

MADAGASCAR

Programme Eaux Continentales

(PEC)

CONNAISSANCE, PROTECTION & GESTION

L. RAKOTOVAO

DIRECTEUR GENERAL DU CNRE

L. FERRY

HYDROLOGUE A L'ORSTOM

J. RAJONSON

HYDROCHIMISTE AU CNRE

J.-M. ELOUARD

HYDROBIOLOGISTE A L'ORSTOM

NOVEMBRE 1990

MRSTD / CNRE

ORSTOM / DEC

SOMMAIRE

| | | |
|------|--|----|
| I | CADRE GENERAL | 3 |
| II | DES OBJECTIFS FINALISES | 3 |
| III | ORGANISMES IMPLIQUES ET/OU UTILISATEURS | 4 |
| IV | DES BASES SCIENTIFIQUES POUR LE DEVELOPPEMENT | 5 |
| V | LES OUTILS DE LA RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT A METTRE EN PLACE | 7 |
| VI | PRESENTATION DES PROJETS ET PROGRAMMES | 12 |
| VI-1 | ETUDES HYDROLOGIQUES ET CLIMATOLOGIQUES DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA | 14 |
| VI-2 | BILAN HYDRIQUE ET MINERAL D'UN BAS-FOND SUR LES HAUTES TERRES DE MADAGASCAR | 15 |
| VI-3 | REGIMES HYDROLOGIQUES DE MADAGASCAR (monographie - PEC I) | 17 |
| VI-4 | BANQUE DE DONNEES HYDROCLIMATOLOGIQUES DE MADAGASCAR "BDHM" (PEC II) | 18 |
| VI-5 | INVENTAIRE DES EAUX DE SURFACE (PEC III) | 20 |
| VI-6 | BILAN DES EAUX, TYPOLOGIE DES BAS-FONDS, EROSION ET MODELISATION SUR DES BASSINS EMBOITES DES HAUTES TERRES DE MADAGASCAR (PEC V) | 27 |
| VI-7 | RECHARGE DES AQUIFERES DE SOCLE EN ZONE SEMI-ARIDE, PROJET D'UN SITE PILOTE EXPERIMENTAL (EJEDA - PEC IV) | 29 |
| VII | PLAN DE FORMATION | 30 |
| | ANNEXES | |
| | - Bibliographie | 33 |
| | - Résumé et sommaire de la Monographie hydrologique de Madagascar | 38 |

I CADRE GENERAL

Les pays développés connaissent maintenant de graves difficultés d'approvisionnement en eau tant en ce qui concerne les qualités que la quantité. Surexploitation, aménagements divers, pollution des nappes et des cours d'eau, urbanisation rapide en sont à l'origine. A Madagascar, on peut prévoir une situation identique à court terme pour les zones urbaines et leur périphérie et, à plus long terme dans les secteurs décentralisés.

Des programmes de recherche doivent donc être lancés dès maintenant afin de pouvoir faire face à cette situation mais,

- . les connaissances sont encore très fragmentaires sur les écosystèmes aquatiques et la faune,
- . peu de chercheurs nationaux sont formés dans le domaine des sciences de l'eau (hydrologie, hydrogéologie, hydrobiologie, sédimentologie, hydrochimie...).

II DES OBJECTIFS FINALISES

Les principaux aspects finalisés pourraient, entre autre, concerner :

- . Les ressources en eaux de surface et leur utilisation (programme de banque de données hydrologiques dès 1990 - financement FAC).
- . Les ressources en eaux souterraines (alimentation en eau villageoise dans le sud notamment).
- . Les problèmes d'envasement des lacs naturels ou artificiels et l'estimation des taux de sédimentation actuels et passés (paléoenvironnement).
- . Les sources d'alimentation potentielles et le maintien des qualités des eaux domestiques et industrielles (région d'Antananarivo et autres zones urbaines).
- . L'utilisation des eaux usées et la mise au point de solutions alternatives pour leur épuration (lagunage).
- . L'impact des pollutions chimiques (insecticides, engrais) ainsi que la recherche d'indices biotiques permettant d'apprécier la qualité des eaux.
- . Les effets de la déforestation ou du reboisement (essences utilisées en boisement monospécifique) sur l'érosion, les bilans hydriques, les matières en suspension, la chimie des eaux et leurs conséquences sur la composition de la faune aquatique.
- . La préservation des espèces autochtones: compétition avec les faunes importées (Fibata par exemple) et création de zones protégées.

