | 740. |
| 1964/65 | 500. | 1980. | 4360. | 2190. | 1670. | 840. | 399. | 305. | 315. | 279. | 264. | 262. | 1110. |
| 1965/66 | 223. | 981. | 1130. | 1430. | 650. | 471. | 320. | 239. | 222. | 224. | 220. | 212. | 522. |
| 1966/67 | 343. | 953. | 3110. | 1430. | 3480. | 1490. | 481. | 341. | 305. | 262. | 260. | 318. | 1070. |
| 1967/68 | 510. | 1000. | 1030. | 2880. | 1470. | 594. | 404. | 386. | 285. | 246. | 225. | 238. | 765. |
| 1968/69 | 383. | 1160. | 2550. | 8870. | 1650. | 1190. | 771. | 424. | 299. | 280. | 237. | 235. | 1450. |
| 1969/70 | 386. | 1330. | 6910. | 2260. | 1970. | 765. | 463. | 359. | 293. | 240. | 206. | 208. | 1280. |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1970/71 | 817. | 942. | 1780. | 3180. | 2150. | 803. | 442. | 341. | 300. | 242. | 234. | 272. | 945. |
| 1971/72 | 391. | 723. | 1170. | 3600. | 1510. | 653. | 326. | 333. | 260. | 240. | 195. | 346. | 802. |
| 1972/73 | 311. | 1040. | 2190. | 3480. | 3900. | 1380. | 383. | 297. | 270. | 251. | 214. | 237. | 1160. |
| 1973/74 | 894. | 1810. | 2390. | 2960. | 2240. | 1420. | 724. | 382. | 327. | 259. | 212. | 235. | 1150. |
| 1974/75 | 513. | 2090. | 2390. | 4030. | 2290. | 1070. | 341. | 227. | 184. | 165. | 151. | 151. | 1120. |
| 1975/76 | 255. | 1130. | 1660. | 2740. | 1500. | 1350. | 257. | 178. | 173. | 161. | 154. | 177. | 803. |
| 1976/77 | 258. | 757. | 1800. | 14300 | 2400. | 1480. | 278. | 180. | 158. | 147. | 149. | 164. | 1750. |
| 1977/78 | 504. | 482. | 1450. | 2150. | 1010. | 676. | 314. | 196. | 195. | 180. | 157. | 223. | 618. |
| 1978/79 | 237. | 1130. | 1150. | 2760. | 1780. | 1090. | 339. | 295. | 286. | 258. | 279. | 253. | 809. |
| 1979/80 | 689. | 1550. | 2590. | 1110. | 1540. | 756. | 362. | 234. | 247. | 223. | 205. | 233. | 814. |
| 1980/81 | 516. | 1330. | 1750. | 3540. | 3530. | 940. | 641. | 325. | 268. | 235. | 237. | 332. | 1140. |
| 1981/82 | 647. | 790. | 5880. | 5500. | 4100. | 1240. | 622. | 415. | 296. | 219. | 190. | 226. | 1660. |
| 1982/83 | 352. | 755. | 2500. | 3410. | 2110. | 1090. | 306. | 396. | (308) | (267) | (234.) | (239.) | (982) |
| 1983/84 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 424. | 1200. | 2390. | 3430. | 2020. | 937. | 399. | 297. | 248. | 223. | 202. | 223. | 987. |
| Ecart-type | 190. | 479. | 1440. | 2790. | 908. | 332. | 150. | 81.3 | 54.6 | 48.0 | 42.9 | 55.1 | |
| Max. | 894. | 2260. | 6910. | 14300. | 4170. | 1490. | 771. | 424. | 327. | 280. | 279. | 346. | |
| Q1 | 512. | 1530. | 2570. | 3620. | 2270. | 1215. | 453. | 371. | 295. | 259. | 234. | 246. | |
| Méd. | 386. | 1130. | 1990. | 2880. | 1760. | 836. | 351. | 301. | 262. | 235. | 205. | 223. | |
| Q3 | 265. | 773. | 1460. | 1930. | 1490. | 676. | 292. | 228. | 198. | 186. | 167. | 174. | |
| Min. | 149. | 482. | 1030. | 1110. | 650. | 430. | 233. | 171. | 158. | 147. | 140. | 132. | |

Nota : les débits de mars 1969 et 1977 sont approchés.

Les graphiques 7.59 à 7.61 représentent les débits mensuels classés et les hydrogrammes annuels d'une année humide (1981-1982 Q = 1660 m³/s) et d'une année sèche (1965-1966, Q = 522 m³/s). On peut observer la grande variabilité des débits mensuels de saison des pluies qui caractérisent l'hydraulicité de l'année opposée à la faible dispersion des débits de fin de saison sèche (débit de septembre voisin de 200 m³/s) qui caractérisent une alimentation très stable à partir des réserves minimales toujours rechargées en fin de saison des pluies. Les débits intermédiaires (avril à juin) sont déterminés par la recharge (selon l'intensité de la saison des pluies) de réservoirs supplémentaires alimentés de façon variable sur différentes zones du bassin. Cela se traduit par des débits de base en début de tarissement assez dispersés de même que des coefficients de tarissement variables liés aux débits initiaux (potentiel global des aquifères).

figure 7.59.

Tsiribihina à Betomba

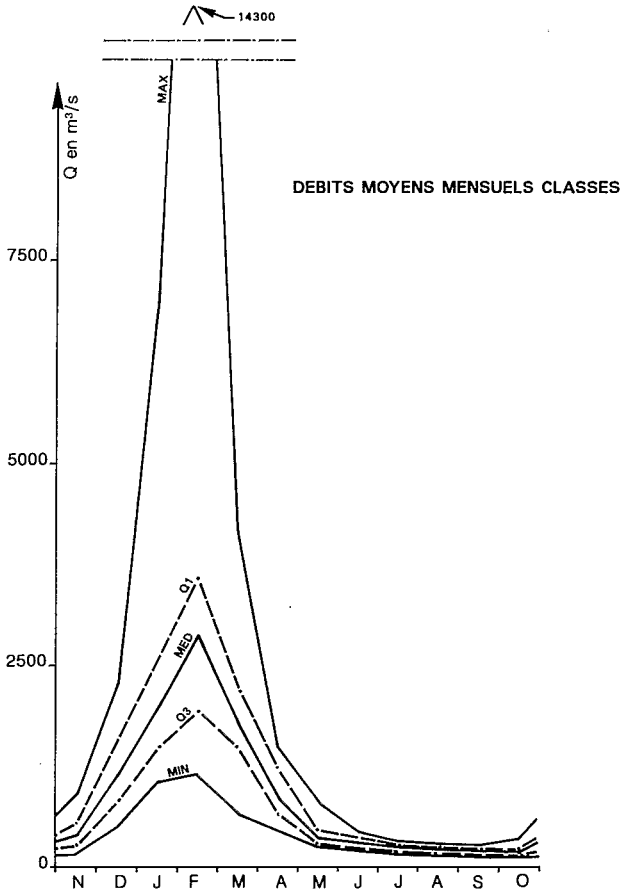



figure 7.60.

Tsiribihina à Betomba

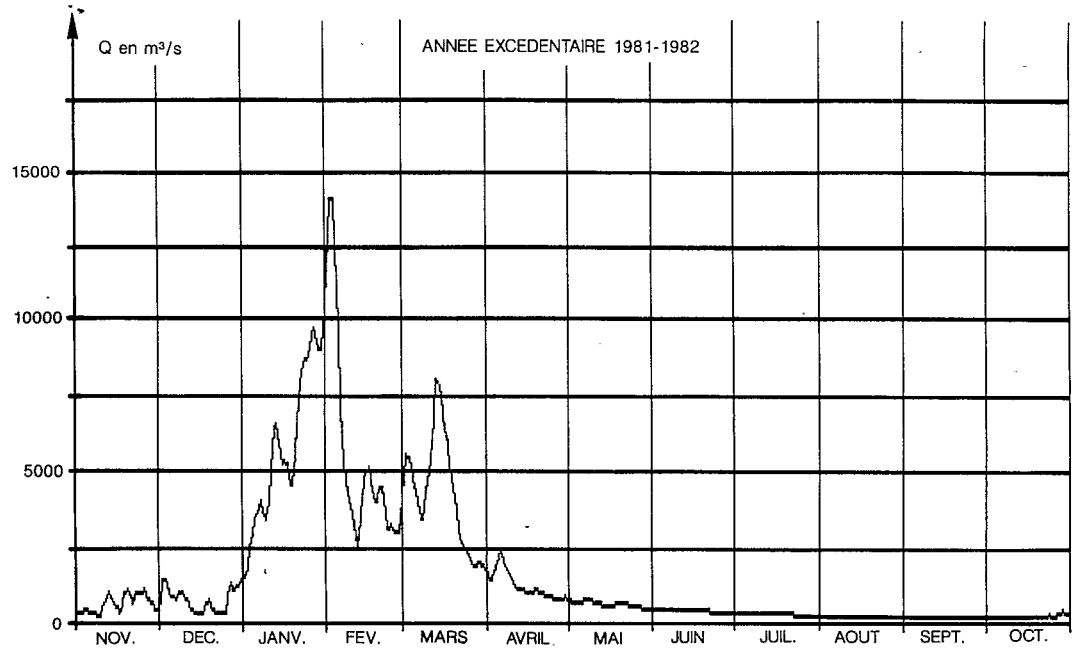
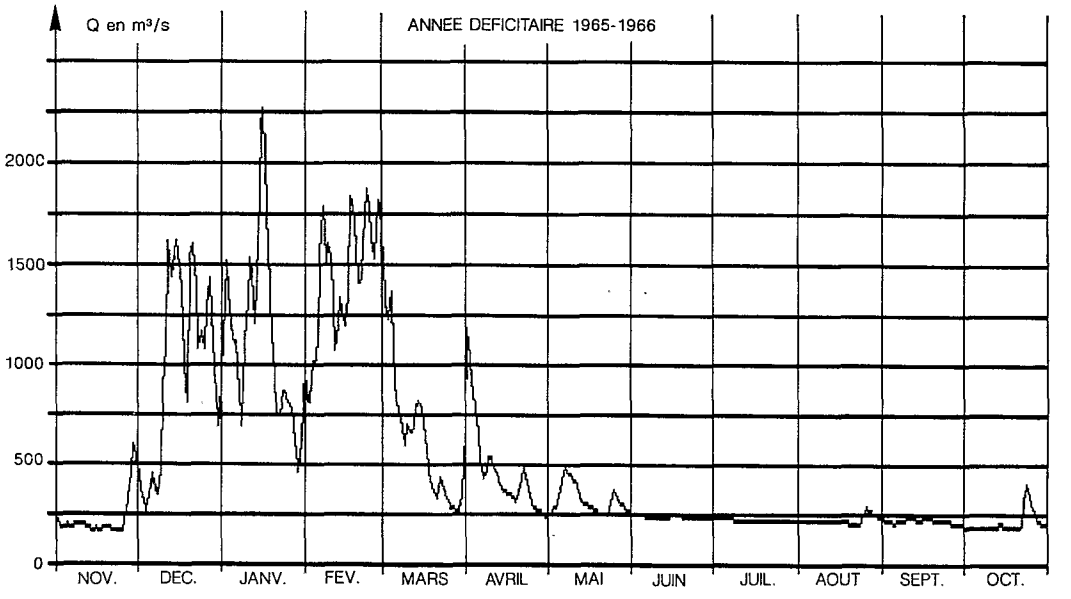


figure 7.61.

Tsiribihina à Betomba




## 5.4.2. Apports annuels

Malgré une certaine imprécision sur la détermination des précipitations annuelles et sur celle des lames écoulées annuelles les plus fortes (extrapolation de la courbe d'étalonnage), la relation statistique entre écoulements et précipitations à l'échelle annuelle est assez significative.

H mm = 1.01 P - 743 ($R^2$ = .73 P> .995)

1968-69 et 1976-77, situées au-dessus de la droite de régréssion, restent à l'intérieur de la dispersion.

Il en va de même entre les lames écoulées de la TSIRIBIHINA à BETOMBA et de la MANIA à FASIMENA

H TSI = .80 H MANIA + 104 ($R^2$ = .73 P> .995)

Les lames écoulées de 1956-57 et 57-58 ont été évaluées d'après la MANIA, celle de 1959-60 d'après la pluviométrie annuelle.

1956-57 H = 530 mm Q = 756 m³/s

1957-58 H = 610 mm Q = 870 m³/s

1959-60 H = 555 mm Q = 790 m³/s

L'ajustement statistique, effectué sur l'échantillon de 27 valeurs observées ou calculées, fournit les quantiles suivants :

tableau 7.99.

Tsibirihina à Betomba
Apports annuels

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| H mm | 385 | 425 | 465 | 520 | 650 | 825 | 940 | 1050 | 1190 |
| Q m³/s | 549 | 606 | 663 | 742 | 927 | 1180 | 1340 | 1500 | 1700 |
| q l/s/km² | 12.2 | 13.5 | 14.7 | 16.5 | 20.6 | 26.2 | 29.8 | 33.3 | 37.8 |

Loi de Gumbel (test B.M : 3.99, échelle : 153 mm, position : 594 mm )
Centennales sèche et humide : (H = 360 mm (Q = 513 m³/s) et H = 1300 mm (Q = 1850 m³/s).

## 5.4.3. Crues

### 5.4.3.1. Évaluation des débits de très hautes eaux

tableau 7.100.

Tsiribihina à Betomba
Maximums annuels de crues

| Année | Q m³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1957-58 | (27500) | | 12,00 | PHE |
| 1958-59 | ≥ 5680 | 16/01/59 18h00 | 5,85 | Min |
| 1959-60 | ≥ 3490 | 31/01/60 06h00 | 4,63 | Min |
| 1960-61 | 7640 | 10/01/61 18h00 | 6,70 | 3rel |
| 1961-62 | 6740 | 29/12/61 06h00 | 6,32 | Min |
| 1962-63 | 5180 | 21/02/63 18h00 | 5,30 | 3rel |
| 1963-64 | 7290 | 12/02/64 18h00 | 6,55 | 3rel |
| 1964-65 | 10800 | 26/01/65 12h00 | 7,87 | 3rel |
| 1965-66 | 2440 | 16/01/66 06h00 | 3,89 | 3rel |
| 1966-67 | 5660 | 25/01/67 06h00 | 5,84 | 3rel |
| 1967-68 | 4960 | 21/02/68 06h00 | 5,48 | 3rel |
| 1968-69 | (24400) | 13/02/69 12h00 | 11,35 | 3rel |
| 1969-70 | (15800) | 18/01/70 18h00 | 9,34 | PHE |
| 1970-71 | 6570 | 02/02/71 18h00 | 6,25 | 3rel |
| 1971-72 | 7910 | 09/02/72 12h00 | 6,81 | 3rel |
| 1972-73 | 8310 | 01/03/73 06h00 | 6,98 | 3rel |
| 1973-74 | 5230 | 10/01/74 18h00 | 5,62 | 3rel |
| 1974-75 | 7480 | 18/02/75 06h00 | 6,63 | 3rel |
| 1975-76 | 5160 | 21/02/76 12h00 | 5,58 | 3rel |
| 1976-77 | (14500) | | | |
| 1977-78 | 4900 | 31/01/78 18h00 | 5,45 | 3rel |
| 1978-79 | 4170 | 13/02/79 12h00 | 5,07 | 3rel |
| 1979-80 | 3970 | 27/01/80 12h00 | 4,95 | 3rel |
| 1980-81 | 10200 | 24/02/81 06h00 | 7,63 | 3rel |
| 1981-82 | 14500 | 02/02/82 14h00 | 9,00 | 3rel |
| 1982-83 | 7400 | 18/02/83 06h00 | 6,60 | 3rel |
| 1983-84 | ≥ 5330 | 16/12/83 18h00 | 5,67 | Min |

Si la station a subi peu de changements depuis 1958, les difficultés d'accès, un nombre très insuffisant de jaugeages et une submersion de l'échelle en très hautes eaux ne permettaient guère l'exploitation des relevés de hauteurs.

Avec la réalisation de mesures (janvier 1981 et février 1982) directement en amont de la zone de confluence, sur les cinq rivières qui forment la TSIRIBIHINA, un ordre de grandeur du débit (4 000 m³/s) a été estimé pour la cote 5,00 à l'échelle.

L'extrapolation logarithmique ou l'utilisation de la formule de STRICKLER, en admettant comme pente hydraulique la pente moyenne superficielle estimée entre BETOMBA et BELO, un coefficient de STRICKLER de 25 à 30 et un surcreusement moyen de 8 à 9 m, conduisent à des débits de 24 à 27 500 m³/s pour le maximum nivelé (12,00 m) attribué à l'année 1957-58.

### 5.4.3.2. Résultats de l'enquête historique

Si aucun relevé ancien n'a été retrouvé, certaines observations et le repérage de quelques niveaux de crue de la période 1968-80, tant à BETOMBA que sur les échelles plus aval de MAROTAOLA (TSIRIBIHINA et lac BEMARIVO) et de BELO, ont permis de corriger certains "relevés indirects" de l'observateur.

| Année | Betomba | Marotaola | Belo |
|---|---|---|---|
| (1957-58) | 27,61 NGM | 8,24 NGM | |
| 1968-69 | 26,96 NGM | 7,40 NGM | 5,34 NGM |
| 1969-70 | 24,95 NGM | | 5,10 NGM |
| 1976-77 | | 6,40 NGM | |

La cote probable du maximum de l'année 1976-77 (cyclone Emilie) "estimée" à 14,00 m et connue plus en aval comme inférieure aux PHE de 1968-69 (cyclone Dany) se situerait d'après la corrélation BETOMBA-MAROTAOLA vers 8,20 m (valeurs adoptées : H = 9,00 m - Q = 14 500 m³/s).

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 16 janvier et le 18 février (date médiane : 2 février - dates extrêmes : 16 décembre et 1er mars).

Une distribution de Frechet, adapté à l'échantillon des 27 maximums observés ou estimés, correspond aux valeurs suivantes :

tableau 7.101.

Tsiribihina à Betomba

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 6820 | 11100 | 15000 | 28100 | (36300) |
| q l/s/km² | 152 | 247 | 333 | 625 | (807) |

## 5.4.4. Basses eaux

Il est possible de déterminer chaque année une droite moyenne de tarissement (cf graphe 7.62, tarissement 1981). Les coefficients $\alpha$ de cette droite sont variables (compris entre . 0011, TC = 630 jours et . 0060, TC = 115 jours) et influencés par le potentiel global des différents réservoirs du bassin, potentiel qui peut-être représenté par le débit initial de "base" $Q_o$, début de tarissement.

$\alpha = (.17\ Q_o - 10)\ 10^{-3}$ $(R^2 = .69\ P > .995)$

Le coefficient médian ($\alpha$ = .0035, TC = 200 jours) correspond à une situation médiane des réserves pour un stock de $6.2.10^9$ m³ (lame équivalente : 140 mm).

figure 7.62.

Tsiribihina à Betomba

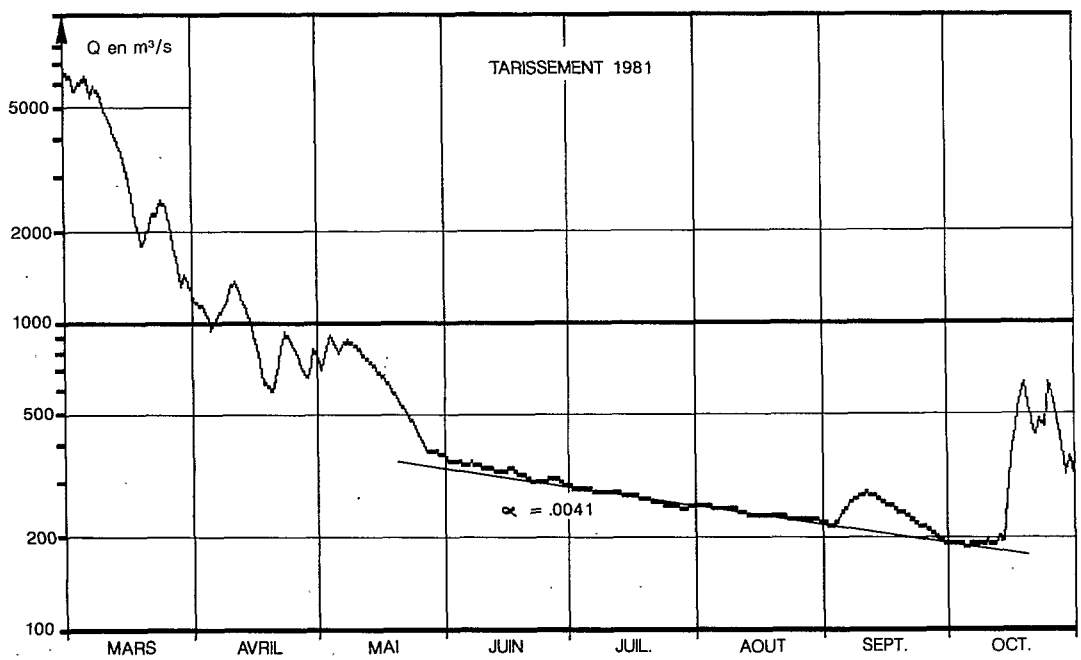



tableau 7.102.

Tsiribihina à Betomba
Débits caractéristiques d'étiage (m³/s)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1958 | - | - | - | 149 | 23-10 |
| 1959 | 197 | 170 | 157 | 150 | 03-11 |
| 1960 | - | - | - | (127) | 02-11 |
| 1961 | 153 | 131 | 129 | 125 | 07-11 |
| 1962 | 164 | 153 | 152 | 151 | 04-10 |
| 1963 | 247 | 201 | 191 | 177 | 10-09 |
| 1964 | 224 | 176 | 172 | 171 | 20-10 |
| 1965 | 277 | 194 | 177 | 161 | 25-11 |
| 1966 | 222 | 193 | 179 | 160 | 07-11 |

suite

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1967 | 300 | 249 | 224 | 213 | 20-09 |
| 1968 | 267 | 224 | 207 | 203 | 14-10 |
| 1969 | 276 | 229 | 222 | 214 | 26-11 |
| 1970 | 258 | 200 | 190 | 174 | 28-10 |
| 1971 | 278 | 210 | 174 | 161 | 16-11 |
| 1972 | 243 | 197 | 181 | 171 | 08-10 |
| 1973 | 261 | 202 | 186 | 174 | 16-10 |
| 1974 | 277 | 205 | 188 | 181 | 04-10 |
| 1975 | 169 | 148 | 140 | 133 | 24-10 |
| 1976 | 170 | 152 | 148 | 141 | 01-12 |
| 1977 | 155 | 146 | 144 | 142 | 06-09 |
| 1978 | 189 | 163 | 150 | 146 | 30-09 |
| 1979 | 285 | 235 | 186 | 180 | 09-10 |
| 1980 | 227 | 206 | 198 | 182 | 31-10 |
| 1981 | 272 | 226 | 191 | 187 | 05-10 |
| 1982 | 238 | 190 | 185 | 178 | 15-10 |
| Max. | 300 | 249 | 224 | 214 | 01-12 |
| Q1 | 276 | 210 | 191 | 181 | 03-11 |
| Méd. | 243 | 197 | 181 | 171 | 20-10 |
| Q3 | 197 | 163 | 152 | 147 | 04-10 |
| Min. | 153 | 131 | 129 | 125 | 06-09 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 300 | 249 | 224 | 214 | 01.12 |
| Q1 | 276 | 210 | 191 | 181 | 03.11 |
| Méd. | 243 | 197 | 181 | 171 | 20.10 |
| Q3 | 197 | 163 | 152 | 147 | 04.10 |
| Min. | 153 | 131 | 129 | 125 | 06.09 |

Entre les différents débits caractéristiques, il est possible d'établir les relations suivantes :

DCE = 1.04 QJ MIN + 1.3 ($R^2$ = .96)
DC11 = 1.23 QJ MIN - 15.8 ($R^2$ = .84)
DC9 = 1.65 QJ MIN - 45.5 ($R^2$ = .69)

$QJ\ MIN = 85.3\ Q07^{.48}\ .T^{.34}$ ($R^2$ = .68)

(T date en jours depuis le début de l'année de l'étiage absolu).

La loi de distribution adaptée à l'échantillon de 25 valeurs observées correspond aux quantiles suivants :

tableau 7.103.

Tsiribihina à Betomba
QJ Min

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q m³/s | 129 | 136 | 146 | 165 | 186 | 197 | 208 |
| q l/s/km² | 2.9 | 3.0 | 3.2 | 3.7 | 4.1 | 4.4 | 4.6 |

Loi log-normale (test B.M = 1.63, échelle : 205 m³/s, position : - 40 m³/s, forme : .116)
Cinquantennales sèche et humide : 121 m³/s (2.7 l/s/km²) et 220 m³/s (4.9 l/s/km²).

## 5.4.5. Bilan hydrologique

Pour une pluviométrie moyenne interannuelle de 1 400 mm, la lame moyenne écoulée (695 mm) correspond à un déficit moyen d'écoulement de 705 mm (Ke = 50 %).

Représentés (graphe 7.63) en fonction des précipitations annuelles, les lames écoulées et déficit annuels présentent la disposition suivante :

croissance du déficit d'écoulement entre 600 mm (pour P = 1050 mm) et 900 mm (pour P = 1800 mm) puis plafonnement à une valeur maximale de l'ETR sur le bassin, qui reste en raison de la faiblesse des précipitation de saison sèche, en deça de l'ETP régionale estimée à 1000 mm (moyenne du bassin).

Les lames écoulées (dans des conditions normales de température et répartition spatio-temporelle des précipitations sur le bassin) croissent de façon parabolique de 450 à 900 mm, puis au-delà de P = 1 800 mm se distribuent autour d'une droite moyenne H = P-900. Les coefficients d'écoulement moyen sont assez peu variables (45 à 50 % et plus pour P>1 800 mm).

figure 7.63.

Tsiribihina à Betomba

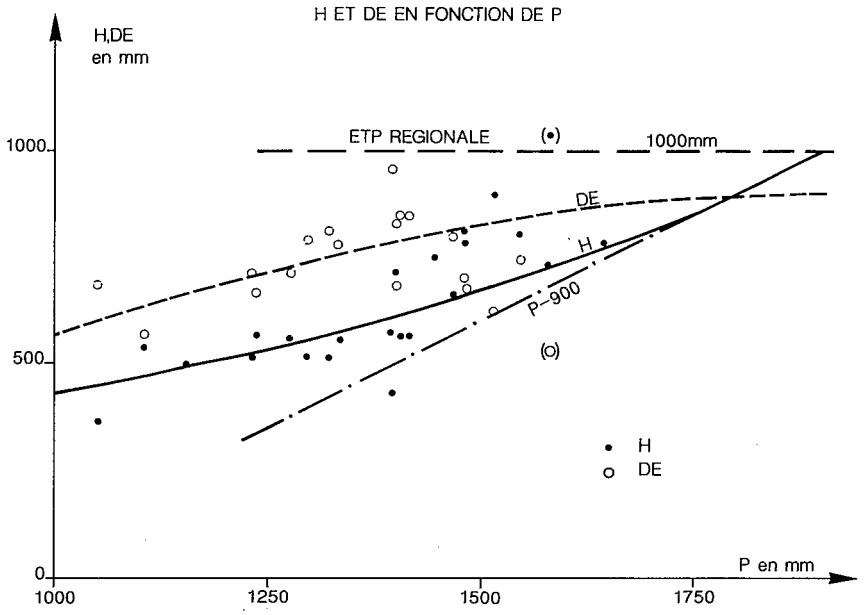


figure 7.64.

Tsiribihina à Betomba

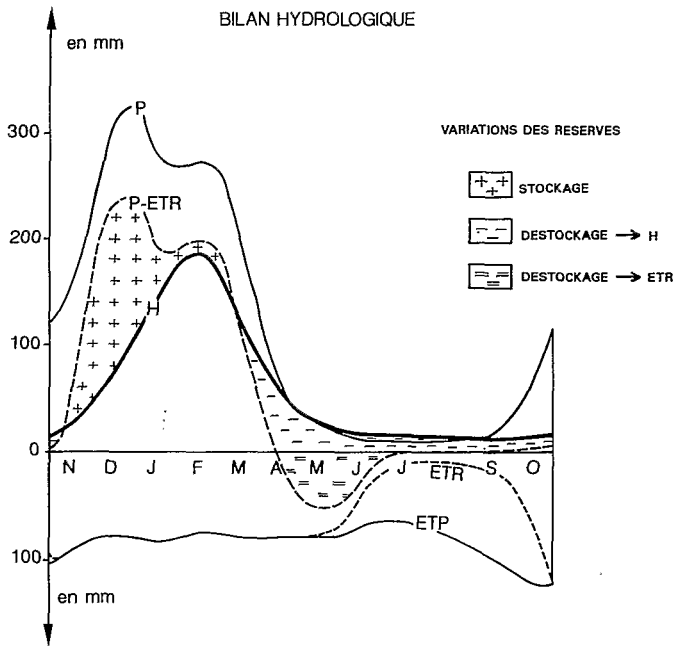



tableau 7.104.

Tsiribihina à Betomba
Bilan hydrologique mensuel et annuel
(valeur en mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 153 | 310 | 275 | 272 | 192 | 59 | 23 | 9 | 11 | 10 | 16 | 70 | 1400 |
| ETP | 92 | 78 | 84 | 75 | 80 | 78 | 80 | 69 | 66 | 78 | 97 | 122 | 1000 |
| ETR | 92 | 78 | 84 | 75 | 80 | 78 | 78 | 36 | 11 | 10 | 16 | 67 | 705 |
| P-ETR | 61 | 232 | 191 | 197 | 112 | -19 | -55 | -27 | 0 | 0 | 0 | 3 | 695 |
| H | 25 | 72 | 142 | 187 | 121 | 54 | 24 | 17 | 15 | 13 | 12 | 13 | 695 |
| ΔR+ | 36 | 160 | 49 | 10 | - | - | - | - | - | - | - | - | +255 |
| ΔR- | - | - | - | - | 9 | 73 | 79 | 44 | 15 | 13 | 12 | 10 | -255 |
| R | 36 | 196 | 245 | 255 | 246 | 173 | 94 | 50 | 35 | 22 | 10 | 0 | - |

En saison des pluies (novembre à mars), les précipitations (1 202 mm) représentent 86 % du total annuel, l'ETP (409 mm) est entièrement satisfaite et après reconstitution des réserves (nappes et réserves utile des sols = 246 mm en fin mars), la lame écoulée de la période (547 mm) représente 79 % du total annuel. L'intervention du stockage-destockage dans les nappes d'altérites se traduit par un décalage du maximum de décembre-janvier (précipitations) sur février (maximum de l'écoulement).

En saison sèche (avril-octobre), l'écoulement de surface est presque totalement satisfait à partir du drainage des nappes (145 mm). L'ETR est soutenu jusqu'en juin, à partir de la reprise sur les réserves utiles des sols (101 mm), puis réduite de juillet à octobre aux apports pluviométriques. L'ETR de la période ne représente que 50 % de l'ETP (70 % à l'échelle annuelle).

Cette forte réduction de l'ETP en saison sèche est responsable du plafonnement même pour les années très excedentaires) à 900 mm de l'ETR en moyenne annuelle.

### 5.4.6. Bilan global du bassin

Les débits mensuels de la TSIRIBIHINA à BETOMBA et des débits cumulés de la MANIA à ANKOTOFOTSY et de la MAHAJILO à MIANDRIVAZO sont en étroite relation (sur les 24 mois 81-82 et 82-83) :

Q BETOMBA = .56 (Q MANIA + Q MAHAVILO) + 222 ($R^2$ = .96)

Les apports annuels du bassin de la TSIRIBIHINA en aval du socle représentent 20 % des apports du bassin total (pour un bassin résiduel représentant 28 % de la superficie totale à BETOMBA).

Ceci correspond à une lame écoulée de 455 mm (contre 725 mm sur les formateurs de socles). En basses eaux les débits minimaux médians des deux formateurs principaux représentent 73 % du débit minimal journalier médian à BETOMBA. Le débit spécifique sur le socle correspond à une valeur de 3.7 l/s/km² pour 1l/s/km² pour le bassin inférieur sédimentaire.

Ces valeurs peuvent être comparées à celles observées sur le bassin du MANGOKY, au sud de la TSIRIBIHINA. Sur le bassin du MANGOKY, les apports du bassin sédimentaire ne représentaient que 20 % du total annuel (pour une superficie représentant 59 % de la superficie totale) soit une lame équivalente de 130 mm (contre 545 mm pour le haut bassin).

Les débits d'étiage spécifiques passaient de 1.6 l/s/km² sur le socle à 0.4 l/s/km² sur les formations sédimentaires.

On voit ainsi que la partie sédimentaire du bassin de la TSIRIBIHINA (d'importance relative beaucoup plus réduite en superficie que sur le MANGOKY) reste encore très active et participe beaucoup plus que sur le MANGOKY aux apports globaux.

Les affluents du bassin sédimentaire de la TSIRIBIHINA (SAKENY au sud, MANANDAZA au nord, petits affluents drainant la façade occidentale du plateau de BEMARAHA), encore bien arrosés (Pluviométrie supérieure à 1 000 mm, pouvant atteindre plus de 1 500 mm sur le BEMARAHA) participent encore notablement à l'écoulement de la TSIRIBIHINA.

## 6. BASSINS DU NORD OUEST

Dans la région de MAINTIRANO, quelques rivières côtières ont été observées entre 1977 et 1979 : la DEMOKA, la KIMAZIMAZY et la NAMELA. Ces petites rivières sont issues du rebord occidental du plateau greseux de BEMARAHA et après avoir traversé les formations sédimentaires du jurassique et du Crétacé (grés et calcaires recouverts largement d'épanchements volcaniques crétacés) rejoignent une zone littorale marécageuse. La pluviométrie sur ces bassins est comprise entre 1 800 mm sur les têtes de bassin et 1 000 mm au voisinage du littoral.

## 6.1. La Demoka à Bevatry

La station de BEVATRY (18° 14' S - 44° 15' E), située en amont de la RN 8, contrôle un bassin de 1325 km².

Une série de jaugeage effectués au niveau de la nationale a permis d'établir un étalonnage relativement satisfaisant avec pour les hautes eaux une extrapolation jusqu'a 1250 m³/s.

tableau 7.105.

Demoka à Bevatry
(Débits en m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1977-78 | 13.6 | 26.0 | (79.1) | 74.9 | 57.1 | 15.8 | 7.32 | 5.15 | 3.86 | 3.41 | 3.02 | 7.64 | 24.5 |
| 1978-79 | (21.0) | 44.3 | 37.5 | 102. | 62.9 | 31.5 | 10.1 | 7.06 | 6.03 | 5.52 | 4.73 | - | (27.3) |

| | QJ Min | QJ Max |
|---|---|---|
| 1977-78 | 2.73 m³/s le 03.10.78 | 153 m³/s le 28.02.78 |
| 1978-79 | < 4.55 m³/s > 30.09.79 | 199 m³/s le 06.02.79 |

En comparant les débits mensuels de la DEMOKA et ceux de la KIMAZIMAZY, on peut estimer que les débits de la DEMOKA representent entre 3.8 et 4 fois ceux de la KIMAZIMAZY. À partir de l'évaluation du module de la KIMAZIMAZY (cf 6.2), il est possible d'estimer sommairement le module de la DEMOKA à environ 28 m³/s. La lame écoulée équivalente (670 mm) pour une pluviométrie moyenne interannuelle voisine de 1 500 mm correspond à un déficit d'écoulement moyen de 830 mm (Ke = 45 %).

À partir de l'évaluation du débit charnière $Q_0$, d'un indice pluviométrique et de la courbe de tarissement, les débits d'étiage ont pu être estimés de façon approchés (DANLOUX1980).

QJ médian 2.35 m³/s (1.8 l/s/km²)
QJ decennal sec 1.60 m³/s (1.2 l/s/km²)
QJ decennal humide 3.25 m³/s (2.5 l/s/km²)

Un premier étalonnage (jaugeages et formule de Manning-Strickler) d'une station plus aval (DEMOKA à la RN 8a), des corrélations entre hauteurs aux deux stations et une série de mesures complémentaires à BEVATRY ont permis après enquête, l'évaluation des débits des plus fortes crues de la période 1958-1979.

| Année | Qm³/s | Hm | H RN8a | H Tsimahabefea |
|---|---|---|---|---|
| 1971-72 | 1500 | | 9,90 - 10,00 | |
| 1972-73 | (12-1500) | | 9,70 - 9,90 | |
| 1969-70 | (12-1500) | | 9,70 - 9,90 | |
| 1977-78 | 1200 | 5,60 | 9,70 | 1,96 |
| 1976-77 | 1000 | 4,75 | 9,40 - 9,45 | |
| 1968-69 | 1000 | | 9,39 | |

Le débit maximal décennal a été évalué à 1 200 m³/s (905 l/s/km²).

P. Chaperon, J. Danloux, L. Ferry

## 6.2. La Kimazimazy à Soatanana

La Kimazimazy rejoint la NAMELA située plus au nord, dans un marécage côtier. La station de SOATANANA '18°08 S - 44°14'E contrôle un bassin de 260 km².

Deux cents jaugeages entre 80 l/s et 149 m³/s ont permis d'établir un étalonnage correct des lectures.

tableau 7.106.

Kimazimazy à Soatanana
Débits mensuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1977-78 | 4.23 | 9.74 | 24.4 | 14.1 | 15.5 | 3.30 | 2.48 | 1.61 | (.80) | (.27) | (.14) | (.07) | (6.36) |
| 1978-79 | - | 5.76 | 10.1 | 31.1 | 16.3 | 5.77 | 1.06 | .53 | .33 | .24 | .11 | (.19) | (6.15) |

| | QJ Min | QJ Max |
|---|---|---|
| 1977-78 | > .07 m³/s octobre | 89.5 m³/s le 18.01.78 |
| 1978-79 | > .09 m³/s octobre | 98.4 m³/s le 20.02.79 |

À partir d'un ajustement graphique entre les débits mensuels et un indice pluviométrique mensuel (postes de MAINTIRANO et de BETANANTANANA), les modules ont pu être reconstitués sur 23 années (DANLOUX, 1980).

L'ajustement d'une loi de Galton fournit les quantiles suivants :

Médiane Q moy. = 7.0 m³/s

Décennale sèche Q moy. = 4.35 m³/s

Décennale humide Q moy. = 11.9 m³/s

La lame écoulée moyenne (875 mm pour = 7.2 m³/s) pour une pluviométrie moyenne interannuelle voisine de 1 600 mm correspond à un déficit d'écoulement de 725 mm (Ke = 55%).

À cette station particulièrement difficile (accès, conditions hydrauliques), 180 jaugeages répartis entre 0,14 m (Q = 0,14 m³/s) et 4,95 m³/s (Q = 149 m³/s), les relevés de 2 échelles et le nivellement des plus hautes eaux connues ont permis :

- l'extrapolation des données des campagnes 1977-78 et 1978-79

- l'évaluation des débits maximums annuels 1976 à 1979.

| Année | Qm³/s | Date | H Orstom | H Fofifa |
|---|---|---|---|---|
| 1976-77 | 450 | 06/02/77 | 5,56 | 4,05 |
| 1977-78 | 515 | 28/01/78 | 5,68 | 4,60 |
| 1978-79 | 380 | 26/03/79 | 5,42 | 3,77 |

Le maximum de l'année 1977-78 (cyclone Georgia) pourrait être considéré après enquête comme la quatrième plus forte crue de la période 1930-79, après 1936-37, 1971-72 et 1955-56.

Le débit de crue décennal a été évalué à 400 m³/s (1 540 l/s/km²).

Le débit d'étiage médian est difficile à estimer, en raison du faible nombre d'observations. Il ne doit pas dépasser les 100 l/s (0,4 l/s/km²), valeur nettement inférieure à celle estimée pour la DEMOKA dont le bassin supérieur, contrairement à celui de la KIMAZIMAZY, draine les formations gréso-calcaires du BEMARAHA (système de l'ISALO).

## 6.3. La Tsiombikary à Tsiombikary

La Tsiombikary est un petit affluent rive droite de la KIMAZIMAZY. La station (18°05'S - 440°14'E) contrôle un bassin de 24 km². Vingt-neuf mesures de débit (entre 1 l/s et 46.5 m³/s) permettent le calcul des débits moyens mensuels de 1977-78 et 1978-79.

tableau 7.107.

Tsiombikary à Tsiombikary
Débits mensuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1977-78 | .12 | .34 | 1.57 | 1.00 | 1.54 | .08 | .01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | .39 |
| 1978-79 | (.02) | .61 | .63 | 1.08 | .85 | .12 | .04 | (.01) | (0) | (0) | (0) | (0) | .28 |

Les débits moyens mensuels de saison des pluies sont liés à ceux de la KIMAZIMAZY par une relation graphique d'expression :
Q TSI = .09 Q KIM - .3

Le module de la TSIOMBIKARY peut être évalué à .45 m³/s (H = 600 mm).

| | QJ Min | QJ Max |
|---|---|---|
| 1977-78 | 0 (a.c. du 15.05) | 29.6 m³/s le 27.01.78 |
| 1978-79 | 0 (a.c. du 7.06) | 8.33 m³/s le 21.01.79 |

Un contrôle aval stable (petits seuils rocheux) et des jaugeages complets de basses et moyennes eaux complétés par une série de mesures par flotteurs ont permis un étalonnage assez correct de cette station (extrapolation par les vitesses moyennes et les sections mouillées) et l'estimation des maximums annuels de la période 1977-79.

| Année | Qm³/s | Date | Hm |
|---|---|---|---|
| 1977-78 | (1.46) | 27/01/78 | 2,29 |
| 1978-79 | 68,0 | 21/01/79 | 1,83 |

Les débits semblent s'annuler chaque année à partir de mai-juin.

## 6.4. La Namela à Antanandeva

La station d'ANTANANDEVA, située à la sortie des gorges de la NAMELA (18° 02' S - 44° 10' E), contrôle un bassin versant de 680 km². La station a été mise en service en 1967 mais les observations ne sont connues que pour l'année 1969 et de novembre 1977 à septembre 1979. 57 mesures de débit (1.41 à 125 m³/s) ont permis d'établir un étalonnage utilisable pour la gamme des observations (après extrapolation jusqu'à 216 m³/s).

tableau 7.108.

Namela à Antanandeva
Débits moyens
mensuels et annuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1968-69 | | | 62.9 | 35.5 | 32.8 | 20.3 | 2.64 | (1.60) | 1.47 | 1.39 | 1.38 | 1.25 | |
| 1969-70 | 2.28 | 2.80 | | | | | | | | | | | |
| 1977-78 | 7.47 | 9.01 | 50.3 | 31.9 | 31.0 | 10.1 | 3.27 | 2.53 | 2.21 | 2.04 | 1.93 | 4.35 | 12.9 |
| 1978-79 | 11.8 | 18.4 | 21.3 | 84.6 | 35.5 | 25.9 | 4.51 | 2.79 | 2.34 | 2.76 | 1.82 | (1.72) | 17.2 |

| | QJ Min | QJ Max |
|---|---|---|
| 1968-69 | 1.20 m³/s le 13.10.69 | 347 m³/s le 27.01.69 |
| 1977-78 | 1.81 m³/s le 13.11.78 | 354 m³/s le 28.01.69 |
| 1978-79 | (1.24) m³/s le 14.10.79 | 408 m³/s le 05.02.79 |

Les débits mensuels de la NAMELA sont en moyenne 2 fois 1/2 supérieurs à ceux de la KIMAZIMAZY.

Le module interannuel de la NAMELA peut être évalué (ordre de grandeur) à 18 m³/s. La lame écoulée (835 mm) pour une pluviométrie moyenne interannuelle de l'ordre de 1600 mm correspond à un déficit d'écoulement de 765 mm (Ke = 52 %)

Calculées de la même façon que sur la DEMOKA, 21 valeurs de débits d'étiage permettent d'estimer les quantiles suivants (DANLOUX 1980) :

| | | |
|---|---|---|
| Médiane | QJ MIN = 1.40 m³/s | (2.1 l/s/km²) |
| Decennale sèche | QJ MIN = .80 m³/s | (1.2 l/s/km²) |
| Decennale humide | QJ MIN = 2.25 m³/s | (3.3 l/s/km²) |

Les étiages sont comparables à ceux de la DEMOKA ; la NAMELA bénéficie également des réserves stockées en saison des pluies dans les formations gréso-calcaires de la BEMARAHA.

L'extrapolation par la formule de Manning-Strickler a été menée pour l'évaluation des débits des très hautes eaux relevées à cette station, suivie de septembre 1977 à octobre 1979.

Maximums connus de la période 1956-1980

| Année | Hm | Qm³/s | Épisode cyclonique |
|---|---|---|---|
| 1971-72 | 4,00 | 930 | Cyclone Eugénie |
| 1969-70 | 3,75-4,00 | 8-900 | Cyclone Genevieve |
| 1972-73 | 3,75-4,00 | 8-900 | Cyclone Hortense ? |
| 1968-69 | 3,75 | 800 | Cyclone Dany |
| 1977-78 | 3,60 | 715 | Cyclone Georgia |

Le débit de crue décennal a été évalué à 835 m³/s (1 230 l/s/km²) et le débit cinquantennal à 1 160 m³/s (1 705 l/s/km²).

## 6.5. La Mahavavy du sud

Entre la région de MAINTIRANO et le bassin de la BETSIBOKA, aucune station perenne n'a pu être installée et suivie sur les principaux cours d'eau : MANAMBAHO, RANOBE, SABAO, MAHAVAVY du Sud, en raison des grandes difficultés d'accès en saison des pluies.

Des observations de courte durée effectuées au début des années cinquante à SITAMPIKY sur la MAHAVAVY au sud (16° 41' S - 46° 06' E- 12 800 km²) avaient permis d'évaluer d'étiage à 2 l/s/km² (26 m³/s).

La station de MAROVATO, située au niveau du bac (15°59'S - 45°54'E), contrôle la quasi-totalité du bassin versant de la MAHAVAVY du sud (18 490 km²).

Une série de jaugeages en 1973 et des mesures de pente entre les échelles SOSUMAV de MAROVATO et de MANAKARA ont permis une évaluation des débits de crue et l'analyse statistique de l'échantillon 1957-1973.

| Année | Qm³/s | Marovato | Manakara | Sitampiky | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1950-51 | | | 10,68 | | |
| 1951-52 | | | 11,28 | | |
| 1952-53 | | | 11,17 | | |
| 1953-54 | | | 11,03 | 4,10 | Min |
| 1954-55 | | | | 3,78 | Min |

suite

| Année | Qm³/s | Marovato | Manakara | Sitampiky | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1955-56 | 2380 | 13,22 | 11,48 | 5,09 | Min |
| 1956-57 | | | | 4,99 | Min |
| 1957-58 | 2130 | 13,01 | 11,28 | 5,99 | |
| 1958-59 | 1900 | 12,80 | 11,10 | 4,82 | |
| 1959-60 | 1790 | 12,68 | 11,00 | 5,65 | |
| 1960-61 | 1200 | 12,00 | 10,30 | 5,14 | |
| 1961-62 | 1750 | 12,65 | 11,10 | 5,80 | |
| 1962-63 | 930 | 11,65 | 10,21 | 4,78 | |
| 1963-64 | 1180 | 11,98 | 10,49 | 4,70 | |
| 1964-65 | 2350 | 13,20 | 11,20 | 5,14 | Min |
| 1965-66 | 2070 | 12,95 | 10,93 | 5,78 | Min |
| 1966-67 | 2380 | 13,22 | 10,73 | 5,00 | |
| 1967-68 | 2210 | 13,08 | 10,60 | 4,88 | |
| 1968-69 | 3050 | 13,65 | 11,50 | 5,51 | Min |
| 1969-70 | 1360 | 12,10 | 9,90 | 5,24 | |
| 1970-71 | 2700 | 13,45 | 11,30 | 5,00 | Min |
| 1971-72 | 4350 | 14,10 | 11,81 | 5,76 | Min |
| 1972-73 | 2680 | 13,44 | 11,90 | 6,00 | Min |

Une distribution de GUMBEL, adaptée à l'échantillon des 16 maximums annuels correspond aux quantiles suivants :

Mahavavy du sud à Marovato

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1990 | 2730 | 3220 | (4300) | (4750) |
| q l/s/km² | 108 | 148 | 174 | 233 | 257 |

# 7. BASSIN DE LA BETSIBOKA

Le bassin de la BETSIBOKA est le plus important de Madagascar par le volume des apports annuels et la superficie (63 500 km²) si l'on y incorpore le haut bassin de la MAHAJAMBA en amont de la capture par la KAMORO. Le bassin proprement dit de la BETSIBOKA est de 49 000 km² (graphe 7E).

La BETSIBOKA est formée de la réunion de deux grands cours d'eau de direction générale sud-nord :

La branche mère (BETSIBOKA) à l'est, issue des hauts plateaux Imerinas au nord de ANTANANARIVO, limitée

à l'est par la falaise de l'ANGAVO et les hauts plateaux de l'ANVAFY, à l'ouest, par la Tampoketsa d'ANKAZOBE. La branche mère après la réunion de ses formateurs (JABO, AMPARIHIBE) reçoit en rive droite la MANANARA et la MANANTA, puis peu avant le confluent, l'ISINKO et l'ANDRIANTOANY. D'une altitude moyenne d'environ 1 000 m la BETSIBOKA coule dans de larges plaines (ALAKAMISY, ANJOZOROBE, ANDAKANA) séparées par des rapides et des chutes (VOHOMBORITRA , AMBODIROKA).

L'affluent principal (plus long et aux apports plus importants mais aux crues moins puissantes) est l'IKOPA qui prend sa source sur le rebord de la falaise orientale au sud-est d'ANTANANARIVO (VARAHINAS du sud et du nord). Après avoir traversé la large plaine alluviale d'ANTANANARIVO, l'IKOPA reçoit en rive gauche d'importants affluents issus des hauts plateaux et de la façade occidentale de l'ANKARATRA : SISAONY et ANDROMBA. Puis l'IKOPA coule vers le nord, rejointe par l'ANDRANOMBE, LA MANANKAZO, l'ISANDRANO et la MENAVAVA. D'une altitude moyenne plus élevée que celle de la BETSIBOKA (1 200 m), le bassin de l'IKOPA est lui aussi caractérisé par une succession de biefs dans des plaines dont la plus importante est celle d'ANTANANARIVO et de chutes et rapides particulièrement importants dans son cours moyen au profil jeune (Chutes de FARAHANTSANA, RANOMAFANA, MAHAVOLA, VOHITSARA, ISANDRANO, ANTAFOFO, ANTANANDAVA)

Au sortir du socle, l'IKOPA et la BETSIBOKA confluent dans une large zone marécageuse, parsemée d'étangs et lacs, et marquent une nette rupture de pente (10 cm/km). Après avoir reçu en rive gauche le KAMORO (qui capture une large partie des eaux de la MAHAJAMBA), la BETSIBOKA à une soixantaine de kilomètres de MAHAJANGA, forme un delta important à travers une forêt dense de paletuviers avant de se jeter dans l'estuaire de BOMBETOKA.

La majeure partie du bassin repose sur les roches cristallines métamorphisées du socle ancien : à l'ouest, constituant la majeure partie du bassin de l'IKOPA, les micaschistes, migmatites granitoïdes, gneiss et granites des systèmes du graphite et des granites de TAMPOKETSA, à l'est (majeure partie du bassin de la BETSIBOKA), micaschistes et amphibolites du système du VOHIBORY, de facies moins cohérent et susceptibles d'une plus forte érodibilité que sur l'IKOPA. Les roches du socle sont très altérées et, au dessus du niveau sain imperméable, supportent de profondes couches latéritisées (sols ferrallitiques rouges) formant d'importants aquifères.

On note également des formations volcaniques néogènes et quaternaires : au sud du bassin de l'IKOPA, basaltes et ankaratrites à olivine de l'ANKARATRA et, au nord du bassin de la Betsiboka, basaltes et sakalavites du KAMORO. Ces formations sont altérées en sols bruns ferrallitiques sur basaltes.

Le contact du sédimentaire est observé un peu en amont du confluent IKOPA-BETSIBOKA. Du sud est au nord-ouest, on rencontre les formations gréso-calcaires du KAROO et du jurassique, calcaires du Crétacé continental avec quelques coulées volcaniques crétacées. Le recouvrement en alluvions anciennes et récentes est important dans les vallées avec des sols peu évolués et hydromorphes dans la zône marécageuse située en aval du confluent.

La majeure partie du bassin est recouverte par la savane herbacée (pseudo-steppe des pentes occidentales à hyparrhenia et aristida, pseudo-steppe de l'ouest à heteropogon).

Les galeries forestières sont réduites et il ne subsiste plus que des lambeaux de forêt primaire (forêt dense ombrophile sur le haut bassin de l'IKOPA, forêt dense tropophile en aval de MAEVATANANA) et quelques périmetres de reboisement.

La pluviométrie, supérieure à 2 000 mm sur la façade orientale de l'ANKARATRA et la Tampoketsa de KAMORO, subit un certain flechissement dans la plaine d'ANTANANARIVO (moins de 1 300 mm sous le vent de la seconde falaise) puis, sur les bassins moyens, une recrudescence (1 500 à 1 800 mm) au voisinage des Tampoketsa d'ANKAZOBE et de KAMORO avant de decroître en allant vers l'exutoire (1 500 mm à AMBATO puis 1 250 mm dans l'estuaire).

Nous présenterons les observations recueillies sur la BETSIBOKA dans l'ordre suivant : haut bassin de l'IKOPA, bassin inférieur de l'IKOPA, bassin de la BETSIBOKA.

## 7.1. Le haut bassin de l'Ikopa

Le bassin supérieur de l'IKOPA, limité à la station de BEVOMANGA, représente une superficie de 4 290 km². Il est caractérisé par une forte densité humaine (plaine d'ANTANANARIVO) et un degré prononcé d'occupation des sols. Les différents équipements (barrages hydro-électriques et retenues à usage mixte, périmètres rizicoles et ouvrages d'irrigation-drainage) ont un impact très sensible sur les caractéristiques "réelles" des régimes hydrologiques de la haute IKOPA.

Nous présenterons les caractéristiques principales des aménagements, telles qu'elles existaient entre 1950 et 1960, centre de gravité des chroniques hydrologiques disponibles.

Situées à une quarantaine de kilomètres en amont d'ANTANANARIVO, les usines de production hydro-électriques d'ANTELOMITA sont anciennes. Implantées sur des chutes de l'IKOPA totalisant 36 m de dénivelée, les usines d'ANTELOMITA I (1909) et ANTELOMITA II (1928) utilisaient à l'origine une réserve en tête de 250 000 m³, portée à 1 300 000 m³ en juin 1952. La puissance installée, initialement de 1700 KW, puis 4300 KW fût portée à 7800 KW en 1952 avec un débit dérivé de 30 m³/s.

En 1938, fut construite la retenue de MANTASOA sur la VARAHINA du nord, en amont d'ANTELOMITA. La retenue d'une surface d'environ 1 850 ha et d'une capacité de 72 millions de mètres cubes était initialement destinée à constituer une réserve (stockage en saison des pluies) pour le soutien des débits d'étiage de l'IKOPA (fonctionnement de l'usine d'ANTELOMITA et irrigation). Les lachures annuelles de la retenue (moyenne 1939-44) étaient de 60 millions de mètres cubes (1,9 m³/s). A la suite de la construction de la retenue de TSIAZOMPANIRY, la majeure partie des apports dans la retenue de MANTASOA est dérivée vers le bassin du MANGORO et la VARAHINA du nord ne participe plus à l'alimentation de l'IKOPA qu'à l'occasion de déversements épisodiques. De ce fait, les bassins naturels des stations de l'IKOPA supérieur doivent être amputés de la superficie de la VARAHINA du nord au niveau du barrage (96 km²) pour obtenir les superficies "réelles" contribuant aux apports.

En utilisant un site naturel favorable, la haute vallée de la VARAHINA du sud a été équipée d'un barrage réservoir (TSIAZOMPANIRY) qui stocke les apports de la VARAHINA et d'un de ses affluents, la MANANDRIANA. Cette retenue d'une capacité totale de 230 millions de mètres cubes a été aménagée en 1955. Elle est susceptible d'emmagasiner environ 75 % des apports annuels moyens de la VARAHINA au sud et de la MANANDRIANA. Cet ouvrage joue évidemment un rôle important sur le régime de l'IKOPA supérieur (prélèvement sur les débits et stockage d'environ 100 millions de mètres cubes en moyenne de novembre à mai restitués à l'IKOPA pendant la saison sèche et ecrètement des crues).

La plaine d'ANTANANARIVO et les fonds de vallées du bassin sont intensivement voués à la riziculture. En 1989, le terroir rizicole (bas-fonds de vallées, terrasses et plaines) des hauts plateaux centraux correspondait à une superficie globale de 6 000 km². Pour la seule plaine de TANARIVE, les superficies rizicoles représentaient déjà en 1950, 18 000 ha (dont 6 000 tributaires de l'IKOPA seule). Si une fraction importante des surfaces rizicoles doivent être drainés, un total de 7 000 ha correspondait à une demande en eau d'irrigation importante (1l/s/ha). Il était envisagé à la suite de la construction de TSIAZOMPANIRY de doubler cette superficie.

Les calendriers culturaux (pour le riz de première récolte) : semis en août, repiquage en octobre, récolte en décembre-janvier, pour celui de seconde saison, récolte en avril) impliquait une fourniture en eau évaluée en 1950 à 60 millions de mètres cubes d'août à novembre pour l'IKOPA seule, à 150 millions de mètres cubes pour l'IKOPA et ses affluents (soit l'équivalent d'un débit dérivé de 15 m³/s). Une partie importante de cette

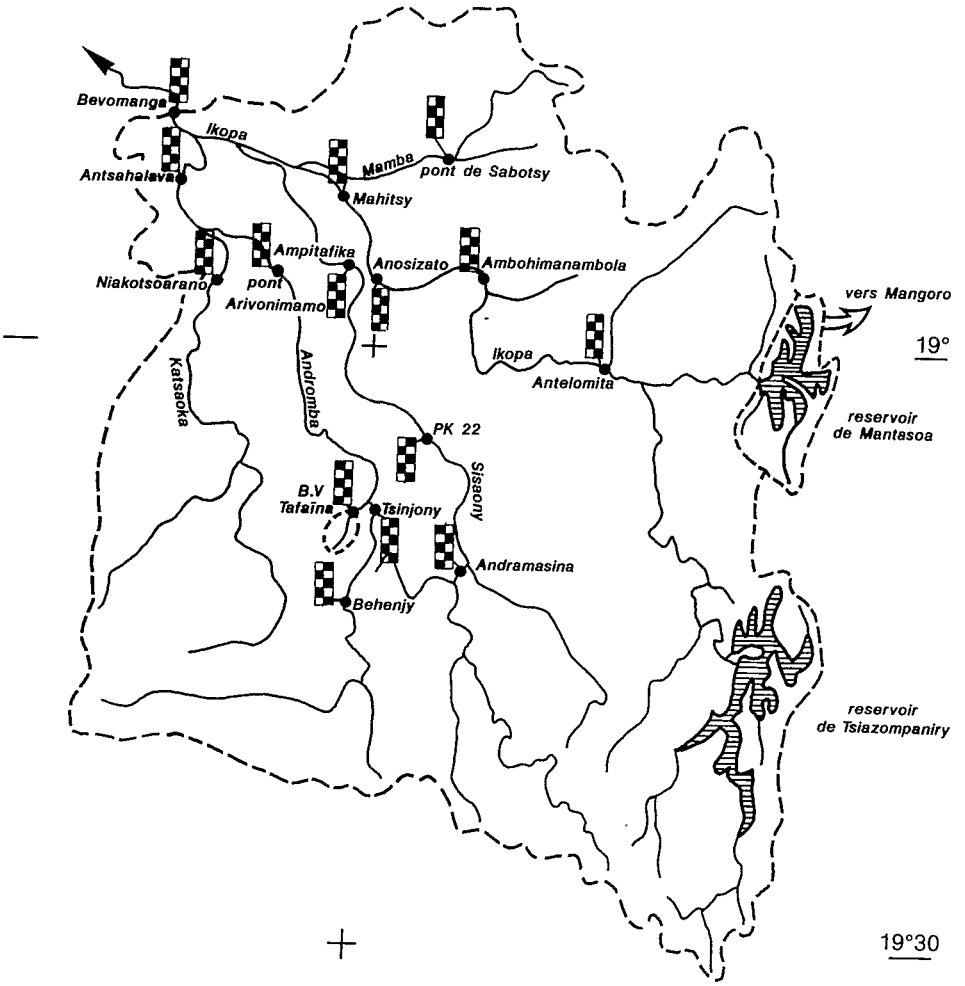
fourniture était assurée à partir de l'IKOPA (prise du barrage de TANJAMBATO et dérivation par le canal d'ANDRIANBONY et retour à l'IKOPA des débits non utilisés, par l'intermédiaires de la MAMBA).

Il faut noter enfin les prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable de l'agglomération d'ANTANARIVO (évaluée à 20 000 m³/s en 1955) et aux divers usages secondaires.

L'implantation des différentes stations hydrométriques du haut-bassin de l'IKOPA est représentée sur le graphe 7.65.

figure 7.65.

Bassin supérieur de l'Ikopa



## 7.1.1. La Varahina du sud à Tsiazompaniry

La station de TSIAZOMPANIRY (19°15'S - 47°50'E) contrôlait un bassin versant de 283 km² situé immédiatement à l'est du rebord de la falaise de l'ANGAVO. Le bassin situé sur le socle gneissique fortement latéritisé sur les flancs et fonds de vallée est recouvert de prairie (70 %) et forêt (30 %).

L'échelle a été installée le 27 août 1948 par EDF et les observations ont été effectuées jusqu'en juin 1955, date du début des travaux de construction de la retenue. Huit jaugeages entre 4 et 60 m³/s ont permis d'établir un étalonnage acceptable.

Le tableau 7.109 présente les débits moyens mensuels de la période d'observation (septembre 1948 à juin 1955, ainsi que les débits moyens estimés par la Société d'électricité de Madagascar, d'une part de septembre 1939 à août 1944, à partir des débits moyens contrôlés sur l'IKOPA à ANTELOMITO, d'autre part de janvier 1956 à janvier 1964, débits calculés à partir des relevés de fonctionnement de la retenue (variations du volume stocké, déversements et lachures). Ces débits "naturels" sont évidemment approchés.

Ils sont probablement légèrement surestimés car intégrant les apports de la MANANDRIANA (environ 2 m³/s en moyenne interannuelle) qui sont supérieurs à la reprise par évaporation sur le plan d'eau (de l'ordre de 0,6 m³/s).

tableau 7.109.

Varahina du sud à Tsiazompaniry
Débits moyens mensuels
et annuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1938/39 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4.4 | 4.9 | - |
| 1939/40 | 6 | 17 | 15 | 20.2 | 21.7 | 14.5 | 9.2 | 7 | 6.6 | 5.9 | 6.2 | 5.8 | 11.2 |
| 1940/41 | 5.4 | 10.8 | 14.8 | 28.4 | 17.8 | 10 | 8.7 | 8.2 | 7 | 7.5 | 4.6 | 4.7 | 10.6 |
| 1941/42 | 5 | 5.6 | 10.3 | 8.6 | 6.5 | 6 | 5 | 4.4 | 4 | 4.2 | 3.9 | 4.5 | 5.65 |
| 1942/43 | 5.3 | 7.4 | 13.6 | 15.4 | 13 | 8.5 | 6 | 4.9 | 4.5 | 4 | 4 | 3.9 | 7.5 |
| 1943/44 | 3.5 | 7 | 5.8 | 8 | 12.5 | 8.5 | 6.2 | 4.7 | 6 | 5.5 | - | - | - |
| 1947/48 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 6.07 | 4.9 | - |
| 1948/49 | (5.2) | 8.12 | 6.81 | 6.98 | 20.9 | 9.93 | 9.74 | 8.4 | 7.79 | 5.9 | 5.2 | 4.5 | 8.31 |
| 1949/50 | 5.5 | 4.76 | 8.75 | 21.3 | 12.2 | 8 | 6 | 5.9 | 6.80 | 6.1 | 5.6 | 5.1 | 7.95 |
| 1950/51 | 6 | 4.8 | 17.5 | 11.9 | 16.2 | 9 | 7.7 | 7.4 | 5.82 | 6.14 | 5.01 | 4.02 | 8.45 |
| 1951/52 | 8.63 | 5.88 | 18.6 | 12.3 | 9.80 | 6.17 | 6.32 | 8.61 | 6.30 | 6.64 | 5.26 | 4.26 | 8.22 |
| 1952/53 | 9.14 | 10.6 | 6.96 | 7.88 | 11.6 | 7.01 | 5.77 | 6.76 | 5.67 | 5.89 | 6.54 | 4.81 | 7.47 |
| 1953/54 | 5.19 | 6.54 | 28.7 | 10.0 | 13.0 | 7.7 | 6.62 | 6.83 | 5.7 | 5.3 | 4.5 | 3.6 | 8.66 |
| 1954/55 | 4.8 | 10.8 | 11.8 | 9.0 | 10.6 | 7.2 | 6.1 | 6.0 | - | - | - | - | - |
| 1955/56 | - | - | 25.0 | 29.0 | 12.7 | 11.2 | 10.5 | 9.3 | 8.6 | 7.5 | 6.1 | 6.8 | - |
| 1956/57 | 18.5 | 21.7 | 13.0 | 13.7 | 15.0 | 10.6 | 8.2 | 8.7 | 8.8 | 8.8 | 6.1 | 5.9 | 11.6 |
| 1957/58 | 7.1 | 12.3 | 13.7 | 12.2 | 12.7 | 8.7 | 8.3 | 9.8 | 10.2 | 8.6 | 7.6 | 7.4 | 9.88 |
| 1958/59 | 7.8 | 13.3 | 15.5 | 9.7 | 49.4 | 13.5 | 7.1 | 7.6 | 11.1 | 8.8 | 7.9 | 9.4 | 13.5 |
| 1959/60 | 11.8 | 9.9 | 20.6 | 10.1 | 4.2 | 7.1 | 8.2 | 8.4 | 8.7 | 5.5 | 6.3 | 3.96 | 8.73 |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1960/61 | 6.5 | 9.8 | 14.4 | 5.45 | 11.6 | 8.4 | 7.05 | 6.25 | 7.30 | 9.66 | 5.6 | 6.7 | 8.27 |
| 1962/62 | 11.2 | 13.9 | 6.28 | 11.9 | 10.1 | 7.55 | 6.99 | 5.99 | 6.00 | 12.8 | 4.68 | 6.06 | 8.61 |
| 1962/63 | 8.01 | 7.13 | 17.1 | 19.3 | 11.0 | 4.77 | 5.29 | 6.20 | 7.68 | 4.00 | 11.1 | 4.9 | 9.40 |
| 1963/64 | 11.1 | 10.6 | 10.9 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 7.58 | 9.90 | 14.1 | 13.6 | 14.6 | 8.72 | 7.25 | 7.07 | 7.08 | 6.83 | 5.83 | 5.66 | 9.00 |
| Ecart-type | 3.47 | 4.29 | 5.97 | 6.78 | 9.18 | 2.40 | 1.52 | 1.55 | 1.82 | 2.20 | 1.65 | 2.04 | |
| Max. | 18.5 | 21.7 | 28.7 | 29.0 | 49.4 | 14.5 | 10.5 | 9.80 | 11.1 | 12.8 | 11.1 | 11.9 | |
| Q1 | 8.89 | 11.6 | 17.3 | 17.4 | 15.6 | 9.97 | 8.25 | 8.40 | 8.60 | 8.60 | 6.25 | 6.38 | |
| Méd. | 6.25 | 9.85 | 13.7 | 11.9 | 12.6 | 8.45 | 7.02 | 6.91 | 6.80 | 6.14 | 5.60 | 4.90 | |
| Q3 | 5.25 | 6.77 | 9.52 | 8.80 | 10.8 | 7.15 | 6.05 | 6.00 | 5.82 | 5.50 | 4.64 | 4.38 | |
| Min. | 3.50 | 4.76 | 5.80 | 5.45 | 4.20 | 4.77 | 5.00 | 4.40 | 4.00 | 4.00 | 3.90 | 3.60 | |

Les graphiques 7.66 et 7.67 représentent les débits mensuels classés et l'hydrogramme annuel (1951-52) d'une année moyenne. Les crues sont bien individualisés (tendance au ruissellement des surfaces imperméables) mais le débit de base est bien soutenu même en saison sèche : nappes d'altérites rechargées en saison des pluies et pluviomètrie de saison sèche pas trop faible (influence du régime de la côte est).

figure 7.66.

Varahina du sud à Tsiazompaniry

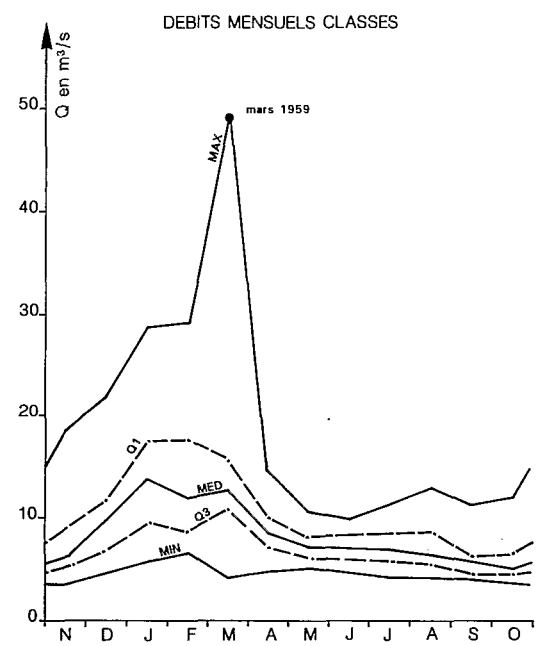
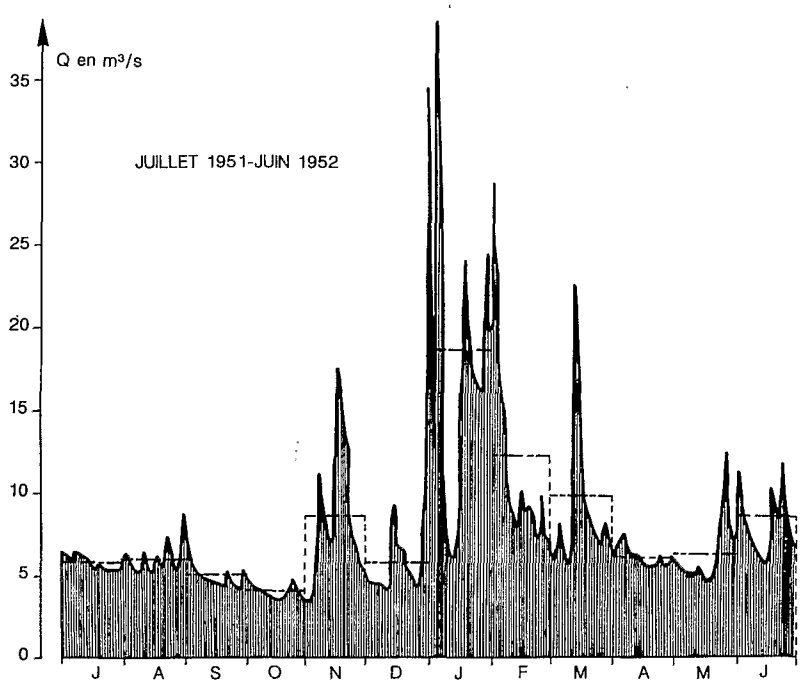


figure 7.67.

Varahina du sud
à Tsiazompaniry




Les débits maximaux observés ou estimés sur le bassin sont les suivants :

| | | |
|---|---|---|
| 1932 | (90) m³/s | évalué d'après la crue de l'IKOPA à BEVOMANGA |
| 1941 | 60 m³/s | |
| 1942 | 40 m³/s | |
| 1943 | 42 m³/s | |
| 1944 | 25 m³/s | |
| 1945 | 43 m³/s | |
| 1944 | 25 m³/s | |
| 1945 | 43 m³/s | |
| 1946 | 36 m³/s | |
| 1947 | 35 m³/s | |
| 1948 | 59 m³/s | |
| 10.3. 1949 | 41 m³/s | (cyclone de début mars 1949) |

Tous ces débits maximaux ont été évalués d'après les observations effectuées sur l'IKOPA à BEVOMANGA par la S.E.M.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Janvier | 1950 | 62 m³/s | |
| Janvier | 1951 | 41 m³/s | |
| | 1952 | 62 m³/s | |
| Janvier | 1953 | 31 m³/s | |
| Crue cyclonique de janvier | 1954 | QMAX = 360 | m³/s (4.82 m.) |
| | 1955 | 29 m³/s | |

Les débits de crue decennal et centennal avaient été estimés par EDF à 80 et 110 m³/s (ordre de grandeur) soit 283 et 390 l/s/km², mais cela à une date antérieure au cyclone de 1954.

Les étiages de la VARAHINA du sud avaient été évalués à 3 à 3,5 m³/s entre 1939 et 1944.

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 1949 | 3.5 | m³/s |
| décembre | 1950 | 3.9 | m³/s |
| novembre | 1951 | 3.3 | m³/s |
| novembre | 1952 | 3.14 | m³/s |
| novembre | 1953 | 3.84 | m³/s |
| octobre | 1954 | 2.80 | m³/s |

L'étiage médian peut être estimé entre 3 et 3,5 m³/s (10,6 à 12.4 l/s/km²).

L'échantillon de 17 valeurs annuelles des apports donne, après ajustement d'une loi log. normale (test B.M. : 3.72, échelle : 977 mm, position : 13.3 mm, forme : .197), les quantiles suivants :

tableau 7.110.

Varahina du sud à Tsiasompaniry

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| H mm | 720 | 775 | 840 | 990 | 1165 | 1270 | 1365 |
| Q m³/s | 6.46 | 6.95 | 7.53 | 8.88 | 10.4 | 11.4 | 12.2 |
| q l/s/km² | 22.8 | 24.6 | 26.6 | 31.4 | 36.7 | 40.3 | 43.1 |

Les précipitations moyennes annuelles sur le bassin sont, en moyenne interannuelle, de l'ordre de 1 700 mm. Avec une lame moyenne de 1 000 mm, le déficit d'écoulement moyen est de 700 mm (Ke = 59 %).

## 7.1.2. Manandriana

Ce petit affluent de la VARAHINA du sud a fait l'objet d'observations, en amont de son confluent (19°15'30"S - 47°51'43"). Le bassin versant contrôlé (53 km²) représente 18.7 % de la surperficie de celui de la VARAHINA du sud à TSIAZOMPANIRY.

tableau 7.111.

Manandriana
Débits moyens mensuels et annuels en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1950/51 | - | - | - | 2.74 | - | 1.68 | 1.28 | 1.13 | .850 | - | .757 | .457 | - |
| 1951/52 | 1.35 | - | - | 2.66 | 2.91 | 1.28 | 1.22 | 1.68 | .850 | 1.17 | .693 | .544 | - |
| 1952/53 | 2.47 | 2.53 | 2.07 | 2.00 | 2.90 | 1.34 | .853 | 1.10 | .738 | 1.13 | - | .486 | - |
| 1953/54 | 1.51 | 1.34 | - | 1.23 | 1.74 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1954/55 | - | 1.89 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 1.78 | 1.92 | 2.07 | 2.16 | 2.52 | 1.43 | 1.12 | 1.30 | .813 | 1.15 | .725 | .496 | 1.45 |

La regression graphique entre les débits mensuels de la MANANDRIANA et ceux de la VARAHINA du sud est exprimée par la relation suivante :

Q MAN. = .33 Q TSIA. - . 9

Le module interannuel de la MANANDRIANA peut être estimé à 2 m³/s (1 200 mm) soit 22 % de celui de la VARAHINA. Le bassin situé plus à l'est que celui de la VARAHINA bénéficie de précipitations plus abondantes (de l'ordre de 2 000 mm).

Le maximum (5.30 m) du 15 janvier 1954 a été estimé à 70 m³/s.

## 7.1.3. Varahina du nord à Mantasoa

Nous ne disposons pas d'observations sur les écoulements antérieures à la construction de la retenue (1938). Le tableau 7.70 consigne les évaluations du débit "naturel" de la VARAHINA du nord, calculé d'après le fonctionnement de la retenue (variations du volume stocké, déversement et lachures) par la S.E.M.

tableau 7.112.

Varahina du nord (96 km²)
Débits moyens mensuels
(m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1955/56 | - | - | - | - | - | - | 2.05 | 1.35 | .75 | 1.12 | .96 | .93 | - |
| 1956/57 | 2.51 | 3.73 | 2.17 | 6.20 | 7.88 | 5.29 | 2.09 | (1.50) | (1.50) | (1.50) | (1.0) | .60 | 2.98 |
| 1957/58 | .81 | 3.58 | (5.60) | (5.60) | (6.7) | (2.5) | 1.75 | (2.0) | 2.50 | 2.61 | 1.85 | 2.73 | (3.18) |
| 1958/59 | 2.31 | 4.9 | 10.3 | 4.5 | 24.3 | 4.5 | 2.4 | 3.3 | 2.3 | 1.9 | .7 | 1.0 | 5.23 |
| 1959/60 | 1.1 | 3.4 | 4.8 | 2.0 | 2.2 | 1.3 | 1.32 | 1.31 | .78 | 2.4 | 1.7 | .86 | 1.94 |
| 1960/61 | - | 2.68 | 6.8 | 2.02 | 4.0 | 3.7 | 1.83 | 1.23 | 2.82 | 2.46 | 2.68 | 1.3 | |
| 1961/62 | 3.55 | 6.72 | 5.0 | 5.44 | 3.06 | 9.52 | 2.31 | 6.90 | 1.98 | 1.40 | 1.92 | 4.34 | 4.32 |
| 1962/63 | 5.24 | 2.12 | 5.30 | 8.28 | 5.52 | 4.43 | 2.19 | 2.90 | 3.24 | 1.85 | | | |
| MOY | 2.59 | 3.88 | 5.28 | 4.86 | 7.67 | 4.46 | 1.99 | 2.56 | 1.98 | 1.90 | 1.54 | 1.68 | 3.36 |

Ces débits mensuels présentent une liaison statistique assez bien marquée avec ceux de la VARAHINA du sud.

$Q_{VAR.NORD} = .43\ Q_{VAR.SUD} - .87$ $\quad R^2 = .61$ $\quad$ (P>.995 pour 87 couples)

En ajoutant au débit moyen calculé d'après cette relation, les pertes par évaporation sur le plan d'eau et fuites aux vannes (de l'ordre de 0.4 m³/s), le module peut être estimé à 3.4 m³/s (H = 1 120 mm). La lame écoulée, supérieure d'environ 10 % à celle de la VARAHINA du sud, correspond à la situation du bassin, plus proche de la falaise et sans doute mieux arrosé.

Les débits de la VARAHINA NORD, branche mère de l'IKOPA, sont actuellement entièrement dérivés vers le bassin du MANGORO (renforcement de l'aménagement de la MANDRAKA).

Si aucune évaluation n'avait été tentée pour la crue de janvier 1954 (exhaussement signalé de la retenue de MANTASOA de 1,50 m), le débit maximal naturel a pu être reconstitué (Q = 153 m³/s) pour la crue du 27/03/59.

## 7.1.4. Ikopa à Antelomita

Les observations effectuées à l'usine d'ANTELOMITA (surface du bassin versant sans MANTASOA : 1 180 km²) de 1939 à 1944 ont permis de déterminer, d'après le fonctionnement de l'usine, les débits mensuels moyens réels de la période et, en prenant en compte les lachures du réservoir de MANTASOA, les débits naturels du bassin.

tableau 7.113.

Ikopa à Antelomita
Débits moyens mensuels (m³/s)
Moyenne 39-44

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q réels | 18.9 | 35.0 | 39.5 | 48.6 | 45.4 | 24.7 | 16.8 | 13.4 | 14.1 | 14.1 | 14.1 | 14.8 | |
| Q naturels | 11.7 | 32.4 | 39.3 | 47.6 | 43.8 | 24.6 | 16.7 | 13.3 | 14.0 | 12.5 | 9.60 | 8.9 | 22.9 |

Sur la période étendue, le module peut être estimé à 25 m³/s, soit une lame écoulée annuelle de 855 mm.

Avant l'entrée de l'IKOPA dans la plaine du BETSIMITATATRA, et directement en aval de la confluence des VARAHINA, le seuil déversant d'ANTELOMITA 1 constitue un excellent contrôle de hautes eaux, étalonné d'après des essais sur modèle au 1/20e.

Bien que les conditions hydrauliques diffèrent (situation des barrages sur le haut bassin de l'IKOPA), les deux plus fortes crues connues de la période 1930-1980 ont causé les deux plus fortes inondations de la plaine d'ANTANANARIVO entre 1930 et 1980.

| Année | Date | Hm | A=1277 km² | sans Mantasoa A=1180 km² | sans Tsiazompaniry A=846 km² |
|---|---|---|---|---|---|
| 1953-54 | 16/01/54 | 1,97 | 960 m³/s | 910 m³/s | 600 m³/s |
| 1958-59 | 28/03/59 | 1,72 | 1000 m³/s | 710 m³/s | 520 m³/s |

Les barrages ayant entre 1959 et 1975 rempli leur fonction (écrêtage des crues), les valeurs les plus fortes crues relevées au cours de cette période peuvent être considérées comme se rapportant à un bassin de 846 km².

Plus fortes crues connues de la période 1958-1975

| Année | Qm³/s | Date | Hm |
|---|---|---|---|
| 1958-59 | (520) | 28/03/59 | |
| 1974-75 | 338 | 13/03/75 | 1,06 |
| 1971-72 | 264 | 15/02/72 | 0,93 |
| 1972-73 | 190 | 25/02/73 | 0,75 |
| 1962-63 | 128 | 18/02/63 | 0,59 |
| 1970-71 | 119 | 28/02/71 | 0,50 |
| 1960-61 | 112 | 04/01/61 | 0,52 |

La crue décennale a été estimée à 300 m³/s (235 l/s/km²) et la crue cinquantennale à 540 m³/s (420 l/s/km²).

## 7.1.5. Ikopa à Ambohimanambola

La station d'AMBOHIMANAMBOLA (18°56'43"S - 47°35'56"E), située à 1 254 m d'altitude, se trouve entre l'usine d'ANTELOMITA et les périmètres rizicoles de la plaine de TANANARIVE : les observations qui y sont effectuées correspondent donc à un régime régularisé par le fonctionnement des réserves amont avant prélèvements pour l'irrigation.

L'échelle a été installée ainsi qu'un limnigraphe, en octobre 1956 (mise en fonctionnement de la retenue de TSIAZOMPANIRY). Les observations sont complètes depuis cette date (à l'exception de la crue de mars 1959 reconstituée d'après ANTELOMITA). Les données de janvier 1977 à octobre 1978 n'ont pas été traduites en débit.

Soixante-douze mesures de débit ont été effectuées par l'ORSTOM entre 1956 et 1973, et trente-quatre mesures par le Service météorologique de 1968 à 1973. Ces mesures entre 3.7 et 205 m³/s permettent un étalonnage stable malgré la dispersion des points jusqu'à 250 m³/s. L'extrapolation a été menée jusqu'à 720 m³/s.

Le bassin contrôlé a une superficie totale de 1503 km² mais la partie contributive aux écoulements n'est que de 1407 km² (déduction faite du bassin de la VARAHINA du nord à MANTASOA).

La pluviométrie du bassin est bien déterminée à partir de 24 stations pluviométriques. Elle est de 1 350 mm en moyenne interannuelle.

### 7.1.5.1. Débits moyens mensuels

Les débits moyens mensuels observés sont influencés par le fonctionnement des réserves amont (stockage en saison de pluies, soutien des débits en étiage). Les liaisons statistiques Q/P sont sans signification réelle bien que, les retenues étant presque pleines en début mars, on observe une bonne corrélation entre les débits de mars et les précipitations de mars et février.

$H03 = .41\ P03 + .06\ P02 - 23 \qquad (R^2 = .84\ P>.995)$

$H04 = .09\ P03 + .09\ P02 + 13.5 \qquad (R^2 = .49\ P>.975)$

Les liaisons statistiques entre débits de saison sèche n'ont aucun intérêt (soutien d'étiage).

tableau 7.114.

Ikopa à Ambohimanambola
Débits moyens mensuels et annuels en m³/s

Station : 1250100203 Ambohimanambola — Latitude : 18.56.43
Rivière : Ikopa — Longitude : 47.35.56

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1956/57 | 32.1 | 60.4 | 36.8 | 38.6 | 46.1 | 37.3 | 28.5 | 30.1 | 31.0 | 29.7 | 22.6 | 21.7 | 34.6 |
| 1957/58 | 25.0 | 44.8 | 76.5 | 47.1 | 41.1 | 28.9 | 30.5 | 31.9 | 31.2 | 28.7 | 28.5 | 28.6 | 36.9 |
| 1958/59 | 25.7 | 48.5 | 58.4 | 34.9 | 148. | 56.7 | 34.8 | 26.4 | 23.3 | 22.7 | 16.4 | 15.7 | 42.8 |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1959/60 | 23.1 | 36.5 | 46.4 | 25.3 | 16.0 | 11.1 | 12.4 | 13.8 | 12.7 | 13.4 | 13.2 | 11.1 | 19.6 |
| 1960/61 | 10.9 | 20.2 | 42.5 | 16.1 | 30.5 | 21.4 | 18.4 | 17.5 | 16.8 | 18.0 | 18.8 | 17.0 | 20.8 |
| 1961/62 | 19.0 | 42.5 | 21.6 | 28.2 | 26.1 | 21.7 | 20.3 | 14.7 | 7.37 | 18.3 | 20.9 | 21.6 | 21.8 |
| 1962/63 | 27.4 | 25.4 | 43.1 | 40.6 | 29.2 | 33.4 | 12.2 | 12.9 | 24.5 | 32.8 | 25.4 | 23.7 | 27.5 |
| 1963/64 | 29.3 | 41.8 | 27.1 | 46.6 | 35.6 | 13.5 | 16.1 | 20.0 | 28.7 | 24.9 | 25.1 | 25.3 | 27.8 |
| 1964/65 | 33.3 | 42.6 | 51.7 | 46.6 | 37.6 | 35.2 | 29.8 | 33.0 | 31.0 | 30.5 | 30.1 | 27.6 | 35.7 |
| 1965/66 | 26.6 | 42.8 | 33.3 | 25.9 | 26.2 | 23.5 | 29.3 | 27.9 | 29.5 | 32.0 | 29.8 | 32.4 | 30.0 |
| 1966/67 | 30.3 | 33.2 | 46.4 | 32.5 | 49.3 | 20.9 | 24.6 | 29.3 | 30.0 | 31.1 | 30.0 | 28.2 | 32.2 |
| 1967/68 | 40.4 | 46.2 | 38.6 | 43.2 | 32.4 | 29.7 | 28.7 | 24.6 | 27.3 | 26.4 | 24.6 | 25.2 | 32.2 |
| 1968/69 | 32.2 | 42.7 | 36.0 | 45.0 | 23.3 | 19.6 | 19.7 | 23.3 | 23.3 | 24.1 | 20.9 | 21.7 | 27.5 |
| 1969/70 | 22.1 | 40.0 | 63.5 | 36.9 | 27.8 | 23.4 | 26.1 | 26.0 | 24.8 | 25.7 | 23.1 | 17.8 | 29.8 |
| 1970/71 | 31.0 | 27.2 | 52.9 | 73.6 | 34.7 | 21.9 | 24.2 | 25.8 | 27.3 | 27.9 | 29.3 | 25.2 | 33.2 |
| 1971/72 | 30.9 | 44.6 | 34.3 | 80.8 | 61.0 | 34.1 | 29.0 | 27.9 | 29.8 | 29.2 | 25.7 | 27.4 | 37.7 |
| 1972/73 | 30.3 | 33.0 | 54.4 | 58.7 | 88.7 | 33.6 | 25.8 | 30.7 | 28.8 | 31.7 | 30.6 | 25.0 | 39.2 |
| 1973/74 | 24.3 | 23.8 | 27.0 | 29.0 | 24.4 | 24.7 | 22.1 | 20.4 | 14.0 | 14.0 | 14.3 | 22.7 | 21.7 |
| 1974/75 | 31.3 | 36.2 | 37.8 | 55.9 | 74.5 | 29.7 | 25.9 | 25.1 | 24.4 | 25.9 | 29.2 | 30.9 | 35.5 |
| 1975/76 | 46.1 | 44.0 | 50.1 | 43.8 | 27.8 | 29.3 | 27.3 | 25.6 | 27.0 | 29.5 | 24.4 | 25.7 | 33.3 |
| 1976/77 | 25.3 | 50.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1977/78 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1978/79 | 13.6 | 13.7 | 19.5 | 29.5 | (8.15) | 9.51 | 6.04 | 10.4 | 8.90 | 9.44 | 8.42 | 10.1 | 11.6 |
| 1979/80 | (14.8) | 18.4 | 31.8 | 26.4 | 30.0 | 10.8 | 9.60 | 8.82 | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 27.2 | 37.4 | 42.0 | 41.2 | 40.0 | 25.9 | 22.8 | 23.0 | 23.9 | 25.0 | 23.4 | 23.1 | 29.5 |
| Ecart-type | 8.03 | 11.5 | 14.5 | 15.7 | 30.0 | 10.7 | 7.60 | 7.17 | 7.65 | 6.73 | 6.26 | 5.94 | |
| Max. | 4.61 | 60.4 | 76.5 | 80.8 | 148. | 56.7 | 34.8 | 33.0 | 31.2 | 32.8 | 30.6 | 32.4 | |
| Q1 | 31.3 | 44.6 | 51.7 | 46.6 | 46.1 | 33.4 | 28.7 | 27.9 | 29.7 | 30.1 | 29.3 | 27.5 | |
| Méd. | 27.4 | 41.8 | 40.5 | 39.6 | 31.5 | 24.1 | 25.2 | 25.4 | 27.0 | 26.4 | 24.6 | 25.0 | |
| Q3 | 23.1 | 27.2 | 33.3 | 29.0 | 26.2 | 20.9 | 18.4 | 17.5 | 20.0 | 20.5 | 19.9 | 19.7 | |
| Min. | 10.9 | 13.7 | 13.5 | 16.1 | 8.15 | 9.51 | 6.04 | 8.82 | 7.37 | 9.44 | 8.42 | 10.1 | |

Les graphes 7.68, 7.69 et 7.70 représentent les débits mensuels classés ainsi que des hydrogrammes annuels en année excédentaire et déficitaire.

On observe une bonne analogie avec les hydrogrammes de la VARAHINA du sud mais surtout une forte régularisation des débits en saison sèche (mai à octobre) pratiquement stabilisés pour les besoins de l'irrigation en aval.

figure 7.68.

Ikopa à Ambohimanambola

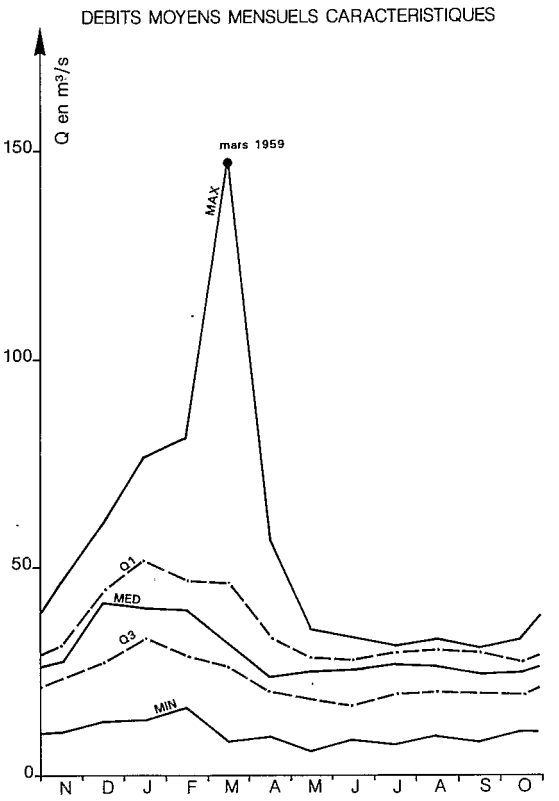



figure 7.69.

Ikopa à Ambohimanambola

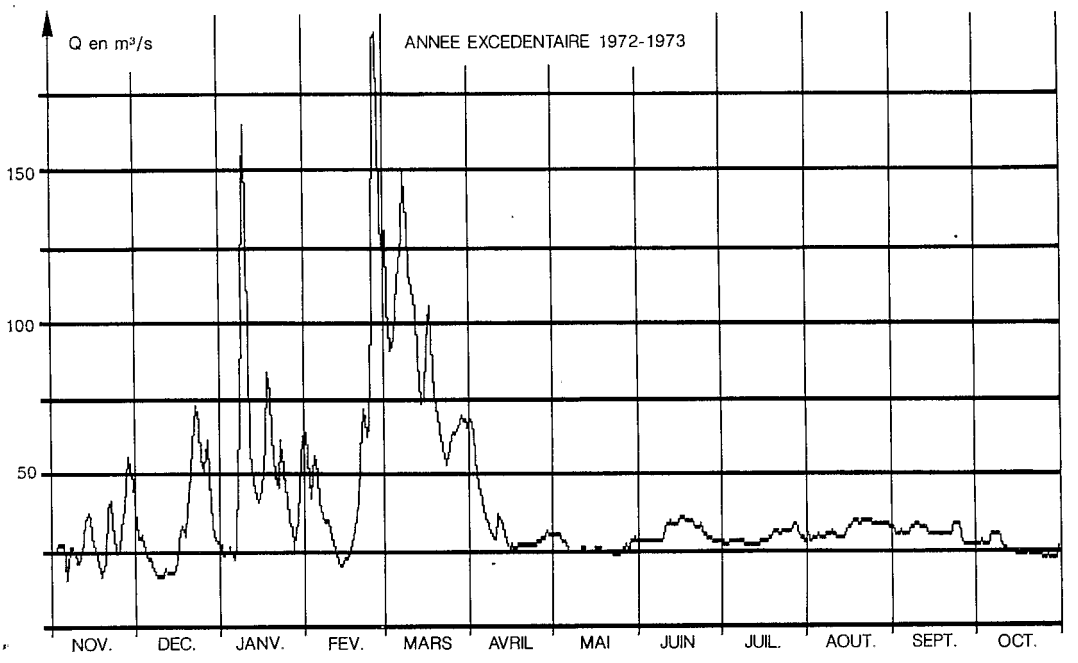
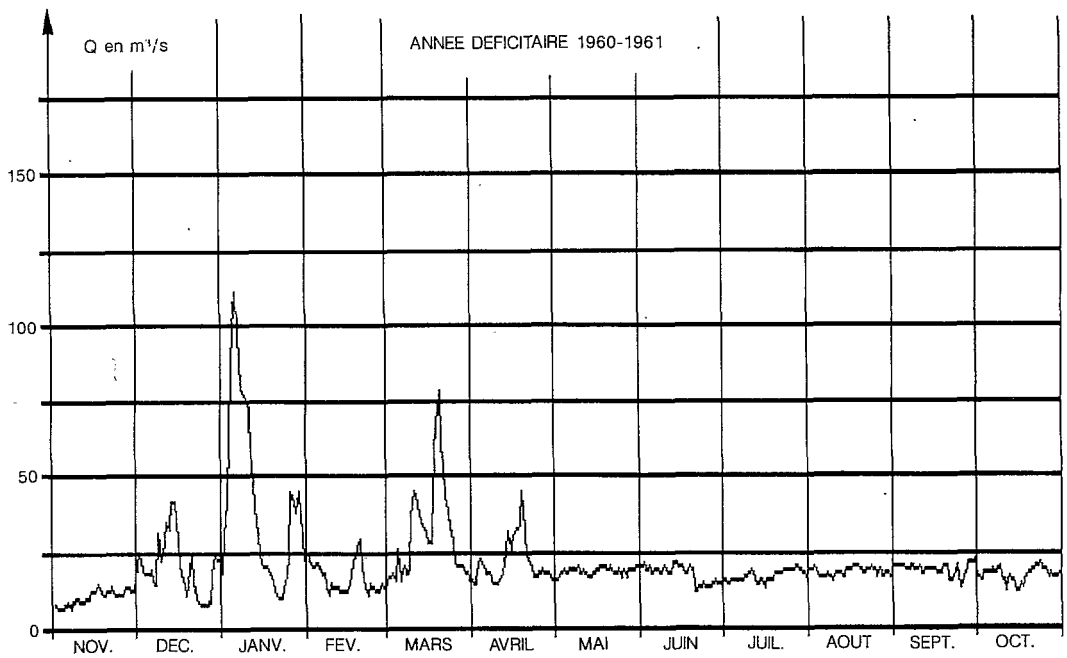


figure 7.70.

Ikopa à Ambohimanambola




## 7.1.5.2. Apports annuels

Cette station représentative du fonctionnement du système d'eau ne présente, pour ce qui concerne les régimes naturels, d'intérêt qu'au niveau des apports annuels.

Ceci bien entendu compte tenu d'une certaine régularisation interannuelle : immédiatement après une année déficitaire, la remise à niveau des réserves amont se traduit par des prélèvements supplémentaires sur les apports de la saison des pluies qui succède. C'est ainsi que l'année 78-79, naturellement déficitaire, et succédant à une année (77-78) encore plus déficitaire, est probablement amputée de novembre à mars d'une fraction importante des débits.

En dépit de cette influence, les lames écoulées et les précipitations présentent une assez bonne liaison statistique :

$H_{AMBI} = .66\ (P - 341)$ $\quad (R^2 = .55\ P>.995)$

De même les lames observées à AMBOHIMANAMBOLA et au pont de MAHITSY en aval sont bien corrélées :

$H_{AMBI.} = .92\ _{HMAHI.} + 105$ $\quad (R^2 = .77\ P>.995)$

Ces relations ont permis de compléter l'échantillon de lames annuelles de 1945 à 1956 et de corriger l'année 1957-58 dont certaines valeurs mensuelles paraissaient douteuses (mai-octobre).

| Année | 45.46 | 46.47 | 47.48 | 48.49 | 49.50 | 50.51 | 51.52 | 52.53 | 53.54 | 54.55 | 55.56 | 57.58 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H mm | 555 | 760 | 780 | 650 | 565 | 575 | 605 | 490 | 550 | 545 | 595 | 540 |
| Q m³/s | 24.8 | 33.9 | 34.7 | 29.0 | 25.2 | 25.6 | 26.9 | 21.9 | 24.5 | 24.3 | 26.5 | 24.1 |

L'échantillon de 32 valeurs annuelles (observées et calculées) fournit, après ajustement statistique, les quantiles suivants.

tableau 7.115.

Ikopa à Ambohimanambola
Apports annuels

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Hmm | 407 | 459 | 522 | 642 | 762 | 825 | 877 |
| Q m³/s | 18.1 | 20.5 | 23.3 | 28.6 | 34.0 | 36.8 | 39.1 |
| q l/s/km² | 12.9 | 14.6 | 16.6 | 20.3 | 24.2 | 26.2 | 27.8 |

Loi de Gauss (test B.M. : 2.16, échelle : 143 mm, position : 642 mm).

Cinquantennales sèche et humide : 348 mm (Q = 15.5 m³/s) et 936 mm (Q = 41.7 m³/s).

## 7.1.5.3. Crues

### *7.1.5.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux*

L'étalonnage des hautes eaux de cette station peut être considéré comme très correct, puisque le plus important jaugeage (11/02/77, H = 3.20 m, Q = 331 m³/s) a été réalisé à une cote très proche du maximum connu (3.29 m) de la période 1959-1982.

tableau 7.116.

Ikopa à Ambohimanambola
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs |
|---|---|---|---|---|
| 1956-57 | 89 | 21/12/56 12H00 | 1,50 | 3rel |
| 1957-58 | 190 | 25/01/58 12H00 | 2,48 | 3rel |
| 1958-59 | | | Rupture digue - H = 4,00 m? | |
| 1959-60 | 86 | 24/01/60 12h00 | 1,46 | 3rel |
| 1960-61 | 114 | 05/01/61 06h00 | 1,84 | 3rel |
| 1961-62 | 70 | 07/12/61 12h00 | 1,23 | 3rel |
| 1962-63 | 157 | 18/02/63 21h00 | 2,24 | 3rel |
| 1963-64 | 122 | 10/03/64 18h00 | 1,96 | 3rel |
| 1964-65 | 125 | 23/01/65 18h00 | 2,00 | 3rel |
| 1965-66 | 89 | 22/12/65 18h00 | 1,50 | 3rel |
| 1966-67 | 104 | 08/03/67 06h00 | 1,70 | 3rel |
| 1967-68 | 109 | 18/02/68 18h00 | 1,77 | 3rel |
| 1968-69 | 124 | 10/02/69 18h00 | 1,99 | 3rel |
| 1969-70 | 137 | 05/01/70 18h00 | 2,09 | 3rel |
| 1970-71 | 193 | 28/01/71 21h00 | 2,50 | 3rel |

suite

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs |
|---|---|---|---|---|
| 1971-72 | 228 | 16/02/72 | 2,72 | |
| 1972-73 | 212 | 25/02/73 18h00 | 2,62 | 3rel |
| 1973-74 | 70 | 08/01/74 06h00 | 1,23 | 3rel |
| 1974-75 | 342 | 14/03/75 06h00 | 3,35 | 3rel |
| 1975-76 | 100 | 17/11/75 12h00 | 1,55 | 3rel |
| 1976-77 | 350 | | 3,29 | PHE |
| 1977-78 | | | | |
| 1978-79 | 71 | 13/02/79 18h00 | 1,14 | 3rel |
| 1979-80 | 124 | 22/01/80 12h00 | 1,88 | 3rel |
| 1980-81 | | | | |
| 1981-82 | 291 | 10/03/82 | 3,00 | PHE |

### *7.1.5.3.2. Validité de l'échantillon de crues*

De par sa situation, directement en aval d'un premier endiguement rive gauche, et en aval des barrages de MANTASOA et de TSIAZOMPANIRY (sur les branches mères de l'IKOPA) et des usines hydroélectriques d'ANTELOMITA 1 et 2, les relevés de cette station sont difficilement exploitables.

L'échantillon de crue de la période 1959-80 pourrait être utilisé à condition de pouvoir vérifier les manoeuvres de TSIAZOMPANIRY (les eaux du lac de MANTASOA sont entièrement dérivées vers le bassin du MANGORO depuis 1958).

L'évaluation du maximum de crue de l'année 1958-59 est extrêmement difficile, en raison de la rupture (après submersion ?) de la digue d'AMBOHIMANAMBOLA (nuit du 27 au 28/03/1959).

## 7.1.5.4. Basses eaux

Les débits minimaux journaliers observés sont les suivants :

tableau 7.116.

Ikopa à Ambohimanambola
Débits minimaux journaliers
(m³/s)

| Année | QJMin | Date | Année | QJMin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1957 | 17.1 | 5.11 | 1968 | 18.2 | 9.11 |
| 1958 | 14.3 | 1.12 | 1969 | 12.5 | 15.11 |
| 1959 | 12.8 | 14.11 | 1970 | 13.7 | 5.10 |
| 1960 | 5.93 | 15.03 | 1971 | 10.6 | 19.1 |
| 1961 | 10.1 | 22.01 | 1972 | 15.5 | 5.11 |
| 1962 | 5.99 | 05.07 | 1973 | 13.5 | 19.12 |
| 1963 | 9.74 | 10.05 | 1974 | 11.7 | 16.07 |
| 1964 | 6.27 | 27.04 | 1975 | 18.5 | 06.07 |
| 1965 | 14.3 | 18.05 | 1976 | 15.9 | 18.11 |
| 1966 | 14.2 | 27.01 | | | |
| 1967 | 16.8 | 16.4 | 1979 | 3.00 | 30.04 |

La date d'observation du débit minimal est aléatoire et peut être observée aussi bien en saison des pluies qu'en fin de saison sèche selon le fonctionnement des délestages de l'amont.

Ces valeurs de débit n'ont d'autre intérêt que d'apprécier l'efficacité du soutien d'étiage.

tableau 7.118.

Ikopa à Ambohimanambola
Débits minimaux journaliers

| | Années déficitaires | | Médiane | Années sèches | |
|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 |
| Q m³/s | 6.98 | 9.30 | 13.0 | 15.9 | 17.2 |
| q l/s/km² | 5.0 | 6.6 | 9.2 | 11.3 | 12.2 |

### 7.1.5.5. Bilan hydrologique

Pour un pluviomètre moyenne interannuelle de 1 350 mm, la lame écoulée (640 mm) correspond à un déficit moyen d'écoulement de 710 mm (Ke : 47 %).

Les apports du bassin intermédiaire entre ANTELOMITA et AMBOHIMANAMBOLA (227 km²) correspondent en moyenne à 4 m³/s, soit une lame équivalente de 555 mm.

## 7.1.6. Ikopa à Anosizato

La station d'ANOSIZATO (18°56'17" S - 47°29'57"E) est située en aval de celle d'AMBOHIMANANBOLA et contrôle un bassin de 1 595 km².

Entre 1958 et 1982, des observations ont été effectuées sur cette station ; discontinues et très incomplètes, elles n'ont pas été traduites en débits. Nous ne disposons d'une chronique continue que de novembre 1963 à octobre 1966.

tableau 7.119.

Ikopa à Anosizato
Débits moyens
mensuels et annuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1963/64 | 29.5 | 46.1 | 28.9 | 55.9 | 39.6 | 19.5 | 16.9 | 18.5 | 24.7 | 20.7 | 18.2 | 18.7 | 28.0 |
| 1964/65 | 27.8 | 50.3 | 61.1 | 59.2 | 39.7 | 39.3 | 25.1 | 26.4 | 24.8 | 23.6 | 20.1 | 19.9 | 34.6 |
| 1965/66 | 20.7 | 48.8 | 40.5 | 25.2 | 25.9 | 19.5 | 22.6 | 19.7 | 20.9 | 23.0 | 19.9 | 22.4 | 25.8 |
| Moyenne | 22.0 | 38.0 | 49.6 | 50.0 | 51.2 | 30.9 | 21.9 | 20.5 | 20.0 | 18.8 | 15.1 | 14.6 | 29.3 |

Plus accessible que MAHITSY-KELY, cette station a été beaucoup mieux suivie (plus fort débit mesuré 238 m³/s pour une cote à l'échelle de 3,71 m), mais s'est révélée malheureusement non univoque (trop faible pente d'écoulement entre TANJOMBATO et MAHITSYKELY).

En s'appuyant sur les quelques jaugeages effectués lors du maximum, la courbe de tarage pour un régime uniforme a été tracée afin d'évaluer les débits maximums de très hautes eaux.

L'extrapolation demeure très faible.

tableau 7.120.

Ikopa à Anosizato
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs |
|---|---|---|---|---|
| 1958-59 | 330 | | 4,50 | |
| 1959-60 | | | | |
| 1960-61 | | | | |
| 1961-62 | | | | |
| 1962-63 | | | | |
| 1963-64 | (121) | 11/03/64 | | |
| 1964-65 | (133) | 24/01/65 | | |
| 1965-66 | (90) | 03/01/66 | | |
| 1966-67 | | | 2,38 | |
| 1967-68 | | | 2,07 | |
| 1968-69 | 149 | 11/02/69 06h00 | 2,66 | 3rel |
| 1969-70 | 162 | 06/01/70 06h00 | 2,82 | 3rel |
| 1970-71 | 187 | 29/01/71 12h00 | 3,10 | 3rel |
| 1971-72 | 202 | 16/02/72 18h00 | 3,26 | 3rel |
| 1972-73 | 196 | 26/02/73 12h00 | 3,20 | 3rel |
| 1973-74 | 84 | 07/01/74 18h00 | 1,72 | 3rel |
| 1974-75 | 237 | 14/03/75 18h00 | 3,64 | 3rel |
| 1975-76 | | | | |
| 1976-77 | 245 | 12/02/77 12h00 | 3,72 | 3rel |
| 1977-78 | | | | |
| 1978-79 | | | | |
| 1979-80 | | | | |
| 1980-81 | | | | |
| 1981-82 | 251 | | 3,78 | |

Débits minimaux journaliers :

12.5 m³/s le 19.06.64
16.2 m³/s le 22.11.64
14.0 m³/s le 06.09.66

Les débits mensuels à ANOSIZATO présente une relation quasi fonctionnelle avec ceux observées à la station aval de MAHITSYKELY.

Q ANOSI. = .96 Q MAHI. - 1.1 ($R^2$ = .98 P>.995)

Cette relation permet d'estimer les débits moyens interannuels à ANOSIZATO (tableau 7.119). Le module (29.3 m³/s) correspond à une lame interannuelle de 580 mm.

## 7.1.7. Ikopa à Mahitsykely

La station du pont de MAHITSYKELY (18°51'47"S - 47°27'29"E), située à une altitude de 1 250 m, contrôle un bassin versant de 1 780 km² (1 684 km² en superficie contributive après déduction du bassin de la VARAHINA du nord). Située à la sortie de la plaine de ANTANARIVO, en amont des confluents de la MAMBA, de la SISAONY et de l'ANDROMBA avec l'IKOPA, cette station contrôle des débits influencés par le fonctionnement des retenues amont (usine hydroélectrique d'ANTELOMITA, retenue de TSIAZOMPANIRY) et par les nombreux prélèvements effectués pour l'irrigation des périmètres rizicoles de la plaine.

La première échelle a été mise en place en janvier 1949, avec un changement de calage (.16 m) en septembre 1951. La station a été déplacée en octobre 1963 avec installation d'un limnigraphe sur le nouveau pont. Cinquante-six mesures de débit ont été effectuées par l'ORSTOM (8 à 133 m³/s) et vingt-six mesures entre 1967 et 1973 par la Météorologie nationale (15.1 à 143 m³/s). Ces mesures de bonne qualité permettent de définir la courbe d'étalonnage des moyennes eaux. Pour les hautes eaux l'extrapolation a été menée jusqu'à 360 m³/s.

Les débits sont connus de janvier 1948 à avril 1975, avec quelques complètements d'après les stations voisines en 1948-49 et 1966-67.

La pluviométrie sur le bassin est bien déterminée à partir de 28 stations pluviométriques bien réparties. La moyenne interannuelle a été estimée à 1 315 mm (1945-69) soit environ 1 340 mm pour la moyenne étendue.

### 7.1.7.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

tableau 7.120.

Ikopa au pont de Mahitsy
Coefficients
de corrélation simple

| Hi ou Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec Pi | .75 | .71 | .80 | .60 | .87 | (-.06) | (-.03) | (-.12) | .45 | (.18) | (.07) | (.24) |
| Pi-1 | (.02) | (.15) | (.15) | .59 | (.31-) | .74 | (-.19) | (-.16) | (.05) | (.31) | (.33) | (.09) |
| Qi-1 | .53 | (.33) | (-.11) | (.39) | (-.06) | .76 | .85 | .92 | .80 | .85 | .93 | .81 |

Le graphe 7.71 représente les coefficients et, en dépit de l'influence des aménagements sur les débits, montre les tendances très nette d'un régime à saison sèche bien marquée et réserves d'altérites importantes. Les débits de saison des pluies (novembre à mars) sont presque entièrement déterminés par les précipitations mensuelles du mois avec influence faible (sauf en février, effet d'échantillon ?) ou nulle des précipitations antérieures. Les débits de saison sèche (avril-octobre), déterminés par le drainage des réserves, marquent une très bonne intercorrélation (à noter en juillet un impact secondaire assez sensible des précipitations, influence réduite des régimes de l'est).

figure 7.71.

Ikopa au pont de Mahitsy

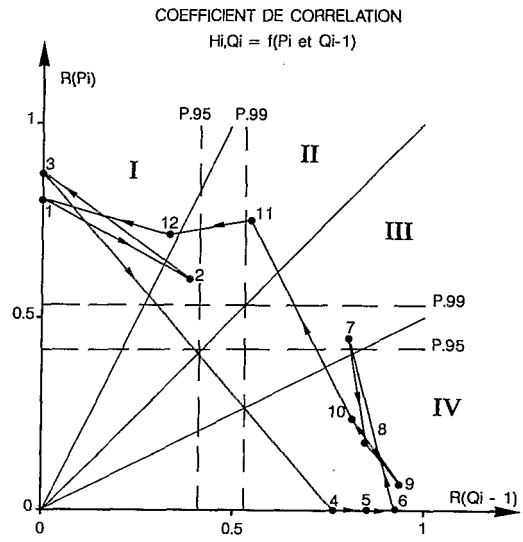



tableau 7.121.

Ikopa au pont de Mahitsy
Régressions hydropluviométriques

| | |
|---|---|
| H11= .13 P11 + .80 H10 - 6.8 | ($R^2$ = .85 P>.995) |
| H12= .15 P11 + .62 H10 + 7.1 | ($R^2$ = .55 P1.99 |
| H01= .18 P01 + 30.9 | ($R^2$ = .64 P>.995) |
| H02= .28 P02 + .12 P01 - 18. | ($R^2$ = .74 P>.995) |
| H03= .24 P03 + .04 P02 +.27 P10 + .3 | ($R^2$ = .93 P>.995)) |
| H04= .13 P03 + .16 P10 + 10.6 | ($R^2$ = .64 P>.995)) |
| H05= .38 H04 + .09 P10 + 12.7 | ($R^2$ = .78 P>.995) |
| H06= .035P03 + .11 P10 + 18.4 | ($R^2$ = .43 P>.99) |
| H07= .21 P07 + .02 P03 + .10 P10 + 17.5 | ($R^2$ = .44 P>.99) |
| H10= F (P08,P10) | ($R^2$ = .24 P # .95) |

H08, H09, H10 sont déterminés par H07, H08 et H09

On notera le poids secondaire des précipitations d'octobre, peut-être dû à leur influence sur le remplissage des retenues ainsi bien sûr qu'à la rehumectation des sols.

Ces relations ont permis d'évaluer les données manquantes d'octobre et novembre 1947.

Les valeurs des débits mensuels des années 1947 à 1974-75 et des débits classés sont présentées dans le tableau 7.122.

Les graphes 7.72, 7.73 et 7.74 représentent ces débits classés ainsi que les hydrogrammes d'une année excéden-

taire (1972-73, Q = 45.5 m³/s) et d'une année déficitaire (1953-1954, Q = 23.5 m³/s). On notera que la stabilisation des débits de saison sèche observée à AMBOHIMANAMBOLA tend à s'estomper à la suite des prélèvements dérivés pour l'irrigation de la plaine d'ANTANANARIVO.

figure 7.72.

Ikopa au pont de Mahitsy

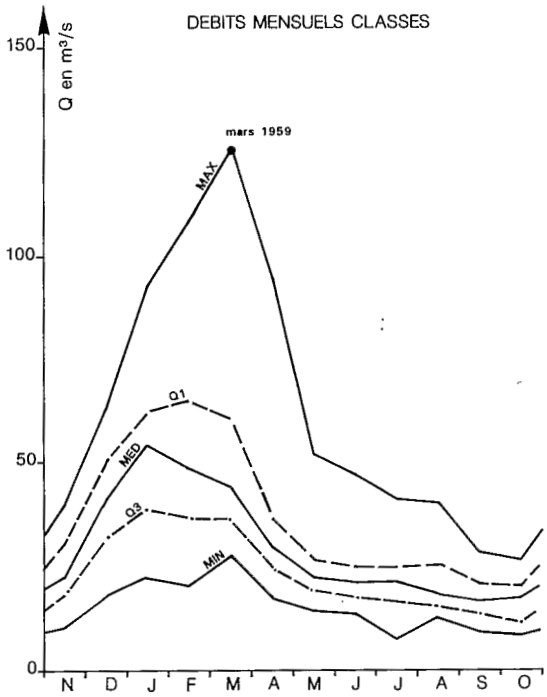



figure 7.73.

Ikopa au pont de Mahitsy

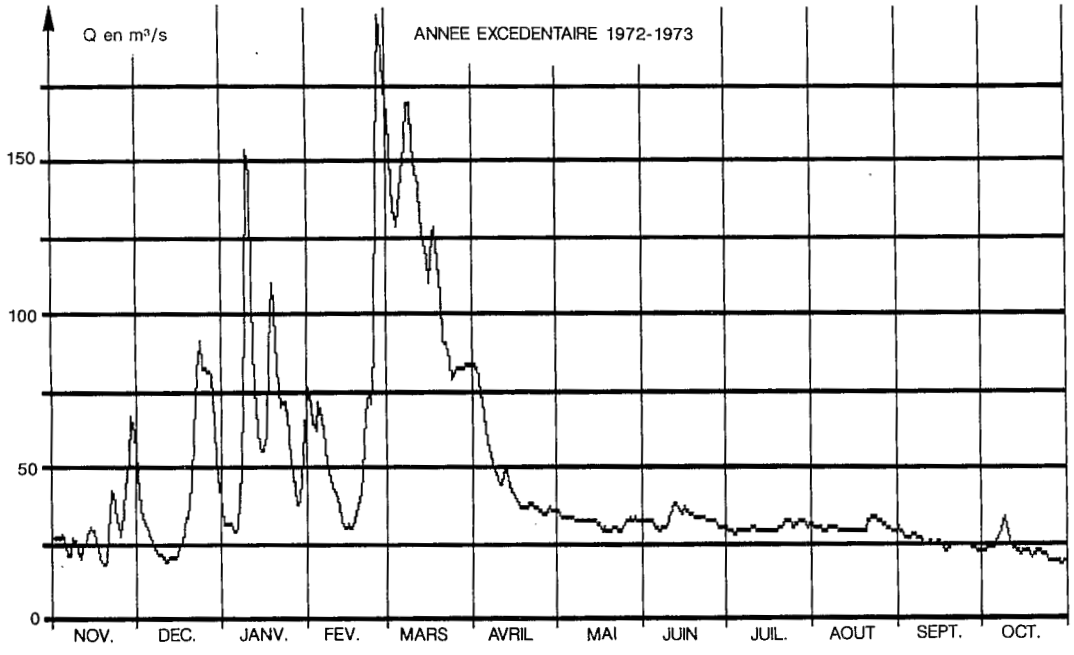


figure 7.74.

