

RESSOURCES EN EAU

Synthèse préparée par :

le **CNRE**
la **DMH**
la **JIRAMA**
le **MEM**
L'OBSERVATOIRE de GEOPHYSIQUE
L'ORSTOM
la **SOMEAH**

I. INTRODUCTION

II. RESSOURCES EN EAU DE SURFACE

1. ASPECTS INSTITUTIONNELS DE L'HYDROLOGIE ET MOYENS

- 1.1. Historique
- 1.2. Les ressources humaines et matérielles

2. LES RESEAUX D'OBSERVATION HYDROLOGIQUE - ETAT ACTUEL

- 2.1. Le réseau de base d'observation hydrologique géré par la DMH
- 2.2. Les autres réseaux actuels

3. L'ARCHIVAGE ET LE TRAITEMENT DES DONNEES

- 3.1. Localisation et type de données
- 3.2. Les outils de traitement

4. RESULTATS DISPONIBLES ET SYNTHESSES

- 4.1. Documents anciens
- 4.2. Travaux récents

5. TRAVAUX EN COURS

6. QUESTIONS ET PERSPECTIVES

- 6.1. Quels réseaux, quelle hydrologie pour demain ?
- 6.2. Le démarrage d'un programme multidisciplinaire national d'étude de l'érosion semble urgent

7. FLEUVES ET RIVIERES DE MADAGASCAR

7.1. Analyse des régimes hydrologiques des eaux de surface

7.1.1 Le réseau hydrographique

7.1.2. Hydrométrie : observations et mesures

7.1.3 Formation des écoulements

7.1.3.1. Le Faraony au bac de Vohilava

7.1.3.2. La Mananara à Bevia

7.1.3.3. La Betsiboka à Ambodiroka

7.2. REGIONALISATION DES REGIMES HYDROLOGIQUES

7.2.1. Les apports annuels

7.2.2. Distribution mensuelle des écoulements

7.2.3. Les basses eaux

7.2.4. Les crues

7.2.5. Grandes unités naturelles hydrologiques

7.2.6. Conclusions

7.3. BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

III. RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

1. ORGANISATION DE L'HYDROGEOLOGIE A MADAGASCAR (aspects institutionnels et moyens)

2. LES RESSOURCES HUMAINES ET MATERIELLES

2.1. Les ressources humaines

2.2. Les ressources matérielles

3. HISTORIQUE DES TRAVAUX ET PRINCIPAUX RESULTATS

3.1. L'Extrême-Sud

3.2. La zone cristalline à faible pluviométrie de la région Sud

3.3. La région de Toliara

3.4. La région de Morondava

3.5. La région de Mahajanga

3.6. La côte Est

3.7. Les Hauts Plateaux du centre

3.8. Le Nord de Madagascar

4. TRAVAUX EN COURS ET BESOINS EN RECHERCHE

4.1. La Banque de Données Hydrogéologiques de Madagascar

4.2. Réalisation des cartes hydrogéologiques et piézométriques

4.3. Etude des potentialités aquifères des nappes d'altérites et des nappes de socle fissuré

- 4.4. Etude hydrogéologique en zone sédimentaire
- 4.5. Prévision et estimation des débits d'étiage
- 4.6. Etude de la pollution des nappes aquifères
- 4.7. Effets du couvert végétal sur les nappes
- 4.8. Méthode de mesure et calcul en hydrogéologie
- 4.9. Mise en place d'un réseau de base d'observations hydrogéologiques

IV. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

I. INTRODUCTION

La maîtrise des ressources en eau, faut-il le rappeler, est un facteur capital pour le développement des activités sociales, économiques, agricoles et industrielles. Une exploitation rationnelle nécessite la connaissance de toutes les ressources en eau sous quelque forme que ce soit. Qu'elles fussent de surface ou souterraines, les ressources en eau doivent être intégrées à une hydrologie continentale globale, décloisonnant les disciplines traditionnelles.

Madagascar, de par ses conditions physiques montre une grande hétérogénéité dans la répartition et le potentiel de ses ressources. Certaines régions apparaissent a priori défavorisées, d'autres n'exploitent peut être pas toutes les ressources disponibles. Dans tous les cas, la coordination de l'exploitation de toutes les ressources en eau est donc indispensable pour une mise en valeur optimale de ce patrimoine qu'est l'eau.

II. RESSOURCES EN EAU DE SURFACE

II.1. ASPECTS INSTITUTIONNELS DE L'HYDROLOGIE ET MOYENS

II.1.1. Historique

- Jusqu'en 1948 - 1949 :

Les observations et mesures hydrométriques à Madagascar sont relativement anciennes. Jusqu'en 1948-1949, elles étaient réalisées de manière ponctuelle et modeste en relation avec des études d'aménagement (centrales hydro-électriques d'Antelomita I/1909 et d'Antelomita II/1928 sur l'Ikopa supérieure, compagnie Nosybéenne sur le Sambirano/1925, aménagement hydro-électrique de la Vohitra à Rogez/1928, retenue de Mantsoa sur la Varahina du nord/1938, etc.).

La Banque de Données Hydropluviométriques de Madagascar (BDHM/cf.II-4) fait état avant 1932 de moins d'une dizaine de stations pour lesquelles des hauteurs d'eau ont été observées (région d'Antananarivo principalement) de manière très inégale par notamment, les Travaux Publics et l'EDF ainsi que les organismes chargés de l'exécution des projets ou de la gestion des ouvrages pour le compte du Ministère de l'Équipement

- De 1949 à 1960

C'est à partir de 1949/1950 que l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer (ORSTOM) a commencé à installer de manière systématique des stations d'observations hydrologiques et éditait avec l'EDF les premiers annuaires hydrologiques de la France d'Outre - Mer. Un réseau d'observations hydrologiques voyait donc le jour et prenait dès 1960, une extension nationale.

- De 1960 à 1971 :

Après l'indépendance, les accords de coopération avec la France ont maintenu l'action de l'ORSTOM à Madagascar sous la tutelle d'un Comité rattaché à la Vice-Présidence (Comité de la Recherche Scientifique et Technique). La section hydrologique de l'Institut de Recherche Scientifique de Madagascar (IRSM/ORSTOM) a donc continué à installer de très nombreuses stations hydrologiques dont beaucoup par le biais de projets d'aménagement et à gérer ce qui, de fait, allait devenir le réseau de base d'observations hydrologiques.

Parallèlement, de plus en plus d'études étaient initiées par les ministères utilisateurs et échappaient à la main mise de l'ORSTOM dans ce domaine. La centralisation des observations brutes et des résultats (inaccessibles ou ignorés) devenait donc impossible, faute d'une institution gouvernementale et de textes législatifs fixant son rôle de coordinateur (l'ORSTOM, organisme étranger de recherche, ne pouvait évidemment pas continuer à jouer ce rôle).

C'est ainsi, que le Gouvernement de l'époque a décidé de confier la gestion du réseau d'observations hydrologiques au Ministère de Travaux Publics et des Communications (MTPC) et, plus précisément, à son Service de la Météorologie (circulaire du Comité de la Recherche Scientifique et Technique du 25/02/1971 signée par le Vice-Président du Gouvernement).

- De 1971 à 1975

La circulaire de 1971 a introduit la notion de Service Public de l'Hydrologie et a permis la création de la Division de l'Hydrologie au sein du Service de la Météorologie (MTPC). Cette circulaire a été renforcée par un texte législatif qui tendait à assurer la coordination dans le domaine de l'hydrologie et permettait la création d'un centre national de documentation météorologique et hydrologique au Service de la Météorologie (arrêté n° 0030 du 05/01/1972).

La création de la Division de l'Hydrologie à partir de l'équipe TP/ORSTOM déjà en place n'a pratiquement rien changé au rôle de la section hydrologique de l'ORSTOM qui y affectait une partie de son personnel pour continuer à diriger les opérations et à archiver les observations à l'IRSM. Par ailleurs, malgré la diffusion de la circulaire et de l'arrêté ci-dessus mentionnés, les observations de terrain et les rapports d'étude menés par d'autres ministères disposant de réseaux d'observation mettaient beaucoup de temps à parvenir à l'institution gouvernementale nouvellement créée, lorsqu'ils étaient transmis.

- A partir de 1975 :

Ce n'est qu'à partir de 1975-1976, date à laquelle l'ORSTOM devait interrompre presque toutes ses activités à Madagascar, que la situation, au moins vis-à-vis de l'ORSTOM, devait s'éclaircir avec la prise en charge effective par la Division de l'Hydrologie du réseau d'observation hydrologique. Parallèlement, un Ministère chargé de la Recherche fut créé et l'ancien grand Ministère des Travaux Publics et des Communications démantelé en plusieurs Ministères dont celui des Transports qui prenait notamment sous sa tutelle le Service de la Météorologie (et la Division de l'Hydrologie).

La volonté de coordination exprimée par la circulaire de 1971 et l'arrêté de 1972 se trouva rapidement dépassée par les différents changements de structure et d'attribution. Ainsi, les archives de l'ancienne section hydrologique de l'IRSM (ORSTOM) n'ont été transférées à la Division de l'Hydrologie que sous forme de copie et n'auraient peut être pas été intégralement transférées.

Le problème de la coordination des observations et des études hydrologiques ne se situait donc plus entre organismes étrangers (ORSTOM, SOGREA, SCET...) et gouvernement malgache. Dans cette nouvelle situation, alors que les prérogatives de la Division de l'Hydrologie auraient dû être claires, des textes spécifiques à chaque département ministériel apparurent favorisant la création de réseaux d'observation parallèles dont ceux du Génie Rural et de la JIRAMA. Ainsi, l'ORSTOM, agissant en qualité de bureau d'étude, a mené pour le compte du Ministère de l'Agriculture principalement des études de grande envergure (Alaotra et Didy: 1976-1980 puis 1984-1987; étude à usage agricole sur l'ensemble de Madagascar: 1980-1984; Opération Micro-hydraulique: 1979-1980; Tsiribihina: 1980-1982 ...).

Vers le milieu des années 1980, suite aux conditions imposées par les bailleurs de fonds qui devaient financer le programme national de la Décennie Internationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement, la question de la coordination dans le domaine des ressources en eau fut de nouveau à l'ordre du jour. La création du Comité National de l'Eau et de l'Assainissement (CNEA), constitué de représentants de chaque organisme chargé de l'eau n'a malheureusement pas pu donner à la Division de l'Hydrologie (devenue Service en 1987) les moyens et l'importance qu'elle méritait. C'est donc à l'initiative du Service de l'hydrologie qu'un arrêté rectificatif de celui de 1972 (mise à jour) est paru officiellement le 21/02/1992.

L'historique précédent montre clairement le rôle important qu'a tenu l'ORSTOM dans le domaine de l'hydrologie de surface à Madagascar pendant plus de quarante ans avec quelques épisodes flous entre 1970 et 1986. La compétence de cet institut français sur l'hydrologie malgache et les liens qu'il a développés avec la Direction de la Météorologie et de l'Hydrologie à partir de 1985 ont permis la signature d'un protocole de coopération scientifique entre le MRSTD, le MTMT et l'ORSTOM le 27/04/1987. Cet accord spécifique, destiné à promouvoir les recherches dans le domaine de l'hydrologie, s'inscrit dans le cadre du protocole de coopération scientifique signé par le MRSTD et l'ORSTOM le 12/06/1986 (accord fixant les conditions de coopération entre le Gouvernement malgache et l'ORSTOM).

- Etat actuel :

- Le Comité National de l'Eau et de l'Assainissement (CNEA) est chargé de la coordination des actions dans le domaine de l'eau (eaux de surface et eaux souterraines).
- La Direction de la Météorologie et de l'Hydrologie (DMH) placée sous la tutelle du Ministère des Transports et de la Météorologie (MTM) est l'organisme public chargé de la gestion et de l'exploitation :
 - . du réseau de base d'observation hydrologique,
 - . de la banque nationale de données hydrologiques et climatologiques,
 - . du centre national de documentation hydrologique,
 - . du système d'annonce des crues.

La Direction a également pour mission de :

- . publier les résultats (annuaires, études statistiques ...),
- . satisfaire les besoins des utilisateurs en données et études hydrologiques (en fonction des demandes et des moyens disponibles ou mis à disposition).

Ces tâches sont assurées au niveau de son Service de l'Agrométéorologie et de l'Hydrologie et de ses Brigades Hydrologiques Provinciales (2 en 1992)

- La Recherche en matière d'Eaux Continentales est placée sous la tutelle du Ministère de la Recherche Scientifique (MRS). Les programmes y afférant sont menés au sein du Centre National de Recherches sur l'Environnement (CNRE avec l'IRNT et le LRSAE) et du Centre National de Recherches Appliquées au Développement Rural (FOFIFA).
- La JIRAMA issue de la fusion de la Société d'Energie de Madagascar et de la Société Malgache de l'Electricité et de l'Eau est chargée de la production, du transport et de la distribution d'électricité et de l'eau potable. Sa cellule

hydrologique a pour vocation de fournir les éléments nécessaires aux études (projets) et à l'exploitation des ouvrages. En fonction de ses besoins, elle fait appel à des services extérieurs et notamment à ceux de la DMH.

- Le Ministère de l'Agriculture (MINAGRI) a développé au sein de la Direction de l'Infrastructure Rurale (DIR/Génie Rural) notamment une cellule de l'hydrologie pour les besoins de l'agriculture (périmètres irrigués). Il a recours à des bureaux d'étude pour des études particulières.

II.1.2. Les ressources humaines et matérielles

Les ressources humaines et matérielles sont en relation directe avec l'historique précédent.

Jusqu'en 1975, les moyens humains et matériels étaient suffisants pour assurer une extension progressive du réseau d'observation; extension qui, rappelons le, est principalement liée aux projets d'aménagement. Les ressources humaines et matérielles étaient de plusieurs origines:

- EDF, ORSTOM (5 à 10 personnes)
- Direction Générale des Travaux Publics
- Subvention du Gouvernement pour la gestion du réseau de base

En 1964 par exemple, 15 personnes travaillaient sur l'exploitation d'une soixantaine de stations hydrologiques. Cette équipe disposait pour cela de moyens relativement importants (4 véhicules de terrain, 2 remorques, 2 canots pneumatiques, appareils de jaugeages en quantité suffisante...) et d'un budget de 13.196.700 Fmg qui pour l'époque était considérable. Ainsi, les rapports d'activité font état de 525 jours de tournée et de déplacement avec une moyenne de 90 jours pour chaque hydrologue.

C'est entre 1976 et 1986 (10 ans) que l'hydrologie malgache a connu les plus graves difficultés. Avec le retrait de l'ORSTOM et de ses moyens, la Division de l'Hydrologie ne pouvait plus compter que sur le maigre budget du Service de la Météorologie, dont les priorités n'étaient pas toujours en faveur de la Division, qui ne travaillait pratiquement plus que pour la prévision des crues de la Plaine d'Antananarivo (financement ciblé). Dans cette période, la Division de l'Hydrologie n'a dû se contenter que de recueillir les données des stations encore en service et de les traiter occasionnellement sur demande. Mais, faute de jaugeage, certaines de ces stations devenaient inexploitable.

Depuis 1987, la Division de l'Hydrologie, devenue Service de l'Hydrologie s'est vue attribuer de nouvelles responsabilités avec la création dans ce service de la Division de l'Agrométéorologie. Les nouvelles attributions du Service n'ont malheureusement pas été

accompagnées d'une augmentation significative de son personnel. En revanche, le Service se voyait attribué un budget spécifique qui, bien que très insuffisant, lui permettait de reprendre une activité malheureusement encore trop réduite.

Malgré :

- les remises de matériels par l'OMM en 1972 puis à partir de 1984,
- le financement par le FNDE local à partir de 1985 d'un projet de réhabilitation et de jaugeage de certaines stations,
- la prise de quelques contrats d'étude par le Service de l'Hydrologie,
- le financement par le FAC du programme Banque de Données Hydropluviométriques de Madagascar (BDHM),
- la décentralisation des activités du Service de l'Hydrologie (constitution de brigades provinciales) financée par le FNDE local,

on a assisté jusqu'en 1991, faute de moyens humains, financiers et matériels suffisants, à l'amenuisement progressif des capacités de travail du Service de l'Hydrologie et par conséquent à la dégradation du réseau d'observation hydrologique national et de la qualité des résultats.

Ce constat ne peut être imputé à un quelconque manque de compétence du personnel du Service de l'Hydrologie qui reste très motivé. Mais, il est malheureusement à l'origine de sa mauvaise réputation.

Notons cependant, que le recrutement de quatre nouveaux agents en 1992 a permis au Service de l'Hydrologie de se lancer à nouveau dans la préparation et l'édition des annuaires hydrologiques.

II.2. LES RESEAUX D'OBSERVATIONS HYDROLOGIQUES : ETAT ACTUEL

II.2.1. Le réseau de base d'observations hydrologiques géré par la DMH:

Rappelons que le réseau de base d'observation hydrologique n'a pas été conçu en tant que tel mais en relation directe avec les projets d'aménagements (Génie Rural, TP, Société d'Energie).

Ainsi, un grand nombre de stations créées pour des besoins ponctuels sont devenues stations du réseau de base. La situation des stations et la taille des bassins (tableau1) qu'elles contrôlent ne correspondent probablement plus aux besoins actuels.

Superficies des bassins amont		Nb. de stations
<	à 100 km ²	25
100 km ²	à 500 km ²	35
500 km ²	à 1000 km ²	39
1000 km ²	à 5000 km ²	68
5000 km ²	à 10000 km ²	11
>	à 10000 km ²	23

- Tableau 1 : Répartition du nombre de stations hydrométriques en fonction des superficies des bassins qu'elles contrôlent. (extrait de la BDHM)

Le réseau actuel ne compte plus que 63 stations en service dont 15 en fort mauvais état, alors qu'à certaines périodes de son histoire, il en comportait plus de 100.

Le réseau, laissé par l'ORSTOM en 1975-1976, réhabilité partiellement entre 1981 et 1984 par cet Institut Français (étude à usage agricole menée pour le compte du Ministère de l'Agriculture) puis de manière plus modeste à partir de 1985 (FNDE), se dégrade de manière inquiétante depuis 1986 notamment.

Les résultats de bonne qualité issus du réseau de base sont maintenant de plus en plus rares suite:

- à la dégradation naturelle des stations par simple vieillissement des matériels en place (panne des enregistreurs, utilisation de matériaux non appropriés pour le remplacement des échelles ...);
- à des destructions partielles ou totales des stations lors des crues; dommages inévitables que l'on peut qualifier comme "normaux" sur un réseau hydrologique;
- à des détériorations de plus en plus fréquentes des stations par malveillances en vue de la récupération de matériaux (boulons, échelles limnimétriques, barres métalliques etc...) constituant l'infrastructure des stations;
- à l'insuffisance des tournées de contrôle (jaugeages, nivellement, vérification des appareils, suivi des lecteurs etc...);
- à la démotivation, voir la désertion des lecteurs dont les indemnités sont restées longtemps dérisoires (identiques de 1964 à 1991). Notons cependant une augmentation significative de ces indemnités en 1992.

Malgré quelques signes positifs (augmentation des lecteurs, création des brigades provinciales, nouveaux recrutements), la tendance actuelle montre clairement que, si des moyens financiers, matériels et humains importants ne sont pas mis en place rapidement pour la réhabilitation et le fonctionnement (indissociables) des stations d'observation hydrologique, le réseau de base ne pourra pas reprendre toute l'importance qu'il devrait avoir.

Soulignons l'effort entrepris par la DMH en vue de la création des brigades hydrologiques provinciales. Ces brigades décentralisées donneront aux hydrologues une plus grande capacité d'intervention sur les stations hydrologiques (déplacements réduits). Par ailleurs, la DMH se trouvera ainsi plus proche du terrain et des utilisateurs en particulier pour des problèmes de "petite hydraulique".

II.2.2. Les autres réseaux actuels

Il s'agit là de réseaux d'observation mis en place pour des besoins très spécifiques et parfois pour des périodes limitées dont :

- le réseau d'annonce de crues de la plaine d'Antananarivo par le DMH (2 stations),
- les réseaux mis en place pour la gestion des ouvrages (barrages réservoirs - canaux ...) :
 - . la JIRAMA (Tsiacompaniry, Mantasoa, Mandraka, Volobe ...),
 - . le MINAGRI sur les retenues (périphérie du lac Alaotra, d'Andilamena...) et au niveau des périmètres irrigués,
- le réseau de la JIRAMA pour l'étude de sites de mini-centrales et micro-centrales par la JIRAMA,
- le réseau d'acquisition de données mis en place par le CNRE (LRSAE) et l'ORSTOM dans la région de Mahitsy (bilan des eaux / 5 sections observées de 1991-1994).

II.3. L'ARCHIVAGE ET LE TRAITEMENT DES DONNEES

II.3.1. Localisation et type de données.

La localisation et la nature d'une grande partie des archives de l'hydrologie malgache (relevés des hauteurs d'eau, jaugeages, notes et synthèses...) sont relativement bien identifiées.