- . Le maintien voire le développement du potentiel en ressources aquatiques vivantes faisant l'objet d'une exploitation (crevettes, poissons ...); biologie et écologie des espèces d'intérêt commercial.
- . La santé (utilisation, représentation et perception de l'eau en milieu rural).
- . La conservation des paysages (tourisme).
- . etc...

d'où l'intérêt de réunir les différentes compétences susceptibles d'intervenir dans le domaine de l'eau et de coordonner les recherches au sein de programmes interdisciplinaires.

I I I ORGANISMES IMPLIQUES ET/OU UTILISATEURS

- . Au CNRE une unité "Eaux Continentales" est en train de se constituer à partir d'un noyau déjà existant en hydrologie et en particulier dans le cadre d'une coopération entre le CNRE, le MTMT et l'ORSTOM. Elle aura pour objectif d'acquérir des connaissances de base en vue d'apporter des éléments de réponse aux questions que se posent les aménageurs.

Notons qu'il existe un projet IRNT chargé de la cartographie des ressources en eau de Madagascar.

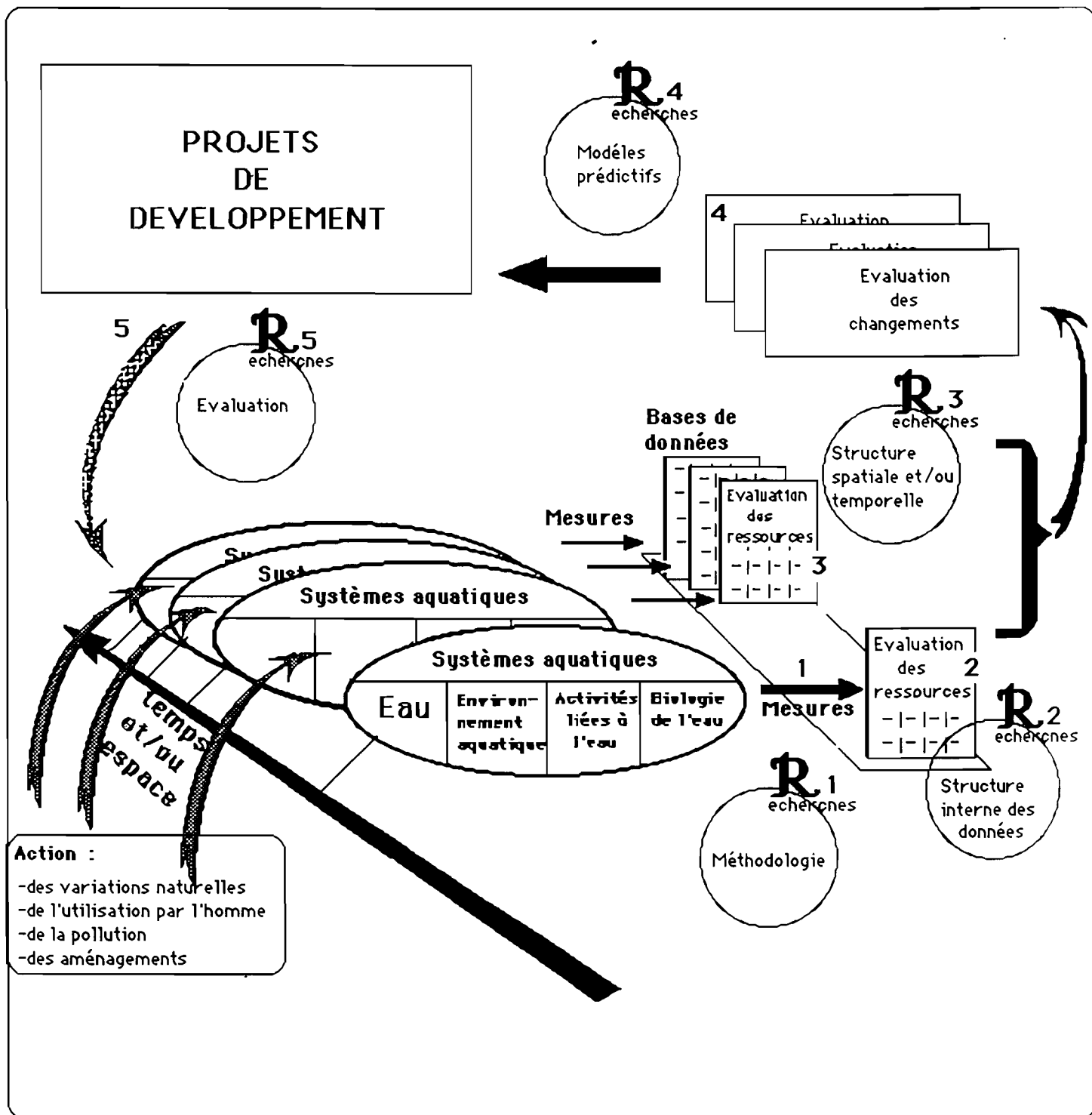
- . Les Universités de Madagascar (Ministère de l'Enseignement Supérieur).
- . Le Ministère de la Production Animale, des Eaux et Forêts (MPAEF).
- . Le Ministère de la Production Agricole et de la Propriété Foncière (MINAGRI).
- . Le Ministère des Transports, de la Météorologie et du Tourisme (MTMT), avec qui le CNRE et l'ORSTOM ont signé un accord de coopération scientifique le 27 avril 1989.
- . Le Ministère de l'Industrie, de l'Energie et des Mines (MIEM).
- . Le Ministère des Travaux Publics (MTP).
- . Le Ministère de la Santé.
- . L'Institut Pasteur.
- . La JIRAMA.
-