Ikopa au pont de Mahitsy

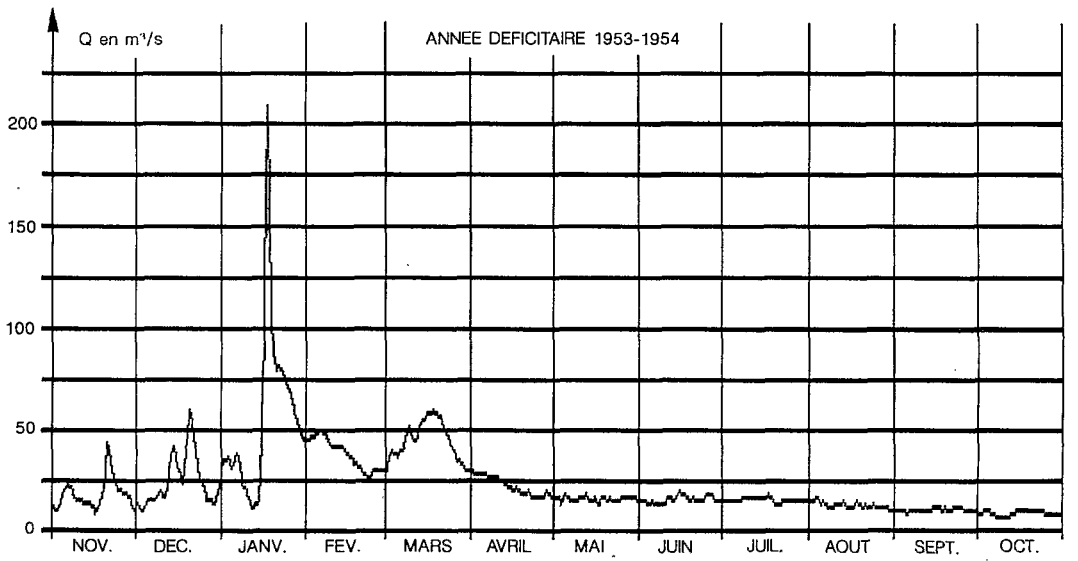



tableau 7.122.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1250100233 Pont de Mahitsykely
Rivière : Ikopa
Pays : Madagascar
Bassin : Betsiboka
Débits en m³/s

Latitude : 18.51.47
Longitude : 47.27.29

Aire : 1780 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1947/48 | (15.0) | (33.0) | 85.6 | 102. | 63.8 | 33.4 | 25.9 | 20.9 | 23.9 | 17.8 | 16.1 | 19.0 | (37.9) |
| 1948/49 | 19.2 | 38.2 | 22.3 | 38.3 | 103. | 35.6 | 26.0 | 20.4 | 18.5 | 13.4 | 11.5 | 11.1 | 29.8 |
| 1949/50 | 22.8 | 18.4 | 35.5 | 57.7 | 44.0 | 26.9 | 16.2 | 13.8 | 15.3 | 12.6 | 9.40 | 9.31 | 23.3 |
| 1950/51 | 20.4 | 23.8 | 75.5 | 40.0 | 54.0 | 29.5 | 21.9 | 18.7 | 15.8 | 14.6 | 10.4 | 10.6 | 27.9 |
| 1951/52 | 22.8 | 18.3 | 63.2 | 67.5 | 43.2 | 26.1 | 22.4 | 24.2 | 19.0 | 19.1 | 15.1 | 12.4 | 29.3 |
| 1952/53 | 26.7 | 33.7 | 27.3 | 23.0 | 61.3 | 38.1 | 17.7 | 17.7 | 14.4 | 18.2 | 14.1 | 11.2 | 25.3 |
| 1953/54 | 18.0 | 24.5 | 55.1 | 38.0 | 44.7 | 22.4 | 16.1 | 16.0 | 15.6 | 12.8 | 10.5 | 8.83 | 23.5 |
| 1954/55 | 15.5 | 50.8 | 55.5 | 31.3 | 41.7 | 29.4 | 16.2 | 16.0 | 15.7 | 14.9 | 10.7 | 10.9 | 25.8 |
| 1955/56 | 11.8 | 49.4 | 59.0 | 65.7 | 34.1 | 24.6 | 20.6 | 19.4 | 18.3 | 15.5 | 13.6 | 14.7 | 28.8 |
| 1956/57 | 33.3 | 63.1 | 33.9 | 46.5 | 55.8 | 45.4 | 23.7 | 21.1 | 20.9 | 17.4 | 10.2 | 8.63 | 31.6 |
| 1957/58 | 13.0 | 31.9 | 54.3 | 43.4 | 45.0 | 24.2 | 20.1 | 21.5 | 23.4 | 18.4 | 17.1 | 16.9 | 27.4 |
| 1958/59 | 17.7 | 48.5 | 68.6 | 43.8 | 126. | 94.5 | 52.0 | 47.1 | 41.1 | 39.9 | 28.5 | 17.4 | 52.2 |
| 1959/60 | 31.1 | 41.6 | 69.3 | 45.9 | 32.7 | 23.5 | 20.8 | 22.7 | 21.5 | 18.2 | 15.4 | 10.9 | 29.4 |
| 1960/61 | 10.7 | 32.4 | 60.1 | 20.6 | 46.6 | 33.6 | 25.3 | 21.5 | 20.5 | 19.3 | 16.5 | 16.5 | 27.1 |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1961/62 | 20.4 | 52.6 | 27.3 | 33.7 | 35.8 | 29.8 | 22.5 | 14.6 | 7.76 | 16.5 | 16.8 | 19.2 | 24.7 |
| 1962/63 | 31.0 | 33.0 | 53.6 | 50.2 | 37.1 | 36.8 | 16.4 | 14.8 | 24.8 | 32.2 | 21.6 | 21.1 | 30.9 |
| 1963/64 | 30.7 | 47.4 | 31.8 | 60.4 | 42.5 | 17.5 | 14.4 | 17.6 | 28.5 | 27.7 | 20.3 | 20.3 | 29.9 |
| 1964/65 | 28.3 | 52.8 | 62.3 | 62.8 | 44.1 | 43.6 | 29.8 | 30.3 | 28.7 | 27.7 | 23.5 | 21.5 | 37.8 |
| 1965/66 | 22.5 | 50.2 | 42.4 | 26.2 | 27.8 | 22.6 | 26.4 | 22.8 | 23.8 | 25.2 | 21.7 | 24.4 | 28.1 |
| 1966/67 | 22.5 | 34.6 | 53.5 | 35.6 | 60.4 | 23.3 | 21.1 | 24.0 | 22.4 | 20.2 | 18.8 | 18.5 | 29.6 |
| 1967/68 | 39.7 | 57.9 | 47.5 | 50.2 | 40.2 | 34.0 | 28.0 | 24.4 | 27.1 | 22.8 | 18.2 | 20.1 | 34.1 |
| 1968/69 | 26.8 | 52.3 | 47.1 | 61.4 | 28.4 | 23.5 | 19.2 | 20.7 | 21.0 | 18.6 | 15.6 | 17.1 | 29.1 |
| 1969/70 | 21.6 | 49.9 | 92.9 | 51.1 | 35.1 | 28.7 | 26.7 | 25.7 | 22.6 | 21.3 | 16.6 | 14.8 | 33.9 |
| 1970/71 | 30.1 | 30.2 | 60.1 | 103. | 50.7 | 28.5 | 26.1 | 24.7 | 24.0 | 21.3 | 22.0 | 20.9 | 36.4 |
| 1971/72 | 31.1 | 59.1 | 41.7 | 108. | 80.3 | 46.1 | 35.0 | 32.1 | 31.7 | 26.8 | 20.9 | 26.2 | 44.7 |
| 1972/73 | 31.2 | 41.5 | 66.5 | 68.9 | 119. | 47.0 | 32.0 | 32.8 | 30.0 | 30.1 | 25.1 | 22.6 | 45.5 |
| 1973/74 | 24.8 | 23.6 | 35.4 | 35.2 | 29.3 | 29.8 | 26.4 | 21.0 | 16.5 | 15.6 | 15.7 | 18.4 | 24.2 |
| 1974/75 | 34.3 | 46.3 | 51.5 | 79.2 | 98.8 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 24.1 | 40.7 | 52.8 | 53.2 | 54.5 | 33.3 | 24.0 | 22.5 | 22.0 | 20.7 | 16.9 | 16.4 | 31.7 |
| Ecart-type | 7.40 | 13.0 | 18.5 | 18.0 | 23.0 | 15.2 | 7.65 | 6.85 | 6.80 | 6.60 | 4.80 | 4.70 | |
| Max. | 39.7 | 63.1 | 92.9 | 108. | 126. | 99.5 | 52.0 | 47.1 | 41.1 | 39.9 | 28.5 | 26.2 | |
| Q1 | 30.9 | 50.5 | 62.8 | 64.3 | 60.9 | 36.8 | 26.4 | 29.4 | 24.8 | 25.2 | 20.9 | 20.3 | |
| Méd. | 22.8 | 41.6 | 54.0 | 48.4 | 44.4 | 29.5 | 22.5 | 21.1 | 21.5 | 18.6 | 16.5 | 17.1 | |
| Q3 | 18.6 | 32.1 | 38.6 | 36.8 | 36.4 | 24.2 | 19.2 | 17.7 | 16.5 | 15.6 | 13.6 | 11.1 | |
| Min. | 10.7 | 18.3 | 22.3 | 20.6 | 27.8 | 17.5 | 19.9 | 13.8 | 7.76 | 12.6 | 9.40 | 8.63 | |

## 7.1.7.2. Apports annuels

Lames annuelles écoulées et précipitations annuelles sur le bassin présentent une corrélation nette

$H = .58 (P - 348)$ $(R^2 = .53\ P>.995)$

améliorée par la prise en compte du coefficient Cp de concentration des pluies mensuelles (cf supra)

$H = .52\ (123\ \{P - 860\ (1 - 2.32\ Cp)\}$ $(R^2 = .66\ P>.995)$

avec Cp moy. = .319.

Cp max = .413 (1958.59) KE = 58%

Cp min =.263 (1962.63) KE = 37%

Les lames écoulées à MAHITSY et AMBOHIMANAMBOLA présentent la liaison suivante :

$H_{MAHI.} = .83\ H_{AMBO} + 58.6$ $(R^2 = .77)$

Ces relations permettent d'estimer les valeurs manquantes de l'échantillon 1945-1976 :

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1946-46 | H = 530 mm | Q = 28.3 m³/s | d'après P, Cp |
| 1946-47 | H = 620 mm | Q = 33.1 m³/s | " |
| 1974-75 | H = 770 mm | Q = 41.1 m³/s | d'après AMBOHIMANAMBOLA |
| 1975-76 | H = 700 mm | Q = 37.5 m³/s | " |

Après ajustement d'une loi de distribution sur l'échantillon complet de 31 valeurs annuelles, les quantiles des apports annuels sont les suivants :

tableau 7.123.

Ikopa au pont de Mahitsy
Apports annuels

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Hmm | 446 | 463 | 488 | 560 | 676 | 765 | 857 |
| Q m³/s | 24.0 | 24.9 | 26.3 | 30.2 | 36.4 | 41.2 | 46.2 |
| q l/s/km² | 14. | 14.6 | 15.5 | 17.8 | 21.4 | 24.2 | 27.2 |

Loi log normale (test B.M. : 1.60, échelle : 182 mm, position : 378 mm, forme : .591) cinquantennales sèche et humide : 432 mm (Q = 23.3 m³/s) et 988 mm (Q = 53.2 m³/s).

## 7.1.7.3. Crues

### *7.1.7.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux*

L'évaluation des débits de hautes eaux s'appuie sur les jaugeages souvent incomplets (débits des canaux rive gauche rarement comptabilisés), réalisés jusqu'à la cote 3,32 m (143 m³/s), ainsi que sur la corrélation entre les maximums de crue relevés à MAHITSYKELY et à ANOSIZATO, station située 10 km plus en amont.

tableau 7.124.

Ikopa à Mahitsykely
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs |
|---|---|---|---|---|
| 1947-48 | 208 | 31/01/48 12h00 | 3,71 | Min |
| 1948-49 | 69 | 25/02/49 12h00 | 2,18 | Min |
| 1949-50 | 124 | 27/03/50 18h00 | 3,12 | 3rel |
| 1950-51 | 130 | 20/01/51 06h00 | 3,18 | 3rel |
| 1951-52 | 130 | 31/01/52 18h00 | 3,48 | 3rel |
| 1952-53 | 106 | 12/03/53 06h00 | 3,18 | 3rel |
| 1953-54 | 250 | 17/01/54 12h00 | 4,20 | 3rel |
| 1954-55 | 117 | 14/01/55 12h00 | 3,33 | 3rel |
| 1955-56 | 127 | 09/02/56 18h00 | 3,45 | 3rel |
| 1956-57 | 107 | 07/02/57 18h00 | 3,20 | 3rel |
| 1957-58 | 141 | 26/01/58 06h00 | 3,60 | 3rel |
| 1958-59 | (360) | | | |
| 1959-60 | 119 | 25/01/60 18h00 | 3,05 | 3rel |
| 1960-61 | 128 | 06/01/61 12h00 | 3,16 | 3rel |
| 1961-62 | 71 | 08/12/61 06h00 | 2,22 | 3rel |

suite

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs |
|---|---|---|---|---|
| 1962-63 | 140 | 19/02/63 18h00 | 3,29 | 3rel |
| 1963-64 | 113 | 11/03/64 06h00 | 2,98 | 3rel |
| 1964-65 | 132 | 24/01/65 18h00 | 3,20 | 3rel |
| 1965-66 | 93 | 03/01/66 18h00 | 2,68 | 3rel |
| 1966-67 | 119 | 08/03/67 18h00 | 3,05 | 3rel |
| 1967-68 | 98 | 19/02/68 12h00 | 2,62 | 3rel |
| 1968-69 | 146 | 10/02/69 06h00 | 3,20 | 3rel |
| 1969-70 | 168 | 06/01/70 06h00 | 3,38 | 3rel |
| 1970-71 | 194 | 29/01/71 18h00 | 3,50 | 3rel |
| 1971-72 | 225 | 16/02/72 18h00 | 3,64 | 3rel |
| 1972-73 | 203 | 26/02/73 12h00 | 3,54 | 3rel |
| 1973-74 | 86 | 09/01/74 06h00 | 2,40 | 3rel |
| 1974-75 | 258 | 15/03/75 06h00 | 3,79 | 3rel |
| 1975-76 | | | | |
| 1976-77 | 301 | 12/02/77 18h00 | 3,94 | 3rel |

### *7.1.7.3.2. Résultats de l'enquête historique et échantillon de crues*

La seule crue dont le calage est possible (3,97 m dans le système de l'échelle EDF-Q = 253 m³/s) est celle de 1940-41, donnée dans un rapport d'activité pour 1948-50 (archives Travaux publics) comme "la plus forte crue connue depuis au moins 10 ans".

D'autres crues, probablement aussi violentes, sont signalées sur l'IKOPA :

- en janvier 1910 (?) et en janvier-février 1917 ("crues énormes") ;
- en 1921 (crue de l'IKOPA aussi forte qu'en 1954 d'après H. PELLERAY).

La taille de l'échantillon et le nombre de renseignements ne sauraient faire oublier :

- que le débit maximal (1958-59) a été évalué à partir d'ANOSIZATO ;

- que cette station contrôle l'IKOPA dans la plaine d'ANTANANARIVO, en amont de grandes confluences (MAMBA, SISAONY, ANDROMBA) et après 25 km d'endiguements, où des brèches se produisent à chaque forte crue, suivant l'état des digues et l'importance de l'évènement.

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 18 janvier et le 20 février (date médiane : 1 au 5 février - dates extrêmes : 8 décembre et 27 mars).

Une distribution de FRECHET, ajustée à l'échantillon des 28 maximums observés, correspond aux quantiles suivants :

tableau 7.125.

Ikopa à Mahitsykely
Maximums annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1133 | 186 | 227 | 340 | (400) |
| q l/s/km² | 79 | 110 | 135 | 202 | (240) |

## 7.1.7.4. Basses eaux

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1948 | 18.2 | 14.0 | 11.0 | 9.45 | 02-01 |
| 1949 | 14.0 | 10.9 | 9.76 | 8.89 | 24-10 |
| 1950 | 12.3 | 9.05 | 8.34 | 8.08 | 16-10 |
| 1951 | 14.0 | 10.3 | 9.21 | 8.05 | 15-10 |
| 1952 | 18.4 | 12.2 | 11.3 | 10.08 | 02-09 |
| 1953 | 14.4 | 11.5 | 10.8 | 7.68 | 19-10 |
| 1954 | 12.9 | 9.54 | 7.75 | 7.11 | 11-10 |
| 1955 | 12.7 | 10.3 | 8.78 | 7.82 | 19-11 |
| 1956 | 16.7 | 13.7 | 12.8 | 11.7 | 03-09 |
| 1957 | 15.6 | 8.42 | 7.59 | 6.96 | 30-10 |
| 1958 | 17.3 | 11.8 | 10.5 | 8.51 | 29-05 |
| 1959 | 30.8 | 17.9 | 14.7 | 11.0 | 03-11 |
| 1960 | 15.8 | 10.3 | 7.99 | 7.63 | 10-11 |
| 1961 | 18.0 | 14.9 | 13.6 | 11.7 | 27-11 |
| 1962 | 16.4 | 8.28 | 7.36 | 6.97 | 25-07 |
| 1963 | 20.1 | 14.6 | 13.7 | 10.3 | 02-07 |
| 1964 | 19.1 | 12.6 | 10.7 | 8.51 | 03-06 |
| 1965 | 25.7 | 19.7 | 16.5 | 11.0 | 18-05 |
| 1966 | 21.2 | 18.2 | 15.6 | 11.9 | 06-09 |
| 1967 | 20.0 | 17.2 | 15.8 | 11.3 | 18-07 |
| 1968 | 22.6 | 18.2 | 15.3 | 9.84 | 08-11 |
| 1969 | 18.1 | 14.5 | 13.6 | 11.6 | 26-11 |
| 1970 | 20.4 | 15.7 | 13.7 | 12.1 | 15-10 |
| 1971 | 22.4 | 19.0 | 16.9 | 11.8 | 17-01 |
| 1972 | 26.3 | 21.2 | 17.9 | 14.8 | 18-09 |
| 1973 | 25.8 | 19.8 | 15.4 | 11.4 | 20-12 |
| 1974 | 16.4 | 14.5 | 12.9 | 11.6 | 03-10 |
| Moyenne | 18.7 | 13.6 | 12.2 | 10.8 | |
| Ecart-type | 4.62 | 3.74 | 3.20 | 2.47 | |
| Max. | 30.8 | 21.2 | 17.9 | 16.3 | 26-12 |
| Q1 | 21.2 | 17.2 | 15.3 | 12.2 | 25-11 |
| Méd. | 18.1 | 13.7 | 12.8 | 11.4 | 24-10 |
| Q3 | 15.6 | 10.3 | 9.21 | 8.08 | 05-10 |
| Min. | 12.3 | 8.28 | 7.36 | 6.96 | 03-09 |

tableau 7.126.

Ikopa au pont de Mahitsy
Débits caractéristiques de basses eaux ($m^3/s$)

La date médiane d'observation du plus faible débit journalier de fin de saison sèche est le 24 octobre. En réalité, les débits journaliers restent influencés et 30 % des valeurs minimales peuvent être observées de janvier à juillet.

DCE = 1.42 QJ MIN - 1.88 ($R^2$ = .81) DCE/QJMIN = 1.13
DCII = 1.63 QJ MIN - 2.18 ($R^2$ = .74) DCII/QJMIN = 1.26
DC9 = 1.54 QJ MIN + 3.47 ($R^2$ = .46) DC9/QJMIN = 1.73

L'analyse statistique des débits minimaux journaliers de l'année (27 valeurs) fournit les quantiles suivants :

tableau 7.127.

Ikopa au pont de Mahitsy
QJMin

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q m³/s | 6.71 | 7.42 | 8.28 | 9.92 | 11.6 | 12.4 | 13.1 |
| q l/s/km² | 4.0 | 4.4 | 4.9 | 5.9 | 6.9 | 7.4 | 7.8 |

Loi normale (test B.M. ; 6.64, échelle : 1.95 m³/s, position 9.92 m³/s)
Cinquantenales sèche et humide : 5.95 m³/s (3.5 l/s/km²) et 13.9 m³/s (8.3 l/s/km²).

Pour les valeurs minimales observées en fin de saison sèche (débits soutenus par les lachures des réserves amont mais après prélèvements pour l'irrigation), la distribution est la suivante :

tableau 7.128.

Ikopa au pont de Mahitsy
QJMin (fin de saison sèche)

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q m³/s | 6.91 | 7.77 | 8.82 | 10.8 | 12.8 | 13.9 | 14.7 |
| q l/s/km² | 4.1 | 4.6 | 5.2 | 6.4 | 7.6 | 8.2 | 8.7 |

Loi normale (test B.M. : 3.84, échelle : 2.38 m³/s, position : 10.8 m³/s)
Cinquantenales sèche et humide : 5.94 m³/s (3.5 l/s/km²) et 15.7 m³/s (9.3 l/s/km²).

### 7.1.7.5. Bilan hydrologique

Pour une pluviométrie moyenne interannuelle estimée à 1340 mm, la lame écoulée interannuelle (590 mm) correspond à un déficit moyen d'écoulement de 750 mm (Ke = 44%).

Les points représentatifs des couples DE, P et KE, P sont reportés sur le graphique 7.75.

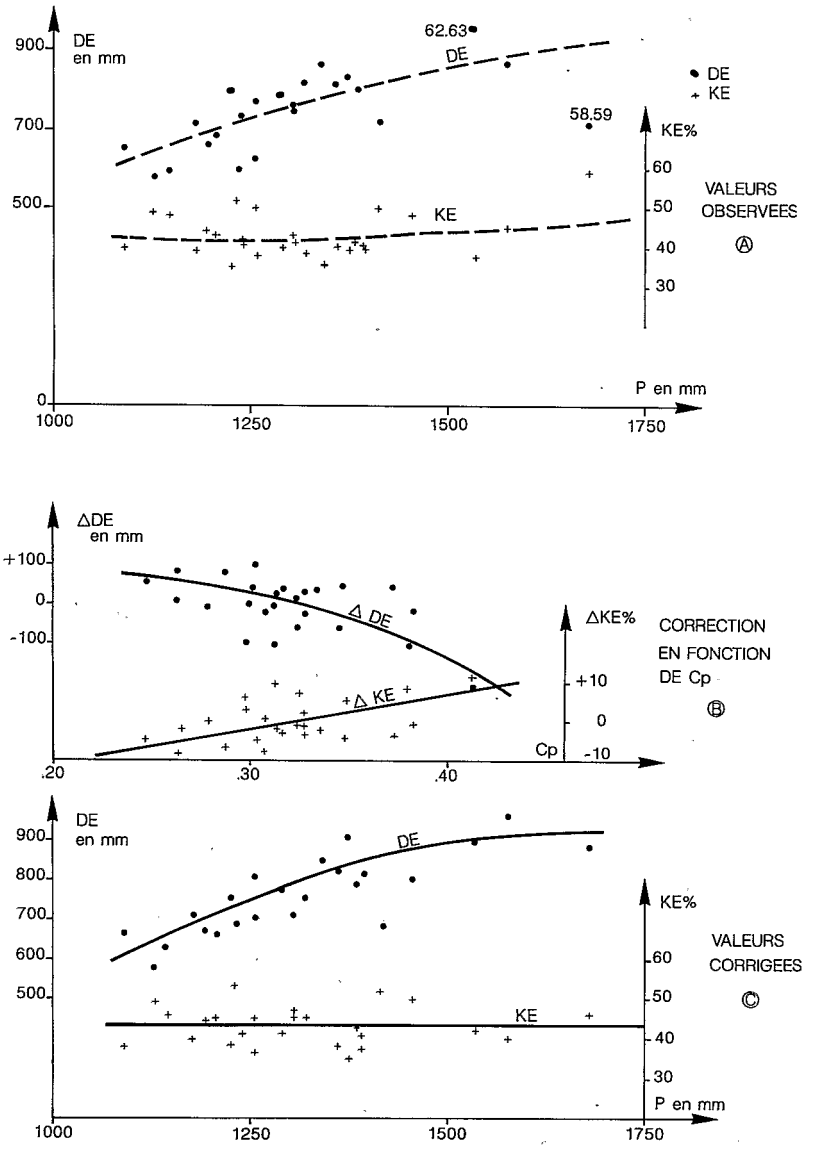
La dispersion constatée autour des courbes moyennes (7.75 a) peut être en partie corrigée en prenant compte le facteur de concentration des précipitations mensuelles Cp.

La correction peut être importante : + 100 mm à - 200 mm pour Δ DE en fonction de Cp, de -10 % à + 10 % pour Δ KE en fonction de Cp - (7.75 b).

Les courbes moyennes corrigées (7.75 c) correspondent à un coefficient KE voisin de 43 % quelque soit la pluviométrie et un déficit d'écoulement croissant de 600 mm à 920 mm quand P croît de 1 100 à 1 700 mm. Le déficit d'écoulement tend vers une valeur plafond inférieure à 950 mm. Ce déficit, relativement important pour la zone des hauts-plateaux reflète les fortes reprises par évapotranspiration sur les plans d'eau libre et les rizières de la plaine d'ANTANANARIVO.

figure 7.75.

Ikopa au pont de Mahitsy




## 7.1.8. Mamba au pont de Sabotsy

La MAMBA, petit affluent rive droite de l'IKOPA, la rejoint entre le pont de MAHITSY et le confluent de la SISAONY. La station de SABOTSY (18°45'S - 47°48'E) contrôle un bassin de 104 km² dont une partie est occupée par des surfaces rizicoles. Des observations et mesures ont été effectuées de 1964 à 1966.

tableau 7.129.

Mamba au pont de Sabotsy
Débits mensuels (m³/s)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 64.65 | .11 | 1.05 | 3.08 | 2.14 | 1.05 | .71 | .48 | .31 | .49 | .54 | .49 | .40 | .90 |
| 65.66 | (.41) | .720 | .760 | .290 | .340 | .310 | .340 | (.13) | (.26) | .330 | .330 | .200 | .380 |

QMAX : 53.2 m³/s (512 l/s/km²) le 22.01.65 et 25 m³/s (240 l/s/km²) le 09.01.66
QJMIN : 70 l/s (.067 l/s/km²) du 22 au 24.11.64 et 0 l/s en 1966

Par comparaison (relation graphique) entre les débits mensuels et ceux de l'IKOPA à MAHITSY, il est possible d'estimer le module à .58 m³/s (175 mm) ce qui pour une pluviométrie annuelle de l'ordre de 1 100 mm correspond à un déficit de 925 mm (Ke = 16 %). Ce déficit élevé correspond à une forte reprise par évapotranspiration sur les rizières, ceci sous réserve d'une estimation très sommaire de la lame interannuelle.

## 7.1.9. Sisaony à Andramasina

La SISAONY est le premier affluent important de l'IKOPA qu'elle rejoint en aval de la station de MAHITSY. Le bassin de la SISAONY, qui draine la partie nord de l'ensellement situé entre la falaise de l'ANGAVO et l'ANKARATRA, est presqu'entièrement situé sur les migmatites et migmatites granitoïdes du système du graphite, formations le plus souvent fortement latéritisées. À l'exception de quelques parcelles de reboisement en tête, le bassin est recouvert de savane maigre.

La SISAONY a été suivie sur trois stations, d'amont en aval : ANDRAMASINA, PK22 et AMPITATAFIKA.

La station d'ANDRAMASINA (19°11'10" S - 47°35'20" E), qui contrôle un bassin de 318 km², a été installée en juillet 1958 à la demande du Génie rural. Elle a été doublée en janvier 1959 d'un limnigraphe NEYRPIC puis en juin 1971 d'un limnigraphe à flotteur. Les observations, avec quelques lacunes, sont complètes d'août 1958 à mai 1980. Les enregistrements sont souvent défectueux, surtout en période de basses eaux, et les débits obtenus sont de qualité assez moyenne.

L'étalonnage a été élaboré à partir de 76 mesures de débit entre .64 et 118 m³/s avec une extrapolation jusqu'à plus de 500 m³/s. Malgré une légère dispersion des jaugeages en basses eaux, la section peut être considérée comme stable.

La pluviométrie, calculée à partir de 6 stations longue durée (ALATSINAINA, ANDRAMASINA, etc.), est estimée à 1 250 mm en moyenne interannuelle.

### 7.1.9.1. Relations hydropluviométriques mensuelles

Les coefficients de corrélations (graphe 7.76) reflètent la situation des bassins des hauts plateaux : forte influence des mois de saison des pluies (janvier - mars). "L'absence" constatée d'influence des précipitations du mois en décembre est peut être due à un effet d'échantillon (12 valeurs concomitantes seulement) mais probablement aussi au fait que les précipitations du mois sont essentiellement mobilisées pour la recharge des aquifères. D'avril à août, les débits sont intercorrélés en raison du drainage des nappes d'altérites. Les débits de septembre à novembre sont déterminés par les précipitations du mois avec influence secondaire sensible des débits antérieurs.

tableau 7.130.

Sisaony à Andramasina
Coefficients de corrélation

| Hi ou Qi | | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| en fonction de | Pi | .62 | (-.01) | .79 | .78 | .96 | (.37) | (-.14) | (.02) | (.41) | (.17) | .65 | (-57) |
| | Pi-i | (.45) | (.29) | (.06) | (.06) | (.35) | (.44) | (-.27) | (-.36) | (.01) | (.43) | (.29) | .63 |
| | Qi-i | (.34) | (29) | (.11) | (.11) | (.44) | .59 | .66 | .88 | .92 | .91 | .67 | (.45) |

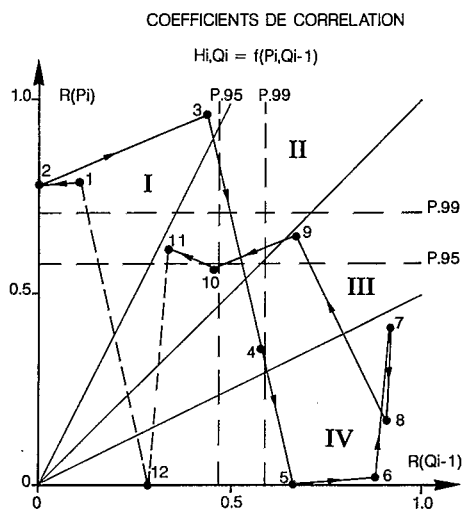



figure 7.76.

Sisaony à Andramasina

| | |
|---|---|
| H11 = .12 P11 + 13.3 | ($R^2$ = .38 P>.95) |
| H12 = pas de régression établie | |
| Janvier à Mars H = .38 P + 9.9. | ($R^2$ = .79 P>.995) |
| H01 = .34 P01 + 16.3 | ($R^2$ = .62 P>.99) |
| H02 = .30 P02 + 21.8 | ($R^2$ = .61 P>.99) |
| H03 = .41 P03 + 0.14 P02 - 16.6 | ($R^2$ = .95 P>.995) |
| H04 = .49 H03 + .25 P04 + 3.2 | ($R^2$ = .68 P>.99) |
| Q05 = .42 Q04 + 1.43 | ($R^2$ = .44 P>.99) |
| Q06 = .62 Q05 + .92 | ($R^2$ = .77 P>.995) |
| Q07 = .81 Q06 + .63 | ($R^2$ = .85 P>.995) |
| Q08 = .80 Q07 + .40 | ($R^2$ = .82 P>.995) |
| H09 = .61 H08 + .16 P09 + 2 | ($R^2$ = .91 P>.995) |
| H10 = .06 P10 + .67 H09 + .3 | ($R^2$ = .94 P>.995) |

tableau 7.131.

Sisaony à Andramasina
Régressions mensuelles

figure 7.77.

Sisaony à Andramasina

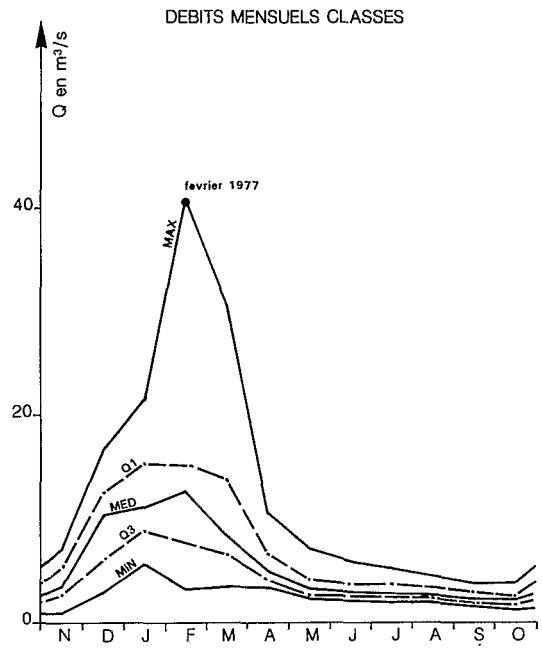



figure 7.78.

Sisaony à Andramasina

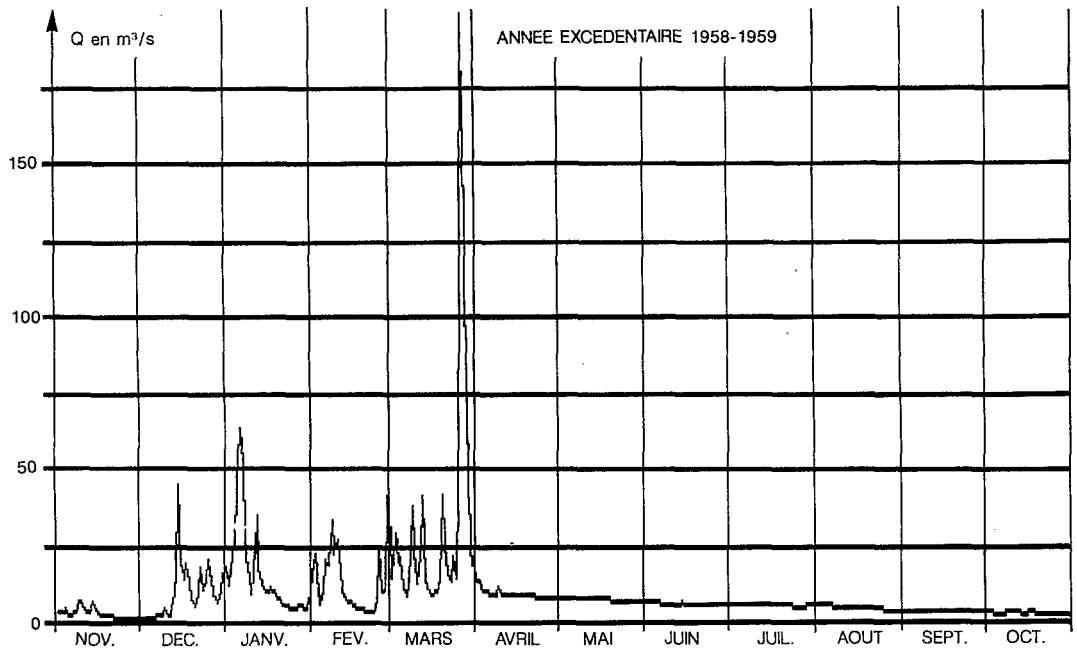
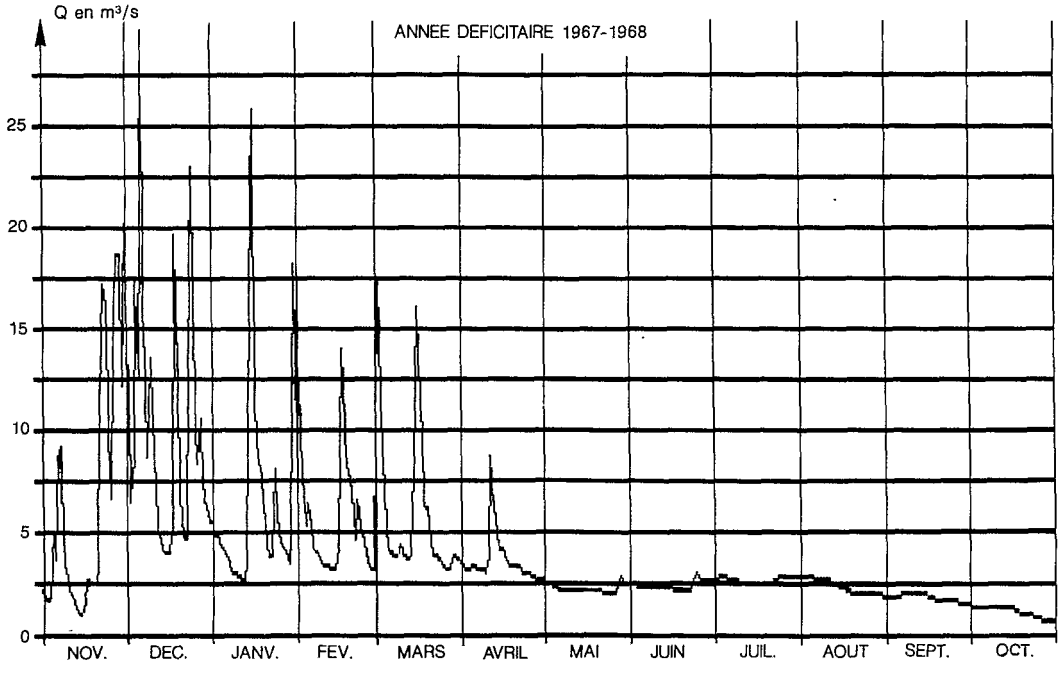


figure 7.79.

Sisaony à Andramasina




Ces relations ont permis d'estimer les débits non observés de mai, août et octobre 1975, ainsi que ceux de juin à octobre 1980.

La regression établie entre les débits mensuels de la SISAONY et ceux de l'ANDROMBA à TSINJONY ($R^2$ = .61 P > .995) met en évidence une surestimation très nette des débits de janvier à avril 1963. Ces débits ont été corrigés à partir de la regression établie entre les débits mensuels (78 couples) à l'exception de ces quatre mois.

Q SIS. = .58 Q ANDR. + . 65 ($R^2$ = .82 P>.995)

Le tableau 7.132 consigne les valeurs observées et complètes des débits mensuels d'août 1958 à octobre 1980, ainsi que les valeurs des moyennes, écarts-type et débits classés.

Les graphes 7.77, 7.78 et 7.79 représentent les débits mensuels classés ainsi que les hydrogrammes de l'année excédentaire 1958-59 (Q = 9.17 m³/s) et de l'année déficitaire 1967-68 (Q = 4.22 m³/s).

Les crues nombreuses et bien individualisées en saison des pluies indique qu'une fraction importante du bassin est imperméable ou imperméabilisée après saturation des sols.

tableau 7.132.

Débits moyens mensuels et annuels en m³/s

Station : 1250102311 Andramasina
Rivière : Sisaony
Pays : Madagascar
Bassin : Betsiboka

Latitude : 19.11.10
Longitude : 47.35.20

Aire : 318 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1957/58 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2.87 | 3.72 | 2.92 | - |
| 1958/59 | 2.98 | 9.42 | 15.7 | 12.9 | 30.7 | 9.22 | 7.30 | 5.86 | 5.28 | 4.54 | 3.40 | 2.65 | 9.17 |
| 1959/60 | 5.27 | 6.15 | 11.3 | 9.26 | 7.59 | 3.43 | 2.48 | 2.40 | 2.34 | 2.23 | 1.83 | 1.35 | 4.63 |
| 1960/61 | .982 | 5.50 | 21.5 | 3.42 | 12.5 | 6.57 | 2.73 | 2.04 | 2.75 | 2.44 | 1.94 | 1.59 | 5.37 |
| 1961/62 | 2.62 | 11.5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1962/63 | 5.52 | 16.5 | (21.8) | (12.3) | (6.55) | (5.00) | 3.85 | 3.34 | 2.89 | 2.28 | 1.87 | 1.97 | (6.98) |
| 1963/64 | 7.14 | 10.9 | 6.58 | 12.7 | 9.44 | 3.45 | 2.64 | 3.34 | 3.51 | 3.58 | 2.25 | 1.85 | 5.59 |
| 1964/65 | 2.75 | 16.6 | 15.0 | 13.0 | 10.4 | 10.7 | 3.91 | 3.53 | 4.43 | 4.19 | 3.30 | 2.54 | 7.51 |
| 1965/66 | 4.42 | 12.3 | 8.05 | 4.26 | 7.08 | 4.77 | 3.81 | 2.67 | 2.65 | 3.15 | 2.15 | 1.45 | 4.75 |
| 1966/67 | 1.28 | 5.86 | 12.4 | 6.86 | 14.7 | 4.49 | 2.88 | 2.78 | 2.68 | 2.74 | 2.31 | 2.00 | 5.09 |
| 1967/68 | 6.23 | 10.3 | 6.22 | 5.72 | 5.93 | 3.57 | 2.26 | 2.40 | 2.69 | 2.36 | 1.81 | 1.14 | 4.22 |
| 1968/69 | 3.70 | 8.48 | 7.28 | 13.4 | 5.57 | 5.64 | 3.05 | 2.83 | 2.64 | 2.76 | 1.98 | 2.16 | 4.90 |
| 1969/70 | 5.24 | 10.7 | 17.6 | 9.72 | 4.98 | 4.09 | 3.19 | 3.10 | 2.90 | 2.75 | 2.06 | 1.60 | 5.65 |
| 1970/71 | 3.63 | 6.30 | 13.4 | 17.9 | 6.39 | 4.66 | 3.63 | 3.22 | 3.24 | 2.81 | 3.19 | 1.74 | 5.77 |
| 1971/72 | 2.80 | 10.6 | 5.82 | 15.0 | 12.9 | 7.80 | 5.89 | 4.17 | 4.21 | 3.47 | 2.54 | 3.87 | 6.57 |
| 1972/73 | 5.01 | 12.9 | 12.1 | 19.8 | 16.0 | 6.01 | 4.33 | 4.27 | 4.20 | 3.81 | 2.69 | 2.16 | 7.71 |
| 1973/74 | 2.85 | 4.09 | 9.97 | 9.28 | 4.30 | 4.65 | 4.62 | 2.94 | 2.83 | 2.09 | 1.95 | 2.31 | 4.30 |
| 1974/75 | 2.04 | 12.6 | 10.8 | 18.5 | 19.6 | 6.53 | (4.17) | 4.57 | 4.14 | (3.71) | 3.03 | (2.4) | (7.62) |
| 1975/76 | - | - | 10.8 | 8.58 | 4.48 | 4.78 | 3.16 | 2.62 | 2.73 | 2.55 | 1.89 | 2.94 | (5.21) |
| 1976/77 | 3.38 | 12.9 | 10.9 | 40.9 | 20.2 | 6.40 | 4.99 | 3.94 | 3.65 | 3.46 | 2.48 | 3.19 | 9.39 |
| 1977/78 | 4.84 | 7.33 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 3.62 |
| 1978/79 | 2.71 | 2.89 | 9.72 | 15.6 | 3.62 | 5.18 | 2.19 | 2.09 | 1.95 | 1.85 | 1.66 | 1.33 | 4.16 |
| 1979/80 | 6.63 | 6.94 | 16.1 | 5.64 | 12.3 | 3.50 | 3.24 | (2.93) | (3.00) | (2.80) | (2.31) | (2.06) | 5.64 |
| Moyenne | 3.91 | 9.56 | 12.2 | 12.7 | 10.8 | 5.52 | 3.72 | 3.25 | 3.24 | 2.97 | 2.40 | 2.15 | 6.01 |
| Ecart-type | 1.71 | 3.78 | 4.65 | 8.14 | 6.87 | 1.94 | 1.27 | .940 | .840 | .710 | .600 | .690 | |
| Max. | 7.14 | 16.6 | 21.8 | 40.9 | 30.7 | 10.7 | 7.30 | 5.86 | 5.28 | 4.54 | 3.72 | 3.87 | |
| Q1 | 5.26 | 12.5 | 15.4 | 15.3 | 13.8 | 6.47 | 4.25 | 3.74 | 3.90 | 3.53 | 2.86 | 2.60 | |
| Méd. | 3.63 | 10.3 | 11.1 | 12.5 | 8.52 | 4.89 | 3.44 | 3.02 | 2.90 | 2.80 | 2.25 | 2.06 | |
| Q3 | 2.73 | 6.22 | 8.88 | 7.72 | 5.75 | 4.29 | 2.80 | 2.64 | 2.68 | 2.40 | 1.91 | 1.59 | |
| Min. | 0982 | 2.89 | 5.82 | 3.43 | 3.62 | 3.43 | 2.19 | 2.04 | 1.95 | 1.85 | 1.66 | 1.14 | |

## 7.1.9.2. Apports annuels

L'extension de l'échantillon des valeurs annuelles des apports a été effectuée à partir des liaisons statistiques établies entre les lames écoulées de la SISAONY et les précipitations annuelles P sur le bassin ou les lames écoulées de l'ANDROMBA à TSINJONY.

$H_{SIS}$ = .70 P SIS - 293 ($R^2$ = .66 P> .995)
$H_{SIS}$ = .56 H AND + 133 ($R^2$ = .72 P> .995)

Les valeurs calculées à partir de ces relations sont les suivantes :

| Année | 45.46 | 46.47 | 47.48 | 48.49 | 49.50 | 50.51 | 51.52 | 52.53 | 53.54 | 54.55 | 55.56 | 56.57 | 55.58 | 61.62 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hmm | 500 | 615 | 670 | 450 | 445 | 530 | 485 | 600 | 355 | 475 | 585 | 895 | 480 | 300 |
| Qm³/s | 5.04 | 6.20 | 6.74 | 4.54 | 4.49 | 5.34 | 4.88 | 6.05 | 3.58 | 4.79 | 5.88 | 9.02 | 4.84 | 3.03 |

La loi de distribution ajustée à l'échantillon de 35 valeurs annuelles observées ou calculées fournit les quantiles suivants :

tableau 7.133.
Sisaony à Andramasina
Apports annuels

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Hmm | 360 | 392 | 435 | 537 | 674 | 764 | 851 |
| Q m³/s | 3.63 | 3.95 | 4.38 | 5.41 | 6.79 | 7.70 | 8.58 |
| q l/s/km² | 11.4 | 12.4 | 13.8 | 17.0 | 21.4 | 24.2 | 27.0 |

Loi de Gumbel (test B.M. : 2.12, échelle : 120.9 mm, position : 492,4 mm)
Cinquantenales sèche et humide : 328 mm (Q = 3.31 m³/s) et 964 mm (Q = 9.71 m³/s).

## 7.1.9.3. Crues

La nature du contrôle (seuil rocheux, chute) permet l'extrapolation de type logarithmique, menée à partir des jaugeages les plus importants (de 37,0 à 118 m³/s pour des cotes à l'échelle allant de 1,65 à 2,57 m).

tableau 7.134.
Sisaony à Andramasina
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs |
|---|---|---|---|---|
| 1958-59 | 271 | 27/03/59 | 3,54 | Lim |
| 1959-60 | 86 | 23/01/60 18h00 | 2,30 | 3rel |
| 1960-61 | 103 | 18/03/61 12h00 | 2,45 | 3rel |

suite

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs |
|---|---|---|---|---|
| 1961-62 | 64 | 27/12/61 06h00 | 2,07 | Min |
| 1962-63 | 57 | 20/01/63 06h00 | 2,00 | 3rel |
| 1963-64 | 109 | 11/01/64 06h00 | 2,50 | 3rel |
| 1964-65 | 165 | 22/12/64 06h00 | 2,90 | 3rel |
| 1965-66 | 71 | 12/12/65 06h00 | 2,15 | 3rel |
| 1966-67 | 116 | 06/03/67 12h00 | 2,55 | 3rel |
| 1967-68 | 75 | 07/12/67 18h00 | 2,20 | 3rel |
| 1968-69 | 97 | 09/02/69 06h00 | 2,40 | 3rel |
| 1969-70 | 90 | 06/01/70 12h00 | 2,34 | 3rel |
| 1970-71 | 77 | 25/02/71 06h00 | 2,22 | 3rel |
| 1971-72 | 224 | 15/02/72 | 3,27 | PHE |
| 1972-73 | 151 | 25/02/73 06h00 | 2,80 | 3rel |
| 1973-74 | 48 | 06/02/74 06h00 | 1,88 | Min |
| 1974-75 | 184 | 13/03/75 12h00 | 3,02 | PHE |
| 1975-76 | 38 | 04/01/76 06h00 | 1,70 | Min |
| 1976-77 | 520 | 02/02/77 | 4,55 | PHE |
| 1977-78 | 52 | 28/01/78 | 1,93 | Min |
| 1978-79 | 86 | 27/01/79 06h00 | 2,30 | 3rel |
| 1979-80 | 109 | 20/01/80 06h00 | 2,50 | 3rel |

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 6 janvier et le 25 février (date médiane 27 janvier - dates extrêmes : 7 décembre et 27 mars).

Après ajustement d'une distribution de Frechet à l'échantillon des 22 maximums annuels de l'échantillon 1959-1980, nous obtenons les valeurs suivantes des quantiles :

tableau 7.135.

Sisaony à Andramasina
Maximums annuels

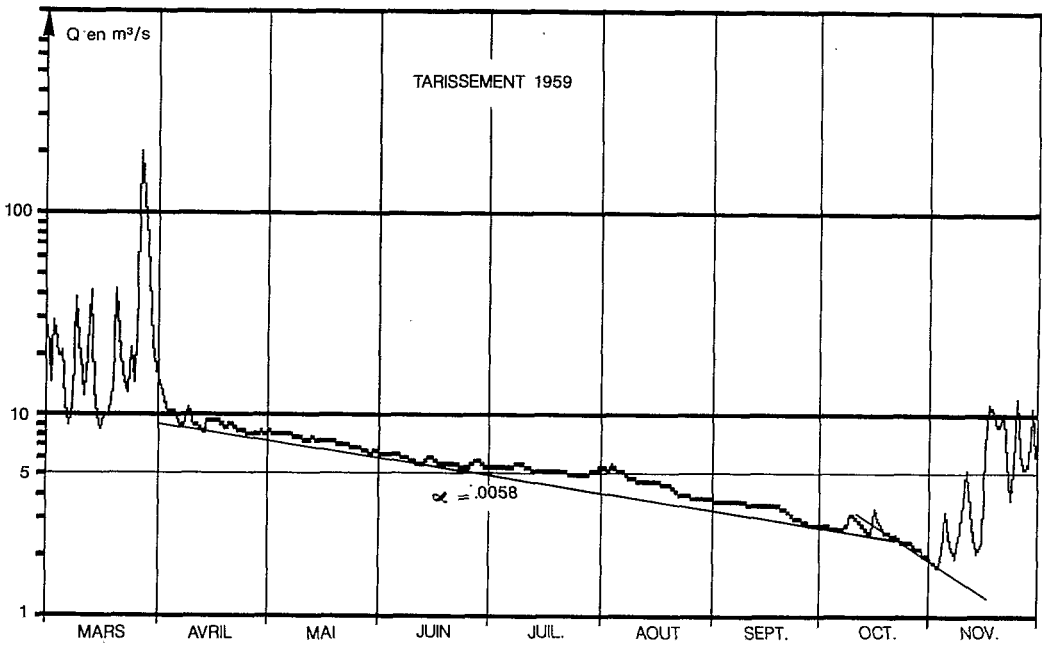
| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 93 | 159 | 227 | 490 | (680) |
| q l/s/km² | 292 | 500 | 714 | 1540 | (2140) |

## 7.1.9.4. Basses eaux

La droite de tarissement (ex. tarissement 1959, graphe 7.80) a pour coefficient moyen $\alpha$ = ,0056 (TC = 124 j). La réserve stockée est de l'ordre de 165 mm en début de saison sèche.

figure 7.80.

Sisaony à Andramasina




| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1958 | 3.77 | 2.64 | 2.14 | 1.78 | 02-11 |
| 1959 | 2.06 | 1.10 | .753 | .670 | 11-11 |
| 1960 | 2.06 | 1.65 | 1.34 | 1.08 | 08-11 |
| 1961 | - | - | - | (1.48) | 07-10 |
| 1962 | 2.36 | 1.81 | 1.55 | 1.35 | 03-12 |
| 1963 | 2.46 | 1.73 | 1.17 | .938 | 21-11 |
| 1964 | 3.38 | 2.45 | 1.82 | 1.37 | 16-11 |
| 1965 | 2.18 | 1.16 | .724 | .609 | 05-12 |
| 1966 | 2.46 | 1.90 | 1.72 | 1.02 | 15-11 |
| 1967 | 2.06 | 1.34 | .668 | .605 | 09-11 |

tableau 7.136.

Sisaony à Andramasina
Débits de basses eaux (m³/s)

suite

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1968 | 2.55 | 1.72 | 1.31 | 1.06 | 29-11 |
| 1969 | 2.71 | 1.80 | 1.06 | .941 | 31-10 |
| 1970 | 2.65 | 1.74 | 1.05 | .938 | 13-11 |
| 1971 | 3.11 | 2.27 | 2.06 | 1.64 | 12-12 |
| 1972 | 2.96 | 2.17 | 1.72 | 1.55 | 30-10 |
| 1973 | 2.10 | 1.68 | 1.10 | .781 | 03-12 |
| 1974 | - | - | - | - | - |
| 1975 | 2.44 | 1.82 | 1.06 | .854 | 02-12 |
| 1976 | - | - | - | 1.43 | - |
| 1977 | - | - | - | .77 | 04-11 |
| 1978 | - | 1.58 | 1.01 | .92 | 11-10 |

La moitié des débits minimaux est observée au cours du mois de novembre (date médiane d'observation : 14 novembre).

DCE = 1.20 QJMIN + .04 ( $R^2$ = .90)
DC11 = .03 QJMIN + .70 ( $R^2$ = .81)
DC9 = 1.15 QJMIN + 1.35 ( $R^2$ = .70)
QJMIN = .13 Q04 + .34 ( $R^2$ = .58)

La date d'apparition de l'étiage a une influence secondaire faible sur la valeur du débit minimal journalier.

Les quantiles du débit minimal journalier (20 valeurs) sont les suivants :

tableau 7.137.

Sisaony à Andramasina
Débits minimaux journaliers

| | Années déficitaires | | Médiane | Années sèches | |
|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 |
| Q m³/s | .688 | .790 | 1.03 | 1.35 | 1.56 |
| q l/s/km² | 2.2 | 2.5 | 3.2 | 4.2 | 4.9 |

Loi de Gumbel (test B.M. : 2.14, échelle : 283 l/s, position : 924 l/s)
Vicennales sèche et humide : .614 m³/s (1.9 l/s/km²) et 1.77 m³/s (5.6 l/s/km²)

## 7.1.9.5. Bilan hydrologique

Pour une pluviométrie interannuelle estimée à 1 250 mm, la lame écoulée, (595 mm) correspond à un déficit moyen d'écoulement de 655 mm (Ke = 48%).La lame écoulée (graphe 7.81) croît de 400 mm à 800 mm pour des précipitations comprises entre 900 et 1 650 mm.

Pour P > 1 650 mm, la lame écoulée (en moyenne) correspond à la droite H = P - 850. Le déficit d'écoulement est compris entre 500 mm pour les plus faibles précipitations observables (900 mm) et croît jusqu'à une valeur limite de 850 mm au-delà de P = 1 650 mm. Cette valeur plafond correspond à près de 80 % de l'évapotranspiration régionale.

figure 7.81.

Sisaony à Andramasina

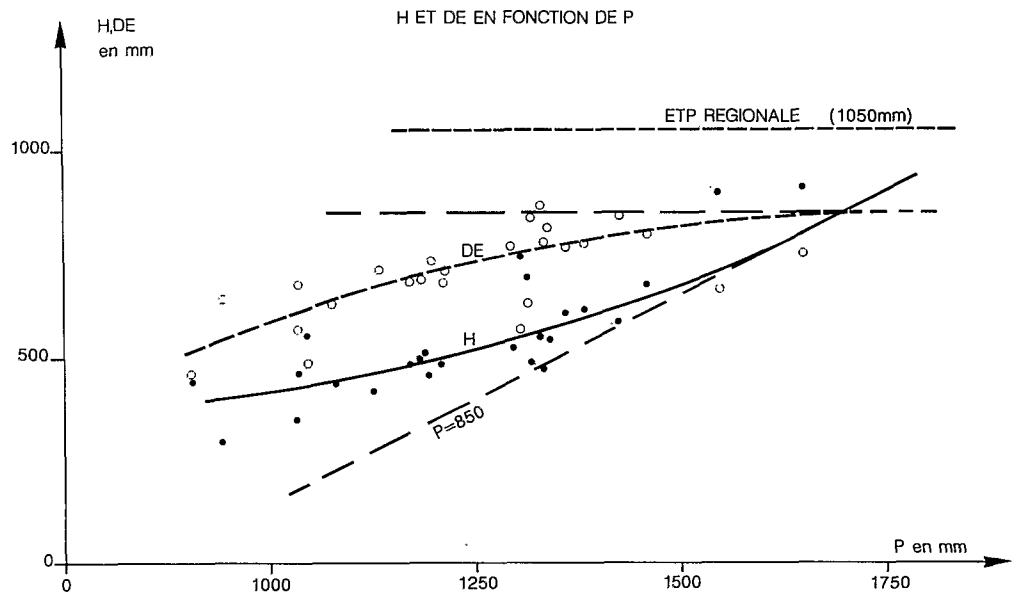



tableau 7.122.

Sisaony à Andramasina
Bilan hydrologique mensuel (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 169 | 288 | 272 | 171 | 197 | 41 | 9 | 9 | 18 | 20 | 7 | 49 | 1250 |
| ETP | 98 | 85 | 90 | 80 | 86 | 84 | 86 | 74 | 70 | 84 | 83 | 130 | 1050 |
| ETR | 98 | 85 | 90 | 80 | 86 | 63 | 36 | 24 | 20 | 20 | 7 | 46 | 655 |
| P-ETR | 71 | 203 | 182 | 91 | 111 | -22 | -27 | -15 | -2 | 0 | 0 | 3 | 595 |
| H | 36 | 89 | 113 | 74 | 91 | 48 | 30 | 26 | 28 | 26 | 18 | 16 | 595 |
| ΔR+ | 35 | 114 | 69 | 17 | 20 | | | | | | | | +255 |
| ΔR- | | | | | | 70 | 57 | 41 | 30 | 26 | 18 | 13 | -255 |
| RES | 35 | 149 | 218 | 235 | 255 | 185 | 128 | 87 | 57 | 31 | 13 | 0 | |

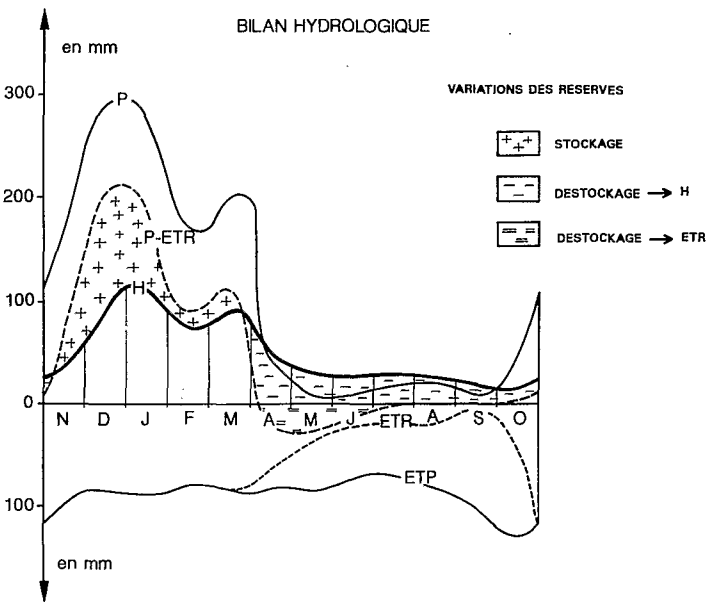
En moyenne interannuelle, l'ETR (655 mm) correspond à 62 % de l'ETP. Cette forte réduction correspond à la faiblesse des apports pluviométriques de saison sèche qui ne représentent que 12 % du total annuel.

En saison des pluies, les précipitations (1 097 mm, soit 88 % du total annuel), après satisfaction totale de l'ETP (439 mm) et recharge des réserves (259 mm en fin mars), nourissent l'écoulement (H = 403 mm, 68% du total annuel).

D'avril à octobre, l'ETR, soutenu d'avril à juillet par la réserve utile mobilisable (66 mm) ne représente plus que 34 % de l'ETP de la période. L'écoulement est presqu'entièrement alimenté par le drainage des nappes d'altérite (189 mm) (graphe 7.82).

figure 7.82.

Sisaony à Andramasina




## 7.1.10. Sisaony au PK 22

La station du Point kilométrique 22, sur la RN7 (19°04'S - 47°33'E), contrôle un bassin de 630 km².

Les observations ont été effectuées de novembre 1963 à octobre 1969.

tableau 7.139.

Débits moyens mensuels et annuels en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1963/64 | 11.3 | 27.9 | 14.0 | 27.8 | 19.4 | 8.8 | 6.6 | 6.9 | 7.2 | 6.8 | 5.3 | 4.8 | 12.2 |
| 1964/65 | 5.6 | 24.9 | 32.6 | 25.8 | 19.9 | 13.4 | 7.3 | 5.8 | 6.8 | 6.0 | 5.4 | 4.3 | 13.1 |
| 1965/66 | 5.80 | 25.7 | 19.3 | 7.51 | 11.6 | 7.80 | 5.80 | 5.10 | 4.83 | 4.16 | 4.06 | 2.90 | 8.78 |
| 1966/67 | 2.70 | 9.46 | 23.0 | 13.2 | 26.9 | 8.33 | 5.25 | 5.13 | 5.29 | 4.38 | 3.96 | 3.77 | 9.29 |
| 1967/68 | 13.2 | 20.1 | 12.5 | 12.3 | 10.3 | 7.93 | 5.50 | 5.26 | 5.57 | 4.80 | 4.27 | 2.90 | 8.71 |
| 1968/69 | 6.66 | 17.7 | 13.6 | 25.9 | 10.2 | 9.16 | 5.85 | 5.19 | 4.83 | 4.99 | 4.22 | 4.76 | 9.31 |
| Moyenne | 7.47 | 18.3 | 23.3 | 29.3 | 20.6 | 10.5 | 7.11 | 6.21 | 6.19 | 5.68 | 4.59 | 4.11 | 11.5 |

QMAX observés :

216 m³/s (343 l/s/km²) le 28.12.63
180 m³/s (286 l/s/km²) le 31.01.65
158 m³/s (251 l/s/km²) le 08.12.65
179 m³/s (284 l/s/km²) le 26.01.67

QJMIN observés

3.9 m³/s (6.2. l/s/km²) du 22 au 24.10.64
1.9 m³/s (3.0 l/s/km²) le 31.10.66
2.5. m³/s (4.0 l/s/km²) le 27.10.67
2.00 m³/s (3.2 l/s/km²) le 08.11.68
2.54 m³/s (4.0 l/s/km²) le 09.10.69

La liaison statistique entre les débits mensuels au PK22 et a ANDRAMASINA est de bonne qualité :

Q PK22 = 1.91 Q ANDRA ($R^2$ = .94 P>.995) (72 valeurs)

et permet d'estimer les valeurs moyennes interannuelles des débits mensuels (tableau 7.139) et le module Q = 11.5 m³/s (H = 575 mm).

Pour une pluviométrie de l'ordre de 1 200 mm, le coefficient d'écoulement est de 48 % (DE = 625 mm).

## 7.1.11. Sisaony à Anpitatafika

La station d'AMPITATAFIKA située en aval du PK22 (18°56'S - 47°29'E) contrôle un bassin de 726 km².

tableau 7.140.

Débits moyens mensuels et annuels en m³/s

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1963/64 | 11.1 | 26.6 | 13.0 | 29.0 | 18.2 | 7.8 | 5.0 | 5.4 | 6.1 | 4.8 | 2.0 | 1.5 | 10.9 |
| 1964/65 | 3.7 | 28.7 | 35.4 | 31.1 | 20.8 | 15.9 | 6.2 | 4.8 | 5.8 | 4.3 | 2.8 | 1.4 | 13.5 |
| 1965/66 | 5.08 | 28.7 | 21.2 | 8.71 | 12.3 | 8.54 | 5.73 | 4.19 | 3.99 | 3.80 | 2.48 | 1.05 | 8.81 |
| 1966/67 | 1.08 | 10.9 | (27.5) | 13.7 | 31.5 | 9.39 | 5.17 | 3.94 | 4.24 | 3.49 | 2.55 | 2.36 | (9.68) |
| 1967/68 | 12.0 | 21.4 | 10.8 | 12.6 | 10.1 | 6.06 | 3.18 | 3.01 | 3.00 | 2.02 | 0.77 | 0.27 | 7.08 |
| 1968/69 | 7.18 | 22.7 | 16.2 | 34.2 | 11.7 | 11.1 | 5.52 | 5.18 | 4.72 | 4.86 | 2.61 | 2.99 | 10.6 |
| Moyenne | 6.66 | 20.1 | 26.4 | 27.6 | 23.1 | 10.5 | 6.20 | 5.09 | 5.06 | 4.42 | 3.06 | 2.47 | 11.7 |

QMAX observés :

106 m³/s les 28 et 29.12.63
159 m³/s le 01.02.65
101 m³/s le 9.12.65
(96) m³/s le 27.01.67

QJMIN observés :

.64 m³/s le 30.10.63
.44 m³/s les 21 et 22.11.64
.19 m³/s le 31.10.66
165 m³/s le 05.10.67
(.05) m³/s le 14.11.68
.37 m³/s le 22.10.69

En comparant ces valeurs aux observations en amont du PK22, on peut noter un ecrètement très sensible des débits maximaux et une diminution importante des débits de basses eaux.

Cela est dû à l'influence des prélèvements opérés sur les apports de la SISAONY en saison sèche pour les besoins de l'irrigation de la plaine d'ANTANANARIVO et à la présence en amont de la station des périmètres rizicoles stockant les apports de saison des pluies.

Les débits "réels" ainsi observés sont bien corrélés aux débits mesurés à ANDRAMASINA.

$Q_{AMPIT.} = 2.38\ Q_{ANDRA} - 2.65$ ($R^2 = .95$ P>.995) (72 vol.)

Le module "réel" est de 11.7 m³/s (lame équivalente 507 mm) et correspond à une augmentation assez nette de la reprise par évapotranspiration (plus de 700 mm).

Un petit bassin versant représentatif de 0.29 km² (AMBATOMAINTY sud), situé dans le haut bassin de la SISAONY, a été suivi pendant quatre années.

À partir d'un étalonnage théorique du déversoir, vérifié par quelques mesures, les valeurs du maximum de crue ont été évaluées :

20/12/72 872 l/s
28/12/73 893 l/s
12/02/75 1260 l/s
30/12/75 353 l/s

Par ajustement d'une loi log-normale à l'échantillon des dix-sept débits maximaux observés en 4 ans, les quantiles suivants ont été estimés :

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 |
|---|---|---|---|
| Q l/s | 785 | 1150 | 1500 |
| q l/s/km² | 2710 | 3970 | 5170 |

## 7.1.12. Andromba à Behenjy

Le bassin de l'ANDROMBA occupe la partie sud-ouest du bassin supérieur de l'IKOPA, à l'ouest de la SISAONY. L'ANDROMBA draine, avec son affluent la KATSAOKA, les formations volcaniques (basaltes fissurés) du flanc nord-est de l'ANKARATRA. A l'exception des pentes de l'ANKARATRA où subsiste la forêt, la majeure partie du bassin est recouverte de savane plus ou moins clairsemée et de rizières dans son cours inférieur. Des observations ont été effectuées à BEHENJY, à TSINJONY (station de base), aux ponts de la route d'ARIVONIMAMO sur l'ANDROMBA et la KATSAOKA et, peu avant le confluent avec l'IKOPA, à ANTSAHALAVA.

La station de BEHENJY (19°13'S - 47°30'E) contrôle un bassin de 321 km². Des observations et mesures ont été effectuées de 1963 à 1980. La station est relativement instable en basses et moyennes eaux et plusieurs courbes d'étalonnage ont dû être établies. Les résultats de cette station permettent de compléter la chronique plus ancienne de TSINJONY.

tableau 7.141.

Andromba à Behenjy
Débits moyens mensuels
et annuels en m³/s

Station : 1250101209 Behenjy
Rivière : Andromba

Latitude : 19.13.00
Longitude : 47.30.00
Aire : 321 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1963/64 | 4.97 | 14.5 | 10.6 | 21.9 | 12.9 | 6.10 | 3.70 | 3.56 | 3.41 | 3.53 | 2.31 | 2.06 | 7.42 |
| 1964/65 | 5.04 | 16.5 | 21.6 | 18.3 | 18.3 | 13.5 | 5.03 | 3.59 | 3.68 | 3.30 | 3.01 | 2.67 | 9.54 |
| 1965/66 | 5.99 | 15.6 | 11.2 | 9.92 | 9.27 | 6.41 | 5.86 | 4.18 | 3.16 | 3.31 | 2.52 | 1.56 | 6.58 |
| 1966/67 | 2.43 | 7.50 | 13.8 | 10.7 | 18.9 | 8.10 | 4.20 | 3.31 | 3.04 | 2.64 | 2.53 | 2.21 | 6.61 |
| 1967/68 | 8.00 | 16.8 | 10.5 | 13.6 | 11.6 | 8.39 | 4.71 | 3.73 | 3.38 | 2.96 | 2.45 | 1.45 | 7.30 |
| 1968/69 | 4.13 | 14.6 | 10.8 | 16.9 | 8.89 | 13.2 | 6.12 | 3.81 | 3.18 | 3.13 | 2.45 | 2.12 | 7.44 |
| 1969/70 | 5.28 | 19.4 | 23.9 | 17.4 | 13.8 | 8.11 | 5.15 | 4.19 | 3.85 | 3.24 | 2.39 | 1.77 | 9.04 |
| 1970/71 | 5.57 | 10.0 | 16.3 | 23.2 | 15.1 | 8.62 | 4.61 | 3.32 | 3.03 | 2.48 | 2.88 | 1.51 | 8.05 |
| 1971/72 | 3.86 | 11.5 | 7.85 | 23.5 | 21.5 | 10.0 | 6.63 | 3.94 | 3.75 | 3.59 | 2.40 | 5.72 | 8.69 |
| 1972/73 | 9.23 | 14.4 | 19.8 | 25.8 | 23.6 | 10.8 | 6.45 | 5.71 | 5.13 | 5.16 | 4.09 | 3.26 | 11.0 |
| 1973/74 | 7.89 | 8.64 | 12.9 | 14.6 | 17.3 | 19.1 | 11.9 | 7.49 | 6.34 | 5.92 | 8.23 | 4.34 | 10.3 |
| 1974/75 | 5.54 | 10.5 | 13.8 | 26.5 | 25.1 | 12.1 | 7.34 | 5.82 | 5.04 | 4.24 | 3.56 | 4.09 | 10.2 |
| 1975/76 | 9.61 | 17.1 | 15.6 | 17.1 | 9.86 | 8.43 | 6.83 | 5.23 | 4.72 | 4.37 | 3.42 | 3.87 | 8.32 |
| 1976/77 | 3.33 | 17.7 | 14.5 | 34.3 | 20.6 | 9.31 | 5.91 | 4.38 | 3.59 | 2.93 | 2.00 | 2.64 | 9.96 |
| 1977/78 | 2.44 | 3.61 | 11.0 | 7.31 | 6.47 | 4.71 | 2.21 | 1.85 | 2.44 | 1.75 | 1.32 | 1.27 | 3.85 |
| 1978/79 | 3.52 | 6.62 | 11.3 | 17.3 | 12.1 | 11.8 | 4.47 | 3.44 | 3.17 | 2.99 | 2.32 | 2.18 | 6.70 |
| 1979/80 | 6.62 | 10.7 | 15.4 | 10.9 | 11.5 | 9.67 | 5.10 | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 5.50 | 12.7 | 14.2 | 18.2 | 14.8 | 9.90 | 5.66 | 4.22 | 3.81 | 3.47 | 2.99 | 2.67 | 8.13 |

## 7.1.13. Andromba à Tsinjony

Située légèrement en aval de la précédente, la station de TSINJONY (19°07'45" S - 47°30'40"E) contrôle un bassin de 350 km². Elle est située à 1 400 m d'altitude, en bordure de la R.N.7.

Une première échelle a été installée en mars 1954, puis après la forte crue de mars 1959, réinstallée en juillet 1960. Les lectures ont été effectuées jusqu'en décembre 1971.

Quarante-sept mesures de débit (entre 1 m³/s et 185m³/s) ont été effectuées au cours de la période d'observation. La section est stable et une courbe d'étalonnage unique a été tracée, avec une extrapolation jusqu'à plus de 200 m³/s. Un certain nombre de complètements ou de corrections des lectures manifestement erronées ont été effectués.

La pluviométrie est déterminée à partir de quatre stations (ANDRIAMBILANY, MANJAKATOMPO, BEHENJY et AMBATOLAMBY).

Elle est en moyenne estimée à 1 500 mm, mais en raison de la faible densité de poste sur le haut-bassin, les valeurs annuelles souffrent d'une certaine imprécision.

## 7.1.13.1. Débits mensuels et relations hydropluviométriques

tableau 7.142.

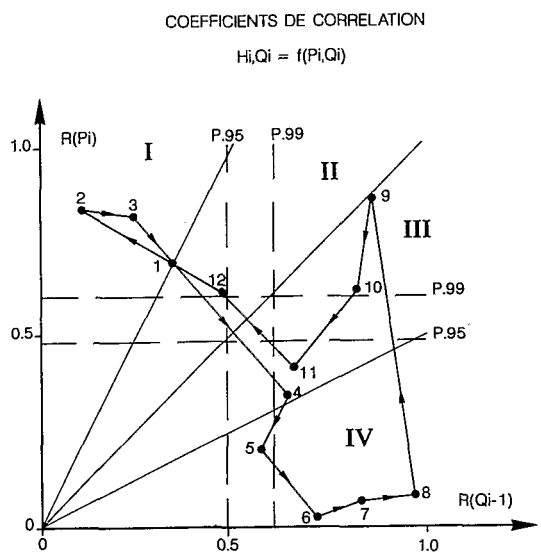
Andromba à Tsinjony
Coefficients de corrélation

| Hi ou Qi | | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| en fonction de | Pi | (.41) | (.23) | .71 | .83 | .81 | (.34) | (.20) | (.02) | (.12) | (.17) | .86 | .62 |
| | Pi-i | .70 | .56 | (-.18) | (.14) | (.40) | .61 | (.04) | (-.17) | (.03) | (.17) | (.38) | .85 |
| | Qi-i | .65 | .47 | (.31) | (.14) | (.24) | .64 | .57 | .71 | .83 | .97 | .86 | .82 |

Le schéma est classique (régime des hauts plateaux). De décembre à janvier, influence principale des précipitations du mois (moyenne de décembre et novembre pour les débits de décembre, période de recharge des nappes). Pendant la première partie de la saison sèche (avril-août), les débits sont intercorrélés (drainage des nappes). Puis de septembre à novembre, les précipitations du mois prennent un poids secondaire important (graphe 7.83).

figure 7.83.

Andromba à Tsinjony



| | |
|---|---|
| H11 = .21 P11 + 1.21 H10 - 25 | ($R^2$ = .84 P>.995) |
| H12 = .72 P1211 + .45 P10 - 92 | ($R^2$ = .65P >.995) |
| H01 = .47 P01 + .41 P10 + 2 | ($R^2$ = .56 P>.995) |
| H02 = .50 P02 + .11 P01 - 20 | ($R^2$ = .76 P>.995) |
| H03 = .47 P03 + .38 P02 + .25 P01 - 104 | ($R^2$ = .81 P>.995) |
| H04 = .46 P04 + .32 H03 - 7 | ($R^2$ = .86 P>.995) |
| H05 = .26 H04 + 25 | ($R^2$ = .36 P>.995) |
| H06 = .62 H05 + 6 | ($R^2$ = .56 P>.995) |
| H07 = .82 H06 + 3 | ($R^2$ =.69 P>.995) |
| H08 = .92 H07 - 1 | ($R^2$ = .93 P>.995) |
| H09 = .90 H08 + .20 P09 - 6 | ($R^2$ = .98 P>.995) |
| H10 = .86 H09 + .09 P10 - 5 | ($R^2$ = .97 P>.995) |

tableau 7.143.

Andromba à Behenjy
Régressions
hydropluviométriques

tableau 7.144.

Débits moyens mensuels
et annuels en m³/s

Station : 1250101215 Tsinjony
Rivière : Andromba
Pays : Madagascar
Bassin : Betsiboka

Latitude : 19.08.00
Longitude : 47.31.00

Aire : 350 km²

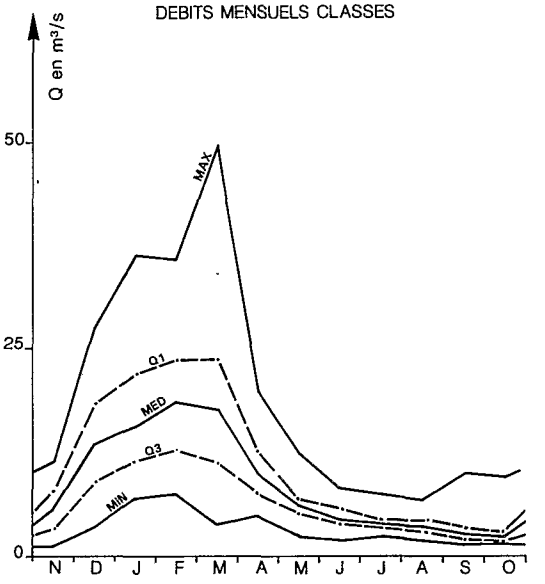
| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1953/54 | - | - | - | - | - | 8.28 | 5.08 | 4.06 | 3.49 | 2.99 | 2.50 | 1.91 | - |
| 1954/55 | 6.64 | 12.7 | 13.4 | 14.0 | 27.0 | 12.1 | 6.94 | 4.81 | 4.15 | 4.26 | 3.16 | 2.78 | 9.32 |
| 1955/56 | 4.64 | 21.9 | 24.2 | 25.4 | 11.3 | 8.68 | 5.38 | 4.19 | 4.33 | 4.02 | 3.10 | 2.32 | 9.92 |
| 1956/57 | 3.34 | 10.8 | 10.5 | 27.4 | 38.0 | 18.0 | 6.74 | 4.86 | 4.15 | 3.81 | 3.08 | 2.68 | 11.2 |
| 1957/58 | 2.97 | 6.78 | 26.4 | 15.4 | 23.5 | 10.1 | 7.08 | 6.88 | 7.02 | 6.57 | 9.78 | 9.39 | 11.0 |
| 1958/59 | 11.2 | 18.9 | 27.2 | 19.7 | 49.6 | 16.3 | 9.84 | 8.13 | 7.32 | 6.55 | 5.25 | 4.39 | 15.4 |
| 1959/60 | 9.23 | 11.2 | 24.1 | 22.3 | 24.3 | 8.19 | 4.73 | 3.95 | 3.41 | 2.99 | 2.46 | 2.16 | 9.89 |
| 1960/61 | 1.16 | 8.11 | 21.7 | 7.24 | 20.0 | 10.2 | 5.94 | 3.89 | 4.32 | 3.79 | 3.19 | 2.39 | 7.70 |
| 1961/62 | 2.51 | 17.0 | 7.55 | 10.5 | 17.0 | 12.5 | 6.63 | 4.21 | 3.29 | 2.93 | 2.19 | 2.45 | 7.39 |
| 1962/63 | 8.48 | 27.4 | 36.3 | 20.0 | 10.2 | 7.50 | 5.06 | 5.81 | 3.68 | 2.81 | 1.89 | 2.90 | 11.0 |
| 1963/64 | 7.14 | 14.6 | 10.7 | 22.1 | 16.2 | 5.89 | 3.17 | 3.06 | 3.51 | 3.00 | 1.79 | 1.03 | 7.64 |
| 1964/65 | 4.22 | 16.4 | 21.5 | 18.8 | 19.9 | 14.2 | 4.03 | 3.31 | 3.52 | 3.70 | 3.40 | 3.23 | 9.65 |
| 1965/66 | 5.55 | 20.6 | 9.95 | 9.46 | 9.67 | 6.86 | 6.90 | 3.88 | 3.04 | 3.25 | 3.41 | 1.83 | 7.04 |
| 1966/67 | 2.59 | 7.60 | 15.6 | 12.0 | 20.2 | 6.72 | 4.50 | 3.49 | 2.89 | 2.38 | 2.00 | 2.19 | 6.84 |
| 1967/68 | 7.78 | 18.0 | 6.91 | 12.4 | 9.73 | 7.98 | 5.21 | 5.34 | 3.43 | 2.82 | 2.15 | 1.47 | 6.92 |
| 1968/69 | 4.16 | 13.4 | 12.5 | 19.2 | 9.48 | 15.3 | 6.66 | 4.11 | 3.41 | 3.08 | 2.64 | 2.18 | 7.93 |
| 1969/70 | 5.41 | 20.4 | 28.9 | 15.0 | 12.9 | 7.40 | 5.08 | 4.11 | 4.42 | 3.56 | 2.36 | 1.80 | 9.28 |
| 1970/71 | 5.81 | 8.35 | 17.0 | 23.5 | 14.2 | 6.99 | 6.03 | 4.10 | 3.74 | 3.35 | 3.73 | 1.96 | 8.14 |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1971/72 | 4.07 | 12.4 | 8.05 | 24.4 | 22.3 | 10.3 | 6.77 | 3.95 | 3.75 | 3.58 | 2.33 | 5.81 | (8.93) |
| 1972/73 | 9.49 | 14.9 | 20.6 | 26.9 | 24.9 | 11.1 | 6.58 | 5.80 | 5.20 | 5.23 | 4.11 | 3.24 | 11.4 |
| 1973/74 | 8.09 | 8.87 | 13.3 | 15.1 | 18.0 | 19.8 | 12.3 | 7.67 | 6.46 | 6.02 | 8.45 | 4.37 | 10.7 |
| 1974/75 | 5.63 | 10.8 | 14.3 | 27.6 | 26.1 | 12.5 | 7.51 | 5.92 | 5.10 | 4.26 | 3.55 | 4.11 | 10.5 |
| 1975/76 | 9.89 | 17.7 | 16.2 | 17.7 | 3.87 | 8.65 | 6.98 | 5.30 | 4.77 | 4.40 | 3.45 | 3.90 | 8.54 |
| 1976/77 | 3.31 | 18.4 | 15.0 | 35.8 | 21.4 | 9.58 | 6.01 | 4.41 | 3.59 | 3.00 | 2.10 | 2.70 | 10.3 |
| 1977/78 | 2.40 | 3.60 | 11.3 | 7.48 | 6.60 | 4.76 | 2.20 | 1.85 | 2.50 | 1.80 | 1.40 | 1.30 | 3.92 |
| 1978/79 | 3.51 | 6.76 | 11.7 | 18.0 | 12.5 | 12.2 | 4.50 | 3.43 | 3.20 | 3.10 | 2.35 | 2.20 | 6.88 |
| 1979/80 | 6.76 | 11.0 | 16.0 | 11.2 | 11.9 | 9.95 | 5.20 | (4.2) | (3.8) | (3.4) | (2.9) | (2.6) | (7.40) |
| Moyenne | 5.61 | 13.8 | 17.0 | 18.4 | 18.5 | 10.5 | 6.04 | 4.64 | 4.40 | 3.74 | 3.30 | 2.95 | 9.01 |
| Ecart-type | 2.68 | 5.67 | 7.45 | 7.08 | 9.91 | 3.74 | 1.96 | 1.42 | 1.22 | 1.20 | 2.00 | 1.71 | |
| Max. | 11.2 | 27.4 | 36.6 | 35.8 | 49.6 | 19.8 | 12.3 | 8.13 | 7.32 | 6.57 | 9.78 | 9.39 | |
| Q1 | 7.78 | 18.0 | 21.7 | 23.5 | 23.5 | 12.5 | 6.90 | 5.34 | 4.42 | 4.26 | 3.41 | 3.24 | |
| Méd. | 5.48 | 13.1 | 15.3 | 18.4 | 17.5 | 9.95 | 6.01 | 4.15 | 3.71 | 3.46 | 2.57 | 2.42 | |
| Q3 | 3.34 | 8.87 | 11.3 | 12.4 | 11.3 | 7.50 | 5.06 | 3.89 | 3.41 | 2.99 | 2.15 | 1.96 | |
| Min. | 1.16 | 3.60 | 6.91 | 7.24 | 3.87 | 4.76 | 2.20 | 1.85 | 2.50 | 1.80 | 1.40 | 1.03 | |

figure 7.84.

Andromba à Tsinjony



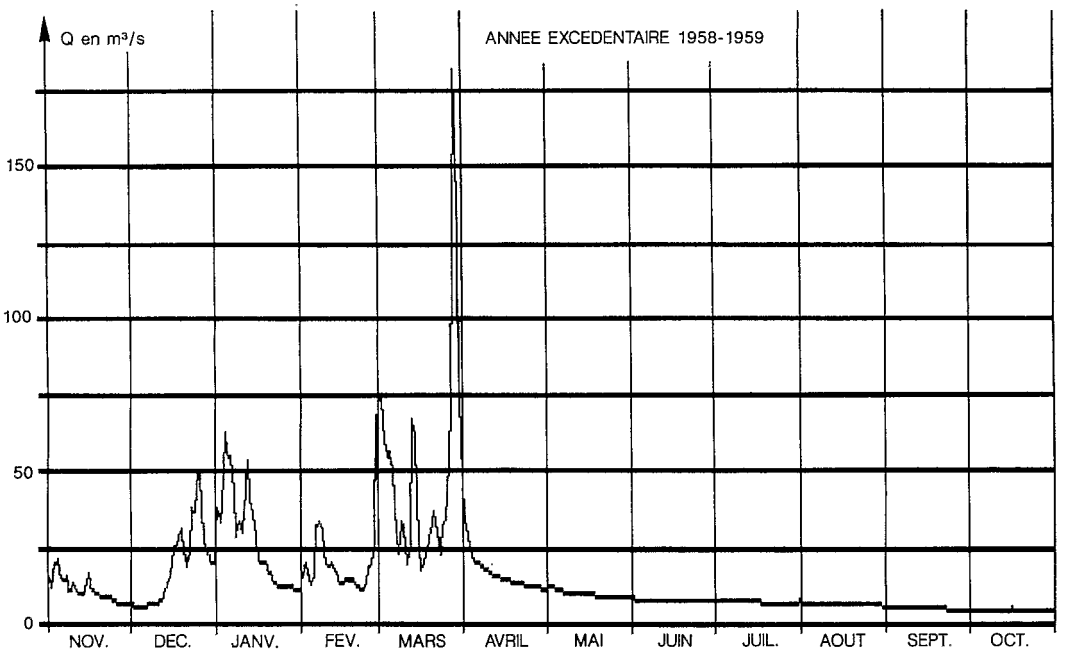



figure 7.85.
Andromba
à Tsinjony

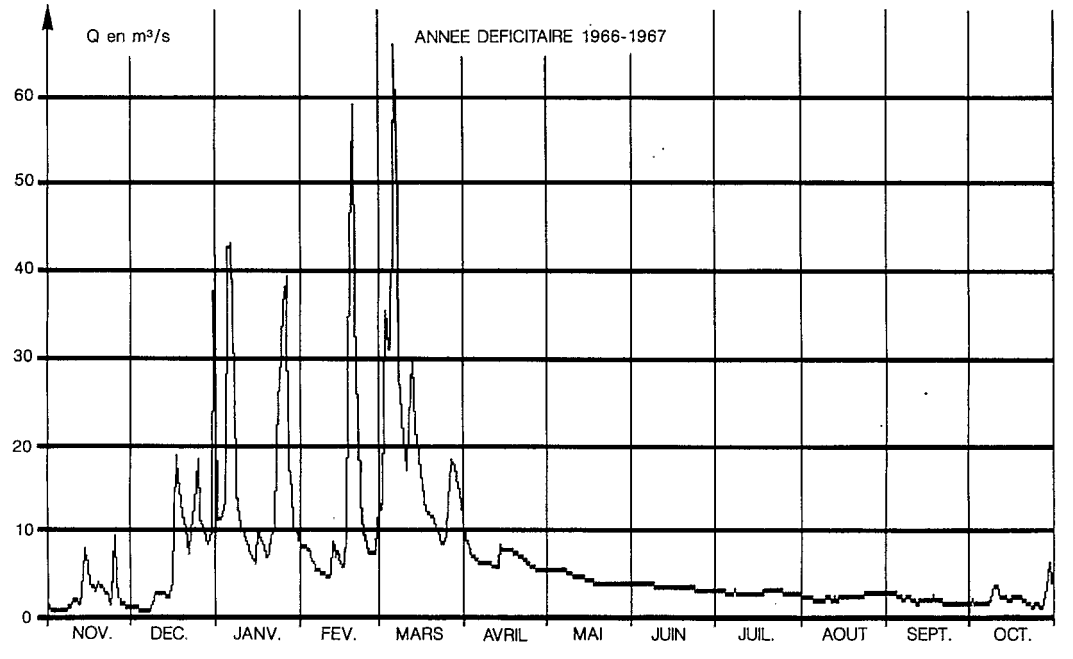



figure 7.86.
Andromba
à Tsinjony

L'équation de regression établie entre les débits mensuels de TSINJONY et BEHENJY (97 couples)

$Q_{TSINJ.} = 1.05\ Q_{BEH.} - .2$ $(R^2 = .97, P>.995)$

a permis de compléter l'échantillon des valeurs mensuelles, de janvier 1972 à mai 1980. Les débits de saison sèche 1980 ont été estimés à partir des régressions intermensuelles du tableau 7.143.

Les débits mensuels classés (MAX, Q1, MED, Q3 et MIN) sont représentés sur le graphe 7.84. Les graphes 7.85 et 7.86 présentent des hydrogrammes en année humide (1958-59, Q = 15.4 m³/s) et en saison sèche (1966.67, Q = 6.84 m³/s). Les épidodes pluvieux sont assez bien marqués, mais en comparant ces hydrogrammes à ceux de la station voisine sur la SISAONY, on note une nette diminution du nombre de crues individualisées. Cette fusion est due à la présence de terrain plus perméables (basaltes) ainsi qu'au couvert forestier du haut bassin. Les débits de base sont bien soutenus.

## 7.1.13.2. Apports annuels

L'analyse de l'échantillon de lames annuelles (1954.70) montre que ces lames sont déterminées par la précipitations annuelle P mais avec une influence secondaire sensible du coefficient de concentration des pluies mensuelles (Cp) et des précipitations antérieures de septembre et octobre (niveau des nappes en début d'année hydrologique).

$H = .68\ P + 1405\ Cp + 1.62\ (P10 + P09) - 720$ $(R^2 = .71)$

Cette relation a permis de compléter l'échantillon des observations annuelles de 1945 à 1954.

| Année | 45.46 | 46.47 | 47.48 | 48.49 | 49.50 | 50.51 | 51.52 | 52.53 | 53.54 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hmm | 825 | 1085 | 1305 | 740 | 880 | 1410 | 1080 | 865 | 720 |
| Qm³/s | 9.16 | 12.0 | 14.4 | 8.21 | 9.77 | 15.6 | 12.0 | 9.60 | 8.00 |

Les quantiles de l'ajustement d'une loi de distribution sur les 35 valeurs annuelles observées ou calculées sont les suivants :

tableau 7.145.

Andromba à Tsinjony
Apports annuels

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Hmm | 464 | 531 | 593 | 674 | 843 | 1035 | 1145 | 1240 | 1350 |
| Q m³/s | 5.15 | 5.89 | 6.58 | 7.48 | 9.35 | 11.5 | 12.7 | 13.8 | 15.0 |
| q l/s/km² | 14.7 | 16.8 | 18.8 | 21.4 | 26.7 | 32.9 | 36.3 | 39.4 | 42.9 |

Loi log-normale (test B.M. : 4.95, échelle : 1445 mm, position : -607 mm, forme : .147).
Centennales sèche et humide : 422 mm (Q = 4.68 m³/s) et 1 435 mm (Q = 15.9 m³/s).

## 7.1.13.3. Crues

### *7.1.13.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux*

L'extrapolation de type logarithmique est relativement faible (de 4.48 m à 5,75 m) et s'appuie sur les deux plus forts jaugeages (89,5 et 185 m³/s correspondant respectivement à des hauteurs de 3,30 et de 4,65 m³/s).

tableau 7.146.

Andromba à Tsinjony
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs |
|---|---|---|---|---|
| 1954-55 | 98 | 29/03/55 06H00 | 3,46 | 3rel |
| 1955-56 | 112 | 28/01/56 12H00 | 3,68 | 3REL |
| 1956-57 | 157 | 20/03/57 12h00 | 4,30 | 3rel |
| 1957-58 | 168 | 24/01/58 12h00 | 4,44 | 3rel |
| 1958-59 | 203 | 28/03/59 12h00 | 4,85 | 3rel |
| 1959-60 | 107 | 09/01/60 12h00 | 3,60 | 3rel |
| 1960-61 | 123 | 19/03/61 18h00 | 3,85 | 3rel |
| 1961-62 | 126 | 27/12/61 06h00 | 3,90 | 3rel |
| 1962-63 | 70 | 18/02/63 12h00 | 2,90 | 3rel |
| 1963-64 | 93 | 05/02/64 12h00 | 3,37 | 3rel |
| 1964-65 | 89 | 29/03/65 06h00 | 3,28 | 3rel |
| 1965-66 | 67 | 07/12/65 06h00 | 2,83 | 3rel |
| 1966-67 | 87 | 06/03/67 06h00 | 3,24 | 3rel |
| 1967-68 | 63 | 19/12/67 06h00 | 2,75 | 3rel |
| 1968-69 | 66 | 07/02/69 06h00 | 2,80 | 3rel |
| 1969-70 | 91 | 03/01/70 18h00 | 3,33 | 3rel |
| 1970-71 | 70 | 26/01/71 18h00 | 2,90 | 3rel |
| 1971-72 | (90) | 14/02/72 | | |
| 1972-73 | (111) | 26/02/73 | | |
| 1973-74 | (60) | 12/03/74. | | |
| 1974-75 | (118) | 03/75 | | |
| 1975-76 | (70 | 25/02/76 | | |
| 1976-77 | 294 | 02/77 | 5,75 | PHE |
| 1977-78 | (76) | 26/01/78 | | |
| 1978-79 | (50) | 01/04/79 | | |
| 1979-80 | (88) | 21/01/80 | | |
| 1980-81 | | | | |
| 1981-82 | (168) | (10/03/82) | | |

### *7.1.13.3.2. Extension de l'échantillon de crues*

La qualité douteuse des relevés est à l'origine de l'abandon de cette station en 1971, au profit de celle de BEHENJY toute proche et mieux équipée.

A l'exception des plus hautes eaux consécutives au cyclone Emilie, relevées sur la plupart des stations des bassins des rivières SISAONY et ANDROMBA, les maximums annuels de la période 1971-1982 ont été déduits (simple rapport des superficies) des relevés de la station de BEHENJY

| Année | Tsinjony | Behenjy | |
|---|---|---|---|
| | Qm³/s | Hm | Q m³/s |
| 1963-64 | 93 | 3,60 | 125 |
| 1964-65 | 89 | 2,95 | 77 |
| 1965-66 | 67 | 2,76 | 65 |
| 1966-67 | 87 | 3,17 | 93 |
| 1967-68 | 63 | 2,73 | 63 |
| 1968-69 | 66 | 2,82 | 69 |
| 1969-70 | 91 | 3,08 | 87 |
| 1970-71 | 70 | 2,67 | 60 |
| 1976-77 | 294 | 4,33 | 178 |

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 24 janvier et le 20 mars (date médiane : 15 février - dates extrêmes : 7 décembre et 1er avril).

Une distribution de Frechet a été ajustée à l'échantillon des 26 valeurs observées :

tableau 7.147.

Andromba à Tsinjony
Maximums annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 91 | 129 | 163 | 270 | (340) |
| q l/s/km² | 260 | 370 | 465 | 770 | (970) |

## 7.1.13.4. Basses eaux

À l'exception de certaines années (1958,1965) où les précipitations de mai à septembre ont été suffisamment abondantes pour masquer le tarissement, celui-ci est observable entre mai et novembre.

En moyenne, le débit de base initial de Qo est observé en mai ou juin et est de l'ordre de 4 m³/s. Après un tarissement de pente moyenne $\alpha$ = .0065 (TC = 107 jours), le débit minimal journalier (de l'ordre de 1.5 à 2 m³/s) est observé entre le 15 octobre et le 15 novembre. (graphe 7.87 : tarissement 1957). Certaines années, il est prolongé d'un second tarissement plus rapide ($\alpha$ = .02, Te = 35 jours) pour atteindre un étiage tardif en mi-octobre à fin novembre (QJMIN de l'ordre de .75 m³/s).

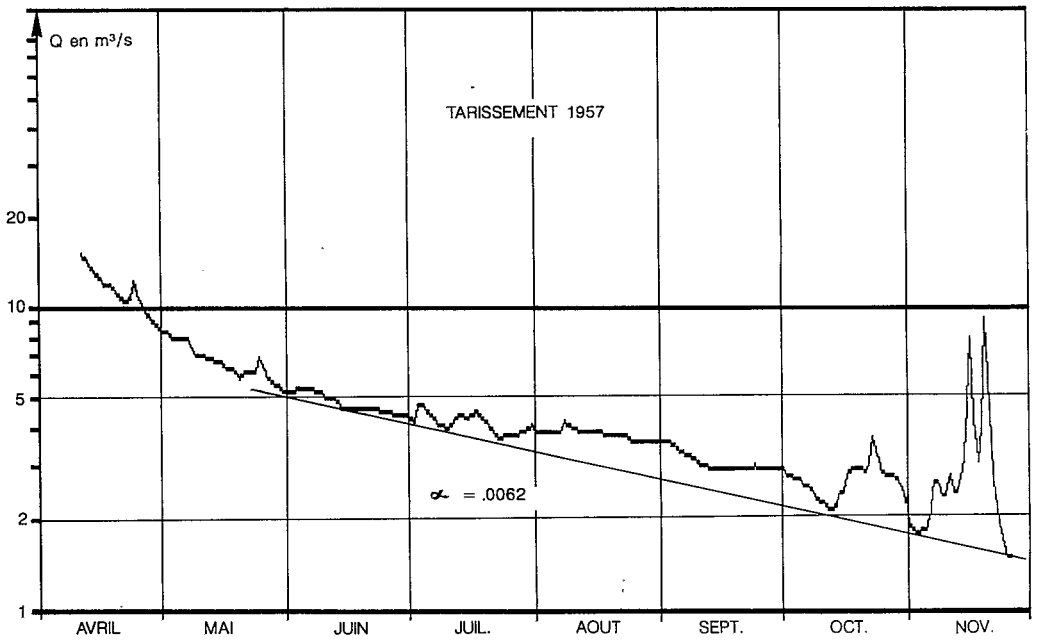



figure 7.87.

Andromba à Tsinjony

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1954 | 3.00 | 2.07 | 1.85 | 1.37 | 01-11 |
| 1955 | 3.77 | 2.71 | 2.27 | 1.74 | 18-11 |
| 1956 | 3.25 | 2.33 | 1.92 | 1.66 | 05-11 |
| 1957 | 3.62 | 2.68 | 1.94 | 1.51 | 25-11 |
| 1958 | 6.73 | 6.28 | 5.86 | 5.55 | 10-09 |
| 1959 | 6.42 | 4.68 | 4.25 | 3.89 | 01-11 |
| 1960 | 2.79 | 1.64 | .943 | .772 | 19-11 |
| 1961 | 3.6 | 2.17 | 1.47 | 1.15 | 26-11 |
| 1962 | 3.15 | 2.16 | 1.85 | 1.67 | 09-10 |
| 1963 | 3.46 | 1.97 | 1.50 | 1.37 | 04-10 |
| 1964 | 2.38 | 1.17 | 1.00 | .886 | 30-10 |
| 1965 | 3.27 | 2.92 | 2.70 | 1.96 | 13-11 |
| 1966 | 2.80 | 1.57 | .947 | .783 | 07-11 |
| 1967 | 2.80 | 1.93 | 1.55 | 1.33 | 24-10 |
| 1968 | 2.90 | 1.37 | 1.00 | .705 | 09-11 |
| 1969 | 3.13 | 2.09 | 1.72 | 1.17 | 22-10 |
| 1970 | 3.58 | 2.06 | 1.50 | 1.16 | 31-10 |

tableau 7.148.

Andromba à Tsinjony
Débits caractéristiques de basses eaux (m³/s)

suite

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1971 | 3.37 | 1.84 | 1.37 | .773 | 14-11 |
| 1972 | (3.44) | (2.41) | (1.91) | (1.78) | 06-10 |
| 1973 | - | - | - | (2.25) | (31-10) |
| 1974 | - | - | - | (2.37) | (01-11) |
| 1975 | - | - | - | (2.24) | (20-10) |
| 1976 | - | - | - | (2.21) | (31-10) |
| 1977 | - | - | - | (1.40) | (21-10) |
| 1978 | - | - | - | .85 | 16-10 |
| 1979 | - | - | - | 1.37 | 04-11 |

Le débit minimal journalier est observé, une année sur deux, entre le 20 octobre et le 15 novembre (date médiane 1er novembre).

DCE = 1.01 QJMIN + .31 ($R^2$ = .98)
DC11 = .99 QJMIN + .79 ($R^2$ = .97)
DC9 = .89 QJMIN / 2.09 ($R^2$ = .87)

$QJMIN = 6.13\ Q03^{.72}\ .e^{-T/59}$ ($R^2$ = .69, T en jours a/c du 31.03)

$QJMIN = 1063\ .P\ 1103^{3.3}\ .e^{-T/42}$ ($R^2$ = .79)

P 11-03 = P en mètres de novembre à mars
T en jours depuis le 01.01

L'ajustement d'une loi de distribution sur les 26 valeurs observées fournit les quantiles suivants :

tableau 7.149.

Andromba à Tsinjony
Débit minimal journalier (QJMin)

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q m³/s | .75 | .84 | .98 | 1.39 | 2.15 | 2.84 | 3.69 |
| q l/s/km² | 2.1 | 2.4 | 2.8 | 4.0 | 6.1 | 8.1 | 10.5 |

Loi de Frechet (test B.M. = 3.08, échelle : 1.47 m³/s, position : - .275 m³/s, forme : -.033)
Cinquantennales sèche et humide : .66 m³/s (1.9 l/s/km²) et 5.13 m³/s (14.7 l/s/km²).

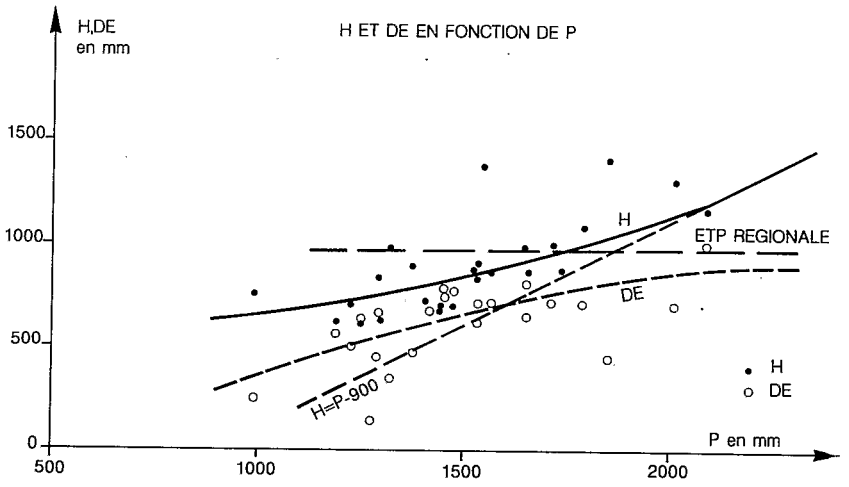
## 7.1.13.5. Bilan hydrologique

Pour une précipitation moyenne interannuelle évaluée à 1 550 mm, la lame écoulée (860 mm) correspond à un déficit moyen d'écoulement de 690 mm (Ke = 55%).

En dépit d'une large dispersion des points représentatifs des couples H, P et DE, P (graphe 7.88) due à l'imprécision sur les précipitations de l'année et la non prise en compte de l'influence du coefficient de concentration des pluies mensuelles et de l'état initial des nappes d'altérites, il est possible de déterminer la position approxi-

figure 7.88.

Andromba à Tsinjony



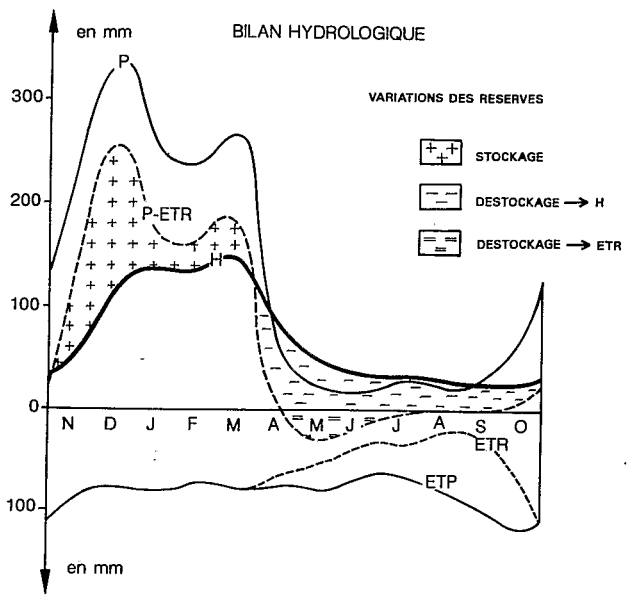

mative des courbes moyennes (H = f (P) et DE = f (P). Le déficit d'écoulement est compris entre 300 mm (pour P = 900 mm) et 900 mm (pour P = 2 200 mm). Pour des précipitations plus importantes, le déficit semble atteindre une valeur limite (900 mm) égale à 93 % de l'ETP régionale.

Les lames écoulées croissent de 600 à 1200 mm (P compris entre 900 et 2 200 mm) puis s'ordonnent autour de la droite moyenne : H = P - 900.

Mois par mois, le bilan hydrologique peut être établi de la façon suivante (graphe 7.89).

figure 7.89.

Andromba à Tsinjony



En saison des pluies (novembre à mars), les précipitations cumulées (1 289 mm) représentent 83 % du total annuel. Après satisfaction de l'ETP (397 mm) et recharge des nappes d'altérite et de la réserve des sols (312 mm), elles nourissent l'écoulement (580 mm) soit 67 % du total annuel.

Pendant la saison sèche (avril à octobre), l'ETR (397 mm), qui ne représente que 51 % de l'ETP (ETR/ETP = 71 % sur l'année), est soutenue jusqu'en début juillet à partir de la réserve utile des sols (57 mm), puis est réduite aux précipitations. Les lames écoulées sont pour 91 %, produites par le drainage des nappes d'altérites.

Le bilan schématique est assez voisin de celui de la SISAONY, avec une pluviométrie plus importante et des réserves d'altérites (basaltes de l'ANKARATRA) plus conséquentes.

tableau 7.150.

Andromba à Tsinjony
Bilan hydrologique (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 201 | 330 | 258 | 235 | 265 | 80 | 24 | 17 | 26 | 23 | 25 | 66 | 1550 |
| ETP | 89 | 76 | 81 | 73 | 78 | 76 | 78 | 67 | 64 | 76 | 94 | 118 | 970 |
| ETR | 89 | 76 | 81 | 73 | 78 | 65 | 54 | 37 | 33 | 23 | 25 | 56 | 690 |
| P-ETR | 112 | 254 | 177 | 162 | 187 | 15 | -30 | -20 | -7 | 0 | 0 | 10 | 860 |
| H | 44 | 112 | 138 | 136 | 150 | 82 | 49 | 36 | 33 | 30 | 26 | 24 | 860 |
| ΔR+ | 68 | 142 | 39 | 26 | 37 | | | | | | | | +312 |
| ΔR- | | | | | | 67 | 79 | 56 | 40 | 30 | 26 | 14 | -312 |
| R | 68 | 210 | 249 | 275 | 312 | 245 | 166 | 110 | 70 | 40 | 14 | 0 | |

## 7.1.14. Andromba au pont de la route d'Arivonimamo

La station (19°00'S - 47°30'E) contrôle un bassin d'une superficie de 525 km². Des observations et mesures ont été effectuées de 1963 à 1969.

tableau 7.151.

Andromba au pont d'Arivonimamo
Débits mensuels et annuels (m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1963/64 | 6.8 | 19.4 | 12.9 | 35.7 | 20.0 | 9.2 | 4.7 | 4.5 | 4.2 | 3.8 | 2.5 | 2.5 | 10.4 |
| 1964/65 | 5.39 | 24.5 | 33.1 | 32.7 | 26.1 | 22.8 | 8.1 | 5.4 | 5.3 | 4.7 | 3.9 | 3.3 | 14.5 |
| 1965/66 | 6.29 | 25.8 | 16.7 | 10.8 | 11.0 | 7.82 | 6.73 | 4.57 | 3.89 | 3.92 | 3.27 | 2.49 | 8.60 |
| 1966/67 | 2.80 | 10.3 | 24.3 | 13.4 | 35.0 | 11.4 | 5.90 | 4.50 | 4.00 | 3.20 | 3.00 | 2.70 | 10.1 |
| 1967/68 | 8.63 | 22.5 | 12.6 | 16.0 | 15.0 | 9.38 | 5.72 | 4.72 | 4.29 | 3.57 | 2.99 | (2.43) | (8.99) |
| 1968/69 | 6.66 | 21.4 | 16.2 | 31.1 | 11.6 | 15.4 | 7.50 | 4.90 | 4.40 | 3.94 | 3.14 | 2.80 | 10.6 |
| Moyenne | 7.49 | 19.8 | 24.5 | 26.5 | 26.7 | 14.8 | 8.13 | 6.04 | 5.30 | 4.70 | 4.05 | 3.52 | 12.6 |

QMax. observés :

103 m³/s (196 l/s/ ) le 06.02.64
67.6 m³/s (129 l/s/ ) le 24.01.65
61.7 m³/s (118 l/s/ ) le 9.12.65
> 48 m³/s janvier 1966

Débits minimaux journaliers

1.50 m³/s (2.9 l/s/km²) le 29.10.63
1.40 m³/s (2.7 l/s/km²) le 23.11.64
1.97 m³/s (3.8 l/s/km²) le 16.10.66
1.90 m³/s (3.6 l/s/km²) le 27.10.67
1.90 m³/s (3.6 l/s/km²) le 31.10.68
1.92 m³/s (3.6 l/s/km²) le 22.10.69

L'étiage médian doit être proche de 3.5. à 4 l/s/km².

Les débits mensuels de la station sont bien corrélés avec ceux de TSINJONY :

$Q_{ARIV.} = 1.49\ Q_{TSINJ.} - .87$ $(R^2 = .95\ P>.995)$

Cette régression permet d'évaluer les débits moyens interannuels (tableau 7.151). Le module (12.6 m³/s) correspond à une lame écoulée de 755 mm (soit une lame de 650 mm pour la partie du bassin comprise entre TSINJONY et le pont de la route d'ARIVONIMAMO).

## 7.1.15. Katsaoka à Niakotsorano

La KATSAOKA, affluent de l'ANDROMBA, draine le nord du massif de l'ANKARATRA. La station (18°55'16"S - 47°22'14"E) est située un peu en aval du pont de la route d'ARIVONIMAMO. Elle contrôle un bassin de 563 km².

Des observations ont été effectuées en 1965-66.

Débits mensuels 1965-66 (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (6) | 22.7 | (20) | 16.7 | 17.4 | 11.4 | 10.1 | 7.33 | (3) | (2.5) | (2) | (1) | 10.0 |

Par comparaison avec les débits de 1965-1966 de l'ANDROMBA au pont d'ARIVONIMAMO, (Q KATS = 1.02 Q ANDR. + 1.25, $R^2 = .83$), il est possible d'estimer le module de la KATSAOKA à 14 m³/s (lame écoulée interannuelle : 785 mm).

Les jaugeages réalisés au cours de la période 1963-1975 jusqu'à 3.23 m paraissent suffisants pour le tracé d'une courbe moyenne d'étalonnage des hautes eaux et permettent une évaluation des débits maximaux de crue à cette station. Par comparaison avec les débits maximaux de l'ANDROMBA à BEHENJY et TSINJONY, l'ordre de grandeur de la crue décennale a été, assez sommairement, estimé à 90 m³/s (160 l/s/km²).

En année moyenne, on peut donc évaluer les apports globaux de l'ANDROMBA, au niveau du confluent, à 27 m³/s environ (soit une lame équivalente de 780 mm pour environ 1 100 km²).

## 7.1.16. Tafaina

La TAFAINA est un petit affluent rive gauche, de l'ANDROMBA. Son bassin repose sur des granites, migmatites et schistes du socle précambrien en moyenne partie altérés en sols ferrallitiques désaturés (latérites). Le bassin est essentiellement recouvert de savane.

Deux bassins versants représentatifs des zones de hauts plateaux de l'IMERINA, affectés par une assez forte érosion en "lavaka", ont été étudiés sur la TAFAINA. Celui d'ANDROVAKELY (24.2 km²), de novembre 1955 à mars 1958, et le bassin emboîté, dit de la TAFAINA (4.5 km²), de novembre 1962 à octobre 1971.

Le bassin de la TAFAINA à AMBOHIDRANO (19°09'11"S - 47°28'30"E - 4.5 km²), à 1 400 m d'altitude, a fait l'objet de mesures et observations hydroclimatiques afin de déterminer les caractéristiques hydrologiques d'une petite unité géographique simple des hauts plateaux.

tableau 7.152.

Tafaina à Ambohidrano
Observations 1962-1971

| Année | P mm | H mm | DE mm | Ke % | Q l/s |
|---|---|---|---|---|---|
| 1962-63 | 1435 | 624 | 811 | 43 | 89 |
| 1963-64 | 1279 | 576 | 703 | 45 | 82 |
| 1964-65 | 1540 | 799 | 741 | 52 | 114 |
| 1965-66 | 1167 | 589 | 578 | 50 | 84 |
| 1966-67 | 1534 | 745 | 789 | 49 | 110 |
| 1967-68 | 1112 | 554 | 558 | 50 | 80 |
| 1968-69 | 1495 | 681 | 814 | 46 | 100 |
| 1969-70 | 1485 | 770 | 715 | 52 | 110 |
| 1970-71 | 1274 | 656 | 618 | 52 | 90 |
| Moyenne | 1369 | 666 | 703 | 49 | 95 |

L'hydraulicité de la période 1962-71 (comparaison avec l'ANDROMBA) est de 92 %. Le module peut être évalué à 103 l/s et le bilan moyen interannuel du bassin est le suivant : précipitation moyenne : 1 425 mm, lame écoulée : 725 mm, déficit d'écoulement : 700 mm, coefficient Ke = 51 %.

Les crues observées remarquables ont, selon l'intensité et la forme de l'averse ainsi que l'état d'humidité initial des sols, des coefficients de ruissellement variant entre 15 et 88 %. La plus forte crue observée (08-12-65) a les caractéristiques suivantes :

précipitations moyenne : 75 mm
précipitation ponctuelle maximale : 88.5 mm
lame ruisselée : 47.2 mm
Kr : 62.6 %
débit de pointe : 66.6 m³/s (14 800 l/s/km²)

À partir d'un échantillon constitué des 39 plus fortes débits sur cinq ans, l'ajustement d'une loi log-normale correspond aux quantiles suivants :

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 |
|---|---|---|---|
| Q m³/s | 33 | 43 | 52 |
| q l/s/km² | 7330 | 9560 | 11500 |

Le fonctionnement du bassin est analogue à celui de l'ANDROMBA : satisfaction totale de l'ETP et stockage dans les altérites en saison des pluies, réduction de l'évapotranspiration et soutien des débits par drainage des nappes en saison sèche (Tarissement : $\alpha$ = .004).

Les débits minimaux d'étiage sont compris entre 10 et 35 l/s et l'étiage médian est de l'ordre de 25 l/s (5.5 l/s/km²).

Le bassin d'ANDROVAKELY (19°07'11"S - 47°27'31"E - 24.2 km²) a été étudié de novembre 1955 à mars 1958.

1955-56 P = 1439 mm, H = 768 mm, DE = 671 mm, KE = 53.4 %
1956-57 P = 1565 mm, H = 664 mm, DE = 901 mm, Ke = 42,5 %

Crue maximale : 28.01.56 QMAX = 48.2 m³/s (1985 l/s/) pour une lame de 15.9 mm (KR = 25 %).

La crue décennale a été estimée à 180 m³/s (7 500 l/s/km²) avec un coefficient de ruissellement de 40 % (P = 100 mm)

## 7.1.17. Ikopa à Bevomanga

La station de BEVOMANGA (18°48'30" S - 47°19'12"E) est située à l'entrée du seuil de BEVOMANGA-FARAHANTSANA qui limite l'important remblaiement alluvial de la plaine d'ANTANANARIVO. La majeure partie du sous-sol est constituée de migmatites, migmatites granitoïdes (parfois porphyroïdes) et plus rarement de gneiss et micaschistes. Au sud-ouest du bassin (ANDROMBA), des épanchements volcaniques de l'ANKARATRA (basaltes et ankaratrites) se surimposent sur le socle. À l'exception des sommets et des pentes, domaine des sols peu évolués, toutes ces formations sont assez profondément altérées en latérites (sols ferrallitiques désaturés).

La majeure partie du bassin est recouverte par la savane avec quelques zones forestières à proximité de la falaise et sur les pentes de l'ANKARATRA et d'importantes surfaces rizicoles et marais dans la plaine autour d'ANTANANARIVO.

Le bassin versant contrôlé à une surface de 4 290 km² (superficie contributive : 4 184 km² en déduisant le bassin de la VARAHINA du nord).

La pluviométrie interannuelle (moyenne de 43 postes) est évaluée à 1 340 mm.

Une première échelle (dont nous ne possedons pas les relevés) a été posée en 1931. Le 20 juin 1948, l'échelle de BEVOMANGA-aval a été mise en place par EDF, puis plusieurs fois recalée (côte du zero dans le systeme actuelle depuis le 18.11.59 : 1243.33 m). Un limnigraphe NEYRPIC a doublé l'échelle en 1953, mais les enregistrements sont difficilement exploitable (envasement de la prise). Les relevés à cette station ont cessé en janvier 1973. Un second système (BEVOMANGA-amont) a été mis en place par l'ORSTOM en novembre 1966, sur un seuil rocheux (meilleur contrôle des basses eaux) et doublé par un limnigraphe en 1966.