Les principaux services et organismes détenteurs de ces archives et documents sont, par ordre de volume:

- 1° La Direction de la Météorologie et de l'Hydrologie (DMH)
- 2° Le Centre National de Recherches sur l'Environnement :
 - à Fiadanana (archives de l'IRSM au Dept. D2)
 - au LRSAE (archives ORSTOM conservées à Madagascar et études récentes MRS/ORSTOM)
- 3° L'ORSTOM / France : les quelques archives de Montpellier seront transférées prochainement à Madagascar dans le cadre du programme BDHM.
- 4° La JIRAMA
- 5° La Direction de l'Infrastructure Rurale

A partir des listes établies par certains de ces cinq organismes (1°,2°) il apparaît que la quasi totalité des archives et des documents intéressant les ressources en eau de surface sont (seront) disponibles à Madagascar.

En revanche, il sera bien difficile de retrouver et de centraliser les quelques observations réalisées par les bureaux d'études (SOMEAH, DINIKA, SECMO, MAMOKATRA, AGRAR, BCEOM et notamment ceux de passage) dont les objectifs sont à plus court terme. Retenons cependant qu'en toute logique ces observations et résultats auront été transmis aux organismes bailleurs (MINAGRI, JIRAMA...) et devraient être disponibles à Madagascar.

II.3.2. Les outils de traitement

Il y a encore moins de 10 ans, le traitement informatique des données hydrologiques était peu développé. Par ailleurs, il n'était possible que sur de gros systèmes.

Les traitements manuels par les hydrologues étaient longs et ne pouvaient donc permettre qu'un dépouillement partiel des données. Les traitements automatiques n'ont commencé qu'avec le développement de la micro-informatique.

A Madagascar les premiers micro-ordinateurs utilisés pour le traitement des données hydrologiques et pluviométriques sont apparus il y a environ 5 ans. A compter de 1986-1987, avec les nouveaux moyens, l'idée du traitement des données hydrologiques et pluviométriques et la constitution de bases de données sur micro-ordinateur se développaient au sein des différentes équipes en place.

Faute de coordination, certains travaux identiques ont été menés parallèlement. Ainsi,

- le Chef de la Division de l'Hydrologie développait le logiciel "HYDR" dont l'utilisation s'est étendue au sein de la DMH, alors que
- le responsable de l'équipe ORSTOM à Madagascar implantait la première version de "HYDROM" en 1986 et développait un programme de saisie de la pluviométrie journalière (traitement des données de l'Alaotra) à partir de fichiers déjà existants (implantation de "PLUVIOM" en 1989).

Dans le cadre du programme Banque de Données Hydropluviométriques de Madagascar (BDHM-cf. II-4) les logiciels "HYDROM" et "PLUVIOM" développés par le Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM (Montpellier) ont été implantés à la DMH dans le premier trimestre 1991.

Les logiciels HYDROM pour le traitement des données hydrologiques et PLUVIOM pour celui de la pluviométrie sont actuellement utilisés dans plus de vingt pays et peuvent être considérés comme des "standards" pour l'Afrique francophone. Outre les possibilités offertes pour la gestion de bases de données spécialisées (décrites en annexe) soulignons entre autre :

- leur prix : gratuit pour les organismes et services partenaires de l'ORSTOM,
- leur mise à jour : le Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM assure le suivi et l'évolution de ces logiciels,
- l'existence d'outils complémentaires développés par l'ORSTOM :
 - . logiciel d'ajustement de lois statistiques : DIXLOIS
 - . logiciel d'homogénéisation des données à l'échelle régionale : MVR (Méthode du Vecteur Régional)
 - . modèles pluie/débit
- leurs formats d'entrée/sortie : compatibles avec d'autres logiciels.

A terme, la réalisation d'une chaîne de logiciels permettant d'exploiter les bases de données (hydropluviométriques, morphométriques...) devra être mise en place. Dans cette éventualité l'acquisition d'outils complémentaires serait nécessaire :

- SGBD : Système de Gestion de Bases de Données
- logiciels de géostatistique permettant la spatialisation des informations en vue de cartographie automatique.

Compte tenu d'une part, du nombre encore trop réduit de spécialistes à Madagascar et de leur implication dans des tâches prioritaires pour le développement, et d'autre part, de la disposition de bon nombre d'outils adaptés sur le marché, il serait préférable que la constitution d'une telle chaîne de traitement se fasse essentiellement à partir d'outils standards.

II.4. RESULTATS DISPONIBLES ET SYNTHESSES

Sont présentés ci-après les travaux et synthèses dont le groupe de travail "Ressources en eau" a eu connaissance. Ce chapitre ne doit donc pas être considéré comme un inventaire exhaustif des programmes en cours et des résultats disponibles. Les Journées de l'Eau nous donneront sans doute l'occasion de le compléter et d'y apporter des précisions supplémentaires.

II.4.1. Principaux documents anciens :

- Relevés des échelles limnimétriques/Données hydrologiques de base/Annuaires hydrologiques de Madagascar (ORSTOM - 1948-1969).
- Etudes hydrologiques de la plaine de Tananarive(ORSTOM, 1963-1967).
- Monographie hydrologique de l'Ikopa et de la Betsiboka,ORSTOM-Paris - M. ALDEGHERI, 1964.
- Monographie hydrologique du Mangoky,ORSTOM-Paris - M. ALDEGHERI, 1964.
- Etudes et Annuaire hydrologiques de la Plaine d'Antananarivo (Service de la Météorologie 1967-1977).
- Etudes de bassins versants (Ambatomainy, Manankazo, Tafaina, Ambodirano).
- Estimation des débits de crues à Madagascar (bassins de 10km² à 50000 km²) - L. DURET 1976.
- Etude hydrologique à usage agricole (ORSTOM, 1985)
- Etude de la Mania à Fasimena (DMH).
- Etude de la région du lac Alaotra (ORSTOM - 1982 et 1989).
- Réseau hydrologique de Madagascar - Données de débit (DMH, 1989).
- Carte des débits spécifiques et des lames d'eau (DMH).

II.4.2. Travaux récents

1° BDHM(1) : Banque de Données Hydropluviométriques de Madagascar.

Les études liées au développement actuel de Madagascar doivent prendre en considération les contraintes climatologiques et hydrologiques. Les demandes, faites par les Ministères concernés ou les bureaux d'études, de données hydro-climatologiques fiables sont et seront de plus en plus fréquentes. Par ailleurs, certaines études ou campagnes de mesures tombent dans l'oubli ou sont tout simplement inutilisables faute de n'avoir pu en faire une revalorisation à partir d'éléments plus récents.

C'est pour ces raisons que la Direction de la Météorologie et de l'Hydrologie (DMH), le Centre National de Recherches sur l'Environnement (CNRE/LRSAE) et l'ORSTOM mènent conjointement depuis le début de l'année 1991 le programme intitulé : Banque de Données Hydropluviométriques de Madagascar. Ce programme qui bénéficie de l'aide du FAC (convention n° 362/C/DEV/89/MAD) a pour objectifs:

- la mise en place d'outils (matériels et logiciels),
- la centralisation des données hydroclimatologiques anciennes et récentes ainsi que leur mise sous support informatique,
- la valorisation des travaux anciens,
- l'édition des données,
- la formation des personnels nationaux :
 - à l'utilisation de la BDHM et à sa gestion (mise à jour / maintenance).
 - aux nouvelles techniques de télétransmission (mise en place d'un réseau expérimental d'acquisition de données hydro-pluviométriques par système ARGOS).

Pour les utilisateurs, le fonctionnement de la BDHM (achèvement prévu fin 1994) se traduira par un gain de temps et par la certitude de pouvoir disposer de l'ensemble des données hydroclimatologiques les intéressant (recherche par thème ou géographique, totalité des résultats ou simples moyennes, statistiques...).

En toute logique, le programme BDHM aurait dû être classé dans le chapitre suivant (travaux en cours). Mais, compte tenu de son état d'avancement (en hydrologie notamment), un certain nombre de résultats sont déjà disponibles (tableau 2):

PLUVIOMETRIE.

Nb. de stations identifiées :	972
Nb. de stations pour lesquelles des pluies journalières (PJ) ont déjà été saisies:....	624
Nb. d'années de pluviométrie journalière saisies :	9148

HYDROMETRIE

Nb. de stations (points) identifiées:	426
Nb. de stations avec cotes instantanées :.....	256
Nb. de couples Haut. d'eau/date (H/T) :.....	2220459
Nb. de jaugeages:.....	12564
Nb. d'étalonnages.....	> 500

Tableau 2 : BDHM 1 - Etat récapitulatif

Notons qu'un programme équivalent concernant les eaux souterraines est en cours de réalisation: "Banque de Données Hydrogéologiques de Madagascar" (BDHM 2). Il est mené par la Direction de l'Eau (DE) en collaboration avec le BRGM.

Outre leur importance pour la sauvegarde et l'exploitation des résultats anciens, ces deux banques de données doivent être considérées comme des outils complémentaires et indispensables pour le développement de Madagascar.

2° Cartes au 1/200000^{ème} réalisées par l'IRNT/CNRE

Le Ministère de la Recherche Scientifique (MRS), dans le cadre du projet "Inventaire des Ressources Naturelles et Terrestres" (IRNT), a réalisé des cartes de ressources en eau au 1/200000^{ème}.

3° Monographie hydrologique de Madagascar (Fleuves et rivières de Madagascar).

L'ouvrage intitulé "Fleuves et rivières de Madagascar" (P. CHAPERON, J. DANLOUX et L. FERRY) est en cours d'édition dans la collection des monographies hydrologiques des éditions de l'ORSTOM. Il sera publié sous le timbre MTM, MRS et ORSTOM et devrait être disponible dans le courant de l'année 1993.

Cette première synthèse des observations hydrologiques fait le point des connaissances sur les ressources en eaux de surface de Madagascar. On y trouvera ainsi des informations sur 28 grands bassins hydrologiques et près de 120 stations (environ 400 pages, 700 tableaux et 390 figures). Un résumé de cette synthèse est présenté au paragraphe II.7.

Signalons qu'aucun financement n'a pu encore être trouvé pour l'édition de cet ouvrage en 200 exemplaires destinés à Madagascar exclusivement.

II.5. TRAVAUX EN COURS

Dans le cadre des programmes menés par le CNRE (LRSAE) la DMH et l'ORSTOM signalons :

- le programme "Inventaire des Eaux de Surface" (PEC III) et son volet "Lacs".

Le volet "Lacs" du programme "Inventaire des Eaux de Surface" (PEC III) consiste à étudier les lacs malgaches (plus de 1000 lacs recensés à partir des cartes au 1/100000^{ème}) en ce qui concerne leur morphologie (surface et capacité), leur hydrologie et la qualité de leurs eaux en vue d'en établir une typologie à l'échelle de Madagascar. Par ailleurs, les travaux cartographiques et physico-

chimiques réalisés sur les lacs, jusqu'alors pratiquement inexistant à Madagascar, donneront des informations sur leur potentialité et leur comblement; informations indispensables tant pour la préservation de l'environnement que dans les perspectives de développement de la pêche et d'utilisation des lacs pour l'irrigation, la production hydroélectrique et l'alimentation en eaux des villes.

L'ensemble des informations recueillies sera archivé dans des bases de données informatisées. Le volet "Lacs" du PEC III est donc à mettre en relation avec la "Banque de Données Hydropluviométriques de Madagascar" (BDHM). Ces bases de données très complémentaires seront indispensables aux futurs travaux de recherche sur les eaux continentales, (modélisation notamment).

Dans le cadre de ce programme, l'aspect sédimentologique des lacs est abordé dans le cadre d'une étude sur l'histoire des lacs et des climats.

- Des activités de recherche et développement sur des méthodes de simulation des écoulements de surface sur les bassins en fonction du relief. Pour Madagascar, le relief est un des principaux facteurs qui interviennent dans les régimes hydrologiques en particulier sur les caractéristiques des crues (temps de montée, temps de base, débit maximum).

II.6. QUESTIONS ET PERSPECTIVES

Ce chapitre a été écrit comme base de réflexion pour un débat et ne prétend donc pas soulever l'ensemble des questions et problèmes liés aux eaux de surface.

A l'occasion des Journées de l'Eau, les discussions feront probablement apparaître de nouvelles perspectives de programmes et d'actions.

II.6.1. Quel réseau, quelle hydrologie pour demain ?

Face à la situation du réseau de base décrite précédemment et de connaissances actuelles, les premières questions qui se posent sont les suivantes:

- Les données disponibles, les synthèses déjà réalisées et les moyens actuels sont-ils suffisants pour répondre aux questions et problèmes qui se posent à Madagascar ?
- Un réseau d'observation hydrologique de base est-il indispensable ?

Dans l'affirmative :

- Le réseau actuel est-il bien adapté?
- Ne faudrait-il pas le restructurer (situation des stations)?
- Combien de stations devrait-il comporter?
- Faut-il s'orienter soit :
 - vers un réseau moderne d'acquisition de données (type du réseau expérimental mis en place dans le cadre du programme BDHM) ou,
 - vers un réseau plus traditionnel mais peut être plus adapté aux contraintes locales
- Le schéma idéal voudrait que l'ensemble des questions relatives aux eaux de surface soit confié à un service unique. L'histoire a montré qu'il était difficile voire illusoire de prétendre à une telle aspiration surtout lorsque les moyens manquent.

De quelle manière le Service de l'Hydrologie peut donc jouer son rôle de coordinateur ?

Suivant quel protocole les informations de base de toute origine pourraient être archivées de manière presque systématique au sein de ce service? ..

II.6.2. Le démarrage d'un programme national d'étude de l'érosion semble urgent...

Au delà des seules questions liées directement aux ressources en eau, à la gestion de réseaux hydrologiques, il semble urgent de lancer à Madagascar un programme national d'étude de l'érosion.

L'eau étant l'élément déterminant intervenant à la fois sur l'érosion proprement dite, le transport et le dépôt, l'hydrologie est amenée à jouer un rôle déterminant dans ce programme. Toutefois, il serait indispensable que ce programme soit mené dans un cadre multidisciplinaire. Ce travail de longue haleine nécessiterait notamment une collaboration étroite entre climatologues, hydrologues, pédologues et géomorphologues.

**ANNEXE : LOGICIELS
(HYDROM ET PLUVIOM, LOGICIELS DE BANQUE DE DONNEES,
HYDROMETRIQUES ET PLUVIOMETRIQUES)**

Annexe I. HYDROM

Ce logiciel développé par le Laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM (Montpellier) permet de gérer diverses données relatives à l'hydrométrie dont :

- Trois fichiers de base:
 - . identification des stations hydrométriques
 - . dossiers des stations
 - . cotes instantanées

- Quatre fichiers élaborés:
 - . fichier des jaugeages, élaborés à partir de mesures sur le terrain (en général, mesures de vitesses)
 - . fichier des étalonnages déterminés à partir des jaugeages
 - . fichier des débits instantanés, calculés de manière automatique avec les étalonnages et les cotes instantanées
 - . fichier des débits moyens journaliers, calculés de manière automatique avec les débits instantanés (ces deux derniers fichiers peuvent aussi être alimentés par introduction directe des débits)

- Divers fichiers secondaires parmi lesquels:
 - . le fichier des hélices
 - . le fichier historique-appareillage des limniographes

Enfin, chaque fichier peut faire l'objet de traitements particuliers (tracé graphique des courbes d'étalonnage, des débits instantanés, des débits journaliers, définition des caractéristiques des crues...).

Annexe II. PLUVIOM

PLUVIOM permet de gérer diverses données relatives à la pluviométrie:

- données permettant d'identifier les postes de mesure ;
- données permettant de décrire l'appareillage (cas des pluviographes) ;
- hauteurs de pluies mesurées à pas de temps constant, d'un jour au moins ;
- hauteurs de pluies mesurées à pas de temps variables, de quelques dizaines de secondes au moins ;
- données permettant de connaître l'historique des stations ou postes de mesure.

II.7. FLEUVES ET RIVIERES DE MADAGASCAR

II.7.1. Analyse des régimes hydrologiques des eaux de surface

II.7.1.1 Le réseau hydrographique

Le relief malgache divise naturellement le réseau hydrographique en cinq ensembles d'importance très inégale :

- Les versants de la *montagne d'Ambre*

Ce massif volcanique est drainé par de petits torrents peu développés et sans affluents notables coulant dans des lits encombrés de blocs de basalte. Les principales rivières, sur la façade est, sont l'Irodo, la Saharenana et la Besokatra. L'ensemble des versants représente 11 200 km² environ, soit à peine 1,8 % de la superficie de l'île.

- Les versants *du Tsaratanana*

Les cours d'eau affectent un dispositif rayonnant autour des sommets puis se dirigent à l'Est vers l'Océan Indien et à l'Ouest, vers le canal de MOZAMBIQUE. Les pentes sont fortes (30 à 40 m/km) mais au contact des formations sédimentaires, s'atténuent brutalement (quelques m/km). Les principaux cours d'eau sont :

- sur le versant MOZAMBIQUE, la MAHAVAVY du nord avec un seul affluent notable (Antsiatsia) et un bassin d'une superficie de 3 270 km², le SAMBIRANO grossi de la RAMENA (bassin total : 2 950 km²); le MAEVARANO qui se jette dans la baie de la LOZA (5 360 km²) et enfin la branche mère de la SOFIA qui se dirige d'abord vers le sud.
- sur le versant océan Indien, la BEMARIVO (5 400 km²) et la LOKOHO.

L'ensemble des versants représente 20 000 km² (3,3 % de la superficie de l'île).

- *Le versant oriental*, à l'est des grands escarpements du socle ancien. Les cours d'eau sont en majorité des cours d'eau de faible longueur et présentent des profils très accentués avant de divaguer, sur l'étroite plaine côtière, jusqu'au cordon dunaire limitant le canal des PANGALANES, parallèle à la côte.

Les principaux cours d'eau de ce premier groupe sont du Nord au Sud : l'IVONDRO (3 300 km²), la RIANILA, grossi de la VOHITRA, de l'AROKA et de la RONGARONGA (7 820 km²), la MANANJARY, grossi de l'IVOANANA, avec un bassin de 6 780 km², le NAMORONA (2 150 km²), le FARAONY (2 700 km²), la MATITANANA (4 395 km²) et la MANAMPATRANA (4 050 km²).

Trois cours d'eau présentent une disposition particulière : leurs bassins supérieurs sont développés soit dans le bassin d'effondrement de l'ALAOIRA-MANGORA, soit sur les hautes terres centrales et méridionales. Les formateurs adoptent des directions nord-sud ou sud-nord imposées par les lignes structurales avant de se réunir pour rejoindre rapidement d'ouest en est, l'Océan Indien. Du nord au sud, ce sont : le MANINGORY (12 645 km²), issu de l'exutoire du lac ALAOIRA où se réunissent une trentaine de formateurs issus des hauts plateaux, le MANGORA (17 175 km²) dont la branche mère coule du nord au sud dans le fossé prolongeant la dépression de l'ALAOIRA et qui est rejoint par son principal affluent, l'ONIVE qui draine le flanc oriental de l'ANKARATRA, enfin la MANANARA formée, en amont du seuil de Soakibany, de la réunion de l'IONAIVO, au nord, de l'ITOMAMPY et de la MENARAHAKA, au sud (14 160 km² au seuil).

L'ensemble du versant représente 150 000 km² (25,2 % de l'île).

- *Le versant méridional* (48 800 km², soit 8,2 % de la superficie de l'île) regroupe les cours d'eau issus de l'extrémité sud du socle et se dirigeant en éventail vers la côte méridionale de Madagascar. Ce sont : le MANDRARE, grossi du MANAMBOLO et de la MANANARA, qui draine un vaste cirque délimité par les chaînes anosyennes, à l'Est et le massif de l'IVAKOANY au nord (12 570 km²); le MANAMBOVO (4 450 km²), la MENARANDRA, grossie de la MANANTANANA et de la MENAKOMPY (8 350 km²) et la LINTA (5 800 km²).

A l'ouest, sur le plateau MAHAFALY, une zone aréique sépare les cours d'eau méridionaux du bassin de l'ONILAHY.

- *Le versant occidental* est le plus développé (365 000 km² soit 61,3 % de la superficie de l'île). Il regroupe les plus grands fleuves malgaches dont les bassins présentent une forme triangulaire dont la base se situe sur les hautes terres et dont le sommet s'appuie sur le littoral du canal de MOZAMBIQUE. Entre ces grands bassins, s'imbriquent une série de petits fleuves côtiers qui prennent leurs sources sur la bordure des hauts plateaux.

Les grands fleuves sont, du Sud au Nord :

- L'ONILAHY (32 000 km²) constitué de la réunion sur les hautes terres méridionales, de l'ISOANALA, de l'HAZOFOTSY, du MANGOKY et de l'IMALOTO. L'ONILAHY rejoint le canal de MOZAMBIQUE au sud de TOLIARA (TULEAR).
- Le MANGOKY (55 000 km²) formé de la réunion de rivières drainant les hautes terres méridionales et le sud des hautes terres centrales : le ZOMANDAO, grossi

de l'IHOSY, la MANANTANANA et la MATSIATRA. Après leur confluence, à l'extrémité occidentale du socle, le MANGOKY reçoit quelques affluents moins actifs (MALIO, ISAHENA, SIKILY) et après un parcours sinueux, se termine par une zone deltaïque au nord de MOROMBE.