IV DES BASES SCIENTIFIQUES POUR LE DEVELOPPEMENT

Pour pouvoir répondre aux objectifs finalisés, les scientifiques doivent acquérir des connaissances de base à la fois sur les milieux et sur les organismes aquatiques. Celles-ci font en général défaut à Madagascar, ou ne sont pas toujours accessibles aux utilisateurs éventuels. Il est donc nécessaire pour cela de mener simultanément:

- La formation à la Recherche par la Recherche de jeunes scientifiques malgaches qui pourraient devenir par la suite les experts nationaux en matière d'eaux continentales
- La collecte et la synthèse de l'information disponible et son stockage sous des formes accessibles et duplicables. Les banques de connaissances qui se développent actuellement pourraient constituer un outil moderne adapté à cette situation.
- Les recherches de type plus fondamental, en liaison si nécessaire avec divers partenaires, afin d'être à même de porter un diagnostic scientifique sérieux sur les questions soulevées. Parmi ces recherches et sans que la liste en soit limitative, on peut ainsi considérer :
 - . La typologie des milieux aquatiques en fonction des régimes hydrologiques, des interactions eaux de surface / eaux souterraines, de la chimie des eaux, des communautés végétales et animales.
 - . Les inventaires faunistiques se focalisant sur les groupes présentant un intérêt pour la recherche (endémicité, ressources exploitables, nuisances, biodescripteurs, bioindicateurs). L'aspect répartition zoogéographique sera pris en compte.
 - . La biologie et l'écologie des espèces, en vue notamment de recueillir des informations sur les cycles vitaux, les relations trophiques et les comportements. Ceci est particulièrement nécessaire pour les espèces endémiques en danger, en concurrence avec des espèces introduites et que l'on souhaite préserver dans des réserves par exemple, mais également pour les espèces exploitables (crevettes, poissons) ou celles qui leur servent de nourriture.
 - . Le fonctionnement des systèmes aquatiques, avec en particulier l'influence des facteurs abiotiques sur la productivité des milieux, la répartition et la composition des communautés végétales et animales, les réseaux trophiques.