Les étalonnages s'appuient sur 47 mesures de débit (EDF-ORSTOM) entre 14.8 et 364 m³/s et 34 mesures (service météorologique) entre 15 et 480 m³/s. La dispersion des jaugeages est faible et, pour tenir compte des déplacements du zero, quatre courbes, rapportées à la station aval, ont été tracées avec des extrapolations vers les basses eaux (jusqu'à 10 m³/s) et les hautes eaux (960 m³/s, 6 m à l'échelle).

Les relevés dont nous disposons vont de juillet 1948 à décembre 1972.

### 7.1.17.1. Débits mensuels et relations hydropluviométriques

tableau 7.153.

Ikopa à Bevomanga
Coefficients de corrélation

| HI ou QI | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| en fonction de PI | .75 | .81 | .73 | .51 | .91 | (-.09) | (-.09) | (-.08) | .49 | (.32) | .55 | .49 |
| PI-I | (.31) | (.09) | (.39) | (.39) | (.34) | .77 | (-.06) | (-.09) | (.15) | (.37) | .50 | .40 |
| QI-I | (.39) | (.23) | (.04) | (.11) | (.01) | .82 | .91 | .86 | .80 | .88 | .72 | .85 |

Les coefficients de corrélation sont tous significatifs et (graphe 7.90) présentent un schéma classique des hauts plateaux malgaches : influence forte des précipitations du mois (avec influence secondaire du débit antérieur pour novembre) pendant la saison des pluies (nov.-mars), forte dépendance des débits antérieurs d'avril à juin, influence prépondérante des débits antérieurs et secondaire des précipitations du mois de juillet à octobre.

figure 7.90.

Ikopa à Bevomanga

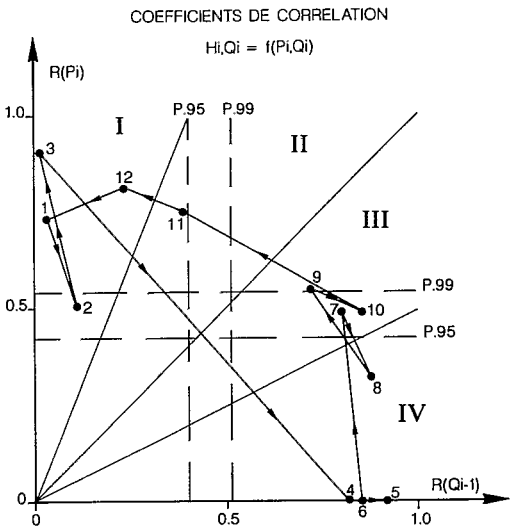



tableau 7.154.

Ikopa à Bevomanga
Régressions hydropluviométriques

| | |
|---|---|
| H11 =.13 P11 + 1.10 H10 - 12 | ($R^2$ = .77 P>.995) |
| H12 =.25 P12 + 1.78 H10 - 30 | ($R^2$ = .66 P>.995) |
| H01 =.30 P01 + .25 P12 - 50 | ($R^2$ = .77 P>.995) |
| H02 =.45 P02 + .20 P01 - 50 | ($R^2$ = .63 P>.995) |
| H03 =.29 P03 + .10 P01 + 13 | ($R^2$ = .85 P>.995) |
| H04 =.21 P03 + .15 P02 - 16 | ($R^2$ = .65 P>.995) |
| H05 =.25 H04 + 17 | ($R^2$ = .87 P>.995) |
| H06 =.50 H05 + 8.5 | ($R^2$ = .72 P>.995) |
| H07 =.69 H06 + .15 P07 + 4 | ($R^2$ = .80 P>.995) |
| H08 =.85 H07 + .06 P08 | ($R^2$ = .79 P>.995) |
| H09 =.57 H08 + .10 P09 + 2.6 | ($R^2$ =.85 P>.995) |
| H10 =.87 H09 + .03 P10 | ($R^2$ = .87 P>.995) |

Les débits mensuels et annuels de 1947 à 1972 sont présentés dans le tableau 7.114, ainsi que les moyennes interannuelles et les quantiles (graphe 7.91). Les graphes 7.92 (année humide : 1958-59, Q = 123 m³/s) et 7.93 (année sèche : 1949-50, Q = 52.3 m³/s) représentent des hydrogrammes annuels caractéristiques : crues regroupées par épisodes pluvieux (une à trois crues par mois) montrant la régularisation due en partie aux secteurs plus perméables du bassin (ANKARATRA) et principalement aux surfaces rizicoles et marais, débits d'étiage soutenus en saison sèche.

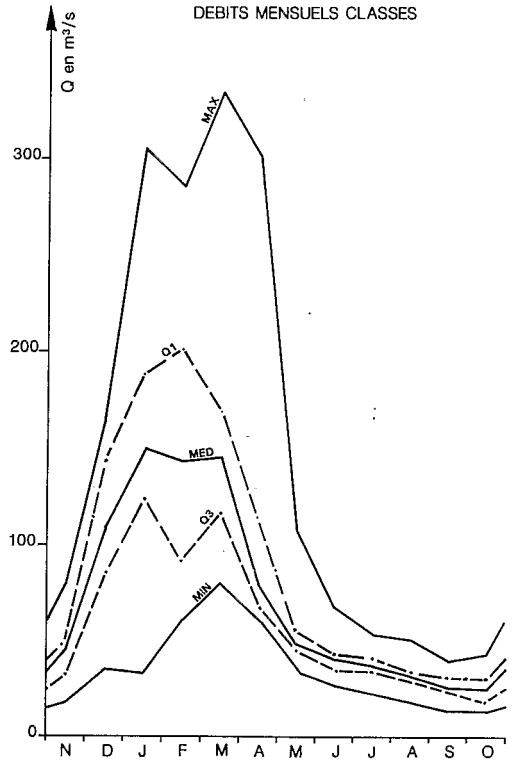



figure 7.91.

Ikopa à Bevomanga

figure 7.92.

Ikopa à Bevomanga

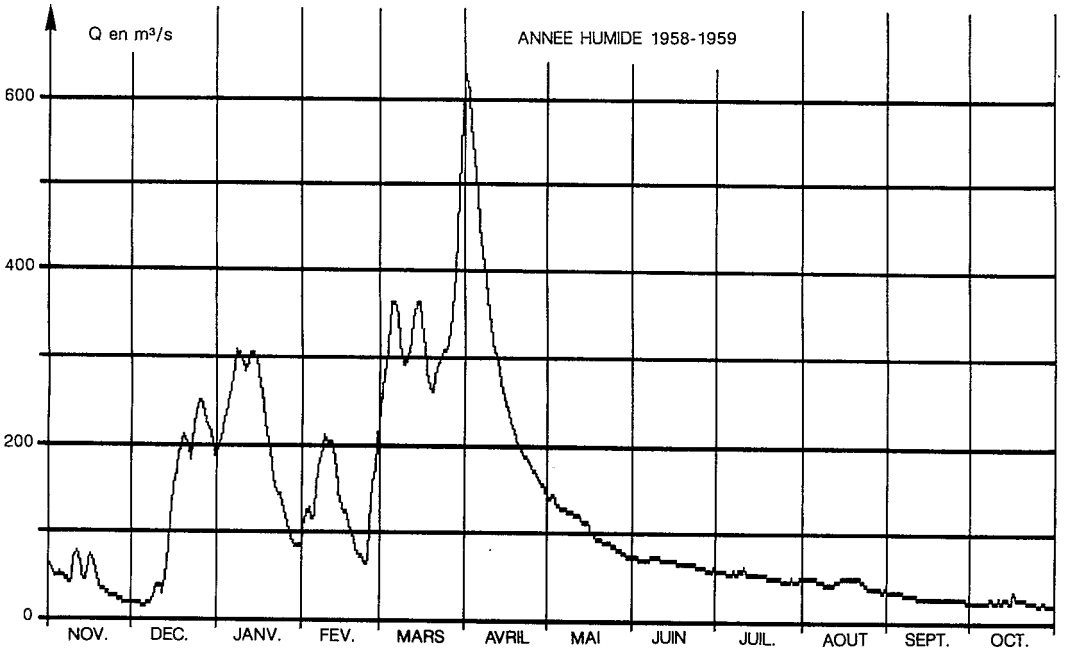


figure 7.93.

Ikopa à Bevomanga

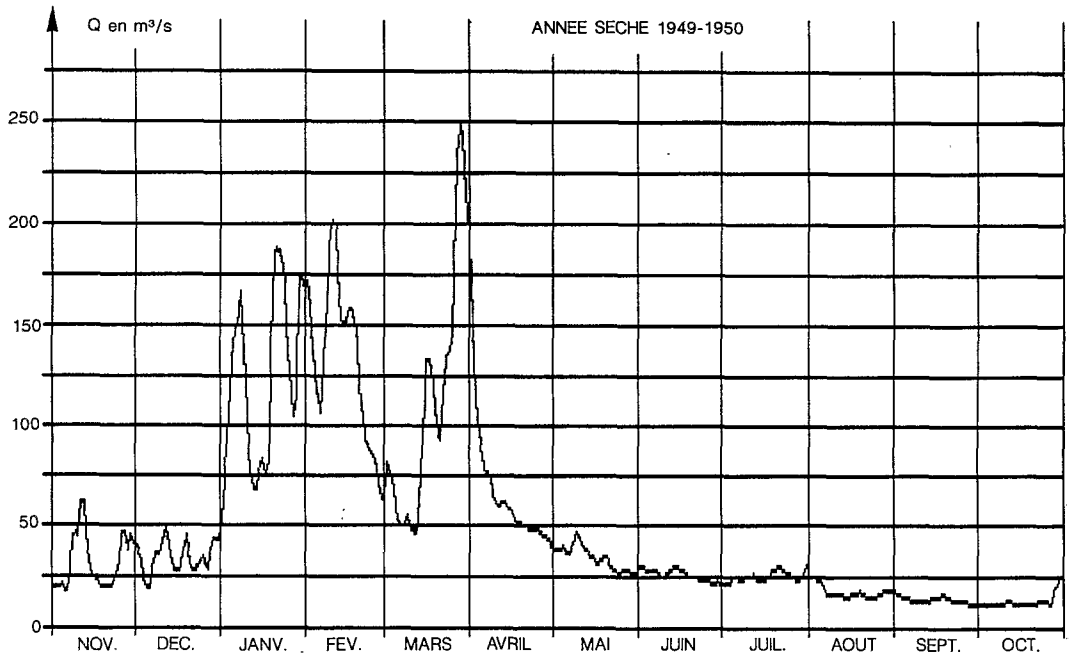



tableau 7.155.

Débits moyens mensuels et annuels en m³/s

Station : 1250100224 Bevomanga
Rivière : Ikopa
Pays : Madagascar
Bassin : Betsiboka

Latitude : 18.48.30
Longitude : 47.19.12

Aire : 4290 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1947/48 | - | - | - | - | - | - | - | - | 40.5 | 30.2 | 26.6 | 30.2 | - |
| 1948/49 | 30.7 | 66.5 | 32.5 | 85.1 | 178. | 77.6 | 46.1 | 33.6 | 31.0 | 23.4 | 19.9 | 17.0 | 53.3 |
| 1949/50 | 32.0 | 34.4 | 124. | 133. | 112. | 66.2 | 34.5 | 26.3 | 25.3 | 18.2 | 14.3 | 13.2 | 52.3 |
| 1950/51 | 46.2 | 70.7 | 223. | 95.0 | 161. | 79.3 | 49.3 | 33.8 | 28.0 | 24.9 | 17.9 | 16.6 | 70.6 |
| 1951/52 | 56.4 | 43.1 | 188. | 250. | 144. | 93.2 | 53.5 | 51.9 | 35.4 | 31.8 | 23.7 | 18.0 | 81.8 |
| 1952/53 | 49.8 | 84.0 | 76.0 | 76.0 | 219. | 139. | 55.6 | 42.1 | 32.5 | 33.5 | 28.7 | 20.6 | 71.4 |
| 1953/54 | 31.6 | 83.7 | 157. | 137. | 159. | 67.4 | 39.5 | 32.1 | 29.2 | 23.1 | 19.3 | 15.0 | 65.9 |
| 1954/55 | 29.8 | 124. | 166. | 88.9 | 147. | 129. | 49.6 | 34.7 | 31.0 | 29.6 | 19.9 | 18.5 | 72.4 |
| 1955/56 | 26.8 | 155. | 188. | 211. | 94.5 | 64.5 | 44.2 | 37.0 | 34.2 | 28.7 | 23.0 | 20.3 | 77.0 |
| 1956/57 | 44.3 | 126. | 93.0 | 190. | 238. | 183. | 64.0 | 44.3 | 40.1 | 32.3 | 20.9 | 18.6 | 90.6 |
| 1957/58 | 20.9 | 61.6 | 147. | 168. | 145. | 60.1 | 38.1 | 35.8 | 37.1 | 29.6 | 38.2 | 33.2 | 67.4 |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1958/59 | 45.4 | 124. | 209. | 137. | 335. | 302. | 107. | 67.7 | 53.4 | 46.1 | 29.7 | 24.2 | 123. |
| 1959/60 | 60.2 | 88.1 | 181. | 154. | 135. | 74.5 | 44.4 | 40.0 | 35.7 | 28.1 | 24.3 | 19.2 | 73.5 |
| 1960/61 | 17.5 | 84.8 | 193. | 60.5 | 157. | 106. | 55.7 | 38.6 | 37.6 | 32.4 | 26.1 | 24.9 | 69.8 |
| 1961/62 | 29.4 | 148. | 66.0 | 85.0 | 126. | 101. | 55.4 | 32.6 | 22.2 | 27.3 | 25.9 | 29.5 | 62.3 |
| 1962/63 | 71.6 | 101. | 150. | 151. | 114. | 93.9 | 47.5 | 39.7 | 42.4 | 46.1 | 30.4 | 31.0 | 76.1 |
| 1963/64 | 63.7 | 136. | 104. | 211. | 139. | 63.3 | 37.7 | 36.6 | 46.9 | 40.0 | 29.2 | 29.3 | 77.7 |
| 1964/65 | 47.9 | 165. | 218. | 229. | 157. | 146. | 64.2 | 54.3 | 52.1 | 50.3 | 39.6 | 34.7 | 104. |
| 1965/66 | 44.6 | 163. | 133. | 73.5 | 80.3 | 60.5 | 54.2 | 41.8 | 40.1 | 39.5 | 33.2 | 31.1 | 66.4 |
| 1966/67 | 29.9 | 81.2 | 164. | 108. | 217. | 85.9 | 47.5 | 43.2 | 40.4 | 34.0 | 32.1 | 29.6 | 76.1 |
| 1967/68 | 78.6 | 162. | 107. | 120. | 118. | 79.1 | 49.4 | 40.8 | 41.4 | 33.6 | 25.6 | 24.9 | 73.3 |
| 1968/69 | 47.3 | 127. | 144. | 189. | 80.6 | 77.6 | 47.5 | 36.6 | 35.4 | 30.8 | 24.7 | 25.0 | 71.4 |
| 1969/70 | 43.6 | 145. | 305. | 154. | 112. | 71.1 | 51.1 | 42.4 | 38.0 | 32.1 | 24.8 | 19.1 | 86.4 |
| 1970/71 | 49.8 | 63.2 | 147. | 285. | 144. | 68.3 | 47.2 | 40.6 | 36.9 | 30.9 | 34.8 | 27.6 | 80.0 |
| 1971/72 | 49.4 | 155. | 94.7 | 286. | 228. | 124. | 72.4 | 55.7 | 51.3 | 43.6 | 32.8 | 42.0 | 102. |
| 1972/73 | 58.6 | 109. | 176. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 44.2 | 108. | 152. | 153. | 156. | 101. | 52.3 | 40.9 | 37.5 | 32.8 | 26.6 | 24.5 | 77.1 |
| Ecart-type | 15.4 | 40.0 | 58.4 | 66.4 | 57.7 | 53.3 | 14.6 | 8.95 | 14.6 | 7.75 | 6.31 | 7.15 | |
| Max. | 78.6 | 165. | 305. | 286. | 335. | 302. | 107. | 67.7 | 53.4 | 50.3 | 39.6 | 42.0 | |
| 75% | 49.8 | 145. | 188. | 200. | 170. | 115. | 54.6 | 42.8 | 40.5 | 34.0 | 30.4 | 29.6 | |
| Méd. | 45.4 | 109. | 150. | 144. | 145. | 79.2 | 49.4 | 39.9 | 37.1 | 31.8 | 25.9 | 24.9 | |
| 25% | 31.6 | 83.7 | 124. | 92.0 | 116. | 67.9 | 45.3 | 35.2 | 34.2 | 29.6 | 23.7 | 19.1 | |
| Min. | 17.5 | 34.4 | 32.5 | 60.5 | 80.3 | 60.1 | 34.5 | 26.3 | 22.2 | 18.2 | 14.3 | 13.2 | |

## 7.1.17.2. Apports annuels

Les relations statistiques à l'échelle annuelle entre les lames écoulées et les précipitations ou les lames des stations voisines de l'IKOPA sont bien marquées :

H BEV. = .65 (P - 420) ($R^2$ = .57 P>.995)
H BEV = .66 {P - 1080 (1 - 1.84 Cp)} ($R^2$ = .70 P>.995)

Avec Cp moy. = .325 (coefficient de concentration moyen des pluies mensuelles)
Cp max = .392 1958-59 (Ke = 58%)
Cp min = .269 1962-63 (Ke = 41%)

$H_{BEV}$ = .86 $H_{MAHIT.}$ + 90 ($R^2$ = .78 P>.995)
$H_{BEV}$ = .82 $H_{FIADANANA}$ + 144 ($R^2$ = .79 P>.995)

Ces relations ont permis d'estimer les années non observées de l'échantillon étendu 1945-1976.

| Année | P mm | H mm | Qm³/s |
|---|---|---|---|
| 1945-46 | 1225 | 510 | 67.1 |
| 1946-47 | 1486 | 635 | 83.6 |
| 1947-48 | 1557 | 850 | 112. |
| 1972-73 | | 745 | 98.0 |
| 1973-74 | | 510 | 67.1 |
| 1974-75 | | 740 | 97.4 |
| 1975-76 | | 605 | 79.4 |

La loi de distribution ajustée sur l'échantillon de 31 valeurs annuelles observées ou calculées fournit les quantiles suivants :

tableau 7.156.

Ikopa à Bevomanga
Apports annuels

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Hmm | 407 | 435 | 462 | 499 | 584 | 693 | 761 | 825 | 905 |
| Q m³/s | 53.5 | 57.2 | 60.8 | 65.6 | 76.8 | 91.1 | 100 | 108 | 119 |
| q l/s/km² | 12.9 | 13.8 | 14.7 | 15.8 | 18.5 | 22.0 | 24.1 | 26.0 | 28.7 |

Loi log-normale (test B.M. : 3.92, échelle : 392 mm, position : 192 mm, forme : .292)
Centennales sèche et humide : 391 mm (Q = 51.4 m³/s) et 964 mm (Q = 127 m³/s).

## 7.1.17.3. Crues

### *7.1.17.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux*

L'extrapolation est relativement faible, tant pour la station de BEVOMANGA amont que pour BEVOMANGA aval : de 3,22 à 4,65 m, dans le dernier système de référence connu (à partir du 18/11/1959) pour BEVOMANGA aval.

tableau 7.157.

Ikopa à Bevomanga
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1948-49 | 255 | 20/03/49 12h00 | 2,58 | 3rel |
| 1949-50 | 249 | 28/03/50 06h00 | 2,53 | 3rel |
| 1950-51 | 323 | 21/01/51 18h00 | 3,08 | 3rel |
| 1951-52 | 408 | 07/02/52 06h00 | 3,80 | 3rel |
| 1952-53 | 306 | 14/03/53 12h00 | 3,17 | 3rel |
| 1954-55 | 302 | 15/01/55 12h00 | 3,18 | 3rel |
| 1955-56 | 326 | 11/02/56 18h00 | 3,34 | 3rel |
| 1956-57 | 408 | 29/03/57 18h00 | 3,84 | 3rel |
| 1957-58 | 393 | 29/01/58 18h00 | 3,76 | 3rel |
| 1958-59 | 642 | (31/03/59) ou (03/04/59) | 4,90 | PHE |

suite

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1959-60 | 300 | 26/01/60 18h00 | 2,93 | 3rel |
| 1960-61 | 343 | 10/01/61 12h00 | 3,21 | 3rel |
| 1961-62 | 205 | 18/12/61 06h00 | 2,19 | 3rel |
| 1962-63 | 318 | 20/02/63 06h00 | 3,05 | 3rel |
| 1963-64 | 345 | 15/02/64 06h00 | 3,22 | 3rel |
| 1964-65 | 367 | 03/02/65 06h00 | 3,36 | 3rel |
| 1965-66 | 243 | 04/01/66 06h00 | 2,49 | 3rel |
| 1966-67 | 358 | 09/03/67 06h00 | 3,30 | 3rel |
| 1967-68 | 227 | 21/12/67 12h00 | 2,36 | 3rel |
| 1968-69 | 364 | 12/02/69 06h00 | 3,34 | 3rel |
| 1969-70 | 484 | 07/01/70 18h00 | 3,97 | 3rel |
| 1970-71 | 377 | 01/02/71 18h00 | 3,42 | 3rel |
| 1971-72 | 400 | 17/02/72 12h00 | 3,56 | 3rel |
| 1972-73 | 364 | | 3,34 | Min |
| 1973-74 | | | | |
| 1974-75 | 372 | | 3,39 | |
| 1975-76 | | | | |
| 1976-77 | 534 | | 4,19 | |

### *7.1.17.3.2. Résultats de l'enquête historique*

Les données recueillies sont malheureusement trop partielles pour cette station où des observations et des mesures sont connues depuis 1931.

Le jaugeage de 540 m³/s réalisé le 13/02/1932 a permis à la mission d'EDF de 1948-49, d'estimer les débits maximums des années 1931-32 (600 m³/s) et 1941-42 (380 m³/s).

Des "dégâts de crues énormes en janvier-février 1917" ont été également signalés dans la plaine d'ANTANANARIVO.

En l'absence d'éléments plus précis, les maximums des années 1958-59, 1931-32, 1981-82 et 1976-77 peuvent être considérés comme les plus importants de la période 1930-1983.

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 15 janvier et le 20 février (date médiane : 5 janvier - dates extrêmes : 18 décembre et 1er avril).

Une loi log-normale (Galton) a été ajustée à l'échantillon des 25 valeurs observées. Après réévaluation des récurrences rares en tenant compte de l'information historique, les valeurs suivantes peuvent être estimées :

tableau 7.158.

Ikopa à Bevomanga
Maximums annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s (échantillon) | 331 | 409 | (457) | (560) | (600) |
| Q m³/s (info. histor.) | | | 460 | 590 | 640 |
| q l/s/km² | 77 | 95 | 107 | 138 | 150 |

## 7.1.17.4. Basses eaux

Les débits caractéristiques de basses eaux observés sont présentes dans le tableau 7.159.

L'étiage journalier est observé, une année sur deux, entre le 15 octobre et le 13 novembre (date médiane : 29 octobre). A BEVOMANGA, il n'est plus observé de minimums en dehors de la saison sèche.

L'effet de régularisation des réserves amont est "gommé" par les reprises effectuées en saison sèche pour l'irrigation et par les apports de la SISAONY et de l'ANDROMBA.

tableau 7.159.

Ikopa à Bevomanga
Débits caractéristiques de basses eaux ($m^3/s$)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1948 | 31.0 | 22.5 | 19.6 | 17.8 | 15-11 |
| 1949 | 22.6 | 18.4 | 15.8 | 13.2 | 24-10 |
| 1950 | 22.0 | 13.0 | 11.9 | 1.6 | 30-09 |
| 1951 | 24.8 | 16.8 | 14.8 | 14.4 | 09-10 |
| 1952 | 32.9 | 19.2 | 16.5 | 14.7 | 01-11 |
| 1953 | 30.9 | 21.6 | 19.5 | 18.6 | 23-10 |
| 1954 | 23.0 | 16.0 | 14.1 | 13.9 | 13-11 |
| 1955 | 27.0 | 18.8 | 16.6 | 14.9 | 17-10 |
| 1956 | 27.3 | 20.9 | 19.3 | 17.5 | 29-10 |
| 1957 | 28.0 | 18.1 | 15.1 | 14.0 | 12-11 |
| 1958 | 33.2 | 21.9 | 19.3 | 17.5 | 05-12 |
| 1959 | 44.6 | 25.7 | 21.6 | 19.0 | 03-11 |
| 1960 | 26.0 | 18.1 | 14.7 | 13.0 | 06-11 |
| 1961 | 31.5 | 23.5 | 21.3 | 19.0 | 30-10 |
| 1962 | 27.4 | 23.1 | 20.9 | 19.5 | 08-10 |
| 1963 | 37.7 | 28.9 | 27.1 | 24.5 | 14-10 |
| 1964 | 32.9 | 27.6 | 25.4 | 21.0 | 26-10 |
| 1965 | 45.2 | 32.8 | 28.5 | 22.6 | 16-11 |
| 1966 | 34.1 | 27.4 | 23.3 | 15.6 | 07-12 |
| 1967 | 37.9 | 29.2 | 26.7 | 22.5 | 09-10 |
| 1968 | 33.5 | 23.2 | 19.0 | 16.6 | 06-11 |
| 1969 | 31.1 | 23.1 | 18.7 | 15.6 | 20-10 |
| 1970 | 31.7 | 21.6 | 16.1 | 15.6 | 16-10 |
| 1971 | 32.9 | 26.0 | 24.5 | 21.4 | 13-11 |
| 1972 | 45.3 | 32.9 | 30.2 | 28.3 | 18-09 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 45.3 | 32.9 | 30.2 | 28.3 | 07.12 |
| Ql | 33.8 | 26.7 | 23.9 | 20.3 | 13.11 |
| Méd. | 31.5 | 22.5 | 19.3 | 17.5 | 29.10 |
| Q3 | 27.2 | 18.6 | 16.0 | 14.6 | 15.10 |
| Min. | 22.0 | 13.0 | 11.9 | 11.6 | 18.09 |

DCE = 1.15 QJMIN - 0.3 $R^2$ = .89 P>.993 DCE/QJMIN = 1.13
DCII = 1.13 QJMIN + 2.8 $R^2$ = .80 P>.993 DCE/QJMIN = 1.29
DC9 = 1.29 QJMIN + 9 $R^2$ = .62 P>.993 DC9/QJMIN = 1.80

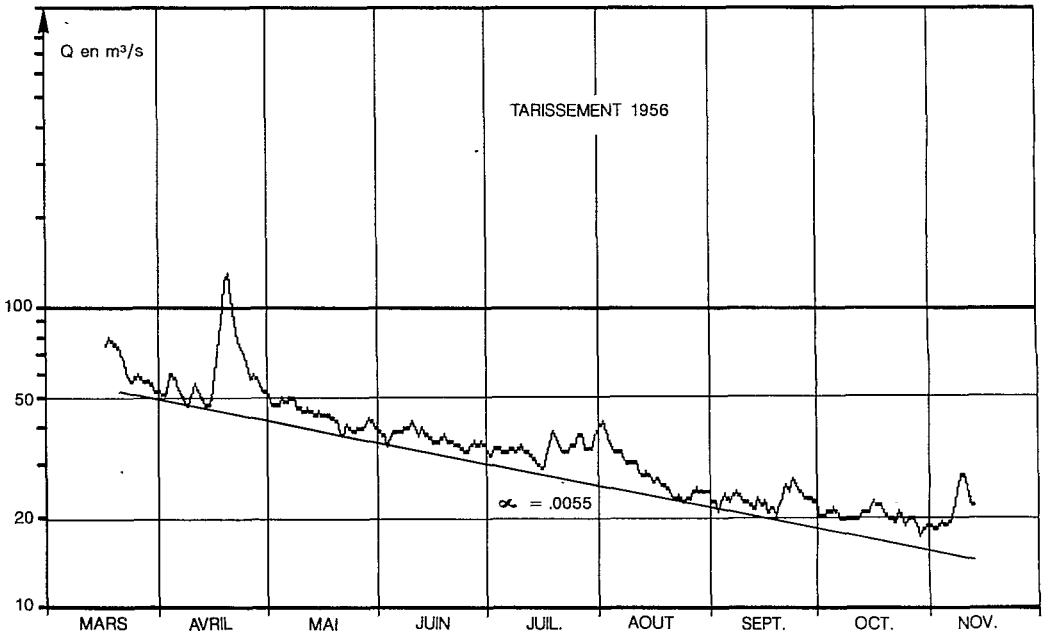
Le tarissement est observé dans la quasi-totalité des cas (sauf 1957-58 et 1963-64). Les coefficients de la courbe de tarissement Q = Qo . EXP (- $\alpha$ T) sont compris entre .0041 et .0100 et la valeur de $\alpha$ est influencée par le débit initial Qo.

$\alpha = (1.21\ Q_o + 15.4) . 10^{-4}$ ($R^2$ = .36 P>.99)

Les caractéristiques médianes du tarissement sont les suivantes :

$Q_o$ = 36.5 m³/s en mai-juin
$\alpha$ = .0059 (cf. graphe 7.94, tarissement 1956)

figure 7.94.
Ikopa à Bevomanga




Les quantiles de la loi de distribution des 25 valeurs de QJMIN sont les suivants :

tableau 7.160.
Ikopa à Bevomanga
QJMin

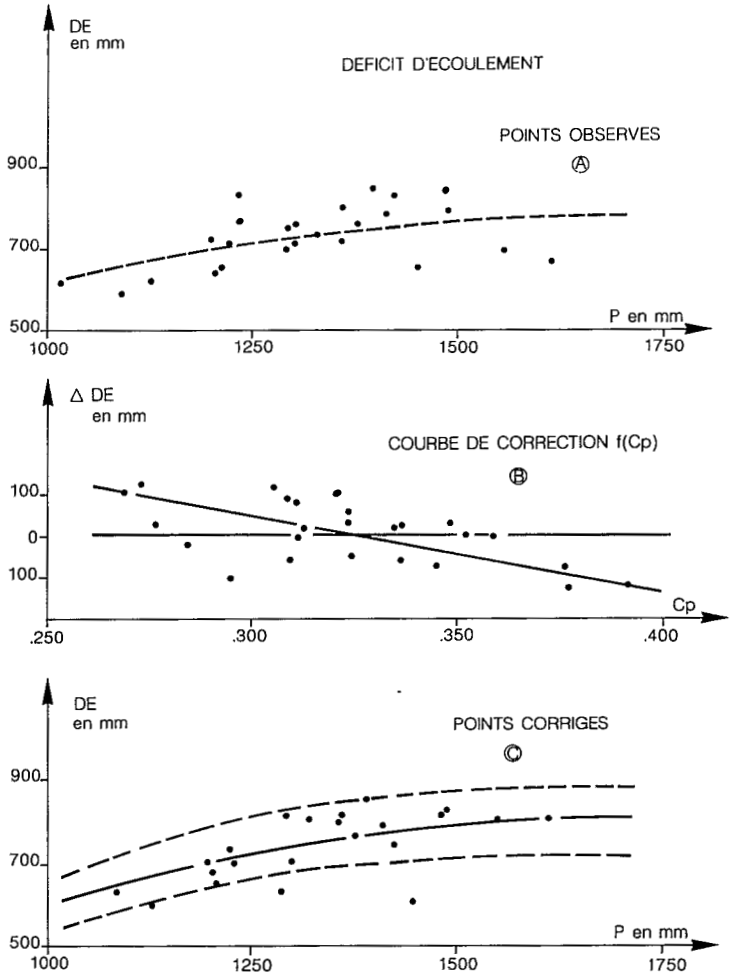
| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q m³/s | 12.6 | 13.3 | 14.3 | 17.0 | 20.6 | 23.0 | 25.4 |
| q l/s/km² | 3.0 | 3.2 | 3.4 | 4.0 | 4.9 | 5.5 | 6.1 |

Loi log-normale (test B.M. : .703, échelle : 9.17 m³/s, position : 7.78 m³/s, forme : .397)
Cinquantenale sèche et humide : 11.8 m³/s (2.8 l/s/km²) et 28.5 m³/s (6.8 l/s/km²).

## 7.1.17.5. Bilan hydrologique

Pour une pluviométrie moyenne interannuelle estimée à 1 340 mm, la lame écoulée (605 mm) correspond à un déficit d'écoulement de 735 mm (Ke = 45 %).

figure 7.95.
Ikopa à Bevomanga




Le graphe 7.95 représente le déficit d'écoulement DE en fonction des précipitations annuelles P. Une partie importante de la dispersion autour de la courbe moyenne DE = F (P) peut être corrigé en fonction du coefficient de concentration des précipitations mensuelles Cp (graphe 7.95 b). Les écarts varient de + 100 mm (pour Cp = .270) à -100 mm (pour Cp = .380).

La courbe moyenne des points corrigés (7.95 c) correspond à un déficit croissant de 600 mm (pour P = 1 000 mm) jusqu'à une valeur plafond de 800 mm environ (pour P = 1 600 mm)

H = P - 800 (pour P ≥ 1 600 mm).

tableau 7.161.

Ikopa à Bevomanga
Bilan hydrologique mensuel (valeurs en mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 170 | 283 | 278 | 200 | 231 | 48 | 20 | 13 | 16 | 19 | 14 | 48 | 1340 |
| ETP | 103 | 89 | 94 | 84 | 90 | 88 | 90 | 78 | 73 | 88 | 87 | 136 | 1100 |
| ETR | 100 | 89 | 94 | 84 | 90 | 88 | 63 | 31 | 18 | 19 | 14 | 45 | 735 |
| P-ETR | 70 | 194 | 184 | 116 | 141 | -40 | -43 | -18 | -2 | 0 | 0 | 3 | 605 |
| H | 28 | 72 | 101 | 94 | 104 | 65 | 35 | 26 | 25 | 22 | 17 | 16 | 605 |
| ΔR+ | 42 | 122 | 83 | 22 | 37 | | | | | | | | +306 |
| ΔR- | | | | | | 105 | 78 | 44 | | 22 | 17 | 13 | -306 |
| R | 42 | 164 | 247 | 269 | 306 | 201 | 123 | 79 | 52 | 30 | 13 | 0 | |

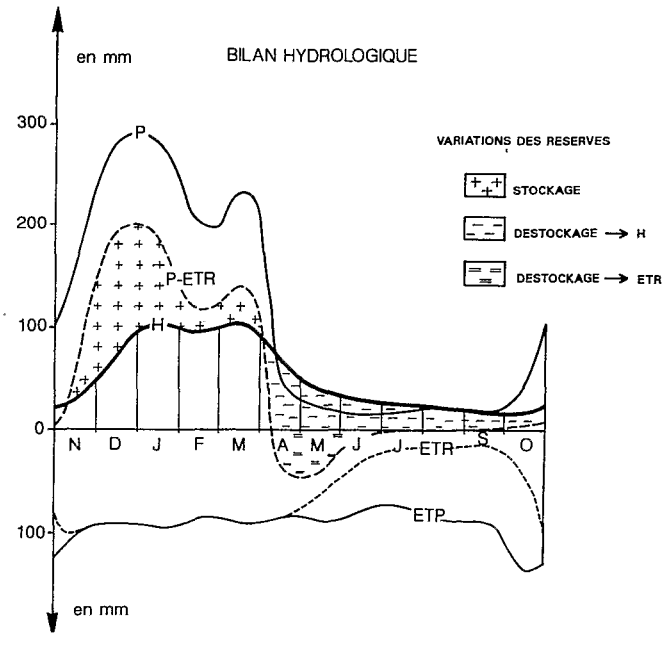
L'ETR annuelle représente 67 % de l'ETP.

En saison des pluies (novembre-mars), les précipitations (87 % du total annuel) après avoir satisfait l'ETR (presqu'égale à l'ETP) et la recharge des nappes et de la réserve utile des sols, nourissent l'écoulement (66 % du total annuel).

En saison sèche (avril-octobre), les réserves utiles des sols soutiennent l'ETR d'avril à juin, qui est ensuite réduite aux précipitations de fin de saison sèche. Sur la période l'ETR ne représente plus que 43 % de l'ETP. Les lames écoulées proviennent presqu'entièrement du drainage des réserves d'altérites (graphe 7.96).

figure 7.96.

Ikopa à Bevomanga

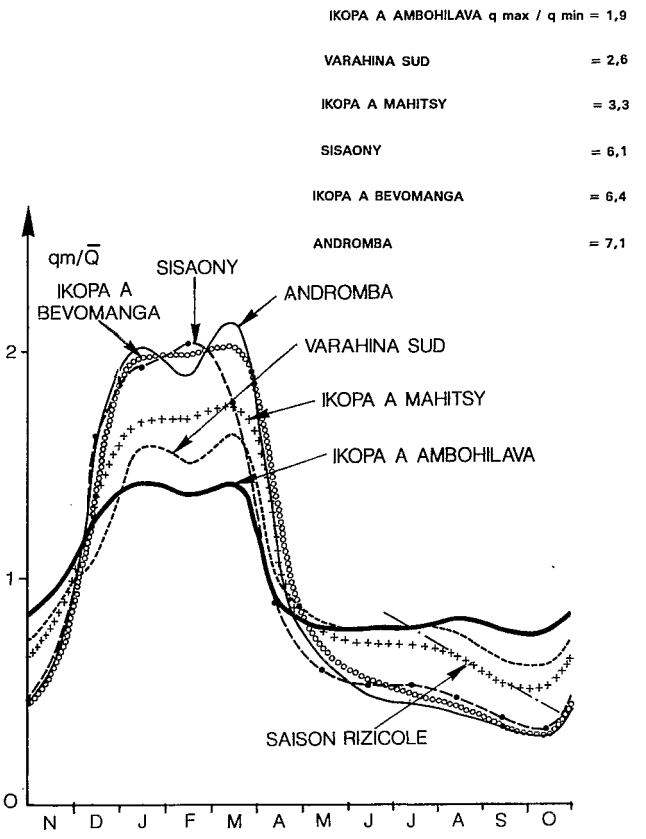


## 7.1.17.6. Caractéristiques du haut bassin

Nous avons représenté (graphe 7.97), les courbes des coefficients mensuels de débit (qm/Q où qm = débit mensuel moyen et Q = module) de l'IKOPA et de ses affluents ou formateurs.

figure 7.97.

Hydrogrammes comparés
du bassin supérieur de l'Ikopa




Les rapports qm max./qm min. (irrégularité intermensuelle) croissent régulièrement de l'est vers l'ouest (VARAHINA : 2.6, SISAONY : 6.1, ANDROMBA : 7.1) et traduisent l'effet "sous le vent" de décroissance des débits de saison sèche par rapport à la saison des pluies.

Le rapport qmmax./qmmin. de l'IKOPA à AMBOHIMANAMBOLA est particulièrement faible (1.9) et correspond à la forte régularisation due au stockage des réserves amont (ecretement des débits de saison des pluies et stabilisation par lachures des débits de saison sèche).

L'irrégularité de l'IKOPA au Pont de MAHITSY (3.3) est plus accentuée, en raison des prélèvements effectués pour l'irrigation particulièrement sensibles à partir d'août (début de la saison rizicole).

La distribution mensuelle de l'IKOPA à BEVOMANGA (irrégularité : 6.4) rejoint les distributions naturelles des grands affluents (SISAONY et ANDROMBA). On peut considérer qu'à BEVOMANGA, l'altération du régime est

pratiquement effacée (les prélèvements amont pour l'irrigation correspondant aux stockages de saison des pluies) et que l'on est revenu au régime "naturel" de l'IKOPA, avec toutefois une reprise par évapotranspiration supérieure à celle des bassins à couvert végétal de savane.

À l'exutoire du haut bassin de l'IKOPA, les apports annuels à BEVOMANGA représentent environ 77 m³/s (pour 4 194 km², soit une lame de 605 mm). Les contributions des différentes branches et affluents sont les suivantes :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Bassin de l'IKOPA à MAHITSY | (1684 km²) | Q = 32 m³/s | (42 %) | 590 mm |
| Bassin de la SISAONY | (750 km²) | Q # 12 m³/s | (16 %) | 510 mm |
| Bassin de l'ANDROMBA | (1100 km²) | Q # 27 m³/s | (35 %) | 780 mm |
| Bassin intermédiaire dont MAMBA | (650 km²) | Q # 6 m³/s | (7 %) | 300 mm |

## 7.2. Le bassin inférieur de l'Ikopa

### 7.2.1. Ikopa au bac de Fiadanana

La station de FIADANANA est située au niveau du bac de la route d'ANKAZOBE à FIADANANA. La station (18°09'45"S - 46°56'54"E) contrôle un bassin versant d'une superficie de 9 450 km².

Le bassin repose (pour 90 % de sa superficie) sur les roches cristallines du socle (migmatites, granites, migmatites granitoïdes et gneiss) assez profondément altérées en latérites (sols ferrallitiques désaturés). 6 % de la superficie correspond aux roches volcaniques de l'ANKARATRA et 4 % en formations alluviales le long du chevelu hydrographique dans la région d'ANTANANARIVO.

Les trois-quarts du bassin sont recouverts de prairie ou de sols dénudés ainsi, qu'en partie, de périmètres rizicoles et vingt-cinq pour cent de forêts (essentiellement des périmètres de reboisement en eucalyptus, pins et mimosas).

La pluviométrie, calculée à partir de 29 postes pluviométriques, est estimée en moyenne interannuelle à 1 390 mm.

L'échelle a été installée en octobre 1958, rallongée en 1959. Un limnigraphe a été installé en juin 1959 et détruit en février 1972 (cyclone EUGENIE). Les lectures sont à peu près continues jusqu'en septembre 1976.

La courbe d'étalonnage a été tracée à partir de 70 mesures de débit effectuées entre 20.9 et 1840 m³/s. L'extrapolation a été tracée jusqu'à la cote 8.47 m (3 450 m³/s).

#### 7.2.1.1. Débits mensuels et relations hydropluviométriques

tableau 7.162.
Ikopa au bac de Fiadanana
Coefficients de corrélation

| Hi ou Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| en fonction de Pi | .80 | .76 | .89 | .73 | .96 | (-.12) | (-.26) | (-.08) | (.35) | (.11) | (-.14) | .40 |
| Pi-1 | (.22) | (.07) | (.26) | (.15) | (.28) | .85 | (-.25) | (-.41) | (-.01) | (.38) | (.12) | (-.16) |
| Qi-1 | (.33) | (-.28) | (-.04) | (-.24) | (.23) | .77 | .96 | .91 | .96 | .97 | .93 | .67 |

Les liaisons statistiques sont significatives (graphe 7.98) et présentent un schéma classique : points de novembre à mars regroupés dans le 1er secteur (influence forte des précipitations du mois, faibles ou négli-

geables du débit antérieur). D'avril à septembre, points regroupés dans le 4ème secteur (influence forte des débits antérieurs et faible ou négligeable - sauf juillet - des précipitations du mois). En octobre, l'influence secondaire des précipitations du mois est sensible.

figure 7.98.

Ikopa au bac de Fiadanana

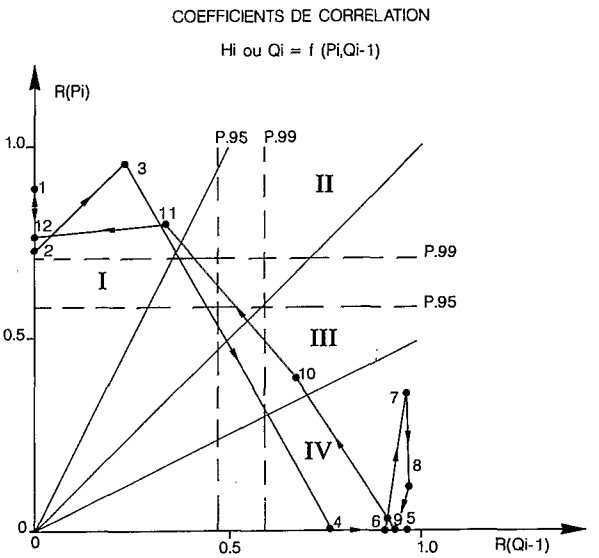



tableau 7.163.

Ikopa au bac de Fiadanana
Régressions hydropluviométriques

| | |
|---|---|
| H11 =.14 P11 + 1.86 H10 - 22 | ($R^2$ = .88 P>.995) |
| H12 =.25 P12 - 3 | ($R^2$ = .58 P>.995) |
| H01 =.40 P01 | ($R^2$ = .80 P>.995) |
| H02 =.38 P02 + 9 | ($R^2$ = .53 P>.995) |
| H03 =.44 P03 | ($R^2$ = .91 P>.995) |
| H04 =.23 P03 + .09 P02 - 19 | ($R^2$ = .76 P>.995) |
| H05 =.39 H04 + 9 | ($R^2$ = .96 P>.995) |
| H06 =.62 H05 + 4 | ($R^2$ = .91 P>.995) |
| H07 =.76 H06 + .10 P07 + 2 | ($R^2$ = .98 P>.995) |
| H08 =.84 H07 | ($R^2$ = .93 P>.995) |
| H09 =.62 H08 + 2 | ($R^2$ = .97 P>.995) |
| H10 =.76 H09 + .05 P10 | ($R^2$ = .94 P>.995) |

Les débits mensuels et annuels observés sont consignés dans le tableau 7.164 ainsi que les moyennes interannuelles et débits classés (graphe 7.99).

Le débit d'octobre 1976 a été estimé d'après les regressions du tableau 7.163.

Les graphes 7.100 et 7.101 donnent des exemples d'hydrogrammes annuels en année excédentaire (1958-59, Q = 273 m³/s) et déficitaire (1965-66, Q = 116 m³/s). On observera une plus grande individualisation des crues

que sur les stations amont en raison de l'affaiblissement de l'effet de régularisation du haut-bassin. À partir de mai-juin, les débits décroissent exponentiellement (tarissement des nappes d'altérites).

figure 7.99.

Ikopa au bac de Fiadanana

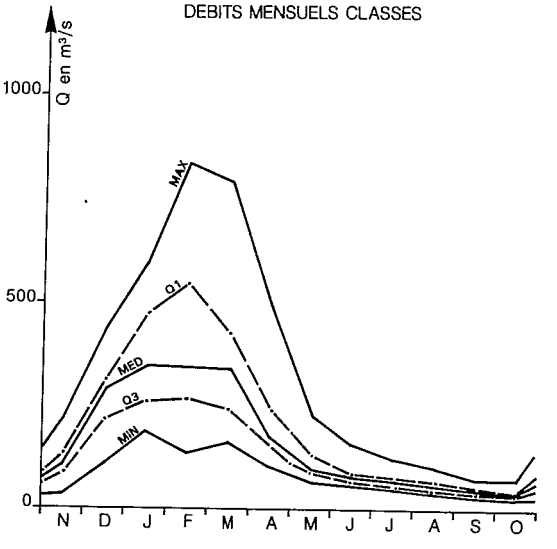



figure 7.100.

Ikopa au bac de Fiadanana

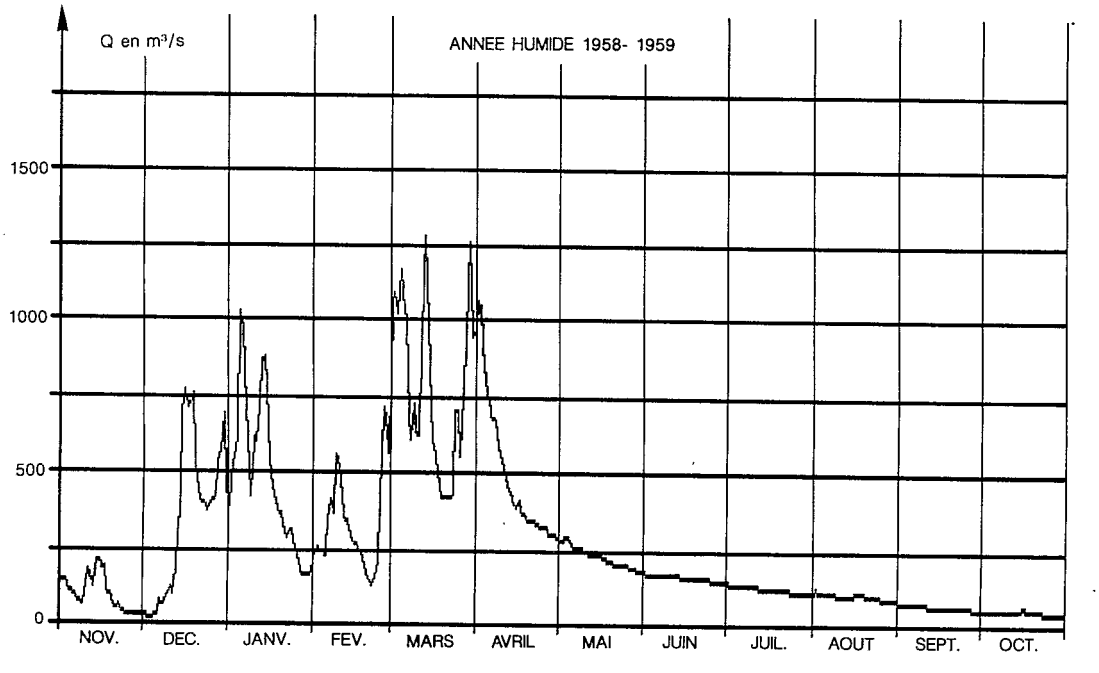
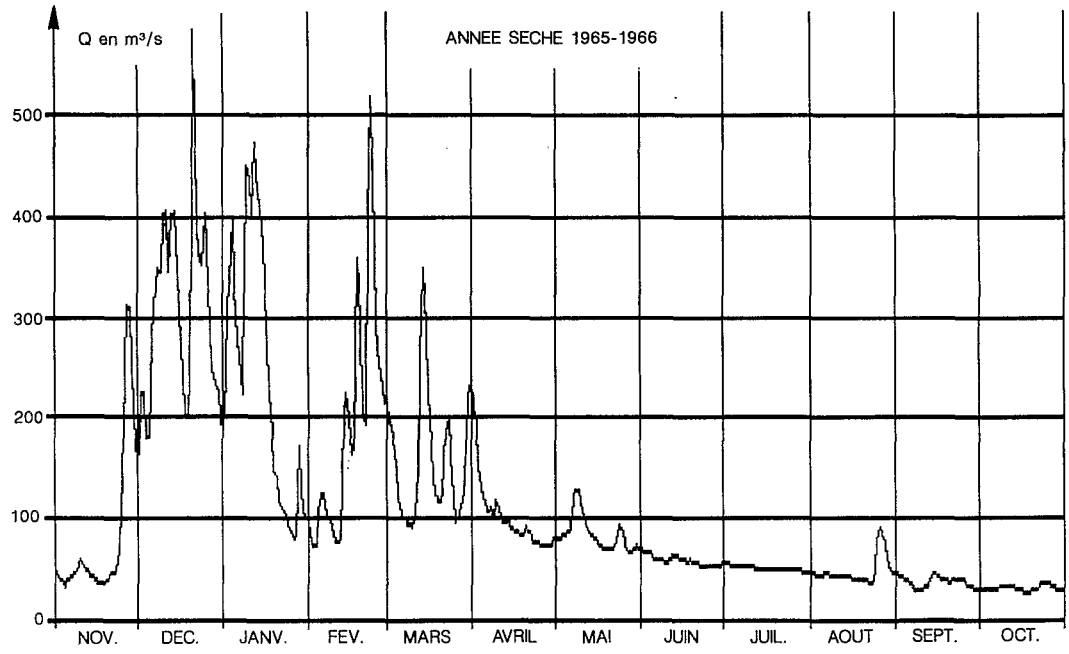


figure 7.101.

Ikopa au bac de Fiadanana




De mars à mai, décroissance de 4 à 1 en 73 jours (Qi mensuel = Q03 .e $^{.019\,T}$), et de juin à septembre, décroissance de 2 à 1 en 128 jours ($Q_i$ mensuel = Q06 .e $^{.0054T}$)

tableau 7.164.

Débits moyens mensuels et annuels en m³/s

Station : 1250100230 Bac de Fiadanana
Rivière : Ikopa
Pays : Madagascar
Bassin : Betsiboka

Latitude : 18.09.45
Longitude : 46.56.54
Aire : 9450 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1957/58 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1958/59 | 101. | 341. | 478. | 330. | 793. | 497. | 228. | 158. | 124. | 102. | 70.7 | 53.5 | 273. |
| 1959/60 | 143. | 201. | 471. | 355. | 368. | 160. | 102. | 86.6 | 77.2 | 61.7 | 48.2 | 37.5 | 176. |
| 1960/61 | 31.5 | 252. | 524. | 136. | 350. | 222. | 105. | 72.7 | 69.1 | 55.0 | 40.0 | 34.2 | 159. |
| 1961/62 | 37.5 | 437. | 255. | 288. | 429. | 236. | 119. | 77.1 | 59.0 | 57.4 | 48.0 | 48.7 | 174. |
| 1962/63 | 181. | 235. | 359. | 423. | 272. | 182. | 97.3 | 89.1 | 75.0 | 71.4 | 54.6 | 56.4 | 173. |
| 1963/64 | 130. | 282. | 213. | 567. | 320. | 141. | 86.4 | 78.2 | 79.8 | 69.9 | 52.4 | 47.4 | 171. |
| 1964/65 | 88.4 | 395. | 571. | 544. | 385. | 287. | 132. | 106. | 99.3 | 90.8 | 66.0 | 53.6 | 233. |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1965/66 | 82.4 | 305. | 242. | 192. | 159. | 100. | 84.5 | 59.1 | 51.0 | 48.4 | 38.1 | 31.2 | 116. |
| 1966/67 | 30.7 | 105. | 394. | 232. | 475. | 165. | 89.4 | 69.2 | 58.8 | 44.7 | 39.0 | 34.6 | 145. |
| 1967/68 | 121. | 299. | 185. | 264. | 246. | 119. | 68.0 | 56.0 | 51.4 | 40.4 | 29.8 | 26.0 | 125. |
| 1968/69 | 91.8 | 258. | 305. | 387. | 176. | 172. | 92.6 | 63.8 | 55.5 | 48.2 | 36.6 | 41.0 | 143. |
| 1969/70 | 64.7 | 288. | 593. | 307. | 288. | 132. | 90.1 | 71.2 | 62.2 | 52.4 | 40.7 | 32.8 | 168. |
| 1970/71 | 128. | 165. | 346. | 634. | 332. | 154. | 99.2 | 80.7 | 71.7 | 58.1 | 58.7 | 42.3 | 178. |
| 1971/72 | 116. | 314. | 206. | 834. | 414. | 244. | 142. | 98.9 | 84.5 | 73.8 | 53.7 | 76.7 | 219. |
| 1972/73 | 103. | 286. | 397. | 426. | 502. | 196. | 99.0 | 86.7 | 74.7 | 63.7 | 52.7 | 42.6 | 193. |
| 1973/74 | 146. | 143. | 347. | 236. | 241. | 251. | 139. | 73.7 | 59.5 | 50.6 | 43.5 | 43.7 | 147. |
| 1974/75 | 100. | 297. | 305. | 595. | 582. | 247. | 141. | 96.0 | 81.4 | 67.6 | 49.9 | 49.3 | 216. |
| 1975/76 | 216. | 214. | 329. | 283. | 160. | 152. | 76.5 | 57.1 | 49.8 | 40.4 | 27.3 | (27.9) | 136. |
| Moyenne | 106. | 268. | 362. | 391. | 361. | 203. | 111. | 82.2 | 71.3 | 60.9 | 47.2 | 43.3 | 175. |
| Ecart-type | 49.0 | 83.3 | 124.3 | 181.2 | 160. | 89.9 | 36.8 | 23.7 | 18.8 | 16.5 | 11.6 | 12. | |
| Max. | 216. | 437. | 593. | 834. | 793. | 497. | 228. | 158. | 124. | 102. | 70.7 | 76.7 | |
| 75% | 130. | 305. | 471. | 544. | 429. | 244. | 132. | 89.1 | 79.8 | 69.9 | 53.7 | 49.3 | |
| Méd. | 102. | 284. | 347. | 343. | 341. | 177. | 99.1 | 77.6 | 69.9 | 57.7 | 48.1 | 42.5 | |
| 25% | 82.4 | 214. | 255. | 264. | 246. | 152. | 89.4 | 69.2 | 58.8 | 48.4 | 39.0 | 34.2 | |
| Min. | 30.7 | 105. | 185. | 136. | 159. | 100. | 68.0 | 56.0 | 49.8 | 40.4 | 27.3 | 26.0 | |

## 7.2.1.2. Apports annuels

Des liaisons statistiques significatives peuvent être établies entre les lames annuelles à FIADANANA et les caractéristiques pluviométriques annuelles (P, Cp) ainsi qu'avec les lames des stations amont (BEVOMANGA) et aval (ANTSATRANA).

$H_{FIA} = .70\ (P - 560)$ ($R^2 = .78$ P>.995)

$H_{FIA} = .67\ \{P - 1272\ (1 - 1.8\ Cp)\}$ ($R^2 = .92$ P>.995)

Cp moy. = .326

$Cp_{MAX}$ = .381 (1958-59) KE = 52 %

$Cp_{MIN}$ = .266 (1968-69) KE = 34 %

$H_{FIA} = .97\ H_{BEV} - 19$ ($R^2 = .79$ P>.995)

$H_{FIA} = 1.13\ H_{ANTS} - 289$ ($R^2 = .71$ P>.995)

Ces relations ont permis d'évaluer les lames annuelles de 1945-46 à 1957-58.

| Année | 1945-46 | 46-47 | 47-48 | 48-49 | 49-50 | 50-51 | 51-52 | 52-53 | 53-54 | 54-55 | 55-56 | 56-57 | 57-58 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hmm | 505 | 715 | 670 | 415 | 435 | 540 | 665 | 575 | 500 | 635 | 480 | 670 | 490 |
| Qm³/s | 151 | 214 | 200 | 124 | 130 | 162 | 199 | 172 | 150 | 190 | 143 | 201 | 147 |

Les quantiles de la distribution des 31 valeurs annuelles observées ou calculées sont les suivants :

tableau 7.165.

Ikopa au bac de Fiadanana

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Hmm | 391 | 415 | 440 | 474 | 555 | 663 | 733 | 800 | 886 |
| Q m³/s | 117. | 124. | 132. | 142. | 166. | 199. | 219. | 240. | 265. |
| q l/s/km² | 12.4 | 13.1 | 14.0 | 15.0 | 17.6 | 21.1 | 23.2 | 25.4 | 28.0 |

Loi log-normale (test B.M. : 1.03, échelle : 325 mm, position : 230 mm, forme : .342)
Centennales sèche et humide : 377 mm (Q = 113 m³/s) et 950 mm (Q = 284 m³/s).

### 7.2.1.3. Crues

Pour cette station bien étalonnée jusqu'à la cote 5,85 m (1843 m³/s), l'extrapolation de type logarithmique a été utilisée pour l'évaluation des débits jusqu'à la cote 8,47 m, et s'appuie sur les deux plus forts jaugeages réalisés.

tableau 7.166.

Ikopa à Fiadanana
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1958-59 | 1340 | 01/03/59 18h00 | 4,99 | 3rel |
| 1959-60 | 1070 | 26/01/60 12h00 | 4,38 | 3rel |
| 1960-61 | 1360 | 11/01/61 06h00 | 5,02 | 3rel |
| 1961-62 | 1050 | 25/02/62 18h00 | 4,33 | 3rel |
| 1962-63 | 1320 | 19/02/63 06h00 | 4,95 | 3rel |
| 1963-64 | 1830 | 10/02/64 18h00 | 5,85 | 3rel |
| 1964-65 | 1160 | 05/02/65 18h00 | 4,62 | 3rel |
| 1965-66 | 706 | 21/12/65 18h00 | 3,29 | 3rel |
| 1966-67 | 1100 | 07/03/67 18h00 | 4,45 | 3rel |
| 1967-68 | 547 | 20/12/67 18h00 | 2,77 | 3rel |
| 1968-69 | 854 | 15/01/69 06h00 | 3,76 | 3rel |
| 1969-70 | 1070 | 04/01/70 12h00 | 4,38 | 3rel |
| 1970-71 | 1040 | 08/02/71 16h00 | 4,29 | 3rel |
| 1971-72 | 3450 | 07/02/72 06h00 | 8,47 | PHE |
| 1972-73 | 1150 | 27/02/73 06h00 | 4,59 | 3rel |
| 1973-74 | 1340 | 09/01/74 06h00 | 4,99 | 3rel |
| 1974-75 | 1920 | 16/02/75 12h00 | 5,99 | 3rel |
| 1975-76 | 788 | 26/02/76 06h00 | 3,55 | 3rel |

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 11 janvier et le 25 février (date médiane : 8 février - dates extrêmes : 20 décembre et 7 mars).

Entre les débits maximaux annuels de l'IKOPA à FADIANANA et ceux de l'IKOPA à la station aval d'ANTSATRANANA, une corrélation significative peut être établie (18 couples).

QMAX (FIADA) = .60 QMAX (ANTSA) - 362 ($R^2$ = .51 P ≥ .995)

Une distribution de FRECHET adaptée à l'échantillon des 18 valeurs observées de 1959 à 1976 correspond aux quantiles suivants :

tableau 7.167.1.

Ikopa à Fiadanana
Maximums annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1140 | 1610 | 1960 | 2920 | (3400) |
| q l/s/km² | 120 | 170 | 207 | 310 | (360) |

Ce qui correspond pour la crue de 1972 à une période de retour de cent ans.

En ajustant une distribution de FRECHET à l'échantillon étendu (28 valeurs) obtenu en estimant, à partir de l'équation de regression, les valeurs maximales de la période 1949-1958 (à partir des valeurs observées à ANTSATRANA), on obtient les valeurs suivantes :

tableau 7.167.2.

Ikopa à Fiadanana
Maximums annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1150 | 1540 | 1820 | 2520 | (2850) |
| q l/s/km² | 122 | 163 | 193 | 270 | (300) |

Cette réévaluation confère aux valeurs de différentes récurrences, des débits spécifiques maximaux plus proches des résultats observés à ANTSARANANA. Mais la crue de 1972 (3450 m³/s) correspondrait alors à une récurrence beaucoup plus rare que la centennale, alors que la crue de 1972 à ANTSATRANANA (5060 m³/s) est de récurrence centennale.

### 7.2.1.4. Basses eaux

Le tarissement est observable chaque année (avec quelques recharges de nappe ou petites crues adventices de saison sèche). Le coefficient de tarissement $\alpha$ est influencé par le potentiel initial des nappes

$\alpha = (.187\ Q_0 + 52.6)\ .10^{-4}$ ($R^2$ = .30 P>.975)

Les coefficients sont compris entre .0055 et .0094 avec pour valeur moyenne $\alpha$ = .0067 (TC = 104 jours). Le débit initial observé en mai-juin est compris entre 50 et 150 m³/s ($Q_0$ moyen = 80 m³/s). Le stock drainable en début de saison sèche correspond à une lame équivalente de 110 mm.

Les débits caractéristiques de basses eaux ont été observés de 1959 à 1975. Les débits d'étiage (QJMIN) de FIADANANA présentent une liaison statistique significative avec ceux de la station amont (BEVOMANGA).

QJMIN FIAD. = 1.63 QJMIN BEV. - .75 ($R^2$ = .62 P>.995)

Cette relation a permis d'évaluer les QJMIN à FIADANANA de 1948 à 1958.

figure 7.102.

Ikopa au bac de Fiadanana

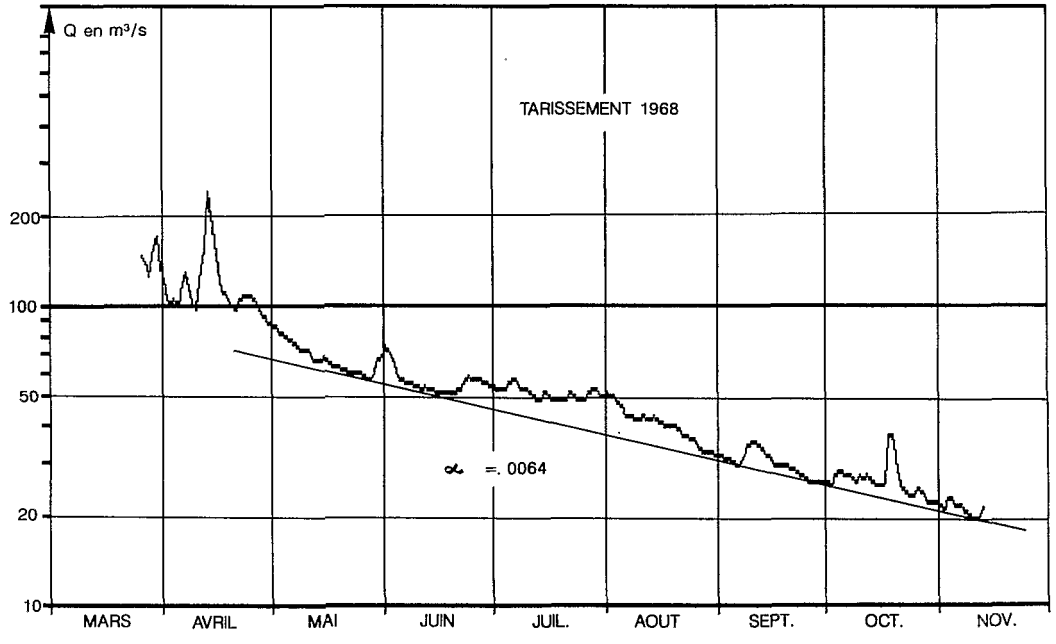



tableau 7.168.

Ikopa au bac de Fiadanana

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1959 | 102. | 57.4 | 48.1 | 42.1 | 02-11 |
| 1960 | 53.3 | 33.7 | 25.3 | 23.9 | 16-11 |
| 1961 | 48.4 | 33.1 | 28.9 | 25.8 | 01-11 |
| 1962 | 58.7 | 46.9 | 42.8 | 34.4 | 09-10 |
| 1963 | 70.8 | 53.9 | 47.9 | 45.1 | 09-10 |
| 1964 | 65.1 | 49.1 | 43.1 | 34.5 | 28-10 |
| 1965 | 79.8 | 51.9 | 43.3 | 34.2 | 04-11 |
| 1966 | 39.0 | 28.7 | 25.2 | 19.5 | 05-12 |
| 1967 | 48.7 | 35.4 | 31.6 | 28.2 | 27-10 |
| 1968 | 41.0 | 25.7 | 21.6 | 19.6 | 10-11 |
| 1969 | 48.9 | 33.8 | 27.4 | 24.1 | 27-11 |
| 1970 | 54.2 | 36.1 | 30.8 | 27.8 | 29-10 |
| 1971 | 57.1 | 42.9 | 36.4 | 32.8 | 02-11 |
| 1972 | 76.9 | 52.1 | 46.9 | 45.1 | 07-10 |
| 1973 | 62.7 | 47.1 | 34.6 | 30.8 | 05-11 |
| 1974 | 51.1 | 43.0 | 37.2 | 32.6 | 19-10 |
| 1975 | 74.9 | 49.1 | 43.2 | 35.7 | 25-10 |

suite

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 102. | 57.4 | 48.1 | 45.1 | 05-12 |
| Q1 | 72.9 | 50.5 | 43.3 | 35.1 | 08-11 |
| Méd. | 57.1 | 43.0 | 30.4 | 32.6 | 01-11 |
| Q3 | 48.8 | 33.7 | 28.1 | 25.0 | 22-10 |
| Min. | 39.0 | 25.7 | 31.6 | 19.5 | 07-10 |

Une année sur deux, l'étiage absolu est observé entre le 22 octobre et le 8 novembre.

DCE = 1.07 QJMIN + 2.4 ($R^2$ = .92) DCE/QJMIN = 1.15
DCII = 1.14 QJMIN + 6.3 ($R^2$ = .88) DCII/QJMIN = 1.35
DC9 = 1.7 QJMIN + 7.2 ($R^2$ = .68) DC9/QJMIN = 1.93

$QJMin = 137 .Q04^{-.28} .e^{-T/100}$ ($R^2$ = .76)
T (en jours depuis le 01.01)

$QJMin = 2.97 (\Sigma P\ 1103)^{1.09} .e^{-T/125}$ ($R^2$ = .86)
$\Sigma$ P 11-03 : précipitations cumulées de novembre à mars

Les quantiles de la distribution des 28 valeurs de l'échantillon étendu sont les suivants :

tableau 7.169.

Ikopa au bac de Fiadanana
Débits d'étiage

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q m³/s | 18.9 | 19.9 | 21.7 | 26.7 | 34.1 | 38.7 | 42.9 |
| q l/s/km² | 2.0 | 2.1 | 2.3 | 2.8 | 3.6 | 4.1 | 4.5 |

Loi de Goodrich (test B.M. : 1.40, échelle 12.1 m³/s, position : 17.3 m³/s, forme : .68)
Cinquantenales sèche et humide : 18.2 m³/s (1.9 l/s/km²) et 48.m³/s (5.1 l/s/km²).

## 7.2.1.5. Bilan hydrologique

La lame écoulée interannuelle (575 mm) pour une pluviométrie interannuelle évaluée à 1 390 mm correspond à un déficit moyen d'écoulement de 815 mm (Ke = 41 %).

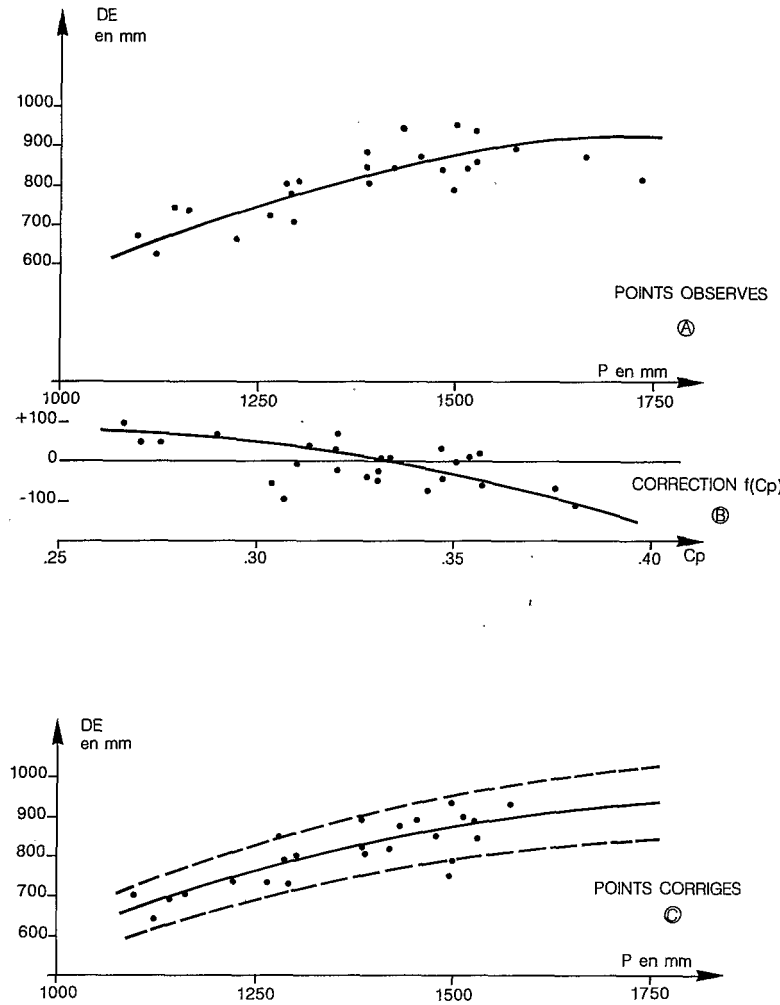
Les déficits annuels d'écoulement, reportés en fonction des précipitations annuelles (graphe 7.103) s'organisent autour d'une courbe moyenne. Les écarts à cette courbe moyenne sont partiellement corrigés par la prise en compte du coefficient de concentration des précipitations mensuelles Cp (7.103b). Le déficit DE est majoré de 100 mm pour les faibles valeurs de Cp (.260) et minoré de 100 mm pour les plus fortes valeurs de Cp (.380).

La courbe moyenne des points corrigés (7.103c) évolue entre DE = 650 mm (pour P = 1 100 mm) jusqu'à une valeur limite de 930 mm (pour P = 1 750 mm). Au delà de cette valeur de P, les lames annuelles écoulées peuvent être exprimées par la relation
$H = P - 930 \pm f(Cp)$

Les apports du bassin intermédiaire entre BEVOMANGA et FIADANANA représentent, en année moyenne, 92 m³/s soit une lame de 550 mm (superficie du bassin intermédiaire : 5 266 km²).

figure 7.103.

Ikopa au bac de Fiadanana




## 7.2.2. Ikopa à Antsatrana

La station d'ANTSATRANA (17°26'S - 46°53'E) est située, à environ 450 m d'altitude, près du village d'AMPOTAKA et à 4 km environ en amont des chutes d'ANTAFOFO. Elle contrôle un bassin de 18 645 km², d'une altitude moyenne voisine de 1 230 m.

L'échelle installée en novembre 1948 par la mission EDF, a été doublée d'un limnigraphe BAR en 1956. En octobre 1960, une nouvelle échelle (calée 50 cm plus bas) a remplacé l'ancienne échelle trop fréquemment exondée en saison sèche.

Jusqu'en 1958, la section de mesure des débits était située au droit du village d'AMPOTAKA dans un bief à écoulement régulier entre deux rapides mais, afin de faciliter la mesure des forts débits, un téléphérique de 200 m de portée a été installée en 1958 dans une section non débordable près d'ANTSATRANA.

Quatre-vingt trois mesures de débit (de 1948 à 1968) entre 60 m³/s et 1 970 m³/s ont permis de tracer les courbes d'étalonnage. Les points sont assez dispersés pour les hautes eaux en raison des difficultés de mesure.

La section est instable en basses eaux (5 à 6 courbes de tarage) et a été extrapolée jusqu'à plus de 5000 m³/s.

Les débits journaliers, avec quelques compléments et corrections, sont connus de novembre 1948 à février 1976.

À partir de 34 stations pluviométriques sur le bassin, la pluviométrie interannuelle moyenne a été estimée à 1 515 mm.

## 7.2.2.1. Débits moyens mensuels et relations hydropluviométriques

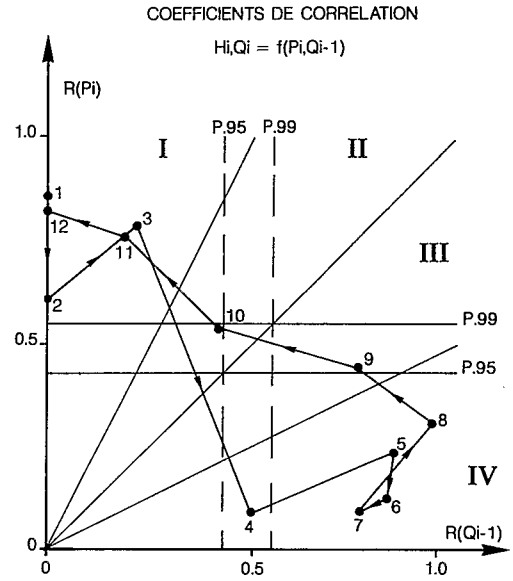
tableau 7.142.

Ikopa à Antsatrana
Coefficients de corrélation

| Hi ou Qi | | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| avec | Pi | .76 | .82 | .84 | .61 | .79 | (.09) | (.24) | (.13) | (.09) | (.31) | .45 | .54 |
| | Pi-i | (.17) | (.06) | (.19) | (-.21) | .37 | .64 | (.04) | (.18) | (.11) | (.05) | (.25) | .69 |
| | Qi-i | (.19) | (-.03) | 0 | (-.13) | (.22) | .50 | .85 | .83 | .76 | .94 | .75 | .41 |

figure 7.104.

Ikopa à Antsatrana




Les mois de saison des pluies (graphe 7.104) se regroupent dans le 1er secteur (influence principale des précipitations du mois, poids faible ou négligeable des débuts antérieurs). D'avril à août, les débits sont intercorrélés (drainage des nappes). En septembre, et surtout en octobre, les précipitations du mois ont une influence secondaire assez sensible.

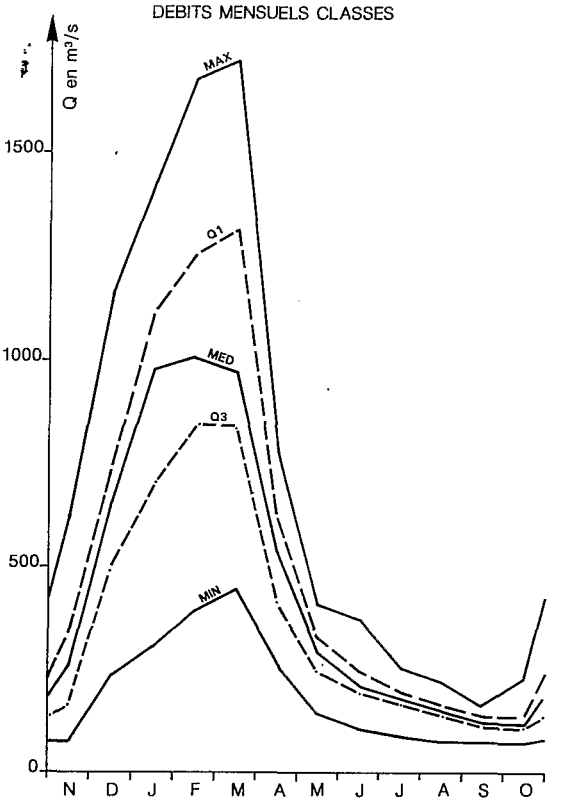
tableau 7.171.

Ikopa à Antsatrana
Régressions hydropluviométriques

| | |
|---|---|
| H11 =.22 P11 - 3 | ($R^2$ = .58 P>.995) |
| H12 =.31 P12 - 7 | ($R^2$ = .70 P>.995) |
| H01 =.32 P01 + 32 | ($R^2$ = .70 P>.995) |
| H02 =.29 P02 + .26 P11 + 13 | ($R^2$ = .56 P>.995) |
| H03 =.34 P03 + .15 P02 + 17 | ($R^2$ = .67 P>.995) |
| H04 =.12 P03 + 40 | ($R^2$ = .42 P>.99) |
| H05 =.43 H04 + 9 | ($R^2$ = .72 P>.995) |
| H06 =.66 H05 + 3 | ($R^2$ = .74 P>.995) |
| H07 =.47 H06 + 11 | ($R^2$ = .56 P>.995) |
| H08 =.81 H07 + 1 | ($R^2$ = .89 P>.995) |
| H09 =.52 H08 + .07 P09 + 5 | ($R^2$ =.82 P>.995) |
| H10 =.10 P09 + .05 P10 + 13 | ($R^2$ = .59 P>.995) |

figure 7.105.

Ikopa à Antsatrana



Les débits moyens mensuels et annuels de novembre 1948 à février 1976 sont présentés dans le tableau 7.172, ainsi que les valeurs interannuelles moyennes, écarts-type et quantiles mensuels (graphe 7.105). Les hydrogrammes annuels d'une année excédentaire (1964-65, Q = 561 m³/s) et d'une année déficitaire (1955-56, Q = 326 m³/s) sont représentés sur les graphes 7.106 et 7.107.

On observe une montée des débits (courbe de forme convexe) de novembre à mars, mois le plus abondant avec un décalage de un à deux mois sur le maximum pluviométrique de janvier du à la réhumectation des sols jusqu'à saturation et au remplissage des nappes. D'avril à mai la décrue annuelle est brutale, les débits diminuent de 4 à 1 en 64 jours ; et correspond à la chute de la pluviométrie déjà très marquée dès qu'on entre dans la zone climatique perhumide, puis de juin à septembre, la décroissance des débits est contrôlée par le drainage des abondantes nappes d'altérites -les débits diminuent de moitié en 107 jours-. Selon la date de reprise des premières pluies, le mois le moins abondant est septembre (une année sur trois environ) ou octobre (deux années sur trois).

figure 7.106.

Ikopa à Antsatrana

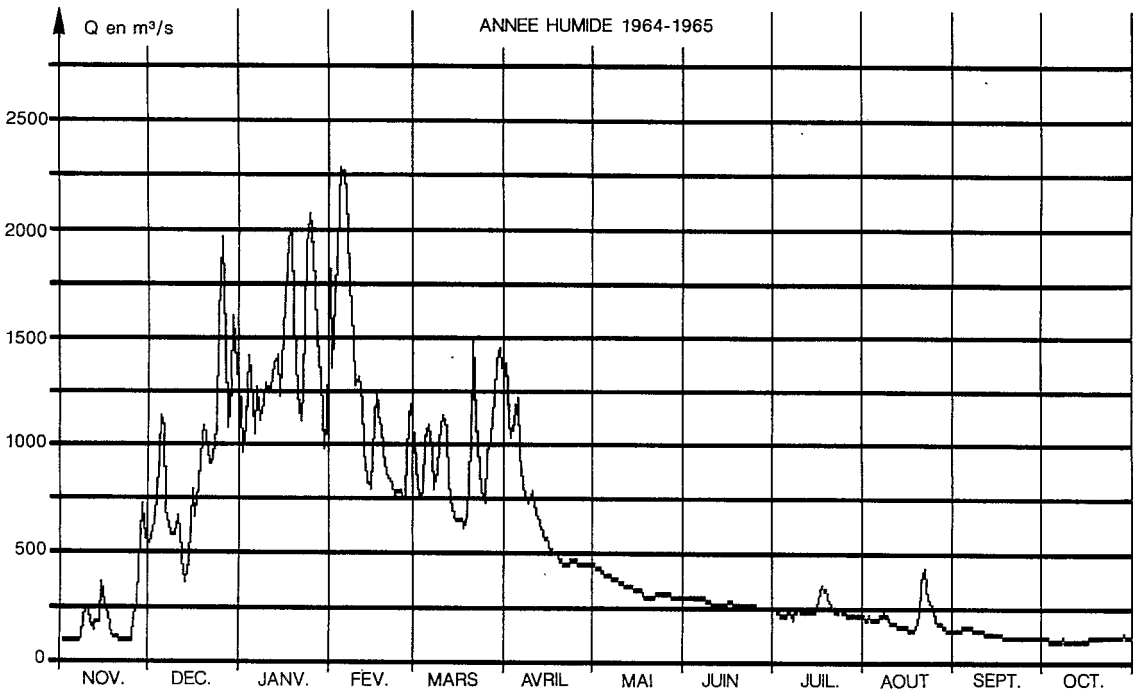


figure 7.107.

*Ikopa à Antsatrana*

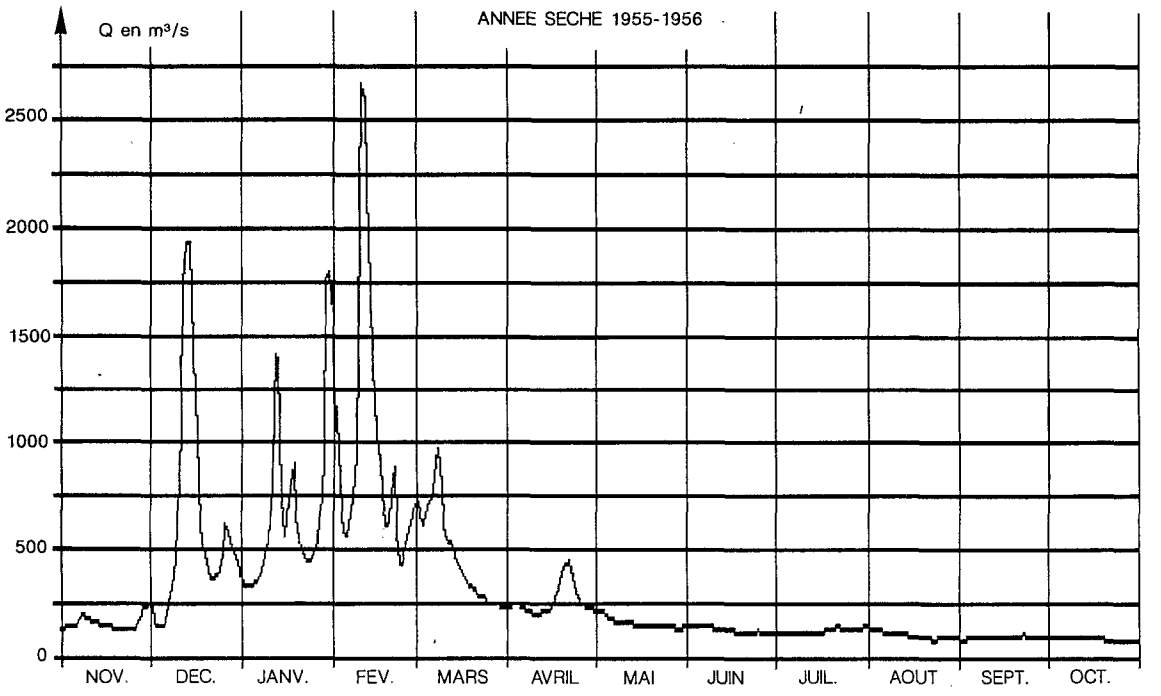



tableau 7.172.

Débits moyens mensuels et annuels en m³/s

Station : 1250100221 Antsatrana
Rivière : Ikopa
Pays : Madagascar
Bassin : Betsiboka

Latitude : 17.26.00
Longitude : 46.53.00

Aire : 18 645 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1948/49 | 214. | 343. | 301. | 1050. | 1430. | 409. | 293. | 182. | 162. | 140. | 129. | 131. | 395. |
| 1949/50 | 333. | 468. | 1020. | 1010. | 843. | 381. | 140. | 101. | 84.4 | 76.2 | 71.0 | 68.9 | 380. |
| 1950/51 | 77.3 | 238. | 1130. | 628. | 1040. | 541. | 329. | 207. | 160. | 131. | 110. | 130. | 393. |
| 1951/52 | 433. | 314. | 1260. | 1360. | 1090. | 684. | 402. | 371. | 185. | 158. | 133. | 116. | 539. |
| 1952/53 | 306. | 714. | (1100.) | (1580.) | 1720. | 695. | 409. | 306. | 251. | 213. | 165. | 117. | (636.) |
| 1953/54 | 162. | 594. | 968. | 1000. | 1310. | 494. | 301. | 238. | 187. | 143. | 119. | 93.4 | 465. |
| 1954/55 | 141. | 692. | 1190. | 1370. | 1430. | 595. | 268. | 207. | 179. | 172. | 147. | 145. | 541. |
| 1955/56 | 160. | 629. | 677. | 1010. | 467. | 267. | 163. | 133. | 128. | 109. | 97.2 | 94.4 | 326. |
| 1956/57 | 160. | 747. | 684. | 1050. | 1480. | 627. | 263. | 198. | 168. | 122. | 107. | 103. | 473. |
| 1957/58 | 160. | 417. | 933. | 916. | 1050. | 414. | 215. | 191. | 165. | 128. | 153. | 194. | 409. |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1958/59 | 248. | 1040. | 1200. | 832. | 1390. | 784. | 361. | 244. | 197. | 155. | 128. | 120. | 558. |
| 1959/60 | 375. | 478. | 1100. | 834. | 945. | 383. | 248. | 211. | 178. | 151. | 120. | 107. | 427. |
| 1960/61 | 80.4 | 609. | 1110. | 391. | 752. | 575. | 286. | 190. | 185. | 149. | 110. | 105. | 380. |
| 1961/62 | 140. | 1160. | 928. | 977. | 1320. | 730. | 359. | 218. | 154. | 128. | 108. | 108. | 526. |
| 1962/63 | 624. | 742. | 831. | 1270. | 781. | 542. | 291. | 259. | 182. | 145. | 111. | 124. | 487. |
| 1963/64 | 307. | 733. | 698. | 1310. | 868. | 367. | 204. | 181. | 179. | 142. | 105. | 98.4 | 430. |
| 1964/65 | 218. | 933. | 1430. | 1240. | 952. | 670. | 348. | 275. | 244. | 209. | 134. | 112. | 561. |
| 1965/66 | 244. | 831. | 577. | 854. | 444. | 342. | 232. | 187. | 155. | 148. | 120. | 108. | 351. |
| 1966/67 | 117. | 334. | 1160. | 676. | 1280. | 537. | 280. | 210. | 182. | 144. | 123. | 128. | 431. |
| 1967/68 | 283. | 730. | 617. | 985. | 925. | 425. | 237. | 206. | 177. | 151. | 117. | 107. | 412. |
| 1968/69 | 305. | 746. | 793. | 978. | 565. | 557. | 295. | 201. | 172. | 150. | 122. | 133. | 415. |
| 1969/70 | 188. | 748. | 1310. | 749. | 948. | 385. | 245. | 195. | 168. | 140. | 110. | 101. | 440. |
| 1970/71 | 401. | 537. | 1030. | 1610. | 975. | 459. | 295. | 243. | 200. | 154. | 133. | 114. | 506. |
| 1971/72 | 337. | 702. | 580. | 1680. | 909. | 482. | 300. | 236. | 191. | 170. | 111. | 225. | 489. |
| 1972/73 | 271. | 597. | 990. | 1120. | 1070. | 514. | 277. | 247. | 200. | 165. | 135. | 110. | 471. |
| 1973/74 | 371. | 572. | 710. | 916. | 739. | 708. | 366. | 229. | 196. | 161. | 127. | 152. | 434. |
| 1974/75 | 254. | 740. | 799. | 1160. | 1260. | 563. | 311. | 238. | 197. | 162. | 124. | 145. | 493. |
| 1975/76 | 490. | 538. | 1000. | 821. | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 264. | 640. | 933. | 1050. | 1040. | 523. | 286. | 219. | 179. | 149. | 121. | 122. | 458. |
| Ecart-type | 128. | 213. | 263. | 301. | 318. | 134. | 65. | 51. | 31. | 27. | 18. | 31. | |
| Max. | 624. | 1160. | 1430. | 1680. | 1720. | 784. | 409. | 371. | 251. | 213. | 165. | 225. | |
| 75% | 335. | 744. | 1120. | 1255. | 1310. | 627. | 329. | 243. | 196. | 161. | 133. | 131. | |
| Méd. | 251. | 660. | 979. | 1005. | 975. | 537. | 291. | 210. | 179. | 149. | 120. | 114. | |
| 25% | 160. | 507. | 704. | 844. | 843. | 409. | 245. | 191. | 165. | 140. | 110. | 105. | |
| Min. | 77.3 | 238. | 301. | 391. | 444. | 267. | 140. | 101. | 84.4. | 76.2 | 71.0 | 68.9 | |

## 7.2.2.2. Apports annuels

La liaison statistiques entre les lames annuelles à ANTSATRANA et les précipitations annuelles sur le bassin, ainsi qu'avec les lames écoulées observées sur l'IKOPA à FIADANANA et la BETSIBOKA à AMBODIROKA sont les suivantes :

$H = .41\ P + 150$ $\quad R^2 = .40$

L'année 1952-53 est très nettement en dehors de la regression. Les lectures de janvier et février 1953 sont suspectes (et avaient été corrigées dans la monographie de la BETSIBOKA, 1963).

Sans l'année 1952-53, la regression est nettement améliorée :

$H = .42\ P + 119$ $\quad (R^2 = .56\ P > .995)$

Avec les bassins voisins, les regressions sont les suivantes :
$H_{ANTSA.} = .62\ H_{FIAD.} + 410$ ($R^2 = .71$ P>.995)
$H_{ANTSA.} = .42\ H_{BETSI.} + 435$ ($R^2 = .75$ P>.995)

Ces relations ont permis de compléter l'échantillon et de corriger la valeur surestimée de 1952-53.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1945-46 | P = 1379 mm | H = 720 mm | Q = 426 m³/s |
| 1946-47 | P = 1842 mm | H = 970 mm | Q = 573 m³/s |
| 1947-48 | P= 1680 mm | H = 835 mm | Q = 492 m³/s |
| 1952-53 | P = 1492 mm | H = 800 mm | Q = 473 m³/s |
| 1975-76 | | H = 660 mm | Q = 389 m³/s |

Les quantiles tirés de la loi de distribution des valeurs annuelles sont les suivantes (pour 31 valeurs observées ou calculées).

tableau 7.173.

Ikopa à Antsatrana

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Hmm | 571 | 602 | 633 | 676 | 766 | 861 | 910 | 951 | 996 |
| Q m³/s | 337 | 356 | 674 | 399 | 453 | 509 | 538 | 562 | 588 |
| q l/s/km² | 18.1 | 19.1 | 20.1 | 21.4 | 24.3 | 27.3 | 28.9 | 30.1 | 31.5 |

Loi de Goodrich (test B.M. : 1.71, échelle : 312 mm, position : 492 mm, forme : .351)
Centennales sèche et humide : 554 mm (327 m³/s) et 1026 mm (606 m³/s).

## 7.2.2.3. Crues

### *7.2.2.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux*

La méthode de STEVENS a été appliquée pour l'extrapolation de la courbe de tarage (jusqu'à 7,50 m dans le système de la nouvelle échelle) de cette station, bien étalonnée de 0,30 à 3,74 m (Q = 1970 m³/s) et dont la stabilité est garantie en moyenne et hautes eaux (seuils rocheux aval).

tableau 7.174.

Ikopa à Antsatrana
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date * | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1948-49 | 2560 | 20/03/49 12h00 | 4,04 | 3rel |
| 1949-50 | 2530 | 16/01/50 18h00 | 4,00 | 3rel |
| 1950-51 | 2530 | 16/01/51 12h00 | 4,00 | 3rel |
| 1951-52 | 2220 | 24/01/52 12h00 | 3,60 | 3rel |
| 1952-53 | 2500 | 11/03/53 12h00 | 3,96 | 3rel |
| 1953-54 | 2120 | 17/01/54 12h00 | 3,48 | 3rel |
| 1954-55 | 2560 | 18/03/55 | 4,04 | Lim |
| 1955-56 | 2900 | 11/02/56 12h00 | 4,46 | Min |
| 1956-57 | 2500 | 12/02/57 12h00 | 3,96 | 3rel |
| 1957-58 | 3010 | 27/01/58 12h00 | 4,59 | 3rel |
| 1958-59 | 2310 | 06/01/59 | 3,72 | Lim |

suite

| Année | Qm³/s | Date * | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1959-60 | 2300 | 11/01/60 06h00 | 3,70 | 3rel |
| 1960-61 | 3680 | 08/01/61 | 5,92 | Lim |
| 1961-62 | 2760 | (28/12/61) | 4,79 | Lim |
| 1962-63 | 2660 | (15/02/63) | 4,66 | Lim |
| 1963-64 | 2770 | 09/02/64 12h00 | 4,80 | 3rel |
| 1964-65 | 2720 | 16/01/60 18h00 | 4,74 | 3rel |
| 1965-66 | 3340 | (21/02/66) | 5,50 | Lim |
| 1966-67 | 2570 | (26/01/67 | 4,55 | Lim |
| 1967-68 | 2060 | (16/02/68) | 3,90 | Lim |
| 1968-69 | 2340 | (28/01/69) | 4,25 | Lim |
| 1969-70 | 2630 | (11/03/70) | 4,62 | Lim |
| 1970-71 | 2410 | 30/01/71 12h00 | 4,35 | Lim |
| 1971-72 | 5060 | 15/02/72 | 7,50 | PHE |
| 1972-73 | 3580 | 26/02/73 06h00 | 5,80 | 3rel |
| 1973-74 | 1910 | 13/03/74 06h00 | 4,10 | 3rel |
| 1974-75 | 2760 | 17/02/75 06h00 | 4,79 | 3rel |
| 1975-76 | 1850 | 18/01/76 12h00 | 3,63 | Min |

* entre parenthèses date probable du maximum.

### *7.2.2.3.2. Résultats de l'enquête historique*

D'une enquête menée par les Travaux publics lors de l'installation du limnigraphe Bar, il ressort (après rattachement de la prise) que la crue de janvier 1943 aurait atteint la cote 6,28 m (système de la nouvelle échelle), soit près de 4 000 m³/s.

En l'absence d'autres éléments, les maximums annuels de 1971-72 et 1942-43 peuvent être considérés comme les plus importants de la période 1942-76.

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 16 janvier et le 21 février (date mediane : 1ère semaine de février - dates extrêmes : 28 décembre et 20 mars).

L'échantillon des vingt-huit maximums observés correspond à une distribution de Frechet. Les crues de récurrence rares ont été évaluées en prenant compte l'information historique.

tableau 7.175.

Ikopa à Antsatrana
Maximums annuels

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s (échantillon) | 2560 | 3060 | 3420 | (4310) | (4750) |
| Q m³/s (info. histor.) | | | | 4550 | 5000 |
| q l/s/km² | 137 | 164 | 183 | (244) | (270) |

La MAMOKOMITA est un affluent rive droite de l'IKOPA qu'elle rejoint en amont de la station d'ANTSATRANA, près d'ANORIBA. A MAROHARANA (bassin versant 775 km²) un ordre de grandeur du maximum de crue de 1975-76 a pu être établi (d'après les valeurs superficielles) lors du passage du cyclone CLOTILDE (14/01/76).

Le débit de crue (1 450 m³/s), considéré comme le plus important depuis une dizaine d'années, a cependant été dépassé en 1978 par une crue estimée à 1 950 m³/s, et comparable à celle de 1924-25 (d'après une enquête estimée à ANDRIBA).

Le débit maximal décennal a été évalué à 942 m³/s (1210 l/s/km²).

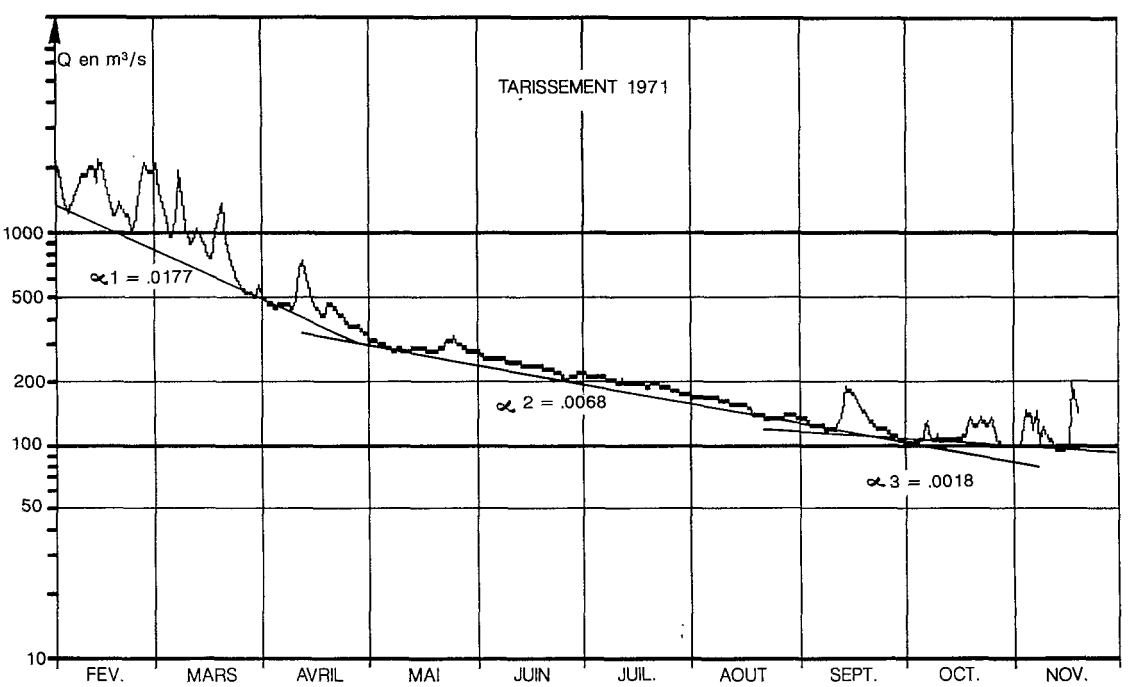
### 7.2.2.4. Basses eaux

Les débits de base de l'IKOPA s'alignent en fin de saison des pluies sur une courbe exponentielle d'expression $Q = Q_o\, e^{-\alpha 1T}$ (graphe 7.108).

Avec un "débit de base" initial supérieur à 350 m³/s, cette décroissance ($\alpha_1$ compris entre .012 et .028) observés de février-mars à avril correspond à une décharge rapide de la nappe.

figure 7.108.

Ikopa à Antsatrana




Le véritable tarissement est observé de mi-avril-juin, mai à septembre. Le débit de base initial $Q_o$ est compris entre 200 et 250 m³/s (en moyenne) et les coefficients $\alpha_2$ entre .0045 et .0085 ($\alpha_2$ moyen = .0065). Le coefficient $\alpha_2$ est influencé par le potentiel des nappes en mai :

$\alpha_2 = (.16\, Q_o + 29)\, .10^{-4}$ $\quad (R^2 = .40\ P>.995)$

tableau 7.176.

Ikopa à Antsatrana
Débits caractéristiques
de basses eaux ($m^3/s$)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1949 | 148 | 130 | 125 | 121 | 28-09 |
| 1950 | 75.5 | 69.0 | 67.8 | 66.7 | 04-12 |
| 1951 | 144 | 108 | 104 | 100 | 15-10 |
| 1652 | 166 | 120 | 107 | 98.8 | 03-11 |
| 1953 | 182 | 118 | 108 | 93.6 | 17-11 |
| 1954 | 139 | 96.7 | 90.1 | 88.0 | 31-10 |
| 1955 | 163 | 142 | 137 | 134 | 23-11 |
| 1956 | 107 | 92.4 | 79.6 | 75.2 | 02-11 |
| 1957 | 123 | 93.8 | 89.0 | 80.7 | 12-11 |
| 1958 | 148 | 107 | 92.0 | 85.2 | 12-10 |
| 1959 | 159 | 119 | 116 | 113 | 01-11 |
| 1960 | 136 | 87.3 | 61.2 | 59.1 | 14-11 |
| 1961 | 146 | 103 | 88.3 | 76.5 | 02-11 |
| 1962 | 133 | 105 | 96.9 | 94.7 | 11-10 |
| 1963 | 148 | 108 | 104 | 96.4 | 14-10 |
| 1964 | 127 | 102 | 95.2 | 91.9 | 29-10 |
| 1965 | 167 | 109 | 101 | 96.0 | 04-11 |
| 1966 | 129 | 106 | 96.0 | 92.5 | 05-12 |
| 1967 | 160 | 118 | 111 | 101 | 28-10 |
| 1968 | 153 | 106 | 98.9 | 95.9 | 25-10 |
| 1969 | 151 | 109 | 97.5 | 88.4 | 27-11 |
| 1970 | 153 | 104 | 98.7 | 94.5 | 28-10 |
| 1971 | 157 | 111 | 103 | 96.6 | 14-11 |
| 1972 | 182 | 114 | 104 | 102 | 18-09 |
| 1973 | 175 | 119 | 102 | 97.4 | 27-10 |
| 1974 | 178 | 125 | 110 | 103 | 22-10 |
| 1975 | 175 | 125 | 116 | 104 | 24-10 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 182 | 142 | 137 | 134 | 05-12 |
| Q1 | 166 | 119 | 108 | 101 | 14-11 |
| Méd. | 151 | 108 | 101 | 95.9 | 31-10 |
| Q3 | 136 | 103 | 92.0 | 88.0 | 22-10 |
| Min. | 75.5 | 69.0 | 61.2 | 59.1 | 18-09 |

DCE = QJMIN + 5.7 ($R^2$ = .95) DCE QJMIN = 1.06
DCII = .85 QJMIN + 28.8 ($R^2$ = .80) DCII QJMIN = 1.16
DC9 = .92 QJMIN + 62.2 ($R^2$= .35) DC9 QJMIN = 1.58

$QJMin = 30.3 * Q05^{.31} * e^{-T/500}$ ($R^2$ = .31 P>.995)
T (date en jours depuis le 1er janvier)

tableau 7.177.

Ikopa à Antsatrana
Quantiles des débits minimaux journaliers (27 valeurs)

| Récurrence | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q m³/s | 70.4 | 75.7 | 82.2 | 94.5 | 107 | 113 | 119 |
| q l/s/km² | 3.8 | 4.1 | 4.4 | 5.1 | 5.7 | 6.1 | 6.4 |

Loi normale (test B.M. : 6.90, échelle : 14.7 m³/s, position : 94.5 m³/s)
Cinquantenales sèche et humide : 64.4 m³/s (3.5 l/s/km²) et 125 m³/s (6.7 l/s/km²).

On observe un redressement très net du débit spécifique d'étiage entre FIADANANA et ANTSATRANA (180 %) dû à la pluviométrie plus abondante nourissant des réserves d'altérites beaucoup plus importantes.

## 7.2.2.5. Bilan hydrologique

En année moyenne, la lame écoulée sur le bassin (770 mm) pour une pluviométrie annuelle de 1 515 mm correspond à un déficit moyen d'écoulement de 745 mm (Ke = 51 %).

Le déficit moyen d'écoulement (graphe 7.109) croît de près de 500 mm (pour P = 1 100 mm) à une valeur limite de 1 050 mm (correspondant à l'ETP régionale) pour P ≥ 2 300 mm. Les lames écoulées varient entre 800 mm (P = 1 250 mm) à 1200 mm (P = 2 250 mm) puis s'ordonnent autour d'une droite moyenne : H = P -1 050.

figure 7.109.

Ikopa à Antsatrana

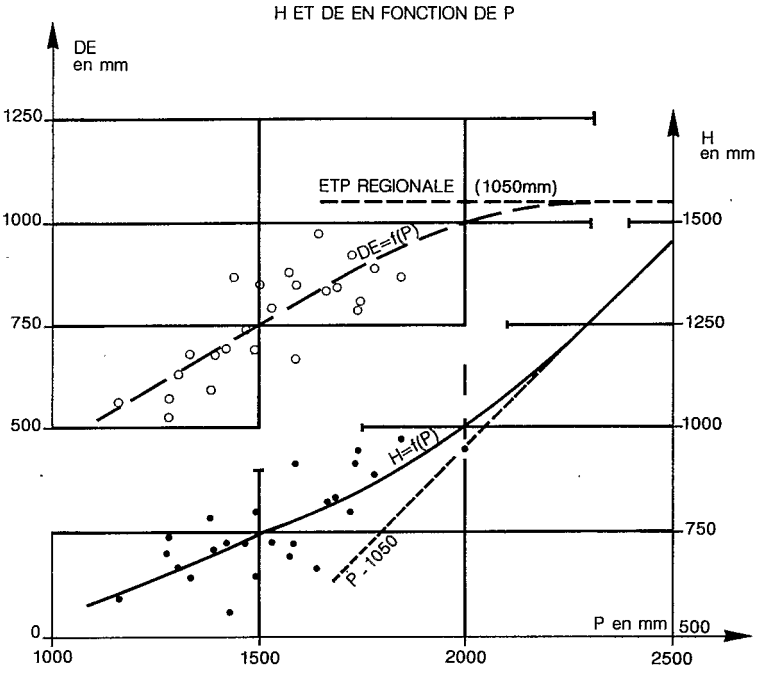


tableau 7.178.

Ikopa à Antsatrana
Bilan hydrologique mensuel moyen (mm)

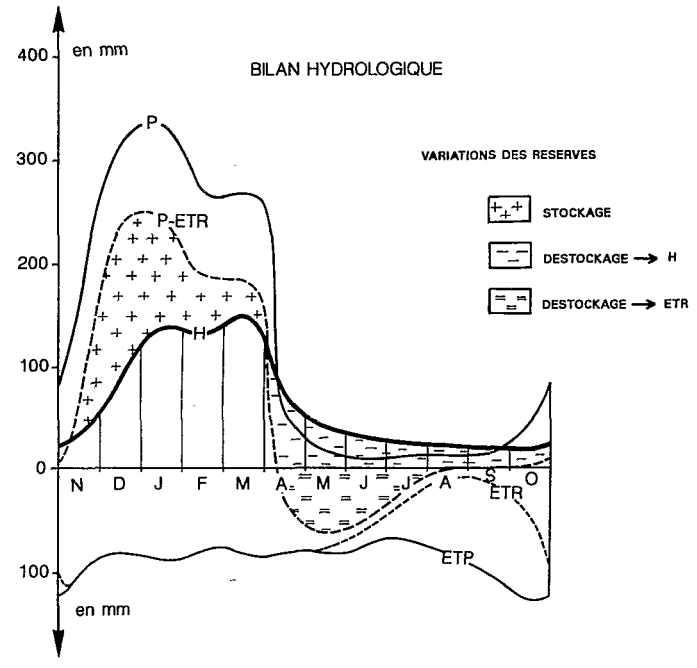
| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 169 | 318 | 332 | 269 | 268 | 55 | 16 | 8 | 10 | 12 | 13 | 45 | 1515 |
| ETP | 96 | 82 | 88 | 79 | 84 | 82 | 84 | 73 | 70 | 82 | 102 | 128 | 1050 |
| ETR | 96 | 82 | 88 | 79 | 84 | 82 | 78 | 58 | 31 | 12 | 13 | 42 | 745 |
| P-ETR | 73 | 236 | 244 | 190 | 184 | -27 | -62 | -50 | -21 | 0 | 0 | 3 | 770 |
| H | 33 | 93 | 137 | 131 | 151 | 72 | 40 | 30 | 25 | 21 | 20 | 17 | 770 |
| ΔR+ | 40 | 143 | 107 | 59 | 33 | | | | | | | | +382 |
| ΔR- | | | | | | 99 | 102 | 80 | 46 | 21 | 20 | 14 | -382 |
| R | 40 | 183 | 290 | 349 | 382 | 283 | 181 | 101 | 55 | 34 | 14 | 0 | |

En saison des pluies (novembre à mars) les précipitations (1 356 mm soit 90 % du total annuel) satisfait entièrement l'ETP (429 mm) et après réhumidification des sols (recharge de la réserve utile) et alimentation des nappes d'altérites (+ 222 mm) nourissent les écoulements (545 mm soit 71 % du total annuel).

L'ETR représente sur l'année 71 % de l'ETP. Mais en saison fraîche, après un soutien à partir des réserves utiles des sols (160 mm d'avril en juillet), elle est réduite aux apports pluviométriques de fin de saison sèche.

figure 7.110.

Ikopa à Antsatrana



Sur la période, l'ETR ne représente plus que 51 % de l'ETP. Les écoulements sont presqu'entièrement fournis par le drainage des altérites (graphe 7.110).

Le bassin intermédiaire entre FIADANANA et ANTSATRANA (9.195 km²) voit un net redressement des apports (Q = 283 m³/s). La lame écoulée du bassin intermédiaire (970 mm) pour des précipitations de l'ordre de 1 650 mm (Ke = 59 %) est supérieure de 70 % à celle du bassin supérieur arrêté à FIADANANA.

## 7.3. Bassin de la Betsiboka

### 7.3.1. Isinko à Ambodiroka

L'INSINKO est un petit affluent rive droite de la BETSIBOKA, issu de la Tampoketsa de KAMORO. Le bassin est situé sur micaschistes et amphibolites du système de VOHIBORY, avec des coulées basiques du crétacé, le tout altéré en latérites. La savane dégradée est prédominante.

La station (16°56'56"S - 46°57'39"E) contrôle un bassin d'une superficie de 600 km².

Une première échelle a été installée en novembre 1957, en amont d'un seuil rocheux, et a été doublée d'un limnigraphe (mars 1959). Une seconde échelle a été placée en octobre 1959 sur le tube du limnigraphe ("zéro" calé 7 cm plus bas). La station a été détruite en 1974.

La pluviométrie est établie à partir de 4 stations (ANDRIAMENA, ANTSIAFABOSITRA, MAEVATANANA et AMBALAJANAKOMBY) toutes extérieures au bassin. La pluviométrie moyenne interannuelle ainsi estimée (1 780 mm) est probablement sous-évaluée, et les pluviométries des différentes années souffrent d'une certaine indétermination.

Soixante-treize mesures de débit (entre 1.81 et 285 m³/s) ont permis d'établir une courbe d'étalonnage acceptable qui a du être assez fortement extrapolée jusqu'à 1 800 m³/s.

Les débits journaliers sont connus avec une assez bonne précision.

#### 7.3.1.1. Débits mensuels et relations hydropluviométriques

tableau 7.179.

Isinko à Ambodiroka
Coefficients de corrélation

| Hi ou Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| en fonction de Pi | .86 | .64 | .74 | .55 | .76 | (.34) | (-.38) | (.09) | (.10) | .63 | (.31) | (.13) |
| Pi-i | (.02) | (-.07) | (-.01) | (.30) | (.13) | (.49) | (-.16) | (-.55) | (0) | (.10) | .69 | (.30) |
| Qi-i | .51 | (-.05) | (-.14) | (-.03) | (-.16) | .60 | .74 | .90 | .94 | .95 | .92 | .69 |

En dépit d'une certaine imprécision sur les valeurs mensuelles des précipitations, les coefficients de corrélation restent significatifs et correspondent au schéma type des hauts plateaux (graphe 7.111). Mois de saison des pluies (octobre à mars) regroupés dans le 1er secteur (influence forte des précipitations du mois et faible ou nulle des débits antérieurs). D'avril à octobre, les débits antérieurs déterminent les débits du mois (secteur IV) avec une faible influence des précipitations mensuelles. En novembre, le débit est conditionné par les précipitations du mois et les débits antérieurs (secteur II).

figure 7.111.

Isinko à Ambodiroka

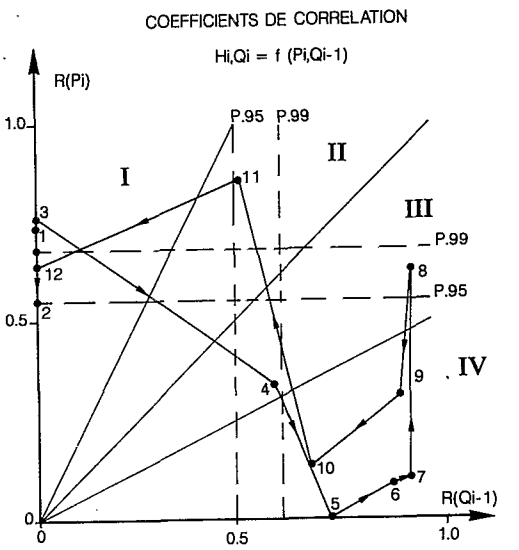



tableau 7.180.

Isinko à Ambodiroka
Régressions mensuelles

| | |
|---|---|
| H11 =.52 P11 + 3.73 H10 - 65 | ($R^2$ = .83 P>.995) |
| H12 =.23 P12 + 41 | ($R^2$ = .41 P>.90) |
| H01 =.38 P01 + 60 | ($R^2$ = .55 P>.95) |
| H02 =.69 P02 - 39 | ($R^2$ = .30 P≥.90) |
| H03 =.46 P03 + 103 | ($R^2$ = .58 P>.95) |
| H04 =.06 P120102.0304 - 6 | ($R^2$ = .35 P>.90) |
| Q04 =.26 Q03 + 6.5 | ($R^2$ = .36 P>.90) |
| H05 =.02 P12010203 + 10 | ($R^2$ = .73P>.99) |
| Q05 =.17 Q04 + 6 | ($R^2$ = .55 P>.95) |
| Q06=.012 P12010203 + 12 | ($R^2$ = .60 P>.995) |
| Q07=.75 Q06 | ($R^2$ = .88 P>.995) |
| H07=.010 P12010203 + 9 | ($R^2$ = .61 P>.99) |
| Q08=.69 Q07 | ($R^2$ = .90 P>.995) |
| H08 =.007 P12010203 + 8 | ($R^2$ = .56 P>.95) |
| Q09 =.66 Q08 | ($R^2$ = .85 P>.995) |
| H09 =.005 P12010203 + 5.6 | ($R^2$ = .48 P>.95) |
| Q10 =1.04 Q09 - 0.6 | ($R^2$ = .48 P>.95) |
| H10 =.006 P12010203 + 1.4 | ($R^2$ = .38 P>.95) |

D'avril à octobre, les lames écoulées sont assez bien déterminées à partir du cumul des précipitations de décembre à mars (P 12010203).

Les débits mensuels observés (novembre 1957 à octobre 1974) sont consignés dans le tableau 7.181.

Le graphe 7.112 représente les débits mensuels classés (MAX, Q1, MED, Q3 et MIN) et les graphes 7.113 et 7.114 des hydrogrammes en année excédentaire (1961-62, Q = 31.7 m³/s) et déficitaire (1965-66, Q = 13 m³/s). Les nombreuses crues individualisées dénotent le caractère imperméable d'une large fraction du bassin. Les débits de saison sèche, quoi que faibles (10 à 5 % des débits de saison des pluies), restent soutenus par le drainage des réserves d'altérites.

figure 7.112.

Isinko à Ambodiroka

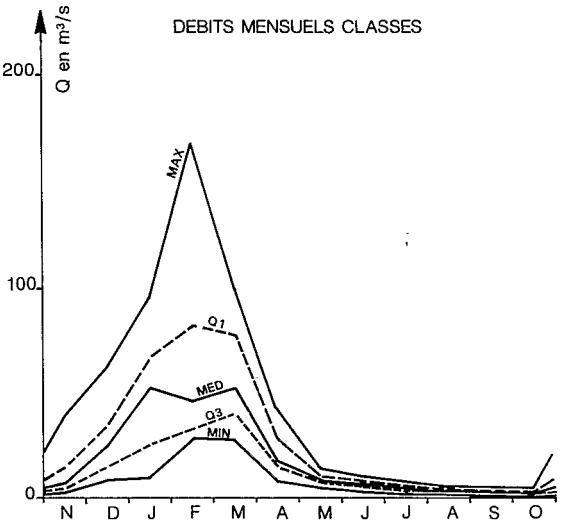



figure 7.113.