- La TSIRIBIHINA (49 800 km²), constituée par la réunion à la sortie du socle cristallin de la MAHAJILO (drainant la façade occidentale de l'ANKARATRA), de la MANIA (hautes terres centrales, au sud de l'ANKARATRA), de la SAKENY et de la MANDAZA. La TSIRIBIHINA, après avoir traversé le plateau de BEMARAHIA par un défilé abrupt, s'élargit en zone d'inondation et rejoint le canal de MOZAMBIQUE par un delta près de BELO.
- La MAHAVAVY du sud (18 500 km²) prend sa source dans le massif d'ANDRANOTOTSIBE et se dirige, du sud au nord sur 410 km avant de rejoindre la mer à l'ouest de MAHAJANGA.
- La BETSIBOKA (49 000 km²) est formée de la réunion de sa branche mère, la BETSIBOKA et de son principal affluent, l'IKOPA. La BETSIBOKA issue des petits massifs au nord d'ANTANANARIVO grossit de la MANANARA et de l'SINKO, se dirige vers le nord et est rejointe, au sortir du socle, par l'IKOPA. Cette grande rivière se forme sur la bordure orientale des hauts plateaux (VARAHINA sud et nord), en amont de la plaine d'ANTANANARIVO, traverse celle-ci en recevant la SISAONY et l'ANDROMBA, puis la KOTORATSY, l'ISANDRANO et la MENAVAVA en rive gauche, la MANANKAZO, l'ANDRANOBE et la NAMOKOMITA en rive droite. Sur leurs cours moyens, l'IKOPA et la BETSIBOKA sont caractérisées par une succession de biefs tranquilles des chutes et rapides pouvant atteindre une dénivellation de 100 à 150 m sur quelques kilomètres. Après le confluent dans une zone marécageuse, la BETSIBOKA parcourt encore 180 km, avec des pentes affaiblies (0,4 à 0,1 m/km). Elle reçoit en rive droite le KAMORO, grossi par l'intermédiaire d'une capture récente (début du siècle) d'une grande partie des eaux de la MAHAJAMBA ce qui porte la superficie "globale" de la BETSIBOKA à 63 500 km² et en fait le plus grand cours d'eau malgache. La BETSIBOKA achève son parcours par un delta important, envahi par la mangrove, dans la baie de Bombetoka, près de MAHAJANGA.
- La SOFIA (27 300 km²) prend sa source sur les contreforts méridionaux du TSARATANANA, au sud de la cuvette de l'ANKAIZINA et se dirige vers le sud puis l'ouest après son confluent avec la MANGARAHARA. Elle reçoit ensuite en rive gauche l'ANJOBONY et la BEMARIVO (15 300 km²) et se dirige vers l'ouest par un large lit à plaines d'inondation avant de rejoindre un vaste delta de la baie de la MAHAJAMBA.

Les petits fleuves côtiers les plus importants sont du sud au nord, la FIHERENANA (7 600 km²) issue de l'ISALO, la MAHARIVO (4 700 km²) et la MORONDAVA

(6 400 km²) issues du massif du MAKAY, la MANAMBAHO (8 060 km²), le MANAMBOLO (13 970 km²) qui prend sa source dans la chaîne de l'ANKAREKA et est grossi au MANAMBOLOMATY, la SAMBAO (6 040 km²), la TSINJOMORONA (3 980 km²) et l'ANKOFIA (2 500 km²) qui se jettent dans la baie de la LOZA.

II.7.1.2. Hydrométrie : observations et mesures

Les observations et mesures hydrométriques à Madagascar sont anciennes et le plus souvent associées à des études d'aménagement (centrale hydro-électrique d'ANTELOMITA sur l'IKOPA supérieure - 1909, compagnie Nosybéenne sur le SAMBIRANO - 1925 aménagement hydro-électrique de la VOHITRA à ROGEZ - 1928, retenue de MANTASOA sur la VARAHINA du nord - 1938, etc.) mais ce n'est qu'à partir de 1947-48 qu'a été mis en place un réseau permanent de stations hydrométriques dont la gestion fût assurée jusqu'en 1973 par des équipes d'hydrologues de l'EDF, puis de l'ORSTOM, puis ensuite par les services techniques malgaches de la METEOROLOGIE NATIONALE et de l'AGRICULTURE.

De 1945 à 1989, plusieurs centaines de stations hydrométriques, réparties sur l'ensemble de l'île, ont fait l'objet d'observations et mesures. Pour la plupart de ces stations les observations ont été de courte durée, voire épisodiques pour des raisons diverses : éloignement et difficultés d'accès, 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 d'étalonnage, études ponctuelles (projet d'aménagement, crues cycloniques, etc). Pour quarante trois stations, des observations et mesures ont été d'une durée suffisante pour que soient constitués des échantillons relativement consistants d'une durée moyenne de vingt à trente années environ. L'ensemble des bassins contrôlés représentent environ 38 % de la superficie de l'île (façade occidentale du TSARATANANA, versant oriental, sud et, sur le versant occidental, trois des plus importants fleuves malgaches ; la BETSIBOKA, la TSIRIBIHINA et le MANGOKY. Quelques grands fleuves (ONILAHY, SOFIA, MAHAVAVY du sud, MANAMBOLO, par exemple) restent encore peu étudiés.

La répartition par superficies des bassins contrôlés est la suivante :

- Huit stations pour des bassins entre 10 000 et 50 000 km²
- Six stations pour des bassins entre 5 et 10 000 km²
- Vingt stations pour des bassins entre 1 et 5 000 km²
- Neuf stations pour des bassins inférieurs à 1 000 km²

L'étude des données hydrométriques a été effectuée selon une méthodologie classique :

- *Examen critique des observations limnimétriques.* Jusqu'à 1960, les observateurs effectuaient une lecture journalière, puis trois ensuite durant la saison des hautes

eaux. Certaines stations avaient été équipées de limnigraphes dont les diagrammes n'ont pu être exploités complètement pour des raisons matérielles. Des contrôles par sondage entre graphes et lectures n'ont pas mis en évidence de distorsions significatives mais l'exploitation (qui va être entreprise) des enregistrements apportera une valorisation certaine des résultats. A ce stade des corrections et compléments des lacunes de courte durée ont été effectués permettant de corriger (ou compléter) les chroniques.

- *Etablissement des courbes d'étalonnage* et barèmes de traduction des hauteurs en débits. Cette opération, relativement aisée pour la partie médiane des relations, a comporté des extrapolations délicates vers les très basses eaux (détarages entraînés par la mobilité des lits mineurs, par exemple le MANGOKY au BANIAN) et les très hautes eaux (estimation des débits probables correspondants), à l'exception de quelques rares stations équipées de téléphériques (MANGOKY au BANIAN, IKOPA à ANTSATRANA, BETSIBOKA à AMBODIROKA, par exemple). Ces extrapolations entraînent une certaine imprécision sur la valeur des débits extrêmes.
- *Traduction des hauteurs en débits* par utilisations du logiciel HYDROM et calcul des débits moyens journaliers, mensuels et annuels. Ces résultats ont fait l'objet d'une analyse critique de la cohérence spatiale et temporelle des débits et quelques corrections ont pu être effectuées (erreurs de lecture non décelées en première analyse, validité des courbes d'étalonnage).
- *Comparaison à l'échelle mensuelle des précipitations et débits.*
Les précipitations moyennes sur les bassins ont été calculées par la méthode de THIESSEN. Les hauteurs moyennes ainsi calculées peuvent être estimées correctes pour les bassins présentant une densité suffisante et une bonne répartition des postes utilisés ainsi qu'un gradient pluviométrique pas trop prononcé (hauts plateaux, ouest et sud). Par contre pour de nombreux bassins (TSARATANANA, versant oriental), les postes trop peu nombreux et mal situés en regard d'une forte pluviométrie à gradient élevé, n'ont permis qu'une très insuffisante estimation des précipitations moyennes. Par utilisation des isohyètes interannuelles moyennes et en vérifiant l'homogénéité des déficits d'écoulement régionaux, les précipitations moyennes ont été corrigées par l'utilisation d'un coefficient respectant la variance des échantillons. Les corrélations mensuelles hydro-pluviométriques ont été établies et ont permis de constater la bonne qualité moyenne des deux échantillons (pluies et débits) réalisés indépendamment ainsi que (par l'intermédiaire de régressions simples ou multiples) de compléter les lacunes mensuelles ou de corriger quelques anomalies flagrantes et d'établir les fichiers opérationnels.

-Extension des échantillons d'apports annuels.

Pour chaque station, l'échantillon des lames observées (calculées sur l'année hydrologique novembre-octobre) a été comparé (par corrélation) aux précipitations annuelles éventuellement corrigées par un indice de concentration mensuelle de la pluviométrie (effet souvent très sensible) ainsi qu'aux lames écoulées des bassins emboîtants ou adjacents. Les régressions ont été utilisées pour étendre les échantillons en conservant leur variance initiale (valeur aléatoire de l'écart type résiduel).

Les échantillons ainsi constitués, d'une taille moyenne voisine de trente à quarante ans, représentent un ensemble d'environ 1 300 stations-années.

- Représentation statistique des paramètres caractéristiques des régimes.

Les résultats des analyses statistiques sont présentés dans les tableaux ci-joints :

- *Tableau 1* : Situation et superficie des bassins
- *Tableau 2* : Apports annuels (P : pluviométrie moyenne interannuelle sur le bassin, H : lame écoulee interannuelle, DE : déficit moyen d'écoulement, Ke : coefficient d'écoulement, Q : module, H10 : lame décennale humide, h10 : lame décennale sèche, K3 : rapport des lames décennales.
- *Tableau 3* : Débits de crue maximale et d'étiage (l/s/km²)
- *Tableau 4* : Débits moyens mensuels.

II.7.1.3 Formation des écoulements

Les mécanismes de formation des écoulements sur les différents bassins peuvent être abordés, d'une part, en étudiant à partir des corrélations les influences respectives des précipitations et débits antérieurs sur les différents débits mensuels en saison des pluies et en saison fraîche, d'autre part, en établissant à l'échelle mensuelle et annuelle, les bilans hydrologiques.

Cette approche est évidemment globale et simplifie les processus complexes de transferts des apports pluviométriques à l'interface sol-atmosphère des bassins. Elle permet cependant de différencier et comparer les régimes divers observés sur le territoire malgache.

La première démarche revient à calculer les différents coefficients de corrélation entre les lames écoulées mensuelles et les précipitations qui les ont produites, entre les débits mensuels et les débits antérieurs. Le report sur un graphe (en ordonnées les coefficients de corrélation H_i/P_i , en abscisses les coefficients Q_i/Q_{i-1}) permet de comparer les influences respectives des facteurs explicatifs des écoulements mensuels.

La seconde démarche consiste à établir les bilans hydrologiques (précipitations, évapotranspirations potentielles et réelles, lames écoulées, stockages et destockages dans les différents réservoirs). Les données utilisées sont les valeurs interannuelles des précipitations et lames écoulées des différents bassins ainsi que les valeurs régionales de l'évapotranspiration potentielle (stations climatologiques et mesures sur bassins versants expérimentaux). La méthode de THORNTHWAITE est utilisée de façon simplifiée en confondant, pour la commodité du calcul, les deux ensembles de réservoirs (aquifères et réserves utiles des sols) sans vouloir attribuer à la réserve utile une dimension arbitraire. Les bilans sont calculés en ligne (moyenne interannuelle) et en colonne (vérifications des termes du bilan à l'échelle du mois).

Les valeurs mentionnées n'ont qu'une signification relative (approximation sur les valeurs de l'E.T.P en particulier) mais fournissent une bonne idée des mécanismes généraux de l'écoulement.

Nous présenterons ici trois exemples caractéristiques des régimes hydrologiques de l'île.

II.7.1.3.1. *Le FARAONY au bac de VOHILAVA*

Le bassin est situé sur les versants de la falaise orientale (TANALA) et repose sur les formations cristallines du socle (gneiss, micaschistes et migmatites du système de graphite) profondément altérées en latérites ferrallitiques jaunes sur rouges. La forêt 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 secondaire sur friches anciennes.

La station (21° 46' S - 47° 55'E), à une altitude proche de 8 m, est située un peu en amont du bac de la route IFANADIANA - MANAKARA et contrôle un bassin d'une superficie de 2 005 km².

La pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin est évaluée à 3 000 mm (région perhumide) et l'ETP à 1 300 mm environ.

Ressources en eau

Coefficients de corrélation mensuels

Hi ou Qi	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
avec Pi	(0,49)	<u>0,93</u>	<u>0,82</u>	<u>0,96</u>	0,64	(-0,07)	(0,38)	(0,11)	(0,39)	0,65	(0,52)	<u>0,73</u>
Pi-1	0,69	(-0,24)	(0,30)	(0,30)	(0,53)	(0,57)	(-0,11)	(0,42)	(-0,14)	(0,52)	<u>0,91</u>	<u>0,82</u>
Q1-1	<u>0,69</u>	(-0,17)	(0,30)	0,55	(0,45)	<u>0,74</u>	<u>0,91</u>	<u>0,90</u>	<u>0,64</u>	(0,47)	(0,44)	(0,30)

Ces coefficients soulignés ont une probabilité de signification supérieure à 99 % (test de SNEDECOR - FISCHER) et, pour ceux entre parenthèses, inférieure à 95 %.

Pendant la saison chaude, on constate une nette prépondérance de l'influence des précipitations mensuelles (en décembre avec influence faible ou nulle des débits antérieurs-nappes en position basse, de janvier à mars avec le soutien des débits antérieurs-aquifères rechargés). D'avril à juin (début de la saison fraîche), l'influence des débits antérieurs est prépondérante et masque celle des précipitations pourtant encore fortes. Enfin, de juillet à novembre, les précipitations du mois et le drainage des aquifères ont un poids équivalent. Le schéma de fonctionnement est typique des bassins du versant oriental : forte influence des aquifères rechargés en saison des pluies sur le soutien des débits de saison fraîche mais influence significative des précipitations encore notables (10 à 150 mm/mois) de saison fraîche. (FARAONY au bac de VOHILAVA)

Bilan hydrologique : lames en mm

	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
$\Delta R+$	26	132	142	30	97								+427
$\Delta R-$						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, après recharge de la réserve utile des sols, les besoins en évapotranspiration (ETR=ETP=648 mm). Les reliquats des précipitations de la période sont, d'une part, stockés dans les aquifères latéritiques (427 mm en fin mars), d'autre part, utilisés pour la production des écoulements (1 262 mm, soit 69 % du total annuel) par ruissellement direct (sols saturés ou imperméables) et drainage intermensuel des nappes.

De mai à octobre (saison fraîche), l'ETR reste égale à l'ETP jusqu'en juillet puis est réduite (malgré le soutien des réserves utiles du sol) pendant les trois derniers mois.

L'ETR, à l'échelle annuelle, représente 90 % de l'ETP. Les lames écoulées de la période (578 mm) sont alimentées, à raison de 60 % à partir du drainage des aquifères et 40 % par les précipitations qui marquent une recrudescence en juillet et août (tendance pseudo-équatoriale de la côte est).

Ce mécanisme est observé sur l'ensemble du versant oriental (avec une intervention plus ou moins importante des précipitations de saison fraîche) ainsi que sur le versant occidental du TSARATANANA (où l'affaiblissement de la pluviométrie en saison fraîche est cependant beaucoup plus marqué).

II.7.1.3.2. *La MANANARA à BEVIA*

Le bassin de la MANANARA, dernier affluent important en rive gauche du MANDRARE (versant méridional) est situé sous le vent de la chaîne anosyenne, sur des formations à dominante imperméable appartenant principalement au système androyen (leptynites et cipolins) et en bordure orientale, aux granites anciens de l'ANOSY. Les sols sont généralement peu évolués (lithosols) et les formations d'altérites (arénisation) sont très peu importantes. A l'exception des crêtes, le bassin est boisé et recouvert d'une brousse xérophile dense avec présence d'une galerie forestière de tamariniers. La pluviométrie, encore forte sur la ligne de crêtes (1 100 mm) est caractérisée par un gradient très prononcé (effet "sous le vent") et ne dépasse pas 500 mm à l'exutoire. La pluviométrie moyenne sur le bassin est estimée à 600 mm et l'évapotranspiration potentielle à 1 000 mm (températures moyennes abaissées par les invasions polaires).

Ressources en eau

Coefficients de corrélation mensuels

Hi ou Qi	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
fonct. Pi	<u>.67</u>	<u>.69</u>	<u>.82</u>	<u>.84</u>	<u>.82</u>	(.32)	<u>0.82</u>	<u>0.86</u>	(.40)	<u>.81</u>	.70	<u>0.75</u>
Pi-i	-.001	(.23)	(.23)	.54	(.08)	.46	.50	(-.01)	.65	.82	(-0.43)	.48
Qi-i	(.10)	(-.16)	<u>.58</u>	.44	(.0)	(.25)	<u>(.02)</u>	(-.02)	<u>.78</u>	<u>.57</u>	0.52	.41

En toutes saisons, l'influence des précipitations du mois (et du mois précédent en juillet et août) est prédominante et atteste le caractère imperméable du bassin. L'influence des faibles réserves éventuelles est négligeable.

Bilan hydrologique (1952-70) (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
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

En aucun moment de l'année, l'évapotranspiration potentielle ne peut être satisfaite et l'ETR ne représente que 42 % de l'ETP annuelle.

Les faibles réserves éventuelles d'altérites n'interviennent pas et il n'y a aucun report inter-mensuel. Le mécanisme du bassin est très simple : l'écoulement est égal, pour chaque mois, à la fraction non-évapotranspirée des précipitations mensuelles. L'hydrogramme se déduit de la courbe des précipitations par une simple translation.

Ce mécanisme est observé sur l'ensemble des bassins méridionaux (MANAMBOVO,...). Sur le haut MANDRARE et la MENARANDRA, des aquifères perchés (nappes d'arènes peu développés et à épuisement rapide peuvent entraîner de faibles reports inter-mensuels (décembre-janvier sur février-mars).

II.7.1.3.3. La BETSIBOKA à AMBODIROKA

Situé entre ceux de la MAHAJAMBA, à l'est, et de son affluent principal, l'IKOPA, à l'ouest, le bassin de la BETSIBOKA correspond au sud à la partie nord des hauts plateaux de l'IMERINA limitée à l'est par la falaise de l'ANGAVO. La BETSIBOKA coule du sud au nord dans de larges plaines (ALAKAMISY, ANJOZOROBE, ANDAKANA) encadrées par les tampoketsa d'ANKAZOBE et du KAMORO et séparées par des rapides et chutes (VOHOMBORITRA, AMBODIROKA). Le bassin de la BETSIBOKA, en amont de la station d'AMBODIROKA repose sur les formations cristallines du socle ancien : micaschistes et amphibolites du système du VOHIBORY pour la majeure partie. Ces formations assez fortement érodibles sont très altérées en puissantes couches de latérites formant d'importants aquifères.

La majeure partie du bassin est recouverte par la savane herbacée. Le bassin d'une superficie de 11 800 km² (altitude moyenne 1 020 m) est située dans la zone climatique humide et recueille des précipitations moyennes interannuelles de l'ordre de 1 500 mm. Les températures moyennes annuelles sont inférieures à 20°C et l'évapotranspiration potentielle est voisine de 1 100 mm. La saison sèche est bien marquée.

Coefficients de corrélation mensuels

Hi ou Qi	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
fouct. Pi	<u>0.90</u>	<u>0.83</u>	<u>0.79</u>	<u>0.62</u>	<u>0.92</u>	(0,10)	(-43)	(-0,08)	(-0,07)	(0,09)	(0,40)	0,66
Pi-i	(0,11)	(0,11)	(0,38)	(0,33)	(0,02)	<u>0.82</u>	(-0,29)	(-0,44)	-0,018	(-0,05)	(-0,02)	(0,70)
Qi-i	(0,42)	(0,06)	(0,17)	(0,08)	(0,13)	<u>0.85</u>	<u>0.68</u>	<u>0.95</u>	<u>0.95</u>	<u>0.97</u>	<u>0.94</u>	<u>0.78</u>

Ces relations sont toutes significatives ($P > .99$) et correspondent au schéma classique observé sur les hautes terres centrales. Les deux saisons chaude et fraîche sont très nettement différenciées. De novembre à mars le facteur principal est la pluie du mois avec influence faible ou négligeable des débits antérieurs. D'avril à août le facteur principal est le débit des mois antérieurs (drainage des aquifères) et l'influence des précipitations réduites de saison fraîche est faible ou négligeable. L'effet des précipitations redevient sensible au cours des mois de transition (septembre-octobre) du fait de l'épuisement des réserves et de la reprise des précipitations en octobre (seconde quinzaine).

Ressources en eau

Bilan hydrologique (1952-70) (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
$\Delta R+$	20	125	124	40	30								+339
$\Delta R-$						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 aquifères et rehumidification des sols (stock global en fin mars : 339 mm) nourrissent les écoulements (571 mm, 73 % du total annuel). En saison sèche (avril-octobre), l'évapotranspiration réelle présente une assez forte réduction par rapport à l'ETP (42 % sur la saison) après épuisement de la réserve utile des sols (avril à début juillet). L'écoulement de saison sèche (27 % du total annuel) est presque totalement assuré à partir du drainage des réserves stockées dans les altérites en saison des pluies.