Ces connaissances de base doivent également s'intégrer dans un système de recueil de données à long terme dans des milieux sélectionnés, constituant alors de véritables observatoires de l'environnement aquatique. C'est dans un tel contexte que l'on peut réellement apprécier l'ampleur des impacts éventuels ou ses modifications liées aux évolutions naturelles à long terme des milieux.



Les niveaux de recherche nécessaires à la conception de projets de développement liés à l'eau.

V
**LES OUTILS DE RECHERCHE
POUR LE DEVELOPPEMENT
A METTRE EN PLACE**

LABORATOIRE COMMUN

Afin d'assurer une interdisciplinarité effective ainsi qu'une optimisation des moyens matériels et humains, et pour développer à Madagascar des sujets de recherche peu ou mal connus, le CNRE et l'ORSTOM ont décidé de réunir les projets d'études menés dans le cadre du PEC (Programme Eaux Continentales) en une structure commune. Cette structure constituera de ce fait un véritable "Observatoire des Systèmes Aquatiques et leur Environnement (OSAE)".

Cet observatoire devrait voir le jour avant la fin de l'année 1990. Il accueillera les PEC ainsi que le programme "Mangroves". Les disciplines telles que l'hydrologie, l'hydrogéologie, l'hydrobiologie, l'hydrochimie et la bactériologie en constitueront le noyau de départ.

Notons que l'hydrochimie est indispensable à la bonne réalisation de plusieurs PEC ainsi qu'au programme "Mangroves". Mais aucun laboratoire d'hydrochimie n'existe actuellement à Madagascar. Il est donc urgent de prévoir l'équipement d'un laboratoire de chimie des eaux qui permettra d'effectuer les analyses courantes (caractéristiques physiques et chimiques) et certaines analyses biologiques (teneur en chlorophylle par exemple).

DOCUMENTATION

Un fond documentaire regroupant les principaux ouvrages d'intérêt général, certaines études menées en Afrique Continentale et les publications et rapports concernant Madagascar sera constitué dans cette unité "Eaux Continentales". Cette opération préliminaire sera mise en relation avec la constitution de la base de données bibliographiques du CIDST (financement FAC en cours).

BASES DE DONNEES

a) Hydrologique

Elle a démarré en collaboration avec la DMH (MTMT) en 1990 (financement FAC). Elle est destinée à inventorier l'ensemble des observations pluviométriques et hydrométriques réalisées à Madagascar, de les regrouper sur support informatique et d'en faire une critique.

b) Hydrogéologique

Comme pour les eaux de surface, il s'agirait de mettre en place les moyens informatiques avec leurs logiciels et d'y adjoindre les informations piézométriques.

c) Hydrobiologique

Pour les différentes espèces végétales ou animales une base de données informatisée devra être constituée. Elle comportera notamment des informations sur la systématique, la biologie, l'écologie et la distribution géographique des espèces ainsi que leurs associations en communautés.

d) Hydrochimique

Elle intéresse autant les eaux de surface que les eaux souterraines.

Chacune de ces bases de données sera évidemment diffusable, interrogeable et réactualisée en fonction de l'acquisition d'informations et de l'avancement des connaissances. Certaines d'entre elles seront interconnectées pour l'exploitation des données.

COLLECTIONS DE REFERENCE

Les différentes espèces récoltées dans le cadre de l'inventaire faunistique feront l'objet de collection de références pouvant être consultées à Madagascar et éventuellement dupliquées dans des musées étrangers.

PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES

Les deux planches photographiques présentées dans les pages suivantes servent à illustrer

- . d'une part, la diversité des milieux aquatiques à Madagascar, soulignée par quatre types de cours d'eau

et,

- . d'autre part, quelques modes d'utilisation par l'homme des ressources aquatiques, figurés par la pêche, les retenues d'eau et l'alimentation en eau potable.