Isinko à Ambodiroka

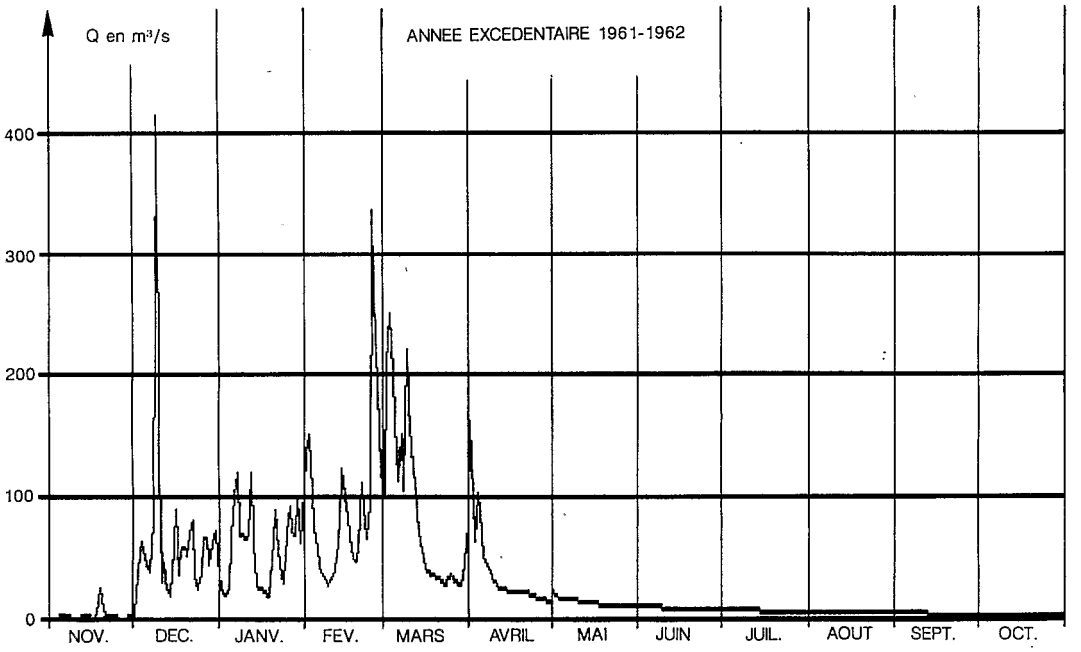


figure 7.114.

Isinko à Ambodiroka

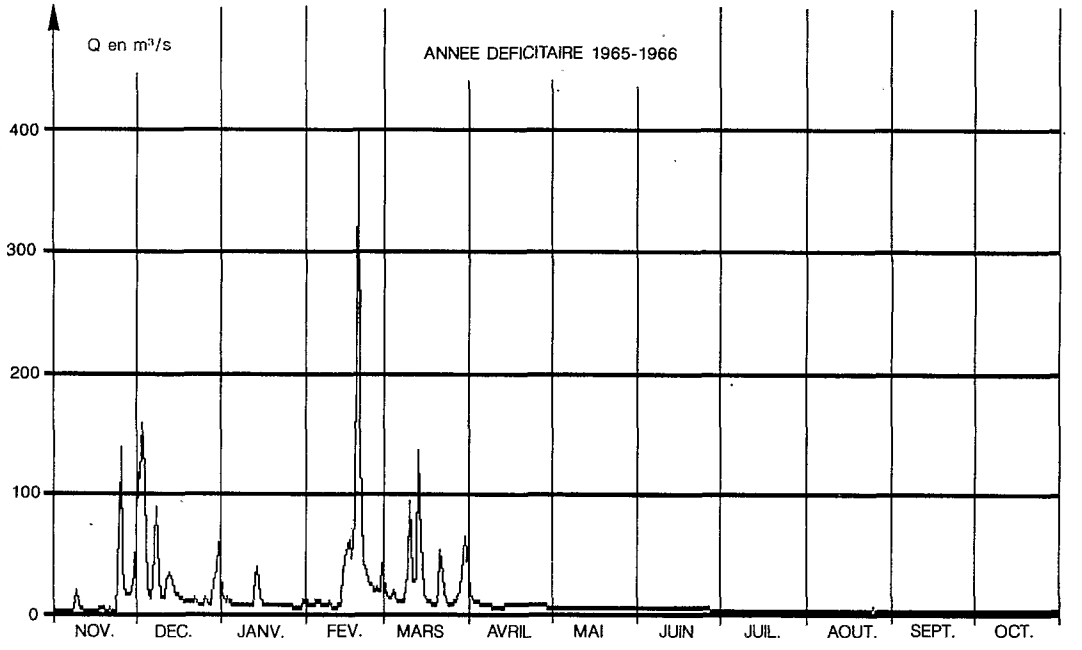



tableau 7.181.

Débits moyens mensuels et annuels en m³/s

Station : 1250101605 Ambodiroka
Rivière : Isinko
Pays : Madagascar
Bassin : Betsiboka

Latitude : 16.56.56
Longitude : 46.57.39
Aire : 600 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1957/58 | 2.42 | 10.6 | 51.1 | 52.0 | 85.6 | 16.6 | 9.38 | 7.41 | 5.78 | 4.20 | 3.93 | 3.41 | 20.9 |
| 1958/59 | 11.6 | 31.5 | 84.4 | 34.1 | 90.8 | 43.2 | 14.2 | 10.0 | 7.38 | 5.57 | 3.93 | 3.38 | 28.4 |
| 1959/60 | 39.3 | 25.7 | 87.5 | 31.5 | 43.9 | 14.8 | 8.52 | 6.26 | 4.90 | 3.91 | 3.10 | 2.38 | 22.7 |
| 1960/61 | 5.56 | 40.0 | 62.9 | 28.3 | 69.4 | 28.6 | 8.53 | 5.73 | 4.16 | 3.31 | 2.39 | 1.50 | 21.7 |
| 1961/62 | 2.87 | 62.8 | 59.4 | 92.2 | 87.6 | 37.0 | 13.9 | 9.03 | 6.93 | 5.46 | 4.03 | 3.08 | 31.7 |
| 1962/63 | 29.5 | 25.4 | 50.0 | 72.4 | 59.5 | 31.8 | 9.84 | 8.89 | 6.21 | 4.57 | 3.40 | 2.98 | 25.4 |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1963/64 | 16.2 | 35.7 | 36.1 | 63.2 | 51.6 | 13.8 | 7.62 | 6.59 | 5.90 | 4.51 | 3.14 | 2.74 | 20.6 |
| 1964/65 | 5.67 | 26.0 | 55.8 | 127. | 51.5 | 19.2 | 11.2 | 9.05 | 7.90 | 5.93 | 4.42 | 3.80 | 26.6 |
| 1965/66 | 12.9 | 34.7 | 10.1 | 41.5 | 28.0 | 8.24 | 6.09 | 4.71 | 3.77 | 3.23 | 2.43 | 1.85 | 13.0 |
| 1966/67 | 3.47 | 9.54 | 68.3 | 33.6 | 71.5 | 30.5 | 8.74 | 6.44 | 4.91 | 3.52 | 2.76 | 2.27 | 20.5 |
| 1967/68 | 5.20 | 20.4 | 23.1 | 30.4 | 46.1 | 13.3 | 8.11 | 6.26 | 4.59 | 3.42 | 2.70 | 2.08 | 13.6 |
| 1968/69 | 4.92 | 37.5 | 30.8 | 47.4 | 29.1 | 24.3 | 8.68 | 6.47 | 4.92 | 4.40 | 3.23 | 2.50 | 16.8 |
| 1969/70 | 4.94 | 23.4 | 68.1 | 37.5 | 53.1 | 16.1 | 9.48 | 7.28 | 5.42 | 3.90 | 3.03 | 2.53 | 19.5 |
| 1970/71 | 7.70 | 10.2 | 95.6 | 144. | 38.1 | 14.6 | 9.34 | 7.57 | 5.73 | 4.38 | 3.50 | 4.46 | 28.0 |
| 1971/72 | 36.6 | 21.5 | 21.9 | 167. | 55.9 | 18.0 | 10.9 | 7.94 | 6.09 | 4.85 | 3.58 | 4.91 | 29.3 |
| 1972/73 | 7.54 | 11.0 | 53.2 | 41.7 | 99.5 | 19.3 | 9.01 | 7.55 | 5.91 | 4.13 | 3.39 | 2.66 | 22.1 |
| 1973/74 | 13.0 | 22.0 | 18.8 | 70.7 | 29.7 | 15.3 | 5.74 | (3.71) | (2.19) | (1.81) | 1.23 | 1.53 | (15.1) |
| Moyenne | 12.3 | 26.4 | 51.6 | 65.6 | 58.3 | 21.5 | 9.37 | 7.11 | 5.46 | 4.18 | 3.19 | 2.80 | 22.1 |
| Ecart-type | 39.3 | 62.7 | 95.6 | 167. | 99.5 | 43.2 | 14.2 | 10.0 | 7.90 | 5.93 | 4.42 | 4.91 | |
| 75% | 14.6 | 35.2 | 68.2 | 82.3 | 78.6 | 29.6 | 10.4 | 8.42 | 6.15 | 4.71 | 3.75 | 3.39 | |
| Méd. | 7.53 | 25.4 | 53.2 | 47.4 | 53.1 | 18.0 | 9.01 | 7.28 | 5.72 | 4.20 | 3.23 | 2.53 | |
| 25% | 4.93 | 15.7 | 26.5 | 33.8 | 41.0 | 14.7 | 8.31 | 6.26 | 4.74 | 3.47 | 2.73 | 2.17 | |
| Min. | 2.42 | 9.54 | 10.1 | 28.3 | 28.0 | 8.24 | 5.74 | 3.71 | 2.19 | 1.81 | 1.23 | 1.50 | |

## 7.3.1.2. Apports annuels

La liaison statistique entre les lames annuelles écoulées et les précipitations est significative, en dépit d'une certaine imprécision sur les précipitations réelles annuelles sur le bassin (pas de postes sur le KAMORO).

$H = .51\ P + 204$ $(R^2 = .52\ P = > .995)$

Les lames de l'ISINKO et de la BETSIBOKA sont bien corrélées

$H\ ISINKO = 1.11\ H\ BETSIB. + 2.66$ $(R^2 = .65\ P > .995)$

Ces régressions ont été utilisées pour le calcul des lames écoulées (jusqu'en 1957 à partir de P, 73-74 à partir de la BETSIBOKA).

| Année | 45-46 | 46-47 | 47-48 | 48-49 | 49-50 | 50-51 | 51-52 | 52-53 | 53-54 | 54-55 | 55-56 | 56-57 | 73-74 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H mm | 1170 | 1185 | 860 | 915 | 1020 | 1490 | 1060 | 1435 | 1130 | 880 | 995 | 925 | 795 |
| Qm³/s | 22.3 | 22.5 | 16.3 | 17.4 | 19.4 | 28.3 | 20.1 | 27.3 | 21.5 | 16.7 | 18.9 | 17.6 | 15.1 |

La loi de distribution des 29 valeurs observées ou calculées fournit les quantiles suivants :

tableau 7.182.

Isinko à Ambodiroka

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| H mm | 751 | 822 | 913 | 1110 | 1337 | 1470 | 1587 |
| Q m³/s | 14.3 | 15.6 | 17.4 | 21.1 | 25.4 | 27.9 | 30.2 |
| q l/s/km² | 23.8 | 26.0 | 29.0 | 35.2 | 42.3 | 46.5 | 50.3 |

Loi log-normale : (test B.M. : 1.85, échelle : 1 456 mm, position : -346 mm, forme : .172)
Cinquantenales sèche et humide : 676 mm (Q = 12.9 m³/s) et 1728 (Q = 32.9 m³/s).

## 7.3.1.3. Crues

Bien que la qualité du contrôle (rapide) ait été mise en doute à la suite d'une série de mesures en 1968, il est probable que les modifications (ensablements) n'interviennent sur le tarage qu'entre 1,00 et 2,00 m, avec un rapide retour à la normale.

Pour les hautes eaux, un étalonnage moyen a été tracé en admettant une croissance quasi linéaire au-delà de 2,50 m.

tableau 7.183.

Isinko à Ambodiroka

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1957-58 | 670 | 28/01/58 12 h 00 | 2,78 | Min |
| 1958-59 | 1710 | 28/03/59 | 2,53 | PHE |
| 1959-60 | 435 | 25/11/59 12 h 00 | 2,43 | 3rel |
| 1960-61 | 420 | 03/01/61 12 h 00 | 2,40 | 3rel |
| 1961-62 | 538 | 09/12/61 12 h 00 | 2,63 | 3rel |
| 1962-63 | 260 | 16/02/63 12 h 00 | 2,00 | 3rel |
| 1963-64 | 260 | 14/03/64 00 h 00 | 2,00 | 3rel |
| 1964-65 | 1070 | 05/02/65 12 h 00 | 3,54 | 3rel |
| 1965-66 | 181 | 25/11/65 12 h 00 | 1,75 | 3rel |
| 1966-67 | 299 | 06/03/67 12 h 00 | 2,10 | 3rel |
| 1967-68 | 346 | 14/03/68 03 h 00 | 2,22 | 3rel |
| 1968-69 | 373 | 24/03/69 06 h 00 | 2,29 | Lim |
| 1969-70 | 1520 | 14/01/70 21 h 00 | 4,25 | Lim |
| 1970-71 | 1440 | 30/01/71 18 h 00 | 4,14 | Lim |
| 1971-72 | 1230 | 14/02/72 18 h 00 | 3,81 | Lim |
| 1972-73 | 801 | 16/03/73 18 h 00 | 3,10 | 3rel |
| 1973-74 | 420 | 08/02/74 06 h 00 | 2,40 | 3rel |

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 3 janvier et le 14 mars (date médiane : 8 février - dates extrêmes : 25 novembre et 28 mars).

L'échantillon des 17 crues maximales annuelles se distribue selon une loi log-normale.

tableau 7.184.

Isinko à Ambodiroka

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 512 | 986 | 1440 | (2870) | (3700) |
| q l/s/km² | 853 | 1640 | 2400 | (4780) | (6170) |

## 7.3.1.4. Basses eaux

Le tarissement (graphe 7.115) peut être observé chaque année de mai à octobre-novembre.

Les débits de base initiaux sont compris entre 6 et 12 m³/s et les coefficients a entre .008 et .011 ; valeurs moyennes : $Q_o$ = 9 m³/s, $\alpha$ = .0090 (TC = 77 jours).

Les réserves sont de l'ordre de 145 mm en début de saison sèche.

figure 7.115.

Isinko à Ambodiroka

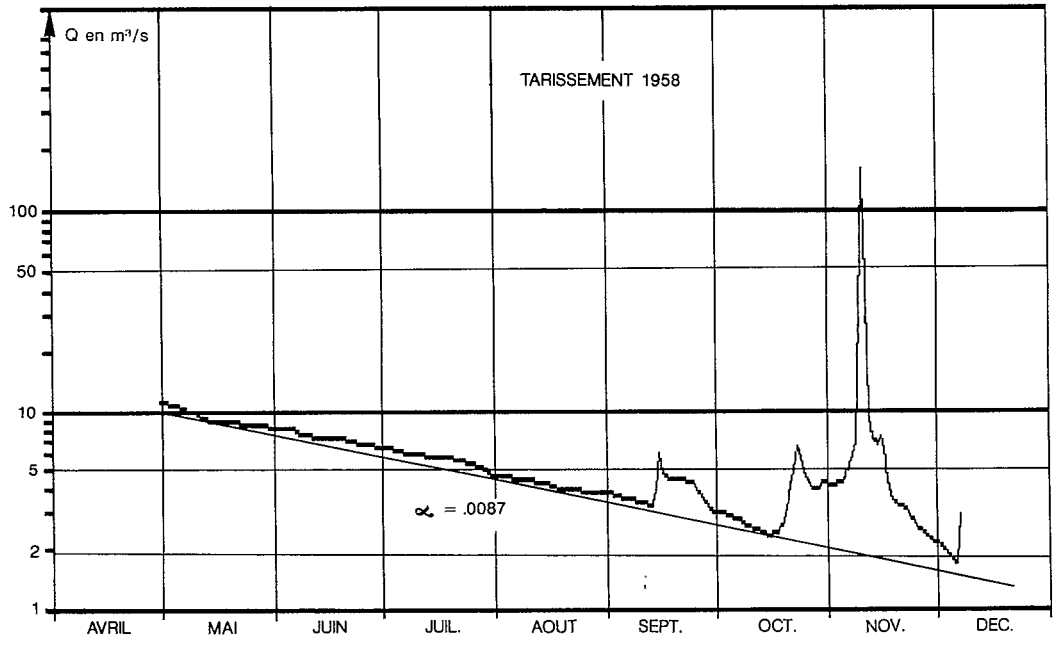


tableau 7.185.

Isinko à Ambodiroka
Débits caractéristiques
de basses eaux ($m^3/s$)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1958 | 4.26 | 2.98 | 2.35 | 1.71 | 06-12 |
| 1959 | 4.49 | 3.73 | 3.09 | 2.99 | 18-10 |
| 1960 | 3.73 | 2.12 | 1.54 | 1.44 | 18-11 |
| 1961 | 2.97 | 1.45 | 1.30 | 1.09 | 10-11 |
| 1962 | 6.01 | 3.31 | 2.98 | 2.76 | 31-10 |
| 1963 | 4.82 | 3.20 | 2.64 | 2.46 | 27-10 |
| 1964 | 4.14 | 2.46 | 2.04 | 1.79 | 29-10 |
| 1965 | 5.66 | 3.61 | 3.09 | 2.66 | 06-11 |
| 1966 | 2.86 | 1.87 | 1.53 | 1.27 | 07-11 |
| 1967 | 3.45 | 2.44 | 2.05 | 1.80 | 27-10 |
| 1968 | 3.20 | 2.14 | 1.84 | 1.62 | 08-11 |
| 1969 | 3.61 | 2.49 | 2.11 | 1.78 | 30-11 |
| 1970 | 3.57 | 2.66 | 2.35 | 2.21 | 15-11 |
| 1971 | 4.80 | 3.13 | 2.55 | 2.26 | 03-11 |
| 1972 | 4.12 | 3.09 | 2.47 | 1.87 | 16-12 |
| 1973 | 4.00 | 2.77 | 2.45 | 2.35 | 03-11 |
| 1974 | - | - | - | (.84) | 02-09 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 6.01 | 3.73 | 3.09 | 2.99 | 16-12 |
| Q1 | 4.81 | 3.17 | 2.60 | 2.41 | 17-11 |
| Méd. | 4.06 | 2.72 | 2.35 | 1.80 | 06-11 |
| Q3 | 3.51 | 2.29 | 1.91 | 1.53 | 28-10 |
| Min. | 2.86 | 1.45 | 1.30 | 0.84 | 02-09 |

DCE = .96 QJMIN + .4 $R^2$ = .91 DCE/QJMIN = 1.13
DC11 = 1.06 QJMIN + .6 $R^2$ = .83 DC11/QJMIN = 1.36
DC9 = 1.53 QJMIN + 1.1 $R^2$ = .77 DC9/QJMIN = 2.08

QJMIN = Q05 $.e^{-T/200}$ $R^2$ = .67
QJMIN = .0011 P1112010203 $R^2$ = .58
QJMIN = .037 * $P11\text{-}03^{.92}$ * $e^{-T/110}$ $R^2$ = .74

Date de l'étiage : T en jours depuis le 1er janvier.

Les valeurs tirées de l'analyse statistique effectuées sur l'échantillon des 17 valeurs observées sont les suivantes :

tableau 7.186.

Isinko à Ambodiroka

| Récurrence | Années sèches | | Médiane | Années humides | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 |
| Q m³/s | 1.21 | 1.46 | 1.94 | 2.41 | 2.66 |
| q l/s/km² | 2.0 | 2.4 | 3.2 | 4.0 | 4.4 |

Loi de Gauss (test B.M. : .78, échelle : .56 m³/s, position 1.94 m³/s)
Vicennales sèche et humide : 1 m³/s (1.7 l/s/km²) et 2.87 m³/s (4.8 l/s/km²)

En ajoutant à l'échantillon observé, les 12 valeurs calculées d'après les précipitations de novembre à mars (1946-1957), on obtient un débit minimum journalier médian de 1.85 m³/s. Les valeurs étendues pourraient être de 5 à 10 % inférieures aux valeurs du tableau 7.143.

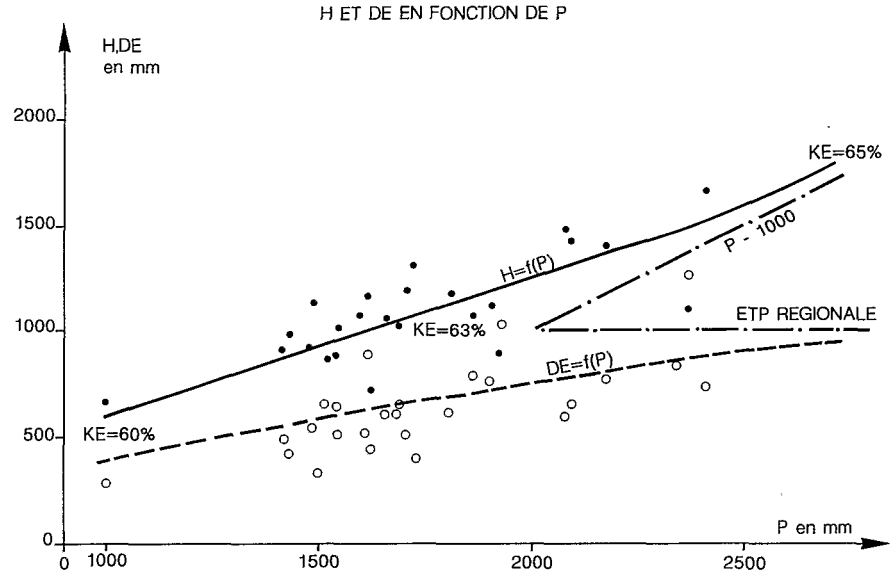
## 7.3.1.5. Bilan hydrologique

La lame écoulée interannuelle (1 130 mm) pour une pluviométrie moyenne de 1 780 mm correspond à un déficit moyen de 650 mm (KE = 63 %).

Le déficit d'écoulement (graphe 7.116.) varie entre 400 mm (pour P = 1 000 mm) à une valeur qui reste inférieure à l'ETP régionale (1 000 mm) lorsque P dépasse les 2 500 mm et ceci en raison de la rigueur de la saison sèche (P mensuelle inférieure à 10 mm - en moyenne - de mai à septembre).

figure 7.116.

Isinko à Ambodiroka



La lame croît de 600 mm (P égale à 1 000 mm, KE = 60 %) à H voisin à de 1 600 mm pour P = 2 500 mm (KE = 64 %) en se rapprochant asymptotiquement de sa limite : H = P-1 000.

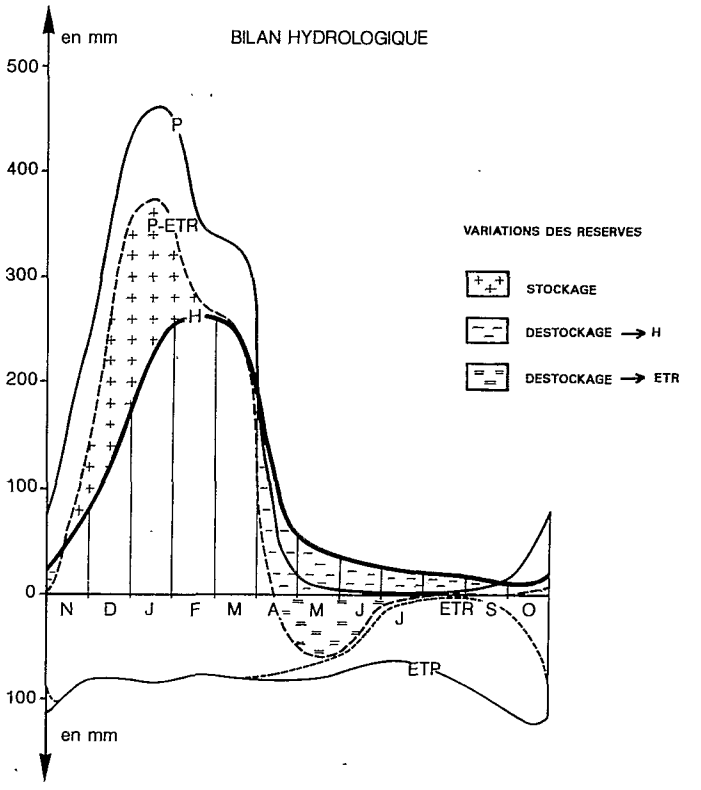
tableau 7.187.

Isinko à Ambodiroka
Bilan hydrologique mensuel (mm)

| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 153 | 356 | 457 | 357 | 330 | 66 | 6 | 3 | 2 | 5 | 6 | 39 | 1780 |
| ETP | 91 | 78 | 84 | 76 | 80 | 78 | 80 | 70 | 66 | 78 | 97 | 122 | 1000 |
| ETR | 91 | 78 | 84 | 76 | 80 | 75 | 64 | 44 | 8 | 5 | 6 | 37 | 650 |
| P-ETR | 62 | 278 | 373 | 281 | 250 | - 9 | - 58 | - 41 | - 6 | 0 | 0 | 2 | 1130 |
| H | 52 | 115 | 224 | 260 | 253 | 90 | 41 | 30 | 24 | 18 | 13 | 12 | 1130 |
| Δ R+ | 10 | 163 | 149 | 21 | | | | | | | | | + 343 |
| Δ R- | | | | | 3 | 99 | 99 | 71 | 30 | 18 | 13 | 10 | - 343 |
| R | 10 | 173 | 322 | 343 | 340 | 241 | 142 | 71 | 41 | 23 | 10 | 0 | |

figure 7.117.

Isinko à Ambodiroka



Le rapport de l'ETR annuelle à l'ETP régionale est en moyenne de 65 %. Ce faible rapport est du à la sévérité de la longue saison sèche (mai à septembre).

De novembre à mars, les précipitations représentent 93 % du total annuel. L'ETP (409 mm) est totalement satisfaite, et après recharge des aquifères et de la réserve utile des sols (+ 340 mm), les précipitations nourissent un écoulement abondant (904 mm) qui représente 80 % du total annuel.

Les précipitations de saison sèche (127 mm) et seulement 22 mm de mai à septembre, alimentent faiblement une ETR très réduite (41 % de l'ETP saisonnière) après l'épuisement des réserves du sol (127 mm d'avril à début juillet). L'écoulement est presqu'entièrement assuré par le drainage des réserves (graphe 7.117).

## 7.3.2. Bassin d'Ankaboka

Le bassin d'ANKABOKA est situé sur le bassin de la BOINAKELI, petit affluent rive droite de la BETSIBOKA, en aval du confluent de l'ISINKO.

Le bassin est situé sur le socle cristallin (migmatites) altéré en latérites (sols ferrallitiques) et recouvert de savane avec quelques arbustes. La pluviométrie sur le bassin (altitude voisine de 200 m) situé à l'ouest de la Tampoketsa de KAMORO doit être voisine de 1 600 mm.

Deux unités emboitées ont été étudiées pendant deux à trois ans .

Bassin total 16°57'S - 46°59'E S = 4.85 km²
Bassin amont (1,5 km plus au sud) S = 1.82 km²

Les observations effectuées de novembre à avril permettent d'approcher les valeurs annuelles (la période représentant environ 95 % du total annuel pluviométrique) (tableau 7.145).

Les années 1959-60 et 1960-61 encadrent, sur l'ISINKO, la valeur du module interannuel. On peut donc évaluer le bilan du bassin (total) d'ANKABOKA :

P voisin de 1 600 mm
H voisin de 550 mm
DE voisin de 1 050 mm
Ke voisin de 34 %

tableau 7.188.

Bassins représentatif d'Ankaboka

| | | | N | D | J | F | M | A | Année* | Qm³/s | DE mm | Ke % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bassin total | 1959-60 | Pmm | (229) | 171 | 608 | 155 | 247 | (56) | 1465 | | | |
| | | Hmm | 29 | 20 | 252 | 74 | 74 | 0 | 449 | .069 | 1016 | 31 |
| | 1960-61 | Pmm | (II) | 453 | 319 | 71 | 279 | (182) | 1314 | | | |
| | | Hmm | 0 | 116 | 144 | 31 | 175 | 81 | 547 | .084 | 767 | 42 |

suite

| | | | N | D | J | F | M | A | Année* | Q m³/s | DE mm | Ke % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bassin amont | 1959- 60 | Pmm | (211) | 185 | 622 | 153 | 264 | 61 | 1495 | | | |
| | | Hmm | 27 | 46 | 260 | 94 | 91 | | 518 | .030 | 911 | 35 |
| | 1960- 61 | Pmm | (12) | 448 | 288 | 74 | 327 | 182 | 1332 | | | |
| | | Hmm | 0 | 155 | 112 | 20 | 174 | 80 | 540 | .031 | 792 | 41 |

* Année (novembre à avril, soit environ 95 % de P et près de 90 % de H).

Les crues observées les plus fortes (pour des précipitations comprises entre 30 et 120 mm) ont des coefficients de ruissellement compris entre 25 et 60 %, selon l'état d'humidité initial du sol (antérieures).

Pour chacun des bassins, les plus fortes crues observées avaient les caractéristiques suivantes :

| | Bassin total | Bassin amont | |
|---|---|---|---|
| Date | 24/25-01-62 | 18-03-61 | 28/29-12-61 |
| P (mm) | 120.5 | 64.5 | 41.3 |
| Lr (mm) | 61.2 | 46.5 | 30.4 |
| Kr (%) | 51.2 | 72.0 | 73.7 |
| Qmax (m³/s) | 72.0 | 22.5 | 31.9 |
| Qmax sp. (l/s/km²) | 14 850 | 12 360 | 17 500 |

L'étalonnage théorique du déversoir a été utilisé entre 1,85 m (plus haute cote jaugée) et 2,71 m (maximum atteint) avec un débit de 72 m³/s.

En ajustant à l'échantillon des 47 plus fortes crues observées sur trois ans (1959-62) une distribution log-normale, on obtient les quantiles suivants (pour le bassin total : 4,85 km²).

| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 45 | 60 | 73 | (110) | (130) |
| q l/s/km² | 9280 | 12400 | 15000 | (22700) | (26800) |

Les étiages n'ont pas été observé. Les débits doivent être très faibles et même nuls la plupart des années.

## 7.3.3. Betsiboka à Ambodiroka

La station d'AMBODIROKA (46°57'E - 16°56'S) est située en rive droite de la BETSIBOKA, en aval du confluent de l'ISINKO et en amont du pont de la RN 4, à une altitude voisine de 135 m. Le bassin, d'une altitude moyenne de 1 020 m, a une superficie de 11 800 km².

Un première station avait été implantée en 1947-48 par la mission E.D.F. à 10 km en aval de la station actuelle. Les observations se sont poursuivies jusqu'en 1952 mais ont été abandonnées en raison de l'instabilité du lit. Une nouvelle échelle a été placée en mai 1949 à AMBODIROKA (doublée d'un limnigraphe). En raison de l'extrême mobilité du lit, les hauteurs observées n'ont pu être traduites en débit et les résultats de cette station sont difficilement exploitables.

Une nouvelle échelle a été placée en amont des chutes en novembre 1957 (doublée par un limnigraphe en octobre 1958).

Les observations sur cette station sont traduites en débit de novembre 1957 à juillet 1975 avec quelques lacunes (juin à août 1974, février à avril 1975).

Cent cinquante-neuf jaugeages ont été effectués à cette station (40 à 7 800 m³/s). Les jaugeages de hautes eaux ont été effectués à partir d'une installation téléphérique. L'extrapolation de la courbe d'étalonnage (méthode de STEVENS) a été menée jusqu'à 20 000 m³/s.

La pluviométrie a été estimée à partir de 17 stations pluviométriques et les précipitations moyennes interannuelles évaluées à 1 500 mm. L'évaluation des valeurs annuelles reste approchée en raison de la taille du bassin.

## 7.3.3.1. Débits moyens mensuels et relations hydropluviométriques

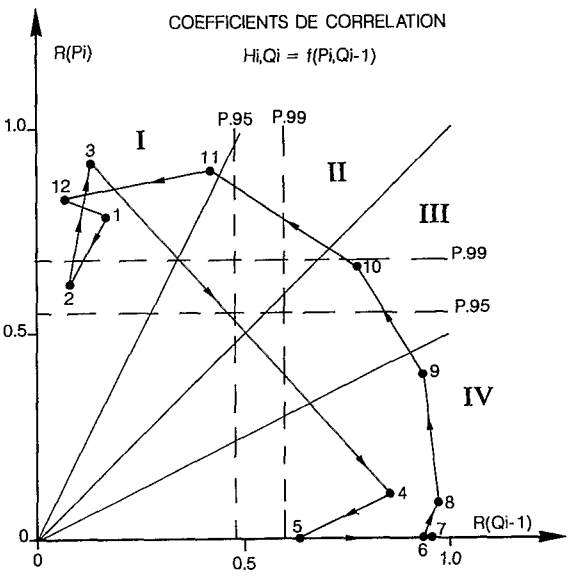
tableau 7.189.

Coefficients de corrélation

| Hi ou Qi | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| en fonction de Pi | .90 | .83 | .79 | .62 | .92 | (.10) | (-.43) | (-.08) | (-.07) | (.09) | (.40) | .66 |
| Pi-i | (.11) | (.11 | (.38) | (.33) | (.02) | .82 | (-.29) | (-.44) | (-.18) | (-.05) | (-.02) | .70 |
| Qi-i | (.42) | (.06) | (.17) | (.08) | (.13) | .85 | .68 | .95 | .95 | .97 | .94 | .78 |

figure 7.118.

Betsiboka à Ambodiroka



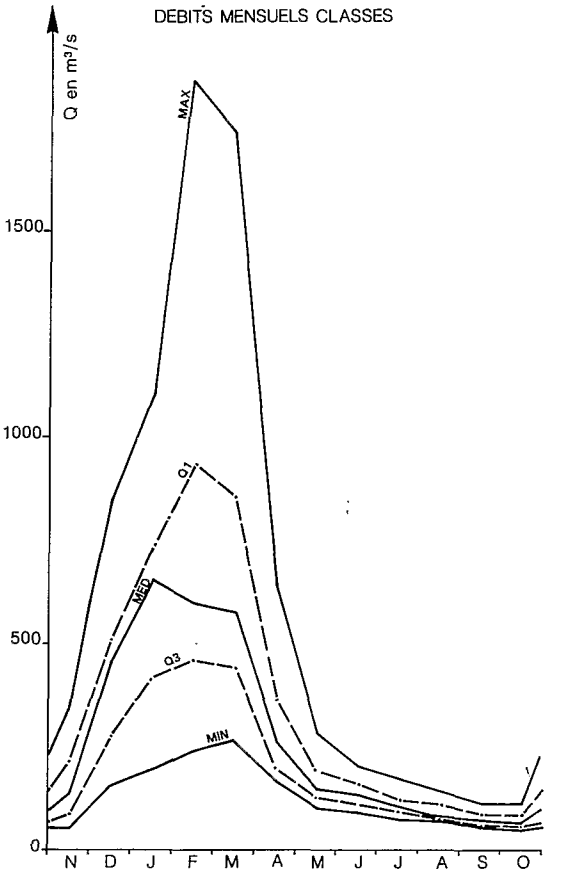
Ces relations sont toutes significatives (graphe 7.118) avec un schéma classique des hauts plateaux : novembre à mars en secteur I (facteur principal : précipitations du mois, influence faible ou négligeable des débits antérieurs). Avril à août en secteur IV (facteur principal : débits antérieurs, influence faible ou négligeable des précipitations du mois). Septembre et octobre en secteur III (facteur principal : débits antérieurs, influence sensible des précipitations du mois).

Ces relations ont permis d'estimer les débits mensuels de novembre 1957, juin à août 1974.

Les débits mensuels et annuels observés sont consignés dans le tableau 7.191. ainsi que les quantiles des débits mensuels (graphe 7.119).

figure 7.119.

Betsiboka à Ambodiroka




Les graphes 7.120 et 7.121 représentent les hydrogrammes annuels d'une année excédentaire (1958-59, Q = 484 m³/s) et d'une année déficitaire (1965-66, Q = 193 m³/s).

On remarquera les très fortes crues observées sur le bassin (fin mars 1959) et l'aspect régulier des écoulements de saison sèche assez peu perturbés.

figure 7.120.

Betsiboka à Ambodiroka

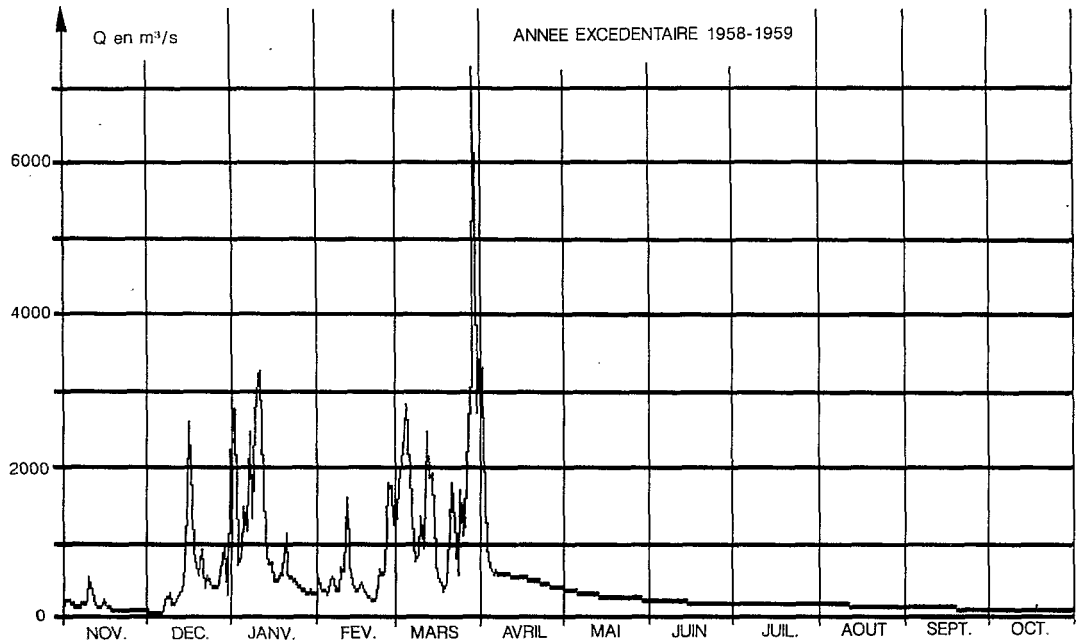
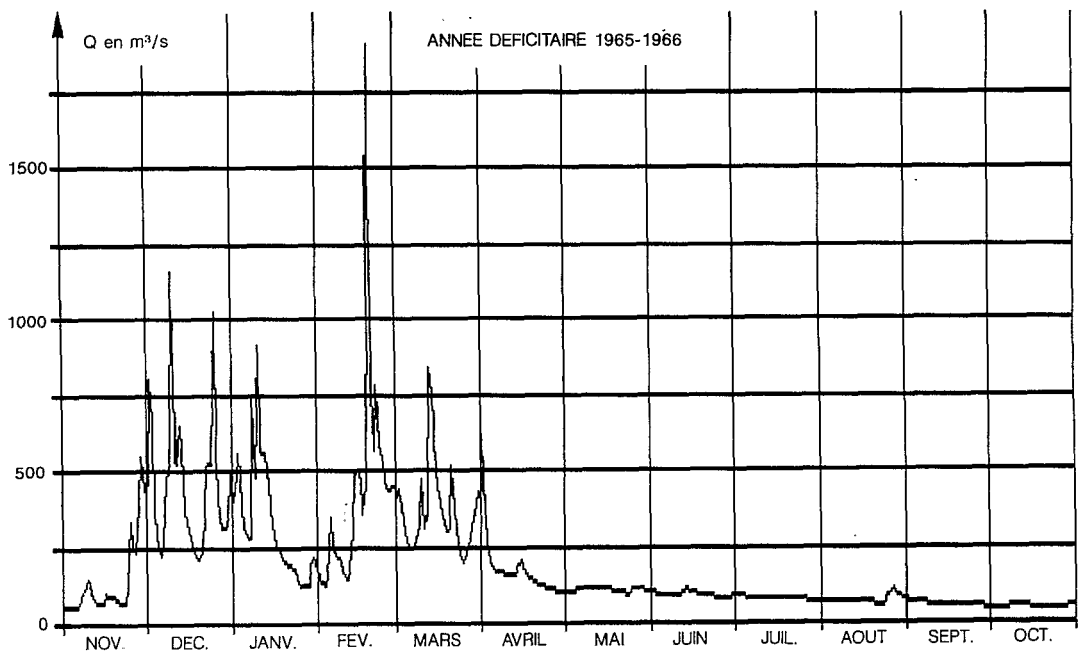



figure 7.121.

Betsiboka à Ambodiroka



| | |
|---|---|
| H11 =.22 P11 + 1.55 H09 - 27 | ($R^2$ = .88 P > .995) |
| H12 =.31 P12 | ($R^2$ = .69 P > .995) |
| H01 =.40 P01 + 10 | ($R^2$ = .62 P > .995) |
| H02 =.66 P02 + .46 P0102 - 210 | ($R^2$ = .76 P > .995) |
| H03 =.60 P03 + .35 P020112 - 114 | ($R^2$ = .89 P > .995) |
| Q04 =.28 Q03 + 102 | ($R^2$ = .72 P > .995) |
| H05 =.15 P12010203 -11 | ($R^2$ = .66 P > .995) |
| Q06 =.69 Q05 + 25 | ($R^2$ = .90 P > .995) |
| Q07 =.72 Q06 + 16 | ($R^2$ = .90 P > .995) |
| Q08 =.81 Q07 + 5 | ($R^2$ = .94 P > .995) |
| Q09 =.71 Q08 + 8 | ($R^2$ = .88 P > .995) |
| Q10 =.87 Q09 + 5 | ($R^2$ = .61 P > .995) |
| H10 =.04 P12010203 + .15 P0910 | ($R^2$ = .77 P > .995) |

tableau 7.190.

Régressions mensuelles

tableau 7.191.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1250100105 Ambodiroka
Rivière : Betsiboka
Pays : Madagascar
Bassin : Betsiboka
Débits en m³/s

Latitude : 16.56.00
Longitude : 46.47.00

Aire : 11 800 km²

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1957/58 | (76.7) | 351. | 675. | 733. | 780. | 244. | 161. | 145. | 124. | 107. | 99.9 | 115. | (299.) |
| 1958/59 | 148. | 538. | 1090. | 598. | 1740. | 637. | 287. | 206. | 175. | 144. | 115. | 93.1 | 484. |
| 1959/60 | 340. | 311. | 711. | 576. | 579. | 210. | 150. | 123. | 102. | 83.1 | 68.1 | 56.3 | 275. |
| 1960/61 | 65.5 | 371. | 719. | 240. | 518. | 373. | 134. | 101. | 94.1 | 74.8 | 59.7 | 49.1 | 234. |
| 1961/62 | 79.7 | 844. | 731. | 1200. | 1100. | 384. | 182. | 136. | 94.4 | 81.9 | 69.8 | 72.2 | 411. |
| 1962/63 | 320. | 509. | 506. | 647. | 413. | 274. | 166. | 165. | 122. | 99.9 | 77.7 | 86.1 | 280. |
| 1963/64 | 213. | 504. | 427. | 779. | 555. | 234. | 150. | 139. | 131. | 113. | 86.8 | 74.7 | 282. |
| 1964/65 | 128. | 522. | 1100. | 1220. | 743. | 362. | 210. | 147. | 125. | 122. | 86.5 | 67.0 | 402. |
| 1965/66 | 138. | 452. | 329. | 417. | 367. | 171. | 107. | 90.6 | 78.8 | 70.3 | 57.6 | 50.0 | 193. |
| 1966/67 | 56.5 | 157. | 640. | 438. | 1100. | 438. | 141. | 120. | 103. | 81.8 | 70.7 | 64.3 | 284. |
| 1967/68 | 297. | 500. | 381. | 406. | 572. | 183. | 127. | 115. | 98.4 | 78.0 | 59.6 | 49.8 | 239. |
| 1968/69 | 101. | 523. | 419. | 485. | 269. | 250. | 116. | 92.3 | 76.3 | 73.2 | 57.4 | 55.2 | 208. |
| 1969/70 | 92.3 | 499. | 862. | 519. | 607. | 191. | 130. | 113. | 95.0 | 84.1 | 65.6 | 52.3 | 276. |
| 1970/71 | 162. | 194. | 724. | 1040. | 486. | 179. | 140. | 119. | 102. | 85.4 | 72.8 | 72.5 | 277. |
| 1971/72 | 262. | 455. | 393. | 1860. | 661. | 304. | 198. | 156. | 127. | 111. | 84.9 | 101. | 387. |
| 1972/73 | 159. | 259. | 818. | 826. | 934. | 315. | 204. | 176. | 148. | 118. | 84.3 | 71.2 | 340. |
| 1973/74 | 139. | 278. | 535. | 559. | 386. | 265. | 242. | (167.) | (114.) | (96.) | 51.3 | 66.6 | (240.) |
| 1974/75 | 83.3 | 179. | 193. | - | - | - | 164. | - | 113. | - | - | - | - |
| 1975/76 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Moyenne | 159. | 414. | 625. | 737. | 695. | 295. | 167. | 136. | 112. | 95.5 | 74.5 | 70.4 | 297. |
| Ecart-type | 90.7 | 169. | 251. | 399. | 365. | 119. | 47.7 | 34.1 | 25.0 | 21.7 | 17.1 | 19.1 | |

suite

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 340. | 844. | 1100. | 1860. | 1740. | 637. | 287. | 206. | 175. | 144. | 115. | 115. | |
| 75% | 213. | 509. | 731. | 933. | 857. | 368. | 198. | 161. | 125. | 112. | 85.2 | 80.4 | |
| Méd. | 139. | 454. | 658. | 598. | 579. | 265. | 159. | 136. | 108. | 85.4 | 70.7 | 67.0 | |
| 25% | 83.3 | 278. | 419. | 461. | 448. | 200. | 134. | 114. | 95.0 | 79.9 | 59.6 | 53.7 | |
| Min. | 56.5 | 157. | 193. | 240. | 269. | 171. | 107. | 90.6 | 76.3 | 70.3 | 51.3 | 49.1 | |

## 7.3.3.2. Apports annuels

Les relations statistiques entre lames annuelles écoulées de la BETSIBOKA et précipitations sur le bassin ou lames annuelles de l'IKOPA (à ANTSATRANA) sont significatives :

$H = .94 (P - 707)$ $(R^2 = .72\ P > .995)$

$H = .75 (P - 1650 (1 - 2.08\ Cp))$ $(R^2 = .82\ P > .995)$

$H_{BETS.} = 1.81\ H_{IKOPA} - 588$ $(R^2 = .75\ P > .995)$

$H_{BETS.} = 1.91\ H_{IKOPA} + .08 (P_B - P_I) - 650$ $(R^2 = .84)$

$P_B - P_I$ = différence des précipitations sur la Betsiboka et l'Ikopa.

Ces relations ont permis d'estimer les apports sur la BETSIBOKA, de 1948-49 à 1956-57 (et 1974-75) à partir de l'IKOPA et en 1945-46 à 1947-48 à partir de P et Cp.

| Année | 45-46 | 46-47 | 47-48 | 48-49 | 49-50 | 50-51 | 51-52 | 52-53 | 53-54 | 54-55 | 55-56 | 56-57 | 74-75 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hmm | 625 | 775 | 645 | 590 | 710 | 730 | 815 | 800 | 735 | 955 | 465 | 865 | 910 |
| Qm³/s | 234 | 290 | 241 | 221 | 266 | 273 | 304 | 299 | 275 | 357 | 174 | 324 | 340 |

La loi de distribution ajustée à l'échantillon des 30 valeurs annuelles (observées et calculées) fournit les quantiles suivants :

tableau 7.192.

Betsiboka à Ambodiroka
Apports annuels

| | Années sèches | | | | Médiane | Années humides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Hmm | 492 | 532 | 572 | 627 | 752 | 912 | 1010 | 1105 | 1220 |
| Q m³/s | 184 | 199 | 214 | 234 | 281 | 341 | 378 | 413 | 456 |
| q l/s/km² | 15.6 | 16.9 | 18.1 | 19.8 | 23.8 | 28.9 | 32.0 | 35.0 | 38.6 |

Loi log-normale (test B.M.) : 2.51, échelle : 587 mm, position : 165 mm, forme : .286)
Centenales sèche et humide : 467 mm (Q = 175 m³/s) et 1 310 mm (Q = 490 m³/s)

## 7.3.3.3. Crues

### *7.3.3.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux*

L'extrapolation de type logarithmique, menée de 4,06 (cote du plus fort jaugeage) à 6,20 m, s'appuie sur les résultats des mesures de hautes eaux réalisées lors du passage des cyclones Félicie (01/71) et Eugénie (02/72).

tableau 7.193.

Betsiboka à Ambodiroka
Maximums annuels de crues

| Année | Qm³/s | Date | Hm | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1957-58 | 4110 | 22/01/58 12h00 | 3,22 | 3rel |
| 1958-59 | 19500 | 29/03/59 15h00 | 5,67 | PHE |
| 1959-60 | 2220 | 25/11/59 06h00 | 2050 | 3rel |
| 1960-61 | 2520 | 06/01/61 12h00 | 2,62 | 3rel |
| 1961-62 | 25900 | 09/12/61 12h00 | 2,65 | Min |
| 1962-63 | 3140 | 02/01/63 06h00 | 2,87 | 3rel |
| 1963-64 | 2110 | 30/12/63 12h00 | 2,45 | 3rel |
| 1964-65 | 12300 | 15/01/65 18h00 | 4,80 | 3rel |
| 1965-66 | 2590 | 19/02/66 12h00 | 2,65 | 3rel |
| 1966-67 | 3170 | 18/01/67 12h00 | 2,88 | 3rel |
| 1967-68 | 2370 | 14/03/68 15h00 | 2,56 | 3rel |
| 1968-69 | 3940 | 28/01/69 06h00 | 3,16 | Lim |
| 1969-70 | 8340 | 15/01/70 03h00 | 4,17 | Lim |
| 1970-71 | 8220 | 30/01/71 18h00 | 4,15 | Lim |
| 1971-72 | 13600 | 14/02/72 09h00 | 4,95 | PHE |
| 1972-73 | 6390 | 30/01/73 18h00 | 3,80 | PHE |
| 1973-74 | 4760 | 15/03/74 12h00 | 3,41 | Min |
| 1974-75 | 6490 | mars 1975 ? | 3,82 | PHE |
| 1975-76 | | | | |
| 1976-77 | 6440 | | 3,81 | PHE |

### *7.3.3.3.2. Résultats de l'enquête historique*

Ils proviennent essentiellement de renseignements recueillis plus en aval, sur le site de l'ancien pont : mesures des Travaux publics de 1926 à 1928, observation lors des travaux de récupération des superstructures en 1945-46 (?), observations régulières de l'ORSTOM de janvier 1968 à février 1969 et relevés de plus hautes eaux antérieures ou postérieures à cette période.

| Année | PHE station | PHE ancien mont |
|---|---|---|
| 1926-27 | (6,20) | 63,50 Ancien système de référence (4,95 m au-dessus des PBE) |
| 1927-28 | (4,42) | 61,60 Ancien système de référence |
| 1945-46 | (5,67) | ≥ 52,98 ≥ repère ORSTOM sur pile (témoignage) |
| 1958-59 | 5,67 | ≥ 52,98 Délaissée ancienne sommet pile |
| 1968-69 | 3,16 | 50,53 NGM |

Considérée à l'époque comme "formidable", car les données antérieures fixaient la cote des plus hautes eaux 1,50 m plus bas, la crue du 4/03/1927 est probablement la plus forte crue connue de la période 1920-1977, dépassant largement les maximums des années 1945-46 (?) et 1958-59.

Une année sur deux, le maximum est observé entre le 6 janvier et le 19 février (date mediane : 22 au 28 janvier - dates extrêmes : 25 novembre et fin mars).

L'ajustement d'une loi de Goodrich à l'échantillon des 18 valeurs observées, complétée par une réévaluation des récurrences rares en tenant compte de l'information historique dans les valeurs suivantes :

tableau 7.194.

Betsiboka à Ambodiroka

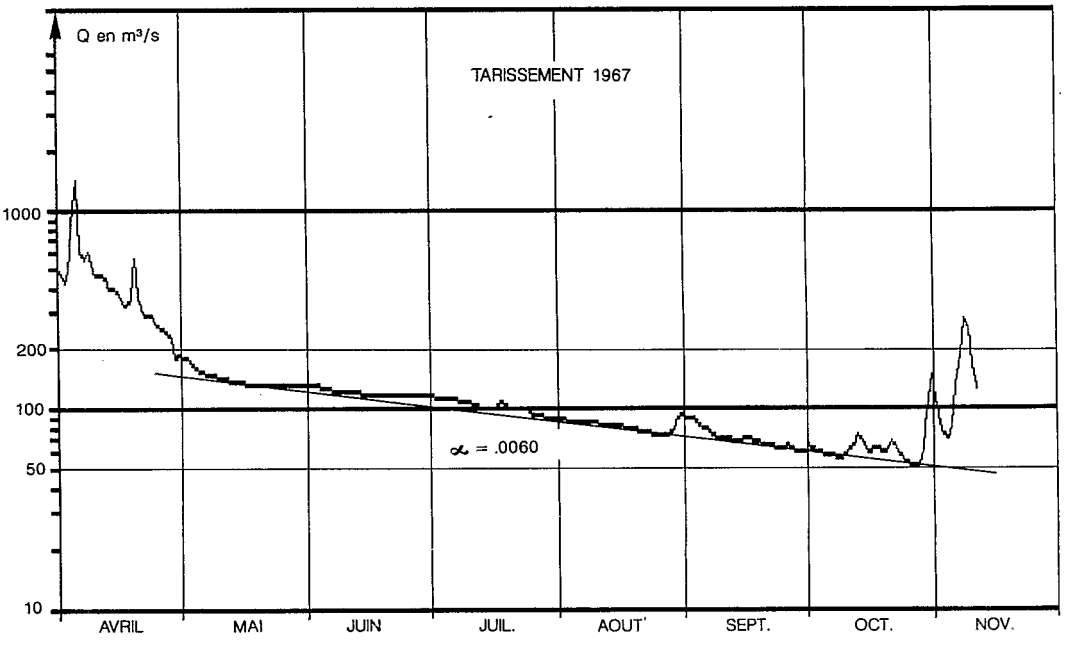
| Période de retour T (ans) | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q m³/s (échantillon) | 4190 | 8380 | 12100 | (21900) | (26500) |
| Q m³/s (info. histor.) | | | | 21400 | 25300 |
| q l/s/km² | 355 | 710 | 1020 | (1810) | (2140) |

## 7.3.3.4. Basses eaux

La courbe de tarissement moyenne (graphe 7.122) ajustée sur les débits de base de saison sèche a pour expression :
$Q = Q_o * e^{-.0061T}$ (Qo moyen, 135 m³/s)
Ce qui correspond à un stock initial de 162 mm.

figure 7.122.

Betsiboka à Ambodiroka



Les débits caractéristiques de basses eaux observés sont consignés dans le tableau 7.195.

Les relations entre débits caractéristiques sont les suivantes :

| | | |
|---|---|---|
| DCE = QJMIN + 4.8 | ($R^2$=.95) | DCE/QJMIN = 1.09 |
| DC11 = 1.03 QJMIN + 10.4 | ($R^2$= .88) | DC11/QJMIN = 1.23) |
| DC9 = 1.46 QJMIN + 14.6 | ($R^2$ =.68) | DC9/QJMIN = 1.73) |
| QJMIN = 3.8 $Q_{05}$ $^{.52}$ | ($R^2$ = .45) | |
| QJMIN = .03 $\Sigma$ P $_{03\ 12}$ + 5.8 | ($R^2$ = .50) (P>.99) | |

L'échantillon des valeurs minimales de débit journalier peut être étendu à partir de la regression entre les débits d'étiage de la BETSIBOKA et ceux de l'IKOPA.

QJMIN BETS. = .62 QJMIN IKOP. - 4.2 ($R^2$ = .39 P >.99)

tableau 7.195.

Betsiboka à Ambodiroka
Débits caractéristiques
de basses eaux ($m^3/s$)

| Année | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1958 | 1,14 | 77,5 | 69,7 | 57,4 | 06-12 |
| 1959 | 137 | 94,0 | 86,7 | 84,8 | 02-11 |
| 1960 | 78,3 | 53,3 | 42,8 | 38,4 | 18+11 |
| 1961 | 71,4 | 50,8 | 45,5 | 41,9 | 03-11 |
| 1962 | 87,0 | 68,0 | 64,6 | 62,7 | 14-10 |
| 1963 | 109 | 74,7 | 64,8 | 60,3 | 13-10 |
| 1964 | 107 | 73,2 | 66,6 | 60,5 | 30-10 |
| 1965 | 111 | 69,7 | 60,3 | 53,4 | 05-11 |
| 1966 | 61,4 | 49,5 | 47,0 | 43,8 | 06-12 |
| 1967 | 88,2 | 64,4 | 57,9 | 51,2 | 27-10 |
| 1968 | 76,4 | 48,3 | 42,7 | 37,2 | 11-11 |
| 1969 | 69,3 | 53,4 | 52,1 | 48,7 | 25-11 |
| 1970 | 84,8 | 57,6 | 49,2 | 46,0 | 28-10 |
| 1971 | 88,6 | 69,5 | 57,1 | 53,5 | 01-11 |
| 1972 | 109 | 82,9 | 74,4 | 68,1 | 06-10 |
| 1973 | 115 | 74,6 | 64,5 | 56,6 | 04-11 |
| 1974 | 72.2 | 59.0 | 50.5 | 48.9 | 20.09 |

| | DC9 | DC11 | DCE | QJmin | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Max. | 137 | 94,0 | 86,7 | 84,8 | 06-12 |
| Q1 | 110 | 74,7 | 65,7 | 60,4 | 15-11 |
| Méd. | 88,2 | 68,0 | 57,9 | 53,4 | 02-11 |
| Q3 | 74,3 | 53,3 | 48,1 | 44,9 | 20-10 |
| Min. | 61,4 | 48,3 | 42,7 | 37,2 | 20-09 |

L'étiage est observé, une année sur deux, entre le 20 octobre et le 15 novembre.

Le coefficient de tarissement a est influencé par le débit initial $Q_o$ (potentiel des nappes).

$\alpha = (.145\ Q_o + 42)\ .10^{-4}$ ($R^2$ = .32 P>.975)

Ajustée à l'échantillon étendu de 26 valeurs (observées et calculées), la loi de distribution correspond aux quantiles suivants :

tableau 7.196.

Débits minimaux journaliers

| | Années sèches | | | Médiane | Années humides | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Récurrence | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Q m³/s | 37.5 | 40.0 | 43.5 | 52.5 | 65.6 | 74.7 | 83.6 |
| q l/s/km² | 3.2 | 3.4 | 3.7 | 4.45 | 5.6 | 6.3 | 7.1 |

Loi log-normale (test B.M. = .96, échelle : 28.7 m³/s, position : 23.8 m³/s, forme = .447)
Cinquantennales sèche et humide : 35.2 m³/s (3.0 l/s/km²) et 95.6 m³/s (8.1 l/s/km²)

Les débits d'étiage spécifiques de la BETSIBOKA sont plus faibles (en moyenne) et plus irréguliers que ceux de l'IKOPA, ce qui traduit la présence sur le bassin d'aquifères moins développés que sur le bassin adjacent de l'IKOPA.

## 7.3.3.5. Bilan hydrologique

Avec une pluviométrie moyenne interannuelle de 1 500 mm, la lame écoulée interannuelle (780 mm) correspond à un déficit moyen d'écoulement de 720 mm (KE = 52 %).

Les courbes moyennes H = F (P) et DE = F (P) sont représentées sur le graphe 7.123.

En raison d'une certaine imprécision sur la détermination des précipitations annuelles, la dispersion des points reste large autour de la courbe moyenne H = F (P) qui a été tracée en tenant compte des écarts déterminés par la concentration des précipitations mensuelles Cp. Les lames croissent de H = 500 mm (pour P = 1 050 mm, KE = 48 %) à H = 1 100 mm (pour P = 2 000 mm, KE = 55 %). Le déficit d'écoulement semble atteindre une limite supérieure de l'ordre de 900 mm (inférieure de 200 mm à l'ETP régionale estimée) en raison de la relative sévérité de la saison sèche.

figure 7.123.

Betsiboka à Ambodiroka

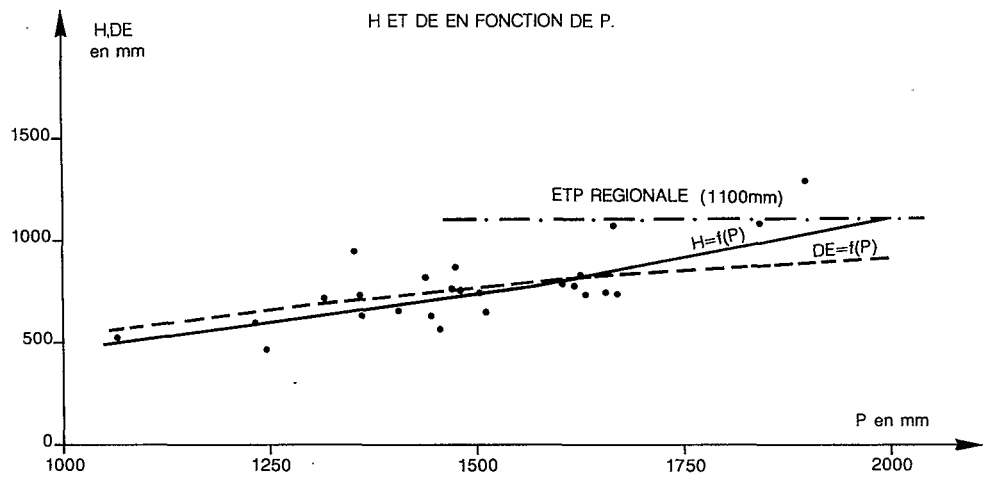


tableau 7.197.

Betsiboka à Ambodiroka
Bilan hydrologique mensuel (mm)

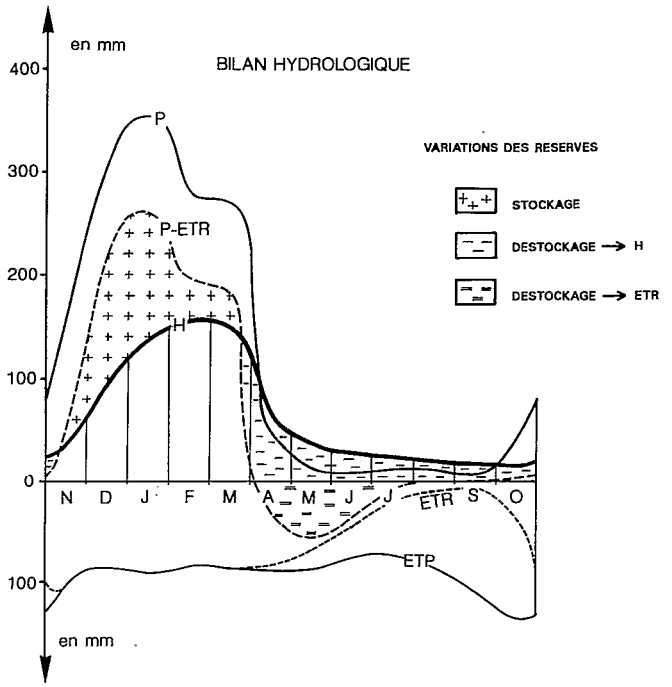
| | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 156 | 305 | 352 | 278 | 269 | 51 | 14 | 9 | 11 | 10 | 7 | 38 | 1500 |
| ETP | 100 | 86 | 92 | 84 | 88 | 86 | 88 | 76 | 73 | 86 | 107 | 134 | 1100 |
| ETR | 100 | 86 | 92 | 84 | 88 | 81 | 70 | 45 | 21 | 10 | 7 | 36 | 720 |
| P-ETR | 56 | 219 | 260 | 194 | 181 | -30 | -56 | -36 | -10 | 0 | 0 | 2 | 780 |
| H | 36 | 94 | 136 | 154 | 151 | 63 | 37 | 29 | 25 | 22 | 17 | 16 | 780 |
| Δ R+ | 20 | 125 | 124 | 40 | 30 | | | | | | | | + 339 |
| Δ R- | | | | | | 93 | 93 | 65 | 35 | 22 | 17 | 14 | - 339 |
| R | 20 | 145 | 269 | 309 | 339 | 246 | 153 | 88 | 53 | 31 | 14 | 0 | |

Les précipitations de novembre à mars (1 360 mm, 91 % du total annuel) permettent la satisfaction de l'ETP (450 mm) et après recharge des nappes et rehumidification des sols (stock fin mars : 339 mm) nourissent les écoulements (571 mm, 73 % du total annuel)

En saison sèche (avril - octobre), l'ETR est assez fortement réduite (42 % de l'ETP de la saison) après épuisement

figure 7.124.

Betsiboka à Ambodiroka

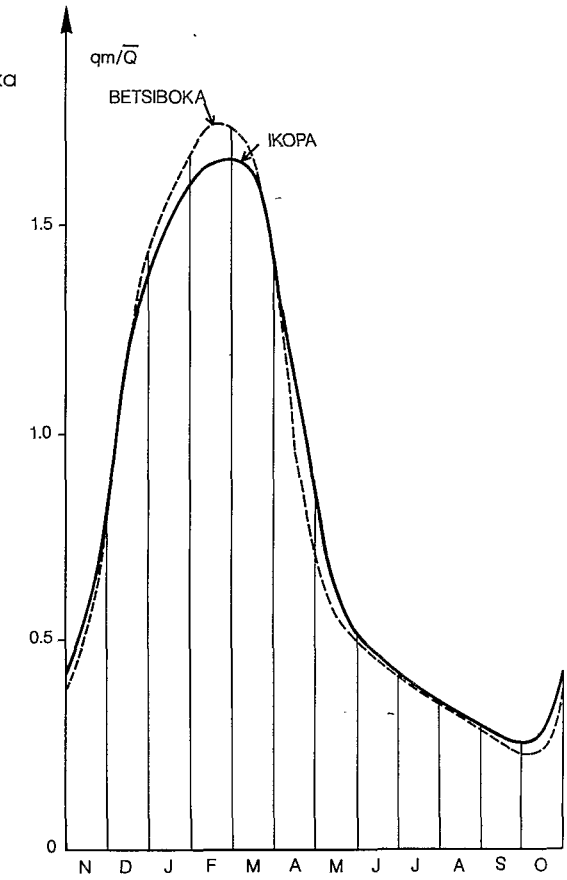


des réserves utiles des sols (avril à début juillet). L'écoulement de saison sèche est presque totalement assuré à partir du drainage des réserves stockées en saison des pluies dans les altérites (graphe 7.124).

Le bilan schématique est assez semblable à celui de l'IKOPA, mais avec des écoulements de saison des pluies plus abondants, une moindre constitution de réserves et, par conséquent, des étiages légèrement moins soutenus. Le graphe 7.125 qui représente l'évolution des rapports qm/Q (débits mensuels/module), met en évidence ces différences.

figure 7.125.

Coefficients qm/Q
de l'Ikopa et de la Betsiboka




## 7.4. Transports solides

Des mesures de transports en suspension ont été effectuées en 1955-56 et 1960-61 sur l'IKOPA à AMPOTOKA et ANTSATRANA et sur la BETSIBOKA à AMBODIROKA.

Les mesures de charges solides, effectuées uniquement en surface, ont été comprises :
- entre 100 et 1 000 g/m³ pour l'IKOPA (une mesure exceptionnelle de 2,2 kg/m³) ;
- entre 1 000 et 8 000 g/m³ pour la BETSIBOKA (maximum : 11 kg/m³ pour un débit de 1870 m³/s).

Des relations graphiques sommaires entre la charge mesurée et le débit liquide correspondant ont permis d'évaluer l'ordre de grandeur des valeurs annuelles moyennes de transports en suspension, soit : 560 tonnes/an/km² pour l'IKOPA et 1 660 tonnes/an/km² pour la BETSIBOKA.

Ces valeurs correspondent à une ablation spécifique de .24 mm pour l'IKOPA et 1.1 mm (soit 4 fois plus) pour la BETSIBOKA dont une partie des matériaux géologiques du bassin est moins cohérente et plus propice à l'érodibilité.

La même contraste est observé dans la composition moyenne des matériaux transportés :

| | Argiles | Limons | Sables fins | Sables grossiers |
|---|---|---|---|---|
| IKOPA | 47 % | 31 % | 20 % | 1 à 2 % |
| BETSIBOKA | 37 % | 32 % | 30 % | 1 à 2 % |

Rappelons que les mesures effectuées ne concernent que les transports de surface (matières fines en suspension) et que les valeurs présentées (érosion annuelle et pourcentage de sables grossiers) sont, par conséquent, minorées.

## 7.5. Kamoro et petits affluents du delta de la Betsiboka

La KAMORO, dernier affluent important de rive droite de la BETSIBOKA, est issue de la Tampoketsa du KAMORO, sur le socle. Elle rejoint la BETSIBOKA dans la dépression d'AMBATO-BOENY après avoir capté une partie des eaux de la MAHAJAMBA par l'intermédiaire d'un défluent actif entre MORAFENO et AMBONAROMANY.

### 7.5.1. Kamoro à la RN 4

Le bassin propre de la KAMORO, au niveau du défluent, est de 1 575 km² et, en y intégrant le bassin de la MAHAJAMBA, en amont de la capture, de 11 300 km².

La station du pont de la RN 4 (16°29'S - 47°11'E), à 40 m d'altitude, a fait l'objet de mesures et d'observations de 1980 à 1983. 15 jaugeages (entre 19 et 445 m³/s) y ont été effectués. La section sableuse est très instable et se remanie lors des crues. L'étalonnage (4 courbes de basses eaux) est assez correcte jusqu'aux moyennes eaux mais manque de précision.

Les débits moyens mensuels de la période sont les suivants (en m³/s) :

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Module |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (118) | (188) | (208) | (236) | (260) | (198) | (83) | 63.3 | 48.2 | 37.3 | 34.7 | 64.0 | (128) |

Le module, probablement sous-estimé par manque de précision sur les hautes eaux, correspond à un débit spécifique de 11.3 l/s/km² (360 mm) en se rapportant à la superficie globale MAHAJAMBA + KAMORO (11 300 km²) mais cette valeur manque de signification, puisqu'en étiage, environ 1/3 à la moitié des débits s'écoulent en aval de

la capture (MAHAJAMBA aval) et qu'en crue, on ne connait pas avec assez de précision la répartition des débits.

On estime que, depuis février 1903, la majeure partie des débits de moyennes et de hautes eaux sont drainées vers le KAMORO, l'ensemble constituant un bassin de 11 300 km².

Des jaugeages de hautes eaux, réalisés les 30 et 31/01/73 (cyclone Hortense) au pont du KAMORO, ont permis le tracé d'un étalonnage moyen de hautes eaux et l'évaluation des débits des plus fortes crues connues de la période 1930-1983.

| Année | Qm³/s | Date | H NGM |
|---|---|---|---|
| 1932-33 | 8660 | 19-20/02/33 | 41,15 |
| 1981-82 | 7870 | | 40,68 |
| (1927-28) | 7860 | | 40,67 |

Des ordres de grandeur des crues décennale et cinquantennale ont été estimés à partir des résultats de l'étude statistique menée sur la BETSIBOKA à AMBODIROKA.

Crue décennale : (4250) m³/s 380 l/s/km² *
Crue cinquantennale : (6750) m³/s 600 l/s/km² *
* rapporté au bassin total KAMORO-MAHAJAMBA (11300 km²).

En étiage, les valeurs suivantes ont été observées :

| Kamoro à RN 4 | | Mahamjamba en aval de la capture | |
|---|---|---|---|
| 07.10.1980 | 26.9 m³/s | | |
| 1981 | < 19.1 m³/s | 11.10.81 | 15.8 m³/s |
| 27.09.1982 | 27.1 m³/s | 14.10.82 | 14.1 m³/s |
| 19.10.1983 | 26.1 m³/s | | |

## 7.5.2. L'Andranomandevy

L'ANDRANOMANDEVY est un petit tributaire de la KAMORO et la rejoint au niveau d'ANJIAJIA. Ce petit bassin s'étend sur des sols arenacés du crétacé moyen et dans son cours inférieur comporte de nombreuses rizières.

La station du pont de la RN 4 (16°22'S - 46°59'E) contrôle un bassin de 67.5 km². Les débits de saison sèche (avril à novembre) ont été observés de 1980 à 1983. Les débits d'étiage observés ont les valeurs suivantes :

23.09.80 .255 m³/s (3.78 l/s/km²)
31.08.81 .145 m³/s (2.15 l/s/km²)
22.08.82 .117 m³/s (1.74 l/s/km²)
01.10.83 .153 m³/s (2.27 l/s/km²)

## 7.5.3. La Marovoay

La MAROVOAY est un petit affluent rive droite de la BETSIBOKA qu'elle rejoint en rive droite par une zone de casiers rizicoles, juste en amont au delta.

Quelques mesures et observations réalisées lors du passage du cyclone Clotilde (15/01/76) et les années suivantes, ont permis après enquête une évaluation des débits des crues de la MAROVOAY, et en aval de la retenue d'AMPIJOROA, au niveau de la RN4.

| Année | H NGM | Qm³/s | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1970-71 | 33,67 | (30,3) | PHE |
| 1976-77 | 33,48 | (24,9) | PHE |
| 1972-73 | | | |
| 1971-72 | | | |
| 1977-78 | 32,72 | 11,2 | PHE |
| 1975-76 | 32,69 | 10,8 | PHE |

Le débit de crue decennale a été estimé à 23 m³/s.

## 7.5.4. La Karambo

Enfin, une petite rivière côtière, la KARAMBO, qui rejoint directement le delta de la BETSIBOKA, dans la région de MAROVOAY, a été observée de 1980 à 1983.

La station de BETSIREBIKA (16°10S - 46°45E) sur la KARAMBO contrôle un bassin de 189 km². Un étalonnage sommaire (19 jaugeages de basses eaux) a permis d'évaluer les débits moyens mensuels d'octobre 1981 à décembre 1983.

tableau 7.198.

Karambo à Betsirebika
Débits moyens mensuels et annuels (en m³/s)

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1980/81 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.529 | 0.590 | - |
| 1981/82 | 0.693 | 0.696 | 1.30 | 1.52 | 1.39 | 0.822 | 0.646 | 0.60 | 0.581 | 0.560 | 0.559 | 0.534 | 0.821 |
| 1982/83 | 0.781 | 1.05 | 2.17 | 2.06 | 1.27 | 0.732 | 0.633 | 0.596 | 0.557 | 0.537 | 0.533 | 0.544 | 0.949 |
| 1983/84 | 0.808 | 2.05 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Le module (0.9 à 1 m³/s) correspond à une lame interannuelle de 150 à 170 mm pour une pluviométrie moyenne

de 1 500 mm (KE voisin de 10 à 11 %). Le bassin est situé sur un plateau à faible pente parsemé de zones dépressionnaires et marécageuses.

Les mesures et observations, effectuées très épisodiquement entre 1975 et 1983 permettent une estimation des débits maximaux annuels de crue de l'année 1975-76 (cyclone Clotilde) et de la période 1979-83.

| Année | Qm³/s | Contrerepère RN 4 | Betsirebika |
|---|---|---|---|
| 1975-76 | 5,4 | - 2,05 | |
| 1979-80 | 15,0 | | 2,30 |
| 1980-81 | 9,5 | | 2,07 |
| 1981-82 | 14,5 | | 2,28 |
| 1982-83 | 17,0 | | 2,39 |

Le débit decennal de crue a été estimé à 16 m³/s (85 l/s/km²).

Cette faible valeur spécifique traduit l'influence des faibles pentes du bassin et l'ecretement des débits dans les zones marécageuses.

Les débits d'étiage sont par contre assez soutenus et très réguliers :
.514 m³/s (2.72 l/s/km²) le 03.09.81
.481 m³/s (2.55 l/s/km²) le 01.10.82
.484 m³/s (2.56 l/s/km²) le 04.11.83

# 8. BASSIN DE LA MAHAJAMBA

La MAHAJAMBA, issue des hauts plateaux de l'ANJAFY après avoir quitté la plaine d'altitude (700 m) délimitée par les tampoketsa du KAMORO et de BEVEROMAY, rejoint le sédimentaire dans la zone dépressionnaire MAMPIKONY-MAEVATANANA.

C'est dans cette dépression qu'une partie importante de ses apports est capturée par la KAMORO. Les débits résiduels, en aval de la capture, transitent par une vallée étroite recoupant le plateau calcaire du BOGONLAVA et rejoignent le canal de MOZAMBIQUE dans une zone marécageuse fermant la baie de la MAHAJAMBA.

Difficilement accessible en permanence, la MAHAJAMBA n'a fait l'objet que d'observations épisodiques.

À ANDROKA (15°55'D - 47°10 - 13 050 km²), quelques mesures de débit en fin de saison sèche 1981 ont été effectuées.

Le débit mesuré le plus faible (14.1 m³/s) doit correspondre à l'étiage résiduel (déduction faite de la capture de

Avec beaucoup de prudence compte tenu du caractère sommaire des observations, on estimera l'étiage moyen de l'ensemble KAMORO-MAHAJAMBA (soit un bassin global de l'ordre de 15 500 km²) à environ 30 m³/s (1.9 l/s/km²).

Un petit affluent de la MAHAJAMBA a été étudié de 1980 à 1984.

La MASOKOENJA, au bassin très plat sur des formations sédimentaires gréseuses, rejoint les plaines alluviales de la MAHAJAMBA inférieure au niveau du delta marécageux.

La station d'AMBALABE (TSINJORANO) située à l'amont de la prise alimentant la plaine d'AMBALABE (15°47 S - 46°57'E) contrôle un bassin de 230 km².

Un étalonnage de basses eaux, établi à partir de 10 jaugeages (6 l/s à 153 m³/s), a permis d'estimer les débits journaliers (avec de nombreuses lacunes pour les hautes eaux).

| Année | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1979-80 | | | | | | | | | | | | .017 |
| 1980-81 | .004 | - | - | - | - | - | .0013 | .0013 | .0013 | .006 | 0 | 0 |
| 1981-82 | - | - | - | 12.2 | 15.7 | 7.26 | .481 | .236 | .051 | .0013 | .158 | .891 |
| 1982-83 | 6.2 | - | - | - | - | .388 | .185 | .287 | .183 | .012 | 0 | 0 |
| 1983-84 | 1.32 | 18.1 | | | | | | | | | | |

On assiste à un tarissement de la rivière en saison sèche.

L'arrêt complet de l'écoulement superficiel apparaît généralement au mois d'août. Il se poursuit jusqu'en octobre ou novembre suivant les dates de reprise des premières pluies.

Les hauteurs maximales relevées d'après les délaissés de crue ont été :

de 15,19 m en 1982 pour un débit estimé à 450 m³/s soit 1950 l/s/km² ;
de 14,40 m en 1983 pour un débit estimé à 170 m³/s soit 740 l/s/km².

# 9. BASSIN DE LA SOFIA

Dernier grand fleuve de la côte ouest (27 300 km²), la SOFIA est issue des hauteurs prolongeant au sud le massif du TSARATANANA. Après avoir été rejointe par la MANGARAHA, issue du seuil de MANDRITSARA, la SOFIA s'incline vers l'ouest et reçoit ses deux principaux affluents : l'ANJOBONY qui draine la tampokesta d'ANALAMAITSO et la BEMARIVO qui draine une large vallée délimitée par l'ANALAMAITSO au nord-est et la tampoketsa de BEVEROMAY à l'ouest. La SOFIA rejoint ensuite la baie de la MAHAJAMBA.

En raison des difficultés d'accès, la SOFIA n'a fait l'objet que d'observations épisodiques qui ne permettent pas de caractériser correctement les régimes.

## 9.1. Haut bassin de la Sofia

### 9.1.1. La Sofia à Antafiatsalana

Les coordonnées de la station sont 15° 31' S - 48° 37' E.

Le bassin de la SOFIA supérieure a une superficie (à la station) de 4 100 km². Dix-sept jaugeages (entre 9.8 et 305 m³/s) ont été effectués en 1968-69.

Débits mensuels et annuels 1968-69

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 190 | (164) | 130 | 102 | 732 | 654 | 398 | 368 | (28.0) | (29,7) | 22,7 | (12,0) | 60,2 |

Soit, pour une précipitation moyenne annuelle de 1 540 mm, un déficit d'écoulement de 1 080 mm (KE = 30 %). L'année 1968-69 est plutôt excédentaire (pluviométrie moyenne interannuelle estimée à 1 340 mm). La lame moyenne interannuelle doit être comprise entre 300 et 350 mm.

Les étiages absolus observés sont de :

8.20 m³/s (2. l/s/) en 1968
et 8.42 m³/s (2.05 l/s/) en 1969

Pour cette station installée en août 1968, une assez forte extrapolation a dû être menée de 2,33 m (Q = 538 m³/s) à 5,80 m, afin d'évaluer les débits des crues les plus importants des périodes 1968-1977 (PHE 1976-77) et 1958-1977 (PHE 1958-59).

| Année | Qm³/s | Ancienne échelle | Nouvelle échelle | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| 1958-59 | 3000 | 5,80 | | PHE |
| 1972-73 | 2300 | 5,05 | | PHE |
| 1976-77 | 2450 | 5,22 | 4,97 | 3rel |

En tenant compte de l'information historique, les valeurs suivantes ont été évaluées :

| Période de retour T (ans) | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|
| Q m³/s | 940 | 2850 | (3700) |
| q l/s/km² | 230 | 695 | (900) |

Les débits des autres stations observées sur le haut bassin de la SOFIA sont plus imprécis (en raison du nombre insuffisant de jaugeages de hautes eaux). Nous citerons les valeurs estimées (à retenir avec beaucoup de prudence) correspondant aux observations effectuées.

## 9.1.2. Sandrangita à Kalandy

(15°44'S - 48°43'E, 366 km²) débit moyen annuel 1968-69 : (2.23 m³/s) (190 mm pour une précipitations annuelle évaluée à 1 100 mm).

L'extrapolation de la courbe de tarage de hautes eaux demeure forte (de 1,65 m à 7,00m) pour cette station réinstallée fin 1970 au pont de la RN32 (de 1968 à 1970 - Gué d'ANTANANDAVA - A = 366 km²).

| Année | Hm | Qm³/s | Obs. |
|---|---|---|---|
| (1958-59) | 7,00 | 660 | PHE |
| 1972-73 | 6,00 | 500 | |
| 1976-77 | 5,15 | 385 | 3rel |
| 1970-71 | 3,24 | 167 | |

Le relevé du maximum de l'année 1958-59 et des plus hautes eaux de la période 1970-1977 ont permis une évaluation très sommaire du maximum décennal de crue, soit 300 m³/s (820 l/s/km²).

## 9.1.3. Mangaraha à Mandritsara

La station de MANDRITSARA, située en amont de la station d'AMBODIAJAVY, contrôle un bassin de 1 320 km².

Installée au pont de la RN3a en novembre 1969, cette station est correctement étalonnée jusqu'à la cote 2,18 m, mais l'extrapolation demeure très forte pour l'évaluation des débits :

- de la crue de mars 1959, considérée comme au moins aussi forte que la crue de mars 1901 (inondations des bas-quartiers de MANDRITSARA) ;

- des plus hautes eaux de l'année 1972-73, crue la plus importante de la période 1968-1980.

| Année | Qm³/s | H NGM | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1900-01 | (1950) | | |
| 1958-59 | (1950) | 301,63 | PHE |
| 1972-73 | (1360) | 300,40 | PHE |

Un ordre de grandeur des crues décennale et cinquantennale a été estimé en s'appuyant sur les résultats des stations les plus proches (BEMARIVO à ANDRANOMIDITRA) ou plus aval (SOFIA RN 6).

| Période de retour T (ans) | 10 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|
| Q m³/s | 610 | 1850 | (2400) |
| q l/s/km² | 460 | 1400 | (1800) |

### 9.1.4. Mangaraha à Ambodiaviavy

(15°50'S - 48°44'E, 1500 km²) débit moyen annuel 1968-69 (4 m³/s) soit 80 mm pour une précipitation annuelle de 970 mm.

### 9.1.5. Amboaboa à Andrafiamamy

(15°50'S - 48°43'E, 698 km²) débit moyen annuel 1968-69 (4.3 m³/s) soit 220 mm pour une précipitation annuelle de 950 mm.

Les débits d'étiage observés en 1969 sont nuls (pendant plus de dix jours) sur la MANGARAHA, de l'ordre de 20 l/s sur la SANDRANGITA et de 110 l/s sur l'AMBOABOA.

### 9.1.6. Saholy à Andampihely

La SALOHY est le dernier petit affluent rive droite de la MANGARAHA, qu'elle rejoint peu en amont au confluent avec la SOFIA.

Comme pour la SANDRANGITA, l'extrapolation de type logarithmique demeure forte, pour cette station créée en novembre 1970 et partiellement étalonnée en janvier 1971 (cyclone Félicie).

| Année | Qm³/s | Echelle 1 | Echelle 2 | Echelle 3 | Obs. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1958-59 | 480 | 6,30 | | | PHE |
| 1970-71 | 123 | 3,30 | | | |
| 1972-73 | 360 | | 5,50 | | |
| 1976-77 | 223 | | | 4,37 | PHE |

À partir des relevés des cotes de 1958-59 (maximum de la période 1958-1977) et des principales crues de la période 1970-77, et par comparaison avec l'échantillon MANGARAHARA, un ordre de grandeur de la crue décennale a été sommairement évalué : 190 m³/s.

## 9.2. Bassin inférieur de la Sofia

### 9.2.1. La Sofia à Maroala

(15°24'S - 47°59' E - 10095 km²).

Quelques mesures de débits d'étiage ont été effectués en 1980-83.

30.11.80 6.20 m³/s (.62 l/s/km²) DCE = 8.44 m³/s
7 au 9.10.81 3.85 m³/s (.38 l/s/km²) DCE = 4.00 m³/s
18.12.82 7.88 m³/s (.78 l/s/km²) DCE = 9.20 m³/s
08.11.83 4.76 m³/s (.47 l/s/km²) DCE = 5.14 m³/s

## 9.2.2. La Sofia au pont de la RN 6

Le bassin contrôlé a une superficie de 23 500 km².

Une série de jaugeages (de 1 130 à 3 210 m³/s) réalisés du 13 au 15/03/75 (cyclone Inès) et des mesures de pente ont permis d'estimer les débits de crue les plus importantes des périodes 1959-1975 et 1902 (?)-1975.

| Année | Qm³/s | H NGM | Obs. |
|---|---|---|---|
| 1958-59 | 23500 | 20,75 | PHE |
| 1972-73 | 6700 | 13,51 | PHE |

Le débit de crue décennal a été évalué à 7 300 m³/s.

## 9.2.3. La Bemarivo à Andranomiditra

(16°S - 47°42E - 6 515 km²).

Huit jaugeages (entre 9.33 et 57.8 m³/s) ont été effectués à cette station. Une extrapolation audacieuse de la courbe d'étalonnage (jusqu'à 9 000 m³/s) a été esquissée à partir du profil en travers et de l'estimation des vitesses afin de traduire les hauteurs observées.

tableau 7.200.

Débits moyens mensuels et annuels

Station : 1251201505 Andranomiditra
Rivière : Bemarivo
Pays : Madagascar
Bassin : Sofia

Aire : 9450 km²
Débits en m³/s

| Année | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1981 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 19.7- | 20.1 | 297. |
| 1982 | 1510. | - | 2560. | 1310. | - | 41.9 | 27.5 | 21.0 | - | 16.9 | 115. | 218. |
| 1983 | 448. | 880. | 409. | 227. | 47.8 | 37.7 | 19.8 | 14.5 | 10.8 | - | 174. | - |
| Moyenne | 979. | 880. | 1490. | 769. | 47.8 | 39.8 | 23.7 | 17.8 | 10.8 | 18.3 | 103. | 258. |

Les valeurs consignées ci-dessus le sont à titre indicatif. Les valeurs des débits de saison des pluies ont été obtenues à partir de relevés limnimétriques de qualité souvent douteuse (une seule observation par jour) et traduites en débit à partir d'une extrapolation peut-être hasardeuse. Le "module" correspondant à ces valeurs (386 m³/s) apparait très surestimé (lame équivalente : 1 870 mm) en regard de la pluviométrie moyenne du bassin (inférieure à 2 000 mm).

Des jaugeages de moyennes eaux et les relevés simultanés de 2 échelles (amont pont et niveau pont) ont permis une évaluation des débits les plus importants des périodes 1958-1983 et 1959-1975.

L'enquête et les mesures effectuées plus en aval (AMPOMBITIKA) confirment la valeur et le caractère exceptionnel de la crue 1958-59 qui a entièrement ravagé PORT-BERGE (BORIZINY).

| Année | Qm³/s | Andranomiditra | Ampombitika | Port-Berge |
|---|---|---|---|---|
| 1958-59 | 15000 | (6,00) | 25,72 NGM | 24,29 NGM |
| 1972-73 | 6100 | 4,38 | 20,57 NGM | |
| 1976-77 | 3900 | 3,87 | | |
| 1974-75 | 2800 | 3,53 | 18,57 NGM | |

Plus que le cyclone de 1901 ("crues très fortes sur la haute-SOFIA"), c'est probablement le cyclone de mars 1903, cause de la capture MAHAJAMBA-KAMORO qui serait à l'origine d'une crue comparable (inondation de PORT-BERGE) à celle de mars 1959.

En analysant l'ensemble de l'information, nous avons estimé la crue décennale à 4 900 m³/s (750 l/s/km²) et la crue cinquantennale à 11 000 m³/s (1 690 l/s/km²).

Les débits d'étiage observés sont de :

8.46 m³/s (1.3 l/s/km²) du 25 au 30.09.81
11.4 m³/s (1.75 l/s/km²) le 27.11.82
(8.50) m³/s (1.3 l/s/km²) en octobre 1983

## 9.2.4. L'Anjobony à Marovato

(15°47'S - 48°05'E - superficie 4 230 km²)

Par comparaison des deux mesures de débit effectuées en 1980 et 1982, les étiages caractéristiques (DCE) ont été estimés à 4.2 m³/s (1 l/s/km²) en 1980 et 6.3 m³/s (1.5 l/s/km²) en 1982.

Pour le bassin global de la SOFIA (27 300 km²), une valeur sommaire du module (500 à 600 m³/s, soit une lame de l'ordre de grandeur de 600 à 650 mm) a été avancée à l'occasion d'une étude récente (POUYAUD, 1990). Cette valeur est vraisemblable et compatible avec la pluviométrie régionale.

# Synthèse régionale des régimes hydrologiques

Troisième partie

L'analyse des données observées sur les stations hydrométriques met en évidence la grande diversité des caractéristiques hydrologiques sur le vaste ensemble géographique malgache : l'île, d'une superficie de 590 000 km², s'étend, du nord au sud, sur 1 650 km (entre 12 ° et 25 ° 40' sud) et, de l'est vers l'ouest, sur 570 km dans sa plus grande largeur.

Cette variété est cependant organisée en grandes régions hydrologiques correspondant pour l'essentiel à la sectorisation climatologique de Madagascar puis aux subdivisions liées à la géologie, aux sols, aux reliefs, à la végétation, etc. Les précipitations, puis les températures, constituent en effet les facteurs conditionnels déterminant des régimes hydrologiques ; les autres facteurs géographiques (dont les paramètres sont le plus souvent assez difficilement quantifiables) n'interviennent que pour modifier au sol la distribution des apports pluviométriques.

Par ailleurs, il faut noter que les différents facteurs conditionnels, s'il est souvent possible de reconnaître leur influence spécifique sur les caractéristiques des régimes, sont en grande partie interdépendants.

Les précipitations, pour leur abondance et leur irrégularité interannuelle ainsi que pour leur distribution dans l'année, dépendent avant tout de l'activité des grands centres d'action météorologique : cellule océanique de hautes pressions de l'Océan Indien et zone de basses pressions intertropicale, puis secondairement les perturbations d'origine polaire. Mais la répartition spatiale des précipitations est fortement influencée par l'orographie. Les alizés de secteur est affrontent transversalement Madagascar et réagissent en fonction des différentes lignes de relief qu'ils rencontrent. Au contact de la côte orientale, l'arrivée du flux d'alizés détermine une abondante pluviométrie qui s'attenue légèrement sur les cinquante kilomètres de l'étroite plaine littorale. La première ligne de falaises, plus ou moins continue, entraine un soulèvement des masses d'air humide et une recrudescence très nette de la pluviométrie ; puis, cet obstacle franchi, la diminution des précipitations est très sensible. Brutal sur les dépressions orographiques situées "sous le vent" de la ligne de falaises ou des premiers massifs (dépression de l'Alaotra-Mangoro, contreforts ouest de l'Anosy, etc.) où l'on observe des gradients décroissants rapides, cet effet est plus progressif sur les hauts-plateaux et les régions sédimentaires de l'ouest. Mais, dans ces zones, on peut observer des remontées sensibles de la pluviométrie au niveau des zones de reliefs, qu'elles soient importantes (TSARATANANA, ANKARATRA, ANDRINGINTRA) ou beaucoup plus modestes (Tampoketsa du KAMORO ou falaises du BEMARAHA dans l'ouest, par exemple). Les apports d'air humide venant de l'ouest (contre-alizée au nord de MAHAJANGA) ou du sud (invasions polaires) viennent compliquer ce schéma.

Les températures (qui, avec l'humidité de l'air) déterminent principalement la reprise potentielle par évapotranspiration sont assez directement liées à l'altitude, beaucoup plus qu'à la latitude. Relativement modérées sur la côte est (20 à 25° C en moyenne annuelle) en raison de l'influence maritime, elles s'abaissent sensiblement sur les hauts-plateaux (moins de 20° C) en raison de l'altitude moyenne supérieure à 1 000 m et encore davantage sur les grands massifs. L'effet de continentalité, renforcé par l'effet de foehn, à peine modéré par la proximité du canal de Mozambique, est sensible à l'ouest et au sud de l'île, où, avec des altitudes moyennes beaucoup plus faibles, les températures moyennes annuelles dépassent 25° C. L'évapotranspiration potentielle varie comme les températures, l'évapotranspiration réelle étant évidemment liée aux disponibilités pluviométriques.

La géomorphologie intervient en second lieu. Les formations géologiques (qui ont déterminé les reliefs : mouvements tectoniques, résistance des roches à l'érosion, etc.) peuvent, lorsqu'elles ne sont pas ou peu altérées, jouer un rôle direct important sur les conditions de ruissellement : régions cristallines, plus ou moins imperméables du sud de l'île et de certaines parties des bassins des hauts-plateaux, calcaires parfois karstifiées et grès perméables des bassins du sud-ouest et des bassins inférieurs de l'ouest, sables grossiers des bassins du sud, ainsi que formations basaltiques fissurées et perméables de l'ANKARATRA et surtout de la Montagne d'Ambre.

Les sols jouent un rôle considérable dans la distribution mensuelle des écoulements. Là où (en raison d'une forte pluviométrie) ils ont pu constituer des formations latéritiques de grande épaisseur (bassins de la cote orientale, est des hauts-plateaux), ils constituent d'importants magasins où peuvent être stockées en saison des pluies des réserves considérables qui fournissent l'essentiel pour le versant occidental ou une bonne partie pour la côte est des écoulements de saison fraîche.

Les reliefs (déterminés par les lignes structurales et la nature des formations géologiques), outre leur influence sur les précipitations, jouent un rôle déterminant sur la concentration et la propagation des écoulement en crue. Sur le socle ancien et ses bordures, les pentes des cours d'eau sont généralement fortes et correspondent à des formes de crue aigues (bassin du TSARATANANA, du sud et de la côte est). Si la pente moyenne des grands cours d'eau des hauts-plateaux reste forte, l'alternance de rapides et chutes et de biefs tranquilles détermine un amortissement partiel des crues (par exemple : bassin de l'Ikopa). Cet effet sur la forme des crues est encore plus notable dans certaines zones dépressionnaires où peuvent se développer des lacs, étangs et marécages (cuvettes de l'Ankaizina, de l'Alaotra, du Betsiriry, etc).

Pour la végétation naturelle, aux influences édaphiques (faciès cristallins, calcaires, sableux, volcaniques, etc.) s'ajoutent des influences climatiques déterminantes : forêts ombrophiles des secteurs à forte pluviométrie ou formations xérophiles et "bush" du sud-ouest par exemple. Le couvert végétal joue un rôle notable sur les conditions de ruissellement et d'infiltration. Lorsqu'il est dense (forêt des falaises de l'est par exemple), il freine le ruissellement et favorise l'infiltration et le stockage des précipitations (humus, chevelu radiculaire, ameublissement des sols,...), peut abaisser l'évapotranspiration potentielle (effet de microclimat frais et humide sous le couvert forestier) mais entrainer pour la satisfaction des besoins de la végétation, une forte évapotranspiration réelle (augmentation du rapport ETR/ETP). À l'inverse, le recouvrement lâche des savanes et prairies ne joue qu'un rôle insignifiant sur la concentration des eaux fluviales et faible sur la transpiration.

Les modifications d'origine anthropiques se surajoutent aux facteurs naturels. Outre les déterminismes historiques et volontaristes, elles se sont développées en fonction des potentialités des sols et des sites. Les aménagements des sols liés aux pratiques culturales peuvent modifier, parfois de façon importante, les caractéristiques des régimes hydrologiques : déforestation en "savoka" sur la bordure orientale des hauts plateaux, mise en valeur des périmètres rizicoles dans les plaines de l'ALAOTRA et d'ANTANANARIVO (imperméabilisation artificielle de l'interface, stockage et écrêtement des crues, renforcement de la reprise par évapotranspiration, etc.) Les infrastructures de stockage et dérivation, particulièrement nombreuses sur le haut bassin de l'IKOPA, entraînent une artificialisation des régimes.

Le bassin versant d'un cours d'eau est donc une unité fonctionnelle naturelle (parfois modifiée par les activités humaines) organisée en système complexe. Au "signal" d'entrée constitué par les précipitations, transformé par les interactions des différents facteurs conditionnels de l'interface de réception et de son environnement climatique, correspond un "signal" de sortie, décrit par les caractéristiques du régime hydrologique.

Chaque bassin versant a, dans le détail, son individualité déterminée par la répartition et les interactions des unités qui le composent, mais il est possible, dans un examen plus large, de mettre en évidence des parentés, des similitudes. Avant de présenter les grandes unités naturelles hydrologiques (chapitre 11), nous examinerons, l'une après l'autre, les caractéristiques principales des régimes : apports annuels et leurs distributions mensuelles (chapitre 8), crues (chapitre 9) et basses eaux (chapitre 10).

# Les apports annuels et leurs distributions mensuelles

Chapitre 8

## 1. CHRONIQUE DES APPORTS ANNUELS

Les coefficients d'hydraulicité (rapport de la lame annuelle à la lame moyenne interannuelle) des stations principales sont consignés dans le tableau 8.1. Pour plus de trente-cinq stations réparties sur l'île, nous disposons d'une chronique commune de trente ans (1950-1980). Pour un nombre plus réduit de stations anciennes, les observations ont été faites depuis 1945 et pour certaines stations maintenues jusqu'en 1985-86.

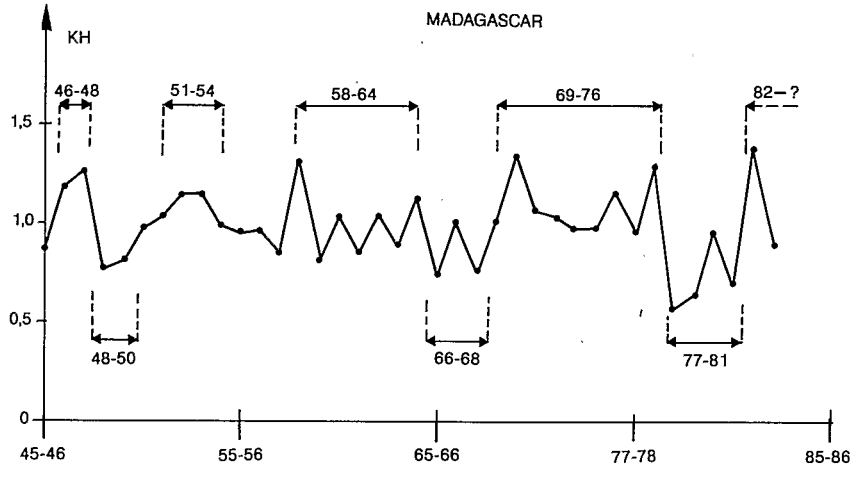
Une chronique de trente années consécutives est supposée selon les normes météorologiques internationales, constituer un échantillon représentatif d'une série climatologique réputée stationnaire. Cette appréciation est plausible en climat tempéré, mais les observations effectuées depuis le début des années 1970 dans la zone sahélienne montrent à l'évidence l'inadéquation de cette norme pour les séries climatiques à forte variance. Une simple comparaison dans le Sahel entre les séries 1930-1960 et 1960-1990 démontre sans effort poussé d'analyse, qu'à moins d'admettre une modification très marquée des conditions climatiques de la zone (et l'apparition d'une nouvelle population statistique), hypothèse jusqu'ici envisagée mais non prouvée, il est nécessaire d'analyser les caractéristiques climatiques d'une zone à irrégularité aussi forte qu'au Sahel sur des chroniques beaucoup plus consistantes (deux à trois fois la norme). Il est vrai que les chroniques pluviométriques sahéliennes montrent l'existence de persistances de longue durée des situations météorologiques annuelles, rompues par des transitions brutales.

Pour l'île de Madagascar, située en climat tropical austral, il est possible d'admettre en première analyse, que la durée de trente à quarante ans des chroniques hydrométriques correspond à un échantillon suffisamment représentatif de la variance de la population statistique et ceci, du moins, au dessus de l'isohyète 700 mm. Au dessous de cette isohyète (sud et sud-ouest de Madagascar), les variances des échantillons sont nettement plus fortes et, bien que les régimes hydrologiques de ce secteur soient légèrement différents (surtout à l'est) des régimes sahéliens, en raison des précipitations de saison fraîche (invasions polaires), les résultats des analyses statistiques ( au delà des récurrences décennales) devront être envisagées avec prudence.

Nous avons représenté (graphe 8.1.) les variations du coefficient moyen d'hydraulicité de Madagascar (moyennes des stations du tableau 8.1., dernière colonne). Si des doublets apparaissent (années humides 46-47 et 47-48, 52-53 et 53-54, 69-70 et 70-71, années sèches 48-49 et 49-50, 77-78 et 78-79), il n'est pas possible de mettre en évidence par le calcul l'existence d'un coefficient de persistance significatif. On observe toutefois l'alternance apériodique de séquences plus humides et de séquences moyennes ou plus sèches.

figure 8.1.

Hydraulicité
1945-1986




Pour les périodes humides, et en moyenne sur la majorité de l'île, nous observons les séries suivantes : 1946-1948, 1951-1954, 1958-1964 (période peu marquée sur les coefficients moyens mais caractérisée par des années très humides successivement en 1958-59 sur le centre-nord, 1960-61 sur le sud, 1961-62 sur le massif du Tsaratanana), 1969-1976 et à partir de 1982.

Pour les périodes sèches, les séquences 1948-1950, 1966-1968 et 1977-1981 sont caractérisées par des déficits plus ou moins marqués selon les régions.

En examinant plus en détail les chroniques, il est possible de regrouper les bassins en quatre grandes zones, correspondant d'ailleurs aux flux d'alizés organisés sous l'influence orographique (cf. chapitre 2, paragraphe 12) :

- massif du Tsaratanana, correspondant au minimum relatif septentrional ;

- bassins du centre-nord, correspondant au maximum relatif oriental observé entre les massifs du Tsaratanana et de l'Ankaratra ;

- bassins du centre-sud, correspondant au minimum relatif oriental observé entre les massifs de l'Ankaratra et de l'Andringintra ;

- bassin du sud, correspondant au maximum relatif méridional observé au sud du massif de l'Andringitra.

tableau 8.1.

Madagascar : Coefficients d'hydraulicité

| | Rivière | Sambirano | Ramena | Maevarano | Maningory | Ivondro | Vohitra | Rianila | Mangoro | Onive | Mananjary | Ivoanana | Namorona | Faraony |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N° | Station | 4 | 5 | 6 | 9 | 13 | 16 | 17 | 23 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 |
| | Hmm | 1500 | 1800 | 600 | 330 | 1320 | 1145 | 1840 | 770 | 720 | 1650 | 1860 | 895 | 1840 |
| | 1945-1946 | | | | .95 | | | | | 1.13 | .81 | 1.04 | .88 | |
| | 1946-1947 | | | | 1.39 | | | | | 1.94 | .95 | 1.15 | .83 | |
| | 1947-1948 | | | | 1.00 | | | | | 2.26 | 1.22 | 1.23 | 1.06 | |
| | 1948-1949 | | | | 1.00 | | | | | .64 | 1.01 | .96 | .73 | .77 |
| | 1949-1950 | | | | .52 | | | | | .65 | 1.00 | 1.01 | 1.05 | 1.09 |
| | 1950-1951 | | | | .85 | | | | | .81 | 1.06 | 1.32 | 1.56 | .97 |
| | 1951-1952 | 1.01 | 1.14 | | 1.27 | .92 | .85 | 1.28 | .77 | 1.01 | 1.11 | 0.93 | 0.97 | .90 |
| | 1952-1953 | .74 | .72 | | 1.00 | .76 | .79 | .84 | .85 | .84 | 1.23 | .92 | 1.03 | .99 |
| | 1953-1954 | 1.56 | 1.56 | | .59 | .80 | .99 | .92 | 1.09 | .76 | 1.16 | 1.22 | 1.46 | 1.42 |
| | 1954-1955 | .95 | 1.04 | | 1.18 | .77 | .81 | .88 | .83 | .79 | .87 | .90 | .89 | .84 |
| | 1955-1956 | 1.02 | .95 | 1.20 | 1.01 | 1.51 | 1.50 | 1.54 | 1.51 | .96 | .96 | .99 | 1.11 | 1.16 |
| | 1956-1957 | 1.64 | 1.58 | 1.12 | 1.35 | .98 | .78 | .93 | 1.16 | 1.14 | .91 | .77 | .86 | .98 |
| | 1957-1958 | .81 | 1.04 | 1.18 | 1.11 | .91 | .83 | .99 | .80 | .81 | 1.05 | .89 | 1.05 | 1.06 |
| | 1958-1959 | 1.08 | 1.02 | 1.00 | 2.83 | 1.69 | 1.95 | 1.84 | 1.69 | 1.35 | 1.20 | 1.32 | 1.82 | 1.67 |
| | 1959-1960 | .91 | .76 | .94 | 1.01 | .89 | .83 | .62 | .82 | .84 | .76 | .58 | .58 | .62 |
| | 1960-1961 | .90 | .96 | .88 | .59 | .55 | .58 | .44 | .63 | .74 | .78 | .72 | .62 | .58 |
| | 1961-1962 | 1.64 | 2.15 | 1.61 | .82 | .78 | .86 | .81 | .73 | .74 | .96 | 1.04 | .91 | 1.02 |
| | 1962-1963 | .84 | .93 | .79 | .84 | .74 | .89 | .78 | .84 | .82 | 1.01 | 1.13 | 1.10 | .83 |
| | 1963-1964 | .79 | .97 | .86 | .81 | 1.00 | 1.10 | 1.05 | 1.01 | .81 | .90 | .88 | .74 | .78 |
| | 1964-1965 | .82 | .91 | .84 | 1.05 | 1.06 | 1.16 | 1.10 | 1.25 | 1.29 | 1.21 | 1.52 | 1.27 | 1.50 |
| | 1965-1966 | .81 | .89 | .84 | .78 | .90 | .88 | .92 | .83 | .75 | .85 | .83 | .74 | .70 |
| | 1966-1967 | .65 | .77 | .86 | 1.05 | .86 | .93 | .89 | .91 | .75 | .98 | .98 | 1.02 | .94 |
| | 1967-1968 | .95 | .98 | 1.33 | 1.17 | 1.00 | 1.08 | .96 | 1.06 | .84 | .83 | .81 | .71 | .68 |
| | 1968-1969 | .85 | .87 | .88 | .78 | .87 | .85 | .82 | .86 | .98 | 1.01 | 1.35 | 1.11 | 1.09 |
| | 1969-1970 | .91 | .84 | 1.11 | 1.28 | 1.06 | 1.10 | 1.11 | 1.06 | .97 | 1.32 | 1.46 | 2.38 | 2.04 |
| | 1970-1971 | 1.13 | 1.56 | .94 | .85 | 1.00 | 1.04 | .96 | .97 | 1.01 | .74 | .85 | .91 | .98 |
| | 1971-1972 | 1.13 | 1.19 | .91 | 1.47 | 1.26 | 1.22 | 1.16 | 1.47 | 1.10 | 1.06 | .94 | 1.03 | 1.10 |
| | 1972-1973 | 1.10 | 1.33 | 1.22 | 1.90 | 1.71 | 1.58 | 1.54 | 1.57 | 1.39 | 1.18 | .98 | 1.01 | 1.13 |
| | 1973-1974 | .94 | .70 | .58 | .81 | 1.11 | 1.01 | .98 | .90 | 1.06 | 1.07 | 1.08 | .95 | 1.05 |
| | 1974-1975 | 1.02 | .78 | .79 | 1.09 | 1.24 | 1.04 | 1.07 | 1.40 | 1.25 | 1.03 | 1.05 | .99 | .99 |
| | 1975-1976 | 1.32 | 1.35 | 1.30 | .87 | 1.21 | 1.08 | 1.24 | 1.04 | 1.03 | .82 | .89 | .82 | .90 |
| | 1976-1977 | | | .87 | 1.11 | 1.27 | 1.23 | 1.31 | 1.40 | 1.31 | | 1.13 | 1.06 | 1.12 |
| | 1977-1978 | | | .34 | .33 | .83 | .61 | .68 | .59 | .46 | | .55 | .37 | .50 |
| | 1978-1979 | | | .59 | .48 | .62 | .49 | .48 | .55 | .84 | | .56 | .49 | .60 |
| | 1979-1980 | | | 1.20 | | .86 | .87 | .90 | | | | | | |
| | 1980-1981 | .52 | .48 | .37 | .15 | .57 | .52 | .60 | | | | | | |
| | 1981-1982 | .84 | .95 | .94 | 1.59 | 1.22 | 1.16 | 1.23 | | | | | | |
| | 1982-1983 | 1.16 | 1.20 | 1.05 | .68 | .88 | .93 | .95 | | | | | | |
| | 1983-1984 | | | | | 2.15 | | | | | | | | |
| | 1984-1985 | | | | | 1.08 | | | | | | | | |
| | 1985-1986 | | | | | 1.15 | | | | | | | | |
| | 1986-1987 | | | | | 1.07 | | | | | | | | |

tableau 8.1.

(suite)

| | Rivière | Mananara sud | Efaho | Mandrare amont | Mandrare aval | Mananara | Manambovo | Menarandra | Onilahy | Ihosy | Zomandao | Manandona | Matsiatra | Mangoky |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N° | Station | 35 | 37 | 38 | 39 | 40 | 43 | 44 | 48 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 |
| | Hmm | 535 | 2070 | 300 | 185 | 175 | 50 | 190 | 165 | 340 | 575 | 440 | 625 | 330 |
| | 1945-1946 | | | | | | | | | | | | | |
| | 1946-1947 | | | | | | | | | | | | | |
| | 1947-1948 | | | | | | | | | | | | | |
| | 1948-1949 | | | | | | | | | | | | | |
| | 1949-1950 | .74 | | | | | | | | .88 | .89 | .88 | .74 | .68 |
| | 1950-1951 | .57 | | | | | | | | .53 | .59 | .77 | .83 | .48 |
| | 1951-1952 | 1.21 | 1.01 | 1.00 | 1.06 | 1.26 | .92 | .54 | .80 | 1.04 | 1.12 | 1.07 | .99 | 1.08 |
| | 1952-1953 | 1.42 | .99 | .83 | .71 | .98 | 1.34 | .83 | .65 | 1.24 | 1.21 | 1.30 | 1.13 | 1.32 |
| | 1953-1954 | 1.69 | 1.35 | 1.38 | 2.40 | 1.26 | .76 | 1.57 | .77 | 2.12 | 1.20 | 1.32 | 1.21 | 1.23 |
| | 1954-1955 | 1.23 | 1.06 | .99 | 1.41 | 1.17 | 1.74 | 1.04 | .72 | 1.03 | .76 | 1.02 | .92 | .83 |
| | 1955-1956 | 1.09 | 1.15 | .55 | .45 | .65 | .46 | .62 | .54 | .61 | 1.18 | 1.04 | 1.09 | .89 |
| | 1956-1957 | .63 | .53 | .67 | .68 | .72 | 1.00 | 1.06 | .78 | .69 | .68 | 1.18 | .95 | .69 |
| | 1957-1958 | .60 | 1.10 | .52 | .37 | .57 | .38 | .43 | .80 | .54 | .90 | .90 | .74 | .67 |
| | 1958-1959 | .98 | .99 | .75 | .62 | .96 | .96 | 1.13 | .72 | .99 | 1.60 | 1.19 | 1.18 | .96 |
| | 1959-1960 | .62 | .57 | .75 | .39 | .61 | 1.22 | 1.01 | .92 | .72 | .46 | .70 | .96 | .65 |
| | 1960-1961 | .95 | 1.79 | 1.99 | 2.26 | 1.94 | 2.50 | 2.72 | 1.13 | 1.04 | .91 | .97 | 1.08 | .83 |
| | 1961-1962 | .78 | 1.14 | .95 | .56 | .51 | .28 | .58 | .95 | .79 | .67 | .73 | .57 | .78 |
| | 1962-1963 | .86 | .68 | 1.97 | 1.65 | 1.70 | 1.50 | 1.34 | 1.08 | .86 | .96 | 1.03 | .98 | .95 |
| | 1963-1964 | .78 | 1.05 | 1.15 | .62 | .85 | .50 | .77 | .90 | .82 | 1.17 | .67 | .72 | .80 |
| | 1964-1965 | 1.13 | 1.28 | 1.23 | .93 | 1.20 | .60 | .73 | .88 | .96 | 1.16 | .96 | 1.34 | .91 |
| | 1965-1966 | .78 | .53 | .53 | .59 | .68 | .78 | .68 | .76 | .65 | .76 | .72 | .58 | .76 |
| | 1966-1967 | 1.26 | 1.57 | 1.06 | 1.46 | 1.11 | 1.92 | 1.11 | 1.25 | 1.40 | 1.13 | 1.08 | 1.34 | 1.00 |
| | 1967-1968 | .60 | .32 | .28 | .30 | .42 | .84 | .34 | .71 | .48 | .71 | .62 | .58 | .64 |
| | 1968-1969 | 1.29 | .73 | .62 | .63 | .70 | 1.38 | 1.11 | 1.13 | 1.42 | 1.20 | 1.26 | 1.45 | 1.38 |
| | 1969-1970 | 1.86 | 1.72 | 1.86 | 1.91 | 2.11 | 1.08 | 1.33 | 1.33 | 1.91 | 1.70 | 1.65 | 1.65 | 1.50 |
| | 1970-1971 | 1.03 | .98 | 1.27 | 1.67 | .93 | 1.24 | 1.44 | 1.28 | 1.14 | .92 | | | .88 |
| | 1971-1972 | 1.03 | .79 | .41 | .34 | .51 | .74 | .76 | .88 | 1.09 | | | | 1.05 |
| | 1972-1973 | 1.00 | 1.03 | .34 | .36 | | .54 | .24 | .53 | .69 | | | | |
| | 1973-1974 | 1.11 | .62 | .73 | .52 | | 1.64 | 1.06 | .96 | 1.07 | 1.45 | | | 1.39 |
| | 1974-1975 | 1.05 | | 1.17 | 1.43 | | 1.24 | 1.25 | | 1.10 | 1.69 | | | 1.38 |
| | 1975-1976 | | | .65 | .38 | | .82 | .37 | | | .66 | | | 1.09 |
| | 1976-1977 | | | | | | | 1.34 | | | | | | |
| | 1977-1978 | | | | | | | .65 | | | | | | |
| | 1978-1979 | | | | | | | 1.03 | | | | | | |
| | 1979-1980 | | | | | | | - | | | | | | |
| | 1980-1981 | | | | | | | - | | | | | | |
| | 1981-1982 | | | | | | | 1.22 | | | | | | 1.46 |
| | 1982-1983 | | | | | | | .46 | | | | | | .76 |
| | 1983-1984 | | | | | | | | | | | | | |

tableau 8.1.