Ce bilan schématique est observé sur l'ensemble des hautes terres et sur l'ouest de l'île. Vers le sud (hautes terres méridionales) et l'ouest, le contraste hautes-eaux -basses eaux tend à s'accroître nettement du fait de la réduction de la pluviosité : diminution de la puissance des couches d'altérites et du stockage en saison des pluies. La sévérité et la durée de la saison sèche tendent également à augmenter et entraînent une réduction accentuée de l'ETR sur l'ETP (plus forte que sur les hautes terres centrales en raison de températures plus élevées).

En effectuant ces analyses sur la quarantaine de stations de base, il est possible, par études des analogies et des différences, de mettre plus ou moins en évidence l'influence propre des différents facteurs conditionnels qui déterminent en interaction la transformation du "signal d'entrée" (histogramme des précipitations) en "signal de sortie" décrit par les caractéristiques des différents régimes hydrologiques.

Les limites de cette analyse tiennent à l'insuffisante représentativité du réseau de base (assez peu développé sur l'ouest de l'île, par exemple) ainsi qu'au caractère global de la

réponse des plus grands bassins polygéniques (et dans ce cas les différents processus locaux sont confondus dans une boîte noire qu'ils s'agit de décrypter plus ou moins bien).

Mais, dans le cadre d'une analyse macro-hydrologique il ne s'agit pas de modéliser mais d'essayer d'identifier les correspondances entre telle ou telle caractéristique du bassin et les déformations du signal qu'elle provoque.

II.7.2. Régionalisation des régimes hydrologiques

L'extension régionale des caractéristiques des régimes hydrologiques s'appuie sur les relations établies sur les bassins de référence entre ces caractéristiques et les facteurs conditionnels qui les déterminent et sur la cartographie des différents facteurs (cartes climatologiques, géologiques, pédologiques, de végétation...). Il s'agit de retenir un moyen terme entre la seule prise en compte des facteurs les plus déterminants (et dans ce cas une synthèse simplifiée ferait correspondre la carte des grandes unités hydrologiques à la carte ombro-thermique) et la prise en compte quasi-exhaustive des facteurs conditionnels propres à chaque bassin (mais dans ce cas, cela reviendrait à identifier presque autant d'unités que de bassins étudiés et ce serait la négation même de toute régionalisation).

Fort heureusement, les différents facteurs conditionnels 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 : cellules océaniques 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'atténue légèrement sur les cinquantes kilomètres de l'étroite plaine littorale. La première ligne de falaises, plus ou moins continue, entraîne 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 (dépressions 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 BEMARAHIA 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 d'avantage sur les grands massifs. L'effet de continentalité davantage 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 dans le Sud de l'île, et de certaines parties des bassins des hauts-plateaux, calcaires parfois karstifiés 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 et le soutien des étiages. Là, où (en raison d'une forte pluviométrie), ils ont pu constituer des formations latéritiques de grande épaisseur (bassins de la côte 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 écoulements 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 aiguës (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'ANKAIZANA, de l'ALAOIRA, 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 entraîner pour la satisfaction des besoins de la végétation, une forte évapotranspiration réelle (augmentation du rapport ETR/ETP). A 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 anthropique 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 : déforestations en "savoka" sur la bordure orientale des hauts plateaux, mise en valeur des périmètres rizicoles dans les plaines de l'ALAOIRA et d'ANTANANARIVO (imperméabilisation artificielle de l'interface, stockage et écrêtement des crues, renforcement de la reprise par évapotranspiration, ...)... Les infrastructures de stockage et dérivation, particulièrement nombreuses sur le haut bassin de l'IKOPA, entraînent une artificialisation des régimes.

Les facteurs conditionnels des régimes sont donc associés en grands "paysages hydrologiques". Ces unités naturelles présentent des caractéristiques générales assez nettes pour avoir été identifiées et leurs limites esquissées dès le début des observations hydrologiques (PELLERAY, 1953) puis précisées (ALDEGHERI, 1972) à partir des observations ultérieures.

Avant de présenter ces grandes unités naturelles, nous examinerons les principales caractéristiques des régimes (apports annuels et leurs distributions mensuelles, basses eaux et crues), leurs rapports avec les différents facteurs conditionnels et leur distribution géographique.

II.7.2.1. Les apports annuels

Pour environ trente-cinq stations de base, des chroniques de trente années consécutives (1950-80) ont pu être constituées. Ces chroniques ne présentent pas de tendance, ni de signes de persistance (avec constitution de sous-série). Elles peuvent donc être considérées comme des échantillons représentatifs de la variance d'une population stationnaire. Cette appréciation doit être nuancée pour les bassins du Sud (situés en dessous de l'isohyète 700 mm) pour lesquels les résultats des analyses statistiques doivent être envisagés avec prudence au-delà des récurrences décennales. Pour les autres

bassins, seules les valeurs moyennes (ou médianes) ont pu être évaluées par comparaison avec les stations de base et, éventuellement, correction d'hydraulicité.

Les précipitations s'échelonnent entre 500 et 1 500 mm pour le MANDRARE à AMBOASARY (versant sud) avec des écoulements annuels respectifs de 50 mm ($k_e = 10\%$) et 600 mm ($k_e = 40\%$). Les déficits d'écoulement (voisins de l'ETR) sont toujours nettement supérieurs aux écoulements (450 à 900 mm) mais ne représentent que 40 à 80 % de l'ETP régionale.

Sur les hautes terres centrales, les précipitations du bassin de la MANIA à Fasimena s'échelonnent entre 1 150 et 2 500 mm avec des écoulements annuels compris entre 400 mm ($k_e = 35\%$) et 1 300 mm ($k_e = 55\%$). Les déficits d'écoulement (750 à 1 200 mm) sont presque toujours supérieurs aux lames écoulées et restent, quatre années sur cinq, inférieurs à l'ETP régionale (60 à 100 %).

Le FARAONY à Vohilava (versant oriental) reçoit les précipitations annuelles parmi les plus fortes de l'île (2 200 à 4 300 mm). Les lames annuelles comprises entre 1 200 et 3 000 mm correspondent à des coefficients d'écoulement élevés (45 à 70%). Le déficit d'écoulement ne reste inférieur à l'ETP régionale (1 300 mm) que pour les années de faible hydraulicité et dès que la pluviométrie dépasse 1 300 mm, la lame écoulée correspond à l'équation simple : $H = P - 1\,300$.

La liaison statistique entre les lames moyennes écoulées et les précipitations moyennes sur les bassins est forte :

$$H = .71 (P-537) \quad R^2 = .90 \text{ pour } 83 \text{ couples}$$

La courbe ajustée graphiquement, d'allure légèrement parabolique, se confond, au-delà de $P=3\,200$ mm avec la droite $P-1\,200$ mm.

Les relations montrent le poids déterminant sur les caractéristiques annuelles de l'écoulement des précipitations annuelles. La dispersion de la grande majorité des points reste modérée et pour les plus forts écarts peut être attribuée à des raisons identifiables, par exemple :

- Déficits d'écoulement des bassins de la montagne d'Ambre très supérieurs à l'évapotranspiration et correspondent à des pertes par infiltration profonde dans les basaltes fissurés.
- Influence des zones marécageuses et périmètres rizicoles entraînant l'accroissement de la reprise par évapotranspiration (MAEVARANO, TSINJOMORONO, MANINGORY, MAMBO...);
- Sous-estimation de la pluviométrie de la TAMPOKETSIA du KAMORO (bassin de l'ISINKO).

A partir du report des valeurs H, DE et Ke, pour les différents bassins, de la carte des isohyètes et des relations définies ci-dessus, les cartes schématiques des écoulements annuels, des déficits d'écoulement et des coefficients d'écoulement ont pu être tracées.

Ces 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).

Situé au dessous de l'isohyète 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'écoulement 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'ALAOIRA 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 mm (rebord occidental 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'écoulement 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 BEMARARA se rattachent à cet ensemble en raison d'une 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 mm 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 du tête du KAMORO ou de l'ANKARATRA présentent des caractéristiques annuelles similaires mais avec une distribution mensuelle plus contrastée.

On notera d'autre part les particularités suivantes :

- Influence de l'orientation des bassins

Pour quelques bassins il a été possible de suivre l'évolution amont-aval des valeurs moyennes de la lame écoulee annuelle.

Les bassins orientés est-ouest respectent le schéma classique de diminution des lames annuelles parallèlement à l'augmentation des superficies. Plus la superficie augmente, plus l'altitude moyenne du bassin diminue ainsi que la pluviométrie. L'effet de foehn renforce cette tendance.

La BETSIBOKA coule du Sud au Nord, parallèlement à la disposition globale des isohyètes. Elle présente dans son bassin supérieur une décroissance des lames écoulées, puis un redressement à partir des TAMPOKETSA. De l'amont vers l'aval, les lames restent limitées entre deux "rails" horizontaux.

Les bassins du versant oriental de l'île coulent de l'Ouest vers l'Est et présentent une évolution atypique des lames caractéristiques du versant. Les hauts bassins situés sur l'extrémité orientale des hautes terres centrales sont beaucoup moins arrosés que les bassins moyens situés sur les falaises orientales. Le gradient amont-aval est fortement positif.

- Irrégularité interannuelle

Le rapport des lames écoulées décennales (K3) présente, de même que celui des précipitations décennales, une liaison statistique sensible avec les valeurs moyennes annuelles.

Le rapport K3 diminue rapidement entre 50 et 800 mm, puis se stabilise autour de la valeur 1.8 entre 800 et 1 200 mm. Au delà de cette valeur moyenne de la lame, le coefficient K3 tend à croître légèrement (ce qui n'est pas le cas des K3 pluviométriques). Cet effet est dû à la diminution très nette pour les bassins les mieux arrosés de la variance des déficits d'écoulement annuel (stabilisation de l'ETR régionale qui prend sa valeur maximale à Madagascar sur le versant oriental).

- Forme des lois de distribution.

A quelques rares exceptions près, les distributions statistiques des apports annuels présentent des formes moins aplaties que la normale (g_2 positif) et à étalement vers la droite, c'est-à-dire vers des apports excédentaires (g_1 positif). Pour près de 25% des échantillons, les coefficients ($g_1 = 1.14$, $g_2 = 2.40$) correspondent à la loi de GUMBEL.

Pour 40% des échantillons (g_1 compris entre 0 et 1.10, g_2 entre 0 et 2) les coefficients correspondent à des distributions gaussio-logarithmiques plus aplaties et moins asymétriques que la loi de GUMBEL.

Pour 20% des échantillons, les coefficients ($g_1 > 1.14$, $g_2 > 2.40$) correspondent à des distributions gaussio-logarithmiques ou exponentielles moins aplaties et plus asymétriques que la loi de GUMBEL.

L'examen des distributions ne fait pas apparaître de tendances régionales bien nettes.

II.7.2.2. 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).

Le contraste entre les hautes eaux de la saison chaude et les basses eaux de la saison fraîche est plus ou moins accusé selon les régions hydrologiques en raison des régimes pluviométriques et des mécanismes de fonctionnement des bassins.

Les comparaisons peuvent être facilitées par le calcul de paramètres relatifs à 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 ou M est le débit mensuel maximal et m le débit mensuel minimal.

Les points représentatifs de la liaison graphique entre l'indice hh/hs et la lame annuelle moyenne H , se regroupent autour d'une courbe moyenne présentant une décroissance rapide jusqu'à $H = 300$ mm, puis une décroissance curviligne plus modérée jusqu'à $H = 1\ 000$ mm et enfin un palier au delà de $H = 1\ 000$ mm. Les bassins se regroupent en régions caractéristiques :

- Les bassins du Sud ($H < 300$ mm) avec des rapports hh/hs supérieurs à 7 (et jusqu'à 50) et des rapports M/m supérieurs à 25.
- 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 hautes terres centrales ($500 < H < 1\ 000$) avec des indices hh/hs compris entre 2 et 5 et des rapports M/m entre 3 et 5.
- Les bassins du versant oriental ($H > 900$) avec des indices hh/hs voisins de 2 et des rapports M/m entre 3 et 5.

Certains bassins s'écartent de la relation moyenne en raison de leurs particularités géographiques. Par exemple :

- Les bassins de la façade occidentale du TSARATANANA, bien arrosés mais à contraste saisonnier plus accusé que sur le versant oriental et très proches sur ce point des régimes de l'Ouest.
- Certains bassins du versant oriental dont les hauts bassins ont les caractéristiques des hautes terres centrales (en particulier le MANINGORY ou le MANGORO dont les branches mères sont situées dans la dépression du MANGORO- ALAOTRA).
- L'EFAHO dans l'extrême Sud du versant oriental et soumis à l'influence méridionale.
- L'ONILAHY à TONGOBOURY régularisé par les aquifères de l'ISALO.

De façon générale, l'irrégularité intermensuelle est soumise à deux tendances fortes :

- Elle est d'autant plus accusée que l'écoulement moyen est faible,
- A écoulement annuel équivalent, l'irrégularité est d'autant plus forte que le

bassin est éloigné du littoral oriental. Ce gradient est-ouest traduit l'évolution progressive des régimes tropicaux de transition (tendance pseudo-équatoriale) aux régimes tropicaux purs (saison sèche bien marquée).

Ces contrastes peuvent être expliqués par les différents mécanismes de formation des écoulements mensuels (dont nous avons donné ci-dessus trois exemples significatifs).

Pour les bassins du versant oriental, un important stockage est effectué au cours de la saison des pluies (de la mi-novembre à la mi mars) dans les puissantes formations latéritiques. Pendant la saison "sèche", le drainage de ces réserves contribue à alimenter les débits des basses eaux mais l'on observe une forte contribution des précipitations encore abondantes de la saison fraîche. Ces précipitations, qui connaissent une certaine recrudescence en juillet-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 des 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.

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 plus souvent négligeable ou nul pour les bassins situés plus à l'Ouest ou au Sud (MANAMBOVO, 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 deux mois "humides".

Les distributions mensuelles de l'écoulement sont donc régies par deux facteurs conditionnels prédominants : l'abondance et la répartition saisonnière des précipitations annuelles, l'importance des aquifères latéritiques. Ces deux facteurs ne sont d'ailleurs pas indépendants puisque la présence d'importantes aquifères latéritiques (et leur alimentation) est déterminée par la pluviosité régionale.

Les précipitations mensuelles les plus abondantes sont observées en décembre-janvier sur les hautes terres centrales, l'Ouest et le Sud, en janvier sur le versant est et la BETSIBOKA supérieure.

Le décalage entre l'écoulement mensuel le plus abondant et le maximum pluviométrique dépend de l'importance des aquifères.

Ce décalage est inférieur à un mois (parfois 8 à 15 jours) pour les bassins du Sud et du Sud-Ouest (maximum en janvier) en raison de l'absence ou de l'insignifiance des réserves d'altérites. Il est de un mois à un mois et demi sur le haut bassin de la TSIRIBIHINA et les bassins moyens de l'IKOPA et de la BETSIBOKA (maximum en février).

Il atteint un mois et demi à deux mois et demi (maximum en mars) pour les bassins à fortes réserves d'altérites du versant oriental, de la haute IKOPA et du TSARATANANA.

Le MANINGORY, en raison du stockage important réalisé en saison des pluies dans le lac ALAOTRA 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).

II.7.2.3. Les basses eaux

Les débits spécifiques d'étiage sont à Madagascar très contrastés et bien régionalisés (entre plus de 15 l/s/km² et jusqu'à 20 à 25 l/s/km² sur le versant oriental de l'île et des débits très faibles ou nuls sur les zones littorales du Sud et de l'Ouest).

Les débits spécifiques minimaux présentent une liaison statistique significative avec les apports annuels des bassins.

$$q_{j \min} \text{ (l/s/km}^2\text{)} = 0.008 P \text{ (mm)} - 7.1 \quad (R^2 = .77 P > .995)$$

$$q_{j \min} \text{ (l/s/km}^2\text{)} = 0.011 P \text{ (mm)} - 2.9 \quad (R^2 = .81 P > .995)$$

Autour de la droite de régression $q_{j \min}/H$, 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 des 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.

Le report sur la carte de Madagascar des valeurs de débit d'étiage et l'interprétation de la régression q/H font apparaître une régionalisation nette des débits de basses eaux :

- 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/km^2 et généralement voisins de 15 l/s/km^2 . 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/km^2) à l'extrême Sud du versant.
- bassins des hauts plateaux avec des débits spécifiques compris entre 3 et 8 l/s/km^2 . On note une tendance décroissante de l'Est vers l'Ouest et un redressement des débits sur les TAMPOKETSIA (bassins moyens de l'IKOPA et de la BETSIBOKA).
- bassins du versant occidental du TASARATANANA 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/km^2 . 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/km^2) et les tributaires issus de l'ISALO (haut bassin de la FIHERENANA, TAHEZA, bassin moyen de l'IMALOTO) avec des débits beaucoup plus soutenus (2 à plus de $0,5 \text{ l/s/km}^2$).
- bassins du Sud avec des débits inférieurs à $0,5 \text{ l/s/km}^2$ 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 fraîche sur l'ensemble des petites rivières côtières de l'Ouest, de la LOZA au nord à l'ONILAHY au Sud.

La liaison statistique forte entre les débits d'étiage et les apports annuels (précipitations et lames écoulées) a une signification physique évidente. Elle traduit, sur

un ensemble géographique aussi vaste et varié que Madagascar, l'absence (ou la faible représentation) de régimes extrêmes :

- forte 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).

Pour près des deux tiers des bassins observés, les valeurs du rapport q_{\min}/Q (supérieures à 10%) se rapprochent des valeurs observées, sous d'autres climats, pour des cours d'eau bénéficiant, ou d'un stockage hivernal nival ou nivo-glaciaire, ou bien d'importants aquifères géologiques (calcaires, craie, grès, sables...).

Le rôle joué par ces réserves (inexistantes ou peu représentées à Madagascar) dans le soutien des étiages est assumé dans l'île par de puissantes et étendues formations latéritiques, qui ont conféré à Madagascar l'appellation "d'île rouge" dans la littérature touristique.

Il est possible de mettre en évidence la liaison statistique entre les débits spécifiques d'étiage et les valeurs des réserves drainées (R en mm) ainsi que celles de la durée caractéristique de drainage (temps T_c en jours pour que le débit de base soit divisé par deux).

$$q_{\min} = .05 (R * T_c / 100)$$

$$R^2 = .73$$

La répartition géographique des réserves drainées 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 (T_c inférieures 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".

Pour les débits d'étiage, les facteurs conditionnels déterminants sont donc la pluviométrie et sa répartition saisonnière (stockage en saison chaude, plus ou moins grande importance des précipitations de saison fraîche particulièrement sur le versant oriental) ainsi que la puissance des aquifères latéritiques. Là encore, ces deux facteurs sont en grande partie interdépendants : les altérites sont d'autant plus épaisses que la pluviosité est forte (Est de l'île) et le stockage est évidemment fonction des excédents de saison chaude. Ceci explique donc naturellement la forte liaison statistique entre débits d'étiage et pluviométrie annuelle.

La date médiane d'observation de l'étiage minimal est généralement comprise entre la mi-octobre et la mi-novembre (plus précoces dans le Sud que dans le Nord). Si, pour la plupart des bassins des hautes terres centrales, du TSARATANANA et de l'Ouest, la dispersion des dates d'apparition de l'étiage autour de la médiane reste faible (un mois pour l'intervalle interquartile, deux mois pour les dates extrêmes), il n'en va pas de même pour la majorité des bassins du versant oriental et pour ceux du Sud. Dans ces régions il est possible d'observer des étiages précoces (début de la saison sèche ou même coeur de la saison des pluies, une année sur quatre) ou tardifs (décembre à fin janvier, une année sur quatre également).

Pour le versant oriental, les débits d'étiage de fin de saison "sèche" peuvent être soutenus par recharge partielle des aquifères de juin à septembre et des débits plus faibles peuvent être observés en début de saison fraîche ou même entre les crues de saison chaude.

Dans le Sud, où les réserves sont faibles ou inexistantes, les débits de basses eaux sont directement liés aux occurrences de précipitations et les plus faibles valeurs observées à n'importe quel moment de l'année (mais une année sur deux cependant entre septembre et novembre).

II.7.2.4. Les crues

Il peut, en première analyse, être tentant de rechercher les liaisons statistiques entre les débits maximaux de crue et un paramètre bien régionalisé comme la pluviométrie annuelle ou la lame écoulée annuelle (les précipitations journalières les plus fortes sont observées dans les zones où la pluviométrie est la plus élevée et présente également les meilleures conditions de saturation préalable).

L'équation de régression entre qs_{10} (débit spécifique décennal "corrigé") :
 $qs_{10} = Q_{10} (m^3/s/S^{.75})$ et H (lame écoulée annuelle)

$$qs_{10} = .004 H + 2,8 \quad R^2 = .22$$

Bien que significative statistiquement (valeur de la distribution de FISCHER SNEDECOR = 16,9 pour 62 couples, probabilité de signification supérieure à 99,5 %) n'explique cependant que moins de 25 % de la variance.