L'inventaire et la caractérisation des milieux aquatiques et de leurs ressources constituent les objectifs des Programmes "Eaux Continentales".



La Sofia au pont de la RN 6
(côte Nord Ouest)



Bas-fonds boisés à l'Ouest du lac Itasy
(versant Ouest)



L'Ikopa vers Maevatanana
(versant Ouest)



La Namorona
(côte Sud Est)



Pièges à poissons sur les Pangalanes
(côte Est - région d'Ambila)



Pêche artisanale au lac Alaotra
(Anororo)



Le lac Mandrozeza
(alimentation en eau d'Antananarivo)



Le lac Mantasoa
(hautes terres)

VI
PRESENTATION DES PROJETS
ET PROGRAMMES

PROGRAMMES TERMINES EN 1989-1990 (rappel):

- Etudes hydrologiques et climatologiques dans la région du lac Alaotra.
- Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar.

PROGRAMMES 1990-1991 :

- PEC I - Monographie hydrologique de Madagascar
- PEC II - Banque de données hydrologiques de Madagascar (BDHM)
- PEC III - Inventaire des eaux continentales
- PEC V - Bilan des eaux, typologie des bas-fonds, érosion et modélisation sur des bassins emboîtés des hautes terres de Madagascar.

HORS PROGRAMME :

- Bases bibliographiques.
- Aide à la mise au point de logiciels de modélisation des crues à Madagascar (application à la cuvette d'Andapa) - Travaux de M. A. RANDRIAMAHERISOA (Université Catholique de Louvain).

PROJET :

- PEC IV - Recharge des aquifères de socle en zone semi-aride, projet d'un site pilote expérimental (EJEDA)

(voir tableau page suivante)

Dans le cadre d'un contrat passé avec la Société Malgache d'Aménagement du LAC (SOMALAC), l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) a été chargé de la réalisation d'études hydrologiques et climatologiques dans la région du lac Alaotra à partir de la fin de l'année 1984. Prévu pour une durée de deux ans, ce contrat a fait l'objet d'un avenant prolongeant les études jusqu'à la fin de l'année 1987.

Les prestations demandées portaient sur six points:

- 1) Réalisation d'une synthèse dite "provisoire" par exploitation du modèle hydropluviométrique mis au point par l'ORSTOM en 1982 (extension des données sur la période 1945-1979).
- 2) Complément d'observations hydrologiques sur 10 sous-bassins périphériques du lac Alaotra.
- 3) Etalonnage de 18 vannes et canaux d'alimentation des périmètres irrigués.
- 4) Suivi de 17 postes pluviométriques et pluviographiques.
- 5) Formation d'une brigade hydrologique à la SOMALAC et stage d'un ingénieur au laboratoire d'hydrologie de Montpellier.
- 6) Participation à des sessions organisées par la SOMALAC visant à la formation du personnel de gestion des réseaux hydrauliques.

Les volets mesures et observations de terrain ont été achevés au début de l'année 1988. Le réseau d'observation ainsi que les matériels ont été remis à la SOMALAC dans la même année. Outre la synthèse "dite provisoire" réalisée en 1985 au centre ORSTOM de Bondy, l'ORSTOM a remis localement à la SOMALAC depuis 1984 [1 à 15]):

- 1 rapport de campagne,
- 10 fascicules,
- 1 inventaire de plus de 4000 jaugeages principalement réalisés par l'ORSTOM depuis 1975.

Le rapport final n'a pu être produit qu'en janvier 1989 (3 tomes, ~ 800 p.). A partir des résultats obtenus de 1984 à 1987 les observations antérieures (étude sur l'Alaotra 1975-1979 et étude à usage agricole 1980-1984) ont été revalorisées et intégrées à ce document.

Par ailleurs, hors programme, en collaboration avec la Direction de la Météorologie et de l'Hydrologie (MTMT/DMB), la pluviométrie journalière de la région du lac Alaotra a été saisie ou complétée jusqu'à la fin de l'année 1987. Une banque de données hydro-pluviométriques quasi-complète de cette région est maintenant disponible.