(suite et fin)

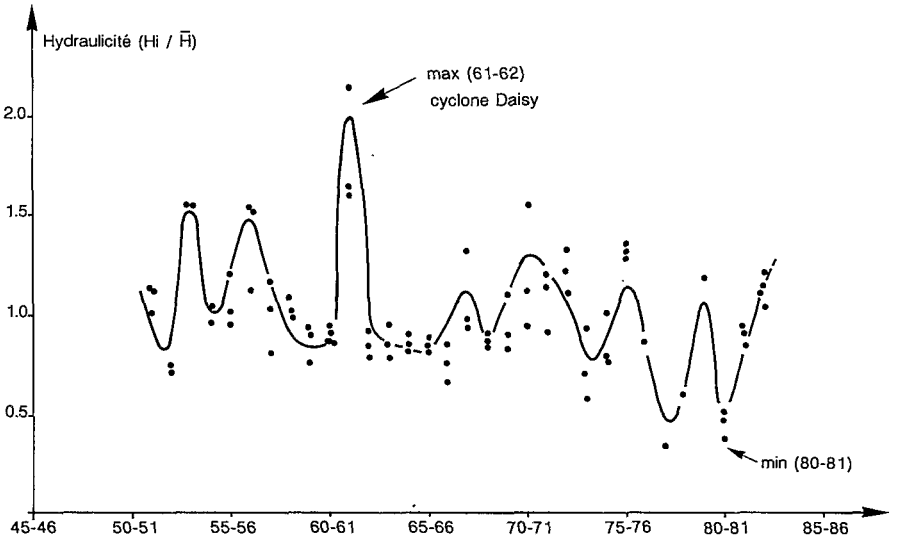
| | Rivière | Sahanivotry | Manandona | Mania | Tsiribihina | Ikopa | Sisaony | Andromba | Ikopa | Ikopa | Ikopa | Isinko | Betsiboka | Moyenne |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N° | Station | 60 | 61 | 62 | 73 | 82 | - | 86 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | Madagascar |
| | Hmm | 730 | 600 | 720 | 685 | 590 | 595 | 860 | 605 | 575 | 770 | 1130 | 780 | |
| | 1945-1946 | .77 | .68 | .69 | | .76 | .83 | .96 | .84 | .88 | 0.94 | 1.03 | .80 | .87 |
| | 1946-1947 | 1.30 | 1.27 | 1.29 | | 1.05 | 1.26 | 1.26 | 1.05 | 124 | 126 | 1.05 | .99 | 1.19 |
| | 1947-1948 | 1.45 | 1.43 | 1.53 | | 1.19 | 1.13 | 1.52 | 1.40 | 1.17 | 1.08 | .76 | .83 | 1.27 |
| | 1948-1949 | .61 | .52 | .53 | | .94 | .76 | .86 | .66 | .72 | .87 | .81 | .76 | .77 |
| | 1949-1950 | .68 | .62 | .62 | | .73 | .75 | 1.02 | .65 | .76 | .83 | .90 | .91 | .81 |
| | 1950-1951 | .87 | .87 | .96 | | .88 | .89 | 1.64 | .89 | .94 | .86 | 1.32 | .94 | .97 |
| | 1951-1952 | 1.23 | 1.08 | 1.22 | | .92 | .82 | 1.26 | 1.03 | 1.16 | 1.19 | .94 | 1.04 | 1.03 |
| | 1952-1953 | 1.01 | 1.18 | 1.08 | | .80 | 1.01 | 1.01 | .90 | 1.00 | 1.04 | 1.27 | 1.03 | 1.15 |
| | 1953-1954 | .90 | .98 | .97 | | .74 | .60 | .84 | .83 | .87 | 1.02 | 1.00 | .94 | 1.15 |
| | 1954-1955 | .87 | .98 | .81 | | .81 | .80 | .98 | .91 | 1.10 | 1.19 | .78 | 1.22 | .98 |
| | 1955-1956 | .91 | .94 | .80 | | .91 | .98 | 1.04 | .97 | .83 | .72 | .88 | .60 | .95 |
| | 1956-1957 | .82 | .91 | .82 | .76 | .99 | 1.50 | 1.15 | 1.14 | 1.17 | 1.04 | .82 | 1.11 | .96 |
| | 1957-1958 | .82 | .77 | .86 | .88 | .86 | .81 | 1.15 | .85 | .85 | .90 | .97 | 1.03 | .84 |
| | 1958-1959 | .97 | 1.09 | 1.11 | .80 | 1.64 | 1.53 | 1.61 | 1.55 | 1.59 | 1.23 | 1.32 | 1.66 | 1.31 |
| | 1959-1960 | .79 | .78 | .72 | .80 | .93 | .77 | 1.04 | .93 | 1.02 | .94 | 1.06 | .94 | .80 |
| | 1960-1961 | .73 | .97 | .80 | .74 | .85 | .90 | .81 | .88 | .92 | .84 | 1.01 | .80 | 1.04 |
| | 1961-1962 | .71 | .65 | .63 | .74 | .78 | .50 | .77 | .78 | 1.01 | 1.16 | 1.47 | 1.41 | .84 |
| | 1962-1963 | 1.07 | .89 | .98 | 1.03 | .97 | 1.16 | 1.15 | .96 | 1.00 | 1.07 | 1.16 | .96 | 1.04 |
| | 1963-1964 | .89 | .84 | .76 | .75 | .94 | .93 | .80 | .98 | .99 | .95 | .95 | .97 | .88 |
| | 1964-1965 | 1.15 | 1.21 | 1.05 | 1.12 | 1.19 | 1.25 | 1.01 | 1.31 | 1.35 | 1.23 | 1.24 | 1.38 | 1.13 |
| | 1965-1966 | .78 | .64 | .78 | .53 | .88 | .79 | .74 | .83 | .67 | .77 | .60 | .66 | .74 |
| | 1966-1967 | .80 | .78 | .82 | 1.08 | .93 | .85 | .72 | .96 | .84 | .95 | .95 | .97 | 1.02 |
| | 1967-1968 | .75 | .72 | .69 | .77 | 1.08 | .71 | .73 | .92 | .73 | .91 | .64 | .82 | .75 |
| | 1968-1969 | 1.20 | 1.17 | 1.13 | 1.47 | .91 | .82 | .83 | .90 | .83 | .91 | .78 | .74 | 1.01 |
| | 1969-1970 | 1.24 | 1.22 | 1.46 | 1.29 | 1.07 | .94 | .97 | 1.09 | .98 | .97 | .91 | .94 | 1.35 |
| | 1970-1971 | 1.04 | 1.08 | .95 | .95 | 1.14 | .96 | .85 | 1.00 | 1.03 | 1.11 | 1.30 | .95 | 1.06 |
| | 1971-1972 | .88 | .93 | .91 | .81 | 1.41 | 1.10 | .94 | 1.29 | 1.27 | 1.08 | 1.37 | 1.33 | 1.03 |
| | 1972-1973 | 1.42 | 1.54 | 1.21 | 1.17 | 1.43 | 1.29 | 1.19 | 1.23 | 1.12 | 1.04 | 1.03 | 1.17 | .97 |
| | 1973-1974 | 1.19 | 1.27 | 1.18 | 1.16 | .76 | .72 | 1.12 | .84 | .85 | .95 | .70 | .82 | .98 |
| | 1974-1975 | 1.21 | 1.21 | 1.26 | 1.13 | 1.31 | 1.27 | 1.10 | 1.22 | 1.25 | 1.09 | | 1.17 | 1.16 |
| | 1975-1976 | 1.08 | 1.21 | 1.00 | .81 | 1.19 | .87 | .90 | 1.00 | .79 | .86 | | | .95 |
| | 1976-1977 | 1.40 | 1.32 | 1.63 | 1.77 | 1.56 | 1.08 | | | | | | | 1.29 |
| | 1977-1978 | .86 | .56 | .72 | .62 | | .60 | .41 | | | | | | .57 |
| | 1978-1979 | .55 | .69 | .93 | .82 | .44 | .69 | .72 | | | | | | .64 |
| | 1979-1980 | 1.09 | 1.06 | 1.21 | .82 | | .94 | .78 | | | | | | .97 |
| | 1980-1981 | 1.12 | .98 | 1.04 | 1.15 | | | | | | | | | .68 |
| | 1981-1982 | 1.77 | 1.88 | 2.05 | 1.68 | | | | 1.22 | | | | | 1.38 |
| | 1982-1983 | .90 | .94 | .89 | .99 | | | | | | | | | .91 |
| | 1983-1984 | | | | | | | | | | | | | |

## 1.1. Bassins du Tsaratanana

Les observations ne portent que sur les bassins du flanc occidental du massif. L'année la plus humide (cyclone Daisy) est observée en 1961-62 avec des récurrences de 20 à 50 ans (Sambirano, Maevarano). Moins marquées, mais nettement excédentaires, sont les années 1953-54, 1956-57 et 1967-68 sur la Maevarano.

L'année 1980-81 est très sèche (récurrence 50 à 80 ans) sur les bassins de la zone. Il est probable (seul la Maevarano a été observée) que la récurrence de l'année 1977-78 soit du même ordre de grandeur (graphe 8.2.).

figure 8.2.
Versants du Tsaratanana
(hydraulicité 1951-1983)




## 1.2. Bassins du centre-nord

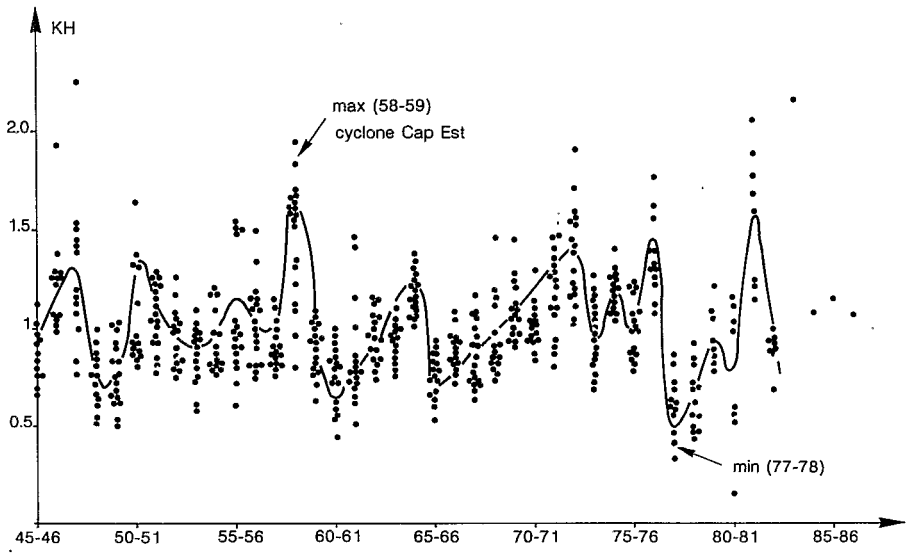
Il s'agit des cours d'eau de la côte orientale jusqu'au Mangoro et du bassin de la Betsiboka.

La plus forte hydraulicité a été observée en 1958-59 (cyclone du Cap-Est) avec des récurrences comprises entre 50 et 100 ans. Puis viennent les années nettement excédentaires : 1972-73 (20 à 50 ans), 1976-77 et 1981-82.

Les années déficitaires ont été observées en 1977-78 (50 à 100 ans sur la Tsiribihina), en 1948-49 et 1949-50 sur la Betsiboka (10 à 20 ans), en 1955-56 (centennale sèche sur la Betsiboka, nettement moins marquée ailleurs), 1965-66 (Tsiribihina et haut bassin de l'Ikopa) (graphe 8.3.).

figure 8.3.

Bassins du centre-nord
(hydraulicité 1945-1986)




## 1.3. Bassins du centre-sud

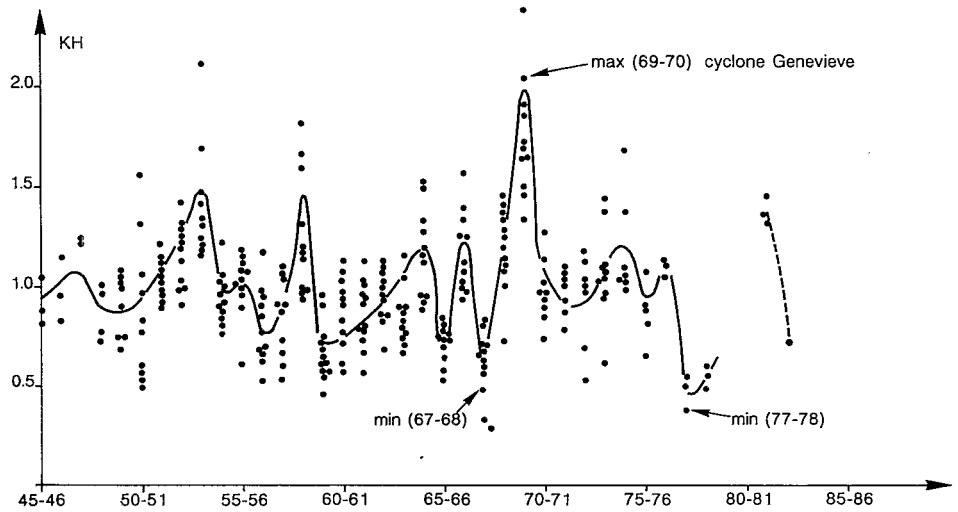
Il s'agit des bassins de la côte orientale au sud du Mangoro et du bassin du Mangoky.

La plus forte hydraulicité a été observée en 1969-70 (cyclone Geneviève) avec des récurrences de 50 à 100 ans. Moins prononcées, mais nettement excédentaires, sont les années 1953-54, 1958-59 (décennale humide, 1964-65 (10 à 20 ans), 1966-67, 1972-73 (sur le haut bassin de la Tsiribihina).

Les années les plus déficitaires ont été observées en 1959-60 (bassin du Mangoky), 1965-66 (10 à 20 ans), 1967-68 (20 à 30 ans sur le Mangoky) et 1977-78, 1978-79 (50 à 100 ans sur la côte orientale) (graphe 8.4.).

figure 8.4.

Bassins du centre-sud
(hydraulicité 1945-1983)



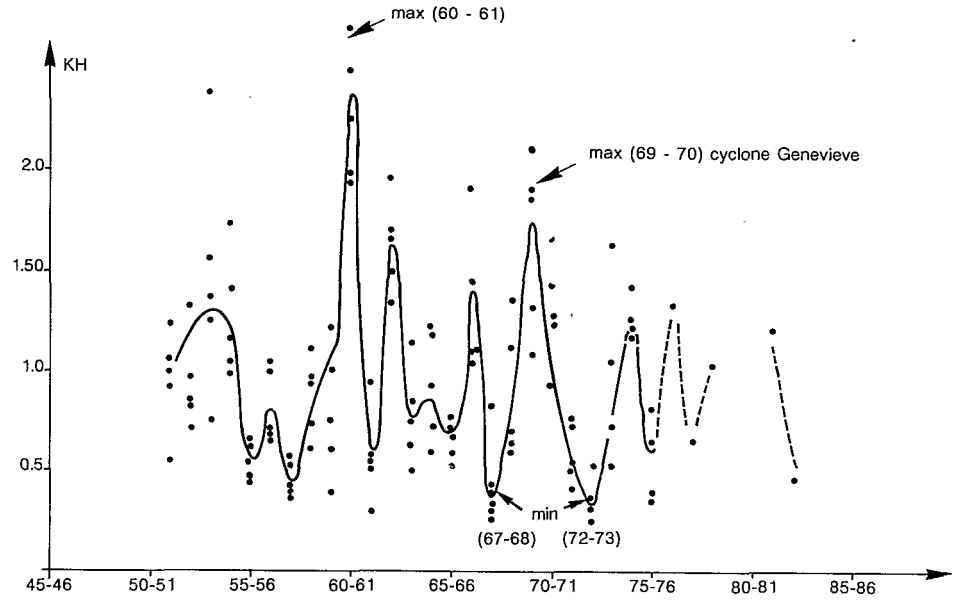
## 1.4. Bassins du sud

L'année la plus abondante a été observée en 1960-61 (50 à 100 ans en récurrence), suivie par les années 1953-54, 1962-63 et 1969-70 (20 à 30 ans). Les déficits sont observés en 1967-68 (cinquantennale) et 1972-73 (10 à 50 ans) (graphe 8.5.).

On notera que les années les plus abondantes correspondent au passage des cyclones (Cap-est 1960, Daisy 1962 et Geneviève 1970) et que les fortes récurrences mentionnées ne sont que des ordres de grandeur car elles correspondent aux limites de validité des ajustements statistiques (échantillon d'environ 30 valeurs).

figure 8.5.

Bassins du sud
(hydraulicité 1951-1982)




# 2. ORGANISATION SPATIALE DES APPORTS ANNUELS

Les caractéristiques principales des apports annuels sont rappelées dans le tableau 8.2.

- numéro de la station
- nom du cours d'eau
- nom de la station
- superficie du bassin versant (S km²)
- précipitation moyenne interannuelle sur le bassin (P mm)
- lame écoulée moyenne interannuelle (H mm)

- déficit moyen d'écoulement (DE mm)
- coefficient moyen d'écoulement (KE % = H/P)
- lame écoulée décennale humide (H10 mm)
- lame écoulée décennale sèche (h10 mm)
- coefficient d'irrégularité (K3 = H10/h10)
- coefficients d'asymétrie g1 et d'aplatissement g2 de la loi statistique ajustée à l'échantillon des lames annuelles.

Sur le graphe 8.6. sont reportées les valeurs des différentes lames moyennes annuelles des bassins du tableau 8.2. en fonction des valeurs moyennes des précipitations annuelles. La liaison statistique est forte :

$H = .71(P - 537)$ ($R^2 = .90$ pour 83 couples, $P > .995$)

figure 8.6.

Lame annuelle (H) en fonction de la pluviométrie annuelle (P)

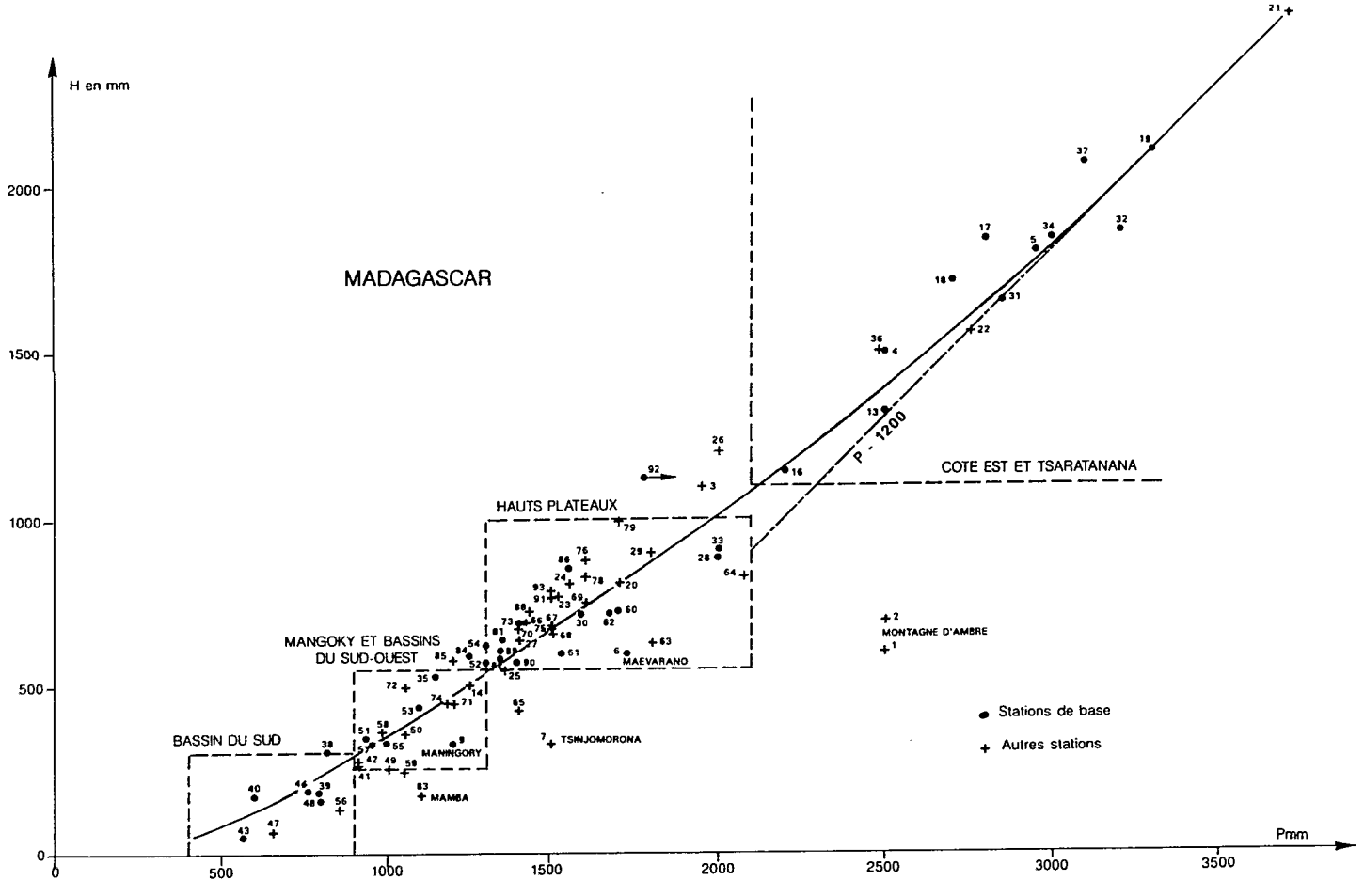


tableau 8.2.

Madagascar

Caractéristiques principales des apports annuels

| N° | Cours d'eau | Station | S km² | P mm | H mm | DE mm | KE % | H10 mm | h10 mm | K3 | γ1 | γ2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | SAKAMARY-BE | | 18 | (2500) | (600) | (1900) | (24) | | | | | |
| 2 | BESOKATRA | | 55 | (2500) | (700) | (1800) | (28) | | | | | |
| 3 | MAHAVAVY nord | Ambilobe | 3210 | (1950) | 1100 | (850) | (44) | | | | | |
| 4 | SAMBIRANO | Ambanja | 2830 | (2500) | 1500 | (1000) | (60) | 2040 | 1055 | 1.93 | 1.14 | 2.40 |
| 5 | RAMENA | Ambodimanga | 1080 | (2950) | 1800 | (1150) | (61) | 2666 | 1253 | 2.13 | 1;14 | 2.40 |
| 6 | MAEVARANO | Ambodivohitra | 2585 | 1730 | 600 | 1130 | 35 | 918 | 367 | 2.50 | .66 | .80 |
| 7 | TSINJOMORONA | Marovato | 1460 | (1500) | (325) | (1200) | (22) | | | | | |
| 8 | LOKOHO | | | | (1650) | | | | | | | |
| 9 | MANINGORY | Andromba | 6855 | 1200 | 330 | 870 | 28 | 540 | 175 | 3.09 | .79 | 1.12 |
| 10 | Sous-bassins | | 4043 | | 500 | | | | | | | |
| 11 | MANINGORY sous-bassins | | 1812 | | 133 | | | | | | | |
| 12 | ONIBE | | | | (1300) | | | | | | | |
| 13 | IVONDRO | Ringa-ringa | 2560 | (2500) | 1320 | (1180) | (53) | 1790 | 910 | 1.98 | .92 | 1.54 |
| 14 | IVONDRO | Ambodifana | 717 | (1250) | 500 | (750) | (40) | 697 | 382 | 1.82 | | |
| 15 | Bassin intermédiaire | | 1843 | | 1655 | | | | | | | |
| 16 | VOHITRA | Rogez | 1910 | (2200) | 1145 | (1055) | (52) | 1583 | 755 | 2.10 | .77 | 1.06 |
| 17 | RIANILA | Brickaville | 6000 | (2900) | 1840 | (1060) | (63) | 2550 | 1185 | 2.15 | .60 | .64 |
| 18 | VOHITRA | Andekaleka | 2615 | (2700) | 1710 | (990) | (63) | 2480 | 1045 | 2.38 | | |
| 19 | RIANILA | Fetraomby | 1863 | (3300) | 2100 | (1100) | (64) | | | | | |
| 20 | VOHITRA | Ankorahotra | 560 | (1700) | 805 | (900) | (47) | 1155 | 550 | 2.10 | | |
| 21 | RONGARONGA | Ambinaninony | 1000 | (3700) | (2500) | (1200) | (68) | | | | | |
| 22 | IAROKA | Ampitabe | 1275 | (2750 | (1550) | (1200) | (56) | | | | | |
| 23 | MANGORO | Gare | 3600 | 1500 | 770 | 730 | 51 | 1090 | 495 | 2.19 | 1.04 | 1.97 |
| 24 | MANGORO | Amboasary | 4735 | (1550) | 805 | (745) | (51) | 1215 | 535 | 2.27 | | |
| 25 | ANDRANOBE | Fanalamanga | 105 | (1350) | (550) | (800) | (41) | | | | | |
| 26 | MANDRAKA | PK68 | 57 | (2000) | (1200) | (800) | (60) | | | | | |
| 27 | ANTSAPAZANA | RN2 | 84 | (1400) | (640) | (760) | (46) | | | | | |
| 28 | AMBOROMPOTSY | Antsampandrano | 95 | 2000 | 890 | 1170 | 45 | 1180 | 605 | 1.95 | 0 | 0 |
| 29 | ONIVE | Ilempona | 1080 | (1800) | (900) | (900) | (50) | | | | | |
| 30 | ONIVE | Tsinjoarivo | 3200 | (1590) | 720 | 870 | (45) | 1025 | 475 | 2.16 | 1.34 | 3.38 |
| 31 | MANANJARY | Antsindra | 2260 | (2850) | 1650 | (1200) | (58) | 1990 | 1345 | 1.49 | .49 | .01 |
| 32 | IVOANANA | Fatihita | 835 | (3200) | 1860 | (1340) | (58) | 2420 | 1315 | 1.84 | .18 | .06 |
| 33 | NAMORONA | Vohiparara | 445 | (2000) | 895 | (1105) | (45) | 1280 | 570 | 2.25 | 1.14 | 2.40 |
| 34 | FARAONY | Vohilava | 2005 | (3000) | 1840 | (1160) | (61) | 2600 | 1200 | 2.17 | 1.14 | 2.40 |
| 35 | MANANARA sud | Marangaty | 14160 | 1150 | 535 | 615 | 47 | 772 | 345 | 2.23 | 1.14 | 2.40 |
| 36 | MANAMPANIHY | Elanary | 1087 | (2500) | (1500) | (1000) | (60) | | | | | |
| 37 | EFAHO | Fanjahira | 195 | (3100) | 2070 | (1030) | (67) | 3090 | 1130 | 2.74 | .51 | .47 |

tableau 8.2.

(suite)

| N° | Cours d'eau | Station | S km² | P mm | H mm | DE mm | KE % | H10 mm | h10 mm | K3 | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 38 | MANDRARE | Andabolava | 4035 | 820 | 300 | 520 | 37 | 475 | 131 | 3.63 | 1.57 | 4.70 |
| 39 | MANDRARE | Amboasary | 12435 | 790 | 185 | 605 | 23 | 336 | 67 | 5.0 | 2.0 | 6.0 |
| 40 | MANANARA | Bevia | 1085 | 600 | 175 | 425 | 30 | 287 | 92 | 3.12 | 2.71 | 15.5 |
| 41 | MANDRARE | Andetsy | 372 | (910) | (265) | (645) | 29 | | | | | |
| 42 | BESALY | Amboasary | 603 | (910) | (265) | (645) | 29 | | | | | |
| 43 | MANAMBOVO | Tsihombe | 2712 | 565 | 50 | 515 | 9 | 87 | 24 | 3.63 | 1.14 | 2.4. |
| 44 | MENARANDRA | Tranoroa | 5330 | 760 | 190 | 570 | 25 | 300 | 84 | 3.56 | 1.14 | 2.40 |
| 45 | MANARANDRA | Bekily | 1735 | | 220 | | | | | | | |
| 46 | MENAKOMPY | Andriabe | 775 | | 390 | | | | | | | |
| 47 | LINTA | Ejeda | 1700 | 650 | 65 | 585 | 10 | | | | | |
| 48 | ONILAHY | Tongobory | 27800 | (800) | 165 | (635) | (21) | 195 | 104 | 1.88 | .73 | .95 |
| 49 | MANGOKY | Betroka | 2345 | (1000) | (250) | (750) | (25) | | | | | |
| 50 | ISOANALA | Isoanala | 459 | (1050) | (360) | (710) | (34) | | | | | |
| 51 | IHOSY | Ihosy | 1500 | 935 | 340 | 585 | 36 | 506 | 203 | 2.49 | 1.67 | 5.34 |
| 52 | ZOMANDAO | Ankaramena | 610 | 1300 | 575 | 725 | 44 | 850 | 365 | 2.33 | .84 | 1.28 |
| 53 | MANANANTANANA | Tsitondroina | 6510 | 1100 | 440 | 660 | 40 | 592 | 310 | 1.91 | .90 | 1.47 |
| 54 | MATSIATRA | Malakialina | 11715 | 1300 | 625 | 675 | 48 | 867 | 408 | 2.12 | .63 | .70 |
| 55 | MANGOKY | Banlan | 50000 | 1000 | 330 | 670 | 33 | 444 | 214 | 2.07 | .88 | 1.41 |
| 56 | MANGOKY Inf. | Banlan | 29665 | (850) | 130 | (720) | (15) | | | | | |
| 57 | MORONDAVA | Dabara | 4640 | 950 | 330 | 620 | 35 | 398 | 248 | 1.60 | -.80 | .87 |
| 58 | SAKAMALY | Migodo | 790 | (980) | (360) | (620) | 37 | (420) | (275) | (1.53) | | |
| 59 | BETSIROKA | barrage | 577 | (1050) | 240 | (810) | (23) | (300) | (165) | (1.82) | | |
| 60 | SAHANIVOTRY | PK 197 | 430 | 1700 | 730 | 970 | 43 | 979 | 510 | 1.92 | 1.00 | 1.84 |
| 61 | MANANDONA | Sahanivotry | 1450 | 1530 | 600 | 930 | 39 | 826 | 397 | 2.08 | .823 | 1.23 |
| 62 | MANIA | Fasimena | 6795 | 1680 | 720 | 960 | 43 | 996 | 486 | 2.05 | 1.43 | 3.78 |
| 63 | SANDRANDAHY | Sandrandahy | 286 | (1800) | 635 | (1165) | (35) | (845) | (440) | (1.92) | | |
| 64 | MANIA | Sandrandahy | 1770 | (2080) | 825 | (1255) | (40) | (1050) | (620) | (1.69) | | |
| 65 | IVATO | Ivato | 215 | (1400) | (430) | (970) | (31) | | | | | |
| 66 | MANIA | Ankotrofotsy | 17990 | (1400) | 695 | (705) | (50) | (880) | (510) | (1.73) | | |
| 67 | BIZY | Ifanja | 21 | (1500) | (690) | (810) | (46) | | | | | |
| 68 | KOTOLOMBO | Ifanja | 151 | (1500) | (660) | (840) | (44) | | | | | |
| 69 | MAHAJILO | Miandrivaro | 14375 | (1600) | 755 | (845) | (47) | (950) | (530) | (1.79) | | |
| 70 | MANAMBOLO | Ambatolahy | 1893 | (1400) | (680) | (720) | (50) | | | | | |
| 71 | SAKENY | Andraketa | 3138 | (1200) | (450) | (750) | (37) | | | | | |
| 72 | MANAMPANDA | Malaibandy | 545 | (1050) | (500) | (550) | (48) | | | | | |
| 73 | TSIRIBIHINA | Betomba | 45000 | 1400 | 695 | 705 | 50 | 940 | 465 | 2.02 | 1.14 | 2.40 |
| 74 | Bassin inférieur | Betomba | 12600 | (1180) | 455 | (725) | (39) | | | | | |
| 75 | DEMOKA | Bevatry | 1325 | (1500) | (670) | (830) | (45) | | | | | |
| 76 | KIMAZIMAZY | Soatanana | 260 | (1600) | 875 | (725) | (55) | (1450) | (530) | (2.74) | | |
| 77 | TSIOMBIKARY | Tsiombikary | 24 | | (600) | | | | | | | |
| 78 | NAMELA | Antanandeva | 680 | (1600) | (835) | (765) | (52) | | | | | |
| 79 | VARAHINA sud | Tsiazompaniry | 283 | (1700) | (1000) | (700) | (59) | 1270 | 775 | 1.64 | | |
| 80 | VARAHINA nord | Mantasoa | 96 | | (1120) | | | | | | | |
| 81 | IKOPA | Ambahiman. | 1503 | 1350 | 640 | 710 | 47 | 825 | 459 | 1.80 | 0 | 0 |
| 82 | IKOPA | Mahitsy | 1780 | 1340 | 590 | 750 | 44 | 765 | 463 | 1.65 | 2.95 | 25.2 |
| 83 | MAMBA | Sabotsy | 104 | (1100) | (175) | (925) | (16) | | | | | |
| 84 | SISAONY | Andramasina | 318 | 1250 | 595 | 655 | 48 | 764 | 392 | 1.95 | .605 | .66 |
| 85 | SISAONY | PK22 | 630 | (1200) | (575 | (625) | (48) | | | | | |
| 86 | ANDROMBA | Tsinjony | 350 | 1550 | 860 | 690 | 55 | 1145 | 593 | 1.93 | .45 | .36 |
| 87 | ANDROMBA | Confluent | 1100 | | 780 | | | | | | | |
| 88 | TAFAINA | B.V. | 4,5 | 1425 | 725 | 700 | 51 | | | | | |
| 89 | IKOPA | Bevomanga | 4290 | 1340 | 605 | 735 | 45 | 761 | 462 | 1.64 | 1.14 | 2.40 |
| 90 | IKOPA | Fiadanana | 9490 | 1390 | 575 | 815 | 41 | 733 | 440 | 1.66 | 1.10 | 2.23 |
| 91 | IKOPA | Antsatranana | 18645 | 1515 | 770 | 745 | 51 | 910 | 633 | 1.44 | .234 | .08 |
| 92 | ISINKO | Ambodiroka | 600 | 1780 | 1130 | 650 | 63 | 1470 | 822 | 1.79 | .53 | .50 |
| 93 | BETSIBOKA | Ambodiroka | 11800 | 1500 | 780 | 720 | 52 | 1010 | 572 | 1.77 | .90 | 1.48 |

et met en évidence le rôle déterminant des précipitations sur l'importance des écoulements annuels. La courbe ajustée graphiquement, d'allure légèrement parabolique, se confond, au delà de P = 3 200 mm avec la droite P - 1 200 mm. La dispersion de la grande majorité des points reste modérée. Compte tenu des imprécisions sur la détermination des valeurs de P et H, les écarts résiduels tiennent aux caractéristiques spécifiques des différents bassins et à l'influence des facteurs conditionnels secondaires : orientation des bassin, relief, géologie, sols, couvert végétal. On note ainsi certains regroupements régionaux : points 60 à 65 (haut bassin de la Mania) qui se situent au dessous de la courbe moyenne, 84 et 85 (affluents rive gauche de la haute Ikopa) et 91-93 (bassins moyens de la Betsiboka et de l'Ikopa correspondant aux Tampoketsas) qui se situent au dessus de la courbe moyenne.

Quelques points représentatifs s'écartent significativement des relations graphiques et ceci pour des raisons identifiables :

- bassins de la Montagne d'Ambre (1 et 2) où les déficits d'écoulement anormalement élevés correspondent aux pertes par infiltration profonde dans les basaltes fissurés s'ajoutant à une évapotranspiration de l'ordre de 1 000 à 1 100 mm ;

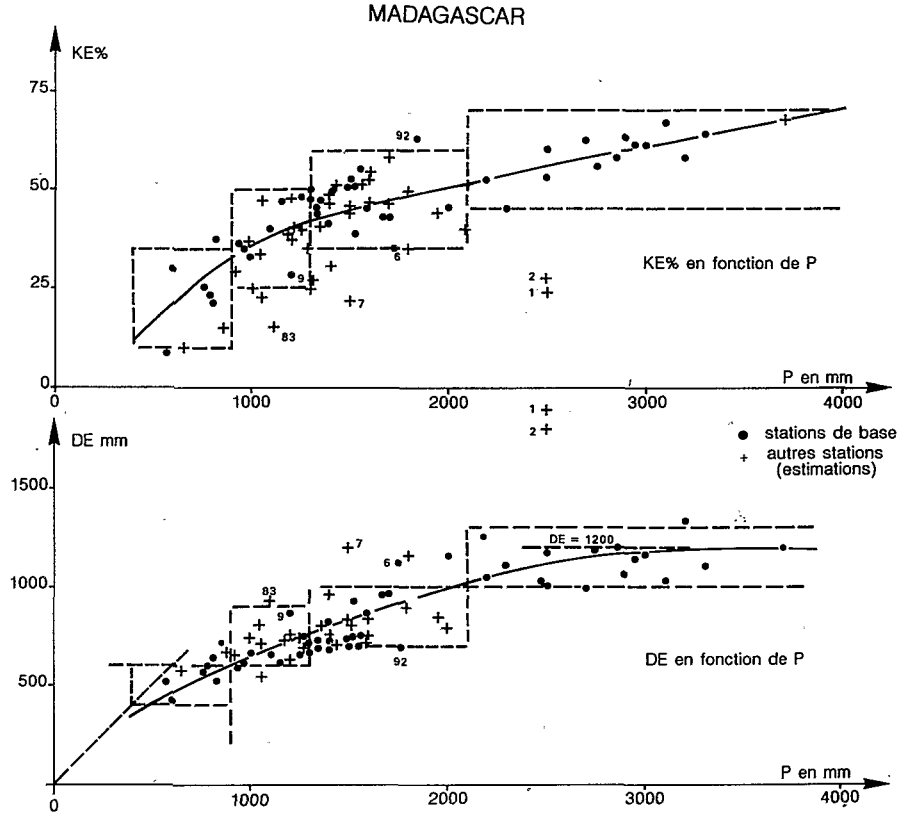
- bassins de la Meavarano, de Tsinjomorona, du Maningory, de la Mamba (6, 7, 9, 83) où la présence importante en superficie relative des zones marécageuses et périmètres rizicoles entraîne un accroissement de la reprise par évapotranspiration et du déficit d'écoulement ;

- bassin de l'Isinko (92) où la précipitations moyenne annuelle (calculée à partir de postes extérieurs au bassin) est probablement assez nettement sous-estimée. La Tampoketsa du Kamoro où la pluviométrie est relativement abondante ne dispose que de très peu de stations pluviométriques.

Les régressions graphiques complémentaires (KE = F (P) et DE = F (P)) sont représentées sur le graphe 8.7.

figure 8.7.

Coefficients d'écoulement et déficits d'écoulement

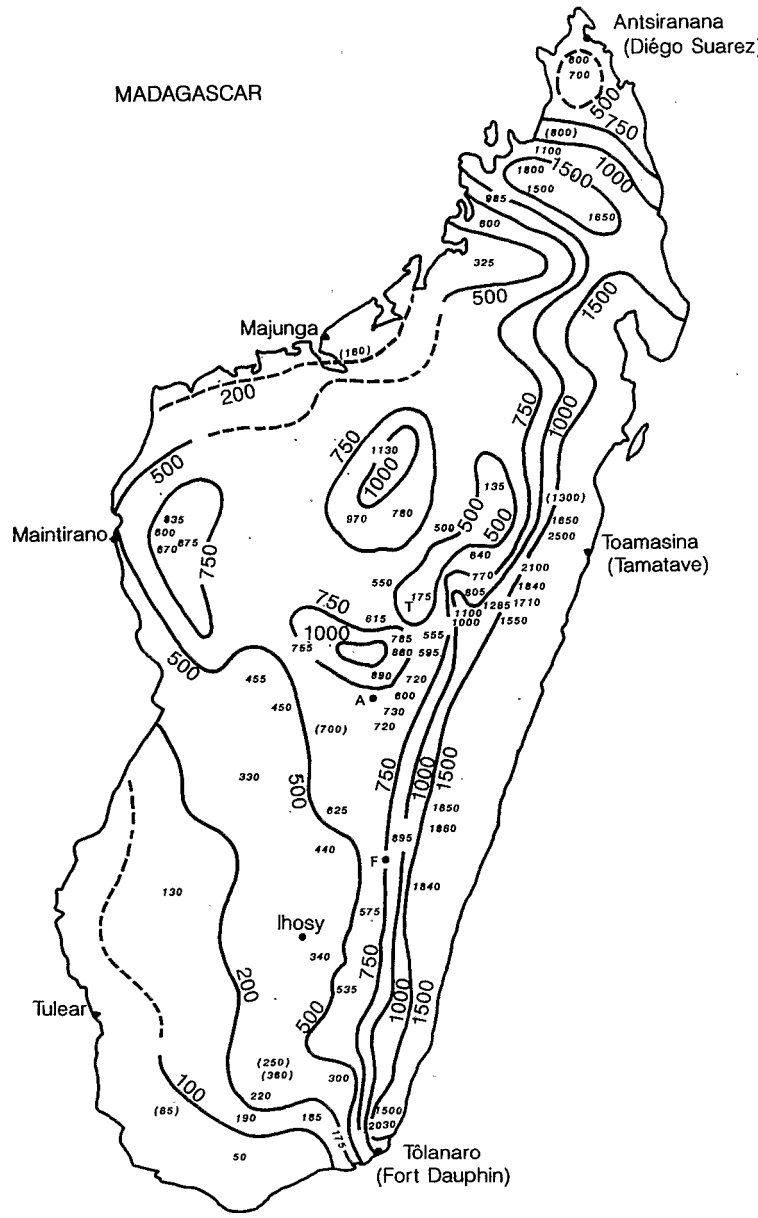



P. Chaperon, J. Danloux, L. Ferry

Les coefficients moyens d'écoulement croissent assez rapidement de 12 à 35 % pour P compris entre 400 et 1 000 mm puis selon un gradient plus modéré jusqu'à 70 % pour P = 4 000 mm. Les déficits d'écoulement DE s'ordonnent autour d'une courbe d'aspect convexe entre 350 mm (pour P = 400 mm) et 1 200 mm pour P = 3 200 mm. Au-delà de cette valeur de P, les déficits d'écoulement restent limités à une valeur moyenne de 1 200 mm correspondant à l'ETR moyenne de la côte orientale.

figure 8.8.

Carte schématique
des lames écoulées moyennes
(H en mm)



Les valeurs de H, KE et DE des différents bassins ont été reportées sur la carte de Madagascar et, en s'appuyant sur la carte des isohyètes interannuelles et sur les régressions graphiques des graphes 8.6. et 8.7., ont été tracées les cartes des lames écoulées moyennes (graphe. 8.8.), des coefficients d'écoulement (graphe 8.9.) et des déficits d'écoulement (graphe 8.10.). Il s'agit bien évidemment de cartes schématiques et la précision du tracé des isolignes n'est pas telle que l'on puisse obtenir autre chose que des ordres de grandeur des valeurs interannuelles dans l'utilisation de ces cartes.

figure 8.9.

Carte schématique
des coefficients d'écoulement
annuel (KE %)

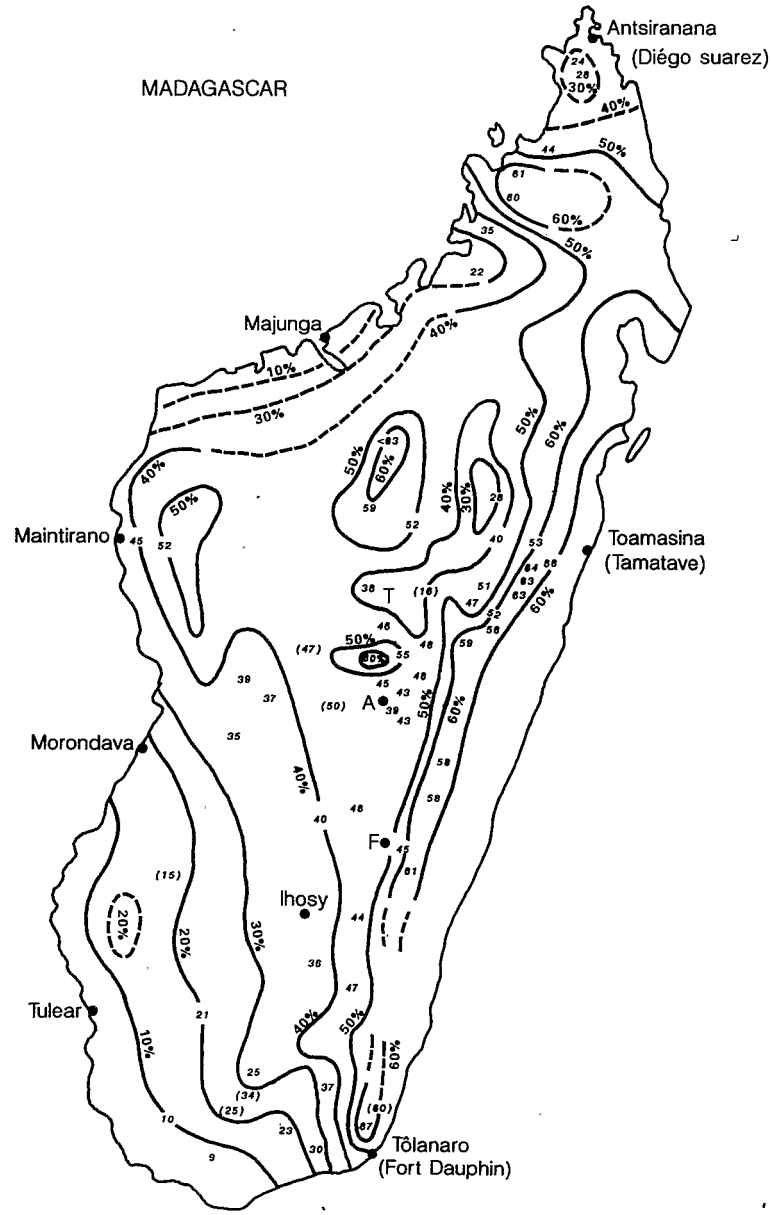
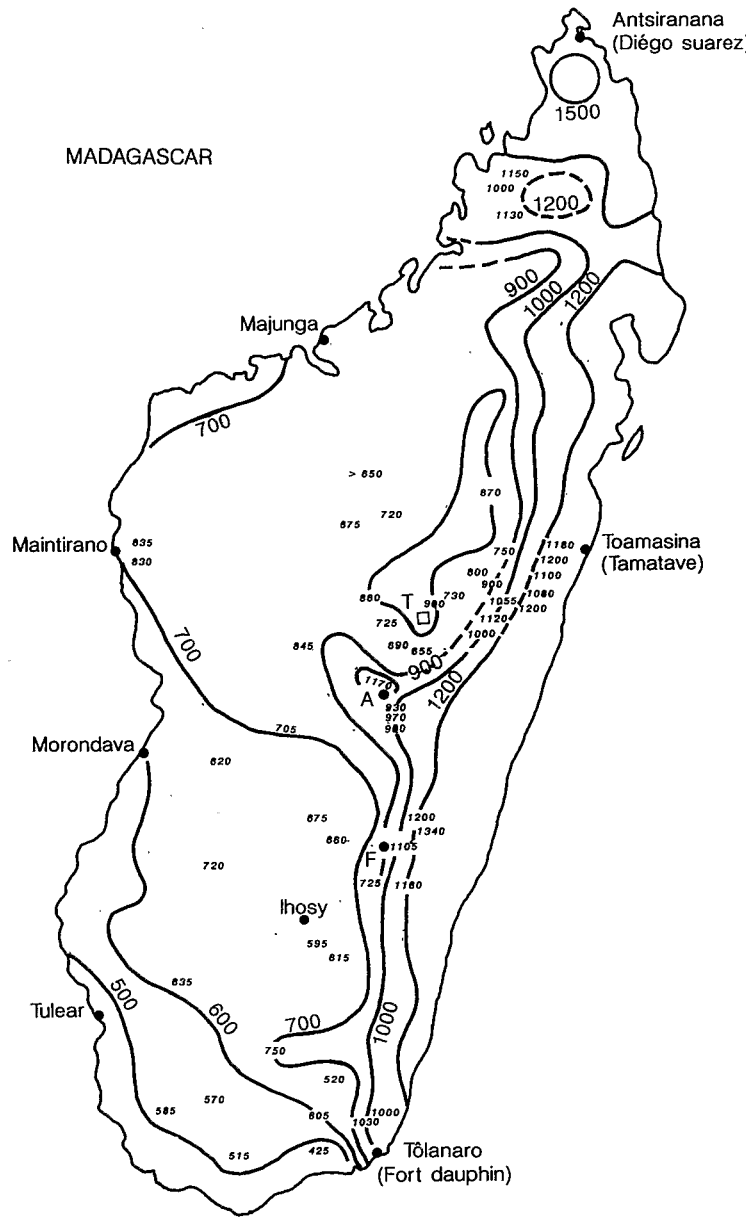


figure 8.10.

Carte schématique
des déficits moyens
d'écoulement (DE mm)



## 2.1. Les ensembles régionaux

Les cartes et les régressions graphiques font ressortir quatre grands ensembles régionaux.

- Les bassins du sud et de l'extrême sud-ouest (du Mandrare au bassin moyen de l'Onilahy et jusqu'au bassin inférieur du Mangoky).

Situés au-dessous de l'isohyètes 900 mm, ces bassins ont des lames écoulées comprises entre 50 mm (Manambovo) et 300 mm (Mandrare) avec des coefficients d'écoulement compris entre 10 et 35 %. Les déficits d'écoulement restent inférieurs à 600 mm et correspondent à une forte réduction de l'ETP généralement satisfaite, et au mieux, un à deux mois dans l'année.

- Les bassins du centre sud-ouest (Mangoky, Mananara du Sud, basse Tsiribihina, Morondava).

Situés globalement entre les isohyètes 900 et 1 300 mm, ces bassins ont des lames écoulées comprises entre 250 mm (le Mangoky, affluent de l'Onilahy) et 550 mm (Mananara du sud) avec des coefficients d'écoulement compris entre 25 et 50 %. Les déficits d'écoulements sont compris entre 600 et 900 mm et correspondent à une réduction sensible de l'ETP due à la longueur de la saison sèche (faibles précipitations de mai à octobre).

Situés hors de cet ensemble, les petits bassins de la côte nord-ouest et ceux de la dépression de l'Alaotra et du centre de la plaine d'Antananarivo présentent les mêmes caractéristiques annuelles.

- Les bassins des hauts plateaux (Haut bassin de la Tsiribihina, Betsiboka, Onive, etc.)

Situés globalement entre les isohyètes 1 300 et 2 100 (rebord oriental des hauts plateaux), ces bassins ont des lames écoulées comprises entre 550 mm (Ikopa supérieure) et 1 000 mm (Varahina du Sud) avec des coefficients d'écoulement compris entre 35 et 60 %. Les déficits d'écoulements sont compris entre 700 et 1 000 mm et correspondent à une réduction de l'ETP de l'ordre de 20 à 40 % due à la faible pluviométrie de la seconde moitié de la saison sèche (juillet-octobre).

Bien que situés à l'ouest de cet ensemble, les petits fleuves côtiers issus du Bemaraha se rattachent à cet ensemble en raison d'un recrudescence des précipitations sur le plateau.

- Les bassins de la côte orientale et du Tsaratanana.

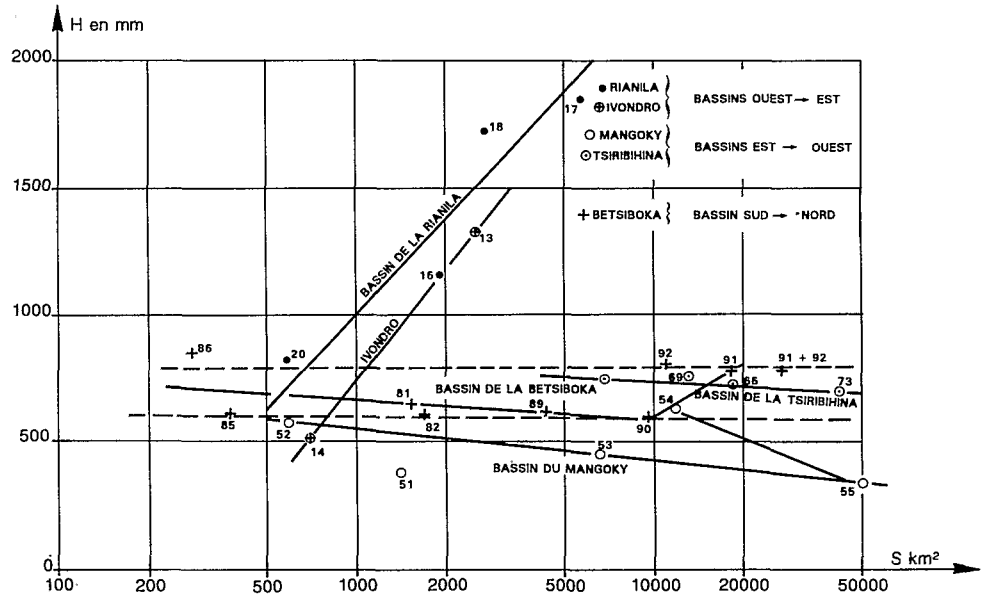
Ces bassins sont situés (à l'exception des bassins supérieurs de certains cours d'eau de la côte orientale qui se rattachent aux régimes des hauts plateaux) au dessus de l'isohyète 2 100 mm. Les lames écoulées sont supérieures à 1 100 mm (Vohitra supérieure) et peuvent atteindre plus de 2 000 mm (Rianila, Rongaronga, Efaho). Les coefficients d'écoulement sont supérieurs à 45 % et peuvent atteindre 70 %. Les déficits d'écoulement (mis à part le cas particulier des rivières de la Montagne d'Ambre) atteignent les valeurs maximales observées à Madagascar et dépassent 1 000 mm pour atteindre sur certains bassins 1 200 à 1 300 mm. En raison des précipitations notables de la saison fraîche, l'ETP n'est qu'assez faiblement réduite. Dans la région des hauts plateaux, certains bassins de tête du Kamoro ou de l'Ankaratra présentent des caractéristiques annuelles similaires mais avec une distribution mensuelle plus contrastée.

## 2.2. Influence de l'orientation du bassin

Pour quelques bassins équipés de stations disposées d'amont en aval, il est possible de suivre l'évolution de la lame écoulée (correspondant au module spécifique) avec l'accroissement des superficies contrôlées. Sur le graphique 8.11. sont représentées quelques situations caractéristiques selon l'orientation générale de l'axe du bassin.

figure 8.11.

Variation de l'écoulement H en fonction de la superficie et de l'orientation des bassins




Pour les bassins orientés de l'est vers l'ouest (Mangoky, Tsiribihina), les lames obéissent au schéma classique de diminution des valeurs parallèlement à l'augmentation des superficies. Ceci correspond au phénomène généralement constaté : Plus la superficie du bassin contrôlé augmente, plus son altitude moyenne diminue ainsi que la moyenne des précipitations recueillies. L'effet de foehn renforce la décroissance des lames

La Betsiboka, d'allongement sud-nord, c'est-à-dire parallèlement à la disposition globale des lignes d'isohyètes, présente sur son bassin supérieur une diminution des lames écoulées, puis à partir des Tampoketsa un redressement net de l'écoulement. Les lames de l'amont vers l'aval restent limitées entre deux "rails" horizontaux.

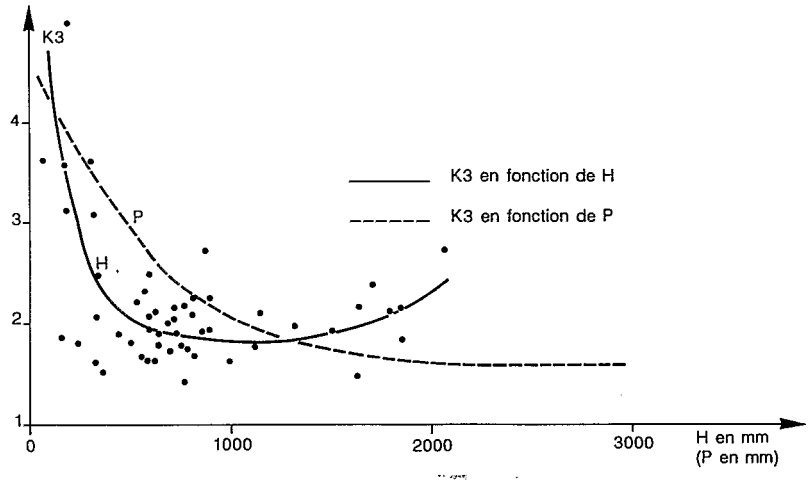
Les bassins orientés de l'ouest vers l'est (versant oriental de l'île) présentent une évolution atypique caractéristique du versant. Les hauts bassins de la Rianila et de l'Ivondro situés sur l'extrémité orientale des hauts plateaux sont beaucoup moins arrosés que les parties de bassins correspondant aux grandes falaises. Le gradient amont-aval est fortement positif.

## 2.3. Irrégularité interannuelle

Les coefficients K3 des distributions de lames annuelles (rapport des lames décennales humide et sèche) ont été reportées sur le graphique 8.12. en fonction des lames moyennes (H). Sur le même graphique, et à titre de comparaison, a été reportée la courbe moyenne de variation du K3 des précipitations annuelles ponctuelles.

figure 8.12.

Rapport de décennales (K3) en fonction de H




Entre 50 et 1 200 mm (lame annuelle écoulée), on observe, de façon analogue à la variation de l'irrégularité des précipitations annuelles, une diminution rapide de K3 suivie d'une stabilisation autour d'une valeur moyenne de 1.8. Mais pour des valeurs croissantes de la lame (H > 1 200 mm jusqu'à 2 100 mm), on observe une croissance du coefficient K3 des lames écoulées qui devient supérieur à celui des précipitations. Ce phénomène peut s'expliquer par la diminution très nette, pour les bassins les mieux arrosés, de la variance des déficits d'écoulement annuel autour de la valeur médiane (réduction de l'irrégularité interannuelle de l'ETR régionale quand celle-ci tend vers les valeurs maximales observées sur le versant oriental).

En notant : K3H = H10/h10, K3P = P10/p10 et DE10, de10, les valeurs décennales du déficit d'écoulement, on a :

K3H = K3P * a

avec :

a = (1 - DE10/P10) / (1 - de10/p10)

Quand P croît (au-delà de 2 300 mm, ainsi que H (au-delà de 1 200 mm), le déficit d'écoulement médian tend vers la valeur régionale maximale à Madagascar (1 200 à 1 300 mm) et de10 tend vers DE10, d'où une tendance rapidement croissante de a.

## 2.4. Asymétrie et aplatissement des échantillons

À l'exception de l'Ikopa à Ambahimanambolo (apports régularisés par les réservoirs amont) et du bassin forestier d'altitude de l'Amborompotsy (distribution normale), tous les bassins ont des distributions moins aplaties que la distribution normale (g2 positif) et (à l'exception de la Morondava) à étalement vers la droite, c'est-à-dire vers les apports excédentaires (g1 positif).

Pour environ 25 % des échantillons, les coefficients (g1 = 1.14, g2 = 2.40) correspondent à la loi de GUMBEL.

Pour 40 % des échantillons, les coefficients (g1 compris entre 0 et 1.10, g2 compris entre 0 et 2) correspondent à des distributions gausso-logarithmiques plus aplaties et moins asymétriques que la distribution de GUMBEL.

Pour 20 % des échantillons, les coefficients (g1 > 1.14, g2 > 2.4) correspondent à des distributions gausso-logarithmiques ou exponentielles moins aplaties et plus asymétriques que la loi de GUMBEL.

L'examen des coefficients ne fait pas apparaître de tendances régionales bien nettes.

# 3. DISTRIBUTION MENSUELLE DES ÉCOULEMENTS

Les régimes hydrologiques de Madagascar se rattachent au domaine tropical austral à deux saisons bien contrastées : la saison chaude et pluvieuse (mi-novembre à fin mars) et la saison fraîche beaucoup plus sèche (mai à octobre).

Ce graphique 8.13. rassemble des exemples d'hydrogrammes caractéristiques des régimes malgaches. Comme il est facile de le constater, le contraste entre saison des hautes eaux et saison des basses eaux est plus ou moins accusé selon les régions hydrologiques en raison des régimes pluviométriques et des mécanismes de fonctionnement des bassins.

Afin de faciliter les comparaisons, nous avons calculé deux indices de l'irrégularité intermensuelle :

- le rapport hh/hs

où hh est la lame cumulée du semestre novembre-avril
et hs celle du semestre mai-octobre

- le rapport M/m

où M est le débit mensuel maximal
et m le débit mensuel minimal.

Ces indices sont présentés dans le tableau 8.3. pour les principaux cours d'eau ainsi que Pm (indice du mois de pluviométrie maximale) et Ph (indice du mois le plus abondant en écoulement de surface).

figure 8.13.

Hydrogrammes caractéristiques

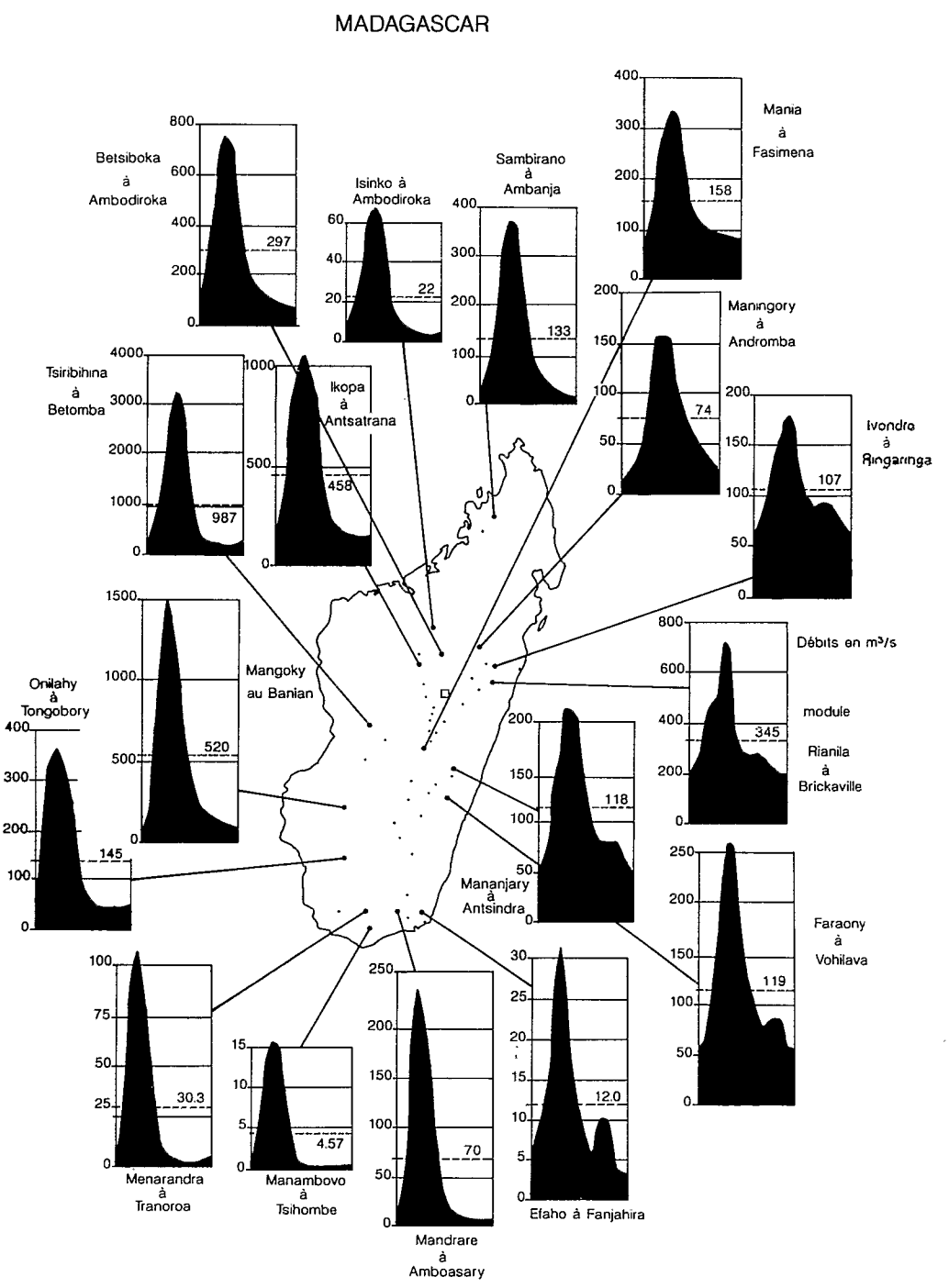


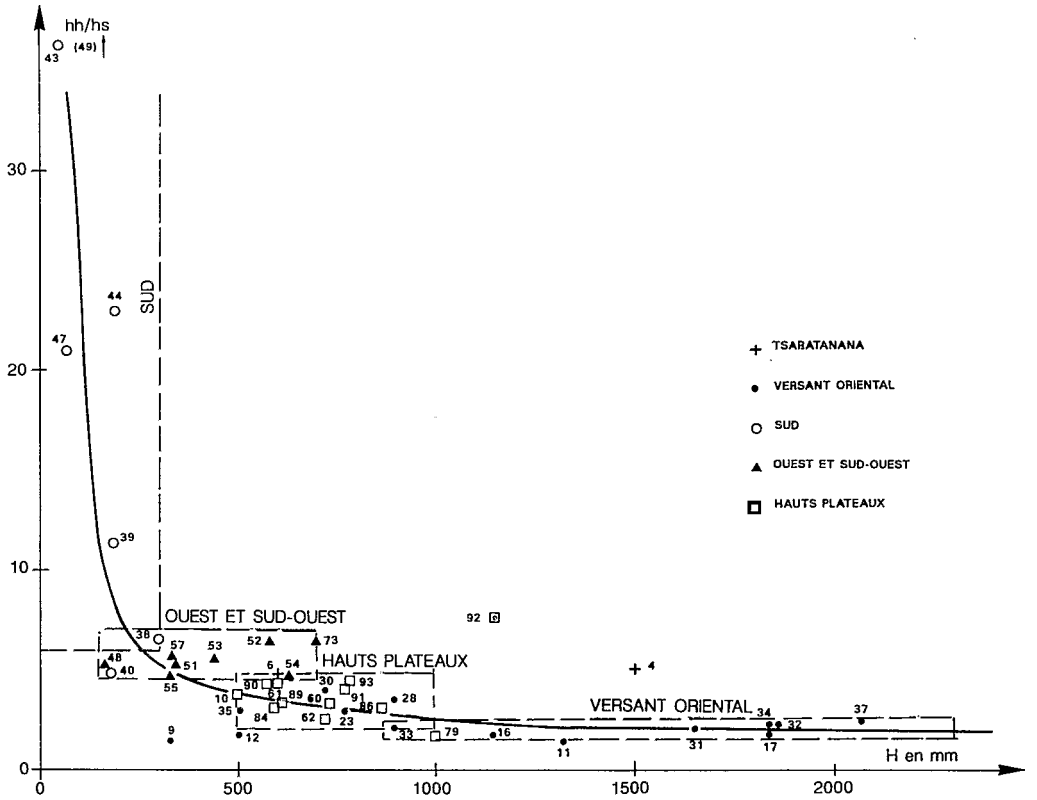
tableau 8.3.

Madagascar
Irrégularité intermensuelle
des débits

| N° | Cours d'eau | Station | H mm | hh mm | hs mm | hh/hs | M/m | Pm | Ph |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | SAMBIRANO | Ambanja | 1500 | 1250 | 250 | 5 | 16 | 1 | 2/3 |
| 6 | MAEVARANO | Ambodivohitra | 600 | 495 | 105 | 4.7 | 22 | 1 | 2/3 |
| 9 | MANINGORY | Andromba | 330 | 199 | 131 | 1.5 | 6 | 1 | 3/4 |
| 10 | Sous-bassins | | 500 | 395 | 105 | 3.8 | 9 | 1 | 2/3 |
| 11 | IVONDRO | Ringa-ringa | 1320 | 779 | 541 | 1.4 | 3 | 1 | 3 |
| 12 | IVONDRO | Ambodifana | 500 | 317 | 183 | 1.7 | 3 | 1 | 3 |
| 16 | VOHITRA | Rogez | 1145 | 724 | 421 | 1.7 | 4 | 1 | 3 |
| 17 | RIANILA | Brickaville | 1840 | 1147 | 693 | 1.7 | 4 | 1 | 3 |
| 23 | MANGORO | Gare | 770 | 570 | 200 | 2.9 | 6 | 12/1 | 3 |
| 28 | AMBOROMPOTSY | Antsampand. | 890 | 693 | 197 | 3.5 | 7 | 12/1 | 3 |
| 30 | ONIVE | Tsinjoarivo | 720 | 572 | 148 | 3.9 | 9 | 12/1 | 3 |
| 31 | MANANJARY | Antsindra | 1650 | 1107 | 543 | 2.0 | 4 | 1 | 3 |
| 32 | IVOANANA | Fatihita | 1860 | 1276 | 584 | 2.2 | 5 | 1 | 2/3 |
| 33 | NAMORONA | Vohiparara | 895 | 6.9 | 284 | 2.1 | 5 | 12/1 | 2 |
| 34 | FARAONY | Vohilava | 1840 | 1262 | 578 | 2.2 | 5 | 1 | 2/3 |
| 35 | MANANARA sud | Marangaty | 535 | 400 | 135 | 3.0 | 8 | 12/1 | 1 |
| 37 | EFAHO | Fanjahira | 2070 | 1469 | 601 | 2.4 | 9 | 1 | 2 |
| 38 | MANDRARE | Andabolava | 300 | 260 | 40 | 6.5 | 20 | 12/1 | 1 |
| 39 | MANDRARE | Amboasary | 185 | 170 | 15 | 11.3 | 29 | 12/1 | 1 |
| 40 | MANANARA | Bevia | 175 | 145 | 30 | 4.8 | 16 | 1 | 1 |
| 43 | MANAMBOVO | Tsihombe | 50 | 49 | 1 | 49 | 610 | 12/1 | 1 |
| 44 | MENARANDRA | Tranoroa | 190 | 182 | 8 | 23 | 62 | 1 | 1 |
| 47 | LINTA | Ejeda | 65 | 62 | 3 | 21 | 54 | 1 | 1 |
| 48 | ONILAHY | Tongobory | 165 | 138 | 27 | 5.1 | 10 | 12/1 | 1 |
| 51 | IHOSY | Ihosy | 340 | 285 | 55 | 5.2 | 20 | 12/1 | 1 |
| 52 | ZOMANDAO | Ankaramena | 575 | 497 | 78 | 6.4 | 25 | 12/1 | 1 |
| 53 | MANANANTANANA | Tsitondroina | 440 | 372 | 68 | 5.5 | 21 | 12/1 | 1 |
| 54 | MATSIATRA | Malakialina | 625 | 513 | 112 | 4.6 | 16 | 12/1 | 1 |
| 55 | MANGOKY | Banian | 330 | 272 | 58 | 4.7 | 16 | 1 | 1 |
| 57 | MORONDAVA | Dabara | 330 | 280 | 50 | 5.6 | 16 | 1 | 1 |
| 60 | SAHANIVOTRY | PK 197 | 730 | 560 | 170 | 3.3 | 5 | 12/1 | 2 |
| 61 | MANANDONA | Sahanivotry | 600 | 489 | 111 | 4.4 | 8 | 12/1 | 2 |
| 62 | MANIA | Fasimena | 720 | 513 | 207 | 2.5 | 4 | 12/1 | 2 |
| 73 | TSIRIBIHINA | Betomba | 695 | 601 | 94 | 6.4 | 16 | 1/2 | 2 |
| 79 | VARAHINA sud | Tsiazomp. | 1000 | 630 | 370 | 1.7 | 3 | 1 | 3 |
| 84 | SISAONY | Andramasina | 595 | 451 | 144 | 3.1 | 7 | 12 | 1 |
| 86 | ANDROMBA | Tsinjony | 860 | 662 | 198 | 3.3 | 6 | 12 | 1 |
| 89 | IKOPA | Bevomanga | 605 | 464 | 141 | 3.3 | 6 | 12/1 | 1 |
| 90 | IKOPA | Fiadanana | 575 | 467 | 108 | 4.3 | 8 | 1 | 2 |
| 91 | IKOPA | Antsatranana | 770 | 617 | 153 | 4.0 | 9 | 1 | 3 |
| 92 | ISINKO | Ambodiroka | 1130 | 994 | 136 | 7.3 | 22 | 1 | 2 |
| 93 | BETSIBOKA | Ambodiroka | 780 | 634 | 146 | 4.3 | 10 | 1 | 2 |

figure 8.14.

Rapport hh/hs des lames de saison humide et de saison sèche en fonction de la lame annuelle écoulée H




Les deux indices d'irrégularité intermensuelle ont été mis en rapport avec la valeur de la lame écoulée interannuelle du bassin :

hh/hs en fonction de H (graphe 8.14.)
M/m en fonction de H (graphe 8.15.)

On constate que les points représentatifs des deux indices se regroupent autour d'une courbe moyenne avec un gradient décroissant très rapide jusqu'à H = 300 mm, une décroissance curviligne plus faible tendant à diminuer entre H = 300 et H = 1 000, puis un palier au-delà de H = 1 000 mm.

Les points représentatifs des bassins sont regroupés en régions bien distinctes :

- les bassins du sud (H ≤ 300 mm) avec des indices hh/hs supérieurs à 5 et jusqu'à 50 et des rapports M/m supérieurs à 25 (à l'exception de la Mananara à Bévia) ;

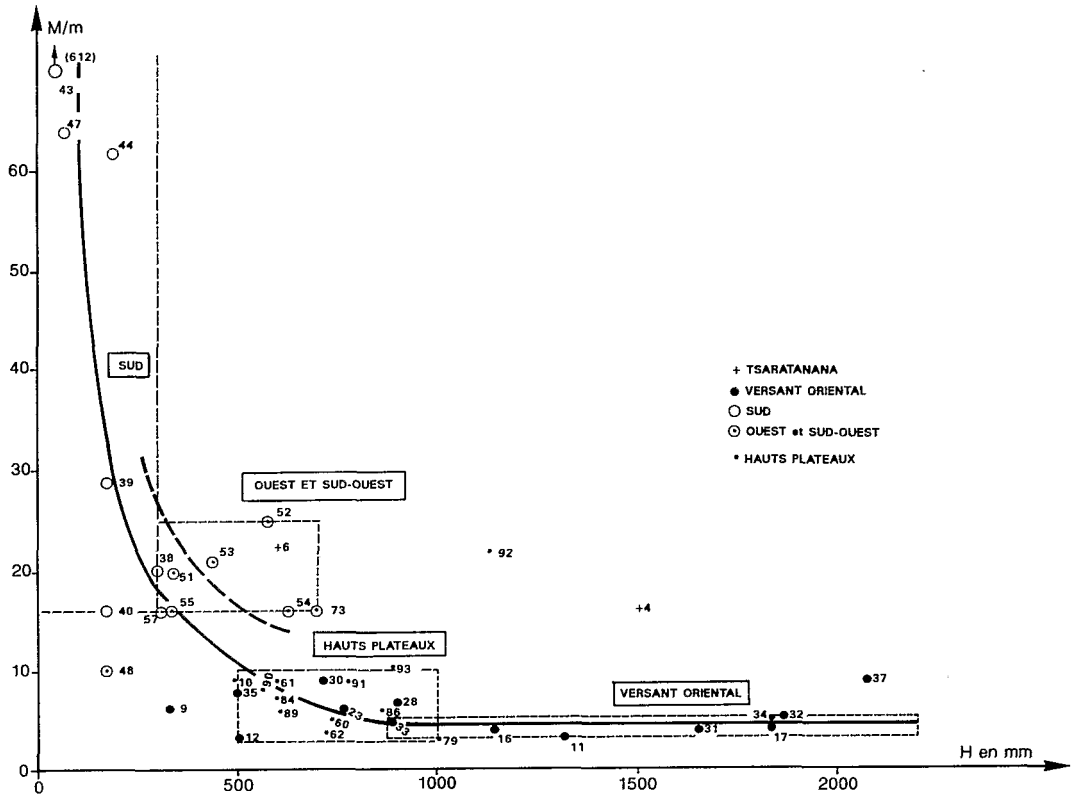
- les bassins de l'ouest et du sud-ouest (300 < H < 700) avec des indices hh/hs compris entre 5 et 7 et des rapports M/m entre 15 et 25 ;

- les bassins des hauts plateaux (500 < H < 1 000) avec des indices hh/hs compris entre 2 et 5 et des rapports M/m entre 3 et 10 ;

- les bassins du versant oriental (H > 900) avec des indices hh/hs voisins de 2 et des rapports M/m entre 3 et 5.

figure 8.15.

Rapport M/m du débit moyen mensuel maximal
au débit moyen mensuel minimal
en fonction de la lame annuelle écoulée H




Un certain nombre de points représentatifs s'écartent assez sensiblement des courbes moyennes ou ne se situent pas dans leur domaine géographique :

- Bassins du Tsaratanana : la Sambirano (point 4), bien que comparable aux cours d'eau du versant oriental par son abondance annuelle, présente des coefficients d'irrégularité nettement supérieurs. Et ceci pour deux raisons : réserves d'altérites moins abondantes, tarissement plus rapide, et saison "sèche" pluviométrique beaucoup plus accusée (influence des régimes de l'ouest).

La Maevarano (point 6) ne se rattache aux régimes du Tsaratanana que pour son bassin supérieur. Son bassin moyen, d'altitude beaucoup plus faible et nettement moins arrosé (cuvette de Bealanana) se rattache aux régimes de la côte Ouest. La situation du point représentatif dans le second secteur est tout à fait justifiée.

- Bassins du versant oriental : le Maningory (point 9) occupe une situation très particulière dans la dépression de l'Alaotra, sous le vent de la première falaise. En saison des pluies, un stockage important est effectué dans le

lac Alaotra, les formations marécageuses et périmètres rizicoles entourant le lac ainsi que dans la nappe phréatique à battement annuel. Cette réserve annuelle est drainée pendant la saison sèche et contribue à soutenir les débits de la saison fraîche (diminution de l'irrégularité intermensuelle).

Le bassin de l'Ivondro à Ambodifana (point 12) est situé sur le rebord oriental des hauts plateaux et se rattachent partiellement à ces régimes.

Le Mangoro (point 23) dont le bassin est situé dans le "graben" de l'Alaotra-Mangoro, sous le vent de la première falaise, se rattache aux régimes des hauts plateaux. Ses affluents, l'Amborompotsy (point 28) et l'ONIVE (point 30), bien que faisant partie du versant oriental, sont en réalité des cours d'eau des hauts plateaux dont ils ont le régime. Il en va de même pour les bassins supérieurs de la NAMORONA (point 33) et de la Mananara du sud (point 35) dont les stations de contrôle sont situées à l'ouest du rebord de la grande falaise.

Enfin, à l'extrême sud, le bassin de l'Efaho (point 37), s'il se rattache par l'abondance de ses apports au régime oriental, s'en distingue par des réserves d'altérites moins puissantes, un drainage plus rapide et un contraste plus marqué entre les précipitations de saison "humide" et "sèche" (influence méridionale).

- Bassins des hauts plateaux : la Varahina du sud (point 79), située sur les hauts plateaux à la limite du rebord oriental, a des caractéristiques intermédiaires entre les régimes des hauts plateaux et ceux du versant oriental.

Le bassin de l'Isinko (point 92), très arrosé relativement (Tampoketsa du Kamoro) connaît cependant un régime pluviométrique beaucoup plus contrasté que celui des hauts plateaux. Son régime se rattache au grand ensemble du secteur ouest dont il représente la variante nord-ouest (à rapprocher du Sambirano).

- Bassins du sud-ouest : l'irrégularité intermensuelle de l'Onilahy à Tongobory (point 48) est très atténuée par l'influence des réserves stockées dans les grès de l'Isalo dont les tributaires connaissent en saison sèche des débits soutenus ainsi que par les résurgences des formations karstiques.

- Bassins du sud : la Mananara à Bévia (point 40) est située à l'est du domaine, directement sous le vent de l'Anosy ; bien que réduites, les précipitations de saison sèche restent suffisantes pour fournir, sur les secteurs imperméables du bassin, des débits encore appréciables en l'absence totale de réserves drainables.

Dans le secteur du sud, on note un accroissement très sensible de l'irrégularité de l'Est vers l'Ouest (du Mandrare à la Linta).

La répartition géographique des irrégularités intermensuelles est représentée sur les graphes 8.16. et 8.17.

Sur le graphe 8.16., les écoulements annuels et leur répartition semestrielle sont figurés pour chaque bassin par un rectangle dont la superficie est proportionnelle à la lame écoulée annuelle (1 $cm^2$ pour 200 mm) et les dimensions dans le rapport du semestre humide au semestre sec. Les rectangles massifs du versant oriental s'opposent aux rectangles grêles du versant méridional. Entre ces extrêmes, les représentations intermédiaires sont localisées sur les hauts plateaux dont les caractéristiques se rapprochent du versant oriental, et sur le versant ouest dont les caractéristiques (du nord au sud) se rapprochent du versant méridional.

Sur le graphe 8.17. sont esquissées les isolignes approchées (en raison du faible nombre de points représentatifs) du rapport des mois extrêmes (M/m).

Ces deux graphes mettent en évidence les deux lois générales de l'évolution de l'irrégularité intermensuelle à Madagascar.

- L'irrégularité est d'autant plus accusée que l'écoulement moyen annuel est faible.

- À écoulement annuel équivalent, l'irrégularité est d'autant plus forte que le bassin s'écarte de la côte orientale (gradient est-ouest).

La pluviométrie mensuelle la plus abondante (Pm) est généralement observée en décembre-janvier (hauts plateaux et ouest, bassins du sud) ou en janvier (versant oriental, bassin moyen de la Betsiboka).

figure 8.16.

Lames écoulées annuelles et répartition nov-avril/mai-octobre

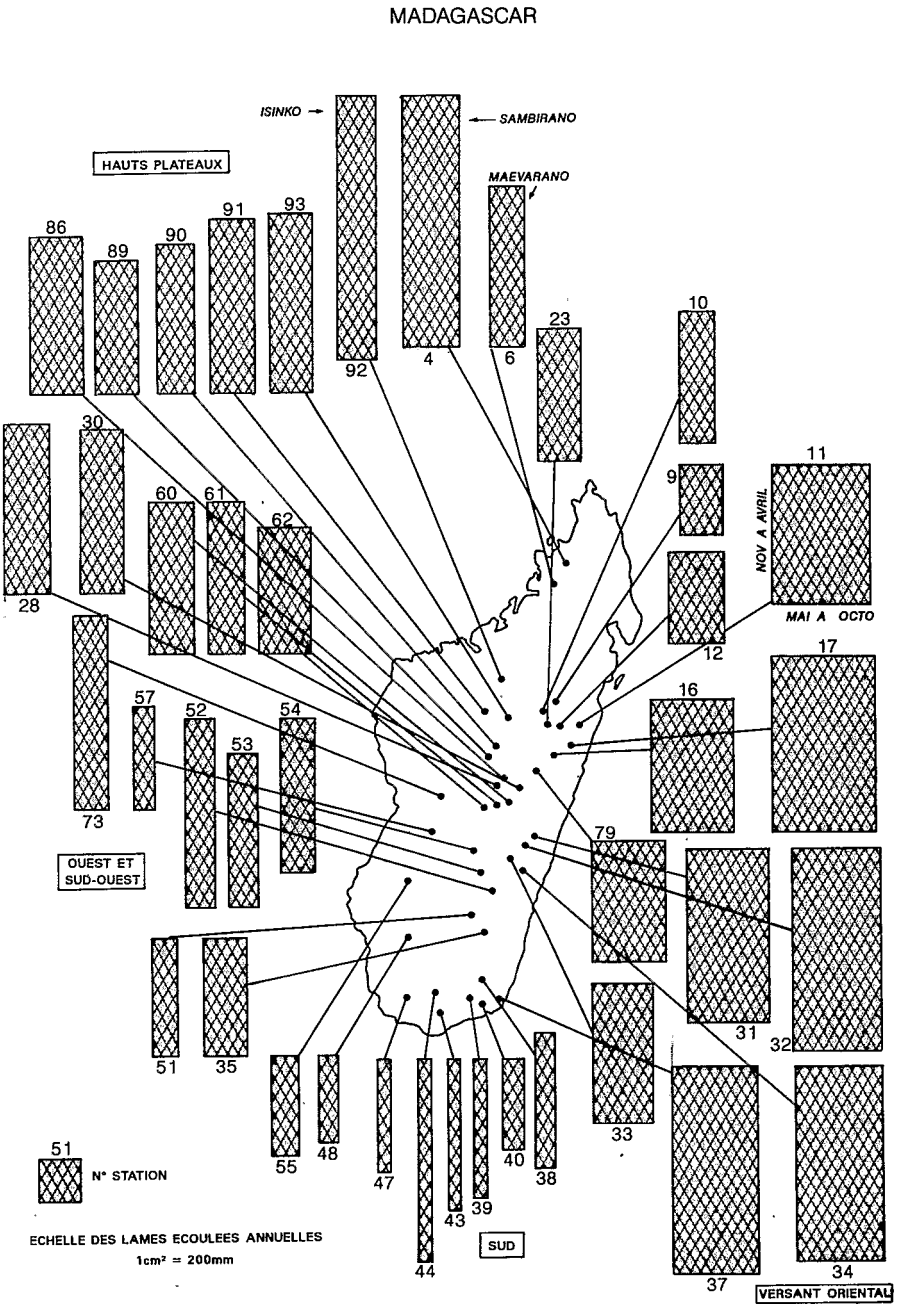
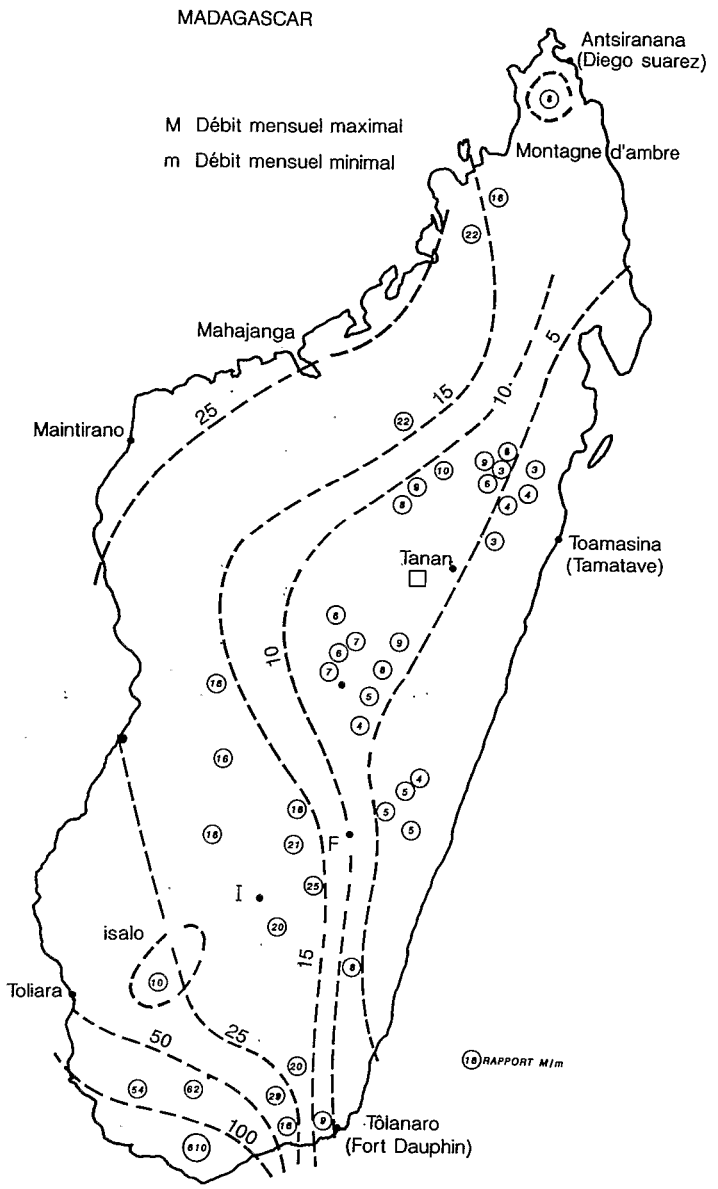


figure 8.17.

Esquisse des isolignes du rapport M/m




L'écoulement mensuel le plus abondant (Ph) est observé :

- en janvier, sur les bassins du sud et du sud-ouest. Le décalage avec le maximum pluviométrique est inférieur à un mois et parfois de l'ordre de 8 à 15 jours ; cela correspond à l'absence ou à l'importance réduite de l'intervention du stockage dans les réserves d'altérites et, dans le sud en particulier, à l'importance du ruissellement direct sur les secteurs imperméables ;

- en février (décalage de un mois à un mois et demi) sur le haut bassin de la Tsiribihina et le bassin moyen de l'Ikopa et de la Betsiboka avec une influence sensible mais encore moyennement importante du stockage-déstockage dans les réserves d'altérites ;

- en mars (décalage de un mois et demi à deux mois et demi) pour les bassins à fortes réserves d'altérites (latéritisation importante) : versant oriental, Ikopa et de façon moins sensible rivières du Tsaratanana.

Le Maningory, en raison du stockage important réalisé en saison des pluies dans le lac et les formations marécageuses périphériques ainsi que dans la nappe phréatique à battement annuel, présente le décalage le plus marqué (trois mois à trois mois et demi).

## 4. MÉCANISMES DES BASSINS

Les contrastes constatés sur l'irrégularité intermensuelle s'expliquent à partir des mécanismes des différents bassins qui apparaissent sur les bilans hydrologiques mensuels.

Dans la deuxième partie de l'étude, ces bilans ont été établis pour la plupart des bassins (stations de base).

Nous avons reportés (graphe 8.18.) quelques exemples caractéristiques des différents régions hydrologiques.

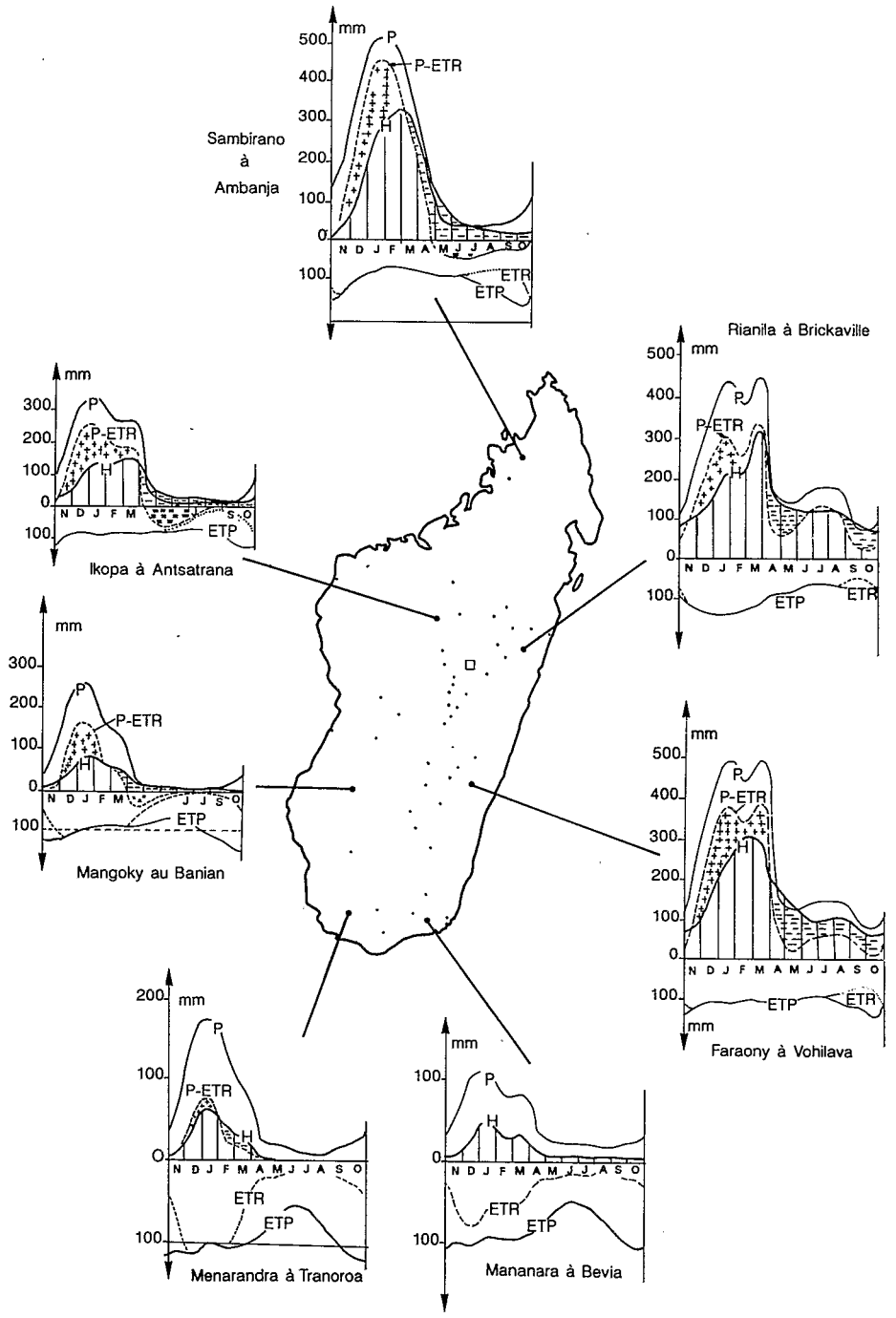
Pour les bassins du versant oriental, un important stockage est effectué au cours de la saison des pluies (de la mi-novembre à mars) dans les puissantes formations latéritiques.

Pendant la saison "sèche", le drainage de ces réserves contribue à alimenter les débits de basses eaux mais l'on observe une forte contribution des précipitations encore abondantes de la saison fraîche. Ces précipitations, qui connaissant une certaine recrudescence en juillet et août, peuvent entraîner un redressement des débits par ruissellement direct et recharge des nappes et conférer aux régimes un caractère tropical de transition avec amorce "pseudo-équatoriale" de seconde saison de hautes eaux, évidemment toute relative. Les sols superficiels sont pratiquement saturés toute l'année et l'ETR ne connaît qu'une assez faible réduction en fin de saison fraîche.

Pour les bassins des hauts plateaux et de l'ouest, le stockage en saison chaude est relativement moins important (réduction de l'épaisseur des altérites et des précipitations efficaces sur les hauts plateaux - pluviométrie moins abondante et ETP plus forte pour les régions de l'ouest). Il est cependant suffisant pour alimenter en saison fraîche des débits de basses eaux relativement soutenus sur les hauts plateaux, moins abondants sur l'ouest où ils proviennent en majeure partie des bassins supérieurs. Les précipitations de saison fraîche, très réduites, ne permettent que d'éviter une réduction trop draconienne de l'ETR et ne contribuent qu'exceptionnellement (lors des années très excédentaires où l'on peut noter quelques petites crues de saison fraîche) à l'alimentation de l'écoulement. L'ETR est nettement plus réduite que sur le versant oriental, et d'autant plus que l'on va vers le sud-ouest. Ces régimes se rattachent au type tropical pur.

figure 8.18.

Madagascar
Bilan hydrologique
mensuel



Pour les bassins méridionaux, l'absence quasi-totale de réserves d'altérites entraîne un effondrement des débits de saison fraîche. Pour les bassins entièrement situés sur l'extrémité méridionale du socle, les précipitations faibles mais presque toujours observées de saison sèche, permettent par ruissellement sur les secteurs imperméables des bassins le maintien d'un assez faible écoulement permanent jusqu'à octobre pour les bassins situés à l'est (Mandrare), et le plus souvent négligeable ou nul pour les bassins situés plus à l'ouest ou au sud (Manombovo, Linta) en raison d'une pluviométrie de saison fraîche plus faible et irrégulière. Mais pour les biefs situés sur les formations sédimentaires (sables grossiers en particuliers) les écoulements en provenance du socle sont assez rapidement absorbés par infiltration dans les lits sableux (et par évaporation) et les débits s'annulent le plus souvent bien en amont du littoral. Les régimes de ces cours d'eau sont tout à fait comparables aux régimes tropicaux sahéliens. L'ETR est très fortement réduite et l'on observe tout au plus un à deux mois "humides".

# Les crues

## Chapitre 9

Les observations et mesures effectuées sur la quarantaine de stations de base permanentes ont permis de constituer des échantillons de débits maximaux annuels à partir desquels, par analyse statistique, ont été évaluées les valeurs de différentes récurrences (en prenant en compte chaque fois que possible, les observations historiques). De plus, à l'occasion d'enquêtes ou études de plus courte durée (effets des cyclones, enquêtes d'environnement, études d'aménagement : Franchissement d'axes routiers, retenues hydroélectriques ou autres, etc), des estimations (parfois sommaire) ont pu être effectuées sur un nombre assez important de stations.

Le tableau 9.1 et la carte de localisation (graphe 9.1) permettent de situer ces observations.

Le tableau 9.2 présente, pour les stations et bassins sur lesquels ont pu être évaluées les caractéristiques de crues, les données suivantes :

- numéro de la station (référence aux tableau et graphe 9.1)
- cours d'eau et station
- superficie ($km^2$) du bassin versant
- lame écoulé annuelle moyenne (H mm)
- débit maximal annuel médian (Q 2 $m^3/s$)
- débit maximal annuel décennal ( Q 10 $m^3/s$)
- débit maximal décennal spécifique (q s 10 $m^3/s/ km^2$)
(calculé sur la superficie corrigés : qs 10 = Q10 / S $.75$)
- dates d'observation du débit maximal annuel (50 % de l'échantillon)

La relation entre les débits maximaux spécifiques décennaux (qs10) et les lames écoulées annuelles (H) (où H, donnée bien régionalisée (cf. graphe 8.8), est représentative des précipitations annuelles, et dans une certaine mesure mais de façon beaucoup plus lâche, des précipitations journalières décennales) est representée par une liaison statistique certes significative (qs10 = .004 H + 2.8, R2 = .22, valeur de distribution de FISCHER- SNEDECOR : 16.9 pour 62 couples, probabilité de signification supérieure à 99.5 %) mais présentant une dispersion considérable.

Les écarts constatés (figure 9.2) ne sont pas distribués de façon aléatoire mais sont organisés en secteurs géographiques bien caractérisés et montrent une dépendance certaine à l'égard des facteurs conditionnels non-climatiques.

Sur la carte de Madagascar, où ont été reportées les valeurs de qs10 (figure 9.3), il n'est pas possible de tracer, à l'inverse des autres caractéristiques des régimes (lame annuelles déficits d'écoulement, débits d'étiage), des courbes d'isovaleurs à l'échelle de l'île.

Par contre apparaissent des regroupement significatifs qu'il est possible d'associer à des contextes géomorphologiques identifiables.

P. Chaperon, J. Danloux, L. Ferry

tableau 9.1.

Crues - Données d'enquêtes
Localisation des stations

| N° | Station | Localisation | N° | Station | Localisation |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Saharenana | Pont RN6 | 31 | Varahina | Mantasoa |
| 2 | Mananjeba | Antakoto | 32 | Mangoro | Ambodimanga |
| | Mananjeba | Marivorahona | 33 | Sakalina | Tsarasambo |
| 3 | Fanambano | Morafeno | 34 | Manampotsy | Ilaka |
| 4 | Maevarano | Beroitra | 35 | Ikopa | Antelomita |
| | Maevarano | Antafiandakana | 36 | Ihosy | Ampitakihosy |
| 5 | Bealanana | Ambinanindrano | 37 | Lohariana | Maroambo |
| 6 | Maevarano | Antelopolo | 38 | Sahasaka | Miakara |
| 7 | Ankaibe | Betsakotsako | 39 | Manandriana | Manandriana |
| 8 | Salohy | Andampihely | 40 | Vaharina Sud | Tsiazompaniry |
| 9 | Sofia | Antafiatsalana | 41 | Sisaony | Andramasina |
| 10 | Sandrangitra | Kalandy | 42 | Ambatomainty | BVR Sud |
| 11 | Mangarahara | Mandritsara | 43 | Onive | Tsinjoarivo |
| | Mangarahara | Ambodiaviavy | 44 | Sahanivotry | PK 197,5 |
| 12 | Bemarivo | Andranomiditra | 45 | Sandrandahy | Sandrandahy |
| | Bemarivo | Ampombitika | 46 | Mania | Sandrandahy |
| 13 | Anony | Ambohiboanjo | | Mania | Amboromania |
| 14 | Maningory | Andromba | 47 | Mananjary | Antsindra |
| 15 | Mananonoka | Rn22 | 48 | Ivoanana | Fatihita |
| 16 | Iazafo | Morafeno | 49 | Namorona | Vohiparara |
| 17 | Mananontanana | Rn44 | 50 | Matsiatra | Fanoro |
| 18 | Andragorona | Rn44 | 51 | Faraony | Sahasinaka |
| 19 | Sasomangana | Marianina | | Faraony | Vohilava |
| | Sasomangana | Pont MLA | 52 | Zomandao | Ankaramena |
| | Sasomangana | Ambohiboromanga | 53 | Matitanana | Mahasoabe |
| 20 | Sasomangana | Antanifotsy | 54 | Sahambano | Sahambano |
| 21 | Ivondro | Ringaringa | 55 | Mananara Sud | Maroangaty |
| | Ivondro | Volobe | 56 | Mangoky | Betroka |
| 22 | Ivondro | Ambodifana | 57 | Tsivory | Ambia |
| 23 | Ranofotsy | Andilanatoby | 58 | Ranomainty | Anivorano |
| 24 | Vohitra | Rogez | 59 | Mandrare | Andabolava amont |
| 25 | Rongaronga | Ambinaninony | | Mandrare | Andabolava aval |
| 26 | Rianila | Fetraomby | 60 | Mandrare | Andetsy |
| 27 | Vohitra | Andekaleka | 61 | Manampanihy | Elanary |
| 28 | Rianila | Vohibinany | 62 | Andrantina | Marotsiraka |
| 29 | Iaroka | Ampitabe | 63 | Efaho | Fanjahira |
| 30 | Mangoro | Mangoro | 64 | Mananara | Bevia |

suite

| N° | Station | Localisation | N° | Station | Localisation |
|---|---|---|---|---|---|
| 65 | Mananara | Beraketa | 97 | Ikopa | Anosizato |
| 66 | Mandrare | Amboasary Sud | | Ikopa | Mahitsykely |
| 67 | Ianamolora | BVR | 98 | Ikopa | Bevomanga avall |
| 68 | Manambovo | Tsihombe | | Ikopa | Bevomanga amont |
| 69 | Besaly | Amboasary Est | | Ikopa | Ambohitrinimerina |
| 70 | Menarandra | Tranoroa | | Ikopa | Anosimpary |
| 71 | Tranoroa | BVR | | Ikopa | Farahantsana |
| 72 | Menakompy | Andriambe | 99 | Ikopa | Fiadanana |
| | Menakompy | Ankilimahazo | 100 | Kimazimazy | Soatanana |
| 73 | Menarandra | Bekily | 101 | Demoka | Bevatry |
| 74 | Onilahy | Tongobory | | Demoka | Rn8 |
| 75 | Fiherenana | RN9 | 102 | Tsiombikary | Tsiombikary |
| 76 | Ihosy | Ihosy | 103 | Namela | Antanandava |
| 77 | Banian | BVR | 104 | Sahamilahy | Maheriara |
| 78 | Mangoky | Banian | 105 | Sahabe | Betambako |
| | Mangoky | Vondrove | | Sahabe | Prise PC23 |
| 79 | Mangoky | Bevoay | 106 | Mamokomita | Maroharana |
| 80 | Mananantanana | Tsitondroina | 107 | Ikopa | Antsatrana |
| 81 | Matsiatra | Bedray | 108 | Ivakaka | Vohidiala |
| | Matsiatra | Malakialina | 109 | Isinko | Ambodiroka |
| 82 | Manandona | Sahanivotry | 110 | Betsiboka | Ambodiroka |
| 83 | Mania | Fasimena | | Betsiboka | Ancien pont |
| 84 | Sakamaly | Migodo | 111 | Ankaboka | BVR aval |
| 85 | Morondava | Tsiandava | 112 | Karambo | Betsireboka |
| | Morondava | Dabara | 113 | Mahavavy Sud | Marovato |
| 86 | Beritsoka | Site barrage | | Mahavavy Sud | Sitampiky |
| | Beritsoka | Rn35 | 114 | Marovoay | Rn4 |
| 87 | Manambola | Ambatolahy | 115 | Kamoro | Rn4 |
| 88 | Sakeny | Andraketa | 116 | Sofia | Rn6 |
| 89 | Mania | Ankotrofotsy | 117 | Tsinjomorona | Ankobakobaka |
| 90 | Tsiribihina | Betomba | 118 | Maevarano | Ambodivohitra aval |
| 91 | Amborompotsy | Antsampandrano | | Maevarano | Tetezambato |
| 92 | Mahajilo | Antsakoamadinika | 119 | Bealanankely | Betainkankana |
| | Mahajilo | Miandrivazol | 120 | Antsamaka | Ambatoria |
| 93 | Tafaina | Ambohidrano | 121 | Beandrarezona | Beandrarezona |
| 94 | Andromba | Behenjy | 122 | Sambirano | Ambanja |
| | Andromba | Tsinjony | 123 | Ramena | Ambodimanga |
| 95 | Ikopa | Ambohimanambola | 124 | Mahavavy Nord | Rn6 |
| 96 | Katsoaka | Niakotsoarano | | Mahavavy Nord | Amont prise |

figure 9.1.

Observations sur les crues
Localisation des stations

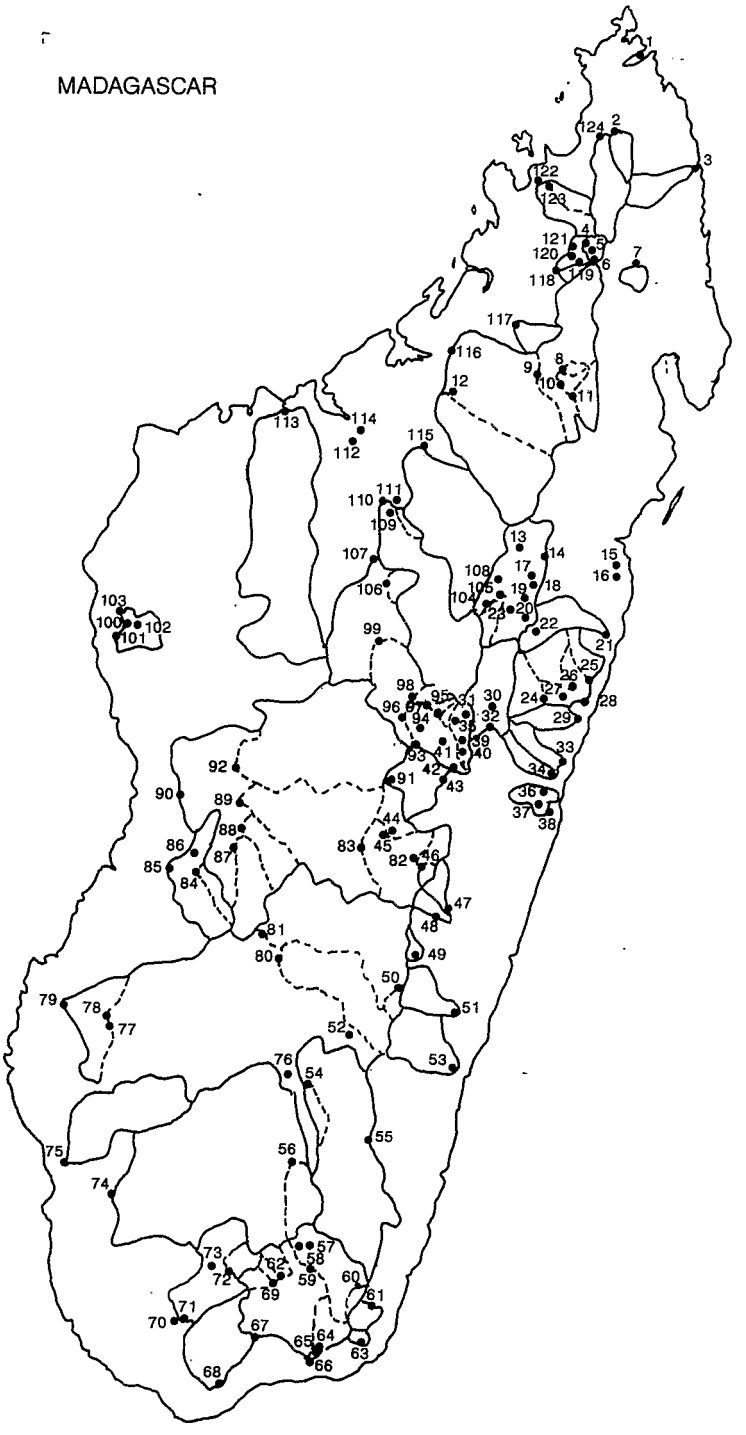


tableau 9.2.

Madagascar
Caractéristiques des crues

| N° | Cours d'eau | Station | S km² | H mm | Q2 m³/s | Q10 m³/s | $qs_{10}$ m³/s/km² | | 50% des crues du | au |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | Mananjeba | Ankatoto | 945 | | 480 | 1090 | 6.4 | | | |
| 124 | Mahavavy nord | Ambilobe | 3210 | 1100 | 1250 | 3500 | 8.2 | | 15.01 | 15.03 |
| 122 | Sambirano | Ambanja | 2830 | 1500 | 1550 | 4270 | 11 | | | |
| 123 | Ramena | Ambodimanga | 1080 | 1800 | 867 | 1930 | 10.3 | | 24.01 | 28.02 |
| 118 | Maevarano | Ambodivohitra | 2585 | 600 | 248 | 445 | 1.23 | | 23.01 | 17.02 |
| 121 | Beandraverona | | 190 | | | 370 | 7.2 | | | |
| 119 | Bealanankely | | 85 | | | 150 | 5.4 | | | |
| 5 | Bealanana | | 95 | | | 160 | 5.2 | | | |
| 117 | Tsinjomorona | Ankobakobaka | 886 | | | 620 | 3.8 | | | |
| 3 | Fanambana | Morafeno | 1830 | | | 2750 | 9.8 | | | |
| | Lokoho | Andohariana | 1040 | (1650) | | 1970 | 10.7 | | | |
| 7 | Ankaibe | Betsakotsako | 480 | | | 275 | 2.7 | | | |
| 14 | Maningory | Andromba | 6855 | 330 | 171 | 365 | .5 | | | |
| 13 | Anony | Ambohiboanjo | 1485 | | | 565 | 2.4 | | | |
| 108 | Ivakaka | Vohidiala | 173 | | | 110 | 2.3 | | | |
| 104 | Sahamilahy | Maheriara | 157 | | | 300 | 6.7 | | | |
| 23 | Ranofotsy | Andilanatoby | 191 | | | 330 | 6.4 | | | |
| 17 | Mananontanana | RN44 | 67 | | | 220 | 9.4 | | | |
| 16 | Mananokoka | RN22 | 84 | | | 180 | 6.5 | | | |
| 21 | Ivondro | Ringaringa | 2560 | 1320 | 865 | 2460 | 6.8 | | 17.01 | 18.03 |
| 24 | Vohitra | Rogez | 1910 | 1145 | 678 | 2530 | 8.8 | | 16.01 | 27.02 |
| 28 | Rianila | Brickaville | 6000 | 1840 | 3090 | 6360 | 9.3 | | 16.01 | 27.02 |
| 27 | Vohitra | Andekaleka | 2615 | 1710 | 780 | 3270 | 8.9 | | | |
| 26 | Rianila | Fetraomby | 1863 | 2100 | 2220 | (5000) | (17.6) | | | |
| 29 | Iaroka | Ampitabe | 1275 | (1550) | 1490 | 2920 | 13.7 | | | |
| 25 | Rongaronga | Ambinaninony | 1000 | (2500) | 760 | 1290 | 7.3 | | | |
| 33 | Sakanila | Tsarasambo | 1700 | | | 2500 | 9.4 | | | |
| 34 | Manampotsy | Ilaka | 1280 | | | 2600 | 12.1 | | | |
| 30 | Mangoro | gare | 3600 | 770 | 440 | 1220 | 2.6 | | 02.01 | 04.03 |
| 32 | Mangoro | Ambodimanga | 4735 | 805 | 760 | 1250 | 2.2 | | | |
| 91 | Amborompotsy | Antsampandrano | 95 | 890 | 19 | 35 | 1.2 | | 06.01 | 01.03 |
| 43 | Onive | Tsinjoarivo | 3200 | 720 | 385 | 575 | 1.4 | | 24.01 | 18.02 |
| 47 | Mananjary | Antsindra | 2260 | 1650 | 467 | 935 | 2.8 | | 15.01 | 23.02 |
| 48 | Ivoanana | Fatihita | 835 | 1860 | 295 | 680 | 4.4 | | 15.01 | 21.02 |
| 49 | Namorona | Vohiparara | 445 | 895 | 86 | 370 | 3.8 | | 15.01 | 22.02 |
| 51 | Faraony | Vohilava | 2005 | 1840 | 995 | 2270 | 7.6 | | | |
| 53 | Matitanana | Mahasoabe | 3925 | | | 3340 | 6.7 | | | |
| 55 | Mananara sud | Marangaty | 14160 | 535 | 1250 | 2340 | 1.8 | | 03.01 | 01.03 |
| 54 | Sahambano | Sahambano | 2000 | | | 200 | .7 | | | |
| 63 | Efaho | Fanjahira | 196 | 2070 | 430 | 960 | 18 | | 01.01 | 01.03 |
| 59 | Mandrare | Andabolava | 4035 | 300 | 691 | 2510 | 5 | | 01.01 | 15.02 |
| 66 | Mandrare | Amboasary | 12435 | 185 | 2150 | 8000 | 6.8 | | 01.01 | 18.02 |
| 64 | Mananara | Bevia | 1085 | 175 | 251 | 900 | 4.8 | | 05.01 | 26.02 |

suite

| N° | Cours d'eau | Station | S km² | H mm | Q2 m³/s | Q10 m³/s | qs10 m³/s/km² | | 50% des crues du | au |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 60 | Mandrare | Andetsy | 372 | (265) | 106 | 420 | 5 | | | |
| 68 | Manamboro | Tsihombe | 2712 | 50 | 422 | 930 | 2.5 | | 29.12 | 18.02 |
| 70 | Menarandra | Tranoroa | 5330 | 190 | 1510 | 3600 | 5.8 | | 01.01 | 09.02 |
| 73 | Menarandra | Bekily | 1735 | (220) | 625 | 1720 | 6.4 | | | |
| 72 | Menakompy | Andriabe | 775 | 390 | 760 | 1560 | 10.6 | | | |
| 74 | Onilahy | Tongobory | 27700 | 165 | (1180) | 2300 | 1 | | 31.12 | 18.02 |
| 76 | Ihosy | Ihosy | 1500 | 340 | 161 | 415 | 1.7 | | 29.12 | 22.02 |
| 52 | Zomandao | Ankaramena | 610 | 575 | 363 | 1160 | 9.4 | | 25.12 | 11.02 |
| 80 | Manantanana | Tsitondroina | 6510 | 440 | 1380 | 1820 | 2.5 | | 24.12 | 27.01 |
| 81 | Matsiatra | Malakialina | 11715 | 625 | 2460 | 4980 | 4.4 | | 01.01 | 01.03 |
| 50 | Matsiatra | Fanoro | 1160 | | | 780 | 3.9 | | | |
| 78 | Mangoky | Banian | 50 000 | 330 | 8410 | 16900 | 5 | | 07.01 | 12.02 |
| 85 | Morondava | Dabara | 4640 | 330 | 1580 | 3600 | 6.4 | | 12.01 | 24.02 |
| 84 | Sakamaly | Migodo | 790 | 360 | | 1700 | 11.4 | | | |
| 86 | Beritsoka | site barrage | 577 | 240 | | 500 | 4.3 | | | |
| 44 | Sahanivotry | PK 197 | 430 | 730 | 76 | 145 | 1.5 | | 16.01 | 05.03 |
| 82 | Manandona | Sahanivotry | 1450 | 600 | 186 | 370 | 1.6 | | 17.01 | 18.02 |
| 83 | Mania | Fasimena | 6795 | 720 | 758 | 1770 | 2.4 | | 06.01 | 24.02 |
| 45 | Sandrandahy | Sandrandahy | 286 | (635) | | 150 | 2.2 | | | |
| 46 | Mania | Sandrandahy | 1470 | (825) | | 620 | 2.6 | | | |
| 89 | Mania | Ankotrofotsy | 17990 | (695) | | 3700 | 2.4 | | | |
| 92 | Mahajilo | Miandrivazo | 14375 | (755) | | 5750 | 4.4 | | | |
| 90 | Tsiribihina | Betomba | 45000 | 695 | 6820 | 15000 | 4.8 | | 16.01 | 18.02 |
| 87 | Manambola | Ambatolahy | 1893 | (680) | | 4790 | 16.7 | | | |
| 88 | Sakeny | Andraketa | 3138 | (450) | | 3100 | 7.4 | | | |
| 101 | Demoka | Bevatry | 1325 | (670) | | 1200 | 5.5 | | | |
| 100 | Kimazimazy | Soatanana | 260 | (875) | | 400 | 6.2 | | | |
| 103 | Namela | Antanandava | 680 | (835) | | 840 | 6.3 | | | |
| 113 | Mahavavy sud | Marovato | 18500 | | | 3220 | 2.0 | | | |
| | Ikopa | Antelomita | 1080 | | | 290 | 1.3 | | | |
| 97 | Ikopa | Mahitsy | 1684 | 590 | 133 | 230 | .9 | | 18.01 | 20.02 |
| 41 | Sisaony | Andramasina | 318 | 595 | 93 | 225 | 3 | | 06.01 | 25.02 |
| 94 | Andromba | Tsinjony | 350 | 860 | 91 | 165 | 2 | | 24.01 | 20.03 |
| 96 | Katsoaka | Niakotsorano | 563 | | | 90 | .8 | | | |
| 93 | Tafaina | Ambohidrano | 4.5 | 725 | 33 | 52 | 16.7 | | | |
| 98 | Ikopa | Bevomanga | 4290 | 605 | 331 | 460 | .9 | | 15.01 | 20.02 |
| 99 | Ikopa | Fiadanana | 9450 | 575 | 1140 | 1780 | 1.9 | | | |
| 107 | Ikopa | Antsatrana | 18645 | 770 | 2560 | 3400 | 2.1 | | 16.01 | 21.02 |
| 109 | Isinko | Ambodiroka | 600 | 1130 | 512 | 1440 | 11.9 | | 03.01 | 14.03 |
| 110 | Betsiboka | Ambodiroka | 11800 | 780 | 4190 | 12000 | 10.6 | | 06.01 | 19.02 |
| 9 | Sofia | Antafiatsalana | 4100 | | | 940 | 1.8 | | | |
| 116 | Sofia | Pont RN6 | 23500 | | | 7300 | 3.8 | | | |
| 12 | Bemarivo | Andranomiditra | 6515 | | | 4900 | 6.7 | | | |

figure 9.2.