La dispersion résiduelle reste très forte et montre l'importance considérable des facteurs conditionnels physiographiques tels que le relief (contreforts des grands massifs, falaises orientales et occidentales,...), la nature du substratum (formations imperméables de l'ANDROY, perméables des basaltes fissurés, des sables...), la présence de dépressions marécageuses ou de périmètres rizicoles (ALAOIRA, ANKAIZINA, plaine d'ANTANANARIVO, ...), des singularités de site (défilé du BANIAN).

Débits maximaux de crue

Pour l'estimation, en vue d'aménagements, des débits maximaux de crue, des formulations empiriques ont été établies, telles que celle de l'EEM ou de la SOGREAH :

$$Q=6,8 A^{0.8} \text{ pour la récurrence de 25 ans}$$

$$Q=11 A^{0.8} \text{ pour la récurrence centennale}$$

ou bien, plus élaborée, celle de L. DURET (1972) :

$$Q=.025 A^{0.8} I^{0.32} P(1-36/P)^2$$

avec A (superficie du bassin), I (Indice de pente globale), P précipitation maximale journalière de période de retour T.

Ces formules (dotées parfois d'une précision assez problématique) donnent des ordres de grandeur assez corrects pour les recurrences pas trop rares et pour les bassins situés sur le centre du versant oriental mais fournissent des valeurs parfois très éloignées des résultats statistiques issus des observations dès qu'il s'agit :

- Des recurrences plus rares (cinquantenales et centennales): Dans ce cas, les calages se sont appuyés sur des valeurs statistiques peu fiables à l'époque de leur élaboration car s'appuyant sur des échantillons insuffisants ; c'est ainsi que J.DANLOUX a pu démontrer le poids, dans les échantillons, de valeurs remarquables comme la crue exceptionnelle de 1958 - 69.

Selon la sous-série considérée, les valeurs décennales de crue de la VOHITRA à ROGEZ (par exemple) peuvent être évaluées à 2 220 m³/s sur l'échantillon 1936-56 ou à 3 140 m³/s sur l'échantillon 1946-66 tandis que les valeurs centennales passent de 4 300 m³/s (échantillon 1936-56) à 12 400 m³/s (échantillon 1951-71).

- Des bassins présentant des particularités géomorphologiques (plaines d'inondation, bassins sur formations sédimentaires ou volcaniques très perméables, ...).

Pour ces bassins, l'indice de pente de la formule la plus élaborée (L.DURET) reste un paramètre bien insuffisant pour expliquer les variations importantes observées sur les formes du crue. Elle ne tient pas compte, en particulier, de l'influence déterminante des facteurs physiographiques tels que la couverture végétale, la nature du substratum (la formule a été essentiellement calée sur les bassins du socle cristallin) ou la présence de dépressions marécageuses et périmètres rizicoles.

Par exemple, sur le bassin de la BETSIBOKA, les deux formateurs (IKOPA et branche mère de la BETSIBOKA) présentent pour le même événement pluviométrique (cyclone de MANANARA nord, mars 1959) des débits spécifiques et des formes de crue très dissemblables :

	S km ²	QMAX m ³ /s/km ²	QMAX/VR	Q10 m ³ /skm ²
BETSIBOKA/AMBODIROKA	11 800	1,60	9,64	1,02
IKOPA/FIADANANA	9 450	0,08	2,22	0,21
IKOPA/ANTSATRANA	18 645	0,05	1,80	0,18

Sur l'IKOPA, les périmètres rizicoles et dépressions marécageuses de la plaine d'ANTANANARIVO entraînent un laminage considérable des pointes de crue.

L'insuffisance de l'information pluviométrique et l'imprécision sur les fortes valeurs de débit (étalonnage des hautes eaux) ne permettaient pas l'élaboration de modèles analytiques sur l'ensemble de l'île. C'est donc une formulation statistique (régression multiple) qui a été retenue par J.DANLOUX (1990) pour le calcul des débits maximaux et ceci pour les seules récurrences décennales, en raison de la consistance moyenne des échantillons.

Six variables explicatives ont été retenues :

- La superficie A (en km²)
- L'indice de pente globale I (en m/km)
- L'indice des précipitations H (en mm), moyenne sur le bassin des précipitations ponctuelles en 24 heures de récurrence décennale.

- L'indice d'exontation E inversement proportionnel au pourcentage de dépressions inondables du bassin. Cet indice est compris entre 0,3 pour les stations situées à l'aval immédiat de grands marais et lacs (MANINGORY à ANDROMBA, MAEVARANO à ANTELOPOLO par exemple) et 1 pour les bassins ne comportant qu'un pourcentage négligeable de marécages ou rizières.
- L'indice d'imperméabilité G lié au pourcentage de sols perméables sur le bassin. Cet indice est compris entre 0,2 pour les bassins situés sur les formations greso-sableuses du crétacé continental et 1 pour les bassins du socle cristallin, fortement latérisé. Des valeurs intermédiaires ont été retenues pour certaines formations volcaniques comme celles de l'ANKARATRA (0,3) ou pour les sols bruts d'érosion sur socle ancien du Sud (0,6), par exemple.
- L'indice de couverture végétale V pseudo-proportionnel à la densité de la végétation. Cet indice est compris entre 0,3 pour le "bush" et les "déserts" pierreux du sud et 0,9 pour les bassins forestiers denses tels que ceux du SAMBIRANO (TSARATANANA) ou de la RIANILA (versant est). Les valeurs intermédiaires ont été attribuées selon la nature du couvert : 0,5 pour les bassins sous savane avec cultures des hautes terres centrales (ANDROMBA à TSINJONY par exemple) ou 0,7 pour des bassins cultivés et reforestés comme celui de la NAMORONA (versant oriental).

La relation établie, à partir des trois premières variables explicatives :

$Q_{10} = 4,17 A^{.72} H^{.03} I^{.26}$ est statistiquement très significative ($R^2 = .89$ pour 115 valeurs) mais donne cependant, pour les bassins très perméables ou en partie marécageux, des résultats trop éloignés des valeurs statistiques observées pour être totalement satisfaisante.

La prise en compte des trois dernières variables explicatives :

$$Q_{10} = 4,34 A^{.72} H^{.03} I^{.26} E^{2,31} G^{1,25} V^{-.27}$$

correspond à un modèle plus généralement applicable. Pour 80 % des couples de valeurs (calculées et observées), les écarts restent inférieurs à l'intervalle $+ / - 50$ % dans une gamme de débits compris entre $10 \text{ m}^3/\text{s}$ et $20\,000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Cette formule pourra être améliorée en précisant les coefficients empiriques (E, G et V) à partir de cartes (topographiques, géologiques et de végétation) plus précises que celles qui ont été utilisées (échelle 1/500 000).

Pour les valeurs extrêmes des crues "record", la méthode des courbes enveloppes a été utilisée.

Les plus fortes crues observées (ou estimées après enquête historique) à Madagascar sont les suivantes :

Cours d'eau	A km ²	Q m ³	K (Francou-Rodier)	Date
MAHAVAVY du Nord	3210	10500	5,6	Daisy 1962
SAMBIRANO	2830	(8000)	5,4	1925
BEMARIVO	6515	(15400)	5,7	Cap Est 1959
BETSIBOKA (Ambodiroka)	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
ZOMANDAO	610	2460	5,0	Geneviève 1970
VOHITRA	1910	6090	5,3	Cap Est
SOFIA (RN 6)	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 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 ($Q/Q_0 = (A/A_0)^{1-k/10}$ avec $Q_0 = 10^6$, $A_0 = 10^8$, $k = 5$ à 6) sont difficilement extrapolables en deçà de 1 000 km².

Afin de couvrir une plus large gamme de superficies, une courbe de CREAGER a été

utilisée. Le coefficient de forme de la courbe-enveloppe ($C = 64$) a été déterminé à partir des débits maximaux décennaux dont l'échantillon était plus homogène et plus consistant que celui des débits extrêmes observés. Après calage sur les valeurs extrêmes, la courbe-enveloppe des plus forts débits connus a pour expression :

$$Q = 1,36 C (A/2,72)^n \quad \text{avec } C = 140 \text{ et } n = .89 A^{-0.46}$$

Enveloppant les crues de bassins aux risques très différents tant par leurs caractéristiques que pour la durée des observations, cette courbe s'appuie sur les plus fortes valeurs estimées des débits maximaux (BEMARIVO à ANDRANOMIDITRA, BETSIBOKA à AMBODIROKA, MANGOKY au BANIAN) dont les périodes de retour ont été évaluées entre 80 et 120 ans. en l'absence de toute observation, la courbe enveloppe peut être retenue comme un moyen sommaire d'estimation des crues centennales pour les 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.

Coefficient de ruissellement

A l'exception des bassins versants représentatifs et de ceux de l'IKOPA supérieure, il n'existe pas de bassins disposant d'un réseau pluviométrique suffisamment dense pour l'évaluation correcte des lames d'eau précipitées.

Pour les quelques bassins retenus, les coefficients de ruissellement les plus élevés sont compris entre 18 % (Bassin versant représentatif du BANIAN) et 62 % (B.V.R de la TAFAINA).

Ces coefficients (KR) s'inscrivent entre deux droites-enveloppes d'expression

$$KR \% = \mu A^{-n} \quad (n = .123)$$

Les valeurs de μ les plus élevées (75,6) correspondent aux bassins sur socle ancien à fort recouvrement latéritique (TAFAINA, ANKABOKA, SISAONY et branches mères de l'IKOPA). Les plus faibles valeurs de m (entre 16 et 35) correspondent aux petits bassins sous forêt dense ou sur formations très perméables (AMPANGALATSARY, BANIAN).

Les valeurs intermédiaires ($36 < m < 75$) correspondent aux petits bassins sur sols bruts d'érosion du sud (TRANOROA, IANAMOILORO) et aux bassins sous forêt secondaire (savoka) du centre -est (MAROLAONA).

Formes des crues

Les informations pluviométriques et limnimétriques disponibles ainsi que la taille de la plupart des bassins ne permettaient pas une analyse poussée des hydrogrammes de crue

(détermination des hydrogrammes unitaires). Une analyse plus globale a été effectuée et a porté sur les rapports entre le débit maximal ruisselé et les volumes correspondants.

Les points représentatifs de ces rapports (QMAXR/VR) reportés sur un graphe log-log (QMAXR/VR en ordonnée, A km² en abscisse) s'inscrivent entre deux droites -enveloppes d'expression :

$$QMAXR/VR = m A^k \quad (k = .356)$$

Les coefficients de position *m* correspondent :

- pour la limite supérieure ($m = 480.10^{-6}$) aux bassins très dégradés avec recouvrement végétal peu dense sur latérite. La plupart de ces bassins sont situés sur le socle cristallin ancien des hautes terres centrales ou du sud avec des pentes moyennes à fortes (TAFAINA, ANKABOKA, BETSIBOKA,...)
- pour la limite inférieure ($m = 48.10^{-6}$) aux bassins entièrement forestiers (RAMENA, IVOANANA,...) ou présentant de larges plaines d'inondation avec laminage des crues (plaine d'ANTANANARIVO, cuvette de l'ALAOIRA,...).

Les autres bassins se situent entre ces limites ; leur position dépend du degré de dégradation de la couverture végétale et de la pente globale du bassin.

La nature du couvert végétal et sa densité apparaît comme un facteur déterminant de l'acuité des crues. Les déforestations excessives sur brûlis (tavy) effectuées sur les falaises de l'est, par exemple, pourraient entraîner une aggravation des risques de crues.

Précipitations et crues cycloniques

Le sud-ouest de l'Océan Indien est une des régions au monde les plus affectées par les cyclones tropicaux. On note en moyenne une quinzaine de dépressions ou cyclones par an.

Tous les ans (en moyenne) et souvent, plusieurs fois par an (1945, 1958, 1960, 1973 par exemple), des épisodes dépressionnaires traversent l'île ; le plus souvent, d'est en ouest, avec des tracés souvent capricieux et infléchis et parfois même recourent les différents groupes de bassin (cyclone FELICIE en 1971).

Les épisodes pluvieux qui accompagnent ces météores sont souvent très abondants, bien que (probablement en raison de l'absence de postes dans les secteurs montagneux) les records observés restent stationnaires (568 mm en 24heures à MORONDAVA en 1977, cyclone Domitile).

On reste très en deça des records mondiaux enregistrés dans l'île de la Réunion, pourtant proche (1 114 mm en 12 heures, 6 078 mm en 15 jours).

Ces fortes précipitations sont responsables des plus fortes crues observées sur l'île : MAHAJAMBA par le KAMORO en 1903, crues record de la BETSIBOKA (24 000 m³/s à AMBODIROKA) en 1927 et 1943, etc... pour les crues historiques

Quelques événements remarquables ont été décrits dans des notes détaillées (trajectoire, précipitations, débits de pointe des bassins affectés...) :

-Cyclone d'ANDEVORANTO (janvier 1954)

Ce cyclone a traversé l'île d'ANDEVORANTO à MORONDAVA (côte ouest) avec de fortes précipitations principalement sur la haute IKOPA (crue de récurrence 80 années) et la côte ouest (412 mm en 24 heures à MAINTIRANO).

- Cyclone de MANANARA nord (mars 1959)

Ce cyclone a abordé la côte au Sud de la baie d'ANTONGIL le 25 mars puis s'est infléchi vers le sud-est. Il a provoqué des crues de récurrence comprises entre 120 et 150 ans sur la SOFIA et le BEMARIVO (nord-ouest de l'île).

-Cyclone EUGENIE (février 1972)

Ce cyclone a traversé l'île de l'est vers l'ouest (VATOMANDRY - BELO) en moins d'une journée, accompagné de vents forts et de pluies violentes, il a provoqué des crues extrêmement fortes (récurrence centennale) sur l'IKOPA et la région de MAINTIRANO.

L'examen des images satellitaires laisse à penser que les plus fortes précipitations et crues se trouvent systématiquement à droite de la trajectoire quand celle-ci n'est pas déviée et sont produites par les amas de cumulo - nimbus les plus développés sur les bandes extérieures et face au cyclone. Par contre, pour les cyclones déviés en l'absence de cumulo - nimbus, les précipitations semblent produites principalement par l'anneau tourbillonnaire.

II.7.2.5. Grandes unités naturelles hydrologiques

L'organisation régionale des principales caractéristiques des régimes hydrologiques apparaît assez clairement à partir des relations avec les facteurs conditionnels définies ci-dessus. La délimitation des grandes unités hydrologiques résulte de la superposition du découpage climatique (cartes ombro-thermiques) et du découpage géomorphologique (les zones de végétation étant généralement, si l'on ne tient pas compte des modifications d'origine anthropique, déterminées en premier lieu par la pluviométrie).

Nous présenterons ci-dessous, pour chacune des unités, la synthèse des caractéristiques principales des régimes en notant, au préalable, que si, à chacune de ces unités, peuvent être associés des caractéristiques régionales, des particularités locales (relief, distribution des formations géologiques, importance des altérations pédologiques, présence de dépressions marécageuses, bas-fonds et périmètres rizicoles, singularité des biefs et sites de contrôle, etc...) peuvent induire des variations parfois sensibles, particulièrement pour les débits maximaux de crue.

Régimes de l'extrême nord et de la montagne d'Ambre

Les bassins de la montagne d'Ambre présentent un dispositif rayonnant autour du sommet. Ils sont de forme allongée, de faibles superficies (inférieures à 100 km²) et reposent sur un soubassement géologique (basaltes fissurés) qui leur confère un régime très spécifique (bassins très perméables avec pertes par infiltration profonde).

- Région climatique humide à perhumide (sommets)
- Pluviométrie annuelle : 1 500 à 3 300 mm au sommet
- Irrégularité interannuelle : K3 compris entre 1,8 et 1,5
- Pluviométrie maximale en *décembre - janvier*, minimale en *août*
- Irrégularité intermensuelle : de l'ordre de 50
- Précipitation en 24 h. décennale : 200 à 250 mm
- Evapotranspiration potentielle : 1 000 à 1 300 mm
- Evapotranspiration réelle : 900 à 1 100 mm
- Ecoulement annuel : 600 à 700 mm (20 à 25 l/s/km²)
- Coefficient d'écoulement annuel : 25 à 30 %
- Infiltration profonde : 500 à 800 mm
- Irrégularité interannuelle : K3 voisin de 2
- Crues :
annuelle 100 à 300 l/s/km² ; assez modérées en raison de la perméabilité des versants, du couvert forestier et de l'encombrement des lits mineurs par des blocs basaltiques.
exceptionnelles 1 400 l/s/km² (1982) à 5 700 l/s/km² (1515 - 1973) sur la SAHARENANA avec effet de pente prédominant pour les fortes précipitations.
- Etiages : 5 à 6 l/s/km²

Régimes du TSARATANANA

D'organisation moins simple que sur la montagne d'Ambre, les cours d'eau du TSARATANANA correspondent à un dispositif rayonnant autour des sommets ; leurs bassins reposent sur les formations cristallines altérées qui constituent le massif, avec de

fortes pentes (20 à 30 m/km) jusqu'au recouvrement sédimentaire où la rupture est brutale (quelques m/km jusqu'au littoral). Les versants sont encore assez largement recouverts par la forêt ombrophile dense.

Les caractéristiques hydrologiques des versants sud et nord du massif sont plus modérées que celles de versants est et ouest soumis à deux flux pluviométriques plus puissants (alizés d'est et "mousson" d'ouest).

- Région climatique perhumide mésothermique (sommets) à mégathermique (littoral)
- Pluviométrie annuelle : 2 000 mm (piemonts) à plus de 3 000 mm (altitude)
- Irrégularité interannuelle : K3 compris entre 1,8 et 1,5
- Pluviométrie maximale en décembre - janvier, minimale en août
- Irrégularité intermensuelle : 10 à 20
- Précipitation en 24 heures décennale : 250 à 350 mm
- Evapotranspiration potentielle : 900 à 1 300 mm
- Evapotranspiration réelle : 850 à 1 200 mm (environ 80 à 90 % ETP)
- Écoulement annuel : 1 500 à 1 800 mm (45 à 60 l/s/km²) versant est et ouest
1 100 à 1 600 mm (35 à 50 l/s/km²) versant sud et nord
- Coefficient d'écoulement annuel : 50 à 60 %
- Irrégularité interannuelle : K3 voisin de 2
- Irrégularité intermensuelle (M/m) : 15 à 20 (max : février, min : octobre)
- Crues : annuelles , 400 à 800 l/s/km² ; décennales, 1 000 à 2 000 l/s/km²
- Etiages : 3 à 7 l/s/km² (10 à 15 l/s/km² sur le versant est)

Régime du nord-est

Situées entre la montagne d'ambre et le versant Nord-Est du TSARATANANA, la petite région nord-est est de relief modéré (à l'exception des bordures de l'ANALAMERA). La pluviométrie, beaucoup plus faible que sur les massifs voisins (trouée d'AMBILOBE) reste, en moyenne, inférieure à 1 500 mm. Il n'y a pas eu d'observations dans ce secteur mais les facteurs conditionnels laissent envisager des débits nettement plus faibles que sur les deux unités qui l'encadrent.

Régimes du Versant oriental

L'unité est délimitée, à l'ouest, par le rebord oriental de Hautes Terres (falaises de l'ANGAVO, du 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 cependant au domaine des Hautes Terres.

Ressources en eau

Ces bassins reposent, pour la majeure partie de leurs superficies, 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".

- Région climatique perhumide mégathermique
- Pluviométrie annuelle : 2 000 à 3 000 mm
- Irrégularité interannuelle : K3 compris entre 1,8 et 1,5
- Pluviométrie maximale en *janvier ou mars*, minimale en *octobre*
- Irrégularité inter-mensuelle : 4 à 6
- Précipitation en 24 heures décennale : 250 à 300 mm
- Evapotranspiration potentielle : 1 100 à 1 300 mm
- Evapotranspiration réelle : 1 000 à 1 200 mm (90 % de ETP)
- Ecoulement annuel : 1 300 à 2 000 mm (40 à 65 l/s/km²)
- Coefficient d'écoulement annuel : 50 à 70 %
- Irrégularité interannuelle : K3 compris entre 2 et 3
- Irrégularité inter-mensuelle (M/m) : inférieure à 5 (max. en mars, min. en septembre)
- Crues :
 - médianes 300 à 1 200 l/s/km²
 - décennales 1 000 à 2 700 l/s/km²

Dans l'extrême sud, les crues du petit bassin d'altitude de l'EFAHO sont très fortes : médiane 2 200 l/s/km² et décennale 4 900 l/s/km².

-Etiages : 13 à 30 l/s/km².

Dans le sud, valeurs beaucoup plus faibles en raison de l'absence d'aquifères latéritiques importants : de l'ordre de 3 l/s/km².

Régimes des Hautes Terres centrales

L'unité regroupe les bassins supérieurs des grands fleuves malgaches : BETSIBOKA, TSIRIBIHINA, formateurs 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 ne subsiste qu'à l'état résiduel et le couvert végétal prédominant est représenté par la savane. Les périmètres rizicoles occupent des surfaces relativement importantes.