Cette base de données comprend:

- . 1 fichier de 4000 jaugeages;
- . 1 fichier de cotes instantanées (* 113000 couples H/T);
- . plusieurs fichiers d'observations réalisés au niveau des ouvrages hydrauliques;
- . 1 fichier opérationnel des débits moyens journaliers (307 années sur 36 stations);
- . 1 fichier d'environ 1200 années de pluviométrie journalière.

Notons que M. L. ROBISON, recruté en 1990 par le CNRE en qualité d'hydrologue, a très largement contribué à la saisie, la critique et le traitement de ces informations.

Les travaux d'hydrométrie réalisés ces dernières années dans la région du lac Alaotra ne peuvent être considérés comme des opérations de recherche mais en constituent la base. La banque de données mise en place constitue un outil essentiel pour le développement de cette région.

Dans le cadre de cette étude, des observations bathymétriques ont été réalisées sur les lacs de Sahamaloto et d'Antanifotsy. Elles mettent en évidence un comblement non négligeable de ces deux retenues depuis 1959.

En 1990, cette banque de données et quelques mesures complémentaires (morphologie et bathymétrie du lac - PEC III) devraient nous permettre de tenter un essai de bilan du lac Alaotra même afin,

- . de valoriser les travaux anciens
- et,
- . d'apporter, dès maintenant, quelques informations supplémentaires dans la perspective de nouveaux aménagements (barrage à l'exutoire du lac).

VI-2 BILAN HYDRIQUE ET MINERAL D'UN BAS-FOND SUR LES HAUTES TERRES DE MADAGASCAR

En 1987, l'IRAT et le FO.FI.FA. (MRSTD) ont sollicité l'intervention de l'ORSTOM en matière d'hydrologie de surface dans l'ATP "Bas-Fond". L'ORSTOM a équipé le bassin d'Ambohitrakoho et les premières observations ont débuté dès novembre 1987.

Pour rappeler les principaux objectifs de ce programme :

'Le programme de recherche porte sur l'étude interdisciplinaire du fonctionnement et des bilans hydrique et minéral d'un bas-fond représentatif des hautes terres de Madagascar, dans l'optique d'une économie des fertilisants en rizières et de la valorisation de ces dernières en saison sèche, par la culture du blé sans irrigation. L'objet de cette étude est d'appréhender, par cycle annuel, les divers flux et transformations hydriques et minéraux traversant le bas-fond et de différencier des dynamiques en fonction des unités morpho-pédologiques caractérisant ce bas-fond, des caractéristiques physiques du bassin versant dominant et du régime pluviométrique auquel il est soumis. Enfin, on tentera d'articuler ces informations en un bilan global, d'extrapoler à d'autres bassins et sur des réseaux plus vastes.'

N. RAUBET (juin 1987)

Cette étude multidisciplinaire faisait intervenir:

- . le FOFIFA,
- . le CIRAD,
- . le Ministère de l'Industrie, de l'Energie et des Mines (MIEM),
- . l'Université d'Antananarivo,
- . le CNRS,
- . l'ORSTOM,
- . les Universités de Montpellier et d'Avignon,
- et, plus récemment,
- . le CNRE avec la participation de L. ROBISON (hydrologue).

dans des domaines très variés:

- . physico-chimie,
- . physiologie végétale,
- . microbiologie,
- . hydrodynamique des remontées capillaires,
- . géologie structurale,
- . hydrogéologie,
- . hydrologie isotopique et hydrochimie,
- . hydrologie de surface.

Les hydrologues du CNRE et de l'ORSTOM ont travaillé en étroite collaboration avec le laboratoire d'hydrogéologie de l'USTL (J.C. GRILLOT) sur le volet "bilan d'écoulement".