Débits maximaux de crue
Qsp décennal en fonction
de la lame écoulée H

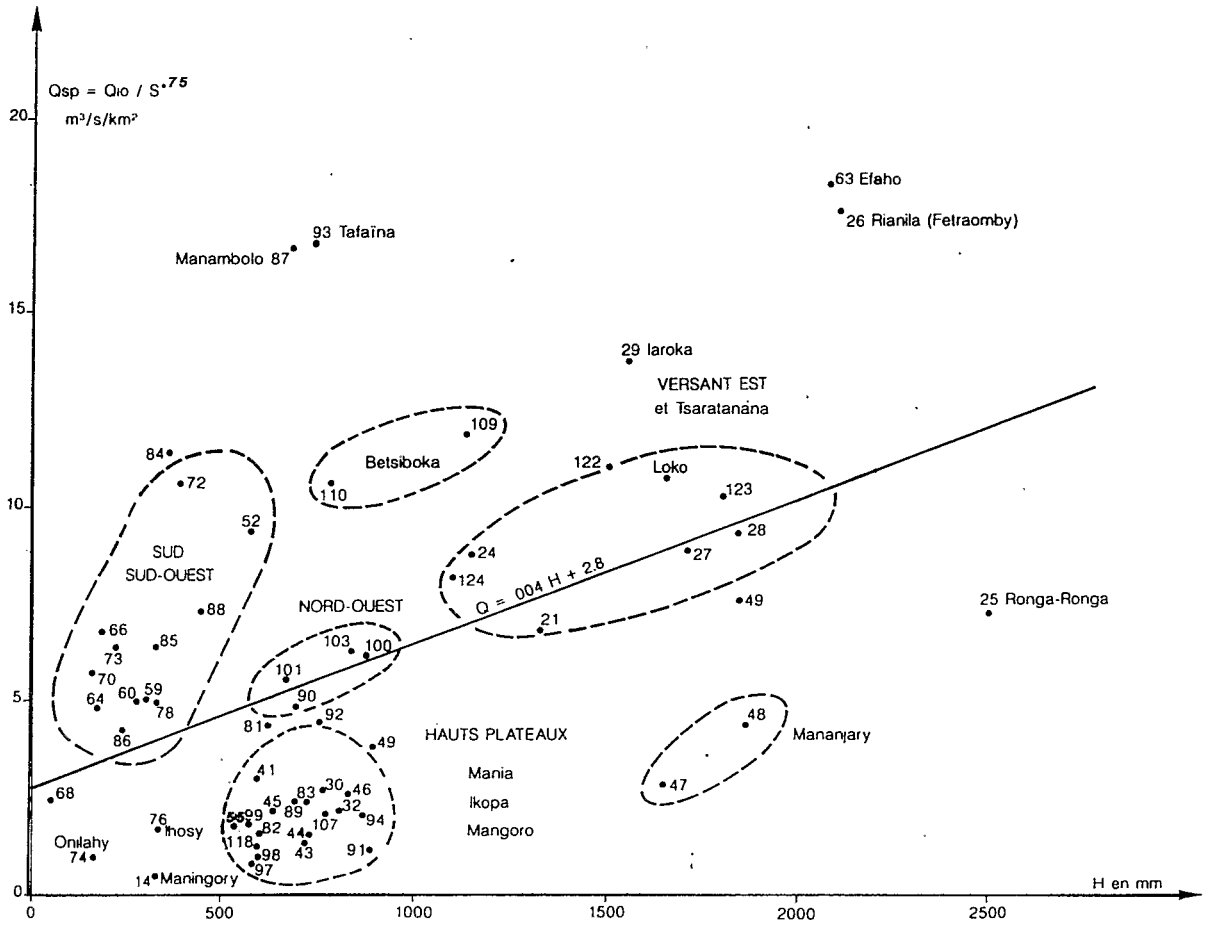
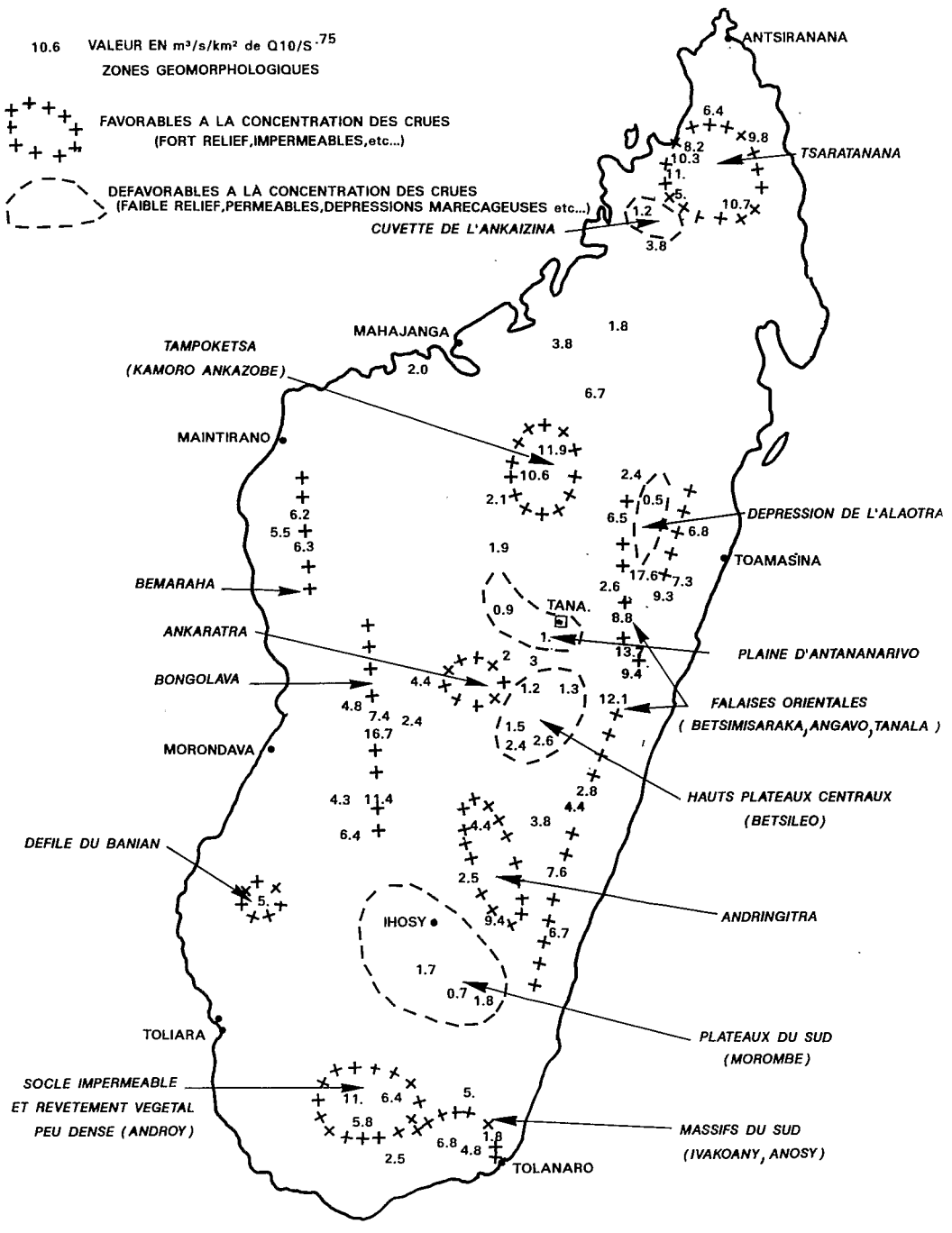


figure 9.3.

Débits spécifiques de crue décennale



On peut ainsi distinguer :

- des zones géomorphologiques favorables à la concentration des crues :

  • sous l'effet du relief : contrefort des grands massifs (TSARATANANA,ANKARATRA, ANDRINGITRA ANOSY et IVAKOANY) avec des débits spécifiques compris entre 5 et 10 $m^3/s/km^2$, falaises orientales (BETSIMISIRAKA, ANGAVO, TANALA) avec des débits compris entre 10 et 15 $m^3/s/km^2$ ,falaises occidentales (BONGOLAVA, BEMARAHA, rebords des TAMPOKETSA) ou les valeurs sont comprises entre 5 et 10 $m^3/s/km^2$ ;

  • En raison de la nature imperméable du substratum (plateau de l'ANDROY, par exemple) ;

  • à la suite d'une singularité de site (défilé du BANIAN) ;

- des zones géomorphologiques défavorables à la concentration des crues :

  • à l'aval de dépressions marécageuses ou de périmètres rizicoles étendus (cuvettes de l'ALAOTRA et de l'ANKAIZENA, plaine d'ANTANANARIVO) avec des débits spécifiques de l'ordre de 1 $m^3/s/km^2$ ou moins ;

  • Pour des reliefs attenués (plaines ou vallées à fond plat des hautes terres centrales - BETSILEO - ou méridionales - plateau de l'Horombe, (vallée de l'Ihosy) avec des valeurs de l'ordre de 2 $m^3/s/km^2$ ;

  • Bassins situés sur des formations perméables (basaltes fissurés, sables, etc).

Ces influences géomorphologiques peuvent se composer, s'opposer (par exemple les cours d'eau de la montagne d'AMBRE avec de fortes pentes sur basaltes fissurés) et se compliquer par l'effet du couvert végétal : atténuation des débits de pointe pour les bassins sous forêt ombrophile dense ou "savoka" ou bien, "a contrario", influence insignifiante du recouvrement lâche et discontinu des savanes.

Différentes formules ont été élaborées pour relier les débits maximaux de crue (variable expliquée) aux différents facteurs conditionnels (variables explicatives) plus ou moins facilement paramétrisables.

# 1. ESTIMATION DES DÉBITS MAXIMUMS DE CRUE

## 1.1. Les formules empiriques

Les tentatives d'application ou d'établissement pour Madagascar d'une formule empirique de calcul direct des débits maximums de crues sont fort nombreuses.

Il s'agit le plus souvent de formules limitées à l'évaluation des plus forts débits maximums connus de crues (courbes enveloppes), ou plus rarement, des méthodes beaucoup plus générales (calcul des débits de pointe

pour différentes périodes de retour), régionales ou applicables exclusivement à Madagascar (méthodes LEROY, EEM, DORSCH, SOGREAH, GR, DURET, SOGREAH-SOMEAH...) et faisant ou non appel à des régressions simples ou multiples (formule de L. DURET).

L'inconvénient de ces formules, trop générales et dotées parfois d'une précision bien problématique (+/- 20 % pour des débits centennaux, selon certains auteurs), est d'avoir été basées sur des résultats d'observations et mesures insuffisants (échantillons de taille restreinte, importantes extrapolations des courbes d'étalonnage, etc.). Dans de nombreux cas, les écarts entre débits calculés et débits "observés" sont extrêmement forts.

Établies et utilisées pour les bassins du centre-est, pour le calcul des crues de périodes de retour 25 ($Q = 6.8A^{0.8}$) et 100 ans ($Q = 11A^{0.8}$), les formules types EEM et SOGREAH fournissent des ordres de grandeur relativement corrects quand il s'agit de stations de cette zone (première façade Est, mêmes gammes de superficie et de pente, conditions géologiques et de couvertures proches) sans grande particularité.

| STATION | Superficie A Km² | Valeurs calculées T=25 | Valeurs calculées T=100 | Résultats des mesures T=25 | Résultats des mesures T=100 |
|---|---|---|---|---|---|
| VOHILAVA | 2005 | 2980 | 4820 | 3280 | 5100 |
| MAHASOABE | 3925 | 5100 | 8250 | 4150 | 5250 |

Les valeurs calculées et estimées différent par contre très fortement, pour toute singularité géologique ou hydraulique.

| STATION | Superficie A Km² | Valeurs calculées T=25 | Valeurs calculées T=100 | Résultats des mesures T=25 | Résultats des mesures T=100 |
|---|---|---|---|---|---|
| MANGORO | 4735 | 5930 | 9590 | 1500 | 1850 |
| ANDROMBA | 6855 | 7970 | 12900 | 490 | 860 |

Afin de tenir compte des conditions de pente (indice de pente global I) et de la pluviométrie, L. DURET a développé en 1972 une méthode d'estimation des crues de différentes périodes de retour, de formulation :

$Q = .025\ A^{0.8}\ I^{0.32}\ H\ (1 - 36/H)^2$

avec H mm, hauteur de pluie maximale journalière de période de retour T.

L'application de cette formule au calcul des crues centennale donne des résultats très inégaux.

| STATION | Superficie A km² | H 100 mm | I. corr. m/km | Crue centennale calculée | Crue centennale déduite * |
|---|---|---|---|---|---|
| ROGEZ | 5114 | 300 | 10 | 5144 | 5470 |
| MAROANGATY | 14162 | 180 | 5 | 10094 | 4470 |
| BEKILY | 1733 | 190 | 18 | 3065 | 6200 |
| BANIAN | 50000 | 265 | 4 | 44312 | 34000 |
| DABARA | 4638 | 275 | 6 | 7896 | 11000 |

* Déduite des ajustements statistiques

Il est possible, en premier lieu, d'attribuer ces disparités au choix de la variable expliquée. Les échantillons de

débits maximums annuels dépassent rarement vingt ans (et encore moins en 1972, date d'établissement de la formule). Les valeurs retenues pour les récurrences cinquantennales et centennales souffrent donc d'une grande imprécision. En effet, dans les échantillons analysés, le poids de certaines valeurs remarquables qu'il n'est, le plus souvent, pas possible de considérer comme exceptionnelle faute d'information historique, influe fortement sur les résultats statistiques.

Les ajustements de sous-séries (20 ans) ou de séries croissantes, tirées des deux plus longs échantillons chronologiques connus (ROGEZ et ANDROMBA), montrent bien l'importance de la crue exceptionnelle de 1958-59 dans ce secteur et les incertitudes qui subsistent quant aux estimations de la crue centennale, qui peut passer du simple au triple de sa valeur, suivant la sous-série considérée.

tableau 9.3.

Estimation des crues décennale et centennale

| VOHITRA A ROGEZ | | | MANINGORY A ANDROMBA | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Séries croissantes | | | | | |
| Période | T10 | T100 | Période | T10 | T100 |
| 1936-56 | 2224 | 4316 | 1948-63 | 386 | 1060 |
| 1936-57 | 2161 | 4216 | 1948-64 | 374 | 954 |
| 1936-58 | 2116 | 4118 | 1948-65 | 376 | 902 |
| 1936-59 | 2863 | 6370 | 1948-66 | 365 | 840 |
| 1936-60 | 2792 | 6312 | 1948-67 | 359 | 828 |
| 1936-61 | 2732 | 6242 | 1948-68 | 341 | 778 |
| 1936-62 | 2598 | 6315 | 1948-69 | 333 | 739 |
| 1936-63 | 2560 | 6111 | 1948-70 | 331 | 707 |
| 1936-64 | 2755 | 6101 | 1948-71 | 342 | 730 |
| 1936-65 | 2654 | 6134 | 1948-72 | 373 | 876 |
| 1936-66 | 2596 | 6124 | 1948-73 | 365 | 846 |
| 1936-67 | 2541 | 6108 | 1948-74 | 365 | 818 |
| 1936-68 | 2505 | 5947 | 1948-75 | 358 | 813 |
| 1936-69 | 2454 | 5935 | 1948-76 | 356 | 785 |
| 1936-70 | 2425 | 5782 | 1948-77 | 357 | 751 |
| 1936-71 | 2420 | 5651 | 1948-79 | 351 | 752 |
| 1936-72 | 2469 | 5643 | 1948-80 | 346 | 754 |
| 1936-73 | 2494 | 5573 | 1948-81 | 350 | 694 |
| 1936-74 | 2462 | 5464 | 1948-82 | 355 | 698 |
| 1936-75 | 2642 | 5639 | 1948-83 | 349 | 692 |
| 1936-76 | 2573 | 5669 | 1948-84 | 363 | 740 |
| 1936-77 | 2556 | 5555 | | | |
| 1936-78 | 2563 | 5491 | | | |
| 1936-79 | 2529 | 5471 | 1899-84 | 363 | (860) |
| Sous séries | | | | | |
| 1936-56 | 2224 | 4316 | 1948-68 | 348 | 828 |
| 1941-61 | 2983 | 6844 | 1953-73 | 397 | 1010 |
| 1946-66 | 3139 | 7017 | 1958-78 | 382 | 924 |
| 1951-71 | 2593 | 12444 | 1963-83 | 316 | 533 |
| 1956-76 | 2891 | 7035 | | | |

On pourrait attendre de meilleurs résultats pour le calcul des débits décennaux, mais bien qu'elle prenne en compte d'assez nombreux paramètres et s'appuie sur des séries de données assez consistantes (distribution statistique des maximums annuels de pluviométrie journalière et de crue), la formule de DURET, trop générale, demeure malheureusement tout aussi imprécise que les précédentes quand elle est appliquée entre autres, à de petits bassins ou à des rivières dont les bassins sont très perméables (faiblesse des volumes et débits ruisselés) ou presentant de larges plaines d'inondation (écrêtage des débits de crue).

| Station | Superficie A km² | H 10 mm | I Corr m/km | Crue décennale (m³/s) calculée | déduite |
|---|---|---|---|---|---|
| ANTSATRANA | 18645 | 135 | 5 | 7920 | 3420 |
| AMBODIROKA | 11800 | 135 | 7 | 6120 | 12070 |
| TSINJOARIVO | 3200 | 140 | 6 | 1920 | 585 |
| ANDROMBA | 6855 | 125 | 3 | 2640 | 363 |
| ANTSAMPANDRANO | 95,0 | 160 | 30 | 270 | 35 |
| BETSIREBIKA | 189 | 185 | 8 | 385 | 16 |

En dépit de la bonne qualité générale des données utilisées, il semble bien que le seul indice de pente globale soit bien insuffisant pour expliquer les variations importantes du rapport du débit maximal ruisselé Q MAX R au volume ruisselé VR. La formule de L. DURET, en particulier, ne prend pas en compte des facteurs géomorphologiques déterminants pour la forme des crues de certains bassins.

### 1.1.1. Le laminage des crues

Les dépressions marécageuses ou cultivées en rizière sont nombreuses à Madagascar et jouent un rôle considérable dans la propagation et l'ammortissement des crues.

Les rivières IKOPA et BETSIBOKA, bien que drainant des bassins assez également arrosés, présentent ainsi des pointes de crues extrêmement différentes (écrêtement de la plupart des crues de l'IKOPA dans la plaine d'ANTANANARIVO).

| STATION | Superficie A km² | QMAX R * m³/s/km² | QMAXR/VR * | Crue décennale m³/s/km² |
|---|---|---|---|---|
| BETSIBOKA à AMBODIROKA | 11800 | 1.60 | 9.64 | 1.02 |
| IKOPA à FIADANNANA | 9450 | 0.08 | 2.22 | 0.21 |
| IKOPA à ANTSATRANA | 18645 | 0.05 | 1.80 | 0.18 |

* Cyclone de MANARA nord (mars 1959)

### 1.1.2. Nature des formations géologiques et couverture végétale

Le calage des paramètres de la formule a été éffectué à partir des résultats de bassins, certes sous couvertures végétales variées, mais situés essentiellement sur le socle cristallin. Trop rares sont les données obtenues et utilisées sur des bassins où dominent les formations sédimentaires ou volcaniques très perméables.

## 1.2. Estimation des débits décennaux de crue

Nous avons donc essayé d'établir une formule d'estimation des débits de crue à partir des principes suivants :

- utilisation de la régression multiple : l'insuffisance de l'information pluviométrique, ne permet pas dans la plupart des cas, l'emploi de méthodes plus analytiques.

- Application aux seuls débits décennaux, compte tenu de l'imprécision des résultats et de la taille des échantillons, pour une évaluation correcte des éléments statistiques nécessaires au calage des paramètres. À l'exception du MANINGORY (et des affluents du lac ALAOTRA), les séries de données disponibles sont, en effet, généralement trop courtes pour permettre (même après extension) une détermination utilisable des valeurs statistiques de récurrence plus rare que la décennale.

- Prise en compte des facteurs conditionnels déterminant pour les bassins situés hors des "normes".

Deux séries de variables explicatives ont été retenues : - les premières, relativement faciles à paramètrer, ne caractérisent que les conditions "moyennes" du ruissellement pour les bassins situés sur le socle ancien et recouverts essentiellement de savanes :

- la superficie A (en km²)
- l'indice de pente globale I (en m/km)
- l'indice des précipitations H (en mm) évalué comme la hauteur moyenne des précipitations journalières de fréquence décennale du bassin considéré (valeurs ponctuelles probables de l'ordre de 75 à 350 mm).

L'évaluation des pluies journalières de fréquence décennale a été menée à partir des données élaborées disponibles ( plus fortes précipitations journalières relevées chaque année ou plus fortes valeurs journalières indépendantes connues). Les résultats (assez proches) tirés de l'un ou de l'autre des échantillons , ont été complétés par des valeurs extraites de l'étude de L. DURET (tableau 9.4) afin de pouvoir établir une carte des précipitation journalières de fréquence décennale (figure 9.4).

Les précipitations journalières les plus importantes (300 mm et plus) sont observées sur le massif du TSARATANANA et les falaises de l'est, les plus faibles (100 mm et moins) dans les zones abritées, sous le vent des lignes de relief (Plaine d'ANTANANARIVO, ouest de l'ANKARATRA, vallées du MANORARE, de l'IHOSY, etc.) ainsi que dans l'extrême sud-ouest.

Les variables de la seconde série caractérisent les conditions plus particulières liées aux stockages (champs d'inondation, marais, rizières, lacs), aux perméabilités des terrains et à la nature (et importance) de la couverture végétale.

Les paramètres relatifs à ces indices sont évidemment plus difficiles à évaluer et comportent une certaine dose " d'empirisme".

Pour les zones exondées, les indices (E) sont compris entre 1 (pour les bassins comportant un pourcentage de marais ou rizières négligeable) et 0.3 (pour les stations situées à l'aval immédiat de grands marais et de lacs, comme le MANINGORY à ANDROMBA et la MAEVARANO à ANTELOPOLO).

Pour la nature des terrains, les coefficients d'imperméabilité (G) sont compris entre 1 (pour les bassins situés sur le socle cristallin fortement latérisé) et 0.2 (pour les bassins situés sur les formations gréso-sableuses du crétacé continental). Des valeurs intermédiaires ont été retenues pour les sols bruts d'érosion sur socle ancien du sud (0.6) et pour certaines formations volcaniques comme celles de l'ANKARATRA (0.3).

Pour la couverture végétale, l'indice (V) est compris entre 0.9 (bassins forestiers du SAMBIRANO) et 0.3 (bush et "déserts" pierreux du sud), en distinguant, par des valeurs intermédiaires les bassins cultivés et reforestés comme celui de la NAMORONA (0.7) et les bassins sous savane avec cultures des hautes terres centrales (0.5).

figure 9.4.

Précipitations journalières de fréquence décennale (24 h T 10)

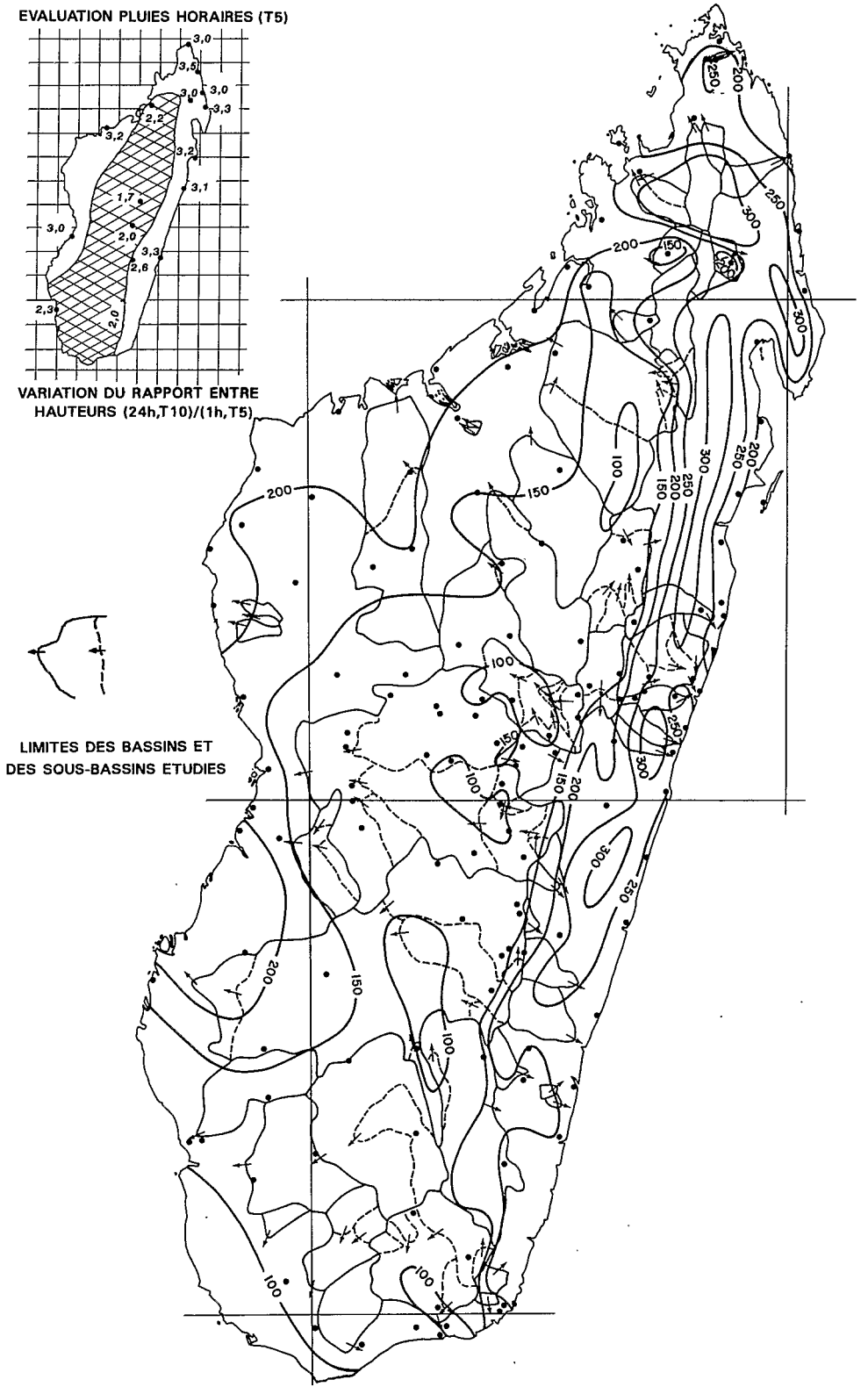


tableau 9.4.

Pluies journalières
de fréquence décennale

| Code | Station | Hauteur - Hmm | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 000400 | ALAOTRA AMBOHITSILAOZANA | 127 | | |
| 002800 | AMBAHIVAHIBE | | | 235 |
| 008000 | AMBALAVAO Sud | 113 | 109 | |
| 009200 | AMBANJA | | | 280 |
| 010800 | AMBATOFINANDRAHANA | 127 | | |
| 012000 | AMBATOLAHY | | 116 | |
| 012400 | AMBATOLAMPY Gare | 98 | 97 | |
| 013600 | AMBATOMAFANA | | 157 | |
| 014000 | AMBATOMAINTY Morafenobe | | | 190 |
| 019200 | AMBILOBE | | | 210 |
| 024400 | AMBODIFOTRA Sainte Marie | | | 280 |
| 024400 | AMBOHIBARY Antsirabe | | | 110 |
| 026400 | AMBOHIJAHANARY Alaotra | | 107 | |
| 027200 | AMBOHIMAHASOA | 118 | | |
| 030800 | AMBOHIMIADANA | 123 | | |
| 035600 | AMBOROMPOTSY | | | 115 |
| 036400 | AMBOSITRA | | | 115 |
| 036800 | AMBOVOMBE | | | 110 |
| 040000 | AMPANIHY Ouest | | | 105 |
| 045200 | AMPASIMPOLAKA | | 103 | |
| 050000 | ANALALAVA | | | 210 |
| 050800 | ANALAMAZAOTRA | 215 | | |
| 053600 | ANDAPA | | 190 | |
| 054800 | ANDEKALEKA-ROGEZ | 230 | | |
| 056000 | ANDEVORANTO | 261 | | |
| 065600 | ANDRIAMENA | | | 120 |
| 066000 | ANDRIBA | | | 150 |
| 071200 | ANJIRO | 127 | | |
| 072000 | ANJOZOROBE | | 102 | |
| 076800 | ANKAVANDRA | | 129 | |
| 077200 | ANKAZOABO Sud | | | 190 |
| 078000 | ANKAZOBE | | | 110 |
| 078400 | ANKAZOMIRIOTRA | | 91 | |
| 085200 | ANOSIBE AN'ALA | 197 | | |
| 087200 | ANTALAHA | | | 220 |
| 092800 | ANTANIMORA Ambovombe | | | 110 |
| 098400 | ANTONIBE | | | 235 |
| 104800 | ANTSIRABE Ecole | | | 120 |
| 106400 | ANTSOHIHY | | | 160 |

1. Valeur calculée à partir d'un échantillon des plus fortes précipitations journalières relevées chaque année.

2. Valeur calculée à partir d'un échantillon des plus fortes hauteurs journalières connues.

3. Valeur tirée de l'étude de L. DURET.

suite

| Code | Station | Hauteur - Hmm | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 107200 | ARIVONIMAMO Aéro | 100 | | |
| 109200 | BEALANANA-BETAINKANKANA | 105 | 103 | |
| 111600 | BEFANDRIANA Nord | 211 | | |
| 115200 | BEHARA Ville | | 96 | |
| 117600 | BEKILY | | | 115 |
| 118800 | BEKODOKA | | | 190 |
| 120400 | BELO/s/TSIRIBIHINA | 149 | 159 | |
| 121200 | BELOBAKA | | 131 | |
| 121600 | BELOHA | | | 120 |
| 124400 | BENENITRA | | | 110 |
| 126800 | BEREVO/s/Ranobe | | | 180 |
| 128400 | BERoROHA | | | 175 |
| 129600 | BESALAMPY | | | 225 |
| 131200 | BETANIMENA Tuléar agriculture | | | 110 |
| 131600 | BETIOKY Sud | | | 115 |
| 132400 | BETROKA | | | 105 |
| 133600 | BEVALA De Guitaud | | 75 | |
| 136400 | BOSY | | 159 | |
| 136800 | BRICKAVILLE-AMPASIMANOLOTRA | 262 | | |
| 140800 | DIEGO SUAREZ-ANTSERANANA | | 195 | |
| 146000 | ESIRA | | | 120 |
| 148400 | FANOVANA | 252 | | |
| 148800 | FARAFANGANA | | | 220 |
| 149200 | FARATSIHO | | | 110 |
| 150800 | FENERIVE-Est FENOARIVO ATSINANANA | | | 220 |
| 151200 | FENOARIVO Centre | | | 135 |
| 153200 | FIANARANTSOA | 154 | | |
| 156000 | FORT DAUPHIN-TAOLAGNARO | | 192 | |
| 159600 | IALATSARA | 142 | | |
| 160000 | IFANADIANA | | | 205 |
| 160400 | IFARANTSA | | | 160 |
| 162400 | IHOSY | | | 100 |
| 162800 | IKALAMAVONY | 103 | | |
| 163200 | ILAKA Centre | | 98 | |
| 163600 | ILAKA Est | 283 | | |
| 168000 | ISALO | | 146 | |
| 170800 | IVOHIBE | 127 | | |
| 171200 | IVOLOINA | | | 240 |
| 172400 | JUNCK-LOHARIANDAVA | 242 | | |
| 172800 | KANDREHO | | | 200 |

suite

| Code | Station | Hauteur - Hmm | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 173200 | KARIANGA | | | 190 |
| 174800 | KIANJASOA | | 122 | |
| 176400 | LA BOURDONNAIS-AMBODIVANDRIKA | 206 | | |
| 182400 | MAEVAETANANA | | | 150 |
| 183600 | MAHABO | | 152 | |
| 184800 | MAHAJAMBA | | | 190 |
| 186000 | MAHANORO | 249 | | |
| 186800 | MAHASOLO | | 104 | |
| 190400 | MAINTIRANO | | 243 | |
| 191600 | MAJUNGA-MAHAJANGA | | | 230 |
| 192000 | MALAIMBANDY | | 124 | |
| 194800 | MANAKARA | | | 235 |
| 197200 | MANANARA Nord | | | 200 |
| 197600 | MANANDAZA | | 113 | |
| 198000 | MANANDONA | 88 | 89 | |
| 198400 | MANANDRAY | 127 | | |
| 199600 | MANANJARY | 225 | | |
| 202400 | MANDOTO | | 122 | |
| 202800 | (LA) MANDRAKA | 179 | | |
| 203200 | MANDRITSARA | 146 | | |
| 207200 | MANJA | | | 205 |
| 212000 | MANTASOA Ecole | 145 | | |
| 214800 | MAROANTSETRA | | | 220 |
| 216800 | MAROLAMBO | 215 | | |
| 218000 | MAROMANDIA | | | 210 |
| 221600 | MAROVOAY Gare | 120 | | |
| 222000 | MAROVOAY-MADIROKELY | | | 190 |
| 223200 | MASOARIVO | 182 | | |
| 226400 | MIANDRIVAZO | | | 145 |
| 228000 | MIARINARIVO Itasy | | 100 | |
| 228800 | MIDONGY Sud | | | 205 |
| 231200 | MORAFENOBE | | | 190 |
| 231600 | MORAMANGA | 172 | | |
| 232400 | MOROMBE | | | 180 |
| 232800 | MORONDAVA | | 235 | |
| 234000 | MOUNEYRES-FANASANA | 219 | | |
| 234800 | NAHAMPOANA | | | 220 |
| 236400 | NANOKELY | 105 | | |
| 237200 | NOSY BE HELLVILLE-ANDOANY | | | 220 |
| 240400 | NOSY VARIKA | 257 | | |

suite

| Code | Station | Hauteur - Hmm | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 242400 | PORT BERGE-BORIZINY | | | 190 |
| 242800 | RANOHIRA | | | 130 |
| 243200 | RANOMAFANA Brickaville | 236 | | |
| 247600 | SAHAMBAVY | 175 | | |
| 251600 | SAKARAHA | | | 120 |
| 254400 | SAMBAVA | | | 230 |
| 256800 | SITAMPIKY | | | 205 |
| 257200 | SOALALA | | | 225 |
| 259200 | SOANIERANA IVONGO | | | 200 |
| 260800 | SOAVINANDRIANA | | 110 | |
| 262400 | TAMATAVE Aéro-TOAMASINA | 262 | | |
| 263200 | TAMBOHARANO | | | 220 |
| 263600 | TAMPINA | 197 | | |
| 266800 | TANANARIVO SCM-ANTANANARIVO | | 101 | |
| 272400 | TSARATANANA | | | 180 |
| 274000 | TSIHOMBE | | | 110 |
| 275600 | TSINJOARIVO | | | 120 |
| 276400 | TSIROANOMANDIDY | | | 120 |
| 277200 | TSIVORY | | | 130 |
| 278800 | TULEAR-TOLEARA | | | 106 |
| 278400 | VANGAINDRANO | | | 200 |
| 278800 | VATOMANDRY | 240 | | |
| 280800 | VOHEMAR | | | 190 |
| 284800 | VOLOBE | 287 | | |
| 285600 | VONDROZO | | | 190 |

Le tableau 9.5 regroupe les données du modèle relatives à 115 bassins étudiés. Les débits de crue décennaux sont tirés des analyses statistiques (stations des réseaux et données d'enquêtes) et de quelques travaux et résultats particuliers (notés * dans le tableau).

La relation établie à partir des trois premières variables explicatives :

$Q10 = 4.17\ A^{.72}\ H^{.03}\ I^{.26}\quad (R^2 = .89)$

peut paraître satisfaisante pour un grand nombre de stations, mais donne des résultats trop éloignés des valeurs statistiques observées pour permettre une estimation correcte des débits de pointe des bassins très perméables ou en partie marécageux.

Afin de corriger l'insuffisance du modèle, un second essai a été tenté en prenant comme variable dépendante $Q'10 = Q10/4.17\ A^{.72}\ H^{.03}\ I^{.26}$ et E, G et V comme nouvelles variables explicatives.

La formule adoptée d'expression,

$Q10 = 4.34\ A^{.72}\ H^{.03}\ I^{.26}\ E^{2.31}\ G^{1.25}\ V^{-.27}$

bien qu'établie de façon relativement sommaire, semble assez satisfaisante puisque, pour plus de 80 % des couples de valeurs (calculées et observées), les écarts restent inférieurs à l'intervalle +/- 50 %, pour une gamme de débits compris entre 10 et 20 000 m³/s (figure 9.5).

Toutefois, les valeurs de la plupart des variables explicatives ayant été estimées à partir de documents peu précis (cartes au 1/500 000e) il est souhaitable que cette formule puisse être améliorée, après une détermination plus correcte des variables :

- répartition hypsométrique des différents bassins avant tout calcul d'indice de pente global ;
- pourcentage de bas fonds inondables établi à partir des cartes au 1/100 000e ou au 1/50 000e ;
- taux d'imperméabilité et indice de végétation établis après examen des cartes géologiques et de végétation.

figure 9.5.

Débits décennaux de crue
Maximums de crues calculés et mesurés

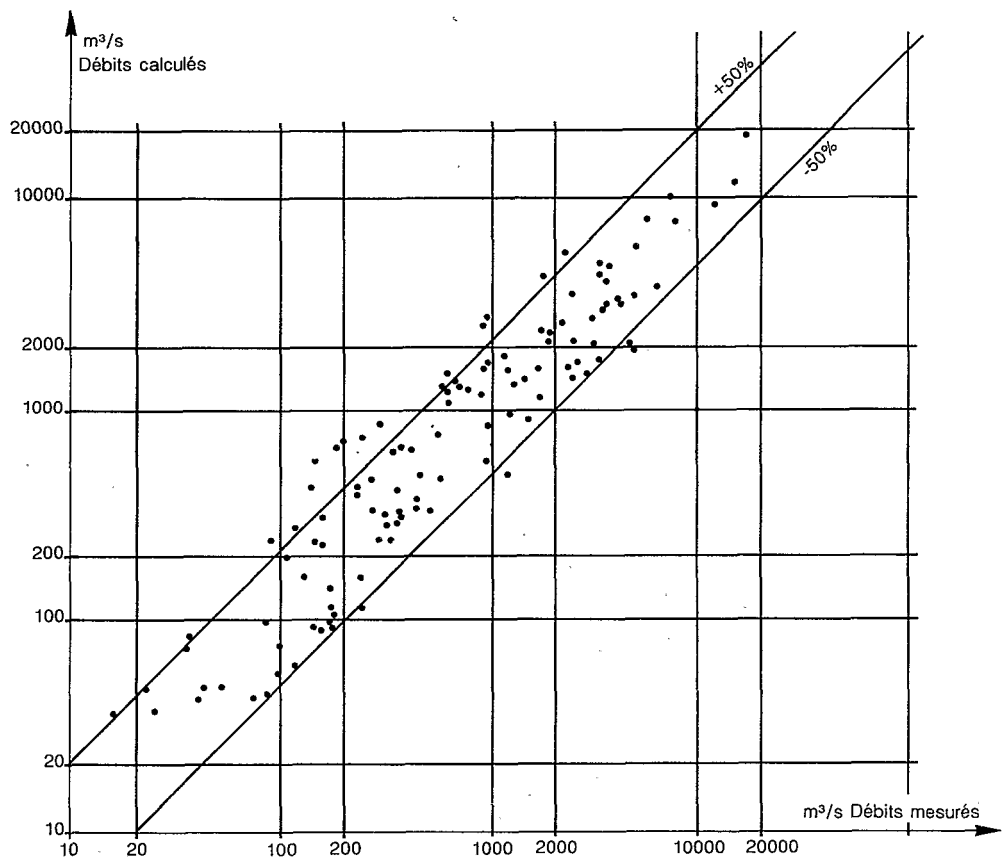


tableau 9.5.

Madagascar

Débits décennaux de crue et variables explicatives

| | Superficie A km² | Indice pluviométrique Hmm | Indice de pente global m/Km | Indice zones exondées | Coefficient d'imper-méabilité | Indice de végétation | Débit decennal de crue Qm³/s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| REGION NORD-EST | | | | | | | |
| 1253101205 - L'ANKAIBE A BETSAKOTSAKO | 480 | 240 | 21 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | (275) |
| REGION CENTRE EST | | | | | | | |
| 1251003205 - LA MANANONOKA A RN22 | 84,0 | 270 | 16 | 0,6 | 1,0 | 0,7 | (180) |
| 12522800109 - L'IVONDRO A RINGARINGA | 2560 | 210 | 8 | 0,8 | 1,0 | 0,8 | 2450 |
| 1256602505 - LA VOHITRA A ANKORAHOTRA | 500 | 160 | 8 | 0,4 | 1,0 | 0,7 | (180) |
| 1256602509 - LA VOHITRA A ROGEZ-ANDALEKA | 1910 | 190 | 10 | 0,8 | 1,0 | 0,7 | 2530 |
| 1256602503 - LA VOHITRA A ANDEKALEKA | 2615 | 190 | 10 | 0,8 | 1,0 | 0,8 | (3400) |
| 1256600110 - LE RIANILA A FETRAOMBY | 1863 | 210 | 16 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 4970 |
| 1256602005 - LA RONGARONGA A AMBINANINONY | 998 | 240 | 18 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 1285 |
| 1256600105 - LE RIANILA A VOHIBINANY-BRICKAVILLE | 5996 | 225 | 7 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 6340 |
| 1256601505 - LA IAROKA A AMPITABE | 1275 | 240 | 15 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 2920 |
| 1256900101 - LA SAKANILA A TSARASAMBO | 1700 | 270 | 11 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | (2500) |
| 1254200101 - LE MANAMPOTSY A ILAKA | 1280 | 260 | 10 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | (2600) |
| REGION SUD-EST | | | | | | | |
| 1254500105 - LA MANANJARY A ANTSINDRA | 2260 | 205 | 10 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 935 |
| 1254502003 - L'IVOANANA A FAHITA | 835 | 190 | 12 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 682 |
| 1255600110 - LE NAMORONA A VOHIPARARA | 445 | 180 | 8 | 0,7 | 1,0 | 0,7 | 372 |
| 1255300101 - LA MATITANANA A MAHASOABE | 3925 | 230 | 15 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 3350 |
| 1250603005 - LA SAHAMBANO A SAHAMBANO | 2000 | 100 | 6 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | (200) |
| 1250600105 - LA MANANARA SUD A MAROANGATY | 1462 | 150 | 5 | 0,8 | 1,8 | 1,0 | 2330 |
| 1256201903 - L'EFAHO A FANJAHIRA | 196 | 190 | 26 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 960 |
| REGION SUD | | | | | | | |
| 1250700106 - LE MANDRARE A ANDABOLAVA | 4033 | 135 | 13 | 1,0 | 0,7 | 0,3 | 2510 |
| 1250702206 - LA MANANARA A BEVIA | 1085 | 125 | 15 | 1,0 | 0,6 | 0,3 | 900 |
| 1250700103 - LE MANDRARE A AMBOASARY-SUD | 12430 | 115 | 13 | 1,0 | 0,7 | 0,3 | 8000 |
| 1253900115 - LA MANAMBOVO A TSIHOMBE | 2712 | 110 | 4 | 1,0 | 0,6 | 0,3 | 930 |
| 1255401505 - LA MENAKOMPY A ANDRIAMBE | 948 | 115 | 12 | 1,0 | 0,6 | 0,4 | 1560 |

suite

| | Superficie A km² | Indice pluviométrique Hmm | Indice de pente global m/Km | Indice zones exondées | Coefficient d'imper-méabilité | Indice de végétation | Débit decennal de crue Qm³/s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1255400108 - LA MENARANDRA A BEKILY | 1733 | 115 | 18 | 1,0 | 0,6 | 0,4 | 1710 |
| 1255400121 - LA MENARANDRA A TRANOROA | 5328 | 110 | 9 | 1,0 | 0,6 | 0,3 | 3590 |
| REGION SUD-OUEST | | | | | | | |
| 1250804005 - L'IHOSY A IHOSY | 1500 | 105 | 6 | 0,7 | 0,8 | 0,4 | 415 |
| 1250802805 - LA ZOMANDAO A ANKARAMENA | 610 | 170 | 40 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | 1160 |
| 1250807705 - LA SAMBALAHY A LA RN42* | 15,0 | 154 | 111 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | (130) |
| 1250807905 - L'ITAOLA A LA RN7 (PK496) | 32,0 | 122 | 68 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | (330) |
| 1250801510 - LA MANANANTANANA A TSITONDROINA | 6510 | 140 | 6 | 0,9 | 1,0 | 0,5 | 1820 |
| 12508807605 - L'ANDREAMIELY A ANDOHANONOKA* | 32,0 | 163 | 26 | 0,7 | 1,0 | 0,6 | (102) |
| 1250802010 - LA MATSIATRA A FANORO | 1160 | 175 | 20 | 0,8 | 1,0 | 0,6 | 780 |
| 1250802015 - LA MATSIATRA A MALAKIALINA | 11715 | 125 | 10 | 0,8 | 1,0 | 0,5 | 4970 |
| 1250800105 - LE MANGOKY AU BANIAN | 50000 | 140 | 4 | 1,0 | 0,9 | 0,4 | 16900 |
| 1255501505 - LA BERITSOKA AU SITE DE BARRAGE | 577 | 170 | 6 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 500 |
| 1255502015 - LA SAKAMALY A MIGODO | 788 | 170 | 7 | 1,0 | 0,9 | 0,4 | 1700 |
| 1255500105 - LA MORONDAVA A DABARA | 4638 | 180 | 6 | 1,0 | 0,9 | 0,4 | 3600 |
| 1251305505 - LA SANDRANDAHY A SANDRANDAHY | 286 | 150 | 5 | 0,7 | 1,0 | 0,6 | (150) |
| 1251306505 - LA SAHANIVOTRY AU PK 197,5 | 432 | 115 | 15 | 0,7 | 1,0 | 0,5 | 143 |
| 1251306005 - L'ANTALAVIANA A ANTALAVIANA | 113 | 141 | 35 | 1,0 | 1,0 | 0,6 | (270) |
| 1251305005 - LA MANANDONA A SAHANIVOTRY | 1451 | 125 | 10 | 0,6 | 1,0 | 0,5 | 370 |
| 1251306205 - LA MAROFODIANA AVOHIBORY-ATSIMO* | 5,20 | 136 | 47 | 0,9 | 1,0 | 0,5 | (84) |
| 1251306305 - L'ANDRIANTSAGO A AMBAMONDRANO* | 4,40 | 110 | 38 | 0,9 | 1,0 | 0,5 | (25) |
| 1251306405 - L'IMORONA A ANDRAHALANA* | 269 | 123 | 15 | 0,9 | 1,0 | 0,5 | (150) |
| 1251302025 - LA MANIA A AMBOROMANIA | 1065 | 145 | 8 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | (620) |
| 1251302020 - LA MANIA A SANDRANDAHY | 1470 | 150 | 7 | 0,8 | 1,0 | 0,5 | (620) |
| 1251302005 - LA MANIA A FASIMENA | 6795 | 130 | 5 | 0,7 | 1,0 | 0,5 | 1770 |
| 1251302002 - LA MANIA A ANKOTROFOTSY | 17990 | 135 | 4 | 0,7 | 1,0 | 0,4 | (3700) |
| 1251304505 - LA MANAMBOLO A AMBATOLAHY | 1893 | 130 | 10 | 1,0 | 0,8 | 0,4 | 4800 |
| 1251302705 - LA SAKENY A ANDRAKETA | 3138 | 135 | 7 | 1,0 | 0,8 | 0,4 | (3100) |
| 1251302505 - LA MAHAJILO A MIANDRIVAZO | 14375 | 130 | 5 | 0,9 | 1,0 | 0,4 | (5750) |
| 1251300110 - LA TSIRIBIHINA A BETOMBA | 45014 | 130 | 5 | 0,8 | 0,9 | 0,4 | 15000 |
| 1256103103 - LA KIMAZIMAZY A SOATANANA | 259 | 225 | 10 | 0,9 | 0,8 | 0,4 | (400) |
| 1256101503 - LA DEMOKA A BEVATRY | 1325 | 230 | 8 | 1,0 | 0,8 | 0,4 | 1200 |

suite

| | Superficie A km² | Indice pluviométrique Hmm | Indice de pente global m/Km | Indice zones exondées | Coefficient d'imper-méabilité | Indice de végétation | Débit decennal de crue Qm³/s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1256101003 - LA NAMELA A ANTANANDAVA | 680 | 230 | 8 | 1,0 | 0,8 | 0,4 | (835) |
| REGION NORD-OUEST | | | | | | | |
| 1250400102 - LA MAHAVAVY SUD A MAROVATO | 18490 | 180 | 6 | 0,6 | 0,9 | 0,5 | 3220 |
| 1250100230 - L'IKOPA A FIADANANA | 9450 | 130 | 7 | 0,6 | 1,0 | 0,5 | 1960 |
| 1250104005 - LA MAMOKOMITA A MAROHARANA | 775 | 140 | 20 | 1,0 | 1,0 | 0,5 | (940) |
| 1250100221 - L'IKOPA A ANTSATRANA | 18645 | 135 | 5 | 0,7 | 1,0 | 0,5 | 3420 |
| 1250199022 - BVR AMONT ANKABOKA* | 1,80 | 150 | 12 | 12 | 1,0 | 1,0 | (48) |
| 1250199021 - BVR AVAL ANKABOKA | 4,90 | 150 | 16 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | (73) |
| 1250102005 - LA MAROVOAY A LA RN4 | 280 | 185 | 8 | 0,8 | 0,2 | 0,6 | (23) |
| 1250101805 - LA KARAMBO A BETSIREBIKA | 189 | 185 | 8 | 0,8 | 0,2 | 0,6 | (16) |
| 1250101605 - L'ISINKO A AMBODIROKA | 600 | 145 | 17 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | 1440 |
| 1250100105 - LA BETSIBOKA A AMBODIROKA | 11800 | 135 | 7 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | 12070 |
| 1250101705 - LE KAMORO A LA RN4 | 11300 | 145 | 7 | 0,7 | 0,9 | 0,5 | (4250) |
| 1251203205 - LA SALOHY A ANDAMPIHELY | 250 | 210 | 17 | 1,0 | 1,0 | 0,6 | (190) |
| 1251203005 - LA SANDRANGITA A KALANDY | 400 | 200 | 17 | 0,9 | 1,0 | 0,6 | 300 |
| 1251202001 - LA MANGARAHARA A MANDRITSARA | 1320 | 200 | 12 | 0,8 | 1,0 | 0,5 | 610 |
| 1251200101 - LA SOFIA A ANTAFIATSALANA | 4100 | 180 | 9 | 0,8 | 1,0 | 0,5 | (940) |
| 1251200103 - LA SOFIA AU PONT DE LA RN6 | 23500 | 220 | 5 | 0,9 | 1,0 | 0,6 | 7300 |
| 1251201505 - LA BEMARIVO A ANDRANOMIDITRA | 6515 | 170 | 7 | 0,8 | 1,0 | 0,5 | 4900 |
| 1250202510 - LA TSINJOMORONA A ANKOBAKOBAKA | 886 | 210 | 11 | 0,6 | 1,0 | 0,7 | (620) |
| 1253400105 - LA MAHAVAVY NORD A AMBILOBE | 3210 | 310 | 24 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 3500 |
| 1256001001 - LA MANANJEBA A ANKATOTO | 945 | 280 | 10 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 1010 |
| 1257102003 - LA RAMENA A AMBODIMANGA | 1080 | 320 | 40 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1930 |
| 1257100103 - LE SAMBIRANO A AMBANJA | 2830 | 330 | 33 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 4280 |
| HAUTS-PLATEAUX ET DEPRESSIONS INTERIEURES | | | | | | | |
| 1250204503 - LA BEALANANKELY A BETAINKANKANA | 85,0 | 140 | 12 | 0,6 | 1,0 | 0,5 | (150) |
| 1250207005 - LA BEALANANA A AMBINANINDRANO | 95,0 | 200 | 25 | 0,9 | 1,0 | 0,5 | (160) |
| 1250206505 - LA BEANDRAREZONA A BEANDRAREZONA | 190 | 250 | 27 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 365 |
| 1250204003 - L'ANTSAMAKA A ANTSAMAKA | 565 | 175 | 12 | 0,4 | 1,0 | 0,5 | 175 |
| 12500202016 - LA MAEVARANO A BEROITRA | 780 | 250 | 15 | 0,3 | 1,0 | 0,6 | 158 |

suite

| | Superficie A km² | Indice pluviométrique Hmm | Indice de pente global m/Km | Indice zones exondées | Coefficient d'imper-méabilité | Indice de végétation | Débit decennal de crue Qm³/s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1250202010 - LA MAEVARANO A ANTELOPOLO | 1185 | 230 | 12 | 0,3 | 1,0 | 0,6 | 245 |
| 1250202007 - LA MAEVARANO A AMBODIVOHITRA AVAL | 2585 | 165 | 10 | 0,4 | 0,9 | 0,6 | 445 |
| 1251001701 - LA RANOFOTSY A ANDILANATOBY | 191 | 120 | 9 | 0,8 | 1,0 | 0,5 | 330 |
| 1251003530 - LA SAHAMILAHY A MAHERIARA | 157 | 140 | 18 | 0,7 | 1,0 | 0,5 | (300) |
| 1251001620 - LA SAHABE A LA RN3α (SB1) | 1200 | 130 | 3 | 0,6 | 0,9 | 0,5 | (440) |
| 1251001210 - L'IVAKAKA A VOHIDIALA | 173 | 130 | 8 | 0,7 | 1,0 | 0,5 | (110) |
| 1251001010 - L'ANONY A AMBOHIBOANJO | 1485 | 140 | 4 | 0,7 | 1,0 | 0,5 | (565) |
| 1251000101 - LE MANINGORY A ANDROMBA | 6855 | 125 | 3 | 0,3 | 1,0 | 0,5 | 363 |
| 1252800150 - L'IVONDRO A AMBODIFANA | 717 | 260 | 6 | 0,3 | 1,0 | 0,7 | (115) |
| 1250901005 - L'ANDRANOBE AU PONT FANALAMANGA* | 105 | 130 | 6 | 0,7 | 0,8 | 0,5 | (170) |
| 1250901505 - L'ANTSAPAZANA A LA RN2* | 84,0 | 130 | 6 | 0,6 | 0,8 | 0,6 | (100) |
| 1250900110 - LE MANGORO A MANGORO GARE | 3600 | 150 | 3 | 0,5 | 0,9 | 0,6 | 1210 |
| 1250900105 - MANGORO A AMBODIMANGA | 4735 | 160 | 2 | 0,6 | 1,0 | 0,6 | 1250 |
| 1250199052 - BVR SUD AMBATOMAINTY | 0,30 | 150 | 70 | 0,7 | 1,0 | 0,5 | 1,5 |
| 1250102311 - LA SISAONY A ANDRAMASINA | 318 | 135 | 8 | 0,8 | 1,0 | 0,5 | 227 |
| 1250102315 - LA SISAONY A AMBATOFOTSY (PK22)* | 630 | 125 | 7 | 0,8 | 1,0 | 0,5 | 350 |
| 1250100218 - L'IKOPA A ANTELOMITA 1 | 846 | 130 | 10 | 0,8 | 1,0 | 0,5 | 300 |
| 1250107605 - LA RENIRANO A AMBOHISOA* | 2,10 | 96 | 156 | 0,9 | 0,8 | 0,5 | 6) |
| 1250107905 - L'ANTSAHALAVA A ANTSAHALAVA | 6,10 | 114 | 38 | 0,9 | 1,0 | 0,5 | (43) |
| 1250199012 - LA TAFAINA A AMBOHIDRANO | 4,50 | 122 | 34 | 1,0 | 1,0 | 0,5 | 52 |
| 1250199011 - LA SAOMANARIVO A ANDROVAKELY* | 24,0 | 120 | 25 | 0,9 | 1,0 | 0,5 | (180) |
| 1250101209 - L'ANDROMBA A BEHENJY | 321 | 140 | 10 | 0,7 | 0,9 | 0,6 | (121) |
| 1250101215 - L'ANDROMBA A TSINJONY | 350 | 135 | 8 | 0,6 | 1,0 | 0,5 | 163 |
| 1250107705 - L'IOMBIFOTSY A ANTANIMASAKA | 45,0 | 140 | 47 | 0,9 | 0,8 | 0,5 | (248) |
| 1250104503 - LA KATSOAKA A NIAKOTSOARANO | 563 | 120 | 8 | 0,6 | 0,8 | 0,5 | (90) |
| 1250100233 - L'IKOPA A MAHITSY-KELY | 1684 | 130 | 6 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 227 |
| 1250100224 - L'IKOPA A BEVOMANGA | 4194 | 125 | 6 | 0,4 | 1,0 | 0,5 | 460 |
| 1250108005 - LA NAMATOANA A MANJAKATOMPO* | 48,0 | 165 | 43 | 0,9 | 0,5 | 0,7 | (36) |
| 1250906503 - L'AMBOROMPOTSY A ANTSAMPANDRANO | 95,0 | 160 | 30 | 1,0 | 0,3 | 0,9 | 35 |
| 1250902015 - L'ONIVE A ILEMPONA* | 1080 | 140 | 8 | 0,6 | 0,7 | 0,6 | (310) |
| 1250902010 - L'ONIVE A TSINJOARIVO | 3200 | 130 | 6 | 0,5 | 0,8 | 0,6 | 585 |

## 1.3. Valeurs "extrêmes " des crues et courbe enveloppe

S'il est parfois difficile d'attribuer une période de retour à une crue "record", il est par contre relativement aisé de tracer une courbe limite des débits de pointe correspondants (en fonction de la superficie des bassins versants) en utilisant des formules classiques du type MYER ($Q = C A^n$ ou $Q / A = CA^{n-1}$) ou bien des formules empirique un peu plus élaborées comme celles :

- de J. FRANCOU et J. RODIER $Q/Q_0 = (A/A_0)^{1-k/10}$ avec $Q_0 = 10^6$ et $A_0 = 10^8$
- de W.R CRAEGER $Q = 1.36\ C\ (A/2.59)^n$ avec $n = .936\ A^{-.048}$

Dans ces différentes formules, Q représentent le débits maximaux ( m³/s), A les superficies des bassins versants (en km²), n le coefficient de forme de la courbe de CREAGER et K et C les coefficients de position des courbes enveloppes dépendant du contexte régional et de la récurrence des crues.

Les plus forte crues observées (ou estimées après enquête historique) à Madagascar sont les suivantes :

tableau 9.6.

| Cours d'eau | A km² | Q m³/s | K (Francou-Rodier) | Date |
|---|---|---|---|---|
| MAHAVAVY du nord | 3210 | 10 500 | 5.6 | Daisy 1962 |
| SAMBIRANO | 2830 | (8000) | 5.4 | 1925 |
| BEHARIVO | 6515 | (15400) | 5.7 | Cap Est 1959 |
| BETSIBOKA (Ambodir.) | 11800 | 24000 | 5.9 | Tamatave |
| TSIRIBIHINA | 45000 | (27500) | 5.3 | Oc Indien 1918 |
| MANGOKY | 50000 | 32000 | 5.5 | Geneviève 1970 |
| MANDRARE | 12430 | 15000 | 5.3 | Félicie 1971 |
| MENARANDRA | 5330 | 10000 | 5.3 | 1951 |
| ZOMANOAO | 610 | 2460 | 5.0 | Geneviève 1970 |
| VOHITRA | 1910 | 6090 | 5.3 | Cap Est |
| SOFIA (RN6) | 23500 | (23500) | 5.5 | 1959 |
| SAHARENANA | 195 | 1120 | 4.8 | Isis 1973 |
| MANANARA (Bevia) | 1085 | 2880 | 4.9 | Fort Dauphin |
| MAHAJILO | 14375 | (9500) | 4.7 | |
| IAROKA | 1275 | (4400) | 5.2 | 1959 |
| FARAONY | 2005 | 4500 | 5.0 | 1945 |
| EFAHO | 196 | 1210 | 4.9 | 1964 |

Ces crues correspondent, pour la gamme 1 000 à 50 000 km², à des coefficients K (Francou-Rodier) compris entre 5 et 6 (graphe 9.6) mais ces valeurs élevées ne peuvent être attribuées qu'aux bassins présentant les plus forts risques. Pour un grand nombre de bassins (sur formations perméables ou à l'aval de zones marécageuses) les coefficients K doivent être beaucoup plus faibles (par exemple : 3.9 pour l'IKOPA à FIADANANA, 3 pour la MAEVARANO, 2.8 pour le MANINGORY)

Les droites de FRANCOU-RODIER sont difficilement extrapolables en deçà de 1 000 km² (surestimation des débits maximaux des moyens et petits bassins).

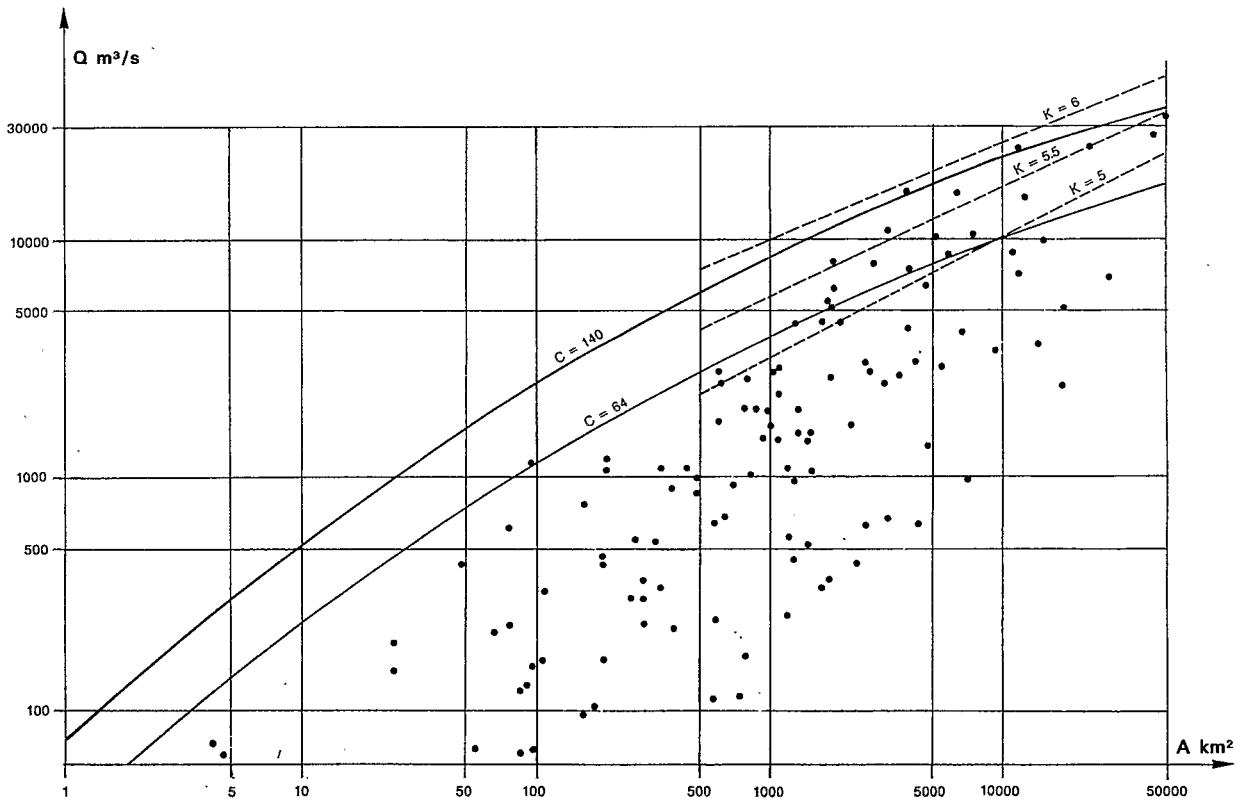
figure 9.6.

Crues maximales à Madagascar

COURBE ENVELOPPE DES DEBITS OBSERVES

$Q = 1.3\ C\ (A/2.72)^{n}$
avec $n = .89A^{-.046}$
C = 140 débits maximaux observés
C = 64 débits décennaux

- - - - - - - droites enveloppes Francou - Rodier (K = 6, 5.5 et 5)




Nous avons,par conséquent, afin de tenter de couvrir une plus large gamme de superficies, utilisé une courbe de CREAGER.

Les coefficients de forme de la courbe-enveloppe ont été déterminés (C = 64) à partir des débits maximaux décennaux, dont l'échantillon était plus homogène et plus consistant que celui des débits maximaux observés.

Après calage sur les valeurs maximales observées, la courbe-enveloppe des plus forts débits connus a pour expression : $Q = 1.3\ C\ (A/2.72)^n$ avec $n = .89\ A^{-.046}$ et $C = 140$

Enveloppant les crues de bassins aux risques très différents tant par leurs caractéristiques que pour la durée des observations (réccurences supposées de valeurs très diverses), cette courbe (figure 9.6) s'appuie sur les plus fortes valeurs connues des débits maximaux (BEMARIVO à ANDRANOMIDITRA, BETSIBOKA à AMBODIROKA, MANGOKY au BANIAN).

Les périodes de retour de ces trois crues sont estimées entre 80 et 120 ans. La courbe enveloppe ainsi établie pourrait, en l'absence de toute observation, être retenue comme un moyen sommaire d'évaluation de la crue centennale des bassins de 100 à 20 000 km² présentant les risques les plus importants : très fortes pentes, absence de stockage en amont, terrains peu perméables, couvert végétal peu dense et forte pluviométrie.

## 2. COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT

Exception faite des bassins versants représentatifs et des bassins de l'IKOPA Supérieur, il n'existe aucun autre bassin disposant d'un réseau pluviométrique suffisamment dense qui permettrait l'évaluation correcte des lames d'eau tombée.

Des données recueillies sur les bassins représentatifs et qui ont fait l'objet d'assez nombreux rapports, seules les valeurs maximales des coefficients de ruissellement ont été extraites, afin de pouvoir les comparer avec celles déterminées pour des bassins de plus grande taille (IKOPA Supérieur - Épisodes cycloniques de janvier 1954 et de mars 1959).

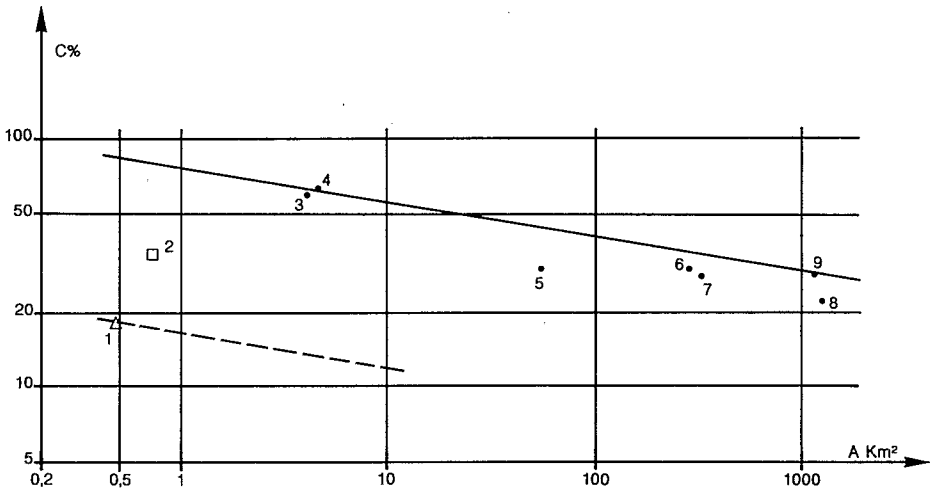
tableau 9.7.

Plus fortes lames ruisselées connues

| N° graph | Station | A (km²) | Episode pluvieux | lame précipitée P mm | Lame ruisselée Lr mm | Coefficient C % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | BRV BANIAN | 0.47 | 20-12-64 | 155.2 | 28.4 | 18.3 |
| 2 | BRV TRANOROA | 0.68 | 29-01-68 | 68.8 | 25.8 | 37.5 |
| 3 | BRV ANKABOKA | 4.08 | 24/25-01-62 | 120.5 | 72.9 | 60.5 |
| 4 | BRV TAFAINA | 4.50 | 05-12-67 | 68.6 | 42.7 | 62.2 |
| 5 | MANANDRIANA | 53 | 14/15-01-54 | 180.0 | 54.7 | 30.4 |
| 6 | VARAHINA SUD à TSIAZOMPANIRY | 283 | 14/15-01-54 | 170 | 53 | 31.2 |
| 7 | SISAONY à ANDRAMASINA | 318 | 17/29-03-59 | 434 | 126 | 29.0 |
| 8 | IKOPA à ANTELOMITA | 1080 | 13/16-01-54 | =<316 | 73 | ≥ 23.1 |
| 9 | IKOPA à ANTELOMITA | 1080 | 17/29-03-59 | 498 | 158 | 31.7 |

figure 9.7.

Coefficients de ruissellement les plus importants




Une relation de type $C=\mu A^{-n}$ avec $\mu = 75,6$ et $n = 0,123$ pourrait correspondre à la courbe enveloppe (graphe 9.7) des valeurs extrêmes des coefficients de ruissellement des bassins sur socle ancien à fort recouvrement latéritique (TAFAINA; ANKABOKA, SISAONY et branches mères de l'IKOPA).

Des valeurs de $\mu$ comprises entre 75 et 36, engloberaient les petits bassins aux sols bruts d'érosion du Sud (TRANOROA, IANAMOLORO - C = 64,2 %) et les bassins sous savoka (brousse secondaire) du centre-est (BVR de MAROLAONA - A = 0,32 km² - C = 66 %).

Enfin, avec des ruissellements maximums nettement plus faibles ($16<\mu<35$), en raison des très fortes rétentions (couverture forestière ou formations très perméables), nous aurions les petits bassins sous forêt dense d'AMPANGAMATSARY (A = 1,01 km² - C = 35 %) et celui du BANIAN.

## 3. FORME DES CRUES

S'il n'était pas envisageable d'étudier le détail de la forme des crues (hydrogramme unitaire en particulier) compte tenu des informations pluviométriques et limnimétriques disponibles et de la taille de la plupart des bassins, une approche plus globale à partir du fichier des débits instantanées était possible pour l'évaluation des rapports entre les débits maximums ruisselés (Q MAX en m³/s) et les volumes ruisselés (VR en m³).

Ces rapports ont la dimension d'un inverse du temps (en secondes) et les temps caractéristiques (VR/ Q max) ont souvent été utilisés pour l'étude des hydrogrammes de ruissellement des crues simples (F. MONIOD, les ressources en eaux de surface de la MARTINIQUE Monographie hydrologique ORSTOM n° 4). Le rapport Q MAX/VR peut être rapproché du coefficient de forme classique (Q MAX/Qmoyen) de l'hydrogramme unitaire.

Le tableau 9.8 rassemble les valeurs Q max/ VR (en $10^{-6}$) des crues les plus violentes connues sur chaque bassin.

tableau 9.8.

Forme des crues à Madagascar

| | Volume ruisselé Vr - $10^6 m^3/s$ | Hauteur ruisselée Hr mm | Débit maximal spécifique l/s/km² | Q MAX/Vr $10^{-6}$ | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| REGION NORD-EST | | | | | |
| 1252200105 - LA FANAMBANA A MORAFENO | 192 | 105 | 1160 | 11,0 | 17-23/03/92 |
| REGION CENTRE-EST | | | | | |
| 1252800109 - L'IVONDRO A RINGARINGA | 95,0 | 37 | 438 | 11,8 | 13-16/02/1972 |
| 1256602509 LA VOHITRA A ROGEZ-ANDEKALEKA | 88,9 | 47 | 686 | 14,7 | 10-13/03/75 |
| 1256602503 - LA VOHITRA A ANDEKALEKA | 77,6 | 30 | 201 | 6,78 | 30/01-07/02/1965 |
| 1256600110 - LE RIANILA A FETRAOMBY | 38,0 | 20 | 329 | 16,1 | 3-05/02/1965 |
| 1256600105 - LE RIANILA A VOHIBINANY-BRICKAVILLE | 502 | 84 | 425 | 5,08 | 20-29/01/1970 |
| 1254502003 - L'IVOANANA A FATIHITA | 203 | 241 | 1072 | 4,45 | 21/02-07/03/1970 |
| 1255600110 - LE NAMORONA A VOHIPARARA | 67,4 | 151 | 766 | 5,06 | 3-11/02/1969 |
| 1252400115 - LE FARAONY A VOHILAVA | 84,2 | 42 | 274 | 6,53 | 15-18/01/1970 |
| 1250600105 - LA MANANARA-SUD A MAROANGATY | 967 | 68 | 103 | 1,51 | 22/03-07/04/1956 |
| 1256201903 - L'EFAHO A FANJAHIRA | 82,5 | 421 | 6071 | 14,4 | 26/02-06/03/1964 |
| REGION SUD | | | | | |
| 1250700106 - LE MANDRARE A ANDABOLAVA | 242 | 60 | 1168 | 19,5 | 28-31/01/1951 |
| 1250702206 - LA MANANARA A BEVIA | 177 | 163 | 2645 | 16,2 | 26/03-01/04/1961 |
| 1250700103 - LE MANDRARE A AMBOASARY-SUD | 287 | 23 | 325 | 14,1 | 2-07/02/1963 |
| 1253900115 - LA MANAMBOVO A TSIHOMBE | 64,7 | 24 | 398 | 16,7 | 23-29/01/1963 |
| 1255499041 - BVR TRANOROA | 0,017 | 26 | 3720 | 144 | 29/01/1968 |
| 1255400121 - LA MENARANDRA A TRANOROA | 389 | 73 | 1342 | 18,4 | 16-21/02/1971 |
| REGION SUD-OUEST | | | | | |
| 1250804005 - L'IHOSY A IHOSY | 75,6 | 50 | 367 | 7,28 | 25/02-02/03/1970 |
| 1250802805 - LA ZOMANDAO A ANKARAMENA | 19,3 | 32 | 1252 | 36,6 | 25-26/12/1978 |
| 1250801510 - LA MANANANTANANA A TSITONDROINA | 255 | 39 | 226 | 5,76 | 9-23/01/1964 |
| 1250899031 - BVR BANIAN | 0,013 | 28 | 12800 | 450 | 20/12/1964 |
| 1250800115 - LA MANGOKY A BEVOAY | 2880 | 54 | 511 | 9,55 | 16-19/01/1970 |
| 1255500105 - LA MORONDAVA A DABARA | 433 | 93 | 1268 | 13,6 | 14-18/01/1970 |
| 1251306505 - LA SAHANIVOTRY AU PK 197,5 | 9,98 | 23 | 208 | 8,99 | 03-09/03/1973 |
| 1251305005 - LA MANANDONA A SAHANIVOTRY | (34,1) | (24) | (154) | (6,57) | 14-19/01/1970 |
| 1251302005 - LA MANIA A FASIMENA | 332 | 49 | 234 | 4,79 | 23-28/02/1970 |
| 1251302502 - LA MAHAJILO A ANTSAKOAMADINIKA | 639 | 40 | 240 | 6,04 | 20/02-02/03/1981 |
| 1251300110 - LA TSIRIBIHINA A BETOMBA | 1420 | 32 | 90 | 2,85 | 5-16/02/1964 |
| REGION NORD-OUEST | | | | | |
| 1250100230 - L'IKOPA A FIADANANA | 232 | 25 | 297 | 12,1 | 13-17/02/1972 |

suite

| | Volume ruisselé Vr - $10^6 m^3/s$ | Hauteur ruisselée Hr mm | Débit maximal spécifique l/s/km² | Q MAX/Vr $10^{-6}$ | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| 1250100221 - L'IKOPA A ANTSATRANA | 532 | 29 | 208 | 7,29 | 13-18/02/1972 |
| 1250199021 - BVR AVAL ANKABOKA | 0,297 | 73 | 17200 | 236 | 24-25/01/1962 |
| 1250101605 - L'ISINKO A AMBODIROKA | 49,8 | 83 | 2467 | 29,7 | 14-15/01/1970 |
| 1250100105 - LA BETSIBOKA A AMBODIROKA | 817 | 69 | 1000 | 14,4 | 14-20/01/1965 |
| 1253400105 - LA MAHAVAVY NORD A AMBILOBE | 598 | 186 | 3146 | 16,9 | 19-20/01/1962 |
| 1256001002 - LA MANANJEBA A MARIVORAHONA | 15,6 | 14 | 162 | 11,9 | 19-21/03/1982 |
| 1257102003 - LA RAMENA A AMBODIMANGA | 521 | 483 | 2352 | 4,87 | 26/03-02/04/1959 |
| 1257100103 - LA SAMBIRANO A AMBANJA | 492 | 174 | 1339 | 7,70 | 22-29/01/1976 |
| HAUTS-PLATEAUX ET DEPRESSIONS INTERIEURES | | | | | |
| 1251002005 - LA SASOMANGANA AU PONT MLA | 7,29 | 26 | 237 | 9,08 | 10-15/04/1984 |
| 1251001701 - LA RANOFOTSY A ANDILANATOBY | (3,32 | (17) | (372) | (21,4) | 19-21/03/1982 |
| 1251003530 - LA SAHAMILAHY A MAHERIARA | 6,91 | 44 | 378 | 8,58 | 9-15/04/1984 |
| 1251001010 - L'ANONY A AMBOHIBOANJO | 59,4 | 40 | 139 | 3,47 | 28/01-08/02/1982 |
| 1250900110 - LE MANGORO A MANGORO GARE | 309 | 86 | 444 | 5,18 | 11-19/03/1975 |
| 1250900105 - LE MANGORO A AMBODIMANGA | 135 | 29 | 131 | 4,60 | 14-18/02/1972 |
| 1250102311 - LA SISAONY A ANDRAMASINA | 11,9 | 37 | 689 | 18,4 | 13-17/02/1972 |
| 1250100218 - L'IKOPA A ANTELOMITA 1 | 93,2 | 73 | 745 | 9,44 | 14-18/01/1954 |
| 1250199012 - LA TAFAINA A AMBOHIDRANO | 0,192 | 43 | 14600 | 342 | 05/12/1967 |
| 1250101209 - L'AMDROMBA A BEHENJY | 8,11 | 25 | 212 | 8,40 | 13-17/02/1972 |
| 1250100233 - L'IKOPA A MAHITSY-KELY | 73,5 | 41 | 130 | 3,14 | 14-31/01/1954 |
| 1250100224 - L'IKOPA A BEVOMANGA | 52,1 | 12 | 34 | 2,71 | 5-14/02/1972 |
| 1250902010 - L'ONIVE A TSINJOARIVO | 68,6 | 21 | 75 | 3,48 | 2-11/03/1975 |

Bien que les périodes d'observations (de quelques années à quelques dizaines d'années) et que la nature et le nombre de relevés soient très variables, le report de ces valeurs en fonction de la superficie montre très clairement (fig. 9.8) leur regroupement en trois populations, avec :

- les bassins entièrement forestiers (RAMENA, IVOANANA) ou présentant de larges plaines d'inondations (plaine d'ANTANANARIVO, cuvette de l'ALAOTRA...) ;

- les bassins très dégradés avec couverture végétale faible sur latérite (BVR TAFAINA et ANKABOKA, BETSIBOKA....) ou la plupart des bassins sur socle ancien du Sud et de pente moyenne à forte ;

- tous les autres bassins aux couvertures plus ou moins dégradées.

Le rapport Q MAX/ Vr, avant tout lié à la superficie, pourrait avoir expression $1/\theta = m\ A^{-.356}$, m variant avec les pentes (indice global de pente et pourcentage de zones inondables) et les états de surface (couverture). Pour les trois familles de bassins sur socle ancien à Madagascar, m prendrait comme valeurs :

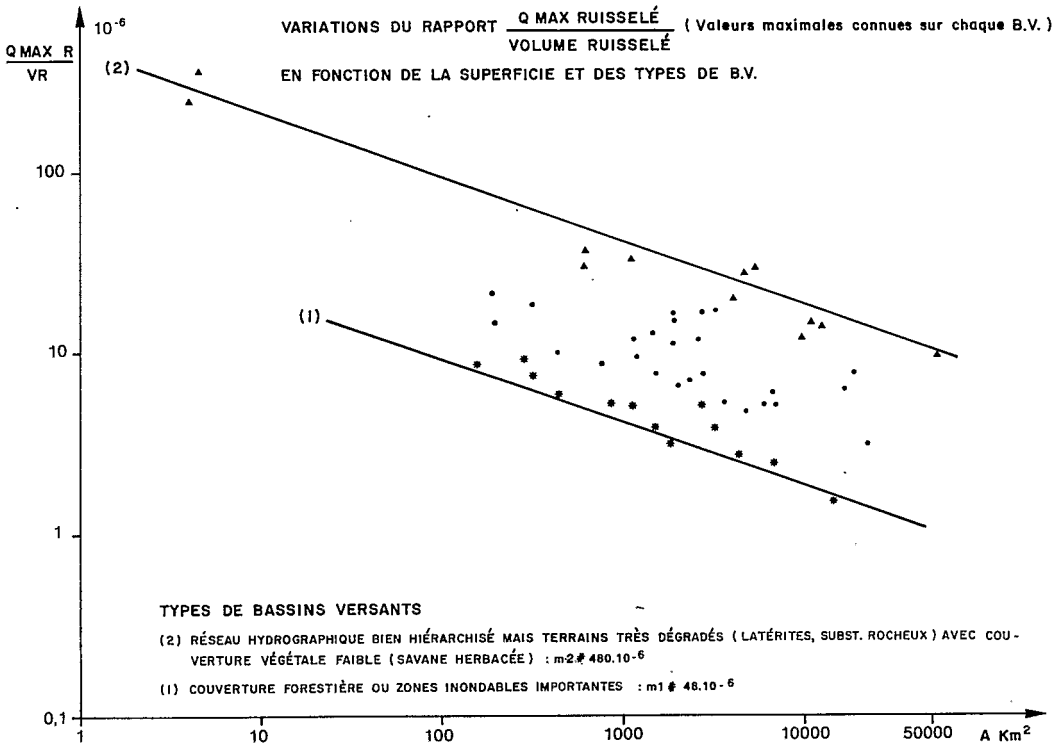
$m1 \# 48.10^{-6}$ $m2 \# 480.10^{-6}$ $48.10^{-6} < m3 < 480.10^{-6}$

À titre de comparaison, pour les petits bassins sur formations volcaniques et aux fortes pentes de Martinique et

de Guadeloupe une valeur moyenne de m, comprise entre $830.10^{-6}$ et $390.10^{-6}$ pourrait être prise égale à $650.10^{-6}$

Fait important pour Madagascar, les déforestations excessives sur brûlis (tavy) pourraient être la cause d'une aggravation des risques de crues (augmentation des débits de pointe), dans les secteurs les plus touchés (massifs de la seconde falaise est en particulier).

figure 9.8.
Madagascar




# 4. PRÉCIPITATIONS ET CRUES CYCLONIQUES

Tous les ans (en moyenne) et souvent, plusieurs fois par an (1958, 1960,1973 par exemple) des épisodes depressionnaires traversent l'île, le plus souvent d'est en ouest et peuvent affecter des tracés capricieux, avec des inflexions ; et parfois même recouper les différents groupes de bassins (par exemple le cyclone FELICIE en 1971).

Les épisodes pluvieux qui accompagnent ces météores engendrent le plus souvent les plus fortes crues annuelles observées sur l'île et peuvent être la cause de très forts débits maximaux. Les différents cyclones observés à MADAGASCAR entre 1951 et 1979 sont présentés dans le tableau 9.9 (baptisés de noms divers à partir de 1960) avec pour les crues les plus notables, les débits maximaux observés sur les bassins.

tableau 9.9.

Cyclones et dépressions à Madagascar
de 1951 à 1979

| Date | Nom | Région affectée | Cours d'eau $m^3/s$ | QMAX | T ans |
|---|---|---|---|---|---|
| fin 01/1951 | | Sud | Manambovo | 2650 | >100 |
| déb. 01/1954 | Vohemar | Nord, Sud | | | |
| mi 01/1954 | Andevoranto | Centre | Ikopa (Antelomita) | | 80 |
| déb. 03/1954 | Cap St André | Sud | Mangoky | 18300 | |
| déb. 01/1955 | Zambeze | Sud | | | |
| mi 02/1955 | Weve | Nord | | | |
| fin 03/1955 | Mozambique | Est | | | |
| déb. 01/1956 | Morondava | Mangoky | | | |
| déb. 02/1956 | Tamatave | Ikopa, Rianila | Rongaronga | 1620 | (30) |
| fin 03/1956 | Farafangana | Mangoky, Sud | | | |
| déb. 04/1956 | Vohemar | Nord | | | |
| déb. 02/1957 | Mozambique | Nord, Ikopa Est | Sambirano | 6700 | 40 |
| mi 03/1957 | Mozambique | Mangoky | | | |
| fin 01/1958 | Mozambique | Centre | | | |
| 02/1958 | | Sud | | | |
| déb. 03/1958 | Océan Indien | Nord, Centre | | | |
| mi 12/1958 | | Mangoky | | | |
| mi 01/1959 | | Tsiribihina | | | |
| mi 03/1959 | Cap Est | Est | Rianila | 8200 | 25 |
| fin 03/1959 | Mananara nord | Nord Centre, Est | Maningory | 970 | 150 |
| | " | | Vohitra | 6090 | 160 |
| | " | | Ikopa (Bevo.) | 640 | 100 |
| déb. 11/1959 | | Est | | | |
| 12/01/1960 | | Mangoky,Sud | | | |
| fin 01/1960 | Alix | Nord, Centre, Sud | | | |
| fin 03/1960 | Diane | Est | | | |
| déb. 01/1961 | Mozambique | Nord, Centre, Sud | | | |
| fin 03/1961 | Fort-Dauphin | Sud | Mananara (Bev.) | 2880 | 60 |
| fin 12/1961 | Ada | Centre,Ouest, Sud | | | |
| mi 01/1962 | Daisy | Nord | Mahavavy nord | 10500 | (90) |
| déb. 02/1962 | Gina | Centre, Est | | | |
| fin 02/1962 | Isabelle | Sud | | | |

suite

| Date | Nom | Région affectée | Cours d'eau m³/s | QMAX | T ans |
|---|---|---|---|---|---|
| mi 03/1963 | Kate | Est | | | |
| mi 02/1963 | Irene | Nord | | | |
| 01/02/1963 | Delia | Centre, Sud | | | |
| 02/1963 | Fanny | Nord, Centre, Est | | | |
| mi 01/1964 | Christine | Mangoky | | | |
| déb. 03/1964 | Gisèle | SudMandrare | 4200 | 20 | |
| | | Efaho 1200 | 20 | | |
| mi 03/1964 | Harriet | Centre, Est Rianila | 7700 | 20 | |
| mi 12/1964 | Connie | Sud | | | |
| mi 01/1965 | Ginette | Centre, Sud | | | |
| mi 01/1965 | Hazel | Nord, Centre, Sud | | | |
| fin 01/1965 | Iris | Est, Centre, Sud | | | |
| fin 12/1965 | Claude | Nord | | | |
| mi 02/1966 | Germaine | Nord, Centre | | | |
| mi 02/1966 | Hilary | Sud | | | |
| fin 12/1966 | Daphne | Est | | | |
| déb. 01/1967 | Florence | Mangoky,Sud | | | |
| mi 01/1968 | Georgette | Nord | | | |
| déb. 03/1968 | Karine | Nord, Centre | | | |
| déb. 01/1969 | Berthe | Nord, Centre, Est | | | |
| fin 01/1969 | Eve | Sud | | | |
| déb. 02/1969 | Dany | Centre Est, Sud | Zomandao | 2140 | 50 |
| | " | Centre Est Sud | Tsiribihina | 24400 | 35 |
| déb. 01/1970 | Eliane | Sud | | | |
| mi 01/1970 | Geneviève | Nord Centre Sud | Mangoky | 32000 | 80 |
| | " | | Zomandao | 2500 | 75 |
| fin 02/1970 | Jane | Centre Sud Est | Namorona | 1100 | 100 |
| | " | | Mandrare (Ande) | 900 | 70 |
| | " | | Mananara sud | 3540 | 40 |
| déb. 02/1971 | Felicie | Sud | Mandrare | 15000 | 40 |
| mi 02/1971 | Joelle | Sud | Menarandra (Bek.) | 3500 | 35 |
| mi 12/1971 | Agnes | Mangoky,Sud | | | |
| déb. 02/1972 | Caroline | Centre | | | |
| mi 02/1972 | Eugénie | Ikopa, Est | Ikopa (Fiad.) | 3450 | 100 |
| | " | | Mahavavy sud | 4350 | 50 |
| déb. 03/1972 | Hermione | Nord | | | |
| déb. 01/1973 | Charlotte | Nord | | | |
| mi 01/1973 | Dorothée | Mangoky,Sud | Mananantanana | 2900 | 70 |

suite

| Date | Nom | Région affectée | Cours d'eau m³/s | QMAX | T ans |
|---|---|---|---|---|---|
| | " | | Morondava | 6400 | 30 |
| fin 01/1973 | Hortense | Est, Centre | Maningory | 525 | 20 |
| déb. 02/1973 | | Nord | | | |
| mi 02/1973 | Isis | Nord, Est | Saharenana | 1120 | |
| mi 03/1973 | Lydie | Nord | | | |
| fin 12/1973 | Esmeralda | Est, Sud | | | |
| mi 01/1974 | Fredegonde | Est | | | |
| fin 12/1974 | Adèle | Sud | | | |
| mi 01/1975 | Camille | Centre | | | |
| fin 01/1975 | Deborah | Sud | | | |
| déb. 02/1975 | Fernande | Centre | Morondava | 3830 | 10 |
| mi 03/1975 | Ines | Centre, Est | Iaroka | 3900 | 33 |
| | " | | Vohitra | 3400 | 20 |
| | " | | Mangoro | 1850 | 20 |
| fin 01/1976 | Danae | Nord | | | |
| fin 03/1976 | Gladys | Nord | | | |
| déb. 02/1977 | Emilie | Centre | Andromba | 295 | 65 |
| | " | | Sahanivotry | 255 | 90 |
| fin 02/1977 | Horvea | Est | | | |
| fin 01/1978 | Georgia | Sud, Centre | Mananara (Bev.) | 2850 | 50 |
| mi 03/1978 | Lucie | Centre | | | |
| fin 12/1978 | Angele | Sud | Mananara (Bev.) | 1860 | 30 |
| déb. 02/1979 | Dora | Nord, Centre | | | |

## 4.1. Généralités

Durant l'été austral (de novembre à avril) l'équateur météorologique oscille entre 4 et 18° sud avec convergence vers ce thalweg et en surface, de vents du nord-ouest (mousson indienne d'hiver) et de l'est.

Un renforcement de la convergence (due en particulier à une température de l'eau de mer supérieure à la normale) peut être à l'origine de dépressions chaudes et de précipitations parfois importantes dans le nord de l'île, sans que ces systèmes évoluent en dépressions tropicales ou cyclones.

Les météorologues ont déterminé un certain nombre de conditions (indices dynamiques et énergétiques) pour que ces amas nuageux s'organisent en vortex, se creusent et se déplacent. La position en latitude (force de Coriolis) de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) et la température de l'océan (profondeur de l'isotherme 26° C ) en sont les facteurs les plus apparents.

Dans le sud de l'Océan Indien, l'une des régions au monde les plus touchées par les cyclones tropicaux (14 %), le nombre de dépressions et cyclones tropicaux est en moyenne d'une quinzaine par an.

La zone de cyclogenèse, au sud de la trace au sol de la ZCIT, se situe entre 8° et 18°S. Les premières et les dernières dépressions de la saison se forment le plus souvent entre 8 et 10°S, au nord-est de Madagascar (entre Agalega et Diégo-Garcia) et affectent principalement le nord et le nord-est de l'île. En pleine saison, toute l'île peut-être touchée par des dépressions qui se lèvent tant à l'est entre les 10 et 18° S (St Brandon) qu'à l'ouest, sur le canal de Mozambique.

## 4.2. Précipitations exceptionnelles

### 4.2.1. Hauteurs journalières

Probablement en raison d'un manque d'observations dans certains secteurs montagneux difficiles d'accès (MASOALA, pentes du TSARATANANA...) et d'un nombre insuffisant de pluviographes ou de pluviomètres de grande capacité, les records de pluviométrie journalières restent stationnaires.

La hauteur record du 12/12/1945 à AMBANJA (561,5 mm) n'a été dépassée que le 21/01/1977, avec 568,4 mm à MORONDAVA (cyclone Domitile - hauteur de 5h à 5 h) alors que l'île de la Réunion toute proche détient les record mondiaux de hauteurs de pluies de 12 h (1114 mm) à 15 jours (6078 mm).

### 4.2.2. Types d'averses et répartitions

Si le passage de fronts froids associés à des perturbations polaires et le renforcement de l'alizé peuvent occasionner d'assez fortes pluies de mai à octobre sur l'est et le sud, les averses importantes sont le plus souvent directement ou indirectement liés à l'activité de la ZCIT, sans qu'il soit toujours possible :

- de distinguer d'après les intensités le type de système convectif (orages et pluies de mousson, lignes de grains à l'avant de cyclones, bandes nuageuses extérieures, masse nuageuse du tourbillon central) ;

- d'estimer sans imagerie précise de la couverture nuageuse les réponses des différents bassins.

Ainsi, au cours de la première semaine de février 1977, le passage du cyclone Émilie provoque de très fortes crues sur les bassins de l'ANDROMBA et de la SISAONY, alors que l'IKOPA atteint péniblement sa cote d'alerte. Les branches-mères de l'IKOPA ne réagiront (seconde crue observée au cours de la période 1959-80) qu'aux séries d'averses orageuses des 8 et 9 février, liées à l'activité de la ZCIT sur Madagascar, alors que les dépressions Gilda et Fifi évoluent plus à l'est.

### 4.2.3 Intensités

Bien qu'ils n'aient pu être réactualisés, certains résultats d'exploitation par le BCEOM des pluviogrammes des stations du réseau de l'aéronautique civile et de la météorologie ont été repris, afin de permettre l'estimation (fig 9.4) d'un ordre de grandeur des intensités horaires (pour une période de retour T = 5 ans) à partir des précipitations journalières de fréquence décennale (variations du rapport $H_{24,10}/H_{1,5}$).

tableau 9.10.

| N° Code | Stations | Intensités - Hmm | | | Périodes d'observations N ans |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Précipitations horaires T = 5 ans | Maximums connus 1 h | 30 mn | |
| 022400 | AMBODIFOTRA | 88 | 78,0 | 49,5 | 5 |
| 050000 | ANALALAVA | 95 | 98,0 | 49,5 | 6 |
| 053600 | ANDAPA | 64 | 55,0 | 47,5 | 6 |
| 087200 | ANTALAHA | 66 | 85,0 | 52,0 | 10 |
| 104800 | ANTSIRABE | 59 | 65,0 | 45,0 | 5 |
| 140800 | ANTSRANANA | 65 | 84,0 | 54,0 | 30 |
| 153200 | FIANARANTSOA | 60 | 55,0 | 45,0 | 7 |
| 170000 | IVATO | 75 | 82,0 | 49,5 | 8 |
| 191600 | MAHAJANGA | 72 | 96,0 | 63,5 | 31 |
| 199600 | MANANJARY | 69 | 62,0 | 52,0 | 8 |
| 232800 | MORONDAVA | 78 | 83,0 | 44,0 | 6 |
| 254400 | SAMBAVA | 76 | 60,0 | 39,5 | 7 |
| 262400 | TOAMASINA | 84 | 117,0 | 79,5 | 30 |
| 266800 | ANTANARIVO | 61 | 74,5 | 51,5 | 27 |
| 278000 | TOLIARA | 47 | 54,0 | 47,0 | 20 |
| 280800 | VOHEMAR | 55 | 58,0 | 46,0 | 7 |

## 4.3. Trajectoires et crues cycloniques

La masse centrale qui s'organise autour du centre dépressionnaire (oeil) d'un cyclone est décrite comme une masse compacte et un véritable "anneau de pluie".

Si cet anneau tourbillonnaire est la zone la plus active, notamment par son "demi cercle dangereux" (à gauche dans le sens de la trajectoire pour les cyclones de l'hémisphère sud) il ne semble pas forcément toujours être le siège des précipitations les plus intenses.

Le tracé des isohyètes n'étant pas permis en raison de la trop faible densité des postes, trois critères ont été retenus pour la localisation des cellules de fortes précipitations :

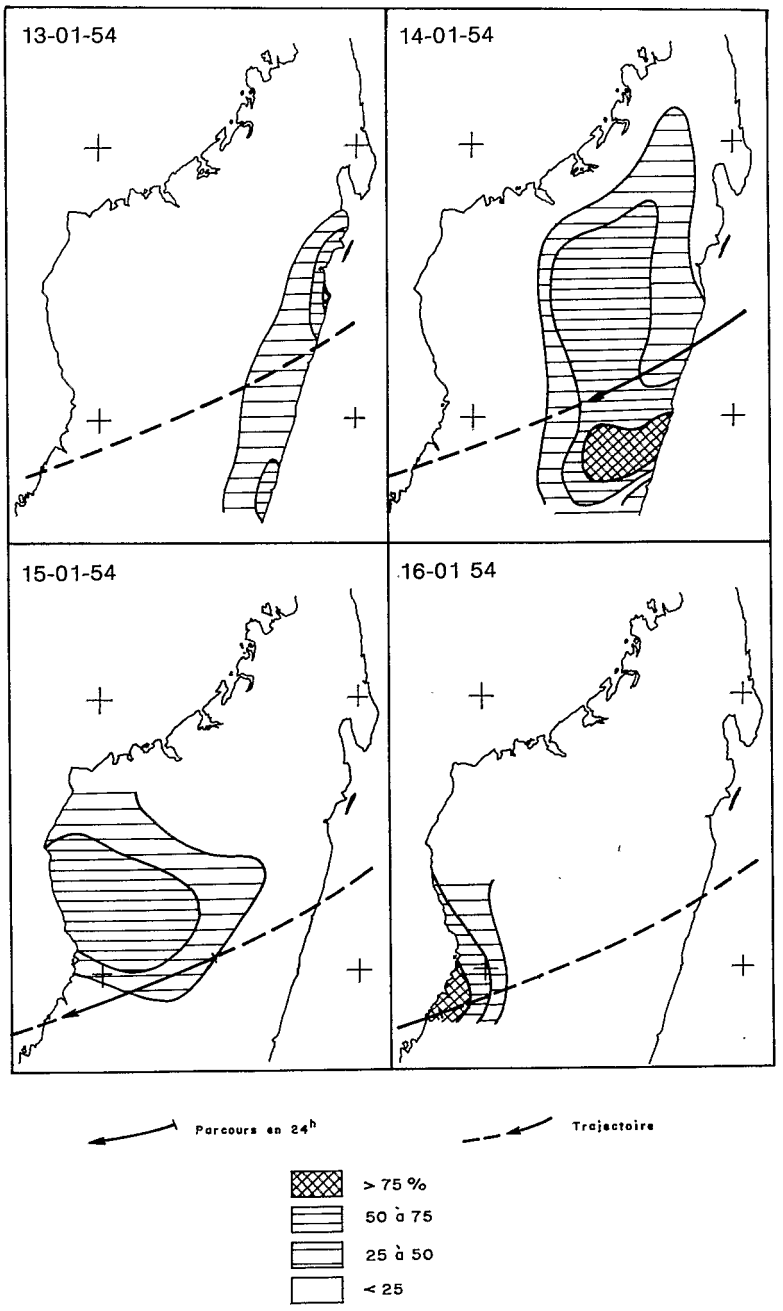
- le rapport des pluies journalières aux pluies accumulées au cours de l'épisode cyclonique
- les périodes de retour des hauteurs maximales journalières relevées
- les périodes de retour des différents maximums de crue.

Si un fichier assez complet des crues a pu être établi pour la plupart des perturbations identifiées au cours de la période 1953-1979, pour les précipitations seuls quelques événements remarquables ayant fait l'objet de notes assez détaillées ont été étudiés.

## 4.3.1. Le cyclone tropical d'Andevoranto (janvier 1954)

figure 9.9.

Cyclone tropical d'Andevoranto
Rapport des pluies journalières
aux pluies accumulées
du 13 au 16-01-54



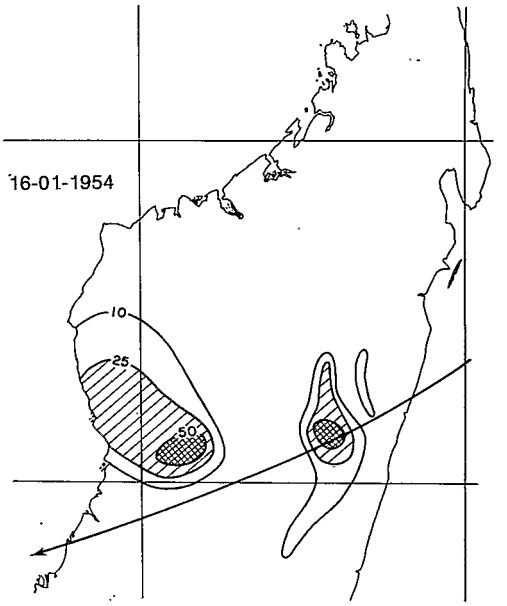
Ce cyclone qui a traversé l'île d'ANTEVORANTO à MORONDAVA, et qui est responsable de nombreux dégats sur la cote (vents et raz de marée) entre TOAMASINA et VATOMANDRY, est surtout connu par les précipitations et les crues (haut IKOPA) qui ont surtout affecté de larges zones à droite de sa trajectoire.

figure 9.10.

Cyclone tropical d'Andevoranto

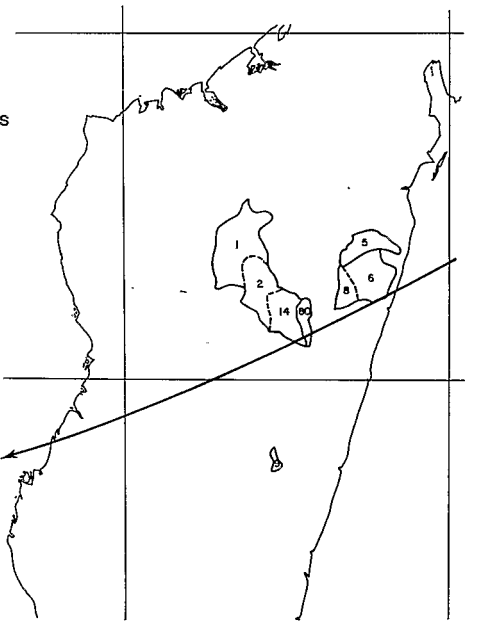
Maximum journalier connu du 13 au 16-01-1954

Périodes de retour - T ans




Maximum de crue observées

Périodes de retour - T ans



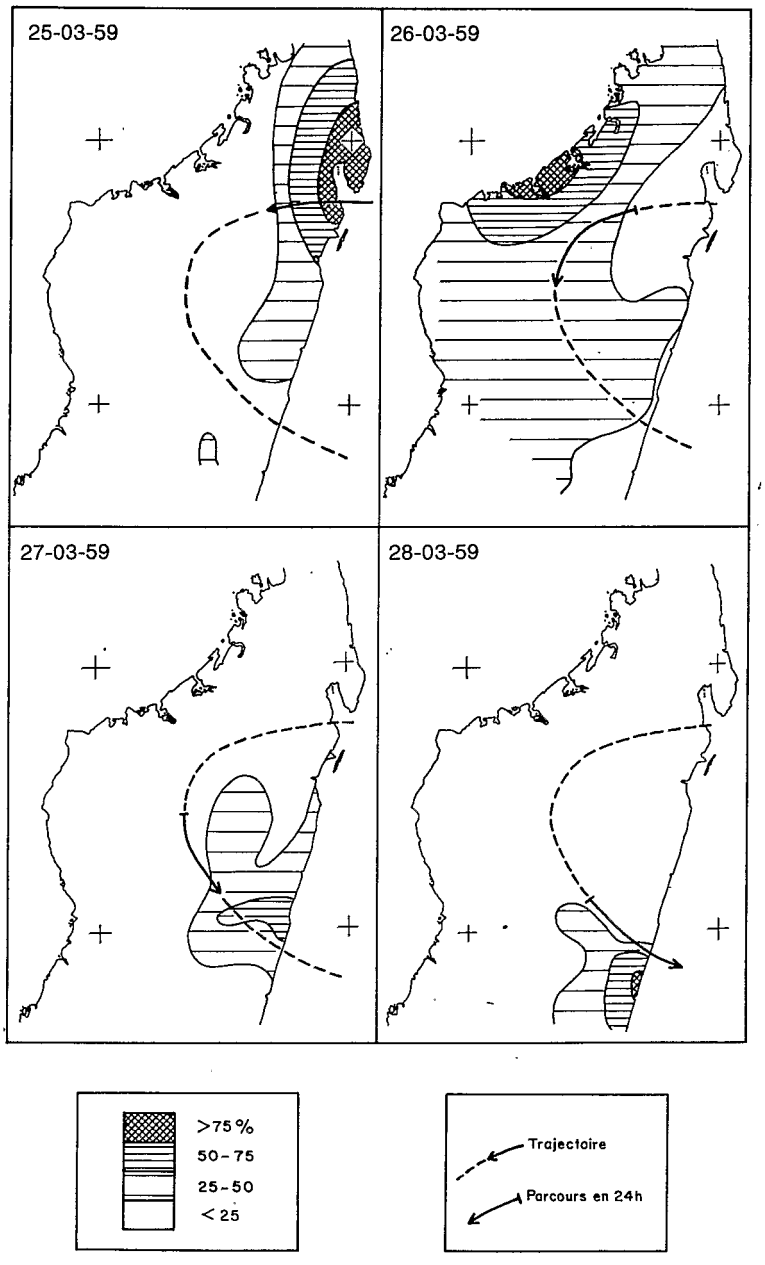
Les précipitations dans le secteur ouest sont d'ailleurs plus fortes qu'elles n'apparaissent avec un découpage journalier de 7 h à 7 h. MAINTIRANO aurait ainsi reçu 412,4 mm du 15 (17 h 00) au 16 (17 h 00), comptabilisés dans les 271,7 et 198,9 mm des 15 et 16.

Si les débits de pointe sont restés modérés sur la côte est (entre la quinquennale et la décennale), le haut bassin de l'IKOPA a connu des valeurs assez remarquables ( T = 80 ans à ANTELOMITO)

## 4.3.2. Le cyclone tropical de Mananara nord (mars 1959)

figure 9.11.

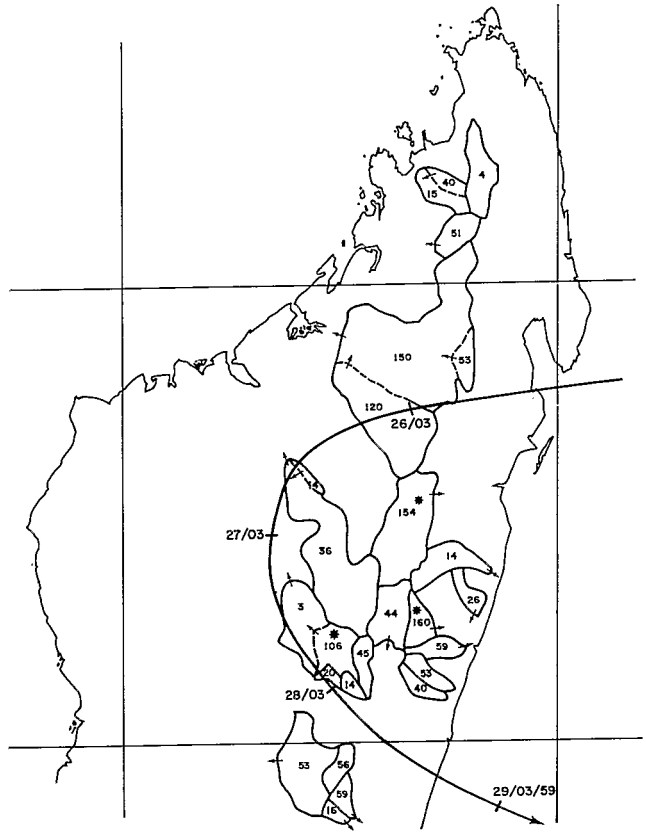
Cyclone tropical de Manarara nord
Rapport des pluies journalières
aux pluies accumulées
du 25 au 28-03-59



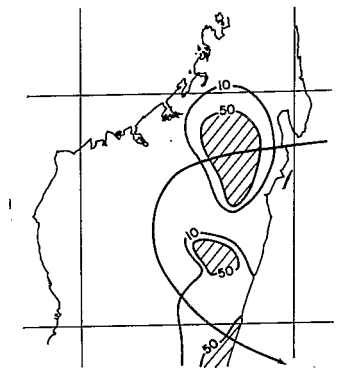
Survenant après le cyclone de Cap est - MANAKARA, ce cyclone tropical intense, tout en donnant normalement des vents forts à gauche de sa trajectoire (d'AMBODIFOTRA à TOAMASINA) a provoqué de fortes précipitations à droite de sa trajectoire, sauf lors de son infléchissement le 27 mars.

figure 9.12.

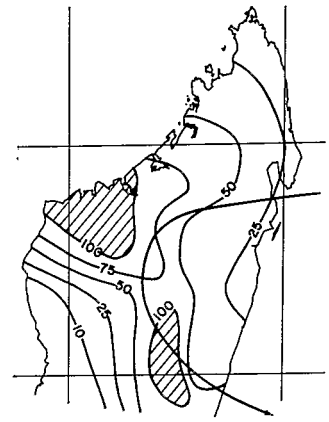
Cyclone tropical de Manarara nord




MAXIMUMS DE CRUE OBSERVES PERIODES DE RETOUR T ANS




MAXIMUM JOURNALIER CONNU DU 25 AU 28-03-59
PERIODE DE RETOUR T ANS

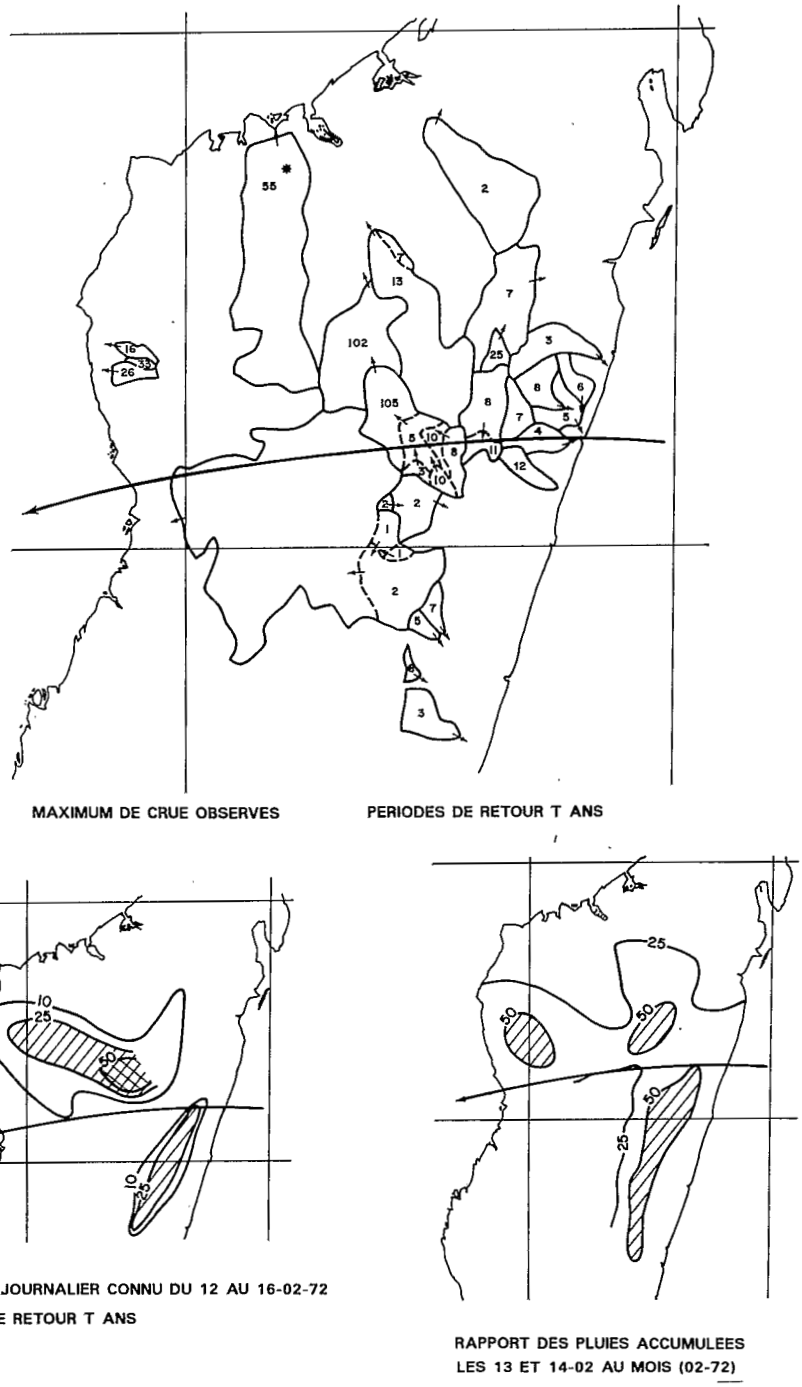



RAPPORT DES PLUIES ACCUMULEES DU 25 AU 29-3-59
A LA PERIODE DU 16 AU 29-03-59

En ne tenant pas compte des bassins où les stockages consécutifs au premier cyclone ont contribué au renforcement de cette seconde crue (ANDROMBA, BEVOMANGA et dans une moindre mesure MANGORO et ROGEZ-ANDEKALEKA), ce sont les stations situées au Nord de la trajectoire (bassin SOFIA et BEMARIVO) qui présentent les crues les plus importantes (récurrences des débits de pointe comprises entre 120 et 150 ans)

figure 9.13.

Cyclone Eugénie



## 4.3.3. Le cyclone tropical Eugénie (février 1972)

Se déplacant vers l'ouest sud ouest, ce cyclone a traversé Madagascar en moins d'une journée, avec des vents forts entre FENERIVE et MANAKARA et des pluies violentes qui ont surtout intéressé des secteurs à droite de sa trajectoire (crues extrêmement fortes sur l'IKOPA à FIADANANA et à ANTSATRANA ainsi que dans la région de MAINTIRANO). Les crues de l'IKOPA sont d'ordre centennal et celles des cours d'eau du BEMARAHA de récurrences comprises entre 25 et 35 ans.

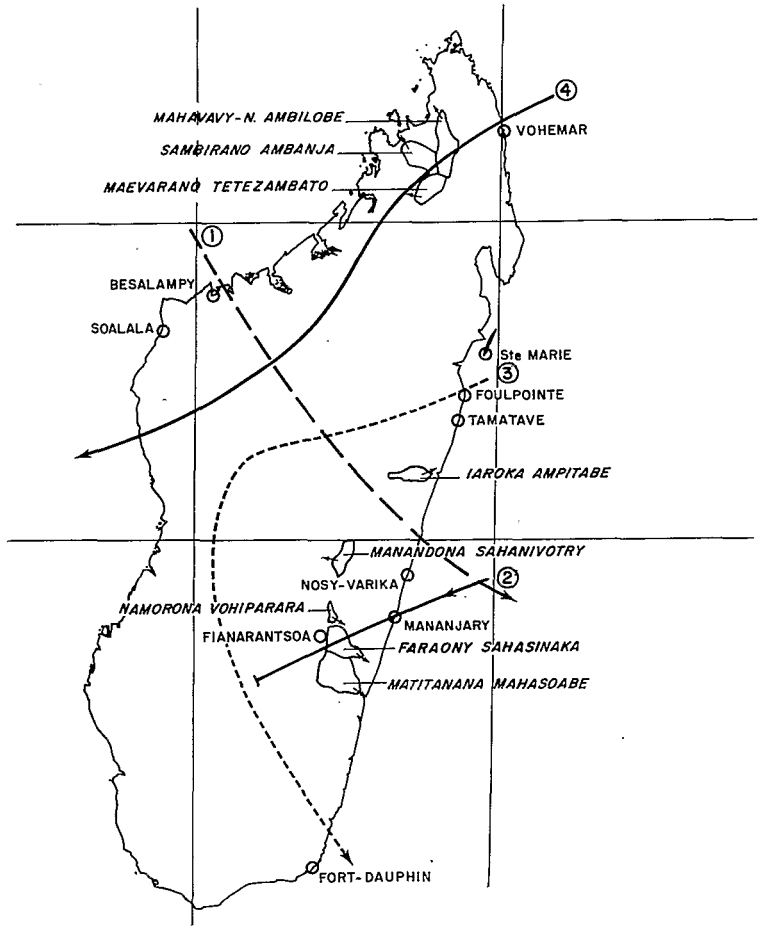
## 4.3.4. Interprétation des résultats d'observations

De pareils résultats pourraient laisser à penser que les plus fortes pluies et crues se retrouvent systématiquement à droite de la trajectoire, sauf quand celle-ci s'incurve ou que la dépression se comble.

L'examen de l'imagerie satellitaire ayant montré que le déplacement d'un cyclone était lié à l'absence (incurvation de la trajectoire) ou à la présence de cellules extérieures de cumulo-nimbus (extrémité de la bande nuageuse extérieure), les grains les plus violents pourraient surtout être produits par :
- les amas de cumulo-nimbus les plus développés des bandes extérieures et face au cyclone (trajectoire maintenue) ;
- l'anneau tourbillonnaire, en l'absence de cumulo-nimbus à l'avant de la trajectoire et amenant son infléchissement.

figure 9.14.

Les cyclones de l'année 1945 et leurs effets



## 4.3.5. Trajectoires et crues anciennes

À Madagascar, des cyclones avec fortes crues ont été observés anciennement dans le secteur de la BETSIBOKA et la BEMARIVO en 1901 (crues "extraordinaires" de la Haute Sofia), en 1903 avec la capture de la MAHAJAMBA par le KAMORO et en 1905 (Alaotra, haute Betsiboka). Le maximum de crue de 1943 aurait égalé le record de 1927 sur la BETSIBOKA (24 000 m³/s à AMBODIROKA). Dans le nord (MAHAVAVY et SAHARENANA) les maximums de crue de 1912 et 1917 sont considérés comme très importants(DANLOUX, 1983)

Si les observations satellite sont malheureusement trop récentes, un certain nombre de trajectoires anciennes identifiées devrait permettre l'amélioration de l'information crues, comme pour cette année 1945 où quatre fortes dépressions ont été recensées (fig 9.14).

### 4.3.5.1. Cyclone tropical de Soalala (16-19/01/1945)

Connue comme "cyclone de faible intensité, ayant traversé l'île d'ouest en est du 17 au 18/01/1945 sans crue importante signalée", cette perturbation a dû amener la descente de la ZCIT vers le sud et le développement d'une activité orageuse dans le nord ouest (crue du SAMBIRANO le 18 - Q = 5 000 m³/s - T = 15 ans).

### 4.3.5.2. Dépression tropicale de Nosy Varika

Cette "dépression tropicale de forte intensité aborde la côte malgache près de MANANJARY le 5 février et se comble le 6 sur les plateaux du sud, provoquant des pluies torrentielles à l'intérieur du triangle FIANARANTSOA - MANANJARY - MANAKARA et causant des dégats très importants à la voie ferrée MANAKARA - FIANARANTSOA".