Ressources en eau

- Région climatique humide mésothermique (moyenne des températures inférieure à 20°C)
- Pluviométrie annuelle : 1 200 à 1 500 mm (avec de moyennes inférieures à 1 000 mm dans les zones dépressionnaires : plaine d'ANTANANARIVO, cuvette de l'ALAO TRA et supérieures à 2 000 mm sur les massifs : ANKARATRA, ANDRINGITRA)
- Irrégularité interannuelle : K3 voisin de 1,8
- Pluviométrie maximale en *janvier*, minimale en *juillet-août*
- Irrégularité inter-mensuelle : 30 à 70
- Précipitation en 24 heures décennale : 100 à 150 mm
- Evapotranspiration potentielle : voisine de 1 000 à 1 100 mm
- Evapotranspiration réelle : 800 à 900 mm (70 à 80 % de ETP)
- Ecoulement annuel : 500 à 1 000 mm (15 à 30 l/s/km²) souvent inférieur à 500 mm dans les zones dépressionnaires
- Coefficient d'écoulement annuel : 30 à 50 %
- Irrégularité interannuelle : K3 compris entre 1,5 et 2
- Irrégularité intermensuelle (M/m) : 5 à 10 (max. : février, min. : octobre)

- Crues :
 - médianes* 120 à 300 l/s/km²
 - décennales* 180 à 800 l/s/km²

Pour les stations situées à l'aval de vastes dépressions marécageuses, les débits de pointe peuvent être fortement laminés (haute IKOPA, MANINGORY)

- Etiages : 3 à 8 l/s/km²

Régimes des Hautes Terres méridionales (Centre sud)

Cette unité correspond aux bassins des formateurs sud-est du MANGOKY et de l'ONILAHY et à celui 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 d'une pluviométrie moins abondante. Avec une altitude de 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.

- Région climatique sub-humide à semi-aride mégathermique (23 à 25 °C)
- Pluviométrie annuelle : 800 à 1 000 mm (1 200 à 1 500 sur les bordures orientales)
- Irrégularité interannuelle : K3 compris entre 2 et 2,5
- Pluviométrie maximale en *janvier*, minimale en *juillet -août*
- Irrégularité inter-mensuelle : 25 à 75
- Précipitations en 24 heures décennales : 100 à 150 mm
- Evapotranspiration potentielle : 1 200 à 1 600 mm

Ressources en eau

- Evapotranspiration réelle : 600 à 700 mm (environ 50 % ETP)
- Ecoulement annuel : 350 à 700 mm (Zomandao) soit 12 à 20 l/s/km²
- Coefficient d'écoulement annuel : 30 à 45 %
- Irrégularité interannuelle : K3 compris entre 2 et 3
- Irrégularité inter-mensuelle (M/m) : 10 à 20 (max. : janvier, min. : septembre - octobre)
- Crues :
 - médianes de l'ordre de 100 l/s/km² (600 l/s/km² pour le Zomandao)
 - décennales 170 à 300 l/s/km² (1 900 l/s/km² pour le Zomandao)
- Etiages : voisins d'un l/s/km²

Régimes du Nord - Ouest et de l'Ouest

L'unité correspond aux bassins du versant ouest sur les bordures occidentales du socle ancien (altitude moyenne 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, le bassin inférieur de la TSIRIBIHINA et les petits tributaires côtiers du BEMARAHHA.

- Région climatique humide mégathermique (25°C) à l'Est sub-humide mégathermique à l'Ouest
- Pluviométrie annuelle : de 1 300 mm (Ouest) à 1 800 mm (Est)
- Irrégularité interannuelle : K3 voisin de 1,8
- Pluviométrie maximale en *janvier*, minimale en *juillet - août*
- Irrégularité inter-mensuelle : 70 à 200 (400 à l'extrême orient)
- Précipitations en 24 heures décennales : 150 à 200 mm
- Evapotranspiration potentielle : supérieure à 1 500 mm
- Evapotranspiration réelle : de l'ordre de 700 mm (50 à 60 % de ETP)
- Apports annuels : compris entre 350 mm (10 l/s/km²) dans le sud de la zone et 900 mm (30 l/s/km²) pour le BEMARAHHA 1 100 mm sur les Tampoketsa de l'est.
- Coefficient d'écoulement annuel : 35 à 40 % (50 à 60 % pour le BEMARAHHA et les Tampoketsa).
- Irrégularité interannuelle : K3 compris entre 1,5 et 2
- Irrégularité inter-mensuelle (M/m) : 15 à 25 (max. : *février*, min : *octobre*)
- Crues : valeurs très dispersées et dépendant de facteurs locaux

Pour les médianes :

100 l/s/km² pour le MAEVARANO à l'aval de zones marécageuses

350 l/s/km² pour la MORONDAVA

850 l/s/km² pour l'ISINKO (Tampoketsa de KAMORO)

Pour les décennales : 1 000 à 2 500 l/s/km². Des valeurs très élevées (10 000 à 30 000 l/s/km²) ont pu être observées sur certains petits bassins du KAMORO.

- Etiages : de l'ordre de 1 à 2 l/s/km² en moyenne. Mais peuvent s'annuler pour les petites rivières côtières ou atteindre des valeurs plus élevées (2 à 4 l/s/km²) pour les cours d'eau du BEMARAHA et des Tampoketsa.

Régimes du Sud-Ouest

A 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 recouverts de savane maigre et de végétation arbustive sèche.

- Région climatique semi-aride mégathermique (températures supérieures à 25 °)
- Pluviométrie annuelle : 500 à 800 mm
- Irrégularité interannuelle : K3 compris entre 2 et 3
- Pluviométrie maximale en janvier, minimale en juillet - août
- Irrégularité inter-mensuelle : 25 à 100 (saison sèche très accentuée)
- Précipitations en 24 heures décennales : 150 à 200 mm
- Evapotranspiration potentielle : 1 200 à 1 500 mm
- Evapotranspiration réelle : de l'ordre de 600 mm (40 à 50 % de l'ETP)
- Apports annuels : 100 à 200 mm (3 à 6 l/s/km²)
- Coefficient d'écoulement annuel : 10 à 20 %
- Irrégularité interannuelle : 2 à 3
- Irrégularité inter-mensuelle (M/m) : 25 à 40 (max. : janvier, min. : septembre - octobre)
- Crues : de l'ordre de 1 000 l/s/km²
- Etiages : très faibles à nuls pour la plupart des petits cours d'eau. De l'ordre de 4 à 6 l/s/km² pour les tributaires de l'ISALO (FIHERENANA, TAHEZA, ...)

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 méridionale du socle ancien, sur les formations sédimentaires du KAROO à l'ouest, ainsi que, en auréole externe, sur les formations sédimentaires marines jurasso-cretacées, éocènes et quaternaires. L'altération est peu prononcée (sols ferrallitiques peu lessivés et parfois indurés, sols ferrugineux tropicaux peu lessivés et lithosols).

A l'exception de lambeaux forestiers sur l'ANOSY, la végétation dominante est représentée par la savane sèche et les formations xérophiles (bush).

Ces régimes 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. Ils s'en distinguent cependant par l'occurrence de précipitations sporadiques d'origine polaire pendant la saison "sèche".

- Région climatique aride mégathermique avec des températures moyennes (20 à 25°) modérées par les intrusions polaires.
- Pluviométrie annuelle : 350 à 600 mm (nord-est de la zone)
- Irrégularité interannuelle : K3 compris entre 2,5 et 3,5
- Pluviométrie maximale en *janvier*, minimale en *juillet -août*
- Irrégularité inter-mensuelle : 4 à 6
- Précipitations en 24 heures décennales : de l'ordre de 100 mm
- Evapotranspiration potentielle : 1 200 à 1 300 mm
- Evapotranspiration réelle : 400 à 600 mm (25 à 30 % de l'ETP)
- Apports annuels : 50 à 150 mm (quelques l/s/km²)
- Coefficients d'écoulements annuels : 10 à 15 %
- Irrégularité interannuelle : K3 compris entre 3 et 5
- Irrégularité inter-mensuelle (M/m) : supérieure à 50 et jusqu'à 100 et 200. Max. en *janvier*, min. en *août / septembre*
- Crues : très brutales avec des médianes comprises entre 150 et 300 l/s/km² et des décennales entre 350 et 900 l/s/km².
Des crues exceptionnelles atteignant 1 000 à 1 500 l/s/km² ont été observées.
- Etiages : de l'ordre de 0,5 à 1 l/s/km² sur les hauts bassins du socle. Nuls sur les petits bassins et les parties aval des grands bassins situés sur les formations sédimentaires (en particulier les sables "roux"). Un infero-flux notable peut être observé sur les plus grands cours d'eau.

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 aux stations de l'aval résultent de la composition des régimes propres des différentes fractions élémentaires du bassin. Citons, en particulier, les bassins suivants :

SOFIA	Hautes Terres centrales + Nord-Ouest + Tsaratanana
BETSIBOKA	Hautes Terres centrales + Nord-Ouest
TSIRIBIHINA	Hautes Terres centrales + Ouest
MANGOKY	Hautes Terres centrales (Matsiatra et Manantanana) + Hautes Terres méridionales (Zomandao et Ihosy) + Ouest (MAKAY) + Sud ouest (Malio et bassin inférieur)

ONILAHY	Hautes Terres méridionales (Imakoto et Mangoky) + Sud-Ouest (Isalo) + Sud (cours inférieur)
MANDRARE	Est (têtes de bassin) + Hautes Terres méridionales (Mandrare sup.)+ Sud (Mandrare inférieur)
MANANARA du Sud	Hautes Terres méridionales (jusqu'au seuil de SAOKIBANY) + Est (en aval du seuil)
MANGORO	Hautes Terres australes (Onive et Mangoro supérieur) + Est (petits affluents rive droite du Mangoro et Mangoro inférieur)
MANINGORY	Hautes Terres centrales (jusqu'à l'exutoire du lac Alaotra) + Est (en aval de l'exutoire)

En raison de la pluviométrie toujours plus abondante sur les bassins supérieurs (mais ce n'est pas le cas pour les bassins du versant oriental) et de la présence sur les bassins supérieurs situés sur le socle ancien de formations parfois épaisses de latérites, les débits spécifiques annuels et les débits d'étiage observés à l'aval des grands fleuves sont toujours assez nettement supérieurs au contexte local (caractéristiques régionales de l'unité hydrologique aval).

Sur la TSIRIBIHINA à BETOMBA (station située dans l'unité ouest) la lame écoulée globale (700 mm avec un coefficient d'écoulement annuel de 50 %) est très supérieure à celle de la fraction aval du bassin (450 mm pour une superficie représentant 28 % du bassin total).

L'amont du bassin (sur les Hautes Terres centrales) avec 72 % de la superficie et une lame de 725 mm représente 80 % des apports. Le débit d'étiage médian (4 l/s/km²) est quatre fois plus élevé que le débit caractéristique de l'unité environnante et alimenté pour les 3/4 par le bassin amont.

Sur le MANGOKY au BANIAN (unité sud-ouest) la lame écoulée globale est de 330 mm (Ke = 33 %). La fraction aval du bassin située sur les formations sédimentaires (60 % de la superficie totale) a une lame de 130 mm (Ke = 15 %) - 80 % des apports proviennent du bassin supérieur (40 % de la superficie totale) avec une lame de 550 mm.

Les débits spécifiques d'étiage des formations du socle représentent quatre fois ceux qui sont observés sur le bassin sédimentaire (respectivement 1,6 et 0,4 l/s/km²). Le débit d'étiage au BANIAN (0,9 l/s/km²) est deux fois supérieur aux caractéristiques locales.

II.7.2.6. Conclusions

L'analyse des données hydro-climatologiques recueillies à Madagascar sur les réseaux d'observations a permis de rassembler une information suffisamment riche, malgré les réserves faites sur certaines lacunes régionales, pour réaliser les objectifs recherchés :

- Etablir la géographie hydro-pluviométrique de l'île
- Dresser un bilan d'ensemble des ressources en eaux de surface
- Fournir le contexte permettant de valoriser les différentes études, la plupart du temps brèves et partielles, qui précèdent la conception et la gestion des divers aménagements hydrauliques.

Cette étude n'est cependant qu'une étape dans la connaissance de régimes si divers de Madagascar. Elle a permis de mettre en évidence les lacunes de l'information qui, dans le domaine de l'étude des régimes, sont de deux ordres :

- Une exploitation encore incomplète des données collectées. Un programme de réalisation d'une banque hydro-pluviométrique exhaustive est actuellement développée (sur financement FAC). Son achèvement apportera une valorisation certaine des observations recueillies.
- Des besoins importants d'observations et mesures supplémentaires concernant :
 - . La pluviométrie des secteurs encore peu étudiés : 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 (inventaire des plus fortes côtes, géométrie des biefs, mesures de forts débits)
 - . 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).

Ces études, complétées par des recherches complémentaires dans le domaine de l'environnement et de la qualité physico-chimique et biologique des cours d'eau, seront nécessaires pour optimiser l'aménagement et la gestion durable des ressources en eau de surface. Cet effort sera certes coûteux mais, à coup sûr, hautement rentable dans la perspective inéluctable d'une utilisation globale des ressources qui, tôt ou tard, interviendra à Madagascar comme ailleurs.

II.7.3. Bibliographie sommaire

- ALDEGHERI (M.) - 1964 : Monographie hydrologique de l'IKOPA et de la BETSIBOKA, ORSTOM - Paris.
- ALDEGHERI (M.) - 1969: Monographie hydrologique du MANGOKY, ORSTOM-Paris
- ARTHAUD (F.), GRILLOT (J.C.), RAUNET (M.) - 1990 : La tectonique cassante à Madagascar et son influence sur les écoulements - Journal of Canadian - Pacht. Sci OTTAWA, Canada.
- BATTISTINI (R.), LE BOURDIEC (F.),LE BOURDIEC (P.) - 1969 : Atlas de Madagascar BDPA - Institut géographique National à Madagascar - Antananarivo.
- BAUDUIN (D.) - 1982 : la Tsiribihina à Betomba, ORSTOM, Tananarive.
- BESAIRE (H.) - 1946 : La géologie de Madagascar - Annales du Service des Mines, N° 12 - Paris.
- BILLON (B.), MLATAC (N.) - 1969 : Etudes hydrologiques sur la bassin de la MORONDAVA ORSTOM Tananarive.
- CHAPERON (P.), DANLOUX (J.), FERRY (L.) - *à paraître* : Fleuves et rivières de Madagascar. in Monographies hydrologiques ORSTOM N° 10 - Paris.
- DANLOUX (J.) - 1974 : Contribution à l'étude hydrologique du MANDRARE, ORSTOM - Tananarive.
- DONQUE (G.) - 1975 : Contribution géographique à l'étude du climat Malgache. Mémoire de thèse. Université de Madagascar.
- DOSSEUR (H.), IBIZA (D.) - 1982 : Etudes hydrologiques sur l'Alaotra -Modélisation du bassin - ORSTOM -Paris
- HERVIEU (J.) - 1967 : Géographie des sols malgaches - Essai synthétique Cahiers ORSTOM, série pédologique, vol. V, n° 1 - Paris.
- PERRIER DE LA BATHIE (H.) - 1954 : Flore de Madagascar et des Comores. Firmin Didot et cie - Paris.
- RAVET (J.) - 1948 : Atlas climatologiques de Madagascar - Service Météorologique de Madagascar n° 10 -Tananarive.

Tableau 1 : situation et superficie des bassins

tableau 1 Cours d'eau	Station	Surface du bassin km2	Latitude		Longitude	
			S	E	S	E
TSARATANANA						
Sambirano	Ambanja	2 830	13°41		48°27	
Ramena	Ambodimanga	1 080	13°45		48°30	
Maevarano	Ambodivohitra	2 585	14°36		48°32	
VERSANT EST						
Maningory	Andromba	6 855	17°24		48°38	
Ivondro	Ringa-Ringa	2 560	18°11		49°15	
Vohitra	Rogez	1 910	18°48		48°36	
Rianila	Brickaville	6 000	18°49		49°04	
Vohitra	Andekaleka	2 615	18°48		48°57	
Rianila	Fetraomby	1 863	18°40		48°56	
Mangoro	Gare	3 600	18°53		48°06	
Ambofompatsy	Antsampandrano	95	19°37		47°05	
Onive	Tsinjoarivo	3 200	19°38		47°41	
Mananjary	Antsindra	2 260	20°59		47°44	
Ivoanana	Fatihita	835	21°03		47°45	
Namorona	Vohiparara	445	21°14		47°23	
Faraony	Vohilava	2 005	21°46		47°55	
Mananara Sud	Marangaty	14 160	22°56		46°58	
Efaho	Fanjahira	195	24°54		46°54	
SUD						
Mandrare	Andabolava	4 035	24°13		46°19	
Mandrare	Ambosary	12 435	25°03		46°28	
Mananara	Bevia	1 085	24°51		46°27	
Manambovo	Tsihombe	2 710	25°18		45°30	
Menarandra	Tranoroa	5 330	24°42		45°04	
SUD OUEST et HAUTES TERRES MERIDIONALES						
Onilahy	Tongobory	27 700	23°32		44°19	
Ihosal	Ihosal	1 500	22°23		46°07	
Zomandao	Ankaramena	610	21°57		49°39	
Mananantanana	Tsitondroina	6 510	21°19		45°59	
Matsiatra	Malakialina	11 715	21°01		45°48	
Mangoky	Banian	50 000	21°48		44°12	
HAUTES TERRES CENTRALES et OUEST						
Morondava	Dabara	4 640	20°24		44°47	
Sahanivotry	PK 197	430	20°07		47°05	
Manandona	Sahanivotry	1 450	20°08		47°05	
Mania	Fasimena	6 795	20°17		46°48	
Tsiribihina	Betomba	45 000	19°03		44°58	
CENTRALES ET OUEST SUITE...						
Ikopa	Ambohimanambola	1 407	18°57		47°36	
Ikopa	Pont de Mahitsy	1 780	18°52		47°27	
Sisaony	Andramasina	318	19°11		47°35	
Andromba	Tsinjony	350	19°08		47°31	
Ikopa	Bevomanga	4 290	18°48		47°19	
Ikopa	Fiadanana	9 450	18°10		46°57	
Ikopa	Antsatrana	18 645	17°26		46°53	
Isinko	Ambodiroka	600	16°57		46°58	
Betsiboka	Ambodiroka	11 800	16°57		46°17	

Ressources en eau

Tableau 2

Apports annuels

Cours d'eau	Station	P (mm)	H (mm)	DE (mm)	Ke (%)	Q m ³ /s	H10 (mm)	h10 (mm)	K3
TSARATANANA									
Sambirano	Ambanja	(2 500)	1500	(1 000)	60	133	2040	1055	1,9
Ramena	Ambodimanga	(2 900)	1800	(1 100)	65	67,3	2670	1250	2,1
Maavarano	Ambodivohitra	1730	600	1130	35	4,64	920	370	2,5
VERSANT EST									
Manungory	Andromba	1200	330	870	28	74,1	540	175	3,1
Ivondro	Ringa-Ringa	(2 500)	1320	(1 180)	53	107	1790	910	2
Vohitra	Rogez	(2 200)	1145	(1 055)	52	69,8	1580	755	2,1
Rianila	Brickaville	(2 900)	1840	(1 060)	63	345	2550	1185	2,2
Vohitra	Andekaleka	(2 700)	1710	(890)	63	140	2480	1040	2,4
Rianila	Fetraomby	(3 300)	(2 100)	(1 200)	64	139			
Mangoro	Gare	1500	770	730	51	88,9	1090	500	2,2
Ambofompatsy	Antsampandrano	(2 000)	890	(1 110)	45	2,85	1180	605	2
Onive	Tsinjoarivo	(1 590)	720	(870)	45	72,1	1025	475	2,2
Mananjary	Antsindra	(2 850)	1650	(1 200)	58	118	1990	1340	1,5
Ivoanana	Fatihita	(3 200)	1860	(1 340)	58	49,6	2420	1315	1,8
Namorona	Vohiparara	(2 000)	895	(1 105)	45	12,6	1280	570	2,3
Faraony	Vohilava	(3 000)	1840	(1 160)	61	119	2600	1200	2,2
Mananara Sud	Marangaty	1150	535	615	47	228	770	345	2,2
Efaho	Fanjahira	(3 100)	2070	(1 030)	67	12	3100	1130	2,7
SUD									
Mandrare	Andabolava	820	300	520	37	36,6	475	130	3,6
Mandrare	Ambosary	790	185	605	23	69,5	335	67	5
Mananara	Bevia	600	175	425	30	5,82	290	90	3
Manambovo	Tsihombe	565	50	515	9	4,57	87	24	3,6
Menarandra	Tranoroa	760	190	570	25	30,3	300	85	3,6
SUD OUEST et HAUTES TERRES MERIDIONALES									
Onilahy	Tongobory	800	165	635	21	145	195	105	1,9
Ihosy	Ihosy	935	340	595	36	16	505	200	2,5
Zomandao	Ankaramena	1300	575	725	44	10,5	850	365	2,3
Mananantanana	Tsitondroina	1100	440	660	40	91,1	590	310	1,9
Matsiatra	Malakialina	1300	625	675	48	232	870	420	2,1
Mangoky	Banian	1000	330	670	33	52,1	445	215	2,1
HAUTES TERRES CENTRALES et OUEST									
Morondava	Dabara	950	330	620	35	50,4	400	250	1,6
Sahanivotry	PK 197	1700	730	970	43	10,3	980	510	1,9
Manandona	Sahanivotry	1530	600	930	39	28,3	830	400	2,1
Mania	Fasimena	1680	720	960	43	158	1000	490	2
Tsiribihina	Betomba	1400	695	705	50	987	940	465	2
Ikopa	Ambohimanambol	1350	640	710	47	29,5	825	460	1,8
Ikopa	Pont de Mahitsy	1340	590	750	44	31,7	765	465	1,7
Sisaony	Andramasina	1250	595	655	48	6,01	765	390	2
Andromba	Tsinjony	1550	860	690	55	9,01	1150	590	1,9
Ikopa	Bevomanga	1340	605	735	45	77,1	760	460	1,6
Ikopa	Fiadanana	1390	575	815	41	175	735	440	1,7
Ikopa	Antsatrana	1515	770	745	51	458	910	630	1,4
Isinko	Ambodiroka	1780	1130	650	63	22,1	1470	820	1,8
Betsiboka	Ambodiroka	1500	780	720	52	297	1010	570	1,8