Malgré quelques difficultés pratiques, un certain nombre de paramètres ont été mesurés depuis novembre 1987:

- les débits à l'exutoire du bassin,
- les pluies,
- les fluctuations des nappes,
- l'évaporation,
- la mise en eau des rizières (cartographie).

En 1988 et 1989, le CNRE et l'ORSTOM ont participé à la rédaction des rapports d'avancement (chapitre hydrologie) [17-18]. Par ailleurs, deux articles ont été acceptés par les revues "Hydrologie Continentale" [19] et "Journal of Hydrology" [20].

Enfin, les travaux réalisés dans les domaines de l'Hydrologie et de l'Hydrogéologie sur le bassin d'Ambohitrakoho ont été présentés à l'occasion d'une communication à l'Académie Malgache le 16/02/1989. Cette présentation a été suivie d'une excursion le 14/04/1989 sur le bassin d'Ambohitrakoho à laquelle participaient les membres de la section des Sciences Appliquées de l'Académie Malgache.

VI-3 REGIMES HYDROLOGIQUES DE MADAGASCAR (monographie)
(PEC I)

La première synthèse des observations hydrologiques de Madagascar est en voie d'achèvement. Cette étude a été réalisée par P. CHAPERON avec la participation de J. DANLOUX et L. FERRY, chercheurs à l'ORSTOM.

Un premier ouvrage intitulé "Fleuves et rivières de Madagascar" sera édité par le CNRE (MRSTD), la DMH (MTMT) et l'ORSTOM dans le premier semestre 1991. Il fera le point des connaissances sur les ressources en eaux de surface de Madagascar à partir des données principalement recueillies par l'ORSTOM entre 1950 et 1975; permettant ainsi :

- de valoriser les études hydrologiques de courte durée effectuées dans le cadre de différents projets d'aménagement;
- de faciliter l'étude critique (projet de banque de données hydro-climatologiques sur financement FAC - PEC II) des informations acquises par les différents services chargés actuellement de la collecte de données hydro-climatologiques;
- de guider le redéploiement et la rationalisation des réseaux de mesures hydro-climatologiques.

(un résumé et un sommaire sont présentés en annexe)

Un additif à cet ouvrage peut être envisagé dès maintenant, à paraître en 1994-1995. Son élaboration serait menée par un chercheur du CNRE avec la collaboration de la Direction de la Météorologie et de l'Hydrologie (MTMT) et l'appui de l'ORSTOM. Outre une mise à jour des connaissances, certains volets y seraient développés de façon plus approfondie; notamment en ce qui concerne l'étude des précipitations.

Ces documents constitueront les ouvrages de référence pour les projets d'aménagement (ouvrages routiers, microcentrales, prises...) et programmes de recherche (élaboration de cartes thématiques par l'IRNT par exemple).

Une demande conjointe MRSTD/ORSTOM a été déposée auprès de la Représentation du PNUD à Madagascar pour une participation à l'édition de ces deux volumes.

A/ JUSTIFICATION

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 climatologiques et hydrologiques fiables sont de plus en plus fréquentes. Les réponses faites à ces demandes sont toujours longues et se traduisent bien souvent pour l'utilisateur par de simples consultations de documents anciens ou de rapports de campagnes trouvés par hasard. De plus, 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.

Tandis que les campagnes de mesures en cours ne doivent surtout pas être interrompues, il est actuellement difficile de proposer des choix en matière de recherches hydroclimatologiques (et hydrogéologiques) avant d'avoir rassemblé les observations dans une banque de données et d'en avoir fait un inventaire et une critique. Outre son importance pour la sauvegarde et l'exploitation des résultats anciens, cette banque de données doit être considérée comme un outil essentiel pour le développement de Madagascar.

B/ OBJECTIFS

Le présent programme concerne les données hydrologiques et pluviométriques de Madagascar.

Le but du programme "Banque de Données Hydroclimatologiques de Madagascar" (BDHM) ne consistera pas seulement en l'archivage de données antérieures mais permettra en outre:

- la mise en place d'outils et d'une méthodologie,
- la centralisation des données hydroclimatologiques à Madagascar,
- 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 (système ARGOS).