Des crues relativement importantes sont connues (données d'enquêtes) à droite de la trajectoire, sur la IAROKA (Q = 3 900 m³/s - T = 33 ans) et la MANANDONA (Q = 510 m³/s - T = 38 ans), puis à gauche de celle-ci (cf comblement) sur le NAMORONA, le FARAONY (Q = 45mm m³/s - T = 59 ans) et la MATITANANA (Q = 4100 m³/s - T = 24 ans).

### 4.3.5.3. Cyclone tropical de Foulpointe

Ce "cyclone d'intensité modérée aborde entre SAINTE- MARIE et TAMATAVE le 14 février et ressort toujours sur l'Océan Indien près de FORT-DAUPHIN le 17, causant des pluies abondantes dans les régions nord-ouest où l'on enregistre des innondations (SAMBIRANO et région de BESALAMPY - MAINTIRANO)".

Non seulement de fortes précipitations sont signalées à droite de la trajectoire mais des maximums de crues ont été relevés sur la MAEVARANNO à AMBODIVOHITRA (Q = 550 m³/s - T = 24 ans) et le SAMBIRANO à AMBAJA (Q = 3 300 m³/s - T = 6 ans).

### 4.3.5.4. Cyclone tropical de Vohemar

Ce "cyclone traverse Madagascar du nord-est à l'ouest du 11 au 13 décembre et provoque des pluies très abondantes sur le nord et nord-ouest de l'île".

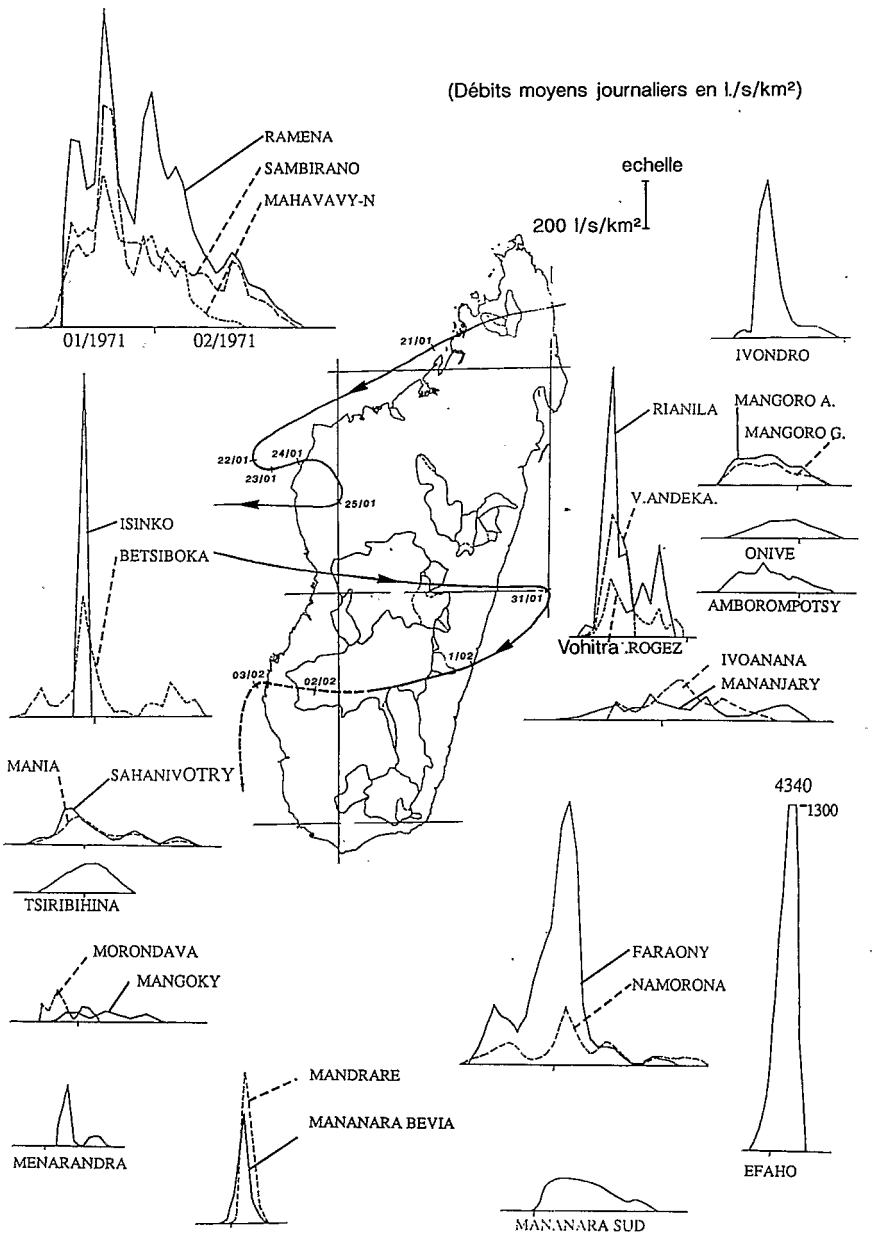
Les records déduits des enquêtes se situent tous les deux à droite de la trajectoire, sur le SAMBIRANO à AMBAJA (crue du 12/12/1945 - Q = 5180 m³/s - T = 45 ans).

## 4.3.6. Le cyclone Félicie

On ne saurait clore ce chapitre sans présenter la trajectoire du cyclone Félicie. Trajectoire assez peu classique puisque ce cyclone a intéressé toute la Grande Ile du 19 janvier au 5 février 1971, en la traversant à trois reprises. La planche (figure 9.15) présente, après séparation des hydrogrammes de ruissellement, les débits moyens journaliers spécifiques établis pour les principales stations.

figure 9.15.

Cyclone Félicie
Débits spécifiques ruisselés



Les bassins du nord-ouest (SAMBIRANO et MAHAVAVY nord), tout comme ceux du sud-est (NAMORONA et FARAONY) bien arrosés, sont touchés directement par une perturbation bien organisée ou qui vient de se régénérer.

Les bassins du nord-ouest et du centre-ouest sont relativement peu affectés par un cyclone qui, progressant d'ouest en est, remonte ces bassins.

À la troisième traversée, l'atténuation est rapide et seuls les bassins du sud sud-est (MANANARA Sud, EFAHO et MANDRARE ) sont très sérieusement touchés.

# Les basses eaux

Chapitre 10

Les basses eaux peuvent être caractérisées par l'importance des réserves drainées en saison sèche, la vitesse de drainage des aquifères, le débit minimal journalier de l'année hydrologique ainsi que l'irrégularité interannuelle des débits observés.

Ces différentes caractéristiques sont présentées dans le tableau 10.1. :

- numéro du cours d'eau/cours d'eau/station
- superficie du bassin versant contrôlé (S km²)
- lame écoulée interannuelle (H mm)
- débit journalier minimal spécifique médian (qj min en l/s/km²)
- estimation des réserves *drainées* en année moyenne (R en mm)

$R = (QO - QJMIN)/\alpha/S * 86.4$

La valeur R (réserve effectivement drainée) est inférieure à la valeur de la réserve drainable calculée pour la plupart des stations principales et qui correspond au potentiel des aquifères susceptibles d'alimenter l'écoulement de saison sèche. Le rapport de la réserve drainée à la réserve drainable dépend de la date de reprise des précipitations efficaces en début de saison des pluies.

- Coefficient $\alpha$ du tarissement principal
- Durée caractéristique de drainage (Tc en jours) correspondant à la division par deux du débit de base ($Tc = Log2/\alpha$)
- Débits spécifiques de récurrences décennales humide et sèche (Q10 et q10)
- Coefficient d'irrégularité des débits minimaux (K3 = Q10/q10)
- Indice médian (m) du mois d'observation de l'étiage minimal.

Les débits spécifiques minimaux présentent une liaison statistique significative avec les apports annuels des bassins.

qj min (l/s/km²) = 0.008 P (mm) - 7.1 ($R^2 = .77$ $P > .995$)
qj min (l/s/km²) = 0.011 H (mm) - 2.9 ($R^2 = .81$ $P > .995$)

Autour de la droite de régression qj min/H (graphe 10.1.), subsiste une assez forte dispersion dont la majeure partie peut être expliquée par les caractéristiques particulières des différents bassins : géométrie et nature des réservoirs naturels susceptibles de stocker une partie des précipitations efficaces de saison des pluies, transmissivité des formations d'altérites et roches poreuses ou fissurées (vitesse de drainage), date moyenne de reprise des précipitations efficaces de saison des pluies, etc.

En particulier, certains bassins aux lames annuelles abondantes se situent très nettement au-dessous de la droite de régression en raison de réserves drainables moins abondantes, de vitesse de drainage plus élevée et de la plus grande rigueur de la saison sèche pluviométrique (influence ouest ou méridionale). Il s'agit des bassins du versant ouest du Tsaratanana, de l'Isinko et des bassins situés à l'extrême sud du versant oriental.

tableau 10.1.

Madagascar

Caractéristiques des basses eaux

| N° | Cours d'eau | Station | S km² | H mm | qjmin l/s/km² | R mm | α | Tc jours | Q 10 l/s/km² | q 10 l/s/km² | K3 | m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | SAKAMARY BE | | 18 | (600) | (6) | | | | | | | (11) |
| 2 | BESOKATRA | | 55 | (700) | (5) | | | | | | | |
| 3 | MAHAVAVY nord | Ambilobe | 3210 | (1100) | (3) | | | | | | | (10) |
| 4 | SAMBIRANO | Ambanja | 2830 | 1500 | 4.2 | 125 | .010 | 72 | 8.7 | 2.3 | 3.8 | fin 10 |
| 5 | RAMENA | Ambodimanga | 1080 | 1800 | 6.8 | 64 | .010 | 72 | 8.8 | 4.0 | 2.2 | fin 10 |
| 6 | MAEVARANO | Ambodivohitra | 2585 | 600 | 1.1 | | .013 | 55 | 1.9 | .64 | 2.9 | début 11 |
| | BEANDRAZENA | | 190 | (985) | (5) | | | | | | | (10) |
| 7 | TSINJOMORONA | Marovato | 1460 | (325) | 0 | | | | | | | (9-10) |
| | ANKOFIA | | 1650 | | .8 | | | | | | | |
| | FANAMBANA | | 1830 | | (3) | | | | | | | (11) |
| 8 | LOKOHO | | 1040 | (1650) | (15) | | | | | | | (10) |
| 9 | MANINGORY | Andromba | 6855 | 330 | 2.1 | | | | 3.5 | .9 | 4 | (fin 11) |
| 13 | IVONDRO | Ringaringa | 2560 | 1320 | 17.2 | 160 | .0055 | 126 | 23.5 | 12.9 | 1.8 | fin 11 |
| 16 | VOHITRA | Rogez | 1910 | 1145 | 13.2 | 128 | .0060 | 115 | 18.0 | 9.5 | 1.9 | mi 11 |
| 17 | RIANILA | Brickaville | 6000 | 1840 | 14.8 | - | - | - | 29.0 | 5.8 | 5 | 11 |
| 18 | VOHITRA | Andekaleka | 2615 | 1710 | 15.9 | - | - | - | 23.1 | 10.6 | 2.2 | fin 11 |
| 21 | RONGARONG | AAmbinanInony | 1000 | (2500) | (15/25) | | | | | | | |
| 22 | IAROKA | Ampitabe | 1275 | (1550) | (15/20) | | | | | | | |
| 23 | MANGORO | Gare | 3600 | 770 | 6.5 | 96 | .0060 | 115 | 7.63 | 5.6 | 1.3 | fin 10 |
| 24 | MANGORO | Ambodimanga | 4735 | 805 | 6.7 | | | | | | | (11) |
| 25 | ANDRANO | BEFanalamanga | 105 | (550) | 3.8 | | | | | | | (11) |
| 26 | MANDRAKA | PK68 | 57 | (1200) | 13.8 | | | | | | | (fin 10) |
| 27 | ANTSAPAZANA | RN2 | 84 | (640) | 2.2 | | | | | | | |
| 28 | AMBOROMPOTSY | Antampandrano | 95 | 890 | 7.7 | 135 | .0052 | 140 | 9.7 | 6.1 | 1.6 | mi 10 |
| 30 | ONIVE | Tsinjoarivo | 3200 | 720 | 1.8 | 73 | .0084 | 82 | 3.9 | 1.1 | 3.6 | fin 10 |
| 31 | MANANJARY | Antsindra | 2260 | 1650 | 13.9 | 214 | .0060 | 115 | 19.2 | 10.5 | 1.8 | deb 11 |
| 32 | IVOANANA | Fatihita | 835 | 1860 | 16.9 | 280 | .006/.008 | 87/115 | 22.6 | 12.5 | 1.8 | deb 11 |
| 33 | NAMORONA | Vohiparara | 445 | 895 | 6.4 | 160 | .0062 | 112 | 8.8 | 4.5 | 2.0 | mi 11 |
| 34 | FARAONY | Vohilava | 2005 | 1840 | 12.8 | 215 | .0059 | 117 | 18.1 | 9.5 | 1.9 | deb 11 |
| 35 | MANANARA sud | Marangaty | 14160 | 535 | 1.9 | 63 | .010 | 69 | 3.9 | 1.1 | 3.7 | fin 10 |
| 36 | MANAMPANIHY | Elanary | 1087 | (1500) | (3) | | | | | | | |
| 37 | EFAHO | | 195 | 2070 | 2.8 | 83 | .010 | 70 | 6.8 | 1.7 | 4.1 | deb 10 |
| 38 | MANDRARE | Andabolava | 4035 | 300 | .20 | | .015 | 48 | .75 | .05 | 16 | fin 10 |

suite

| N° | Cours d'eau | Station | S km² | H mm | qjmin l/s/km² | R mm | α | Tc jours | Q 10 l/s/km² | q 10 l/s/km² | K3 | m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 39 | MANDRARE | Amboasary | 12435 | 185 | .02 | 10/15 | .01/.028 | 25/69 | .21 | - | 2700 | deb 10 |
| 40 | MANANARA | Bevia | 1085 | 175 | .19 | 0 | | | .61 | .04 | 13 | deb 11 |
| 43 | MANAMBOVO | Tsihombe | 2712 | 50 | 0 | | | | | | | 5 à 10 |
| 44 | MENARANDRA | Tranoroa | 5330 | 190 | .03 | - | | | .15 | <.01 | 17 | deb 10 |
| 47 | LINTA | Ejeda | 1700 | 65 | 0 | | | | | | | (8) |
| 48 | ONILAHY | Tongobory | 27700 | 165 | .93 | | (.003) | (230) | 1.60 | .54 | | deb 10 |
| 49 | MANGOKY | Betroka | 2345 | (250) | (.50) | | | | | | | (10-11) |
| 50 | ISOANALA | Isoanala | 459 | (360) | (1) | | | | | | | |
| | TAHEZA | Ambafinakoho | 1590 | | (6) | | | | | | | |
| | FIHERANANA | *Mahaboboka* | 4020 | - | (1à2) | | | | | | | |
| | FIHERANANA | Ranomena | ((200)) | | (4) | | | | | | | |
| 51 | IHOSY | Ihosy | 1500 | 340 | 1.25 | 36 | .011 | 65 | 2.3 | .35 | 6.4 | fin 10 |
| 52 | ZOMANDAO | Ankaramena | 610 | 575 | .53 | 32 | .012 | 58 | 1.1 | .30 | 3.7 | deb 11 |
| 53 | MANANANTANANA | Tsitondroina | 6510 | 440 | .51 | 35 | .0085 | 82 | 1.6 | .13 | 12 | deb 11 |
| 54 | MATSIATRA | Malakialina | 11715 | 625 | 1.4 | 65 | .0065 | 107 | 2.9 | 1.85 | 1.6 | fin 10 |
| 55 | MANGOKY | Banian | 50000 | 330 | 0.9 | 27 | .0063 | 110 | 1.3 | 0.6 | 2.3 | fin 10 |
| 56 | MANGOKY inf*é*r. | (Banian) | 29665 | 130 | 0.4 | | | | | | | |
| 57 | MORONDAVA | Dabara | 4640 | 330 | (1.7) | (20) | (.005) | 138 | | | | (10) |
| 60 | SAHANIVOTRY | PK197 | 430 | 730 | 4.9 | 145 | .0062 | 112 | 6.5 | 3.3 | 2.0 | deb 11 |
| 61 | MANANDONA | Sahanivotry | 1450 | 600 | 2.8 | 82 | .0087 | 80 | 3.9 | 2.0 | 2.0 | fin 10 |
| 62 | MANIA | Fasimena | 6795 | 720 | 7.4 | 150 | .0043 | 161 | 10.5 | 5.5 | 1.9 | fin 10 |
| 66 | MANIA | Ankotrofotsy | 17990 | (695) | (4.4) | | | | | | | |
| 69 | MAHAJILO | Miandrivaso | 14375 | (755) | (2.8) | | | | | | | |
| 73 | TSIRIBIHINA | Betomba | 45000 | 695 | 3.7 | 50 | .0035 | 200 | 4.4 | 3.0 | 1.5 | fin 10 |
| 74 | TSIRIBIHINA inf*é*r. | (Betomba) | 12600 | (455) | (1) | | | | | | | |
| 75 | DEMOKA | Bevatry | 1325 | (670) | 1.8 | | | | 2.5 | 1.2 | 2.1 | |
| 76 | KIMAZIMAZY | Soatanana | 260 | (875) | (0.4) | | | | | | | |
| 77 | TSIOMBIKARY | Tsiombikary | 24 | (600) | 0 | | | | | | | |
| 78 | NAMELA | Antanandeva | 680 | (835) | (2.1) | | | | 3.3 | 1.2 | 2.7 | |
| 79 | VARAHINA sud | Tsiazompaniry | 283 | (1000) | (11.5) | | | | | | | (11) |
| 84 | SISAONY | Andramasina | 318 | 595 | 3.2 | 120 | .0056 | 124 | 4.9 | 2.2 | 2.3 | mi 11 |
| 85 | ANDROMBA | Tsinjony | 350 | 860 | 4.0 | 100 | .0065 | 107 | 8.1 | 2.4 | 3.4 | deb 11 |
| 88 | TAFAINA | | 4.5 | 725 | (5.5) | | | | | | | |
| 89 | IKOPA | Bevomanga | 4290 | 605 | 4.0 | 68 | .0059 | 117 | 5.5 | 3.2 | 1.7 | fin 10 |
| 90 | IKOPA | Fiadanana | 9450 | 575 | 2.8 | 72 | .0067 | 104 | 4.1 | 2.1 | 1.9 | deb 11 |
| 91 | IKOPA | *Antsatrana* | 18645 | 770 | 5.1 | 110 | .0065 | 107 | 6.1 | 4.1 | 1.5 | fin 10 |
| 92 | ISINKO | Ambodiroka | 600 | 1130 | 3.2 | 114 | .0090 | 77 | 4.4 | 2.0 | 2.2 | deb 11 |
| 93 | BETSIBOKA | Ambodiroka | 11800 | 780 | 4.45 | 100 | .0061 | 114 | 6.3 | 3.4 | 1.9 | deb 11 |

# 1. RÉPARTITION SPATIALE DES DÉBITS D'ÉTIAGE

Les valeurs des débits spécifiques d'étiage ont été reportées sur la carte de Madagascar (figure 10.2.) sur laquelle ont été tracées les lignes schématiques d'isovaleurs du débit d'étiage. Les différentes régions hydrologiques apparaissent nettement sur cette carte ainsi que sur la figure 10.1.

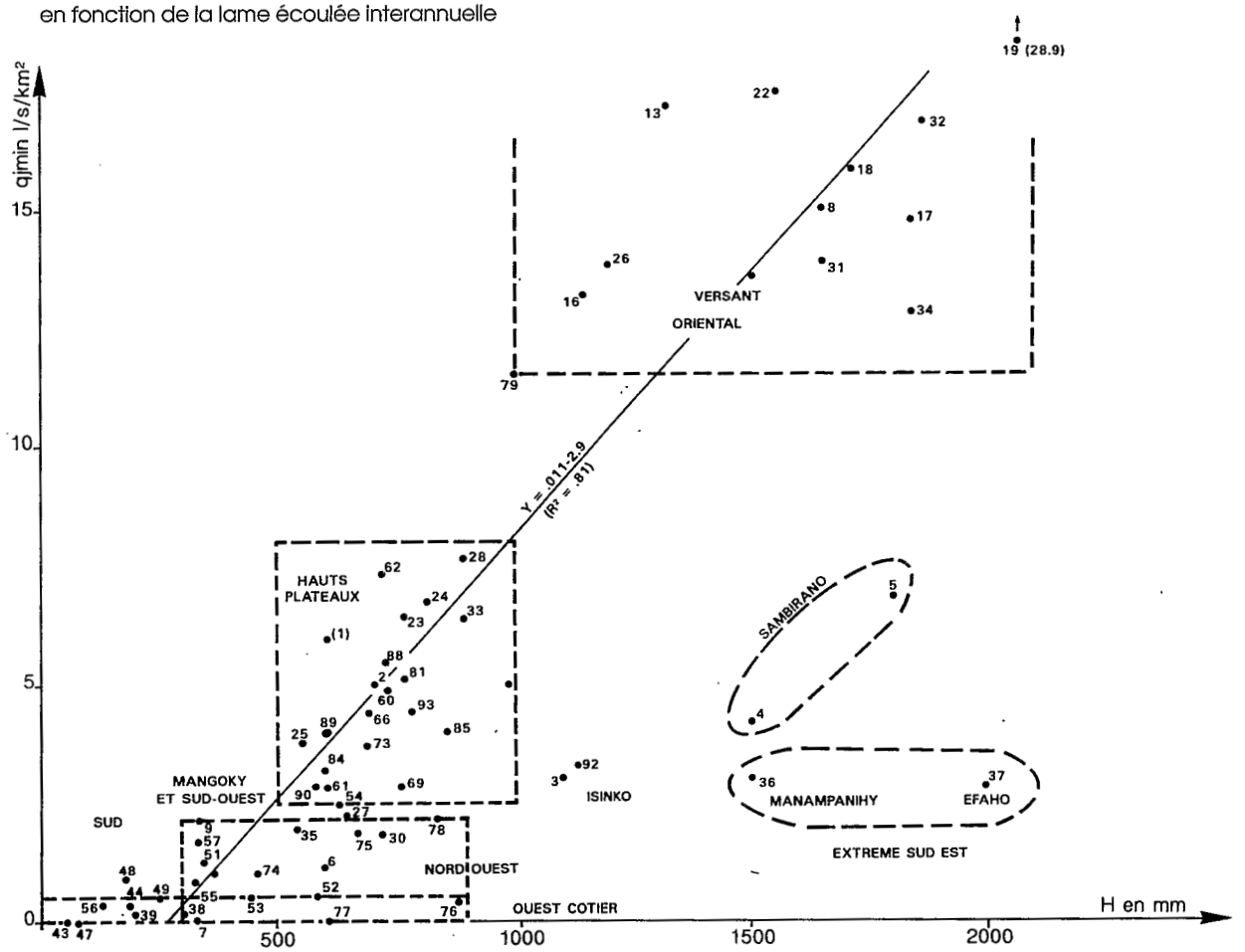
- Bassins du versant oriental (à l'est de la ligne de relief correspondant à la grande falaise) avec des débits spécifiques supérieurs à 10 l/s/km² et généralement voisins de 15 l/s/km².

Sur le versant de la seconde falaise, la Mandraka se rattache à ces bassins. On notera l'affaiblissement des débits d'étiage (environ 3 l/s/km²) à l'extrême sud du versant.

- Bassins des hauts plateaux avec des débits spécifiques compris entre 3 et 8 l/s/km². On note une tendance décroissante de l'est vers l'ouest et un redressement des débits sur les Tampoketsa (bassins moyens de l'Ikopa et de la Betsiboka).

figure 10.1.

Débit journalier spécifique minimal
en fonction de la lame écoulée interannuelle



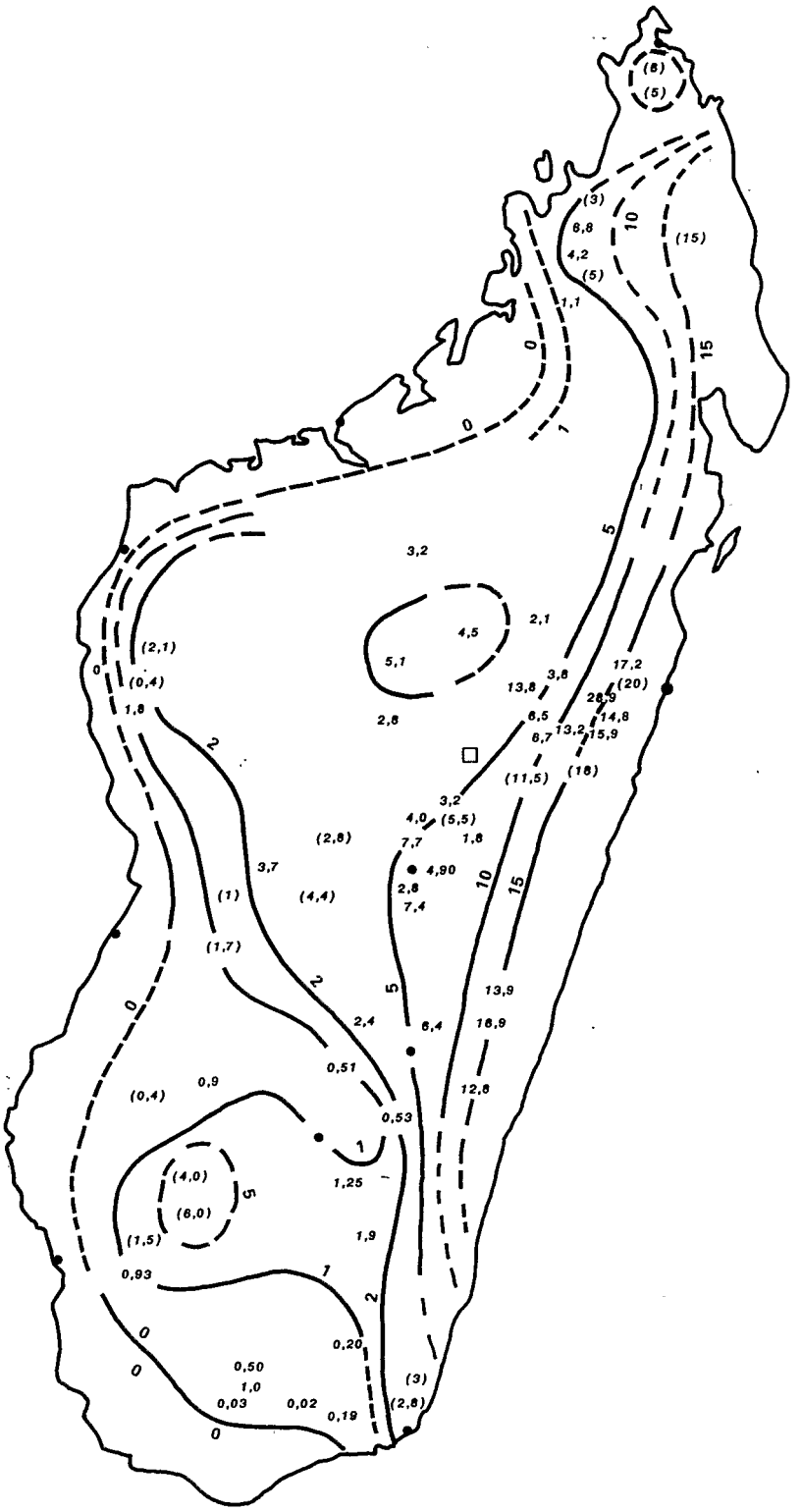



figure 10.2.

Basses eaux
Carte schématique des isovaleurs
de qj min spécifique
(valeurs en l/s/km²)

- Bassins du versant occidental du Tsaratanana où les débits d'étiage sont voisins de ceux des hauts plateaux avec des écoulements annuels très supérieurs.

- Bassins de l'ouest avec des débits spécifiques compris entre 1 et 3 l/s/km². S'en distinguent les bassins du Zomandao et de la Manantanana (bassin supérieur du Mangoky) aux débits beaucoup plus faibles (de l'ordre de 0.5 l/s/km²) et les tributaires issus de l'Isalo (haut bassin de la Firehanana, Taheza, bassin moyen de l'Imaloto) avec des débits beaucoup plus soutenus (2 à plus de 5 l/s/km²).

- Bassins du sud avec des débits inférieurs à 0.5 l/s/km² sur l'est du prolongement méridional du socle et extrêmement faibles ou nuls sur le sud-ouest du socle et les formations sédimentaires. Les cours d'eau sont également à sec la plus grande partie de la saison fraiche sur l'ensemble des petites rivières côtières de l'ouest, de la Loza au nord à l'Onilahy au sud.

# 2. RAPPORTS DU DÉBIT MINIMAL JOURNALIER AU MODULE

Nous avons mis en évidence ci-dessus la relativement forte liaison statistique existant entre les débits spécifiques d'étiage et les apports annuels (précipitations et lames). Les débits d'étiage croissent régulièrement selon un modèle linéaire, en même temps que les apports totaux annuels.

Sur un ensemble géographique aussi vaste et varié que Madagascar, une regression aussi nette traduit le poids relativement faible des régimes extrêmes : Fortes abondance annuelle avec des débits d'étiage faibles ou nuls (à l'exception des cours d'eau de l'extrême sud-est) ou, au contraire, faible abondance annuelle mais débits de basses eaux bien soutenus (à l'exception dans l'échantillon observé, de l'ONILAHY inférieur, à l'aval des formations gréseuses de l'ISALO et des zones karstiques ainsi que des petites rivières de la montagne d'Ambre.) La distribution des rapports qj min/ module (q/Q) correspond à la répartition suivante (intervalles inter-quintiles soit 20 % de l'échantillon).

## 2.1. q/Q ≤ 6 %

La moitié environ des observations dans cette classe correspond à des rapports inférieurs à 1 % (très souvents nuls). Il s'agit des cours d'eau situés sur la partie occidentales du socle méridional.

L'autre moitié (entre 1 et 6 %) correspond aux bassins méridionaux de l'est (MANDRARE), du sud-ouest (certains affluents du MANGOKY) et aux plus petites rivières cotières du nord-ouest (région de MAINTIRANO par exemple).

Les régimes, par la séverité de la saison sèche, se situent dans une position intermédiaire entre celle des régimes sahéliens (dont les apports annuels sont nettement moins abondants) et celle des regimes méditerranéens (plus abondants).

## 2.2. 6 % < q/Q <11 %

Les débits de basses eaux sont relativement conséquents mais encore modestes. On retrouve dans cette classe, les bassins du sud-ouest de l'île (affluents de l'ONILAHY situés sur le socle, certains formateurs du MANGOKY, MANANARA du sud etc.), de l'ouest (ISINKO, région de MAINTIRANO etc.) ainsi que les fleuves du versant occidental du TSARATANANA (avec des débits d'étiage assez soutenus mais une très forte abondance annuelle). Sur le versant oriental, les cours d'eau situés au sud de la MANANARA du sud (MANAMPANIHY, EFAHO) présentent les mêmes rapports.

## 2.3. 11 % < q/Q < 18 %

Dans cette classe intermédiaire se situent généralement les bassins de la partie centrale des haut-plateaux (au sud de l'ANKARATRA). Avec une abondance annuelle modérée mais des débits d'étiage soutenus par le drainage des grès de l'ISALO et des formations kastiques, l'ONILAHY inférieur se situe dans cet intervalle.

## 2.4. 18 % < q/Q < 26 %

Il s'agit des bassins situés sur la partie nord des hauts-plateaux à proximité de la falaise orientale (Haute MANIA, IKOPA, etc.). Ainsi que de certains cours d'eau du versant est (IVOANANA, NAMORONA, FARAONY).

## 2.5. 27 % < q/Q

Dans l'intervalle supérieur se retrouvent les cours d'eau du versant oriental où les débits d'étiage bien soutenus par le drainage des aquifères sont abondés des précipitations encore fortes de la saison fraiche.

Pour près des deux tiers des bassins observés, les valeurs du rapport qj min/Q se rapprochent des valeurs observées, par exemple, en France (avec des précipitations annuelles plus modérées et à contraste saisonnier moins accentué) pour des cours d'eau bénéficiant d'un stockage hivernal nival ou nivo-glaciaire (inexistant bien sûr à Madagascar) mais également pour les bassins (sous climat pluvial océanique) munis d'importantes aquifères (calcaires, craie, grès, sables...). Des formations géologiques aussi importantes ne sont pas représentées dans l'île, mais de puissantes et étendues formations latéritiques (qui ont conféré à Madagascar, l'appellation d' "île rouge" dans la littérature touristique) jouent un rôle analogue pour le soutien des débits d'étiage.

À l'exception des cours d'eau du sud, dont les régimes (par le contraste accusé entre les hautes eaux et les basses eaux) se situent entre ceux des cours d'eau saheliens (moins abondants en moyenne annuelle) et ceux des cours d'eau méditerranéens (plus abondants), la grande majorité des cours d'eau malgaches appartiennent au domaine tropical austral, avec des saisons contrastées, mais des débits de basses eaux bien soutenus. Cette situation spécifique (rencontrée beaucoup plus rarement sur le continent africain) est due à l'existence à Madagascar de formations

latéritiques plus ou moins importantes mais souvent de grande épaisseur (versant oriental et dans une moindre mesure, hauts plateaux et Tsaranana) qui ont pu se développer sur les formations du socle cristallin sous forte pluviométrie. Ces réservoirs, bien alimentés en saison des pluies, se distinguent des réservoirs classiques des altérites peu évoluées (arènes) des formations cristallines ou métamorphisées, des basaltes fissurés, des formations sédimentaires poreuses (grès, calcaires gréseux, etc.) et des formations calcaires karstiques.

La diversité des valeurs d'étiage est due beaucoup plus à l'intensité des phénomènes de formation des écoulements qu'à des différences de mécanisme. Ce mécanisme commun est le suivant : en saison des pluies, les précipitations efficaces (une fois satisfaite la reprise par évapotranspiration) nourissent, par drainage rapide des nappes en position haute et par ruissellement sur les zones imperméables et les sols saturés, la majeure partie des écoulements annuels (60 à 80 %).

Les excédents qui constituent une fraction notable des précipitations de saison des pluies sont stockées dans les altérites et, par drainage, nourissent en saison sèche des débits relativement soutenus qui peuvent être abondés (sur le versant oriental) de recharges partielles (ou même de ruissellement) à partir des précipitations (en particulier juillet et août).

Pour résumer, c'est en raison des fortes précipitations annuelles qu'a pu se constituer un recouvrement latéritique épais et c'est également pour la même raison que les latérites peuvent emmagasiner des réserves importantes. Cela explique tout naturellement la régression débits d'étiage-apports annuels.

## 3. RÉSERVES DRAINÉES ET VITESSES DE DRAINAGE

La répartition géographique des réserves drainées (représentées par l'indice R du tableau 10.1.) correspond à la répartition des précipitations : les valeurs les plus élevées (100 à 200 mm) sont situées sur les bassins du versant oriental, puis secondairement sur l'est des hauts-plateaux et le versant occidental du Tsaratanana. Les valeurs intermédiaires (50 à 100 mm) correspondent aux secteurs occidentaux et méridionaux des hauts-plateaux ; encore plus faibles (25 à 70 mm) sont les réserves des bassins du sud-ouest (Mangoky). Enfin, dans le sud, ces réserves sont pratiquement inexistantes.

Les vitesses de drainage sont également, mais dans une moindre mesure, diversifiées et régionalisées. Les vitesses les plus élevées (Tc inférieur à un mois) sont observées pour les aquifères peu développés des bassins méridionaux de l'ouest (Mandrare) ; sur les bassins de l'ouest et des hauts plateaux ainsi que pour le Tsaratanana, les temps caractéristiques sont de l'ordre de deux à trois mois alors qu'ils sont compris entre trois et quatre mois sur le versant oriental.

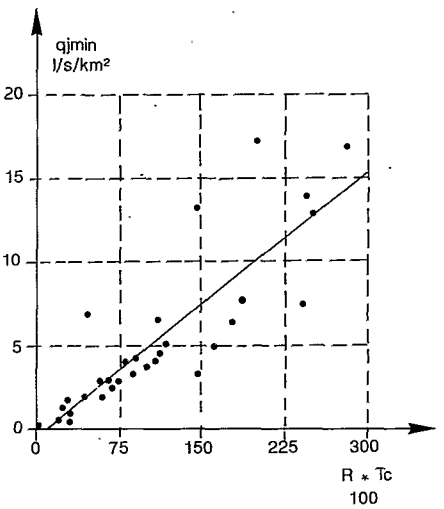
Il semble cependant que, sur ce versant, le ralentissement constaté tienne, beaucoup plus qu'à la nature des magasins, aux perturbations du tarissement naturel entraînées par les nombreuses recharges partielles de nappes en saison fraîche. Il s'agit dans ce cas d'un "pseudo-tarissement".

La liaison statistique entre les débits d'étiage et ces deux paramètres (R et Tc) est significative.

qj min = .05 (R * Tc/100) $R^2$ = .73 (graphe 10.3.)

figure 10.3.

Débit journalier spécifique minimal en fonction de R*Tc/100




qjmin = .05 (R * Tc/100) ($R^2$ = .73 P>.995)

# 4. DATES D'OBSERVATION DE L'ÉTIAGE MINIMAL ANNUEL

La date médiane d'observation de l'étiage minimal est généralement comprise entre la mi-octobre et la mi-novembre ; avec une tendance à des débits d'étiage en octobre dans la moitié sud de Madagascar, en novembre dans la moitié nord. Nous avons représenté (graphe 10.4.) la position, pour les différents bassins, de l'étiage médian, de l'intervalle interquartile Q3 Q1 et les dates extrêmes d'observation des débits minimaux.

Si pour la plupart des bassins des hauts plateaux, du Tsaratanana et de l'ouest, la dispersion des plages d'observations autour de la date médiane reste relativement faible (un mois pour l'intervalle interquartile, deux mois environ - octobre et novembre - pour les dates extrêmes, il n'en va pas de même pour la majorité des bassins du versant oriental et pour ceux du sud de l'île. On observe une tendance à l'élargissement de l'intervalle interquartile et une très large dispersion des dates d'observation de l'étiage minimal avec des étiages précoces (début de la saison sèche, voire au coeur de la saison des pluies) une année sur quatre environ et des étiages tardifs (décembre à fin janvier) une année sur quatre également.

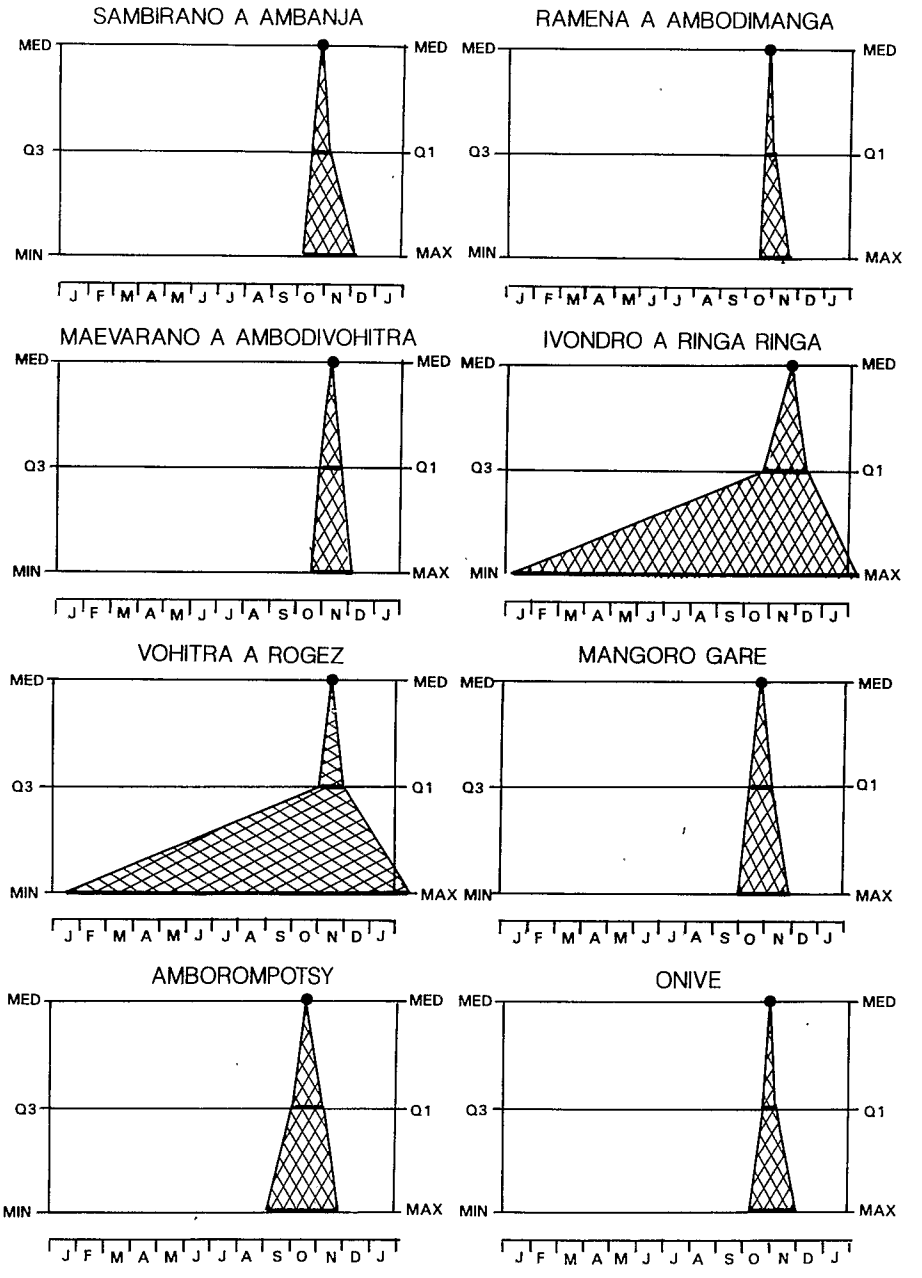
Deux cas de figure peuvent être rencontrés :

- bassins du versant oriental (Ivondro, Vohitra, Ivoanana, Efaho, etc.) où, en raison du soutien des débits de fin de saison "sèche" par recharge partielle des aquifères à partir des précipitations encore notables de juin à septembre, des débits de base plus faibles peuvent être observés (une année sur deux) en début de saison fraîche ou même entre les crues en saison des pluies ou bien à l'occasion d'une reprise plus tardive de la saison des pluies ;

- bassins du sud de Madagascar où, en raison de l'absence de réserves conséquentes, les débits sont liés directement aux occurences de précipitations et où les plus faibles valeurs peuvent être observées toute l'année, avec toutefois une préférence (50 % des cas) pour la période septembre-novembre.

figure 10.4.

Date d'observation de l'étiage absolu



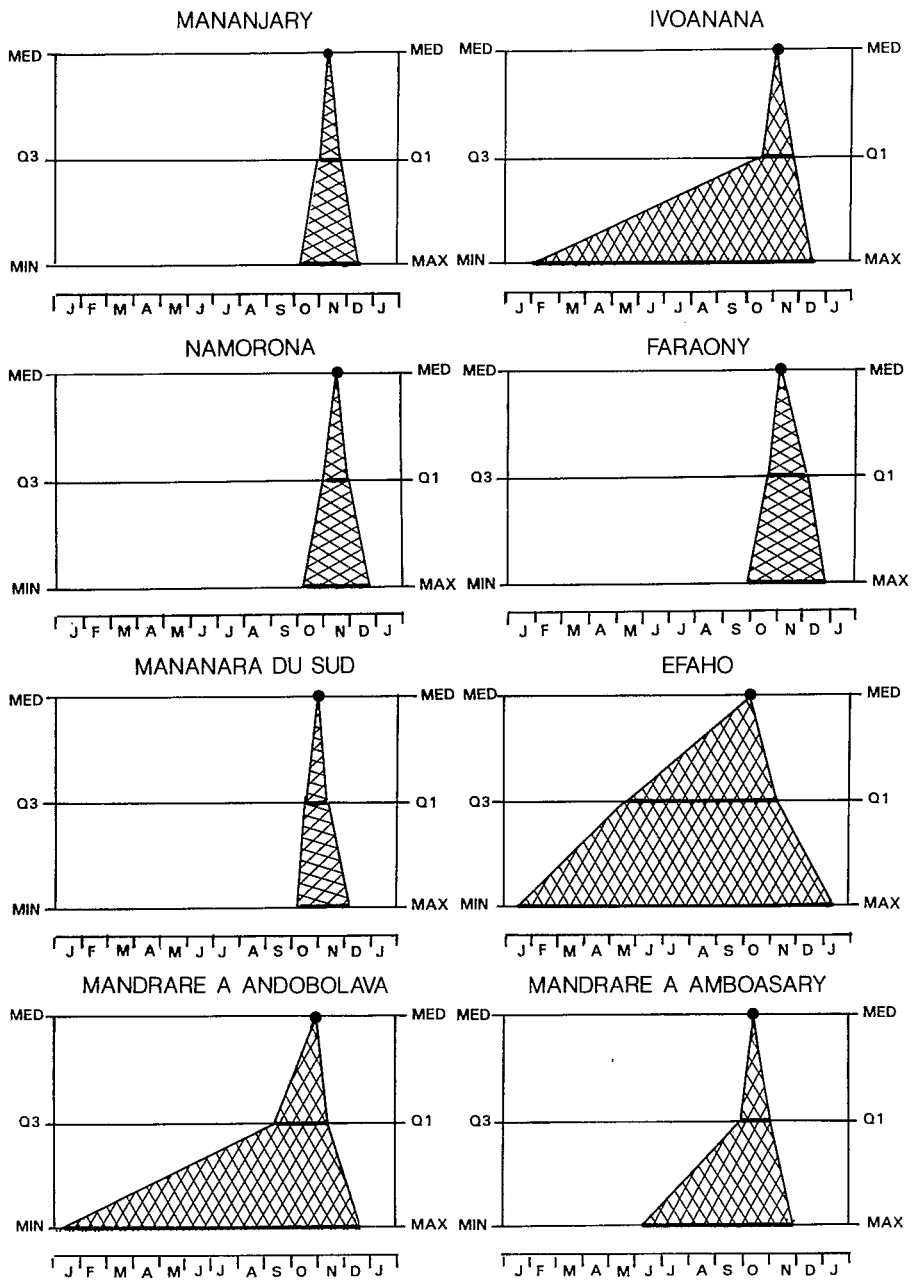
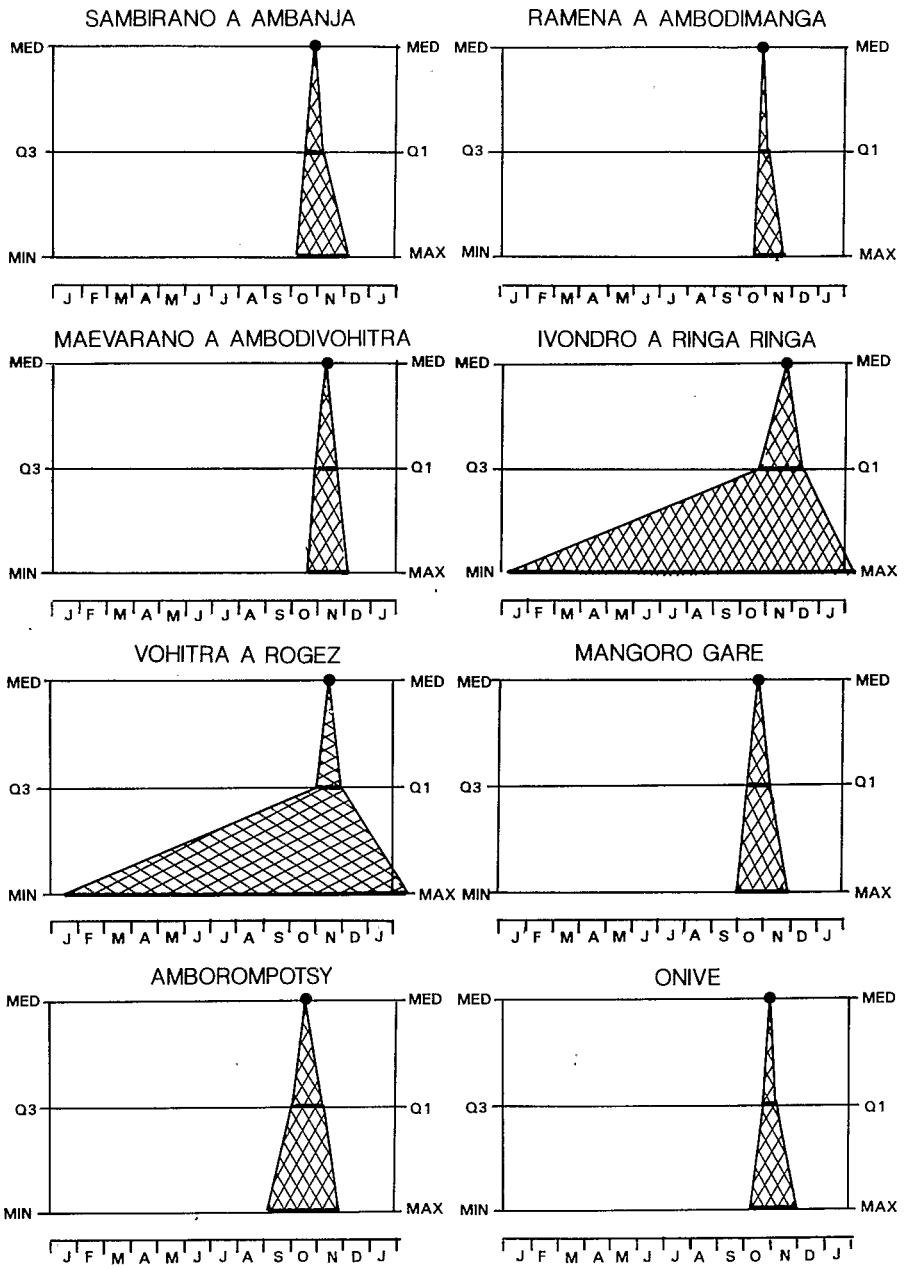



figure 10.4.A

Date d'observation de l'étiage absolu

figure 10.4.B

Date d'observation
de l'étiage absolu



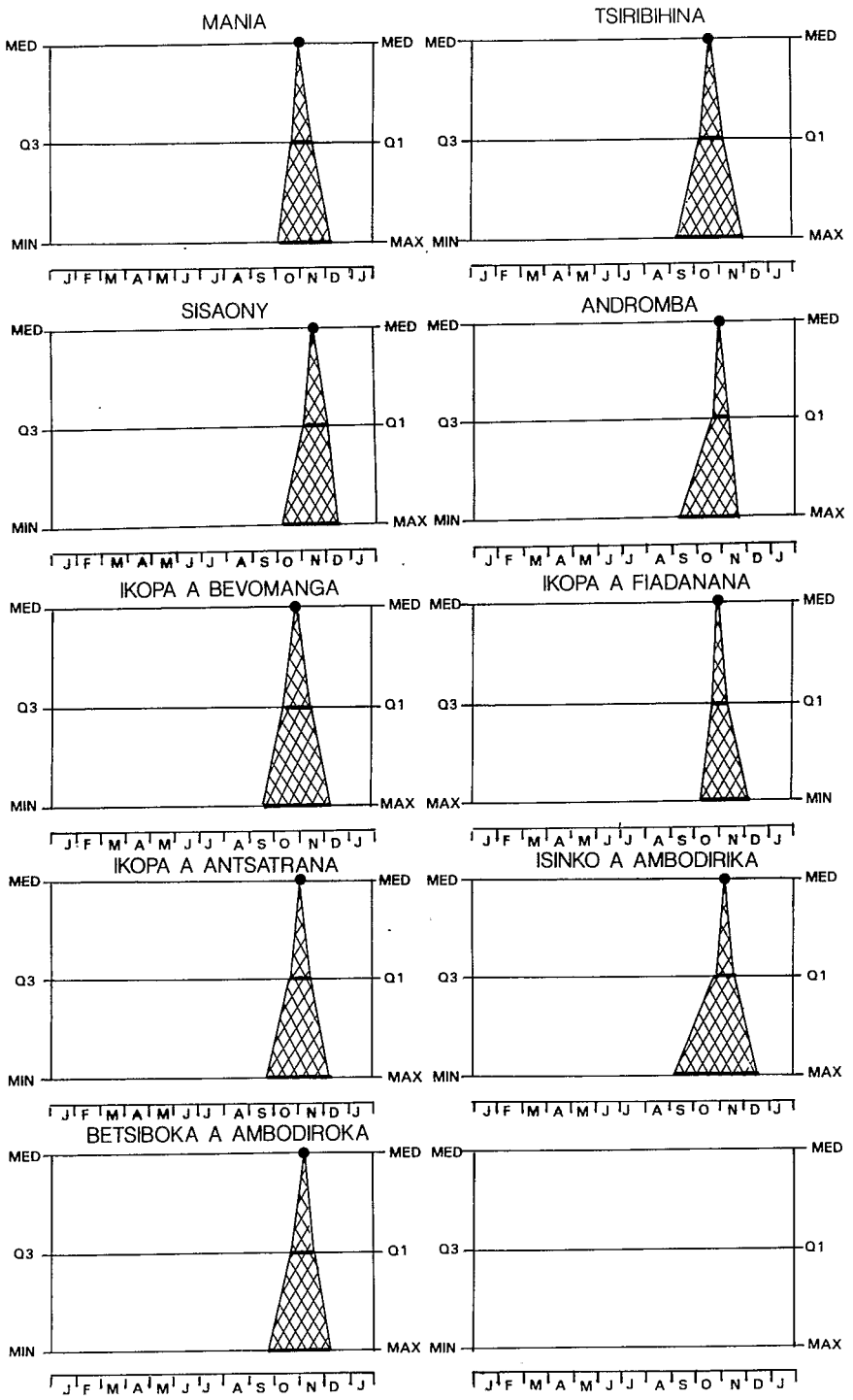



figure 10.4.C

Date d'observation de l'étiage absolu

# 5. IRRÉGULARITÉ INTERANNUELLE

Le rapport K3 (Q10/q10) d'irrégularité des débits minimaux a été représenté en fonction de la valeur médiane du débit d'étiage (graphe 10.5.). Les points représentatifs s'ordonnent autour de deux droites nettement caractérisées.

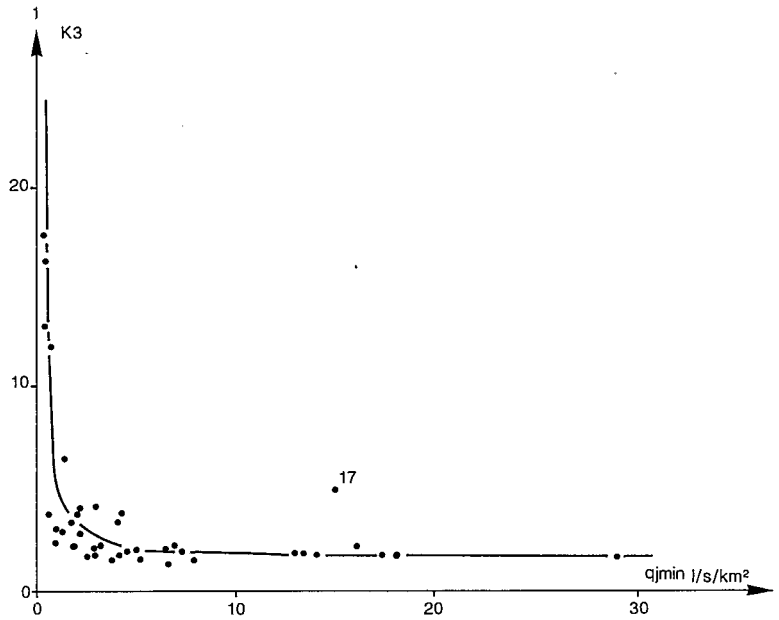
Pour les débits inférieurs au l/s/km² (bassins du sud), l'irrégularité est très forte (4 à 20 et plus) en fonction de l'irrégularité des précipitations (fréquences des épisodes pluvieux).

Pour les débits supérieurs à 4 l/s/km² (Est des hauts plateaux, Tsaratanana, versant oriental), l'intervention des aquifères régularise le rapport des débits décennaux autour d'une valeur voisine de 2. La position anormale du point 17 (Rianila à Brickaville) peut s'expliquer par l'imprécision sur les valeurs de faible débit liée à l'étalonnage de la section (mobilité du lit, influence probable de la marée).

Les valeurs intermédiaires de K3 (2 à 4) correspondent en général aux bassins du sud-ouest (débits d'étiage compris entre 1 et 4 l/s/km²).

figure 10.5.

Madagascar
Débits minimaux journaliers
K3 en fonction de
qjmin médian



# Grandes unités naturelles hydrologiques

## Chapitre 11

L'organisation régionale des principales caractéristiques des régimes hydrologiques apparaît assez clairement à partir des relations hydropluviométriques définies ci-dessus.

En premier lieu, la sectorisation des régimes correspond assez étroitement, pour la majeure partie des cours d'eau, à la sectorisation climatique :

- abondance, distribution saisonnière et irrégularité interannuelle des écoulements associées à la distribution des précipitations annuelles et des températures moyennes ;

- abondance des débits de basses eaux liée à l'importance des réserves stockées en saison chaude, elles mêmes très dépendantes des précipitations annuelles moyennes (constitution et remplissages des aquifères d'altérites) et de leur distribution dans l'année (plus ou moins grande sévérité des saisons sèches).

Mais si les seules précipitations annuelles peuvent expliquer, en moyenne, près de 90 % de la variance totale des lames écoulées annuelles et près de 80 % de celle des débits d'étiage, elles ne le font qu'à hauteur de 20 % pour les débits maximaux spécifiques de récurrence décennale. Pour la majeure partie des écarts résiduels des débits de pointe, l'influence des facteurs conditionnels non climatiques (géomorphologie et végétation) est prépondérante.

La délimitation des grandes unités naturelles hydrologiques résulte donc de la superposition du découpage climatique et du découpage géomorphologique (les zones de végétation étant généralement, si l'on ne tient pas compte des modifications anthropiques, déterminées par la pluviométrie et en second lieu par les influence édaphiques).

On notera enfin, qu'à l'intérieur des grandes unités, des particularités locales (relief, distribution des formations géologiques, importance des altérations, présence de dépressions marécageuses, bas-fonds et casiers rizicoles, singularité des biefs et sites de contrôle, etc.) peuvent induire des variations notables autour des caractéristiques hydrologiques régionales.

La caractérisation des différentes unités est suffisamment nette pour qu'elles puissent avoir été identifiées et leurs limites esquissées dès le début des observations hydrologiques (PELLERAY, 1953) puis précisées (ALDEGHERI, 1972) à partir des observations ultérieures.

Cinq grandes unités peuvent être identifiées.

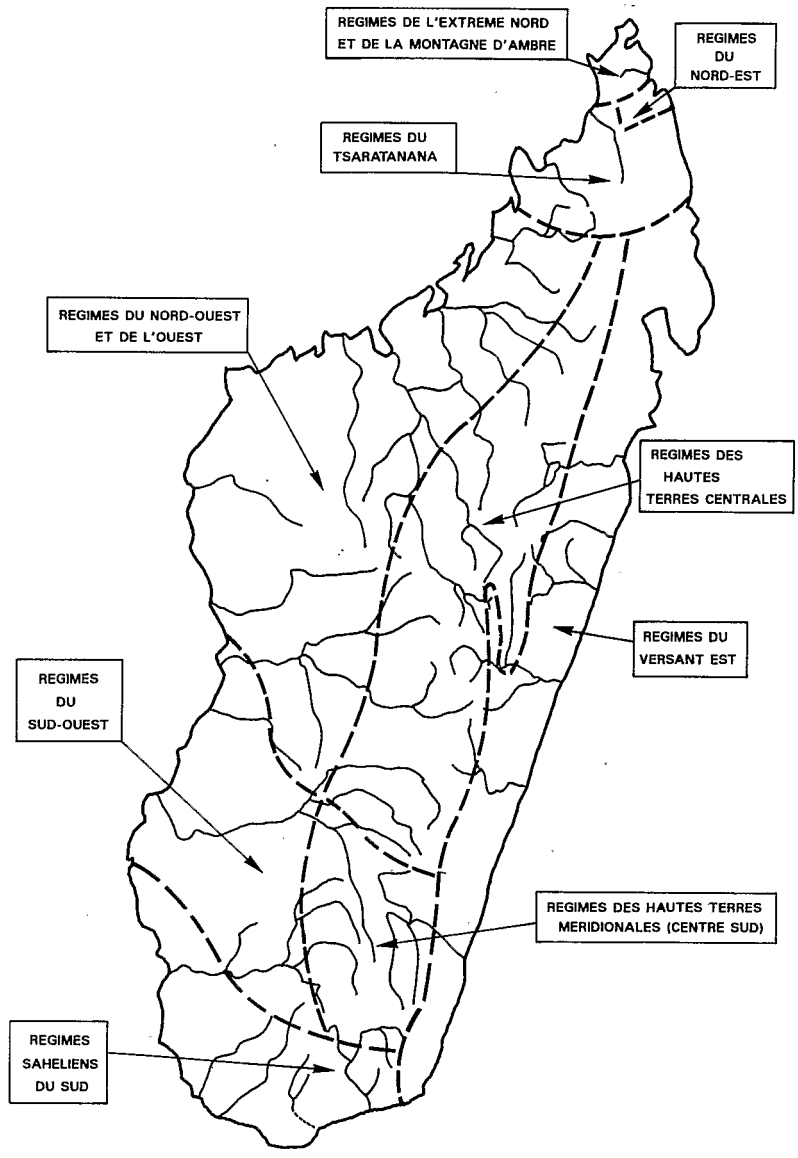
- Les régimes du nord, où l'on peut distinguer :
  - l'extrême nord et la montagne d'Ambre
  - le massif du TSARATANANA et ses bordures
  - un petit secteur nord-est intermédiaire entre ces deux massifs.

- Les régimes du versant est.

P. Chaperon, J. Danloux, L. Ferry

figure 11.1.

Principaux régimes hydrologiques




- Les régimes des hautes terres, où l'on peut distinguer :

• les hautes terres centrales entre TSARATANANA au nord, l'ANDRINGITRA au sud et regroupant globalement, à l'ouest du rebord des grandes falaises, les "hauts plateaux" situés à une altitude supérieure à 1 000 m

• les hautes terres méridionales (centre sud) entre l'ANDRINGITRA au nord, l'IVAKOANY au sud, l'ANBALAVAO à l'est et l'ISALO à l'ouest. D'une altitude moyenne plus modérée, ce secteur correspond à un relief encore assez marqué et plus contrasté que sur les Hautes Terres centrales, avec l'alternance de chaînes et massifs montagneux et de vallées profondes.

- Les régimes des pentes occidentales, où l'on peut distinguer :

• le nord- ouest et l'ouest, du bassin de la MAEVARANO, au nord, à celui de la TSIRIBIHINA au sud

• le sud-ouest, de la MORONDAVA au nord au bassin du MANGOKY au sud, en majeure partie sur les formations sédimentaires.

- Les régimes du sud, du MANGOKY inférieur au MANDRARE (cf. graphe 11.1).

# 1. RÉGIMES DU NORD

## 1.1. L'extrême nord et la montagne d'Ambre

Les bassins de Montagne d'Ambre correspondent à un dispositif rayonnant autour du sommet. D'organisation relativement simple, ils présentent des formes très allongées, avec de fortes pentes et des superficies réduites (généralement inférieures à 100 km²) La zone est caractérisée par la nature du soubassement géologique (basaltes fissurés) qui conditionne la spécificité des régimes (bassins très perméables).

La pluviométrie est assez mal déterminée : supérieure à 1 500 mm sur les premières pentes, elle atteint près de 3 300 mm au sommet.

Les observations effectuées sur quelques bassins de la zone (BESOKATRA, SAHARENANA) permettent d'évaluer sommairement les lames écoulées entre 600 et 700 mm ( 20 à 25 l/s/km²) avec des coefficients moyen d'écoulement de l'ordre de 25 à 30 %.

Le déficit d'écoulement,supérieur à 1 500 mm, peut approcher les 1 900 mm pour les bassins d'altitude. Avec une ETR estimée à 1 000 à 1 100 mm, il est possible d'estimer très grossièrement les pertes par infiltration profonde entre 500 et 800 mm (pour les bassins d'altitude). Les eaux ainsi infiltrées sont plus ou moins récupérées par drainage dans les biefs du piémont.

Les crues sont généralement aiguës et de courte durée. Les débits de pointe restent modérés (100 à 300 l/s/km²) pour les précipitations moyennes en raison de la perméabilité des pentes, du couvert forestier, de l'encombrement des lits par des blocs basaltiques, mais pour les très fortes précipitations, l'effet de pente devient prédominant

et des débits spécifiques élevés peuvent être observés (1 400 l/s/km² en 1982 et 5 700 l/s/km² - cyclone ISIS - sur la SAHARENANA).

Les débits d'étiage médians sont relativement soutenus (de l'ordre de 5 à 6 l/s/km² pour la BESOKATRA et la SAHARENANA) par drainage des basaltes.

## 1.2. Le Tsaratanana et ses bordures

D'organisation moins simple que sur la montagne d'Ambre, les cours d'eau du TSARATANANA correspondent à un dispositif rayonnant sur les formations cristallines altérées qui constituent le massif. Les pentes sont fortes (20 à 30 m/km) jusqu'au recouvrement sédimentaire où la rupture est brutale (quelques m/km jusqu'à la mer) et encore assez largement recouvertes de forêt dense.

L'ensemble appartient principalement au domaine climatique perhumide par les fortes précipitations annuelles mais à températures modérées par l'effet d'altitude.

La pluviométrie n'a été observée que sur des postes de faible altitude du pourtour du massif. En raison, d'un part, de l'exposition du massif aux flux d'alizés d'est et de "mousson" d'ouest, d'autre part, des écoulements abondants qui sont mesurés, les précipitations annuelles peuvent être estimées à plus de 2 000 mm sur les premières pentes et dépasser les 3 000 mm (voire atteindre 3 500 et peut être 4 000 mm) sur les sommets.

Les lames écoulées annuelles sont comprises entre 1 500 et 1 800 mm (45 à 60 l/s/km²) pour les bassins de l'est et de l'ouest du massif, entre 1 100 et 1 600 mm (35 à 50 l/s/km²) pour les bassins du nord et au sud soit des coefficients d'écoulement compris entre 50 et 60 %. La distribution saisonnière des écoulements bien que régularisée partiellement par les aquifères d'altérites, est beaucoup plus contrastée, à abondance égale, que sur les bassins de la côte est. Cela tient à une saison fraîche plus sèche (juin à août). Le rapport des mois extrêmes est de l'ordre de 15 à 20.

Le déficit d'écoulement (850 à 1 200 mm) correspond à une ETR (saison sèche) un peu réduite par rapport à l'ETP Les débits maximaux de crue (qui sont observés généralement entre la mi janvier et la mi mars) sont élevés en raison des fortes pentes ; de l'ordre de 400 à 800 l/s/km² pour une crue médiane et de 1 000 à 2 000 l/s/km² pour la crue décennale.

Les débits d'étiage sont soutenus (3 à 7 l/s/km² pour l'étiage médian) sur l'ensemble du massif et se rapprochent des débits de la côte est sur le flanc sud-est du TSARATANANA (LOKOHO : 15 l/s/km²). Ils sont généralement observés au cours de la seconde quinzaine d'octobre.

Le régime du SAMBIRANO est représentatif de l'unité.

## 1.3. Le secteur nord-est

Située entre la montagne d'Ambre et le TSARATANANA, la petite région nord-est est de relief modéré (à l'exception des bordures de l'ANALAMERA) La pluviométrie est beaucoup plus faible que sur les massifs voisins (Trouée

d'AMBILOBE) et reste en moyenne, inférieur à 1 500 mm. Il n'y a pas eu d'observations sur les cours d'eau, mais les facteurs conditionnels laissent envisager des débits nettement plus faibles que sur les deux unités qui l'encadrent.

## 2. RÉGIMES DU VERSANT EST

L'unité est délimitée à l'ouest par le rebord oriental des hautes terres (falaises de l'ANGAVO, de BETSIMISARAKA et de TANALA). Elle regroupe les cours d'eau dont les bassins sont pour l'essentiel, situés en aval du rebord des falaises. Les bassins supérieurs bien développés du MANINGORY, du MANGORO et de la MANANARA du sud appartiennent au domaine des hautes terres.

L'unité se rattache au climat perhumide avec des précipitations annuelles supérieures à 2 000 mm et pouvant atteindre dans les secteurs les mieux arrosés plus de 3 000 mm et des températures moyennes comprises entre 20 et 25 ° G. Les saisons sont assez peu contrastées et, en saison fraîche, les précipitations mensuelles dépassent généralement les 100 mm. L'évapotranspiration potentielle annuelle est comprise entre 1 000 et 1 300 mm.

Les bassins reposent, pour la majeure partie de leurs superficie, sur les formations du socle cristallin profondément altérées en latérites. Les formations basses sédimentaires ne sont représentées que sur l'étroite plaine littorale. Sur les reliefs la végétation est représentée par la forêt dense ombrophile, très souvent dégradée en "savoka".

Les apports annuels sont, avec ceux du TSARATANANA, les plus abondants de l'île. Les lames écoulées médianes sont comprises entre 1 300 et 2 000 mm (40 à 65 l/s/km²), les décennales entre 1 600 et 3 000 mm (50 à 100 l/s/km²). L'irrégularité interannuelle est faible (K3 voisin de 2). Les coefficients d'écoulement sont compris entre 50 et 70 %. L'évapotranspiration potentielle est presque toujours satisfaite (sols saturés la majeure partie de l'année) et le déficit d'écoulement est de l'ordre de 1 100 à 1 200 mm.

C'est sur ce versant que l'irrégularité saisonnière est la moins marquée (rapport du mois le plus abondant au moins abondant M/m inférieur à 5). Toutefois l'irrégularité s'accuse dans l'extrême sud du versant.

En raison des fortes pentes sur les falaises, qui confèrent aux cours d'eau du versant un important potentiel hydroélectrique (déjà bien exploité) et en dépit d'un couvert forestier dense, les débits de crue sont très élevés.

Pour les débits de pointe spécifiques médians ils sont compris entre 300 et 1 200 l/s/km², et entre 1 000 et 2 700 l/s/km² pour les débits décennaux. Des valeurs encore plus fortes sont observées sur les petits bassins d'altitude de l'extrême sud du versant (EFAHO 2 200 l/s/km², médiane et 4 900 l/s/km², décennale).

Bien soutenus par le drainage des puissants aquifères lateriques, gorgés d'eau en fin de saison chaude, et par les précipitations encore importantes de saison fraîche, les débits d'étiage sont les plus élevés de l'île : 13 à 30 l/s/km² pour les débits médians avec une irrégularité très modérée (K3 voisin de 2). Dans l'extrême sud, où les aquifères sont plus limités et à drainage rapide, les débits d'étiage sont beaucoup plus faibles (3 l/s/km²).

# 3. RÉGIMES DES HAUTES TERRES

## 3.1. Les hautes terres centrales

L'unité regroupe les bassins supérieurs des grands fleuves malgaches : BETSIBOKA, TSIRIBIHINA, affluents nord du MANGOKY. Elle repose entièrement sur les formations du socle ancien altérées en sols ferrallitiques cependant moins épais que sur le versant oriental. La forêt n'est plus que résiduelle et le couvert végétal prédominant est représenté par la savane. Les périmètre rizicoles occupent des superficies relativement importantes.

Le domaine climatique correspond à la région humide avec des précipitations moyennes comprises entre 1 200 et 1 500 mm (parfois inférieurs à 1 000 mm dans les zones dépressionnaires : plaine de TANANARIVE, ALAOTRA) et des températures moyennes inférieures à 20 °C (influence de l'altitude supérieure à 1 000 m). On y retrouve également, mais plus localement, le climat d'altitude (ANKARATRA, ANDRINGITRA) avec des précipitations de 2 000 mm et plus et des températures de l'ordre de 15 °C. L'humidité atmosphérique et la nébulosité sont moins accentués que sur le versant est. La saison sèche commence à être assez bien différenciée (pendant six mois, les précipitations mensuelles restent comprises entre 10 et 50 mm). L'évapotranspiration réelle ne représente plus que 70 à 80 % de l'évapotranspiration potentielle (saison sèche de l'ordre de 2 à 6 mois).

Les apports annuels restent relativement abondants, beaucoup moins cependant que sur le versant oriental. Les lames annuelles médianes sont comprises entre 500 (et parfois beaucoup moins pour les zones dépressionnaires) et 1 000 mm (15 à 30 l/s/km²) ; les lames décennales entre 700 et 1 200 mm (20 à 40 l/s/km²) L'irrégularité interannuelle reste assez modérée (K3 compris entre 1,5 et 2,5). Les coefficients d'écoulement varient entre 30 et 50 %. Les déficits d'écoulement sont voisins de 800 à 900 mm. L'irrégularité saisonnière est plus accusée que sur le versant est (M/m compris entre 5 et 10).

Les pentes moyennes des cours d'eau (biefs de faible pente entrecoupés de rapides et chutes) sont beaucoup plus modérées qu'à l'est des falaises. La présence de bas-fonds marécageux et de périmètres rizicoles dans les bassins supérieurs contribue fortement à l'écrêtement des crues. Les débits spécifiques de crue sont compris entre 120 et 300 l/s/km² pour la médiane, parfois beaucoup moins quand les stations sont situées immédiatement à l'aval des dépressions marécageuses (MANINGORY : 25 l/s/km²). Les crues décennales sont comprises entre 180 et 800 l/s/km². On notera le contraste très net entre les débits de pointe de l'IKOPA et ceux de la BETSIBOKA (trois à cinq fois plus élevés).

Les aquifères latéritiques sont moins développés qu'à l'est et, avec des précipitations de saison fraîche beaucoup plus faibles, les débits d'étiage sont nettement moins soutenus : 3 à 8 l/s/km² pour les étiages médians qui se produisent généralement entre le 15 octobre et le 15 novembre. L'irrégularité interannuelle, (K3) est de 2 à 3. On notera que les débits d'étiage (haute IKOPA) peuvent être assez considérablement amputés par les prélèvement pour l'irrigation.

## 3.2. Les hautes terres méridionales (centre sud)

Cette unité correspond aux bassins des formateurs sud-est du MANGOKY, de ceux de l'ONILAHY et au bassin de la MANANARA du sud en amont du seuil de SOAKIBANY. Ils reposent sur la partie sud du socle cristallin,

moins profondément altéré en raison de la pluviométrie moins abondante. Avec une altitude moyenne moins élevée que sur les hautes terres centrales, les bassins présentent un relief assez accusé avec des vallées étroites et profondes encaissées entre des massifs et chaînes élevés. La région se rattache au climat sud-humide à semi-aride avec des précipitations comprises entre 800 et 1 000 mm (1 200 à 1 500 mm sur les bordures orientales des hautes terres) et des températures moyennes plus élevées qu'au nord (23 à 25 ° c). L'évapotranspiration potentielle est assez forte (1 200 à 1 600 mm) et l'ETR ne représente plus que la moitié de l'ETP avec six à huit mois "secs".

Les apports annuels sont nettement plus faibles que sur les hautes terres centrales. Les lames annuelles médianes sont comprises entre 350 et 700 mm (au pied des massifs de l'est) soit 12 à 20 l/s/km². Les décennales sont comprises entre 500 et 900 mm (15 à 30 l/s/km²) avec un rapport d'irrégularité K3 de 2 à 3. Les coefficients d'écoulement sont compris entre 30 et 45 % avec des déficits d'écoulement (ETR réduite) de 600 à 700 mm. L'irrégularité saisonnière est accusée (M/m compris entre 10 et 20).

Les crues annuelles sont rapides avec des débits de pointe de l'ordre de 100 l/s/km² pour les médianes (mais près de 600 l/s/km² pour le ZOMANDAO au pied de l'ANDRINGITRA) et 170 à 300 l/s/km² pour les décennales (1 900 l/s/km² pour le ZOMANDAO).

Les étiages ne bénéficient pas d'aquifères importants et restent voisins du l/s/km² (0.5 à 2 pour la MANANARA du sud). Ils se produisent en octobre ou novembre.

Ces régimes présentent un caractère de transition entre ceux de l'est, des hautes terres centrales et du sud-ouest.

# 4. RÉGIMES DES PENTES OCCIDENTALES

## 4.1. Le nord-ouest et l'ouest

L'unité correspond aux bassins du versant ouest situés sur les bordures du socle ancien à une altitude inférieure à 1 000 m et sur la couverture sédimentaire. On y retrouve les bassins inférieurs de la SOFIA et de la BETSIBOKA, la MAHAVAVY du sud, le MANAMBOLO et le bassin inférieur de la TSIRIBIHINA.

Les zones climatiques correspondent au climat humide mégathermique à l'est, au climat sub-humide mégathermique à l'ouest. La pluviométrie est comprise entre 1 300 mm (1 000 à 1 200 sur les régions côtières) et 1 800 mm à l'est. Les températures moyennes sont élevées (de l'ordre de 25 °C) Le mois le plus frais ne descend pas au dessous de 20 °C. L'évapotranspiration potentielle est élevée et en raison de la sévérité de la saison sèche (six à huit mois "secs"), l'ETR ne représente plus que 50 à 60 % de l'ETP.

Les informations sur ce secteur sont assez rares. Les lames annuelles sont comprises entre 350 mm (10 l/s/km²) pour les bassins du sud de la zone et les petits fleuves côtiers) et 900 mm (30 l/s/km²) pour certain fleuves côtiers plus développés issus du BEMARAHA. À l'est de la zone sur les TAMPOKETSA, les apports sont nettement plus

importants (1 100 mm ou 35 l/s/km² pour l'ISINKO). Les coefficients d'écoulement sont généralement compris entre 35 et 40 % (50 à 60 % pour les cours d'eau du BEMARAHA et des TAMPOKETSA ) et correspondent à un déficit d'écoulement de l'ordre de 700 mm. L'irrégularité saisonnière est accusée (M/m compris entre 15 et 25).

Les débits maximaux de crue sont assez dispersés et dépendent de facteurs locaux. Pour les crues médianes, on observe des débits de 850 l/s/km² sur l'ISINKO (KAMORO) et 350 l/s/km² sur la MORANDAVA, mais de l'ordre de 100 l/s/km² seulement sur le MAEVARANO, à l'aval de zones marécageuses importantes (et malgré les forts débits observés sur ses formateurs issus du TSARATANANA). Pour les décennales les débits sont compris entre 1 000 et 2 500 l/s/km². Sur certains petits bassins du KAMORO on a pu observer des débits dépassant 10 000 l/s/km² et atteignant exceptionnellement 20 à 30 000 l/s/km².

Les débits d'étiage sont faibles (de l'ordre de 1 à 2 l/s/km²). Ils peuvent atteindre les valeurs un peu plus fortes (2 à 4 l/s/km²) sur les cours d'eau du BEMARAHA et des TAMPOKETSA et, par contre, s'annuler totalement pour les petites rivières côtières.

## 4.2. Le sud-ouest

À l'ouest du plateau de l'HOROMBE, cette région correspond à la basse MORONDAVA, au bassin sédimentaire du MANGOKY et au bassin moyen de l'ONILAHY. Les bassins sont essentiellement situés sur les formations sédimentaires et sous climat semi-aride mégathermique avec des précipitations comprises entre 500 et 800 mm et des températures moyennes élevées (plus de 25 °). La sévérité de la saison sèche est très accusée.

Les lames annuelles médianes sont comprises entre 100 et 200 mm (3 à 6 l/s/km²) Les coefficients d'écoulement (10 à 20 %) correspondent à un déficit d'écoulement de l'ordre de 600 mm. L'irrégularité saisonnière est forte (M/m compris entre 25 et 40).

Les débits de crues, brutales et brèves, peuvent atteindre des valeurs élevées de l'ordre de 1 000 l/s/km² pour les bassins de moyenne taille. Sur l'ONILAHY à TONGOBORY, dans un bief présentant des possibilités de débordement importantes, le débit de crue médian est de l'ordre de 40 l/s/km² et a été évalué à environ 80 l/s/km² pour la crue décennale.

Pour la plupart des petits cours d'eau les débits d'étiage sont nuls ou extrêmement faibles. Seules font exception, dans cette zone, les rivières drainant l'ISALO (FIHERENANA supérieur, TAHEZA, SAKAMAKEBE, SAKAMAREKCLY) où les débits (4 à 6 l/s/km²) bénéficient de résurgences importantes.

# 5. RÉGIMES DU SUD

Ce domaine regroupe le bassin inférieur du MANDRARE (à l'est), ceux du MANAMBOVO, de la MENARANDRA et de la LINTA ainsi que l'ONILAHY en aval de l'ISALO. Les bassins reposent sur l'extrémité méridional du socle

ancien, sur les formations sédimentaires du KAROO à l'ouest, ainsi que en auréole externe, sur les formations sédimentaires marines jurasso-crétacées, éocènes et quaternaires. L'altération est peu prononcée (sols ferrallitiques peu lessivés et parfois indurés, sols ferrugineux tropicaux peu lessivés et lithosols). À l'exception de lambeaux forestiers sur l'ANOSY, la végétation dominante est représentée par la savane sèche et les formations xerophiles (bush). Le climat est aride avec des précipitations annuelles comprises entre 350 mm (littoral) et 600 mm (nord et à l'est) avec des températures moyennes élevées (20 à 25 °C). L'évapotranspiration potentielle est comprise entre 1 200 et 1 300 mm mais l'ETR présente une très forte réduction (25 à 30 % de l'ETP) en raison de la sévérité de la saison sèche (quatre à cinq mois seulement reçoivent plus de 15 mm) où, en raison des invasions polaires, des précipitations faibles sont cependant observées toute l'année.

Les lames écoulées sont parmi les plus faibles de l'île (50 à 150 mm soit quelques litres/s/km²) avec une forte irrégularité interannuelle. Les coefficients d'écoulement annuels, de l'ordre de 10 à 15 %, correspondent à un déficit d'écoulement de l'ordre de 400 à 600 mm. L'irrégularité saisonnière est très prononcée (les rapports des mois extrêmes sont supérieur à 50 et peut dépasser, et souvent de beaucoup, 100 à 200). La quasi-totalité de l'écoulement est concentrée sur 2 à 3 mois (mi-décembre à mi-mars).

Les crues sont très brutales, avec des variations extrêmement rapides des plans d'eau. Des débits de pointe de 500 à 800 l/s/km² pouvant atteindre lors des crues exceptionnelles, 1 000 à 1 500 l/s/km² ont été observés. Sur les bassins observés un nombre suffisant d'années, les débits médians ont été évalués entre 150 et 300 l/s/km² et les débits décennaux entre 350 et 900 l/s/km².

Les étiages sont extrêmement faibles : de l'ordre de 0.5 à 1 l/s/km² sur les parties amont des bassins, ils sont nuls pour les petits bassins et, à l'aval des grands bassins sur les formations sédimentaires (sables roux en particulier). On peut cependant observer pour les plus grands cours d'eau, un inféro flux notable.

Les régimes des cours d'eau du sud ont été rapprochés de ceux des cours d'eau sahéliens : extrême concentration des écoulements sur un faible nombre de mois, dégradation hydrographique à l'aval des bassins, brutalité des crues assez semblable à celle des "ouedis" méditerranéens. Ils s'en distinguent cependant par l'occurence de précipitations sporadiques pendant la saison "sèche".

## 6. LES RÉGIMES MIXTES

Ils correspondent aux plus grands fleuves malgaches dont les bassins s'étendent sur plusieurs unités naturelles hydrologiques et dont les caractéristiques observées à l'aval résultent de la composition des régimes propres des différentes fractions élémentaires du bassin.

- Appartiennent (non exhaustivement) à ces régimes, les bassins suivants :

| | |
|---|---|
| SOFIA | hautes terres centrales + nord-ouest |
| BETSIBOKA | hautes terres centrales + nord-ouest |

| | |
|---|---|
| TSIRIBIHINA | hautes terres centrales + ouest |
| MANGOKY | hautes terres centrales (Matsiatra et Mananantanana)<br>+ hautes terres méridionales (Zomandao-Isohy)<br>+ ouest (petits affluents du MAKAY)<br>+ sud-ouest (Malio et cours inférieur) |
| ONILAHY | hautes terres méridionales (Imakoto supérieur et Mangoky)<br>sud-ouest (Isalo) + sud (cours inférieur) |
| MANDRARE | est (pour les têtes de bassins) + hautes terres méridionales (Mandrare supérieur)<br>+ sud (Mandrare inférieur) |
| MANANARA du sud | hautes terres méridionales (jusqu'au seuil de SOAKIBANY)<br>+ est en aval du seuil |
| MANGORO | hautes terres centrales (Onive et Mangoro supérieur)<br>+ est (petits affluents rive droite du Mangoro et Mangoro inférieur) |
| MANINGORY | hautes terres centrales (jusqu'à l'exutoire du lac Alaotra)<br>+ est (en aval de l'exutoire). |

Un nombre restreint de stations ont été observées à l'aval des grands bassins (TSIRIBIHINA à BETOMBA, MANGOKY au BANIAN, ONILAHY à TONGOBORY, MANDRARE à AMBOASARY).

En raison de la pluviométrie toujours plus abondante sur les bassins supérieurs de ces cours d'eau (ce qui n'est pas le cas des bassins de la côte est ayant des formateurs bien développés sur les hauts-plateaux), les débits spécifiques annuels observes sur les stations aval des grands fleuves sont assez nettement supérieurs au contexte local.

Sur la TSIRIBIHINA à BETOMBA, la lame écoulée globale est de près de 700 mm (avec un coefficient d'écoulement de 50 %) alors que la fraction aval du bassin (28 % de la superficie totale du bassin) n'a qu'un écoulement voisin de 450 mm. L'amont du bassin (72 % de la superficie) sur le socle a une lame de 725 mm soit 80 % des apports.

La disparité est encore plus accusée pour le MANGOKY. Le bassin global (au BANIAN) a une lame écoulée de 330 mm (KE = 33 %) alors que le bassin aval (situé sur les formations sédimentaires et représentant près de 60 % de la superficie totale) a une lame de 130 mm (KE = 15 %) Environ 80 % des apports proviennent du bassin supérieur (40 % de la superficie totale) avec une lame de 550 mm.

Sur l'ONILAHY les lames écoulées du MANGOKY et de l'ISOALANA sont respectivement de 250 et 360 mm.

Elle n'est plus que de 165 mm pour le bassin global (à TONGOBORY) mais les apports du bassin inférieur ne représente qu'entre 100 et 120 mm.

Pour le MANDRARE, le bassin supérieur a des apports équivalents à une lame de 300 mm contre 185 mm pour le bassin global (moins de 150 mm pour la fraction aval).

Les débits de crue se forment essentiellement sur les bassins supérieurs mais en dépit de l'amortissement au cours du transfert, peuvent être consolidés par les crues encore notables des fractions inférieures. Les débits spécifiques décennaux observés aux station aval restent élevés (330 l/s/km² pour la TSIRIBIHINA, 350 l/s/km² pour le MANGOKY, 650 l/s/km² pour le MANDRARE mais seulement de l'ordre de 80 l/s/km² pour l'ONILAHY où des zones de débordements caractérisent la station).

Le contraste entre les débits d'étiage, observés sur les stations aval des grands fleuves, et les débits spécifiques des unités hydrologiques, où ces stations sont situées, est encore plus accusé que pour les lames annuelles.

Le débit spécifique d'étiage médian de la TSIRIBIHINA à BETOMBA est de l'ordre de 4 l/s/km² (dont près des trois-quarts en provenance des bassins supérieurs) soit quatre fois plus élevé que le débit d'étiage caractéristique de l'unité hydrologique environnante. Le débit spécifique des bassins amont (de l'ordre de 5 l/s/km²) est de l'ordre de grandeur des débits d'étiage médians constatés au confluent de l'IKOPA et de la BETSIBOKA.

Sur le MANGOKY, les débits spécifiques des formateurs du socle moins soutenus que sur les hautes terres centrales, représentant toutefois quatre fois ceux observés sur le bassin sédimentaire (1.6 et 0.4 l/s/km² respectivement). Le débit d'étiage du BANIAN (0.9 l/s/km² pour la médiane) reste près de deux fois supérieur au contexte local.

Sur l'ONILAHY, le débit d'étiage à TONGOBORY (0.9 l/s/km²) reste voisin de ceux des formateurs (.5 l/s/km² sur le MANGOKY, 1 l/s/km² sur l'ISOALANA) car bien soutenu par les résurgences de l'ISALO (4 à 6 l/s/km²).

Si le débit d'étiage du MANDRARE à AMBOASARY (0.02 l/s/km²) est très faible comparativement à ceux de l'amont (.2 l/s/km²), il ne faut pas oublier que les débits des petits cours d'eau du secteur aval sont nuls.

Des cours d'eau nettement moins importants peuvent également participer de deux unités. C'est le cas de la MAEVARANO. Les formateur issus des pentes du TSARATANANA ont les caractéristiques de cette unité (écoulement annuel, crues et débits de basses eaux) mais à la station aval (AMBODIVOHITRA), après que le cours d'eau eût traversé une zone dépressionnaire marécageuse, les caractéristiques du régime sont très nettement influencées par les conditions de l'unité nord-ouest (lame écoulée : 600 mm contre près de 1 500 mm pour les bassins supérieurs. Débit de crue écrêté : 170 l/s/km² pour la décennale contre 1 500 à 2 000 l/s/km² pour les formateurs. Débit d'étiage faible : 1 l/s/km² contre 3 à 4 l/s/km² pour les formateurs).

tableau 11.1.

Caractéristiques hydrologiques
des grandes unités naturelles

| Réglons<br>Caractéristiques | Extrême nord et mont. d'Ambre | Massif du Tsaratanana | Versant est | hautes terres centrales | hautes terres méridionales | Versants ouest et nord-ouest | Versants sud-ouest | Sud |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Climat | perhumide | perhumide | perhumide | humide | sub-humide à semi aride | humide à sub-humide | semi-aride | aride |
| P ann. (mm) | 1500 à 3300 | 2000 à 3500 | 2000 à 3000 | 1200 à 1500 | 800 à 1000 | 1200 à 1800 | 500 à 800 | 350 à 600 |
| H ann. (mm) | 6 à 700 | 1200 à 1800 | 1300 à 2000 | 500 à 1000 | 350 à 700 | 350 à 900 | 100 à 200 | 50 à 150 |
| DE (mm) | 1500 à 1900 | 850 à 1200 | 1100 à 1200 | 800 à 900 | 600 à 700 | 700 | 600 | 400 à 600 |
| Ke (%) | 25 à 30 | 50 à 60 | 50 à 70 | 30 à 50 | 30 à 45 | 35 à 40 | 10 à 20 | 10 à 15 |
| Débits de crue medians (l/s/km²) | 100 à 300 | 400 à 800 | 300 à 1200 | 120 à 300 | 100 à 200 | 100 à 500 | très variables | 150 à 300 |
| Débit d'étiage medians (l/s/km²) | 5 à 6 | 3 à 7 | 15 à 30 | 3 à 8 | Voisins de 1 | 1 à 2 | 0 à 1 | 0 à 1 |
| Irrégularité intermensuelle (M/m) | 8 à 10 | 15 à 20 | 5 | 5 à 10 | 10 à 20 | 15 à 25 | 25 à 40 | 50 à 100 et plus |
| Observations | Fortes pertes par infiltration profonde de l'ordre de 500 à 800 mm | Caractéristiques hydrologiques plus faibles sur l'axe N-S que sur l'axe E-W | Débits d'étiage plus faibles et irrégularité intermensuelle plus forte dans le sud | Affaibliss. des caract. hydologiques de l'est vers l'ouest | A noter gradient est-ouest comme H.T.C. | Apports, crues et étiages plus élevés sur les reliefs (Bemaraha, Kamoro) | Débits d'étiage très faibles sauf dans réglon de l'Isalo (étiages soutenus) | Débits d'étiage faibles sur le socle et nuls sur petits bassins |

Nota : les valeurs médianes des débits de crue sont données à titre indicatif (ordre de grandeur). Les valeurs observables sont très variables à l'intérieur d'une réglon et dépendent de caractéristiques locales (relief, géomorphologie, végétation, etc.).

# Conclusion

La synthèse des régimes hydropluviométriques de Madagascar s'appuie sur plusieurs décennies d'observations et mesures.

Reprenant, complétant et précisant les nombreuses études ponctuelles ou régionales réalisées antérieurement, cet ouvrage avait pour objectifs d'établir la géographie hydroclimatologique de l'île, de dresser un bilan d'ensemble des ressources en eaux de surface et de fournir le contexte permettant de valoriser, de la meilleure façon possible, les différentes études, la plupart du temps brèves et partielles, qui précèdent la conception des divers aménagements hydrauliques.

Mais cette étude ne doit être considérée que comme une étape dans la connaissance des régimes si divers de Madagascar, un des objectifs recherchés étant également de mettre en lumière les lacunes de l'information qui, dans le domaine de l'étude des régimes, sont de deux ordres :

- une exploitation incomplète des données collectées dont une partie importante n'a pu être analysée, pour des raisons matérielles que de façon relativement sommaire. Un effort important devait être effectué dans la réalisation d'une banque hydropluviométrique exhaustive permettant ensuite l'analyse critique détaillée des données précisées et homogénéisés. Cette action est en cours de réalisation dans le cadre du programme de "Banque de données hydrologiques de Madagascar (BDHM sur financement FAC n° 362) qui a débuté en janvier 1991. L'achèvement de ce programme apportera une valorisation certaine des observations recueillies ;

- des besoins importants d'observations et mesures supplémentaires concernant :

• la pluviométrie des secteurs encore insuffisamment connus : grands massifs de l'île (en particulier le TSARATANANA) et falaises orientales, entre autres ;

• la connaissance des plus hautes eaux (hauteurs et débits) à partir de mesures complémentaires portant sur la recherche des plus fortes cotes, la géométrie des biefs, des mesures de forts débits (flotteurs, téléphériques, etc) ;

• la mise en place et le suivi de stations sur quelques uns des cours d'eau encore mal connus (SOFIA, ONILAHY, MAHAVAVY du sud, en particulier).

Parallèlement à ces compléments d'études quantitatives, un effort important devra être effectué dans le domaine de la qualité physicochimique et biologique des eaux de surface ainsi que dans celui des biotopes aquatiques. En particulier seront nécessaires des études concernant les interactions entre, d'une part, les modifications naturelles et surtout anthropiques des facteurs conditionnels des bassins versants (aménagement du territoire, occupation des sols) et des biefs (aménagement hydraulique), d'autre part, les régimes des eaux de surface et les biotopes aquatiques.

Cet effort sera coûteux par l'ampleur des moyens à mettre en oeuvre, mais sa justification est évidente. Si de nombreux aménagements ont déjà été réalisés, un important potentiel reste encore inexploité. À Madagascar, comme ailleurs, c'est l'ensemble des ressources en eau qui, tôt ou tard, devra être utilisé. Maîtriser et gérer rationnellement ces ressources, c'est d'abord mieux les connaître dans leurs caractéristiques moyennes et leur variabilité, aussi bien que, dans leurs relations environnementales. Ce qui implique de ne pas attendre la mise en oeuvre des projets d'aménagement pour mettre en place et exploiter les observatoires nécessaires. L'investissement financier à consentir, certes important, est d'un rentabilité certaine. Des études économiques, effectuées dans divers pays ont pu mettre en évidence les gains considérables qu'on pouvait en attendre (dans les économies sur les dimensionnements, l'agencement et la gestion des systèmes d'eau) ; gains qui dépassent le plus souvent, dix fois les coût des observations et mesures préalables.

Dans la planification de l'aménagement du territoire aussi bien que pour la préservation de la nature, les études hydrologiques associées aux autres disciplines et techniques de l'environnement, apparaissent comme une activité nécessaire et d'une haute rentabilité.

# Bibliographie

# GÉOGRAPHIE GÉNÉRALE

BATTISTINI (R.), LE BOURDIEC (F.), LE BOURDIEC (P.) avec le concours de l'Université de Madagascar, de l'ORSTOM et du Centre National de la Recherche Scientifique (Paris) - *Atlas de Madagascar (1969).*
BDPA, Tananarive, Centre de l'Institut Géographique National à Madagascar - 68 pl. noir et couleur 31 x 40, fig., cart., tabl., graph., bibliographie.

BATTISTINI (R.) (1967)
*L'Afrique australe et Madagascar* - Magellan - P.U.F., Paris.

DESCHAMPS (H.) (1968)
*Madagascar* - P.U.F., Paris.

DONQUE (G.) (1965)
*Madagascar* - Documents EDSCO.

GUILCHER (A.), BATTISTINI (R.) (1967)
*Madagascar, géographie régionale* - CIDU, Paris.

ROBEQUAIN (CH.) (1958)

*Madagascar et les bases dispersées de l'Union française* - P.U.F., Paris.

# GÉOLOGIE ET GÉOMORPHOLOGIE

ARTHAUD (F.), GRILLOT (J.C.) ET RAUNET (M.)
La tectonique cassante à Madagascar et son influence sur les écoulements ( 1990), *Journal of Canadian Parth. Sci.*, Ottawa, Canada.

BESAIRIE (H.) (1946)
La géologie de Madagascar - *Annales du Service des Mines* n° 12, Paris.

BESAIRIE (H.) (1954)
Documents pour la géographie de Madagascar - *Travaux du Bureau Géologique* n° 54, Tananarive.

BESAIRIE (H.), COLLIGNON (M.) (1960)
Lexique stratigraphique international. *Vol. 4 Afrique.* Fasc. 11 Madagascar. C.N.R.S, 190 p.

BESAIRIE (H.) (1965)
Esquisse géologique et lithologie de Madagascar. *in Notice de la carte du tapis végétal de Madagascar* - hors série n° 6, Institut français de Pondichery.

BOURGEAT (F.), PETIT (M.) (1965)
*Etude morphologique du bassin versant de la Tafaina* - CR du séminaire géologique de Madagascar, imprimerie nationale (pp. 9 à 13).

PETIT (M.), BOURGEAT (F.)
Les "Lavakas" malgaches : un agent naturel d'évolution des versants - *Bulletin de l'association géographique française 332.*

## SOLS

BOURGEAT (F.) (1972)
*Sols sur socle ancien à Madagascar* - ORSTOM, Paris.

HERVIEU (J.) (1967)
Géographie des sols malgaches - Essai synthétique. *Cahiers ORSTOM, série pédologique, vol. V n° 1* - ORSTOM, Paris.

LE BOURDIEC (P.) (1972)
*Accelerated erosion and soil degradation in Biogeography and Ecology of Madagascar* - DR.W.JUNK B.V. Publishers, The Hague.

## VÉGÉTATION

BOSSER (J.) (1954)
*Les pâturages naturels à Madagascar* - Mémoires de l'Institut Scientifique de Madagascar, Tananarive.

BOSSER (J.) (1963)
*Végétation du moyen-ouest et des bas-fonds de la Sakay* - Roneo., ORSTOM, Tananarive.

HUMBERT (H.) (1928)
*Végétation des hautes montagnes de Madagascar.* Mémoires de la Société de Biogéographie, Paris.

HUMBERT (H.) (1936)
*Flore de Madagascar et des Comores.* Laboratoire de Phanetogam., Museum d'Histoire Naturelle, Paris.

HUMBERT (H.) ET COURS DARNE (G.) (1965)
*Notice de la carte internationale du tapis végégal* - Madagascar - Institut Français de Pondichery.

MORAT (P.) (1964)
*Végétation herbacée des plateaux du moyen-ouest*, vallée de la Vaonjo - Roneo., ORSTOM, Tananarive.

MORAT (P.) (1969)
Esquisse du milieu et de la végétation sur le plateau de l'Horombe. *Cahiers ORSTOM, série Biologie*, Paris.

PERRIER DE LA BATHIE (H.) (1921)
*La végétation malgache* - Annales du musée colonial, Marseille.

PERRIER DE LA BATHIE (H.) (1936)
*Biogéographie des plantes de Madagascar* - Société des éditions géographiques, maritimes et coloniales, Paris.

PERRIER DE LA BATHIE (H.) (1954)
*Flore de Madagascar et des Comores* . Firmin Didot et Cie, Paris.

RAUNET (M.) (1989)
Les terroirs rizicoles des hautes terres de Madagascar : environnement physique et aménagements. *Agronomie Tropicale 44-2*, Paris.

## CLIMATOLOGIE

CHAUSSARD (A.), LAPLACE (L.) (1958-1959)
Les perturbations dans le sud-ouest de l'Océan Indien, saison chaude - *La météorologie n° 56*, Paris.

CHAUSSARD (A.), LAPLACE (L.) (1964)
Les cyclones du sud-ouest de l'Océan Indien- *Mémorial de la Météorologie nationale n° 49*, Paris.

DONQUE (G.) (1975)
*Contribution géographique à l'étude du climat malgache* - Mémoire de thèse, Université de Madagascar, Tananarive.

DUFOURNET (R.) (1972)
*Régimes thermiques et pluviométriques des différents domaines climatiques de Madagascar* - Doc. n° 340 de l'I.R.A.M.

GERMAIN (H.), CHAUSSARD (A.) (1964)
Aperçu sur le temps à Madagascar - *La météorologie n° 75*, Paris.

GRAY (W.) (1976)
Genèse des cyclones tropicaux. Rev. *La Météorologie, n° spécial* 6, pp. 275-295

GRIFFITHS (J.F.), RANAIVOSON (R.) (1972)
*Climat de Madagascar* - Chapitre 14 du volume X - Climates of Africa - World Survey of Climatology - Elsevier Scientific Publis. Comp., Amsterdam.

LAJOIE (F.A.), NICHOLLS (N.) (1976)
Relation entre le mouvement d'un cyclone et sa structure nuageuse. *Rev. Met-Mar*, n° 91, pp. 32-39

RAVET (J.) (1948)
Atlas climatologique de Madagascar. *Service météorologique de Madagascar n° 10*, Tananarive.

RIQUIER (J.) (1963)
Formules d'évapotranspiration (annexes : tables utilisables à Madagascar). *Cahiers ORSTOM, série pédologie n° 4* - ORSTOM, Paris.

THOMAS (J.) (1947)
*Madagascar, caractères essentiels de la climatologie* - Encyclopédie Coloniale et Maritime, Paris.

Rapport technique sur le cyclone tropical Eugénie M.N. (1972)
Rapport multigr., 13 p. dont ann.

(Anon.) Saison cyclonique 1971-1972 - (1972)
M.N. réunion, rapport multigr., 24 + graph + photos.

## HYDROLOGIE

ALDEGHERI (M.) (1964)
*Monographie hydrologique de l'Ikopa et de la Betsiboka* - Quatre tomes roneo. - ORSTOM-IRSM, Paris.

ALDEGHERI (M.) (1966 à 1969)
*Etude hydrologique de la plaine de Tananarive - Campagnes 1963-64 à 1966-67* - Documents roneo., ORSTOM, Paris.

ALDEGHERI (M.) (1967)
*Fleuves et rivières de Madagascar* - ORSTOM, Paris (en français, roneo.) et *in Biogeography and Ecology in Madagascar* (texte anglais) - DR.W.JUNK B.V. Publishers, The Hague (1972).

ALDEGHERI (M.) (1959)
*Les cyclones de mars 1959 à Madagascar.* ORSTOM, An. Hydr. F.O.M. année 1959, pp 33-56

ALDEGHERI (M.) ET POURRUT (P.) (1967)
*Bassin versant représentatif du Banian* - Roneo., ORSTOM, Paris.

ALDEGHERI (M.) (1969)
*Monographie hydrologique du Mangoky* - Quatre tomes roneo., ORSTOM, Paris.

ALDEGHERI (M.) ET OBERLIN (J.) (1965)
*Etude hydrologique du bassin versant expérimental de l'Ankaboka* - Roneo., ORSTOM, Paris.

ALDEGHERI (M.) ET POURRUT (P.) (1968)
*Etudes hydrologiques sur le bassin versant représentatif de la Tafaina* - Roneo., ORSTOM, Paris.

ALDEGHERI (M.) (1970)
*Etudes hydrologiques sur le bassin versant de Tranoroa* - Roneo., ORSTOM, Paris.

ALDEGHERI (M.) (1983)
*Contribution à l'étude des régimes hydrologiques malgaches.* ORSTOM, Rapport inédit 2 vol.

BAILLY (C.), BENOIT DE COIGNAC (G.), DE VERGNETTE (J.) (1968)
*Etude de l'économie de l'eau à Antanimora. Bassins versants expérimentaux de Tsimandaha et Iaonamolora. Campagne 1964-65, 1965-66, 1966-67 CTFT-MAER,* rapport multigr. 32 p.. + ann.

BAILLY (C.), BENOIT DE COIGNAC (G.), DE VERGNETTE (J.), HUEBER (R.) (1968)
*Bassins Versants élémentaires de Marolaona-Perinet. Observations réalisées 2e année (Campagne 1964-65), 3e année (Campagne 1965-66), 4e année (Campagne 1966-67) CTFT,* Rapport multigr.

BAILLY (C.), BENOIT DE COIGNAC (G.), MALVOS (C.P.), NINGRE (J.M.), SARRAILH (J.M.) (1974)
Etude de l'influence du couvert naturel et de ses modifications à Madagascar. Expérimentations et bassins versants élémentaires. *Rev. Bois et Forêts des Tropiques* (Suppl.). Cah. scient. n° 4, 114 p., fig., tabl., ann.

BAUDUIN (D.) ET SERVAT (E.) (1987)
*Etude hydrologique à usage agricole* - Rapport de synthèse - Trois tomes multigr. - ORSTOM, Paris.

BAUDUIN (D.) (1982)
*La Tsiribihina à Betomba* - Etude hydrologique - Roneo., ORSTOM, Tananarive.

BILLON (B.) ET MLATAC (N.) (1969)
*Etudes hydrologiques sur le bassin de la Morondava* - Roneo., ORSTOM, Tananarive.

BILLON (B.) (1969)
Etude des crues exceptionnelles du Bas-Mangoky - *Bulletin de Madagascar n° 282.*

BILLON (B.) (1970)
*Etudes hydrologiques sur le bas Mangoky (réévaluation des crues de fréquence rare)* - multigr., ORSTOM, Tananarive.

BLANCHET (CH.) (1971)
*Ponts de la côte est de Madagascar. Etude hydraulique Tsararafa sur la Manampratrana - Fanandrana sur l'Ivondro* SOGREAH - DGEA, Rapport multigr.

BRESSON (Y.) (1957)
*Note hydrologique sur les cours d'eau de la région semi-aride de Madagascar* - ORSTOM, Paris.

BRESSON (Y.) (1958-59)
*Etudes hydrologiques du bassin versant d'Androvakely* - Roneo., ORSTOM, Paris.

CAMUS (O.) (1950)
*Monographie hydrologique du bassin supérieur de l'Ikopa* - EDF, Paris.

DANLOUX (J.) (1970)
*Etudes hydrologiques dans la région de Befandriana-Mandritsar. Résultats de la campagne 1968-1969.* ORSTOM-MAER, Rapport multigr. 75 p., 50 fig. + 2 ann.

DANLOUX (J.) (1974)
*La Namorona à Vohiparara (Andriamamovoka) Contribution à l'étude des crues.* ORSTOM, Note dactyl. 5 p., 3 fig.

DANLOUX (J.) (1975)
*Franchissement de la Sofia par la RN 6. Estimation de quelques caractéristiques hydrologiques.* ORSTOM - DRST, Note multigr. 11 p., 5 fig.

DANLOUX (J.) (1978)
*Franchissement de la rivière Bemarivo au niveau d'Ampombitika - Matsabory Lemby, Evaluation de quelques caractéristiques hydrologiques.* ORSTOM - SECMO, Note multigr. 9 p., 6 fig.

DANLOUX (J) (1979)
*La rivière Onive aux chutes de Tsinjoarivo. Quelques caractéristiques hydrologiques.* ORSTOM, Note multigr., 4 p., fig 4.

DANLOUX (J.) (1979)
*Etudes hydrologique en vue du calcul des ponts de la RN 11 à Bricka Ville - Vatomandry - Mahanoro. Compte rendu des mesures et premiers résultats.* ORSTOM - EEGC, Rapport multigr. 17 p., 16 fig.

DANLOUX (J.) (1974)
*Contribution à l'étude hydrologique du haut et moyen Mandrare.* Multigr., ORSTOM, Tananarive.

DANLOUX (J.) (1980)
*Vallées de la Sasomangana et de la Ranofotsy. Etudes hydrologiques complémentaires : Intensités d'averses, fonctionnement hydraulique, PC 15, crues exceptionnelles Harave, Sahamaro, Andavahirika.* ORSTOM-SOGREAH, Note multigr. 24 p., 10 fig.

DANLOUX (J.) (1980)
*Etudes hydrologique en vue du calcul des ponts de la RN 11 à Bricka Ville - Vatomandry - Mahanoro. Détermination des crues du projet.* ORSTOM - EEGC, Note multigr. 18 p., 6 fig.

DANLOUX (J.) (1980)
*Etudes hydrologiques dans la région de Sandrandahy. Campagne 1980.* ORSTOM-SECMO, Rapport dactyl. 38 p., 12 fig. + 2 ann.

DANLOUX (J.) (1976)
*Etudes hydrologiques dans l'Ankaizina* - Roneo., ORSTOM, Tananarive.

DANLOUX (J.) (1981)
*Evolution de certaines contraintes hydrologiques pour la réalisation d'aménagements de microhydraulique sur les hauts plateaux de l'Imerina et du Betsileo* - Multigr., ORSTOM, Tananarive.

DANLOUX (J.) (1980)
*Etudes hydrologiques dans la région de Maintirano* - Multigr., ORSTOM, Tananarive.

DANLOUX (J.) (1983)
Crues d'origine cyclonique dans l'Océan Indien (Madagascar) et le Pacifique Sud (Nouvelle-Calédonie et Tahiti) *in Hydrology of Humid Tropical Regions with particular reference to the Hydrological Effets of Agriculture and Foresty Practice* - Proceedings of the Hamburg Symposium, August 1983 - IAHS Publ. *n° 140.*

DANLOUX (J.) (1991)
*Madagascar, Etudes des crues, les données d'observations et évaluation des débits maximums.* ORSTOM Nouméa, 154 pages, 13 graph. et tableaux.

DOSSEUR (H.) ET IBIZA (D.) (1982)
*Etudes hydrologiques sur l'Alaotra - Modélisation du bassin* - Multigr., ORSTOM, Paris.

DOSSEUR (H.) (1983)
*Etude de simulation de l'aménagement de la vallée de Sasamangana en liaison avec la cuvette de Didy* - ORSTOM, Paris.

DUBREUIL (P.), CHAPERON (P.), GUISCAFRÉ (J.) ET HERBAUD (J.) (1972)
*Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux - Années 1951-1969* - ORSTOM, Paris.

DURET (L.) (1976)
*Estimation des débits de crue à Madagascar - Bassins de 10 à 50 000 km²* - FAC, Paris.

FERRY (L.) (1984-87)
*Etudes hydrologiques dans la région du lac Alaotra* - 8 fascicules, IFRSOC-ORSTOM, Tananarive.

FERRY (L.) (1987)
*Bibliographie pouvant intéresser les recherches hydrologiques et climatologiques et les aménagements hydrauliques à Madagascar* - Première édition multigr., ORSTOM, Tananarive.

GOUYET (R.) (1973)
*Etudes hydrologiques dans la région de Farafangana Campagne 1971-1972.* ORSTOM -MAERR, Rapport multigr., 54 p., 24 fig. + ann.

GUISCAFRE (J.), KLEIN (J.C), MONIOD (F) (1976)
*Les ressources en eau de surface de la Martinique.* ORSTOM, Monographie Hydrol., n° 4 pp. 132-135

GOUEFFON (M.) (1987)
*Estimation des débits de crue à Madagascar. Rappel et comparaison des méthodes et référence existantes.* MPARA, Rapport multigr., 24 p. + annexes.

LAMAGAT (J.P.) (1982)
*Etude des sites de microcentrales hydroélectriques prospectés à Madagascar et à l'Ile Maurice* - ORSTOM, Paris.

LAMAGAT (J.P.) (1990)
*Etude hydrologique de l'Onilahy* - Multigr., ORSTOM, Montpellier.

MORVANT (G.), REY (A.) (1963)
*Antelomita I. Etalonnage du barrage SOGREAH - TP,* Rapport R 8492, 7 p. + Graph. + Photos.

NINGRE (J.M.) (1973)
*Etudes hydrologique comparative de 7 bassins versants de superficie et de couvert différents dans la zone forestière orientale de Madagascar (Perinet - Analamazaotra campagnes 1962-63 à 1971 -72).* CTFT- MADR, Rapport multigr.

PELLERAY (H.) (1954)
*Quelques données de base en vue de l'étude des régimes hydrologiques de Madagascar* - Mémoires de l'Institut Scientifique de Madagascar - Série D - Tome VI.

PELLERAY (H.) (1955)
Le cyclone tropical du 14 au 22 janvier 1954 à Madagascar. ORSTOM, *Ann. Hydrol FOM,* Année 1953, pp. 67-75

POURRUT (P.) (1976)
*Etude des bilans hydriques et de l'érosion sur le bassin versant représentatif de la Tafaina (Madagascar). Présentation des résultats et début d'interprétation. Campagnes 1966-67 à 1970-71* - ORSTOM, Rapport multigr. 137 p.

*A. Etude d'une méthode de calcul de débouché à donner aux petits ouvrages d'art à Madagascar (méthode simple de calcul, rapport de synthèse et annexes)* BCEOM- ME, Rapport Multigr., 54 + 40 p.

*A. Projet de developpement agricole de la plaine de Morondava (1972) Climatologie-hydrologie. Synthèse hydrologique.* A.H.T/SATEC - PNUD FAO- Rapport technique 33, Rapport multigr., 83 p. + ann.

CREAGER (W.R), JUSTIN (J.D.), HINDS (J.) (1945)
*Engeneering for Dams.* John Wiley and Sons, Inc., New-York.

FRANCOU (J.), RODIER (J.A.) (1967)
Essai de classification des crues maximales observées dans le Monde. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.*, Vol. 4, n° 3, pp. 19-46.

ROCHE (M.) (1963)
*Hydrologie de Surface* - ORSTOM, Gauthier-Villars édit., Paris.

ROCHE (M.), RODIER (J.A.) (1984)
Répertoire mondial des crues maximales observées. (Madagascar - Identification des points d'observation et caractéristiques des bassins. Caractéristiques des crues). *AIHS publ n° 143*, pp. 297-298, p. 354.

VISCHER (D.) (1980)
Le débit de crue maximal possible et la valeur limite empirique. *Rev. l'Ingénieur et l'Architecte suisses*, n° 40, pp. 2-9.

WANDLE (S.W.J.R) (1983)
Estimating peak discharges of small, rural streams in Massachussetts. *U.S Geologigal Survey Water-Supply Paper* 2214, 26 p.

*Annales hydrologiques de la France d'Outre-Mer - Années 1949 à 1959* - ORSTOM, Paris.

*Annales hydrologiques de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer - Années 1959 à 1973* - ORSTOM, Paris.

*Annuaire hydrologique de Madagascar - Années 1966-67 à 1968-69* - ORSTOM, Tananarive.

*Fichiers de la Météorologie Nationale Serv. Météo. Antanarivo.*

*Fichier de la Division d'Hydrométéorologie Serv. Météo. Antanarivo.*

*Fichiers du Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM.* ORSTOM Montpellier.