Ressources en eau

Tableau 3 Débits de crues maximales et d'étiages (en l/s/km²)

Cours d'eau	Station	S en km ²	Crues		Étiages	
			médiane	decennale humide	médiane	decennale sèche
TSARATANANA						
Sambirano	Ambanja	2830	550	1510	4,2	2,3
Ramena	Ambodimanga	1080	800	1800	6,8	4,0
Maevarano	Ambodivohitra	2585	100	170	1,1	0,64
VERSANT EST						
Maningory	Andromba	6855	25	55	2,1	0,9
Ivondro	Ringa-Ringa	2560	340	960	17	13
Vohitra	Rogez	1910	355	1325	13	9,5
Rianila	Brickaville	6000	515	1060	15	5,8
Vohitra	Andekaleka	2615	300	(1 260)	15,5	10,6
Rianila	Fetraomby	1863	1190	2700	29	22
Mangoro	Gare	3600	120	340	6,5	5,6
Ambofompatsy	Antsampsandran	95	200	370	7,7	6,1
Onive	Tsinjoarivo	3200	120	180	1,8	1,1
Mananjary	Antsindra	2260	205	415	14	10,5
Ivoanana	Fatihita	835	350	815	12,5	16,9
Namorona	Vohiparara	445	195	835	6,4	4,5
Faraony	Vohilava	2005	500	1130	12,8	9,5
Mananara Sud	Marangaty	14160	90	265	1,9	1,1
Efaho	Fanjahira	195	2200	4900	2,8	1,7
SUD						
Mandrare	Andabolava	4035	170	620	0,20	0,05
Mandrare	Amboasary	12435	175	645	0,02	0
Mananara	Bevia	1085	250	900	0,19	0,04
Manambovo	Tsihombe	2710	155	345	0	0
Menarandra	Tranoroa	5330	285	675	0,03	0
SUD OUEST et HAUTES TERRES MERIDIONALES						
Onilahy	Tongobory	27700	45	(55)	0,93	0,54
Ihosy	Ihosy	1500	105	275	1,3	0,35
Zomandao	Ankaramena	610	600	1900	0,5	0,3
Mananantanana	Tsitondroina	6510	210	280	0,5	0,13
Matsiatra	Malakialina	11715	210	425	2,4	1,9
Mangoky	Banian	50000	170	340	0,9	0,6
HAUTES TERRES CENTRALES et OUEST						
Morondava	Dabara	4640	340	775	(1,7)	
Sahanivotry	PK 197	430	180	330	4,9	3,3
Manandona	Sahanivotry	1450	130	255	2,8	2,0
Mania	Fasimena	6795	110	260	7,4	5,5
Tsiribihina	Betomba	45000	150	330	3,7	3,0
Ikopa	Ambohimanamt	1407			(9)	(5)
Ikopa	Pont de Mahitsy	1780	80	135	5,9	4,4
Sisaony	Andramasina	318	290	715	3,2	2,2
Andromba	Tsinjony	350	260	465	4,0	2,4
Ikopa	Bevomanga	4290	77	107	4,0	2,4
Ikopa	Fiadanana	9450	120	207	2,8	2,1
Ikopa	Antsatrana	18645	140	180	5,1	4,1
Isinko	Ambodiroka	600	850	2400	3,2	2,0
Betsiboka	Ambodiroka	11800	360	1020	4,5	3,4

Ressources en eau

Tableau 4 : débits moyens mensuels (en m³/s). Année hydrologique novembre/octobre.

Cours d'eau	Station	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
TSARATANANA													
Sambirano	Ambanja	36,5	120	275	368	336	214	105	56	36	26	21	19
Ramena	Ambodimanga	17	63	144	187	158	107	55	29	19	15	11	11
Maevarano	Ambodivohitra	8,6	34	87	130	121	85	35	21	16	12	707	5,4
VERSANT EST													
Maningory	Andromba	19	27	63	115	160	155	107	78	60	46	34	24
Ivondro	Ringa-Ringa	65	94	143	158	180	123	94	91	95	98	80	65
Vohitra	Rogez	41	65	105	116	132	77	55	53	57	59	46	36
Rianila	Brickaville	222	299	465	508	720	382	291	284	294	279	221	179
Vohitra	Andekaleka	77	127	234	256	274	151	105	97	105	110	81	67
Rianila	Fetraomby	85	115	245	233	216	146	107	100	104	140	94	81
Mangoro	Gare	53	119	155	185	179	105	67	54	49	43	33	30
Ambofompatsy	Antsampsandrano	1,8	3,8	5,5	5,8	6,5	3,5	1,9	1,5	1,2	1,0	0,92	0,93
Onive	Tsinjoarivo	42	110	137	166	149	89	47	34	31	27	20	17
Mananjary	Antsindra	66	128	178	216	208	152	102	82	81	83	64	49
Ivoanana	Fatihita	26	48	73	104	96	67	42	33	32	32	26	20
Namorona	Vohiparara	6,8	12,3	20	28	24	14	10	9,6	8,9	8,9	6,3	4,8
Faraony	Vohilava	62	124	183	261	224	140	100	77	80	84	59	48
Mananara Sud	Marangaty	108	303	496	545	435	249	145	110	108	115	77	62
Efaho	Fanjahira	7,2	9,3	21	31	23	13	8,7	5,8	10	9,9	3,7	3,3
SUD													
Mandrare	Andabolava	23	73	115	90	57	25	15	11	9	9	6,5	6,9
Mandrare	Amboasary	28	152	242	187	121	37	20	14	11	10,5	7,5	9
Mananara	Bevia	2,6	8,9	18	13	12	3,6	2,5	2,8	1,9	2,1	1,7	1,3
Manambovo	Tsihombe	3,6	12,4	15	14,5	6,5	1,4	0,36	0,21	0,22	0,03	0,23	0,58
Menarandra	Tranoroa	20	85	108	80	42	11	5,5	3,1	2,1	2,0	2,2	4,5
SUD OUEST et HAUTES TERRES MERIDIONALES													
Onilahy	Tongobory	121	327	373	327	229	87	57	52	46	44	40	49
Ihosy	Ihosy	5,6	25	50	42	28	13	7,4	5,8	4,8	4,4	3,3	3,4
Zomandao	Ankaramena	5	22	32	30	20	6,9	3,2	2,4	2,0	1,8	1,3	1,3
Mananantanana	Tsitondroina	42	208	261	224	172	64	31	27	20	19	15	13
Matsiatra	Malakialina	90	680	650	530	430	166	93	77	64	59	47	39
Mangoky	Banian	234	858	1520	1370	999	419	221	181	154	129	101	98
HAUTES TERRES CENTRALES et OUEST													
Morondava	Dabara	18	106	144	151	95	(22)	(16)	(19)	(12)	(11)	(9,6)	(9,1)
Sahanivotry	PK 197	8,1	14	18	21	18	13	8,1	6,1	5,5	4,7	3,7	4,0
Manandona	Sahanivotry	17,7	38	54	66	54	37	21	14,5	12,7	10,5	8,1	8,2
Mania	Fasimena	100	193	285	330	276	175	119	100	94	87	74	71
Tsiribihina	Betomba	424	1200	2390	3430	2020	937	399	297	248	223	202	223
Ikopa	Ambohimambola	27	37	42	41	40	26	23	23	24	25	23	23
Ikopa	Pont de Mahitsy	24	41	53	53	55	33	24	23	22	21	17	16
Sisaony	Andramasina	3,9	9,6	12,2	12,7	10,8	5,5	3,7	3,3	3,2	3,0	2,4	2,2
Andromba	Tsinjony	5,6	13,8	17,0	18,4	18,5	10,5	6,0	4,6	4,4	3,7	3,3	3,0
Ikopa	Bevomanga	44	108	152	153	156	101	52	41	38	33	27	25
Ikopa	Fiadanana	106	268	362	391	361	203	111	82	71	61	47	43
Ikopa	Antsatrana	264	640	933	1050	1040	523	286	219	179	149	121	122
Isinko	Ambodiroka	12	26	52	66	58	22	9,4	7,1	5,5	4,2	3,2	2,8
Betsiboka	Ambodiroka	159	414	625	737	695	295	167	136	112	95	75	70

III. RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

III.1.ORGANISATION DE L'HYDROGEOLOGIE A MADAGASCAR (aspects institutionnels)

Pendant la colonisation, le domaine des eaux souterraines était de la compétence du Service Géologique de Madagascar.

Lors de l'avènement de l'Etat malgache, en 1960, le service responsable des eaux souterraines a été placé sous la tutelle du Ministère chargé de l'eau. Ce service a changé plusieurs fois de nom:

- Service de l'Hydrogéologie à l'indépendance;
- Subdivision Hydrogéologique en 1965;
- Division Hydrogéologique en 1972;
- Service de l'Eau et de l'Hydrogéologie en 1984;
- Direction de l'Eau en 1992.

La Direction de l'Eau (DE) est maintenant placée sous la tutelle du Ministère de l'Energie et de Mines (MEM). Il est chargé, suivant la réglementation en vigueur, de faire respecter :

- l'ordonnance n°60-173 du 03/10/1963 pour le contrôle des eaux souterraines;
- le décret n°63-193 du 27/03/1963 concernant le captage et l'exploitation commerciale des eaux de table et des eaux minérales (modifié par le décret n°65-657 du 22/09/1965).

Face au problème de l'eau dans le Sud, le gouvernement malgache a mis en place l'Opération Alimentation en Eau du Sud (AES), structure d'intervention rattachée d'abord à la Présidence puis à la Haute Autorité de l'Etat (HAE). Ses activités sont limitées à la zone comprise entre l'Onilahy et le Mandrare et concernent la réalisation:

- de forages équipés de pompes à main en milieu rural;
- de forages pour l'alimentation en eau potable (étude et exploitation) de certaines localités (Manambaro, Amboasary, Ampanihy, Betioky-Sud...).

En dehors de ces deux principales organisations gouvernementales chargées des ressources en eaux souterraines et de leur exploitation, notons que d'autres organisations gouvernementales ou non (ONG), des bureaux d'études mènent également des travaux dans ce domaine (recherche, réalisation, exploitation...). Il s'agit principalement :

- du Service de l'Assainissement et du Génie Sanitaire (SAGS- Ministère de la Santé) qui a entrepris la réalisation de plusieurs forages dans le socle sur les hauts-plateaux et de puits dans les environs d'Ambatondrazaka en vue d'équiper quelques centres médicaux. Le projet du SAGS est en cours de réalisation depuis 1985. Il a fait appel au bureau d'étude Mac Donald pour l'exécution de quelques études de géophysique;
- de certaines ONG (FIKRIFAMA, Eglise Luthérienne de Madagascar, FJKM, Caritas ...) qui, dans le cadre de leurs activités pour l'amélioration des conditions de vie des populations rurales, exécutent des puits villageois dans différentes régions de Madagascar. Ces puits sont réalisés sans études hydrogéologiques approfondies;
- de sociétés privées (SIF, FORESTRAS, BRGM, SOGREAH...) qui font un certain nombre d'études et/ou de travaux pour le compte d'organismes dont la JIRAMA, la SIRANALA et le FAFIFAMA. Les résultats de ces travaux ne sont généralement pas communiqués au Ministère chargé de l'eau;
- de quelques autres organisations gouvernementales dont l'Opération Microréalisation, du Ministère chargé de l'agriculture et du génie rural et de petites entreprises de tâcheronage qui réalisent des puits pour l'alimentation en eau en milieu rural. Les données techniques de ces réalisations ne sont généralement pas disponibles;
- des établissements d'enseignement dont notamment l'EESP font effectuer par leurs étudiants des mémoires de fin d'études sur les eaux souterraines et leur exploitation. Ces mémoires contribuent à l'amélioration des connaissances.
- du Ministère de la Recherche Scientifique (MRS) qui, dans le cadre de ses actions pour la connaissance et la protection de l'environnement, mène actuellement des programmes concernant les eaux souterraines dont :
 - . l'Inventaire des Ressources Naturelles et Terrestres (IRNT) pour la réalisation de cartes au 1/200000^{ème}.
 - . le programme "Bilan des eaux, typologie des bas-fonds, érosion et modélisation sur des bassins emboîtés des hautes terres de Madagascar" pour l'étude des ressources en eaux de la région d'Antananarivo à partir d'un bilan hydrologique et de la géométrie et du fonctionnement des aquifères.

III.2. LES RESSOURCES HUMAINES ET MATERIELLES

III.2.1. Les ressources humaines

Les concentrations les plus importantes de spécialistes dans le domaine des eaux souterraines se situent évidemment à la Direction de l'Eau (DE), à l'AES et au SAGS. Par ailleurs, dans leurs activités annexes, certains services gouvernementaux dont notamment l'Observatoire de Géophysique, les départements de l'Université, l'EESP, le CNRE et le LNTPB ainsi que certaines ONG... (sans oublier les bureaux d'études) disposent de spécialistes dont les compétences ne sont peut-être pas assez souvent mises à contribution en vue d'une optimisation des ressources humaines.

Le champ d'action se situe à plusieurs niveaux (recherche, prospection, exploitation) et fait intervenir de nombreuses spécialités (géologues, hydrogéologues, hydrauliciens, foreurs, hydrochimistes...). Il serait donc bien délicat d'établir un état exact des ressources humaines (compétences et niveaux).

Cependant, au moins en ce qui concerne la Direction de l'eau:

- Le groupe des cadres est constitué d'ingénieurs de haut niveau ayant une formation technique professionnelle et opérationnelle avancée en géophysique (prospection), en technique d'études hydrogéologiques et travaux de captages, en technique de forage (rotary, fond de trou) et en technique de gestion des grands projets.
- Les agents d'exécution qui ont travaillé dans toutes les régions de l'île ont acquis une très grande expérience en matière d'études hydrogéologiques. A tous les niveaux, les agents de la DE (ingénieurs et techniciens) ont pu bénéficier de nombreux stages à l'extérieur (France, Italie, RFA, Japon, Etats Unis, Yougoslavie...).

III.2.2. Les ressources matérielles

Avant 1980, les matériels utilisés en matière de prospection et d'exploitation des eaux souterraines étaient relativement limités et ne permettaient qu'un nombre réduit d'opérations. Ainsi, dans la phase de prospection, l'utilisation des sondages mécaniques nécessitait des délais d'intervention très importants.

Au cours des 10 dernières années, les Départements chargés de l'Hydrogéologie ont été équipés de matériels modernes et plus performants dont notamment des sondeuses de grande capacité, des sondeuses équipées de marteau fond de trou, des appareils de prospection géophysique. Il ne s'agit pas ci-après d'établir un inventaire exhaustif des moyens en place. Signalons cependant ceux :

- du MEM, de l'AES et du SAGS,
 - . 10 sondeuses mécaniques et plusieurs lots (dont 4 au MEM) de tarières à main pour la réalisation de prospections et de forages,
 - . plusieurs équipements pour pompages d'essais (groupe électrogène, pompe, déversoirs, sonde...),
 - . des appareils de prospection géophysique (dont 2 au MEM)
- Méthodes électriques et VLF,
 - . divers équipements d'analyse physico-chimique des eaux (dont certains transportables),
 - . des matériels pour la construction de puits.
- des sociétés SIF et FORESTRAS qui disposent de gros matériels de forage.
- des autres services gouvernementaux et des ONG équipés de manière plus modeste de matériels de prospection et de mesure (Observatoire de Géophysique, CNRE/LRSAE...) et d'outillage et d'équipement pour la réalisation des petits ouvrages (puits). Les ressources humaines et matérielles actuellement disponibles à Madagascar tant pour les prospections et recherches sur les eaux souterraines que pour leur exploitation semblent suffisantes pour le moment. Evidemment, dans la perspective d'une exploitation plus systématique des eaux souterraines ces moyens seront rapidement dépassés.

III.3. HISTORIQUE DES TRAVAUX ET PRINCIPAUX RESULTATS

Les premiers rapports sur les recherches d'eau souterraine à Madagascar archivés au Ministère chargé de l'eau datent de 1910. Les études ainsi que les principaux résultats et réalisations sont énumérés ci-après par zone géographique.

III.3.1. L'extrême-sud: Etudes et travaux :

- Etudes géologiques, hydrogéologiques et hydrologiques de 1910 à environ 1940 par notamment GIRAUD, DECARY et CARLE.
- Etudes géologiques et hydrogéologiques de H. BESAIRIE de 1929 à 1958 avec les premiers sondages de reconnaissance.
- Campagne de forages de la SNTP en 1952-1953.
- Forages d'Ambovombe en 1954.
- Deuxième campagne de forages de la SNTP en 1955.
- Mission ARCHAMBAULT en 1956-1957.
- Prospection géophysique (électrique) par la CGG en 1958-1959.
- Thèse d'AUROUZE en 1959.
- Campagne de recherches hydrogéologiques à la tarière en 1959 par J. de SAINT OURS.

- Campagne de forage FAC en 1961.
- Etude par photographies aériennes par la Géothecnip en 1963.
- Etude géomorphologique (thèse) par R. BATTISTINI en 1964.
- Campagne de forages de la Direction des Mines-Division d'Hydrogéologie de 1969 à 1973.
- Etude hydrogéologique en vue de la programmation de la réalisation de 60 puits dans le cadre du projet FED: Création de 140 points d'eau dans le Sud de Madagascar par J. RAKOTONDRAINIBE et J. MARCHAL à partir de 1973.
- Réalisation du projet FED de 1974 à 1976 (réalisation de 60 puits en régie par le Service de l'Hydrogéologie et 80 impluvia à l'entreprise par le Service du Génie Rural).
- Rapport de synthèse sur l'hydrogéologie du Sud par C. DOMERGUE en 1974.
- Etudes hydrogéologiques du sous-écoulement du Menarandra à Ampotaka en vue de réaliser le captage pour le pipe-line du projet SCHLEGEL en 1976.
- Projet SCHLEGEL (alimentation en eau par pipe-line à partir du Menarandra et du Mandrare) en 1974-1976.
- Rapport sur l'hydrogéologie de l'Extrême Sud, zone comprise entre le Mandrare et le Menarandra par J. RAKOTONDRAINIBE en 1976.
- Rapport LONGHI ANTONIO : Bilan des ressources et des potentiels en eau de l'Androy en 1975-1976.
- Réalisation du projet d'approvisionnement en eau potable dans le Sud par la coopération japonaise (mise en place de la distribution d'eau par camion citerne) 1980-1981.
- Etude des ressources en eau par Land-System en 1981-1982.
- Mise en place de l'Opération Alimentation en Eau du Sud (AES) sur financement FED (réalisation de forages profonds en régie et d'impluvium à l'entreprise) en 1981.
- Réalisation de puits dans les régions d'Ambondro, de Beloha et d'Ambovombe par le FLM en 1984-1986.

L'ensemble de ces études et travaux ont permis de connaître les ressources en eaux souterraines de l'Extrême Sud où l'on distingue:

- 1° Les nappes profondes dans le quaternaire ancien et dans le néogène. Ces nappes ont en général, des eaux situées à grande profondeur (50 à 170 m), saumâtres à salées et sont exploitables à des débits très faibles ($<3\text{m}^3/\text{h}$ - plusieurs forages profonds sont restés secs).
- 2° Les nappes superficielles contenues dans les sables d'Ambovombe, les sables blancs d'Ambondro, les sables blancs de Beloha, les alluvions de la Bemamba, de l'Imaririny, de l'Ibetay et de la Noga. Ces nappes ont des débits faibles (1 à $4\text{m}^3/\text{h}$) d'eau douce à saumâtre et se trouvent à des profondeurs inférieures à 20 m.
- 3° Les nappes des sables des plages et des dunes exploitées par les villageois par puits traditionnels; l'eau y est saumâtre à salée. Actuellement, une équipe japonaise est en

train de réaliser un captage sur le Mandrare en vue de l'approvisionnement d'un château d'eau à Ambovombe par camion citerne.

Dans une phase ultérieure, il est programmé le raccordement des ouvrages par une conduite d'environ 34 km. C'est ce système qui doit assurer l'alimentation en eau potable (AEP) d'Ambovombe dont la distribution actuelle est réalisée par camion citerne. Le problème de la mise en place d'une adduction d'eau à Ambovombe devrait être résolue. Les autres localités du Sud sont déjà équipées. Ainsi,

- Tsihombe dispose d'une AEP par pompage du sous-écoulement de la Manambovo par la JIRAMA,
- Beloha dispose d'un captage dans les sables blancs,
- l'AEP d'Amboasary est assurée à partir des alluvions du Mandrare. Le milieu rural de l'extrême sud est alimenté en eau par:
 - des puits traditionnels ou "vovo" (puits modernes munis de pompe à main ou forages plus profonds généralement en panne),
 - impluvium, camion citerne, mare,...
 - par les fleuves Mandrare, Manambovo et Menarandra.

III.3.2. La zone cristalline à faible pluviométrie de la région sud

C'est la zone cristalline située au Sud de l'isohyète 800 mm. Elle comprend les régions d'Antanimora, Bekily, Ampanihy, Tranoroa, Tranomaro et Ebelo. Des études hydrogéologiques y ont été réalisées depuis 1910. A partir de 1980, le Ministère chargé de l'eau et l'AES y ont réalisé des forages dans le cadre de projets financés par le FNDE, l'UNICEF, le FED (140 points d'eau) et la BAD (projet AES). Les débits sont faibles pour les puits de 15 à 20m de profondeur.

En revanche, ils sont plus élevés (10m³/h) sur les forages de 50 à 70m réalisés au DTH (surtout dans la région d'Antanimora) dans les nappes de fissures. Ainsi, Ampanihy est alimenté par plusieurs forages réalisés dans le socle et il est prévu d'alimenter les principales localités de cette région par des forages de même type. Ces nappes du socle fissuré sont probablement intéressantes pour l'alimentation en eau du sud et de la zone cristalline en général. Un effort de recherche dans ce sens devrait donc être engagé afin d'en connaître leur capacité et leur mode de recharge.

III.3.3. La région de Toliara

Depuis 1925, date de réalisation du premier puits d'alimentation en eau de la ville de Toliara, de nombreux études et travaux hydrogéologiques ont été réalisés dans la zone comprise entre le Menarandra et le Mangoky dont :

- La thèse de M. KARCHE sur la nappe calcaire éocène du plateau Mahafaly.
- Les travaux de l'USAID dans les plaines de Toliara et de Befandriana (réalisation de plusieurs forages entre 1965 et 1967).
- Le projet ONU d'étude de la nappe de la plaine de Befandriana réalisé par le BRGM en 1968 et 1969.
- L'étude de la plaine littorale de Toliara par N. RANDRIANARISOA (mémoire EESP).
- La réalisation de 1989 à 1991 par une équipe japonaise du projet intitulé : Développement des eaux souterraines de la région Sud-Ouest de Madagascar.
- Les nombreux travaux exécutés par le Service Hydrogéologique dont notamment ceux de C. DOMERGUE.
- La reconnaissance hydrologique et géologique dans la région de Manombo/Ranozaza. (L. FERRY, F. ARTHAUD, B. DUSSARRAT, J. RALAIMARO, J.C. GRILLOT - 1991).

L'ensemble de ces études a permis de bien connaître et d'exploiter les nappes du bassin sédimentaire de Toliara; à savoir :

- 1° La nappe calcaire de l'éocène produisant des débits spécifiques de l'ordre de 3000m³/h/m pour l'alimentation en eau de Toliara et utilisée pour l'alimentation en eau potable (AEP) des localités de Befandriana, Soahazo...
- 2° Les nappes des sables superficielles exploitées par puits et forages pour l'alimentation en eau des principaux villages et pour la brasserie STAR de Toliara par exemple.
- 3° La nappe de grès de l'Isalo qui assure l'alimentation en eau des localités de Bezaha et de Betioky.
- 4° La nappe des calcaires du quaternaire utilisée pour l'alimentation en eau de Morombe.
- 5° Les nappes des sables des plages et des dunes exploitées pour l'alimentation en eau en milieu rural.
- 6° La nappe des calcaires de l'éocène qui alimente de nombreuses sources exploitées pour l'agriculture dont celle de Ranozaza.

III.3.4. La région de Morondava

Les eaux souterraines du bassin de Morondava ont été également étudiées par le Service de l'Hydrogéologie, en régie et sur des financements extérieurs dans le cadre de projets réalisés en coopération avec l'USAID (réalisation de puits et forages en 1965 et 1967), l'ONU et le BRGM en 1968 et 1969.

Signalons également des recherches individuelles dont celle de NICOLINI (thèse de 3^{ème} cycle).

Les principales nappes sont relativement bien connues et exploitées à savoir :

- 1° La nappe des grés du crétacé qui donne de nombreuses venues d'eau artésienne comme à Dabara.
- 2° La nappe des grés de l'Isalo exploitée à Beroroha.
- 3° La nappe des alluvions de Morondava exploitée par le SIRANALA pour l'irrigation de la canne à sucre et par la JIRAMA pour l'alimentation en eau de Morondava.
- 4° Les nappes des sables superficiels et des plages utilisées en milieu rural.

III.3.5. La région de Mahajanga

Les nappes du bassin sédimentaire de Mahajanga ont été étudiées et/ou exploitées par :

- le Service Hydrogéologique, l'USAID en 1965 et 1967,
- le BRGM dans le cadre d'un projet de la FAFIFAMA entre 1978 et 1980,
- une équipe japonaise en 1988 et 1989 dans le cadre du projet intitulé: Développement des eaux souterraines de la région Nord-Ouest de Madagascar
- les principales exploitations sont réalisées dans :

- 1° La nappe du calcaire éocène à Majunga.
- 2° La nappe artésienne des grés du crétacé à Marovoay.
- 3° La nappe des grés et sables superficiels à Ambato-Boeni.
- 4° Les nappes d' inféro-flux (exploitation et mise au point développées par le Service Hydrogéologique) à Antsalova et Morafenobe.
- 5° Les grés de l'Isalo à Antsohihy.

III.3.6. La côte Est

Les quelques études et travaux réalisés par le Service de l'Hydrogéologie concernent l'alimentation en eau des principales localités de la côte Est. Signalons également la réalisation par le Service de l'Hydrogéologie de puits et forages en milieu rural en 1966 et 1967 avec l'aide de l'USAID.

Les nappes étudiées et exploitées sont:

- 1° les nappes alluviales (captage des sous-écoulement à Sambava et Antalaha et par puits et forages à Fenerive Est)
- 2° les nappes des sables de dunes et des plages (puits de Mahanoro, Vatomandry, Mananjary, Vohemar).

Les principaux problèmes actuels rencontrés sur les nappes de la côte est sont :

- les remontées salines (Fénériverive est, Mananjary) et, surtout

- la pollution organique des nappes des sables due aux rejets domestiques (excrétas, ordures, eaux usées).

III.3.8. Les Hauts Plateaux du centre

Les principales études et réalisations du Service de l'Hydrogéologie dans cette région portent sur :

- quelques forages munis de pompes à main en 1967,
- les nappes alluviales dont celle d'Antananarivo en 1973,
- la nappe des altérites (Ambohitrakoho en 1986)
- la nappe du socle fissuré (2 forages à Ambohitrakoho en 1986 et quelques forages dans les plateaux cristallins du Sud avec l'AES).

Ces quelques études permettent de proposer le schéma suivant:

- 1° Les nappes alluviales sont bien connues. Elles donnent des débits de l'ordre de $25\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ dans les cas favorables comme à Maevatanana, à Mampikony et à Fenoarivobe. Cependant, les teneurs en fer sont trop élevées. C'est la raison pour laquelle la nappe alluviale d'Antananarivo n'est pas exploitée.
- 2° Par contre, la nappe des altérites présente une minéralisation très faible ($<30\text{micro-siemens}/\text{cm}^2$) et des débits peu importants ($0,1$ à $0,2\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$)
- 3° La nappe du socle fissuré est encore insuffisamment connue. Cependant, les quelques études réalisées dans la région d'Antananarivo (Ambohitrakoho et Mahitsy) montreraient que cette nappe dont l'eau est relativement peu minéralisée ($\approx 200\text{micro-siemens}/\text{cm}^2$) pourrait être exploitée, la localisation de forages ne pouvant se faire qu'à la suite d'études plus approfondies (morphotectonique et géophysique).

Les nappes de socle et des altérites sont importantes pour plusieurs raisons:

- A l'aval des systèmes, elles permettent le maintien des débits d'étiage en rivière pendant la saison sèche.
- La nappe des altérites contribue à l'irrigation des rizières de bas-fond et pourvoit à l'alimentation des rizières pendant les épisodes secs de la saison des pluies.
- Sur les hautes terres, l'exploitation de la nappe des altérites prédomine.

III.3.9. Le Nord de Madagascar

Les régions du Nord de Madagascar et notamment celles du Nord Est sont bien alimentées en eaux de surface. Très peu d'études hydrogéologiques y ont été effectuées mise à part l'étude des nappes alluviales de la plaine de Namakia, de la Mahavavy à

Ambilobe, des nappes des formations volcaniques de Nosy Be et des nappes des sables de plages de Nosy Be. Les nappes connues ont en général les caractéristiques suivantes:

- Nappes des sables de plages : 10 à 12 m³/h
- Nappes des formations volcaniques : 25 m³/h

III.4. TRAVAUX EN COURS ET BESOINS EN RECHERCHE

Le Ministère chargé de l'eau a notamment pour mission de mettre en place à Madagascar un réseau d'alimentation en eau devant satisfaire les milieux urbains (60 % à 70 %) et ruraux (5 % à 10 %) et de coordonner les activités dans ce sens. Ainsi, sur cette base, le Bureau d'Inventaire des Ressources Hydrauliques (BIRH) a pu archiver une quantité considérable de données et a mis en place un fonds bibliographique sur l'hydrologie de Madagascar. L'ensemble de ces informations a permis notamment de réaliser des maquettes de cartes hydrogéologiques au 1/500000^{ème} et au 1/2000000^{ème}

III.4.1. La Banque de Données Hydrogéologiques de Madagascar

Le BIRH est actuellement remplacé par le programme Banque de Données Hydrogéologiques de Madagascar (BDHM 2). Il s'agit dans ce programme de mettre sur support informatique l'ensemble des informations relatives aux eaux souterraines en vue d'un traitement automatique. Ce programme est réalisé au sein de la Direction de l'Eau avec la coopération du BRGM. Il est financé par la Banque Mondiale et le FAC. Afin de rendre cette banque de données plus performante, une coopération étroite entre tous les départements et organismes ayant des activités d'étude et d'exploitation des eaux souterraines est indispensable. Il est donc demandé à ces départements et organismes, conformément à la législation en vigueur :

- d'informer le Ministère chargé de l'eau de leurs activités et,
- de transmettre dans les meilleurs délais toutes les informations dont ils disposent.

Notons qu'un programme équivalent concernant les eaux de surface est en cours de réalisation: "Banque de Données Hydroclimatologiques de Madagascar (BDHM 1). Il est mené par la DMH, le CNRE et l'ORSTOM.

III.4.2. Réalisation des cartes hydrogéologiques et piézométriques

Le Ministère chargé de l'eau a réalisé des maquettes de cartes hydrogéologiques. Le Ministère de la Recherche Scientifique (MRS), dans le cadre du projet Inventaire des Ressources Naturelles et Terrestre (IRNT), a exécuté des cartes de ressources en eau au

1/200000^{ème} sur lesquelles les potentialités aquifères sont indiquées par cartographie de la lithologie.

Il semble urgent d'achever la réalisation d'une véritable carte hydrogéologique de Madagascar dans une coopération étroite entre tous les départements et organismes concernés.

III.4.3. Etude des potentialités aquifères des nappes d'altérites et des nappes du socle fissuré

Les ressources en eau des nappes d'altérites et du socle fissuré sont probablement importantes. Elle pourrait être une réponse à certains problèmes d'approvisionnement en eau potable pour l'alimentation en eau des villes et en milieu rural, agriculture, élevage. Leur exploitation serait sans doute de plusieurs types (barrages souterrains intercollinaires, forages profonds...).

Les problèmes à résoudre concernent leur réalimentation et la maîtrise des débits. Il y a donc lieu de continuer les recherches en cours (Ambohitrakoho/Mahitsy...).

Signalons un projet de recherche multidisciplinaire (et multi-organisme) intitulé Recharge des Aquifères de socle en zone semi-aride :

- Projet d'un site pilote expérimental (EJEDA) a été proposé en 1990 par notamment le MRSTD, le MIEM, l'Université des Sciences et Techniques de Langue doc (USTL), l'ORSTOM et le CIRAD. Ce projet n'a pu avoir de suite faute de financement.

III.4.4. Etude hydrogéologique en zone sédimentaire :

Dans les zones sédimentaires, les eaux superficielles sont très chargées et souvent polluées (cas de la Betsiboka à Mahajanga). Ainsi, en matière d'alimentation en eau potable, on a souvent recours aux eaux souterraines profondes des zones sédimentaires qui présentent des qualités physico-chimiques acceptables et ne nécessitent pas de traitement complexe onéreux (cas des eaux de surface).

III.4.5. Prévision et estimation des débits d'étiage :

Les stations hydrométriques sont principalement implantées sur de grandes rivières à l'exutoire de bassins hydrogéologiques de grande taille. Les débits d'étiage sont rarement disponibles sur les petits bassins (cas de l'alimentation en eau d'Ambositra).

La prévision et l'estimation des débits d'étiage sont donc estimées par élaboration de bilan hydrique alors que des mesures en rivière donneraient des résultats plus satisfaisants.

III.4.6. Etude de la pollution des nappes aquifères

Aucune étude détaillée n'a été effectuée alors que des problèmes de pollution sont déjà observés (cas de l'usine SOBOMA à Talatamaty) et devraient s'accroître.

III.4.7. Effets du couvert végétal sur les nappes

Les professionnels de l'eau ont préconisé les reboisements des périmètres de protection pour protéger les zones de captage (sources, puits...). Mais ce reboisement a parfois été suivi d'une baisse du niveau des nappes et du tarissement des sources. Il conviendrait donc qu'une étude sur les besoins en eau des végétaux soit lancée

III.4.8. Méthode de mesure et calcul en hydrogéologie

Il est souhaitable que Madagascar puisse suivre les nouvelles technologies en matière d'évaluation et d'exploitation des eaux souterraines.

III.4.9. Mise en place d'un réseau de base de mesures hydrogéologiques

Comme pour le réseau national d'observation hydrologique, les nappes doivent être suivies de manière régulière (niveau, physico-chimie...).

IV. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Le nombre de participants et d'intervenants à la table ronde "ressources eau" ainsi que l'importante assemblée qui assistait au débat témoignent de l'importance et de l'intérêt que les décideurs, les aménageurs et les utilisateurs portent à ce sujet.

Tous les points relatifs à ce thème et les questions qui se posent n'ont évidemment pas pu être abordés dans les quelques quatre heures qui lui ont été consacrées.

Les Journées de l'Eau ont montré qu'un volume considérable d'informations existe et que de nombreux travaux ont déjà été réalisés. Par ailleurs, dans la connaissance des ressources en eaux, qu'elles fussent de surface ou souterraines, des programmes de recherches et des campagnes de terrains sont en cours de réalisation et des synthèses sont en voie d'achèvement. Rappelons entre autres :

- La mise en place des Banques de données hydrogéologiques et Hydroclimatologiques,
- Les cartes au 1/200 000^{ème} réalisées par le projet Inventaire des Ressources Naturelles et Terrestres (IRNT),

- La parution prochaine de l'ouvrage "Fleuves et Rivières de Madagascar", première grande synthèse sur les régimes hydrologiques de l'île.

Il apparaît que ces travaux sont très mal connus des utilisateurs.

Dans un même ordre d'idées signalons également les rapports techniques, les mémoires de fin d'étude, les thèses etc..., dont l'édition souvent trop réduite ne permet pas une bonne diffusion des connaissances.

La question de la fourniture des informations de base issues notamment des banques de données a fait l'objet de nombreux commentaires et questions. Les avis sont restés très partagés. Ce point devra faire l'objet d'un débat spécifique.

Le débat concernant les réseaux de base d'observation hydrologique et hydrogéologique n'aura été que très bref. Nul n'a été besoin d'en démontrer l'intérêt et la nécessité. Il convient donc de les maintenir et de les développer avec notamment :

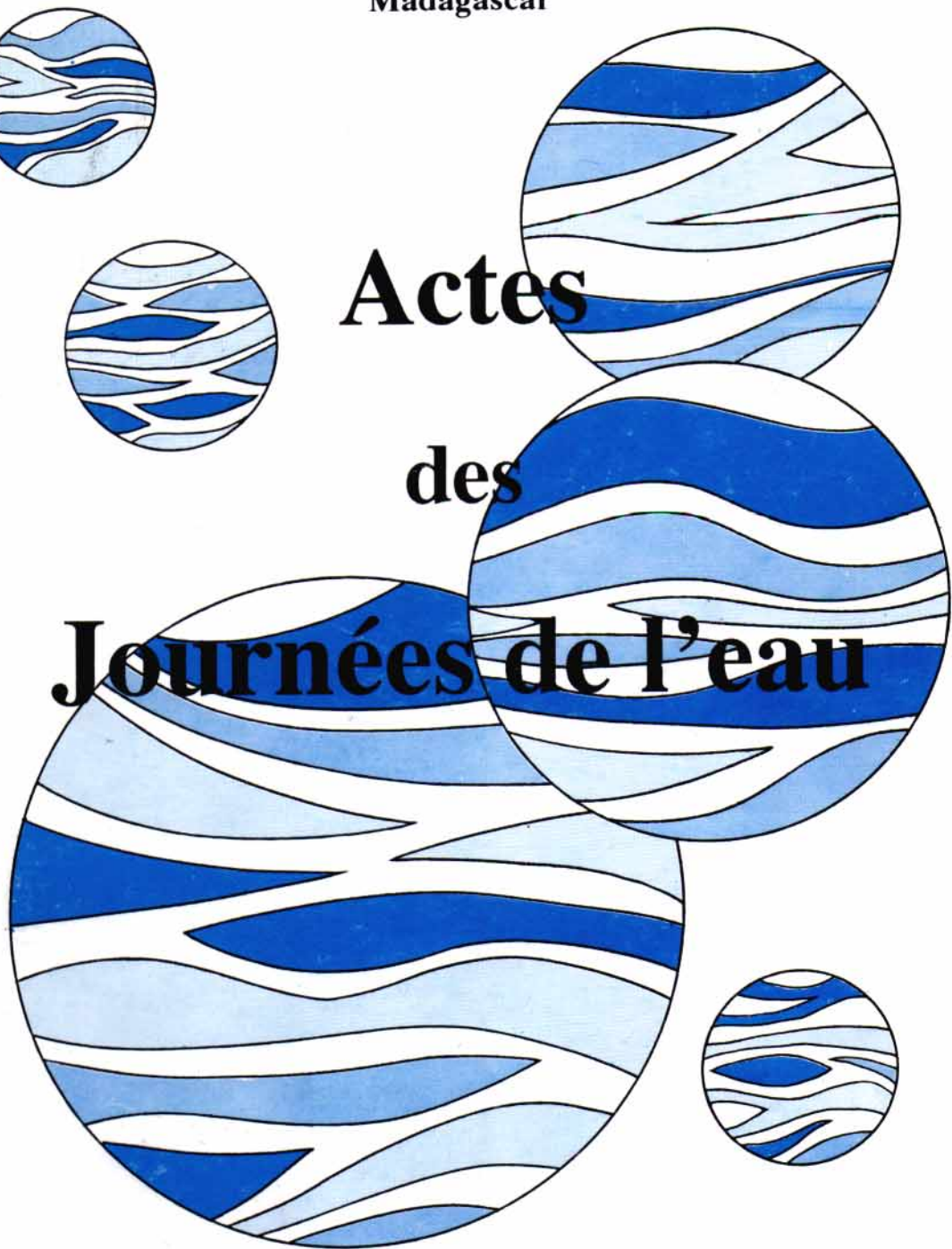
- la restructuration et la rénovation du réseau de base d'observation hydro-pluviométrique,
- et,
- l'implantation d'un réseau national d'observations piézométriques et de la qualité des eaux souterraines.

Il est rappelé que l'effort d'équipement qui pourrait être consenti, devrait être accompagné des moyens de fonctionnement indispensables.

Ce résumé ne présente évidemment que les principaux sujets abordés à la table ronde "ressources en eaux". Un document plus complet devra être élaboré.

Dans l'immédiat nous pouvons déjà retenir que les connaissances sont très insuffisantes et que les travaux de recherche et de prospection sur les eaux de surface et souterraines doivent être poursuivis et associés.

16 - 20 novembre 1992 Antananarivo
Madagascar



Actes
des
Journées de l'eau

Editeurs : Jean-Marc ELOUARD
Marta ANDRIANTSIFERANA