# Annexes

# Annexe 1

## PRÉCIPITATIONS ET LAMES ÉCOULÉES ANNUELLES SUR LES BASSINS VERSANTS (P ET H EN MM)

| Rivière<br>Station | Sambirano<br>Ambanja | | Ramena<br>Ambodimanga | | Maeverano<br>Ambodivohitra | | Maningory<br>Andromba | | Ivondro<br>Ringa-Ringa | | Ivondro<br>Ambodifana | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | P | H | P | H | P | H | P | H | P | H | P | H |
| 1945-1946 | | | | | | | | (313) | | | | |
| 1946-1947 | | | | | | | | (460) | | | | |
| 1947-1948 | | | | | | | | (330) | | | | |
| 1948-1949 | | | | | | | | (329) | | | | |
| 1949-1950 | | | | | | | | (172) | 1990 | (1340) | | (550) |
| 1950-1951 | | | | | | | | (282) | 2263 | (1500) | | (600) |
| 1951-1952 | 2773 | (1520) | 3212 | (2043) | | | | (419) | 2787 | (1210) | | (475) |
| 1952-1953 | 1829 | 1109 | 2291 | (1298) | | | | (330) | 2150 | (1000) | | (435) |
| 1953-1954 | 3012 | 2342 | 3781 | 2800 | | | | (196) | 1886 | 1057 | | (417) |
| 1954-1955 | 2632 | 1417 | 3167 | (1880) | | | | (388) | 2377 | 1018 | | (647) |
| 1955-1956 | 2242 | 1537 | 2615 | 1710 | | (722) | | (332) | 3036 | 1992 | | 510 |
| 1956-1957 | 3023 | 2465 | 3599 | 2838 | | (671) | | (447) | 2408 | 1287 | | 557 |
| 1957-1958 | 2086 | 1214 | 2384 | 1865 | | (708) | | (366) | 2593 | 1205 | | 451 |
| 1958-1959 | 2234 | 1616 | 2729 | 1830 | | (598) | | (934) | 3516 | 2237 | | 942 |
| 1959-1960 | 2751 | 1368 | 3295 | 1360 | | (563) | | (333) | 2264 | 1177 | | 450 |
| 1960-1961 | 2513 | 1347 | 3073 | 1727 | | (525) | | (194) | 1785 | 721 | | 408 |
| 1961-1962 | 3477 | 2459 | 4242 | 3865 | | (964) | | (269) | 2310 | 1032 | | 354 |
| 1962-1963 | 2228 | 1257 | 2802 | 1676 | | (476) | | (276) | 2095 | 976 | | 394 |
| 1963-1964 | 2114 | 1178 | 2476 | 1744 | | 514 | | (268) | 2877 | 1319 | | (515) |
| 1964-1965 | 2683 | 1228 | 3291 | 1633 | | 503 | | (345) | 2404 | 1402 | | (508) |
| 1965-1966 | 2069 | 1216 | 2534 | 1602 | | 504 | | (257) | 1937 | 1192 | | (450) |
| 1966-1967 | 2266 | 981 | 2813 | 1386 | | 515 | | (347) | 2649 | 1137 | | (476) |
| 1967-1968 | 2497 | 1426 | 2882 | 1755 | | 795 | | (386) | 2812 | 1326 | | (502) |
| 1968-1969 | 2765 | 1270 | 3236 | 1574 | | 530 | | (259) | 2970 | 1150 | | (470) |
| 1969-1970 | 2227 | 1363 | 2620 | 1503 | | 668 | | (422) | 3403 | 1404 | | (593) |
| 1970-1971 | | 1689 | | 2800 | | 566 | | (282) | | 1315 | | (485) |
| 1971-1972 | | (1701) | | (2146) | | 546 | | (484) | | 1659 | | 778 |
| 1972-1973 | | (1656) | | 2390 | | 730 | | (626) | | 2260 | | 870 |
| 1973-1974 | | 1415 | | 1253 | | 346 | | (267) | | 1459 | | 575 |
| 1974-1975 | | 1524 | | 1395 | | 471 | | (361) | | 1635 | | 529 |
| 1975-1976 | | 1981 | | 2422 | | 777 | | (287) | | 1593 | | 529 |
| 1976-1977 | | | | | | 522 | | 365 | | 1682 | | 668 |
| 1977-1978 | | | | | | 204 | | 110 | | 1092 | | 365 |
| 1978-1979 | | | | | | 356 | | 160 | | 815 | | (330) |
| 1979-1980 | | | | | | 722 | | | | 1137 | | (525) |
| 1980-1981 | | 774 | | (869) | | 224 | | 49 | | 751 | | (345) |
| 1981-1982 | | 1264 | | (1704) | | 564 | | 524 | | 1604 | | (650) |
| 1982-1983 | | 1733 | | (2160) | | 628 | | 233 | | 1162 | | (460) |
| 1983-1984 | | | | | | | | 710 | | | | |
| 1984-1985 | | | | | | | | 355 | | | | |
| 1985-1986 | | | | | | | | 379 | | | | |
| 1986-1987 | | | | | | | | 354 | | | | |

| Rivière<br>Station | Vohitra<br>Rogez | | Rianila<br>Brickaville | | Vohitra<br>Andekaleka | | Rianila<br>Fetraomby | | Mangoro<br>Mangoro gare | | Amborompotsy<br>Antsampandrano | | Onive<br>Tsinjoarivo | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1945-1946 | | | | | | | | | | | 1716 | (615) | 1712 | (812) |
| 1946-1947 | | | | | | | | | | | 2416 | (1035) | 2485 | (1400) |
| 1947-1948 | | | | | | | | | | | 2048 | (915) | 2739 | (1630) |
| 1948-1949 | | | | | | | | | | | 1222 | (380 | 1130 | (460) |
| 1949-1950 | 1919 | (1180) | 2533 | (1520) | 2402 | (1827) | | | 1132 | (395) | 1550 | (540) | 1290 | (465) |
| 1950-1951 | 2320 | (1580) | 3162 | (2430) | 2983 | (2373) | | | 1438 | (685) | 1943 | (860) | 1613 | (585) |
| 1951-1952 | 2403 | (970) | 3444 | 2360 | 3028 | (1230) | | | 1330 | (595) | 2119 | (915) | 1897 | (725) |
| 1952-1953 | 2276 | 906 | 2776 | 1549 | 2675 | (1206) | | | 1701 | (655) | 1961 | (805) | 1629 | (605) |
| 1953-1954 | 1783 | 1137 | 2404 | 1699 | 2206 | (1648 | | | 1072 | (840) | 1892 | (930) | 1285 | (545) |
| 1954-1955 | 1916 | 932 | 2595 | 1614 | 2332 | (1201) | | | 1345 | (640) | 1885 | (810) | 1560 | (570) |
| 1955-1956 | 2438 | 1723 | 3448 | 2832 | 3208 | (2858) | | | (1494) | (1160) | 2051 | (890) | 1517 | (690) |
| 1956-1957 | 2009 | 893 | 2614 | 1702 | 2462 | (1323) | | | 1596 | 895 | 2222 | (1080) | 1649 | (820) |
| 1957-1958 | 2211 | 946 | 2804 | 1826 | 2609 | (1387) | | | 1603 | (615) | 2012 | 734 | 1599 | (585) |
| 1958-1959 | 2958 | 2238 | 3604 | (3377) | 3438 | (3487) | | | 1943 | (1300) | 2206 | 1080 | 1638 | (970) |
| 1959-1960 | 1759 | 950 | 2355 | 1148 | 2197 | (1366) | | | 1261 | (630) | 1864 | 835 | 1279 | (605) |
| 1960-1961 | 1662 | 668 | 2000 | 809 | 1978 | (917) | | | 1390 | 483 | 2260 | 1037 | 1495 | (535) |
| 1961-1962 | 2086 | 986 | 2944 | 1488 | 2728 | (1607) | | | 1229 | 560 | 2143 | 927 | 1192 | (535) |
| 1962-1963 | 2318 | 1019 | 2869 | 1427 | 2785 | (1374) | | | 1464 | 644 | 2325 | 1206 | 1533 | (590) |
| 1963-1964 | 2497 | 1262 | 3188 | 1928 | 3049 | (1767) | | | 1505 | 779 | 2045 | 812 | 1473 | 584 |
| 1964-1965 | 2515 | 1326 | 3313 | 2031 | 3111 | 1657 | | 2658 | 1680 | 960 | 2485 | 1102 | 1785 | 927 |
| 1965-1966 | 2045 | 1011 | 2775 | 1693 | 2632 | 1362 | | 1862 | 1423 | 636 | 1632 | 536 | 1328 | 540 |
| 1966-1967 | 2184 | 1068 | 2891 | 1641 | 2676 | 1377 | | 1589 | 1543 | 697 | 1910 | 747 | 1277 | 543 |
| 1967-1968 | 2395 | 1238 | 3002 | 1768 | 2762 | 1615 | | 2071 | 1935 | 818 | 1651 | 749 | 1433 | 604 |
| 1968-1969 | 2139 | 971 | 2942 | (1504) | 2583 | 1317 | | 1566 | 1422 | 661 | 2297 | 898 | 1645 | 702 |
| 1969-1970 | 2355 | 1259 | 3226 | (2050) | 2837 | 1713 | | 2454 | 1620 | 817 | 2120 | 954 | 1452 | 700 |
| 1970-1971 | | 1194 | | (1763) | | 1854 | | 1947 | | 746 | | 1035 | | 724 |
| 1971-1972 | | 1395 | | (2140) | | 1993 | | 2567 | | 1132 | | 900 | | 789 |
| 1972-1973 | | 1809 | | (2825) | | (3467) | | (4323) | | 1209 | | 1490 | | 998 |
| 1973-1974 | | 1162 | | (1795) | | (1779) | | | | 692 | | (776) | | 765 |
| 1974-1975 | | 1195 | | (1965) | | (1775) | | | | 1080 | | 1208 | | 897 |
| 1975-1976 | | (1239) | | (2280) | | (1980) | | | | 803 | | (900) | | 744 |
| 1976-1977 | | (1405) | | (2415) | | (2150) | | | | 1080 | | (1205) | | 944 |
| 1977-1978 | | 704 | | (1245) | | (909) | | | | (451) | | (420) | | 330 |
| 1978-1979 | | 560 | | (880) | | (737) | | | | (421) | | 981 | | 603 |
| 1979-1980 | | (1000) | | (1655) | | | | | | | | | | |
| 1980-1981 | | (595) | | (1110) | | | | | | | | | | |
| 1981-1982 | | (1325) | | (2255) | | | | | | | | | | |
| 1982-1983 | | (1070) | | (1745) | | | | | | | | | | |

| Rivière<br>Station | Mananjary<br>Antsindra | | Ivoanana<br>Fatihita | | Namorona<br>Vohiparara * | | Faraony<br>Vohilava | | Mananara sud<br>Marangaty | | Efaho<br>Fanjihira | | Mandrare<br>Andobolava | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | P | H | P | H | P | H | P | H | P | H | P | H | P | H |
| 1945-1946 | 2962 | (1330) | 3055 | (1940) | 2133 | (785) | | | | | | | | |
| 1946-1947 | 2734 | (1575) | 3134 | (2140) | 2085 | (740) | | | | | | | | |
| 1947-1948 | 3493 | (2060 | -3677 | (2280) | 2509 | (950) | | | | | | | | |
| 1948-1949 | 2542 | (1660) | 3105 | (1780 | 2153 | (650) | 2754 | (1420) | | | | | | |
| 1949-1950 | 2765 | (1650) | 3089 | (1870) | 2026 | (940) | 2656 | (2005) | 1000 | (395) | | | | |
| 1950-1951 | 3058 | (1745) | 3820 | (2460) | 2703) | (1395) | 3072 | (1780) | 919 | (305) | | | | |
| 1951-1952 | 3446 | (1835 | (3847) | (1735) | (1638) | 866 | 3283 | (1660) | 1465 | (645) | 2967 | (2090) | 929 | (300) |
| 1952-1953 | 3393 | (2035) | 3810 | (1710) | (1601) | 922 | 3476 | (1825) | 1313 | (760) | 2972 | (2055) | 754 | (250) |
| 1953-1954 | 2895 | (1915) | 3304 | (2260) | (1504) | 1306 | 3061 | (2605) | 1444 | (905) | 3552 | (2785) | 945 | 413 |
| 1954-1955 | 3179 | (1430 | 3245 | (1665) | (1475) | 793 | 2592 | (1550) | 1140 | (660) | 3150 | (2185) | 857 | 297 |
| 1955-1956 | 2941 | 1586 | 2865 | (1850) | (1317) | 991 | 2815 | (2135) | 1210 | (582) | 3153 | (2390) | 613 | 164 |
| 1956-1957 | 2894 | 1496 | 2874 | 1427 | (1210) | 770 | 2579 | (1795) | 969 | 336 | 2461 | (1090) | 683 | 201 |
| 1957-1958 | 3247 | 1727 | 3368 | 1657 | (1290) | 939 | 2689 | (1950) | 1003 | 320 | 3315 | (2280) | 687 | 155 |
| 1958-1959 | 3120 | (1985) | 3431 | 2451 | (1418) | 1625 | 3780 | (3065) | 1042 | 526 | 3190 | (2055) | 519 | 226 |
| 1959-1960 | 2199 | (1260) | 2270 | 1079 | (928) | 522 | 2154 | (1145) | 978 | 334 | 2217 | (1185) | 611 | 225 |
| 1960-1961 | 2939 | 1282 | 2927 | 1336 | 1722 | 553 | 2264 | 1076 | 1227 | 507 | 4316 | (3710) | 1173 | 596 |
| 1961-1962 | 2667 | 1591 | 3084 | 1932 | 2311 | 815 | 2918 | 1884 | 1048 | 418 | 3188 | (2370) | 641 | 286 |
| 1962-1963 | 2845 | 1665 | 3136 | 2106 | 2445 | 982 | 3000 | 1523 | 1016 | 460 | 2861 | 1405 | 995 | 591 |
| 1963-1964 | 2573 | 1484 | 2313 | 1643 | 2275 | 659 | 3478 | 1447 | 948 | 419 | 2973 | 2149 | 725 | 345 |
| 1964-1965 | 3113 | 2003 | 3678 | 3821 | 2864 | 1140 | 4885 | 2759 | 1249 | 602 | 3020 | 2653 | 937 | 368 |
| 1965-1966 | 2487 | 1409 | 2953 | 1544 | 2081 | 666 | 3031 | 1294 | 986 | 415 | 1990 | 1088 | 867 | 160 |
| 1966-1967 | 2400 | 1624 | 3212 | 1830 | 2765 | 917 | 3558 | 1730 | 1261 | 674 | 3847 | 3251 | 1120 | 318 |
| 1967-1968 | 1804 | 1362 | 2155 | 1500 | 1789 | 632 | 2418 | 1242 | 807 | 319 | 2104 | 668 | 751 | 84 |
| 1968-1969 | 2485 | 1667 | 3228 | 2506 | 2824 | 990 | 3104 | 2010 | 1495 | 690 | 3251 | 1506 | 832 | 186 |
| 1969-1970 | 3448 | 2186 | 4269 | 2709 | 2921 | 2133 | 3833 | 3745 | 1441 | 997 | 4368 | 3566 | 966 | 558 |
| 1970-1971 | | 1219 | | 1583 | | 816 | | 1801 | | 552 | | 2021 | | (381) |
| 1971-1972 | | 1748 | | 1756 | | 921 | | 2031 | | 550 | | 1638 | | 122 |
| 1972-1973 | | 1954 | | 1824 | | 907 | | 2073 | | 536 | | 2137 | | 103 |
| 1973-1974 | | 1760 | | 2009 | | 846 | | 1929 | | 592 | | 1284 | | (220) |
| 1974-1975 | | 1703 | | 1949 | | 882 | | 1815 | | 563 | | | | 352 |
| 1975-1976 | | (1350) | | (1660) | | 731 | | (1665) | | | | | | 196 |
| 1976-1977 | | (2105) | | 948 | | (2055) | | | | | | | | |
| 1977-1978 | | (1020) | | 332 | | (915) | | | | | | | | |
| 1978-1979 | | (1045) | | 440 | | (1095) | | | | | | | | |

* nota : NAMORONA à VOHIPARA : Pluviométrie très douteuse de 1951 à 1959-1960.

| Rivière<br>Station | Mandrare<br>Amboasary | | Mananara<br>Bevia | | Manambovo<br>Tsihombe | | Menanarandra<br>Tranoroa | | Onilahy<br>Tongobory | | Ihosy<br>Ihosy | | Zomandao<br>Ankaramena | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1945-1946 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1946-1947 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1947-1948 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1948-1949 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1949-1950 | | | | | | | | | | | 784 | (300) | 1229 | (510) |
| 1950-1951 | | | | | | | | | | | 744 | (180) | 1029 | (340) |
| 1951-1952 | 786 | (197) | 607 | 221 | 553 | (46) | 742 | (102) | | 132 | 973 | (355) | 1453 | (645) |
| 1952-1953 | 747 | 131 | 557 | 172 | 683 | (67) | 792 | (158) | | 107 | 1032 | (420) | 1473 | 693 |
| 1953-1954 | 915 | 444 | 710 | 221 | 544 | (38) | 997 | (298) | | 127 | 1211 | 721 | 1526 | 692 |
| 1954-1955 | 820 | 260 | 683 | 204 | 567 | (87) | 797 | (197) | | 119 | 967 | 349 | 1060 | 439 |
| 1955-1956 | 583 | 83 | 473 | 113 | 480 | (23) | 510 | 118 | | 89 | 825 | 207 | 1416 | (679) |
| 1956-1957 | 700 | 126 | 505 | 126 | 601 | 50 | 736 | 202 | | 129 | 657 | 234 | 889 | 393 |
| 1957-1958 | 562 | 68 | 567 | 100 | 298 | 19 | 433 | 82 | | (132) | 745 | 183 | 1292 | (515) |
| 1958-1959 | 522 | 115 | 550 | 168 | 329 | (48) | 480 | 215 | | 118 | 813 | 337 | 1744 | (920) |
| 1959-1960 | 629 | 72 | 471 | 106 | 455 | 61 | 617 | (192) | | (152) | 903 | 244 | 997 | 265 |
| 1960-1961 | 1121 | 418 | 852 | (340) | 972 | 125 | 1200 | (516) | | (186) | 958 | 355 | 1381 | 521 |
| 1961-1962 | 607 | 104 | 591 | 90 | 468 | 14 | 648 | (111) | | (157) | 804 | 270 | 1186 | 387 |
| 1962-1963 | 862 | 306 | 599 | 297 | 666 | 75 | 932 | (254) | | 179 | 865 | 291 | 1220 | 553 |
| 1963-1964 | 683 | 114 | 548 | 148 | 521 | 25 | 712 | 146 | | 148 | 957 | 279 | 1313 | 670 |
| 1964-1965 | 864 | 172 | 580 | 210 | 560 | 30 | 707 | 139 | | 146 | 1073 | 325 | 1258 | 665 |
| 1965-1966 | 920 | 109 | 525 | 119 | 591 | 39 | 895 | 130 | | 128 | 863 | 222 | 950 | 437 |
| 1966-1967 | 1253 | 271 | 830 | 194 | 804 | 96 | 1049 | 210 | | 206 | 1278 | 476 | 1309 | 650 |
| 1967-1968 | 660 | 56 | 425 | 74 | 578 | 42 | 682 | 65 | | 117 | 763 | 162 | 1045 | 411 |
| 1968-1969 | 829 | 117 | 572 | 122 | 656 | 69 | 807 | 210 | | 187 | 1045 | 484 | 1555 | (690) |
| 1969-1970 | 934 | 353 | 766 | 369 | 436 | 54 | 710 | 243 | | 219 | 1127 | 650 | 1897 | (980) |
| 1970-1971 | | 309 | | 163 | | 62 | | 273 | | 211 | | 386 | | 531 |
| 1971-1972 | | 99 | | 90 | | 37 | | 144 | | 146 | | 371 | | |
| 1972-1973 | | 66 | | | | 27 | | 45 | | 88 | | 234 | | |
| 1973-1974 | | 96 | | | | 82 | | 201 | | 159 | | 363 | | 833 |
| 1974-1975 | | 265 | | | | 62 | | 238 | | | | 374 | | 971 |
| 1975-1976 | | 71 | | | | (41) | | 71 | | | | | | 378 |
| 1976-1977 | | | | | | | | (254) | | | | | | |
| 1977-1978 | | | | | | | | 123 | | | | | | |
| 1978-1979 | | | | | | | | 195 | | | | | | |
| 1979-1980 | | | | | | | | - | | | | | | |
| 1980-1981 | | | | | | | | - | | | | | | |
| 1981-1982 | | | | | | | | (231) | | | | | | |
| 1982-1983 | | | | | | | | 88 | | | | | | |

| Rivière<br>Station | Mananantanana<br>Tsitondroina | | Matsiatra<br>Malakialina | | Mangoky<br>Banian | | Morondava<br>Dabara | | Sahanivotry<br>PK 197 | | Manandona<br>Sahanivotry | | Mania<br>Fasimena | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | P | H | P | H | P | H | P | H | P | H | P | H | P | H |
| 1945-1946 | | | | | | | | | 1528 | (560) | 1382 | (405) | 1614 | (500) |
| 1946-1947 | | | | | | | | | 2227 | (950) | 2038 | (760) | 2167 | (930) |
| 1947-1948 | | | | | | | | | 2179 | (1055) | 1919 | (860) | 2223 | (1100) |
| 1948-1949 | | | | | | | | | 1024 | (445) | 952 | (310) | 1197 | (370) |
| 1949-1950 | 981 | (385) | 1006 | (460) | 833 | (225) | | | 1610 | (500) | 1410 | (370) | 1349 | (445) |
| 1950-1951 | 912 | (340) | 1120 | (520) | 788 | (160) | | | 1849 | (635) | 1657 | (520) | 1684 | (695) |
| 1951-1952 | 1201 | (470) | 1412 | (620) | 1155 | 358 | | 285 | 1885 | (900) | 1759 | (650) | 1957 | (875) |
| 1952-1953 | 1317 | 574 | 1406 | 709 | 1215 | 434 | | 265 | 1725 | (740) | 1657 | (710) | 1733 | (775) |
| 1953-1954 | 1224 | (580) | 1300 | 758 | 1104 | 405 | | | 1412 | (655) | 1383 | (590) | 1537 | (700) |
| 1954-1955 | 977 | 447 | 1263 | 572 | 923 | 274 | | | 1524 | (635) | 1414 | (585) | 1660 | (585) |
| 1955-1956 | 1040 | (459) | 1231 | 680 | 978 | 295 | | 185 | 1735 | (665) | 1542 | (565) | 1724 | (579) |
| 1956-1957 | 1114 | (5) | 1199 | 592 | 926 | 228 | | 310 | 1781 | (600) | 1643 | (545) | 1701 | 588 |
| 1957-1958 | 1052 | 397 | 1281 | 463 | 898 | 221 | | | 1624 | (595) | 1633 | (460) | 1688 | 618 |
| 1958-1959 | 1228 | 523 | 1355 | 737 | 961 | 316 | | 265 | 1554 | (710) | 1288 | (655) | 1610 | (798) |
| 1959-1960 | 1051 | 307 | 1142 | 601 | 918 | 215 | | 295 | 1492 | (575) | 1257 | (466) | 1319 | (520) |
| 1960-1961 | 1022 | 425 | 1360 | (675) | 942 | 275 | | 335 | 1539 | (535) | 1767 | (580) | 1772 | 572 |
| 1961-1962 | 978 | 321 | 117 | 357 | 917 | 256 | | | 1376 | (520) | 1329 | (390) | 1446 | 456 |
| 1962-1963 | 1123 | 454 | 1338 | 613 | 986 | 315 | | | 1590 | (780) | 1703 | (535) | 1806 | 708 |
| 1963-1964 | 1001 | (294) | 1085 | (450) | 945 | 265 | | 400 | 2101 | 648 | 1316 | 502 | 1514 | 537 |
| 1964-1965 | 1255 | 422 | 1458 | (835) | 1145 | 299 | | 360 | 2622 | 842 | 1796 | 723 | 2007 | 759 |
| 1965-1966 | 998 | 315 | 1187 | (365) | 902 | 252 | | 245 | 1629 | 567 | 1280 | 383 | 1494 | 563 |
| 1966-1967 | 1119 | 473 | 1559 | (840) | 1213 | 331 | | 365 | 1301 | 581 | 1502 | 469 | 1709 | 588 |
| 1967-1968 | 836 | (272) | 1050 | (360) | 778 | (212) | | 375 | 1510 | 547 | 1090 | 434 | 1305 | 498 |
| 1968-1969 | 1255 | 553 | 1587 | (905) | 1187 | (455) | | 395 | 1591 | 877 | 1608 | 700 | 1792 | 813 |
| 1969-1970 | 1504 | (725) | 1724 | (1030) | 1157 | 496 | | 395 | 1775 | 905 | 1767 | 731 | 2004 | 1051 |
| 1970-1971 | | | | | | 290 | | 400 | | 758 | | 647 | | 683 |
| 1971-1972 | | | | | | 346 | | 355 | | 641 | | 560 | | 655 |
| 1972-1973 | | | | | | - | | | | 1037 | | 925 | | 873 |
| 1973-1974 | | | | | | 460 | | 365 | | 872 | | 763 | | 853 |
| 1974-1975 | | | | | | 456 | | | | 882 | | 728 | | 906 |
| 1975-1976 | | | | | | 360 | | 260 | | 788 | | 726 | | 721 |
| 1976-1977 | | | | | | | | | | (1020) | | 791 | | 1175 |
| 1977-1978 | | | | | | | | | | (630) | | 335 | | 515 |
| 1978-1979 | | | | | | | | | | 401 | | 415 | | 673 |
| 1979-1980 | | | | | | | | | | (794) | | (635) | | 871 |
| 1980-1981 | | | | | | | | | | (815) | | (585) | | 746 |
| 1981-1982 | | | | | | 483 | | | | (1292) | | (1130) | | 1476 |
| 1982-1983 | | | | | | 252 | | 288 | | (660) | | (565) | | 640 |
| 1983-1984 | | | | | | | | 400 | | | | | | |

| Rivière Station | Tsiribihina Betomba | | Ikopa Ambohimanambola | | Ikopa Mahitsy | | Sisaony Andramasina | | Andromba Tsinjony | | Ikopa Bevomanga | | Ikopa Fiadanana | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | P | H | P | H | P | H | P | H | P | H | P | H | P | H |
| 1945-1946 | | | 1202 | (555) | 1195 | (530) | 1188 | (500) | 1530 | (825) | 1225 | (510) | 1291 | (505) |
| 1946-1947 | | | 1475 | (760) | 1454 | (620) | 1389 | (615) | 2086 | (1085) | 1486 | (635) | 1496 | (715) |
| 1947-1948 | | | 1595 | (780) | 1574 | (705) | 1466 | (670) | 2008 | (1305) | 1557 | (850) | 1512 | (670) |
| 1948-1949 | | | 1185 | (650) | 1147 | 553 | 911 | (450) | 989 | (740) | 1015 | (401) | 1093 | (415) |
| 1949-1950 | | | 1227 | (565) | 1226 | 432 | 1080 | (445) | 1523 | (880) | 1229 | 394 | 1262 | (435) |
| 1950-1951 | | | 1301 | (575) | 1290 | 518 | 1300 | (530) | 1850 | (1410) | 1359 | 536 | 1500 | (540) |
| 1951-1952 | | | 1389 | (605) | 1361 | 545 | 1166 | (485) | 1792 | (1080) | 1412 | 623 | 1529 | (665) |
| 1952-1953 | | | 1339 | (490) | 1339 | 470 | 1366 | (600) | 1567 | (865) | 1397 | 543 | 1455 | (575) |
| 1953-1954 | | | 1094 | (550) | 1089 | 436 | 1036 | (355) | 1223 | (720) | 1090 | 501 | 1121 | (500) |
| 1954-1955 | | | 1250 | (545) | 1253 | 478 | 1336 | (475) | 1654 | 840 | 1361 | 550 | 1478 | (635) |
| 1955-1956 | | | 1397 | (595) | 1373 | 536 | 1429 | (585) | 1528 | 897 | 1327 | 586 | 1282 | (480) |
| 1956-1957 | | (530) | 1403 | 775 | 1384 | 586 | 1552 | (895) | 1719 | 993 | 1491 | 688 | 1576 | (670) |
| 1957-1958 | | (610) | 1312 | (540) | 1320 | 508 | 1322 | (480) | 1648 | 990 | 1378 | 512 | 1384 | (490) |
| 1958-1959 | 1275 | 559 | 1699 | 960 | 1678 | 969 | 1654 | 910 | 1544 | 1386 | 1614 | 938 | 1738 | 912 |
| 1959-1960 | 1335 | (555) | 1119 | 440 | 1127 | 548 | 1197 | 460 | 1374 | 894 | 1207 | 560 | 1291 | 588 |
| 1960-1961 | 1295 | 516 | 1240 | 465 | 1238 | 503 | 1345 | 533 | 1473 | 694 | 1301 | 531 | 1386 | 529 |
| 1961-1962 | 1320 | 512 | 1174 | 489 | 1178 | 459 | 946 | (300) | 1453 | 666 | 1199 | 474 | 1383 | 581 |
| 1962-1963 | 1400 | 713 | 1561 | 616 | 1534 | 574 | 1321 | (692) | 1341 | 990 | 1426 | 579 | 1524 | 578 |
| 1963-1964 | 1230 | 520 | 1332 | 625 | 1304 | 555 | 1333 | 556 | 1446 | 690 | 1290 | 592 | 1420 | 572 |
| 1964-1965 | 1645 | 779 | 1409 | 800 | 1416 | 702 | 1309 | 745 | 1733 | 869 | 1451 | 792 | 1664 | 779 |
| 1965-1966 | 1050 | 366 | 1212 | 672 | 1205 | 521 | 1039 | 470 | 1295 | 634 | 1130 | 505 | 1139 | 387 |
| 1966-1967 | 1445 | 748 | 1387 | 722 | 1392 | 549 | 1192 | 505 | 1248 | 616 | 1300 | 578 | 1299 | 483 |
| 1967-1968 | 1105 | 537 | 1235 | 725 | 1232 | 635 | 1132 | 420 | 1191 | 625 | 1210 | 559 | 1160 | 419 |
| 1968-1969 | 1580 | 1019 | 1321 | 617 | 1306 | 540 | 1175 | 486 | 1412 | 715 | 1296 | 543 | 1432 | 476 |
| 1969-1970 | 1515 | 899 | 1246 | 667 | 1255 | 629 | 1049 | 560 | 1292 | 836 | 1232 | 657 | 1221 | 562 |
| 1970-1971 | 1465 | 662 | | 743 | | 675 | | 572 | | 733 | | 608 | | 594 |
| 1971-1972 | 1405 | 563 | | 848 | | 832 | | 653 | | 807 | | 780 | | 733 |
| 1972-1973 | 1480 | 811 | | 879 | | 844 | | 765 | | 1027 | | (745) | | 645 |
| 1973-1974 | 1545 | 803 | | 488 | | 450 | | 426 | | 961 | | (510) | | 492 |
| 1974-1975 | 1480 | 782 | | 795 | | (770 | | )(756 | | )948 | | (740) | | 719 |
| 1975-1976 | 1415 | 565 | | 750 | | (700) | | (520) | | 771 | | (605) | | (454) |
| 1976-1977 | 1805 | 1227 | | | | | | 931 | | 928 | | | | |
| 1977-1978 | 1395 | 433 | | | | | | 359 | | 353 | | | | |
| 1978-1979 | 1235 | 567 | | 260 | | | | 413 | | 620 | | | | |
| 1979-1980 | 1395 | 572 | | | | | | (560) | | (670) | | | | |
| 1980-1981 | | 796 | | | | | | | | | | | | |
| 1981-1982 | | 1166 | | | | | | | | | | | | |
| 1982-1983 | | (688) | | | | | | | | | | | | |

| Rivière<br>Station | Ikopa<br>Antsatrana | | Isinko<br>Ambodiroka | | Betsiboka<br>Ambodiroka | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1945-1946 | 1579 | (720) | 1615 | (1170) | 1362 | (625) |
| 1946-1947 | 1842 | (970) | 1801 | (1185) | 1619 | (775) |
| 1947-1948 | 1680 | (835) | 1521 | (860) | 1406 | (645) |
| 1948-1949 | 1299 | 668 | 1415 | (915) | 1229 | (590) |
| 1949-1950 | 1327 | 645 | 1540 | (1020) | 1316 | (710) |
| 1950-1951 | 1638 | 665 | 2075 | (1490) | 1669 | (730) |
| 1951-1952 | 1582 | 914 | 1658 | (1060) | 1438 | (815) |
| 1952-1953 | 1492 | (800) | 2094 | (1435) | 1597 | (800) |
| 1953-1954 | 1378 | 787 | 1901 | (1130) | 1359 | (735) |
| 1954-1955 | 1724 | 915 | 1529 | (880) | 1354 | (955) |
| 1955-1956 | 1424 | 553 | 1428 | (995) | 1244 | (465) |
| 1956-1957 | 1718 | 800 | 1476 | (925) | 1473 | (865) |
| 1957-1958 | 1578 | 692 | 2367 | 1100 | 1623 | 800 |
| 1958-1958 | 1736 | 944 | 2339 | 1492 | 1898 | 1293 |
| 1959-1960 | 1417 | 724 | 1707 | 1197 | 1505 | 737 |
| 1960-1961 | 1493 | 643 | 1488 | 1143 | 1446 | 625 |
| 1961-1962 | 1775 | 890 | 2408 | 1667 | 1842 | 1098 |
| 1962-1963 | 1659 | 823 | 1717 | 1316 | 1654 | 748 |
| 1963-1964 | 1466 | 729 | 1602 | 1077 | 1478 | 757 |
| 1964-1965 | 1997 | 949 | 2176 | 1404 | 1666 | 1075 |
| 1965-1966 | 1156 | 593 | 988 | 681 | 1066 | 516 |
| 1966-1967 | 1526 | 729 | 1862 | 1075 | 1470 | 759 |
| 1967-1968 | 1273 | 699 | 1608 | 718 | 1509 | 640 |
| 1968-1969 | 1383 | 702 | 1924 | 886 | 1455 | 577 |
| 1969-1970 | 1275 | 745 | 1683 | 1027 | 1628 | 737 |
| 1970-1971 | | 855 | | 1474 | | 739 |
| 1971-1972 | | 830 | | 1546 | | 1037 |
| 1972-1973 | | 797 | | 1159 | | 910 |
| 1973-1974 | | 734 | | (795) | | (641) |
| 1974-1975 | | 836 | | | | (910) |
| 1975-1976 | | (660) | | | | |
| 1976-1977 | | | | | | |
| 1977-1978 | | | | | | |

# Annexe 2

## FICHES RÉCAPITULATIVES DES CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES DES PRINCIPALES STATIONS

Cours d'eau : SAMBIRANO
Station : AMBANJA
Superficie du bassin versant : 2830 km²

Coordonnées : latitude : 13°41 S
longitude : 48°27 E

Bilan hydrologique moyen P = (2500) mm
H = 1500 mm
DE= (1000) mm
Ke= 60 %

période : 1952-1983

Débits moyens mensuels et annuels ($m^3/s$)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 36.5 | 120 | 275 | 368 | 336 | 214 | 105 | 56.1 | 35.8 | 26.2 | 20.8 | 19.4 | 133 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 1055 | 1438 | 2040 | 1.93 |
| Q $m^3/s$ | 94.6 | 129 | 183 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 1550 | 3100 | 4280 | 8 |
| q/l/s/$km^2$ | 550 | 1100 | 1510 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha = .010$ Tc = 72 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 6.38 | 7.67 | 12.0 | 3.84 |
| q/l/s/$km^2$ | 2.25 | 2.71 | 4.24 | |

Cours d'eau : RAMENA
Station : AMBODIMANGA
Superficie du bassin versant : 1080 km²

Coordonnées : latitude : 13°45 S
longitude : 48°30 E

Bilan hydrologique moyen P = (2900/3000) mm
H = 1800 mm
DE= (1100/1200) mm
Ke= 65 %

période : 1953-1976

Débits moyens mensuels et annuels ($m^3/s$)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 17.0 | 62.6 | 144 | 187 | 158 | 107 | 55.2 | 28.6 | 19.3 | 14.9 | 10.7 | 10.7 | 67.3 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 1253 | 1803 | 2666 | 2.13 |
| Q $m^3/s$ | 42.9 | 61.7 | 91.2 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 867 | 1500 | 1930 | 6.5 |
| q/l/s/$km^2$ | 803 | 1390 | 1790 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha = .0095$ Tc = 73 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 4.32 | 5.49 | 7.37 | 2.2 |
| q/l/s/$km^2$ | 4.0 | 5.1 | 6.8 | |

Cours d'eau : MAEVARANO
Station : AMBODIVOHYTRA
Superficie du bassin versant : 2585 km²

Coordonnées : latitude : 14°36 S
longitude : 48°32 E

Bilan hydrologique moyen P = 1730 mm
H = 600 mm
DE= 1130 mm
Ke= 35 %

période : 1955-1983

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8.55 | 34.2 | 86.8 | 130 | 121 | 84.8 | 34.9 | 21.4 | 15.7 | 11.7 | 7.67 | 5.40 | 4.64 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 367 | 605 | 918 | 2.50 |
| Q m³/s | 30.1 | 49.6 | 75.2 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 248 | 364 | 445 | 3.3 |
| q/l/s/km² | 96 | 141 | 172 | |

**Basses eaux**

Tarissement $\alpha = .125$ Tc = 55 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1.66 | 2.00 | 2.91 | 2.9 |
| q/l/s/km² | .64 | .77 | 1.13 | |

Cours d'eau : MANINGORY
Station : ANDROMBA
Superficie du bassin versant : 6855 km²

Coordonnées : latitude : 17°24 S
longitude : 48°38 E

Bilan hydrologique moyen P = 1200 mm
H = 330 mm
DE= 870 mm
Ke= 28 %

période : 1945-1979

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 19.2 | 27.2 | 62.6 | 115 | 160 | 155 | 107 | 77.7 | 59.5 | 45.9 | 34.0 | 24.3 | 74.1 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 175 | 328 | 540 | 3.1 |
| Q m³/s | 38.0 | 71.2 | 117 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 171 | 277 | 363 | 4.3 |
| q/l/s/km² | 25 | 40 | 53 | |

**Basses eaux**

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 5.96 | 8.62 | 14.2 | 4 |
| q/l/s/km² | .87 | 1.26 | 2.07 | |

Cours d'eau : IVONDRO
Station : RINGA-RINGAA
Superficie du bassin versant : 2560 km²

Coordonnées : latitude : 18°11 S
longitude : 49°15 E

Bilan hydrologique moyen P = (2500) mm
H = 1320 mm
DE= (1180) mm
Ke= 53 %

période : 1952-1983

Débits moyens mensuels et annuels ($m^3/s$)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 65.5 | 93.6 | 143 | 158 | 180 | 123 | 93.5 | 90.8 | 95.3 | 98.0 | 79.7 | 65.3 | 107 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 909 | 1269 | 1791 | 2 |
| Q $m^3/s$ | 73.7 | 103 | 145 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 865 | 1770 | 2450 | 8.6 |
| q/l/s/km² | 338 | 690 | 960 | |

Basses eaux

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 33.1 | 36.4 | 44.0 | 1.8 |
| q/l/s/km² | 12.9 | 14.2 | 17.2 | |

Cours d'eau : VOHITRA
Station : ROGEZ (ANDEKALEKA)
Superficie du bassin versant : 1910 km²

Coordonnées : latitude : 18°48 S
longitude : 48°36 E

Bilan hydrologique moyen P = (2200) mm
H = 1145 mm
DE= 1055 mm
Ke= 52 %

période : 1951-1980

Débits moyens mensuels et annuels ($m^3/s$)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 41.3 | 62.1 | 105 | 116 | 132 | 77.4 | 54.9 | 53.2 | 56.8 | 58.6 | 45.8 | 36.2 | 69.8 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 755 | 1105 | 1583 | 2.1 |
| Q $m^3/s$ | 45.7 | 66.9 | 95.8 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 678 | 1690 | 2530 | 13.7 |
| q/l/s/km² | 355 | 885 | 1325 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha = .0060$ Tc = 115 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 18.2 | 20.5 | 25.3 | 1.9 |
| q/l/s/km² | 9.5 | 10.7 | 13.2 | |

Cours d'eau : RIANILA
Station : BRICKAVILLE
Superficie du bassin versant : 6000 km²
période : 1951-1969

Coordonnées : latitude : 18°49 S
longitude : 49°04 E
Bilan hydrologique moyen P = (2900) mm
H = 1840 mm
DE= 1060 mm
Ke= 63 %

Débits moyens mensuels et annuels ($m^3/s$)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 222 | 299 | 465 | 508 | 720 | 382 | 291 | 284 | 294 | 279 | 221 | 179 | 345 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 1185 | 1790 | 2549 | 2.15 |
| Q $m^3/s$ | 225 | 340 | 485 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 3090 | 4900 | 6370 | 5.5 |
| q/l/s/$km^2$ | 515 | 815 | 1060 | |

Basses eaux

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 34.5 | 50.3 | 88.5 | 5 |
| q/l/s/$km^2$ | 5.8 | 8.4 | 14.8 | |

Cours d'eau : VOHITRA
Station : ANDEKALEKA aval
Superficie du bassin versant : 2615 km²
période : 1951-1979 (étendue)

Coordonnées : latitude : 18°48 S
longitude : 48°57 E
Bilan hydrologique moyen P = (2700) mm
H = 1710 mm
DE= 990 mm
Ke= 63 %

Débits moyens mensuels et annuels ($m^3/s$)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 77.3 | 127 | 234 | 256 | 274 | 151 | 105 | 97.5 | 105 | 110 | 81.2 | 66.8 | 140 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 1043 | 1603 | 2480 | 2.4 |
| Q $m^3/s$ | 86.4 | 133 | 206 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 780 | | (3300) | |
| q/l/s/$km^2$ | 300 | | (1260) | |

Basses eaux

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 27.6 | 31.6 | 41.5 | 2.2 |
| q/l/s/$km^2$ | 10.6 | 12.1 | 15.6 | |

Cours d'eau : RIANILA
Station : FETRAOMBY
Superficie du bassin versant : 1863 km²

période : 1963-1973

Coordonnées : latitude : 18°40 S
longitude : 48°56 E
Bilan hydrologique moyen P = (3300) mm
H = (2100) mm
DE= (1200) mm
Ke= 64 %

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 85.2 | 115 | 245 | 233 | 216 | 146 | 107 | 100 | 104 | 140 | 94.4 | 80.8 | 139 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | | (2100) | | |
| Q m³/s | | (124) | | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 2220 | 3810 | 4970 | 5 |
| q/l/s/km² | 1190 | 2040 | 2680 | |

Basses eaux

Tarissement α = .0045 Tc = 154 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 40.1 | 44.6 | 53.8 | 1.7 |
| q/l/s/km² | 21.5 | 23.9 | 28.9 | |

Cours d'eau : MANGORO
Station : MANGORO Gare
Superficie du bassin versant : 3600 km²

période : 1956-1979

Coordonnées : latitude : 18°53 S
longitude : 48°06'30 E
Bilan hydrologique moyen P = 1500 mm
H = 770 mm
DE= 730 mm
Ke= 51 %

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 53.1 | 119 | 155 | 185 | 179 | 105 | 66.6 | 53.8 | 49.1 | 43.1 | 33.4 | 30.0 | 88.9 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 497 | 732 | 1089 | 2.2 |
| Q m³/s | 56.7 | 83.5 | 124 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 440 | 810 | 1210 | 5.3 |
| q/l/s/km² | 120 | 225 | 340 | |

Basses eaux

Tarissement α = .0060 Tc = 115 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 20.2 | 21.3 | 23.3 | 1.3 |
| q/l/s/km² | 5.6 | 5.9 | 6.5 | |

Cours d'eau : AMBOROMPOTSY
Station : ANTSAMPANDRANO
Superficie du bassin versant : 95 km²

Coordonnées : latitude : 19°37 S
longitude : 47°05 E
Bilan hydrologique moyen P = (2000) mm
H = 890 mm
DE= 1110 mm
Ke= 45 %

période : 1956-1979

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.77 | 3.80 | 5.54 | 5.84 | 6.52 | 3.46 | 1.93 | 1.46 | 1.21 | 1.04 | .923 | .931 | 2.85 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 604 | 891 | 1179 | 1.95 |
| Q m³/s | 1.82 | 2.68 | 3.55 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 19 | 28 | 35 | 3.2 |
| q/l/s/km² | 200 | 295 | 370 | |

**Basses eaux**

Tarissement $\alpha$ = .0052 Tc = 140 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | .58 | .63 | .73 | 1.6 |
| q/l/s/km² | 6.1 | 6.6 | 7.7 | |

Cours d'eau : ONIVE
Station : TSINJOARIVO
Superficie du bassin versant : 3200 km²

Coordonnées : latitude : 19°38 S
longitude : 47°41 E
Bilan hydrologique moyen P = (1590) mm
H = 720 mm
DE= 870 mm
Ke= 45 %

période : 1963-1980

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 42.4 | 110 | 137 | 166 | 149 | 89.2 | 47.3 | 34.3 | 30.8 | 27.1 | 20.2 | 16.6 | 72.1 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 474 | 672 | 1025 | 2.2 |
| Q m³/s | 48.1 | 68.1 | 104 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 385 | 500 | 580 | 2.1 |
| q/l/s/km² | 120 | 155 | 180 | |

**Basses eaux**

Tarissement $\alpha$ = .0084 Tc = 82 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 3.55 | 4.00 | 5.89 | 3.6 |
| q/l/s/km² | 1.11 | 1.25 | 1.84 | |

Cours d'eau : MANANJARY
Station : ANTSINDRA
Superficie du bassin versant : 2260 km²

Coordonnées : latitude : 20°59 S
longitude : 47°44 E
Bilan hydrologique moyen P = (2850) mm
H = 1650 mm
DE= 1200 mm
Ke= 58 %

période : 1955-1976

Débits moyens mensuels et annuels ($m^3/s$)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 66.0 | 128 | 178 | 216 | 208 | 152 | 102 | 82.1 | 80.5 | 82.5 | 63.7 | 48.6 | 118 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 1343 | 1631 | 1991 | 1.5 |
| Q $m^3/s$ | 96.2 | 117 | 143 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 467 | 713 | 935 | 2.1 |
| q/l/s/$km^2$ | 207 | 315 | 414 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha$ = .0060 Tc = 115 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 23.7 | 26.0 | 31.4 | 1.84 |
| q/l/s/$km^2$ | 10.5 | 11.5 | 13.9 | |

Cours d'eau : IVOHANANA
Station : FATIHITA
Superficie du bassin versant : 835 km²

Coordonnées : latitude : 21°03 S
longitude : 47°45 E
Bilan hydrologique moyen P = (3200) mm
H = 1860 mm
DE= 1340 mm
Ke= 58 %

période : 1955-1976

Débits moyens mensuels et annuels ($m^3/s$)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 26.0 | 47.6 | 73.2 | 104 | 96.1 | 67.1 | 42.3 | 33.4 | 31.7 | 31.8 | 25.5 | 20.1 | 49.6 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 1315 | 1845 | 2418 | 1.8 |
| Q $m^3/s$ | 34.8 | 48.8 | 64.0 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 295 | 475 | 682 | 3.4 |
| q/l/s/$km^2$ | 353 | 570 | 815 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha$ = (.007) Tc = 115/87 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 10.4 | 11.6 | 14.1 | 1.8 |
| q/l/s/$km^2$ | 12.5 | 13.9 | 16.9 | |

Cours d'eau : NAMORONA
Station : VOHIPARARA
Superficie du bassin versant : 445 km²

Coordonnées : latitude : 21°14 S
longitude : 47°23 E

Bilan hydrologique moyen P = (2000) mm
H = 895 mm
DE= 1105 mm
Ke= 45 %

période : 1951-1979

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6.75 | 12.3 | 19.6 | 27.6 | 23.6 | 14.3 | 10.0 | 9.59 | 8.86 | 8.90 | 6.31 | 4.83 | 12.6 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 570 | 850 | 1280 | 2.3 |
| Q m³/s | 8.04 | 12.0 | 18.0 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 86 | 216 | 372 | 10 |
| q/l/s/km² | 193 | 485 | 835 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha = .0062$ Tc = 112 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 2.01 | 2.28 | 2.86 | 2 |
| q/l/s/km² | 4.5 | 5.1 | 6.4 | |

Cours d'eau : FARAONY
Station : VOHILAVA
Superficie du bassin versant : 2005 km²

Coordonnées : latitude : 21°46 S
longitude : 47°55 E

Bilan hydrologique moyen P = (3000) mm
H = 1840 mm
DE= 1160 mm
Ke= 61 %

période : 1960-1976

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 62.0 | 124 | 183 | 261 | 224 | 140 | 99.6 | 77.2 | 79.7 | 83.7 | 58.7 | 48.3 | 119 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 1200 | 1745 | 2600 | 2.2 |
| Q m³/s | 76.2 | 111 | 165 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 995 | 1650 | 2260 | 4.3 |
| q/l/s/km² | 500 | 820 | 1130 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha = .0059$ Tc = 117 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 19.0 | 21.0 | 25.7 | 1.9 |
| q/l/s/km² | 9.5 | 10.5 | 12.8 | |

Cours d'eau : MANANARA sud
Station : MARANGATY
Superficie du bassin versant : 14 160 km²

Coordonnées : latitude : 22°56 S
longitude : 46°58 E
Bilan hydrologique moyen P = 1150 mm
H = 535 mm
DE= 615 mm
Ke= 47 %

période :

Débits moyens mensuels et annuels ($m^3/s$)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 108 | 303 | 496 | 545 | 435 | 249 | 145 | 110 | 108 | 115 | 76.8 | 61.9 | 228 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 345 | 512 | 772 | 2.2 |
| Q $m^3/s$ | 155 | 230 | 346 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 1250 | 1850 | 2330 | 3.1 |
| q/l/s/km² | 88 | 130 | 263 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha$ = .011 Tc = 69 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 15.1 | 18.0 | 26.8 | 3.7 |
| q/l/s/km² | 1.1 | 1.3 | 1.9 | |

Cours d'eau : EFAHO
Station : FANJIHIRA
Superficie du bassin versant : 195 km²

Coordonnées : latitude : 24°54 S
longitude : 46°54 E
Bilan hydrologique moyen P = (3100) mm
H = 2070 mm
DE= 1030 mm
Ke= 67 %

période : 1962-1975

Débits moyens mensuels et annuels ($m^3/s$)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7.24 | 9.25 | 21.3 | 30.9 | 22.7 | 12.8 | 8.73 | 5.81 | 10.2 | 9.86 | 3.65 | 3.25 | 12.0 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 1128 | 2004 | 3090 | 2.7 |
| Q $m^3/s$ | 6.97 | 12.4 | 19.1 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 430 | 735 | 960 | 6.5 |
| q/l/s/km² | 2190 | 3750 | 4900 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha$ = (.010) Tc = (70 j)

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | .328 | .379 | .543 | 4 |
| q/l/s/km² | 1.7 | 1.9 | 2.8 | |

Cours d'eau : MANDRARE
Station : ANDABOLAVA
Superficie du bassin versant : 4035 km²
période : 1953-1977

Coordonnées : latitude : 24°13 S
longitude : 46°19 E
Bilan hydrologique moyen P = 820 mm
H = 300 mm
DE= 520 mm
Ke= 37 %

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 22.5 | 72.9 | 115 | 90.1 | 57.3 | 25.2 | 15.3 | 11.2 | 9.01 | 9.01 | 6.50 | 6.92 | 36.6 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 131 | 254 | 475 | 3.6 |
| Q m³/s | 16.7 | 32.5 | 60.7 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 691 | 1490 | 2510 | 7.7 |
| q/l/s/km² | 171 | 370 | 622 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha$ = .015 Tc = 48 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | .187 | .314 | .747 | 16 |
| q/l/s/km² | .05 | .08 | .20 | |

Cours d'eau : MANDRARE
Station : AMBOASARY
Superficie du bassin versant : 12 435 km²
période : 1951-1977

Coordonnées : latitude : 25°03 S
longitude : 46°28 E
Bilan hydrologique moyen P = 790 mm
H = 185 mm
DE= 605 mm
Ke= 23 %

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 28.1 | 152 | 242 | 187 | 121 | 37.0 | 19.6 | 14.1 | 10.8 | 10.6 | 7.45 | 8.99 | 69.5 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 67 | 139 | 336 | 5 |
| Q m³/s | 26.4 | 54.8 | 132 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 2150 | 5070 | 8000 | 10 |
| q/l/s/km² | 173 | 408 | 645 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha$ = .01/.03 Tc = 69/25 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | .001 | .022 | .264 | 2600 |
| q/l/s/km² | - | - | .02 | |

Cours d'eau : MANANARA
Station : BEVIA
Superficie du bassin versant : 1085 km²
période : 1951-1973

Coordonnées : latitude : 24°51 S
longitude : 46°27 E
Bilan hydrologique moyen P = 600 mm
H = 175 mm
DE= 425 mm
Ke= 30 %

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.60 | 8.86 | 17.8 | 12.8 | 12.2 | 3.58 | 2.52 | 2.76 | 1.85 | 2.09 | 1.67 | 1.27 | 5.82 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 92 | 150 | 287 | 3.1 |
| Q m³/s | 3.16 | 5.16 | 9.87 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 251 | 548 | 900 | 9 |
| q/l/s/km² | 231 | 505 | 830 | |

Basses eaux

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | .05 | .08 | .21 | 13 |
| q/l/s/km² | .04 | .07 | .19 | |

Cours d'eau : MANOMBOVO
Station : TSIHOMBE
Superficie du bassin versant : 2712 km²
période : 1956-1976

Coordonnées : latitude : 25°18 S
longitude : 45°30 E
Bilan hydrologique moyen P = 565 mm
H = 50 mm
DE= 515 mm
Ke= 9 %

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3.62 | 12.4 | 15.3 | 14.5 | 6.51 | 1.38 | .356 | .207 | .222 | .025 | .231 | .576 | 4.57 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 24 | 48 | 87 | 3.6 |
| Q m³/s | 2.06 | 4.13 | 7.48 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 422 | 714 | 930 | 6.5 |
| q/l/s/km² | 156 | 263 | 343 | |

Basses eaux

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 0 | 0 | 0 | |
| q/l/s/km² | | | | |

Cours d'eau : MENARANDRA
Station : TRANOROA
Superficie du bassin versant : 5330 km²
période : 1951-1983

Coordonnées : latitude : 24°42 S
longitude : 45°04 E
Bilan hydrologique moyen P = 760 mm
H = 190 mm
DE= 570 mm
Ke= 25 %

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 19.6 | 84.6 | 108 | 80.3 | 42.2 | 11.2 | 5.52 | 3.13 | 2.12 | 1.99 | 2.23 | 4.47 | 30.3 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 84 | 167 | 299 | 3.6 |
| Q m³/s | 14.2 | 28.2 | 50.5 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1510 | 2670 | 3590 | 6.9 |
| q/l/s/km² | 283 | 500 | 675 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha = .009$ Tc = 75/90 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | .050 | .079 | .183 | 17 |
| q/l/s/km² | <.01 | <.01 | .03 | |

Cours d'eau : ONILAHY
Station : TONGOBORY
Superficie du bassin versant : 27 700 km²
période : 1951-1974

Coordonnées : latitude : 23°32 S
longitude : 44°19 E
Bilan hydrologique moyen P = 800 mm
H = 165 mm
DE= 635 mm
Ke= 21 %

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 121 | 327 | 373 | 327 | 229 | 87.2 | 56.5 | 51.6 | 45.8 | 43.8 | 40.3 | 48.7 | 145 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 104 | 143 | 195 | 1.9 |
| Q m³/s | 91.6 | 126 | 172 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1180 | 1350 | (1450) | 1.5 |
| q/l/s/km² | 43 | 49 | (52) | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha = .003$ Tc = 230 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 15.0 | 18.2 | 25.9 | 3 |
| q/l/s/km² | .54 | .65 | .93 | |

Cours d'eau : IHOSY
Station : IHOSY
Superficie du bassin versant : 1500 km²
période : 1952-1976

Coordonnées : latitude : 22°23 S
longitude : 46°07 E
Bilan hydrologique moyen P = 935 mm
H = 340 mm
DE= 595 mm
Ke= 36 %

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5.63 | 24.9 | 50.0 | 42.1 | 28.3 | 13.3 | 7.35 | 5.77 | 4.76 | 4.38 | 3.31 | 3.36 | 16.0 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 203 | 310 | 506 | 2.5 |
| Q m³/s | 9.65 | 14.7 | 24.0 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 161 | 305 | 415 | 6.1 |
| q/l/s/km² | 107 | 203 | 277 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha = .0107$ Tc = 65 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | .53 | .97 | 1.87 | 6.4 |
| q/l/s/km² | .35 | .65 | 1.25 | |

Cours d'eau : ZOMANDAO
Station : ANKARAMENA
Superficie du bassin versant : 610 km²
période : 1952-1976

Coordonnées : latitude : 21°57 S
longitude : 49°39 E
Bilan hydrologique moyen P = 1300 mm
H = 575 mm
DE= 725 mm
Ke= 44 %

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5.02 | 21.6 | 32.4 | 29.5 | 19.6 | 6.86 | 3.16 | 2.37 | 1.96 | 1.78 | 1.32 | 1.33 | 10.5 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 365 | 566 | 850 | 2.3 |
| Q m³/s | 7.05 | 10.9 | 16.4 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 363 | 783 | 1160 | 6.7 |
| q/l/s/km² | 595 | 1280 | 1900 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha = .012$ Tc = 58 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | .181 | .218 | .323 | 3.7 |
| q/l/s/km² | .30 | .36 | .53 | |

Cours d'eau : MANANANTANANA
Station : TSITONDROINA
Superficie du bassin versant : 6510 km²
période : 1952-1969

Coordonnées : latitude : 21°19 S
longitude : 45°59'10 E
Bilan hydrologique moyen P = 1100 mm
H = 440 mm
DE= 660 mm
Ke= 40 %

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 42.4 | 208 | 261 | 224 | 172 | 64.3 | 31.2 | 27.0 | 20.4 | 19.4 | 14.9 | 13.5 | 91.1 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 310 | 425 | 592 | 1.9 |
| Q m³/s | 63.9 | 87.7 | 122 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1380 | 1690 | 1820 | 2.6 |
| q/l/s/km² | 212 | 260 | 280 | |

**Basses eaux**

Tarissement α = .0085 Tc = 82 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | .85 | 1.35 | 3.35 | 12 |
| q/l/s/km² | .13 | .20 | .51 | |

Cours d'eau : MATSIATRA
Station : MALAKIALINA
Superficie du bassin versant : 11 715 km²
période : 1952-1963

Coordonnées : latitude : 21°01 S
longitude : 45°48 E
Bilan hydrologique moyen P = 1300 mm
H = 625 mm
DE= 675 mm
Ke= 48 %

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 90.2 | 680 | 652 | 531 | 431 | 166 | 92.6 | 77.4 | 64.0 | 58.8 | 47.3 | 39.1 | 232 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 418 | 608 | 867 | 2.1 |
| Q m³/s | 151 | 226 | 322 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 2460 | 3870 | 4970 | 3.1 |
| q/l/s/km² | 210 | 330 | 425 | |

**Basses eaux**

Tarissement α = .0065 Tc = 107 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 21.7 | 23.8 | 27.9 | 1.6 |
| q/l/s/km² | 1.85 | 2.03 | 2.38 | |

Cours d'eau : MANGOKY
Station : BANIAN
Superficie du bassin versant : 50 000 km²
période : 1951-1984

Coordonnées : latitude : 21°48 S
longitude : 44°12'25 E
Bilan hydrologique moyen P = 1000 mm
H = 330 mm
DE= 670 mm
Ke= 33 %

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 234 | 858 | 1520 | 1370 | 999 | 419 | 221 | 181 | 154 | 129 | 101 | 97.8 | 521 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 214 | 309 | 444 | 2.1 |
| Q m³/s | 339 | 490 | 703 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 8 410 | 13 100 | 16 900 | 3.7 |
| q/l/s/km² | 168 | 262 | 338 | |

**Basses eaux**

Tarissement α = .006 et .019
Tc = 110 J et 36 J

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 29 | 34 | 46 | 2.3 |
| q/l/s/km² | .6 | .7 | .9 | |

Cours d'eau : MORONDAVA
Station : DABARA
Superficie du bassin versant : 4640 km²
période : 1951-1984

Coordonnées : latitude : 20°24 S
longitude : 44°47 E
Bilan hydrologique moyen P ≈ 950 mm
H ≈ 330 mm
DE≈ 620 mm
Ke≈ 35 %

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 18.0 | 106 | 144 | 151 | 95.4 | (21.9) | (16.1) | (19.4) | (12.4) | (10.9) | (9.63) | (9.13) | 50.4 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 248 | 336 | 398 | 1.6 |
| Q m³/s | 36.5 | 49.4 | 58.5 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1580 | 2500 | 3600 | 3.1 |
| q/l/s/km² | 340 | 540 | 775 | |

**Basses eaux**

Tarissement α = (.005) Tc = (138 j)

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | | | (8) | |
| q/l/s/km² | | | (1.7) | |

Cours d'eau : SAHANIVOTRY — Coordonnées : latitude : 20°07 S
Station : PK 197 — longitude : 47°05 E
Superficie du bassin versant : 430 km² — Bilan hydrologique moyen P = 1700 mm
H = 730 mm
DE= 970 mm
période : 1963-1980 — Ke= 43 %

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8.12 | 13.8 | 18.1 | 21.4 | 18.2 | 12.6 | 8.11 | 6.09 | 5.50 | 4.66 | 3.73 | 4.04 | 10.3 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 510 | 698 | 979 | 1.9 |
| Q m³/s | 6.95 | 9.51 | 13.3 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 76 | 113 | 143 | 3.4 |
| q/l/s/km² | 177 | 263 | 333 | |

**Basses eaux**

Tarissement $\alpha = (.0062)$ Tc = (112 j)
$\alpha = (6\,Q_0 + 22) .10^{-4}$

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1.42 | 1.66 | 2.11 | 2 |
| q/l/s/km² | 3.3 | 3.9 | 4.9 | |

Cours d'eau : MANANDONA — Coordonnées : latitude : 20°08 S
Station : SAHANIVOTRY — longitude : 47°05 E
Superficie du bassin versant : 1450 km² — Bilan hydrologique moyen P = 1530 mm
H = 600 mm
DE= 930 mm
période : 1963-1980 — Ke= 39 %

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 17.7 | 38.2 | 53.6 | 66.1 | 54.3 | 36.8 | 21.0 | 14.5 | 12.7 | 10.5 | 8.12 | 8.16 | 28.3 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 397 | 576 | 826 | 2.1 |
| Q m³/s | 18.2 | 26.5 | 38.0 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 186 | 295 | 370 | 39 |
| q/l/s/km² | 128 | 203 | 255 | |

**Basses eaux**

Tarissement $\alpha = (2.7Q_0 + 42) .10^{-4}$
$\bar{\alpha} = (.0087)$
Tc = (80 j)

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 2.88 | 3.21 | 3.98 | 2 |
| q/l/s/km² | 1.99 | 2.21 | 2.75 | |

Cours d'eau : MANIA — Coordonnées : latitude : 20°17 S
Station : FASIMENA — longitude : 46°48 E
Superficie du bassin versant : 6795 km² — Bilan hydrologique moyen P = 1680 mm
H = 720 mm
DE = 960 mm
période : 1955-1983 — Ke = 43 %

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 100 | 193 | 285 | 330 | 276 | 175 | 119 | 100 | 94.4 | 87.2 | 74.1 | 71.0 | 158 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 486 | 684 | 996 | 2.05 |
| Q m³/s | 105 | 147 | 214 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 758 | 1260 | 1770 | 3.9 |
| q/l/s/km² | 112 | 185 | 260 | |

**Basses eaux**

Tarissement $\alpha = F(Q_0)$ Tc = (161 j)
$\bar{\alpha}$ = (.0043)

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 37.2 | 41.2 | 50.2 | 1.9 |
| q/l/s/km² | 5.5 | 6.1 | 7.4 | |

Cours d'eau : TSIRIBIHINA — Coordonnées : latitude : 19°43 S
Station : BETOMBA — longitude : 44°58 E
Superficie du bassin versant : 45 000 km² — Bilan hydrologique moyen P = 1400 mm
H = 695 mm
DE = 705 mm
période : 1957-1983 — Ke = 50 %

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 424 | 1200 | 2390 | 3430 | 2020 | 937 | 399 | 297 | 248 | 223 | 202 | 223 | 987 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 465 | 650 | 942 | 2 |
| Q m³/s | 663 | 927 | 1340 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 6820 | 11 100 | 15 000 | 3.9 |
| q/l/s/km² | 152 | 247 | 333 | |

**Basses eaux**

Tarissement $\alpha = F(Q_0)$ Tc = (200 j)
$\bar{\alpha}$ = (.0035)

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 136 | 146 | 165 | 1.5 |
| q/l/s/km² | 3.0 | 3.2 | 3.7 | |

Cours d'eau : IKOPA
Station : AMBOHIMANAMBOLA
Superficie du bassin versant :
(1503 km²) naturelle
1407 km² réelle
période : 1956-1980

Coordonnées : latitude : 18°56'43 S
longitude : 47°35'56 E
Bilan hydrologique moyen P = 1350 mm
H = 640 mm
DE= 710 mm
Ke= 47 %

Débits moyens mensuels et annuels ($m^3/s$)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 27.2 | 37.4 | 42.0 | 41.2 | 40.0 | 25.9 | 22.8 | 23.0 | 23.9 | 25.0 | 23.4 | 23.1 | 29.5 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 459 | 642 | 825 | 1.8 |
| Q $m^3/s$ | 20.5 | 28.6 | 36.8 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | | | | |
| q/l/s/$km^2$ | | | | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha$ = Tc =
débits influencés "réels"
(soutien d'étiage)

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 6.98 | 9.30 | 13.0 | 2.5 |
| q/l/s/$km^2$ | 5.0 | 6.6 | 9.2 | |

Cours d'eau : IKOPA
Station : Pont de MAHITSY
Superficie du bassin versant :
(1780 km²) naturelle
1684 km² réelle
période : 1947-1975

Coordonnées : latitude : 18°51'47 S
longitude : 47°27'29 E
Bilan hydrologique moyen P = 1340 mm
H = 590 mm
DE= 750 mm
Ke= 44 %

Débits moyens mensuels et annuels ($m^3/s$)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 24.1 | 40.7 | 52.8 | 53.2 | 54.5 | 33.3 | 24.0 | 22.5 | 22.0 | 20.7 | 16.9 | 16.4 | 31.7 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 463 | 560 | 765 | 1.7 |
| Q $m^3/s$ | 24.9 | 30.2 | 41.2 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 133 | 186 | 227 | 2.6 |
| q/l/s/$km^2$ | 79 | 110 | 135 | |

Basses eaux

influencés

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 7.42 | 8.28 | 9.92 | 1.7 |
| q/l/s/$km^2$ | 4.4 | 4.9 | 5.9 | |

Cours d'eau : SISAONY
Station : ANDRAMASINA
Superficie du bassin versant : 318 km²

Coordonnées : latitude : 19°11'10 S
longitude : 47°35'20 E
Bilan hydrologique moyen P = 1250 mm
H = 595 mm
DE = 655 mm
Ke = 48 %

période : 1957-1980

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3.91 | 9.56 | 12.2 | 12.7 | 10.8 | 5.52 | 3.72 | 3.25 | 3.24 | 2.97 | 2.40 | 2.15 | 6.01 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 392 | 537 | 764 | 2 |
| Q m³/s | 3.95 | 5.41 | 7.70 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 93 | 159 | 227 | 4.4 |
| q/l/s/km² | 292 | 500 | 714 | |

**Basses eaux**

Tarissement $\alpha = .0056$ Tc = 124 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | .688 | .790 | 1.03 | 2.3 |
| q/l/s/km² | 2.2 | 2.5 | 3.2 | |

Cours d'eau : AMDROMBA
Station : TSINJONY
Superficie du bassin versant : 350 km²

Coordonnées : latitude : 19°08 S
longitude : 47°31 E
Bilan hydrologique moyen P = 1550 mm
H = 860 mm
DE = 690 mm
Ke = 55 %

période : 1953-1980

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5.61 | 13.8 | 17.0 | 18.4 | 18.5 | 10.5 | 6.04 | 4.64 | 4.40 | 3.74 | 3.30 | 2.95 | 9.01 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 593 | 843 | 1145 | 1.9 |
| Q m³/s | 6.58 | 9.35 | 12.7 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 91 | 129 | 163 | 2.6 |
| q/l/s/km² | 260 | 370 | 465 | |

**Basses eaux**

Tarissement $\alpha = .0065$ Tc = 107 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | .84 | .98 | 1.39 | 3.4 |
| q/l/s/km² | 2.4 | 2.8 | 4.0 | |

Cours d'eau : IKOPA
Station : BEVOMANGA
Superficie du bassin versant :
(4290 km²) naturelle
4184 km² réelle
période : 1947-1972

Coordonnées : latitude : 18°48'30 S
longitude : 47°19'12 E
Bilan hydrologique moyen P = 1340 mm
H = 605 mm
DE= 735 mm
Ke= 45 %

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 44.2 | 108 | 152 | 153 | 156 | 101 | 52.3 | 40.9 | 37.5 | 32.8 | 26.6 | 24.5 | 77.1 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 462 | 584 | 761 | 1.6 |
| Q m³/s | 60.8 | 76.8 | 100 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 331 | 409 | 460 | 1.9 |
| q/l/s/km² | 77 | 95 | 107 | |

**Basses eaux**

Tarissement $\alpha = .0059$ Tc = 117 j
$\alpha = F(Q_0)$

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 13.3 | 14.3 | 17.0 | 1.7 |
| q/l/s/km² | 3.2 | 3.4 | 4.0 | |

Cours d'eau : IKOPA
Station : Bac de FIADANANA
Superficie du bassin versant : 9450 km²
période : 1958-1976

Coordonnées : latitude : 18°09'45 S
longitude : 46°56'54 E
Bilan hydrologique moyen P = 1390 mm
H = 575 mm
DE= 815 mm
Ke= 41 %

**Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)**

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 106 | 268 | 362 | 391 | 361 | 203 | 111 | 82.2 | 71.3 | 60.9 | 47.2 | 43.3 | 175 |

**Apports annuels**

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 440 | 222 | 733 | 1.7 |
| Q m³/s | 132 | 166 | 219 | |

**Crues (QMax)**

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1140 | 1610 | 1960 | 2.7 |
| q/l/s/km² | 120 | 170 | 207 | |

**Basses eaux**

Tarissement $\alpha = .0067$ Tc = 104 j
$\alpha = F(Q_0)$

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 19.9 | 21.7 | 26.7 | 1.9 |
| q/l/s/km² | 2.1 | 2.3 | 2.8 | |

Cours d'eau : IKOPA
Station : ANTSATRANA
Superficie du bassin versant : 18 645 km²
période : 1948-1976

Coordonnées : latitude : 17°26 S
longitude : 46°53 E
Bilan hydrologique moyen P = 1515 mm
H = 770 mm
DE= 745 mm
Ke= 51 %

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 264 | 640 | 933 | 1050 | 1040 | 523 | 286 | 219 | 179 | 149 | 121 | 122 | 458 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 633 | 766 | 910 | 1.4 |
| Q m³/s | 674 | 453 | 538 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 2560 | 3060 | 3420 | 1.6 |
| q/l/s/km² | 137 | 164 | 183 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha = F(Q_0)$ Tc = 107 j
$\alpha$ = .0065

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 75.7 | 82.2 | 94.5 | 1.5 |
| q/l/s/km² | 4.1 | 4.4 | 5.1 | |

Cours d'eau : ISINKO
Station : AMBODIROKA
Superficie du bassin versant : 600 km²
période : 1957-1974

Coordonnées : latitude : 16°56'56 S
longitude : 46°57'39 E
Bilan hydrologique moyen P = (1780) mm sous-estimée
H = 1130 mm
DE= 650 mm
Ke= 63 %

Débits moyens mensuels et annuels (m³/s)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12.3 | 26.4 | 51.6 | 65.6 | 58.3 | 21.5 | 9.37 | 7.11 | 5.46 | 4.18 | 3.19 | 2.80 | 22.1 |

Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 822 | 1110 | 1470 | 1.8 |
| Q m³/s | 15.6 | 21.1 | 27.9 | |

Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 512 | 986 | 1440 | 5.9 |
| q/l/s/km² | 853 | 1640 | 2400 | |

Basses eaux

Tarissement $\alpha$ = .0090 Tc = 77 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q m³/s | 1.21 | 1.46 | 1.94 | 2.2 |
| q/l/s/km² | 2.0 | 2.4 | 3.2 | |

Cours d'eau : BETSIBOKA
Station : AMBODIROKA
Superficie du bassin versant : 11 800 km²
. période : 1957-1975

Coordonnées : latitude : 16°56 S
longitude : 46°57 E
Bilan hydrologique moyen P = 1500 mm
H = 780 mm
DE= 720 mm
Ke= 52 %

## Débits moyens mensuels et annuels ($m^3/s$)

| N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | Annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 159 | 414 | 625 | 737 | 695 | 295 | 167 | 136 | 112 | 95.5 | 74.5 | 70.4 | 297 |

## Apports annuels

| | décennale sèche | médiane | décennale humide | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Hmm | 572 | 752 | 1010 | 1.8 |
| Q $m^3/s$ | 214 | 281 | 378 | |

## Crues (QMax)

| | médiane | quinquennale | décennale | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 4190 | 8380 | 12100 | 5.4 |
| q/l/s/$km^2$ | 355 | 710 | 1020 | |

## Basses eaux

Tarissement $\alpha$ = .0061 Tc = 114 j

| Etiages (QJMin) | décennal | quinquennal | médian | K3 |
|---|---|---|---|---|
| Q $m^3/s$ | 40.0 | 43.5 | 52.5 | 1.9 |
| q/l/s/$km^2$ | 3.4 | 3.7 | 4.45 | |

# Table des matières

Préface ..... 6
Avant-propos ..... 7
Sommaire ..... 8

Introduction 9

Facteurs conditionnels des régimes 13

Première partie

Facteurs géographiques 14

Chapitre 1

1. SITUATION ..... 14
2. APERÇU GÉOLOGIQUE ..... 14
3. GÉOMORPHOLOGIE ..... 19
**3.1. Caractères d'ensemble** ..... 19
**3.2. Les hautes terres centrales** ..... 22
**3.3. Les bordures des hautes terres centrales** ..... 23
**3.4. Le versant oriental** ..... 25
**3.5. Le relief de la couverture sédimentaire du nord-ouest, de l'ouest et du sud** ..... 25
4. LES SOLS, L'EAU ET L'ÉROSION ..... 27
**4.1. Les sols : généralités** ..... 27
**4.2. Les sols et l'eau** ..... 30
4.2.1. Sols à perméabilité forte ..... 30
4.2.2. Sols à perméabilité bonne à moyenne ..... 32
4.2.3. Sols à perméabilité médiocre à mauvaise ..... 32
4.2.4. Sols imperméables ..... 32
**4.3. L'érosion** ..... 33
5. LA COUVERTURE VÉGÉTALE ..... 34

6. LE RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE ..... 38
**6.1. Généralités** ..... 38
**6.2. Les caractères du tracé du réseau hydrographique** ..... 39
6.2.1. Sur le socle ancien ..... 39
6.2.2. Sur la couverture sédimentaire ..... 39
6.2.2.1. L'ouest ..... 39
6.2.2.2. L'est ..... 40
6.2.2.3. Le sud ..... 41
6.2.3. Les versants naturels ..... 41
**6.3. Description sommaire des versants malgaches et de quelques rivières importantes** ..... 43
6.3.1. Les versants de la Montagne d'Ambre ..... 43
6.3.2. Les versants du Tsaratanana ..... 43
6.3.3. Le versant est ..... 45
6.3.3.1. Le Maningory et le bassin du lac Alaotra ..... 45
6.3.3.2. L'Ivondro ..... 47
6.3.3.3. La Rianila ..... 47
6.3.3.4. Le Mangoro ..... 48
6.3.3.5. La Mananjary ..... 48
6.3.3.6. Le Namorana ..... 49
6.3.3.7. Le Faraony ..... 49
6.3.3.8. La Matitanana ..... 49
6.3.3.9. La Manampatrana ..... 49
6.3.4.0. La Mananara ..... 49
6.3.4.1. La Manampaniry ..... 50
6.3.4. Le versant ouest ..... 50
6.3.4.1. Les grands fleuves ..... 50
*6.3.4.1.1. La Sofia (fig. 1.12.)* ..... 51
*6.3.4.1.2. L'ensemble Betsiboka-Mahajamba (fig. 1.13.)* ..... 52
*6.3.4.1.3. La Mahavavy du sud* ..... 56
*6.3.4.1.4. Le Manambolo* ..... 56
*6.3.4.1.5. La Tsiribihina (fig. 1.14.)* ..... 56
*6.3.4.1.6. Le Mangoky (fig. 1.15.)* ..... 58
*6.3.4.1.7. L'Onilahy* ..... 62
6.3.4.2. Les petits fleuves côtiers ..... 62
6.3.5. Les versants méridionaux ..... 63
6.3.5.1. Le Mandrare ..... 64
6.3.5.2. Le Manambovo ..... 64
6.3.5.3. La Menarandra ..... 64
6.3.5.4. La Linta ..... 65

Chapitre 2

1. GÉNÉRALITÉS SUR LE CLIMAT DE MADAGASCAR ..... 66
**1.1. Influence de la circulation des masses d'air** ..... 66
**1.2. Influence des facteurs géomorphologiques** ..... 68
**1.3. Les saisons** ..... 68
1.3.1. La saison fraîche ..... 69
1.3.2. La saison chaude ..... 69
1.3.2.1. Zone de convergence intertropicale sur Madagascar ..... 70
1.3.2.2. Les cyclones tropicaux ..... 72
1.3.3. Les intersaisons ..... 76
2. LES VENTS ..... 79
**2.1. La direction des vents** ..... 79
**2.2. La vitesse des vents** ..... 82
**2.3. Les régimes des vents** ..... 83
2.3.1. Le long de la côte orientale ..... 83
2.3.2. Sur la bordure de la falaise orientale ..... 83
2.3.3. À l'ouest des hautes terres ..... 84
2.3.4. Le long du canal du Mozambique ..... 84
3. LES TEMPÉRATURES ..... 85
4. L'HUMIDITÉ RELATIVE ..... 92
5. L'ÉVAPORATION ET L'ÉVAPOTRANSPIRATION ..... 95
**5.1. L'évaporation Piche** ..... 95
**5.2. L'évaporation sur bac et nappe d'eau libre** ..... 97
5.2.1. Dispositif de mesures ..... 97
5.2.2. Contrôle et correction des résultats ..... 97
5.2.3. Résultats ..... 99
5.2.4. Comparaison de l'évaporation sur bac et de l'évaporation Piche ..... 100
5.2.5. Évaporation sur nappe d'eau libre ..... 101
5.2.6. Variabilité interannuelle et distribution mensuelle ..... 101
**5.3. L'évapotranspiration** ..... 102
6. L'insolation et le rayonnement solaire ..... 104
7. Les précipitations ..... 107

**7.1. Les précipitations annuelles** ..... 107
7.1.1. Les précipitations et isohyètes moyennes interannuelles ..... 107
7.1.1.1. Historique du réseau pluviométrique ..... 107
7.1.1.2. Tracé de la carte des isohyètes interannuelles ..... 108
7.1.1.3. Les régimes pluviométriques ..... 110
7.1.2. Distribution statistique des précipitations annuelles ..... 118
**7.2. Précipitations moyennes sur les bassins fluviaux** ..... 119
**7.3. Variations saisonnières des précipitations** ..... 121
**7.4. Pluies journalières** ..... 128
7.4.1. Les pluies d'orage ..... 129
7.4.2. Les précipitations dépressionnaires ..... 132
7.4.3. Étude statistique des intensités de pluies journalières ..... 134
7.4.4. Pluies exceptionnelles ..... 137
8. LES RÉGIONS CLIMATIQUES ..... 148
**8.1. Région perhumide** ..... 148
**8.2. Région humide et climat d'altitude** ..... 151
**8.3. Région subhumide à semi-aride** ..... 151
**8.4. Région sèche** ..... 152

Analyse des données hydrologiques 153

Deuxième partie

Présentation de l'analyse 154

Chapitre 3

1. DONNÉES DISPONIBLES ..... 154
2. MÉTHODOLOGIES DE L'ANALYSE ..... 155
**2.1. Examen critique des lectures limnimétriques** ..... 155
**2.2. Établissement des courbes d'étalonnage et barèmes de traduction de hauteurs en débits** ..... 155
**2.3. Traduction des hauteurs limnimétriques en débits par utilisation du logiciel Hydrom** ..... 155
**2.4. Comparaison à l'échelle mensuelle des précipitations et des débits** ..... 156
**2.5. Étude des apports annuels** ..... 156
**2.6. Étude des crues** ..... 157

**2.7. Étude des débits de basses eaux** ..... 158
**2.8. Bilans hydrologiques annuels et mensuels - Mécanismes de l'écoulement** ..... 159
**2.9. Autres bassins** ..... 160

Nord de Madagascar 161

Chapitre 4

1. MONTAGNE D'AMBRE (AMBOHITRA) ..... 161
**1.1. Bassin de la Besokatra** ..... 161
**1.2. Bassin de la Saharenana** ..... 165

2. MASSIF DU TSARATANANA ..... 166
**2.1. Le versant occidental** ..... 167
2.1.1. Bassin de la Mananjeba ..... 167
2.1.2. Bassin de la Mahavavy du nord ..... 169
2.1.3. Bassin de l'Ifasy ..... 172
2.1.4. Bassin du Sambirano ..... 172
2.1.4.1. Le Sambirano à Ambanja ..... 172
*2.1.4.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles* ..... 173
*2.1.4.1.2. Écoulements annuels* ..... 178
*2.1.4.1.3. Crues* ..... 178
*2.1.4.1.4. Basses eaux* ..... 180
2.1.4.1.4.1. Le tarissement ..... 180
2.1.4.1.4.2. Les débits d'étiage ..... 182
*2.1.4.1.5. Bilan hydrologique et mécanismes de l'écoulement* ..... 183
2.1.4.2. La Ramena à Ambodimanga ..... 185
*2.1.4.2.1. Relations hydropluviométriques mensuelles* ..... 185
*2.1.4.2.2. Écoulements annuels* ..... 188
*2.1.4.2.3. Crues* ..... 190
2.1.4.2.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 190
2.1.4.2.3.2. Résultats de l'enquête historique ..... 191
*2.1.4.2.4. Basses eaux* ..... 191
2.1.4.2.4.1. Le tarissement ..... 191
2.1.4.2.4.2. Les débits d'étiage ..... 192
*2.1.4.2.5. Bilan hydrologique* ..... 194
2.1.5. Bassin de la Loza ..... 194
2.1.5.1. Le bassin de la Maevarano ..... 195
*2.1.5.1.1. La Maevarano à Ambodivohitra* ..... 195
2.1.5.1.1.1. Débits moyens mensuels ..... 195
2.1.5.1.1.2. Apports anuuels ..... 196
2.1.5.1.1.3. Crues ..... 198
2.1.5.1.1.4. Basses eaux ..... 199
2.1.5.1.1.5. Bilan hydrologique ..... 201
*2.1.5.1.2. La Maevarano à Beroitra (superficie du bassin versant : 780 km²)* ..... 201
*2.1.5.1.3. La Maevarano à Antelopolo (bassin versant : 1 185 km²)* ..... 201

*2.1.5.1.4. La Beandrarezona à Beandrarezona* ..... 201
*2.1.5.1.5. Petits sous-bassins de la Maevarano* ..... 203
2.1.5.1.5.1. La Bealanankely à Betainkankana (A = 85 km²) ..... 203
2.1.5.1.5.2. La Bealanana à Ambinanindrano (A = 95,4 km²) ..... 203
2.1.5.1.5.3. L'Antsamaka à Antsamaka (A = 565 km²) ..... 203
2.1.5.2. Bassins de l'Ankofia et du Tsinjomorona ..... 204
*2.1.5.2.1. L'Ankofia* ..... 204
*2.1.5.2.2. Le Tsinjomorona* ..... 204
**2.2. Le versant oriental** ..... 205
2.2.1. Bassin de la Fanambana ..... 205
2.2.2. Bassin de la Lokoho ..... 206
2.2.2.1. La Lokoho à Andohariana ..... 207
2.2.2.2. L'Ankaibe à Betsakotsako ..... 208

## Le versant oriental 210

Chapitre 5

1. BASSIN DU MANINGORY ..... 211
**1.1. Le Maningory à Andromba** ..... 213
1.1.1. Débits moyens mensuels ..... 214
1.1.2. Apports annuels ..... 214
1.1.3. Crues ..... 214
1.1.4. Basses eaux ..... 217
1.1.5. Bilan hydrologique ..... 217
**1.2. Affluents du lac Alaotra** ..... 219
1.2.1. La Sahabe ..... 219
1.2.2. L'Anony ..... 220
1.2.3. L'Ivakaka ..... 221
1.2.4. La Sahamilahy ..... 222
1.2.5. Autres stations ..... 223
1.2.5.1. La Sasomangana à Antanifotsy (A = 75,4 km²) ..... 223
1.2.5.2. La Sasomangana à Marianina (A = 279 km²) ..... 223
1.2.5.3. La Ranofotsy à Andilanatoby (A = 191 km²) ..... 223
1.2.5.4. La Mananontanana à la RN 44 (A = 67,3 km²) ..... 223
1.2.5.5. L'Andragorona à la RN 44 (A = 107 km²) ..... 223
1.2.5.6. La Mananonoka à la RN 22 (A = 84 km²) ..... 224
1.2.6. Fonctionnement du lac Alaotra ..... 224
2. BASSIN DE L'IAZAFO ..... 225
3. BASSIN DE L'ONIBE ..... 226

4. BASSIN DE L'IVONDRO ..... 226
**4.1. Ivondro à Ringa-Ringa** ..... 227
4.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 227
4.1.2. Apports annuels ..... 231
4.1.3. Crues ..... 232
4.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 232
4.1.4. Basses eaux ..... 234
4.1.5. Bilan hydrologique et mécanismes de l'écoulement ..... 236
**4.2. Ivondro à Ambodifana** ..... 238
5. BASSIN DE LA RIANILA ..... 239
**5.1. La Vohitra à Rogez (Andekaleka)** ..... 240
5.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 240
5.1.2. Apports annuels ..... 241
5.1.3. Crues ..... 245
5.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 245
5.1.3.2. Résultats de l'enquête historique ..... 245
5.1.4. Basses eaux ..... 247
5.1.4.1. Tarissement ..... 247
5.1.4.2. Étiages ..... 247
5.1.5. Bilan hydrologique et mécanismes ..... 248
**5.2. La Rianila à Brickaville (Ampasimanolotra)** ..... 250
5.2.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 250
5.2.2. Apports annuels ..... 254
5.2.3. Crues ..... 255
5.2.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 255
5.2.3.2. Résultats de l'enquête historique ..... 256
5.2.4. Basses eaux ..... 257
5.2.5. Bilan hydrologique ..... 258
**5.3. La Vohitra à Ankorahotra** ..... 260
**5.4. La Vohitra à Andekaleka aval** ..... 261
5.4.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 261
5.4.2. Apports annuels ..... 263
5.4.3. Crues ..... 264
5.4.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 264
5.4.3.2. Extension de l'échantillon de crues ..... 264
5.4.4. Basses eaux ..... 265
5.4.5. Bilan hydrologique ..... 266

**5.5. La Rianila à Fetraomby** ..... 266
5.5.1. Débits moyens mensuels et annuels ..... 266
5.5.2. Apports annuels ..... 268
5.5.3. Crues ..... 269
5.5.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 269
5.5.3.2. Résultats de l'enquête historique ..... 269
5.5.4. Basses eaux ..... 270
**5.6. La Ronga-Ronga au pont d'Ambinaninony** ..... 270
**5.7. Iaroka au bac d'Ampitabe** ..... 272
**5.8. Petits bassins côtiers au sud du bassin de la Rianila** ..... 274
5.8.1. Le Sakanila à Tsarasambo (A = 1 700 km²) ..... 274
5.8.2. La Manampotsy à Ilaka (A = 1 280 km²) ..... 274
5.8.3. L'Ihosy à Ambamasina (A = 65 km²) ..... 274
5.8.4. La Lohariana à Maroambo (A = 158 km²) ..... 275
5.8.5. La Sahasaka à Miakara (A = 485 km²) ..... 275
6. BASSIN DU MANGORO ..... 275
**6.1. La branche mère du Mangoro** ..... 275
6.1.1. Le Mangoro à Mangoro-gare ..... 276
6.1.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 276
6.1.1.2. Apports annuels ..... 279
6.1.1.3. Crues ..... 281
*6.1.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux* ..... 281
*6.1.1.3.2. Résultats de l'enquête historique* ..... 282
6.1.1.4. Basses eaux ..... 282
6.1.1.5. Bilan hydrologique ..... 284
6.1.2. Le Mangoro à Ambodimanga (bac) ..... 286
6.1.2.1. Apports annuels ..... 287
6.1.2.2. Crues ..... 287
*6.1.2.2.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux* ..... 287
*6.1.2.2.2. Extension de l'échantillon de crues* ..... 287
6.1.2.3. Basses eaux ..... 288
6.1.3. L'Andranobe au pont Fanalamanga ..... 289
6.1.3.1. Crues ..... 289
6.1.3.2. Basses eaux ..... 290
6.1.4. La Mandraka au PK 68.68 ..... 290
6.1.4.1. Crues ..... 291
6.1.4.2. Basses eaux ..... 291
6.1.5. L'Antsapazana à la RN 2 ..... 291
6.1.5.1. Crues ..... 292
6.1.5.2. Basses eaux ..... 292

**6.2. Le bassin de l'Onive** ..... 293
6.2.1. L'Amborompotsy à Antsampandrano ..... 293
6.2.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 293
6.2.1.2. Apports annuels ..... 297
6.2.1.3. Crues ..... 298
6.2.1.4. Basses eaux ..... 299
6.2.1.5. Bilan hydrologique ..... 301
6.2.2. L'Onive à Ilempona ..... 302
6.2.3. L'Onive à Tsinjoarivo ..... 303
6.2.3.1. Relations hydropluviométriques ..... 303
6.2.3.2. Apports annuels ..... 306
6.2.3.3. Crues ..... 308
*6.2.3.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux* ..... 308
*6.2.3.3.2. Résultats de l'enquête historique* ..... 309
6.2.3.4. Basses eaux ..... 309
6.2.3.5. Bilan hydrologique ..... 311

7. BASSIN DE LA MANANJARY ..... 314
**7.1. La Mananjary à Antsindra** ..... 314
7.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 314
7.1.2. Apports annuels ..... 319
7.1.3. Crues ..... 320
7.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 320
7.1.3.2. Extension de l'échantillon de crues ..... 321
7.1.4. Basses eaux ..... 321
7.1.5. Bilan hydrologique ..... 324
**7.2. L'Ivoanana à Fatihita** ..... 325
7.2.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 326
7.2.2. Apports annuels ..... 330
7.2.3. Crues ..... 330
7.2.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 330
7.2.3.2. Extension de l'échantillon de crues ..... 331
7.2.4. Basses eaux ..... 332
7.2.5. Bilan hydrologique ..... 334

8. BASSIN DE LA NAMORONA ..... 335
**8.1. La Namorona à Vohiparara** ..... 336
8.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 336
8.1.2. Apports annuels ..... 340
8.1.3. Crues ..... 342
8.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 342
8.1.3.2. Résultats de l'enquête historique ..... 343

8.1.4. Basses eaux ..... 344
8.1.5. Bilan hydrologique ..... 346

9. BASSIN DU FARAONY ..... 346

**9.1. Le Faraony à Vohilava** ..... 346
9.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 347
9.1.2. Apports annuels ..... 351
9.1.3. Crues ..... 352
9.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 352
9.1.3.2. Résultats de l'enquête historique ..... 352
9.1.4. Basses eaux ..... 353
9.1.5 Bilan hydrologique ..... 355

**9.2. Bassins au sud du Faraony** ..... 357
9.2.1. La Matitanana à Mahasoabe ..... 357

10. BASSIN DE LA MANANARA DU SUD ..... 358

**10.1. La Mananara du sud à Marangaty** ..... 358
10.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 359
10.1.2. Apports annuels ..... 363
10.1.3. Crues ..... 363
10.1.4. Basses eaux ..... 365
10.1.5. Bilan hydrologique ..... 367

**10.2. La Sahambano à Sahambano** ..... 369

11. BASSIN DU MANAMPANIHY ..... 370

**11.1. Le Manampanily à Elanary** ..... 370

12.BASSIN DE L'EFAHO ..... 371

**12.1. L'Efaho à Fanjahira** ..... 371
12.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 371
12.1.2. Apports annuels ..... 375
12.1.3. Crues ..... 375
12.1.4. Basses eaux ..... 376
12.1.5. Bilan hydrologique ..... 378

Le sud 380

Chapitre 6

1. BASSIN DU MANDRARE ..... 381

**1.1. Le Mandrare à Andabolava amont** ..... 382
1.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 382
1.1.2. Apports annuels ..... 386

1.1.3. Crues ..... 387
1.1.4. Basses eaux ..... 388
1.1.5. Bilan hydrologique ..... 390
**1.2. Le Mandrare à Amboasary** ..... 392
1.2.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 392
1.2.2. Apports annuels ..... 396
1.2.3. Crues ..... 397
1.2.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 397
1.2.3.2. Résultats de l'enquête historique ..... 398
1.2.4. Basses eaux ..... 399
1.2.5. Bilan hydrologique ..... 401
**1.3. La Mananara à Bevia** ..... 403
1.3.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 403
1.3.2. Apports annuels ..... 407
1.3.3. Crues ..... 408
1.3.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 408
1.3.3.2. Extension de l'échantillon de crues ..... 409
1.3.4. Basses eaux ..... 409
1.3.5. Bilan hydrologique ..... 411
**1.4. Autres stations du bassin** ..... 412
1.4.1. Mandrare à Andetsy ..... 413
1.4.2. Mandrare à Ifotaka ..... 414
1.4.3. Andratina à Marotsiraka ..... 414
1.4.4. Besaly à Amboasary est ..... 415
1.4.5. Conclusion ..... 416
2. BASSIN DU MANAMBOVO ..... 417
**2.1. Le Manambovo à Tsihombe** ..... 417
2.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 417
2.1.2. Apports annuels ..... 421
2.1.3. Crues ..... 422
2.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 422
2.1.3.2. Résultats de l'enquête historique ..... 423
2.1.4. Basses eaux ..... 423
2.1.5. Bilan hydrologique ..... 423
3. BASSIN DE LA MENARANDRA ..... 425
**3.1. La Menarandra à Tranoroa** ..... 426
3.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 426
3.1.2. Apports annuels ..... 429
3.1.3. Crues ..... 431
3.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de hautes eaux à l'échelle village ..... 431
3.1.3.2. Résultats de l'enquête historique ..... 432

3.1.4. Basses eaux ..... 433
3.1.5. Bilan hydrologique ..... 435
**3.2. Autres observations sur le bassin** ..... 438
3.2.1. La Menarandra à Bekily ..... 438
3.2.2. Le Menakompy ..... 440
3.2.3. Le Manambahi ..... 441
3.2.4. Bassin versant de Tranoroa ..... 441
4. BASSIN DE LA LINTA ..... 442

## Le versant occidental 444

Chapitre 7

1. BASSIN DE L'ONILAHY ..... 450
**1.1. L'Onilahy à Tongobory** ..... 450
1.1.1. Apports annuels ..... 453
1.1.2. Crues ..... 453
1.1.3. Basses eaux ..... 454
1.1.4. Bilan hydrologique ..... 455
**1.2. Autres observations sur le bassin** ..... 456
1.2.1. Le Mangoky à Betroka ..... 456
1.2.2. L'Isoanala ..... 457
2. BASSIN DE LA FIHERENANA ..... 458
3. BASSIN DU MANGOKY ..... 460
**3.1. Bassin de l'Ihosy** ..... 461
3.1.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 462
3.1.2. Apports annuels ..... 465
3.1.3. Crues ..... 467
3.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 467
3.1.3.2. Résultats de l'enquête historique ..... 468
3.1.4. Basses eaux ..... 468
3.1.5. Bilan hydrologique ..... 470
**3.2. Bassin du Zomandao** ..... 472
3.2.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 472
3.2.2. Apports annuels ..... 476
3.2.3. Crues ..... 477
3.2.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux de l'échelle village ..... 477
3.2.3.2. Extension de l'échantillon de crues ..... 478
3.2.4. Basses eaux ..... 479
3.2.5. Bilan hydrologique ..... 481

**3.3. Bassin de la Manantanana** ..... 483
3.3.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 483
3.3.2. Apports annuels ..... 487
3.3.3. Crues ..... 488
3.3.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 488
3.3.3.2. Extension de l'échantillon de crues ..... 489
3.3.4. Basses eaux ..... 490
3.3.5. Bilan hydrologique ..... 492
3.3.6. Mananantana à Iarintsena ..... 494
**3.4. Bassin de la Matsiatra** ..... 494
3.4.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 495
3.4.2. Apports annuels ..... 499
3.4.3. Crues ..... 500
3.4.4. Basses eaux ..... 501
3.4.5. Bilan hydrologique ..... 503
**3.5. Le Mangoky au Banian** ..... 505
3.5.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 506
3.5.2. Apports annuels ..... 512
3.5.3. Crues ..... 512
3.5.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 512
3.5.3.2. Échantillon des crues et enquête historique ..... 513
3.5.3.3. Le Mangoky à Bevoay : mesure des crues maximales ..... 514
3.5.4. Basses eaux ..... 515
3.5.5. Bilan hydrologique ..... 517
3.5.6. Bilan global du bassin ..... 519
3.5.7. Transports solides ..... 520
4. BASSIN DE LA MORONDAVA ..... 521
**4.1. La Morondava à Dabara** ..... 521
4.1.1. Débits observés et calculés ..... 522
4.1.2. Apports annuels ..... 523
4.1.3. Crues ..... 525
4.1.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux ..... 525
4.1.3.2. Résultats de l'enquête historique ..... 526
4.1.4. Basses eaux ..... 526
4.1.5. Bilan hydrologique ..... 527
**4.2. La Sakamaly à Migodo** ..... 528
**4.3. La Betsiroka au barrage** ..... 529
5. BASSIN DE LA TSIRIBIHINA ..... 530
**5.1. Bassin de la Mania** ..... 531

5.1.1. Sahanivotry au PK 197 ..... 531
5.1.1.1. Débits moyens mensuels et annuels ..... 532
5.1.1.2. Apports annuels ..... 535
5.1.1.3. Crues ..... 535
5.1.1.4. Basses eaux ..... 536
5.1.1.5. Bilan hydrologique ..... 538
5.1.2. Manandona à Sahanivotry ..... 539
5.1.2.1. Débits moyens mensuels et annuels ..... 539
5.1.2.2. Apports annuels ..... 542
5.1.2.3. Crues ..... 543
*5.1.2.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux* ..... 543
*5.1.2.3.2. Résultats de l'enquête historique* ..... 544
5.1.2.4. Basses eaux ..... 544
5.1.2.5. Bilan hydrologique ..... 546
5.1.3. La Mania à Fasimena ..... 547
5.1.3.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 548
5.1.3.2. Apports annuels ..... 552
5.1.3.3. Crues ..... 553
*5.1.3.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux* ..... 553
*5.1.3.3.2. Résultats de l'enquête historique* ..... 553
5.1.3.4. Basses eaux ..... 554
5.1.3.5. Bilan hydrologique ..... 556
5.1.4. La Sandrandahy à Sandrandahy ..... 558
5.1.5. La Mania à Sandrandahy ..... 559
5.1.6. L'Ivato à Ivato ..... 561
5.1.7. La Mania à Ankotrofotsy ..... 562
**5.2. Bassin de la Mahajilo** ..... 563
5.2.1. La Bizy à Ifanja ..... 563
5.2.2. La Kotombolo à Ifanja ..... 564
5.2.3. La Mahajilo à Miandrivazo ..... 566
**5.3. Bassin de la Sakeny** ..... 567
5.3.1. Manambolo à Ambatolahy ..... 568
5.3.2. Sakeny à Andraketa ..... 568
5.3.3. Manampanda à Malaimbandy ..... 569
**5.4. La Tsiribihina à Betomba** ..... 569
5.4.1. Débits moyens mensuels et annuels ..... 570
5.4.2. Apports annuels ..... 573
5.4.3. Crues ..... 574
5.4.3.1. Évaluation des débits de hautes et de très hautes eaux ..... 574
5.4.3.2. Résultats de l'enquête historique ..... 575
5.4.4. Basses eaux ..... 575
5.4.5. Bilan hydrologique ..... 578
5.4.6. Bilan global du bassin ..... 580

6. BASSINS DU NORD-OUEST ..... 580
**6.1. La Demoka à Bevatry** ..... 581
**6.2. La Kimazimazy à Soatanana** ..... 582
**6.3. La Tsiombikary à Tsiombikary** ..... 583
**6.4. La Namela à Antanandeva** ..... 584
**6.5. La Mahavavy du sud** ..... 585
7. BASSIN DE LA BETSIBOKA ..... 586
**7.1. Le haut bassin de l'Ikopa** ..... 588
7.1.1. La Varahina du sud à Tsiazompaniry ..... 590
7.1.2. Manandriana ..... 593
7.1.3. Varahina du nord à Mantasoa ..... 594
7.1.4. Ikopa à Antelomita ..... 595
7.1.5. Ikopa à Ambohimanambola ..... 596
7.1.5.1. Débits moyens mensuels ..... 596
7.1.5.2. Apports annuels ..... 599
7.1.5.3. Crues ..... 600
*7.1.5.3.1. Mode d'évaluation des débits de hautes eaux* ..... 600
*7.1.5.3.2. Validité de l'échantillon de crues* ..... 601
7.1.5.4. Basses eaux ..... 601
7.1.5.5. Bilan hydrologique ..... 602
7.1.6. Ikopa à Anosizato ..... 602
7.1.7. Ikopa à Mahitsykely ..... 604
7.1.7.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 604
7.1.7.2. Apports annuels ..... 608
7.1.7.3. Crues ..... 609
*7.1.7.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux* ..... 609
*7.1.7.3.2. Résultats de l'enquête historique et échantillon de crues* ..... 610
7.1.7.4. Basses eaux ..... 611
7.1.7.5. Bilan hydrologique ..... 612
7.1.8. Mamba au pont de Sabotsy ..... 613
7.1.9. Sisaony à Andramasina ..... 614
7.1.9.1. Relations hydropluviométriques mensuelles ..... 614
7.1.9.2. Apports annuels ..... 619
7.1.9.3. Crues ..... 619
7.1.9.4. Basses eaux ..... 620
7.1.9.5. Bilan hydrologique ..... 622
7.1.10. Sisaony au PK 22 ..... 624
7.1.11. Sisaony à Anpitatafika ..... 625
7.1.12. Andromba à Behenjy ..... 626

7.1.13. Andromba à Tsinjony ..... 627
7.1.13.1. Débits mensuels et relations hydropluviométriques ..... 628
7.1.13.2. Apports annuels ..... 632
7.1.13.3. Crues ..... 633
*7.1.13.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux* ..... 633
*7.1.13.3.2. Extension de l'échantillon de crues* ..... 634
7.1.13.4. Basses eaux ..... 634
7.1.13.5. Bilan hydrologique ..... 636
7.1.14. Andromba au pont de la route d'Arivonimamo ..... 638
7.1.15. Katsaoka à Niakotsorano ..... 639
7.1.16. Tafaina ..... 640
7.1.17. Ikopa à Bevomanga ..... 641
7.1.17.1. Débits mensuels et relations hydropluviométriques ..... 641
7.1.17.2. Apports annuels ..... 645
7.1.17.3. Crues ..... 646
*7.1.17.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux* ..... 646
*7.1.17.3.2. Résultats de l'enquête historique* ..... 647
7.1.17.4. Basses eaux ..... 648
7.1.17.5. Bilan hydrologique ..... 650
7.1.17.6. Caractéristiques du haut bassin ..... 652
**7.2. Le bassin inférieur de l'Ikopa** ..... 653
7.2.1. Ikopa au bac de Fiadanana ..... 653
7.2.1.1. Débits mensuels et relations hydropluviométriques ..... 653
7.2.1.2. Apports annuels ..... 657
7.2.1.3. Crues ..... 658
7.2.1.4. Basses eaux ..... 659
7.2.1.5. Bilan hydrologique ..... 661
7.2.2. Ikopa à Antsatrana ..... 662
7.2.2.1. Débits moyens mensuels et relations hydropluviométriques ..... 663
7.2.2.2. Apports annuels ..... 667
7.2.2.3. Crues ..... 668
*7.2.2.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux* ..... 668
*7.2.2.3.2. Résultats de l'enquête historique* ..... 669
7.2.2.4. Basses eaux ..... 670
7.2.2.5. Bilan hydrologique ..... 672
**7.3. Bassin de la Betsiboka** ..... 674
7.3.1. Isinko à Ambodiroka ..... 674
7.3.1.1. Débits mensuels et relations hydropluviométriques ..... 674
7.3.1.2. Apports annuels ..... 678
7.3.1.3. Crues ..... 679
7.3.1.4. Basses eaux ..... 680
7.3.1.5. Bilan hydrologique ..... 682

7.3.2. Bassin d'Ankaboka ..... 684
7.3.3. Betsiboka à Ambodiroka ..... 685
7.3.3.1. Débits moyens mensuels et relations hydropluviométriques ..... 686
7.3.3.2. Apports annuels ..... 690
7.3.3.3. Crues ..... 691
*7.3.3.3.1. Mode d'évaluation des débits de très hautes eaux* ..... 691
*7.3.3.3.2. Résultats de l'enquête historique* ..... 691
7.3.3.4. Basses eaux ..... 692
7.3.3.5. Bilan hydrologique ..... 694
**7.4. Transports solides** ..... 696
**7.5. Kamoro et petits affluents du delta de la Betsiboka** ..... 697
7.5.1. Kamoro à la RN 4 ..... 697
7.5.2. L'Andranomandevy ..... 698
7.5.3. Le Marovoay ..... 699
7.5.4. La Karambo ..... 699
8. BASSIN DE LA MAHAJAMBA ..... 700
9. BASSIN DE LA SOFIA ..... 701
9.1. Haut bassin de la Sofia ..... 702
9.1.1. La Sofia à Antafiatsalana ..... 702
9.1.2. Sandrangita à Kalandy ..... 703
9.1.3. Mangaraha à Mandritsara ..... 703
9.1.4. Mangaraha à Ambodiaviavy ..... 704
9.1.5. Amboaboa à Andrafiamamy ..... 704
9.1.6. Salohy à Andampihely ..... 704
**9.2. Bassin inférieur de la Sofia** ..... 704
9.2.1. La Sofia à Maroala ..... 704
9.2.2. La Sofia au pont de la RN 6 ..... 705
9.2.3. La Bemarivo à Andranomiditra ..... 705
9.2.4. L'Anjobony à Marovato ..... 706

Synthèse régionale des régimes hydrologiques 707

Troisième partie

Les apports annuels et leurs distributions mensuelles 710

Chapitre 8

1. CHRONIQUE DES APPORTS ANNUELS ..... 710
**1.1. Bassins du Tsaratanana** ..... 715

**1.2. Bassins du centre-nord** ..... 715
**1.3. Bassins du centre-sud** ..... 716
**1.4. Bassins du sud** ..... 717
2. ORGANISATION SPATIALE DES APPORTS ANNUELS ..... 717
**2.1. Les ensembles régionaux** ..... 725
**2.2. Influence de l'orientation du bassin** ..... 726
**2.3. Irrégularité interannuelle** ..... 727
**2.4. Asymétrie et aplatissement des échantillons** ..... 728
3. DISTRIBUTION MENSUELLE DES ÉCOULEMENTS ..... 728
4. MÉCANISMES DES BASSINS ..... 736

Les crues 739

Chapitre 9

1. ESTIMATION DES DÉBITS MAXIMUMS DE CRUE ..... 747
**1.1. Les formules empiriques** ..... 747
1.1.1. Le laminage des crues ..... 750
1.1.2. Nature des formations géologiques et couverture végétale ..... 750
**1.2. Estimation des débits décennaux de crue** ..... 751
**1.3. Valeurs « extrêmes » des crues et courbe enveloppe** ..... 762
2. COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT ..... 764
3. FORME DES CRUES ..... 765
4. PRÉCIPITATIONS ET CRUES CYCLONIQUES ..... 768
**4.1. Généralités** ..... 771
**4.2. Précipitations exceptionnelles** ..... 772
4.2.1. Hauteurs journalières ..... 772
4.2.2. Types d'averses et répartitions ..... 772
4.2.3. Intensités ..... 772
**4.3. Trajectoires et crues cycloniques** ..... 773
4.3.1. Le cyclone tropical d'Andevoranto (janvier 1954) ..... 774
4.3.2. Le cyclone tropical de Mananara nord (mars 1959) ..... 776
4.3.3. Le cyclone tropical Eugénie (février 1972) ..... 779
4.3.4. Interprétation des résultats d'observations ..... 779

4.3.5. Trajectoires et crues anciennes ..... 780
4.3.5.1. Cyclone tropical de Soalala ( 16-19/01/1945) ..... 780
4.3.5.2. Dépression tropicale de Nosy Varika ..... 780
4.3.5.3. Cyclone tropical de Foulpointe ..... 780
4.3.5.4. Cyclone tropical de Vohemar ..... 780
4.3.6. Le cyclone Félicie ..... 781

Les basses eaux 783

Chapitre 10

1. RÉPARTITION SPATIALE DES DÉBITS D'ÉTIAGE ..... 786
2. RAPPORTS DU DÉBIT MINIMAL JOURNALIER AU MODULE ..... 788
**2.1. q/Q ≤ 6 %** ..... 788
**2.2. 6 % < q/Q < 11 %** ..... 789
**2.3. 11 % < q/Q < 18 %** ..... 789
**2.4. 18 % < q/Q < 26 %** ..... 789
**2.5. 27 % < q/Q** ..... 789
3. RÉSERVES DRAINÉES ET VITESSES DE DRAINAGE ..... 790
4. DATES D'OBSERVATION DE L'ÉTIAGE MINIMAL ANNUEL ..... 791
5. IRRÉGULARITÉ INTERANNUELLE ..... 796

Grandes unités naturelles hydrologiques 797

Chapitre 11

1. RÉGIMES DU NORD ..... 799
**1.1. L'extrême nord et la montagne d'Ambre** ..... 799
**1.2. Le Tsaratanana et ses bordures** ..... 800
**1.3. Le secteur nord-est** ..... 800
2. RÉGIMES DU VERSANT EST ..... 801
3. RÉGIMES DES HAUTES TERRES ..... 802
**3.1. Les hautes terres centrales** ..... 802
**3.2. Les hautes terres méridionales (centre sud)** ..... 802

4. RÉGIMES DES PENTES OCCIDENTALES ..... 803
**4.1. Le nord-ouest et l'ouest** ..... 803
**4.2. Le sud-ouest** ..... 804
5. RÉGIMES DU SUD ..... 804
6. LES RÉGIMES MIXTES ..... 805

Conclusion 809

Bibliographie 813

Annexes 823

**Annexe 1**
PRÉCIPITATIONS ET LAMES ÉCOULÉES ANNUELLES
SUR LES BASSINS VERSANTS (P ET H EN MM) ..... 824

**Annexe 2**
FICHES RÉCAPITULATIVES DES CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES
DES PRINCIPALES STATIONS ..... 832

Tables des matières 855

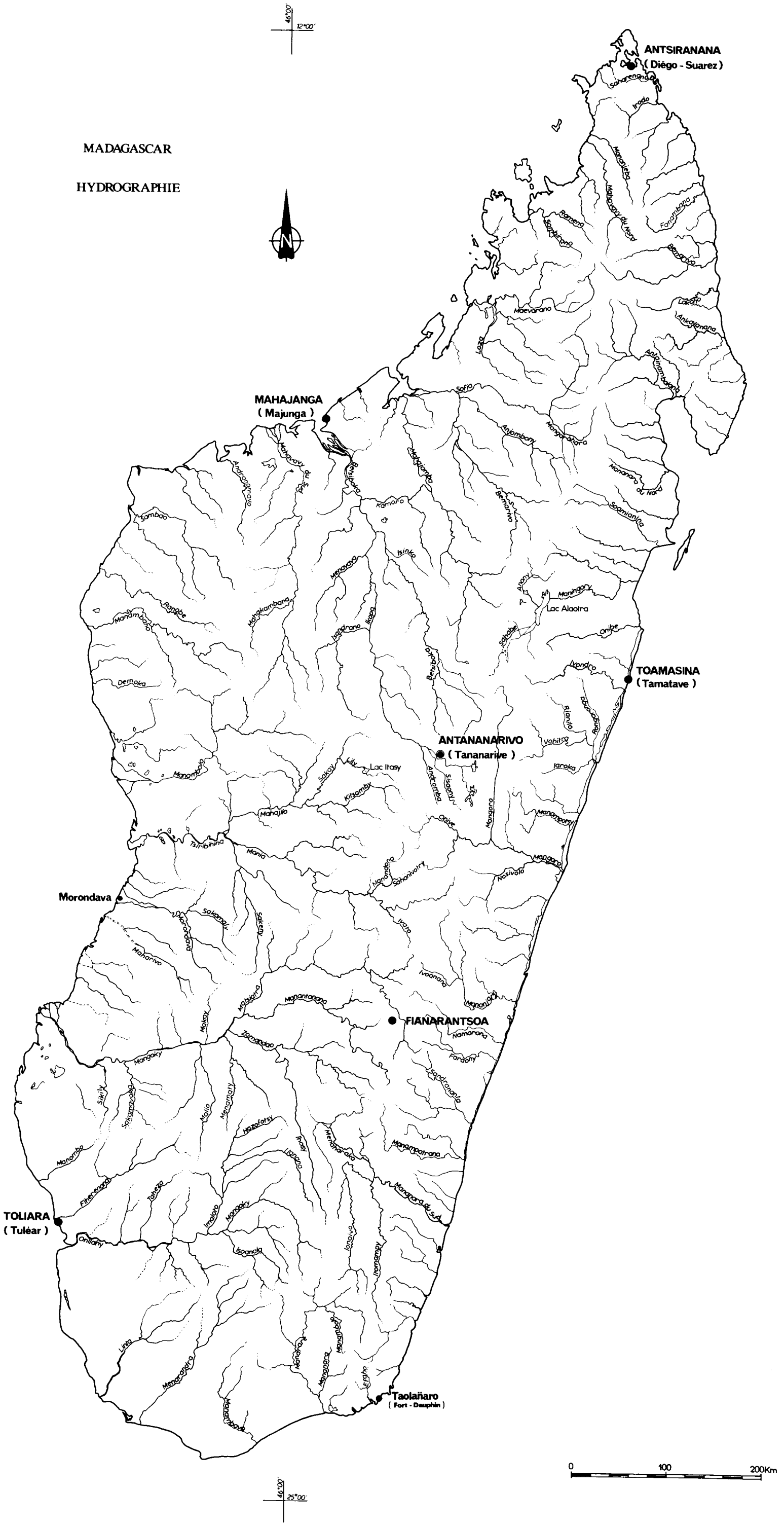
Mise en page PAO et flashage : Anadine Compo - Montpellier
Photogravure trait : Publicep - Montpellier
Photogravure couleurs : D2B - Montpellier
Achevé d'imprimer sur les presses
de l'imprimerie Publicep à Montpellier
Reliure : Sirc - Marigny-le-Chatel

Dépôt légal : mars 1993

Fleuves et rivières de Madagascar - Paris 1993

# MADAGASCAR

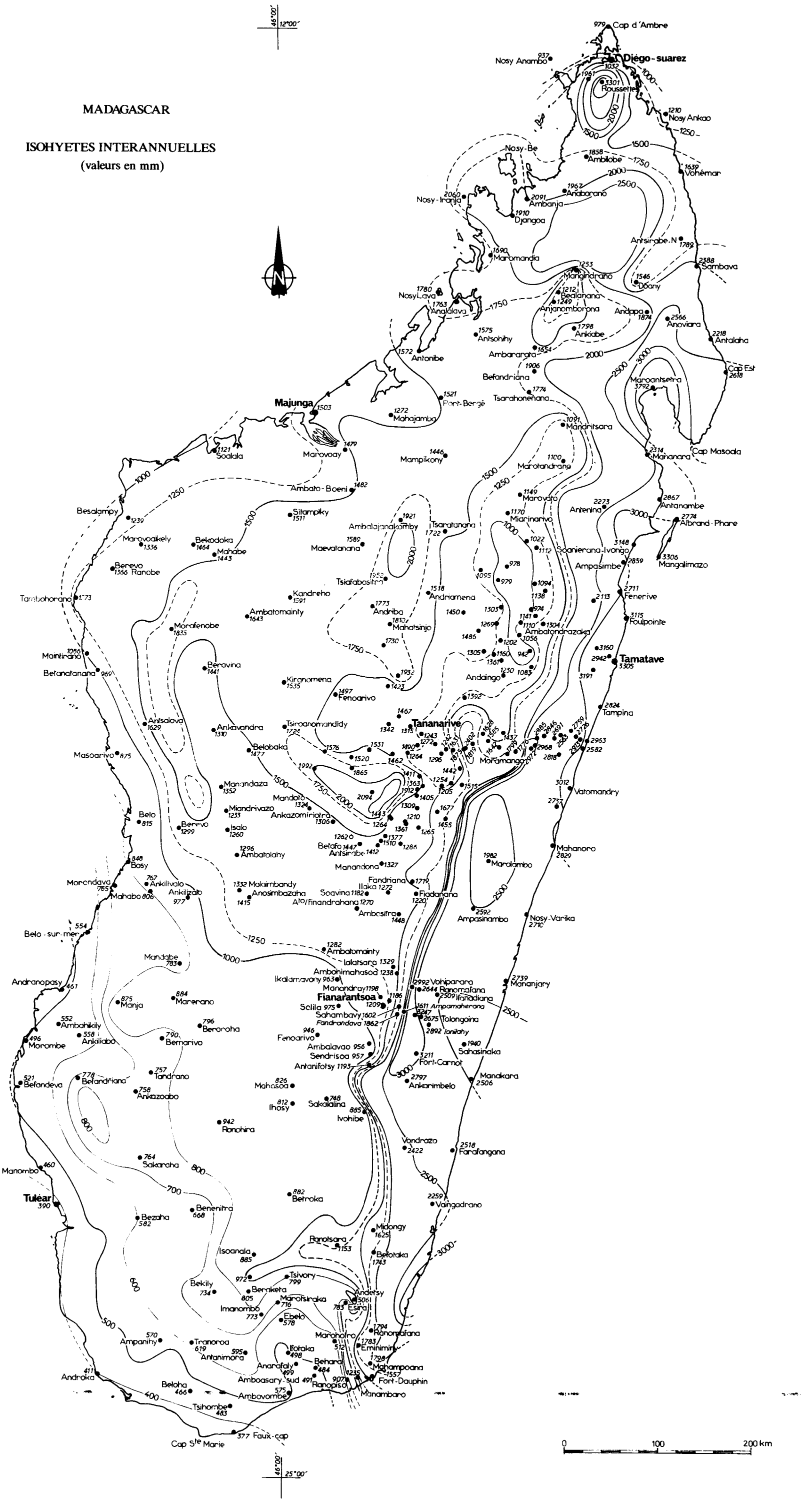
## HYDROGRAPHIE




Dessinée par RAKOTONDRAMANANA Modeste

# MADAGASCAR

## ISOHYETES INTERANNUELLES
(valeurs en mm)




Dessinée par RAKOTONDRAMANANA M.

Etablie par FERRY L. - ROBISON L.

Madagascar est une des plus grandes îles du monde (590 000 km²). L'influence de deux centres principaux d'action météorologique (la zone des basses pressions intertropicales au nord, la cellule océanique permanente de hautes pressions de l'archipel des Mascareignes au sud) se traduit par l'alternance de deux saisons bien tranchées : la saison chaude et humide en été austral (de novembre à mars) et la saison fraîche et sèche (d'avril à octobre). Ce climat tropical austral est caractérisé par un flux d'alizés de secteur est et un contre-flux d'alizés déviés de secteur nord-ouest. Des incursions polaires et le passage fréquent de cyclones tropicaux compliquent ce schéma général.

La géomorphologie de l'île avec un socle ancien cristallin d'altitude moyenne élevée (supérieure à 1 000 mètres) bordé de formations sédimentaires basses, le développement de latérites épaisses dans les régions les mieux arrosées, l'opposition de couverts végétaux variés (forêt ombrophile dense et savanes) confèrent aux régimes hydrologiques de l'île une grande diversité.

L'ouvrage, synthèse des régimes hydropluviométriques de Madagascar, a pour objectifs d'établir la géographie hydroclimatologique de l'île, de dresser un bilan d'ensemble des ressources en eaux de surface et de fournir le contexte permettant de valoriser les différentes études, le plus souvent brèves et partielles, qui précèdent la conception et la réalisation des divers aménagements hydrauliques ou systèmes d'eau.

ISSN 0335-6906
ISBN 2-7099-1126-4