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

C/ ORGANISMES IMPLIQUES - RESPONSABILITE SCIENTIFIQUE

Le programme "BDHM" s'inscrit dans le cadre du protocole de coopération scientifique signé le 27/04/1989 par:

- . Le Ministère des Transports de la Météorologie et du Tourisme (MTMT);
- . le Ministère de la Recherche Scientifique et Technologique pour le Développement (MRSTD);
- et,
- . l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM).

Il sera mis en oeuvre sous la responsabilité conjointe de

- . Monsieur E. RANDRIANARISON, Directeur de la Météorologie et de l'Hydrologie (DMH/MTMT);
- . Madame L. RAKOTOVAO, Directeur du Centre National de Recherche sur l'Environnement (CNRE/MRSTD);
- et,
- . Monsieur L. FERRY, Représentant de l'ORSTOM à Madagascar, Hydrologue;

Cette banque de données ayant pour but d'être aussi exhaustive que possible, des contacts seront pris avec le FO.FI.FA. la JIRAMA, la Division de l'Infrastructure Rurale..., également détenteurs de données hydroclimatologiques.

D/ CALENDRIER

Le Ministère Français de la Coopération a donné accord pour le financement du programme. Une convention de financement a été signée le 14 juin 1990 par le Fonds d'Aide et de Coopération (FAC) de la République Française et le Gouvernement de la République Démocratique Malgache pour la réalisation de ce programme ("Etude hydrologique à Madagascar" - convention n° 362/C/DEV/89/MAD). Notons que ce programme s'inscrit dans le cadre du programme international (financement Banque Mondiale, BAD, FAC): "Etude hydrologique et Afrique Sub-saharienne"

Du point de vue pratique, le programme ne démarrera effectivement qu'après l'achat des premiers matériels informatiques (fin 1990). Cependant, certains travaux ont déjà pu être réalisés:

- . Recensement de près de 650 titres, notes et rapports, concernant les eaux continentales et les aménagements hydrauliques à Madagascar [21].
- . Recensement de près de 900 postes pluviométriques et 350 stations hydrométriques.
- . Constitution d'un fichier de plus de 7000 années de pluviométrie journalière (dont ≈ 1200 pour la région du lac Alaotra).
- . Réactualisation des données hydrométriques de la région du lac Alaotra jusqu'en 1987 (chap. VI-1).

- . Transfert et adaptation des données hydrométriques de l'ORSTOM (≈ 900000 couples H/T).

Sur ces bases, l'ensemble du programme pourra être réalisé en 24 mois (1990-1993). Nous pouvons y voir quatre phases :

- 1) Installation des matériels et implantation des logiciels de l'ORSTOM (15 jours) accompagnés d'une formation préliminaire.
- 2) Transfert et adaptation des fichiers déjà existant et saisie des données brutes (10 mois).
- 3) Vérification et critique des observations (10 mois).
- 4) Edition des données hydrologiques et pluviométriques au pas de temps mensuel (3 mois).

Deux groupes de travail pourront être constitués à la DMH, et à l'Observatoire des Systèmes Aquatiques et leur Environnement (OSAE) CNRE/ORSTOM dont l'installation est prévue pour la fin de l'année 1990 (chap. V). La formation et l'information mutuelle nécessiteront la mobilité des agents au sein de ces deux groupes ainsi que la libre circulation des documents et archives.

Notons qu'au cours du dernier trimestre 1990 Messieurs R. RAKOTOMALALA et R. RAMANAMAHEFA respectivement hydrologues au CNRE et à la DMH ont participé à la réalisation d'un certain nombre de travaux dans les locaux de la Représentation de l'ORSTOM à Madagascar [22 à 24].

Enfin, deux bureaux ont été mis à la disposition du programme par la DMH. Trois techniciens du CNRE et de l'ORSTOM y sont installés depuis le début du mois de novembre 1990.

VI-5 INVENTAIRE DES EAUX DE SURFACE (PEC III)

A/ OBJECTIFS

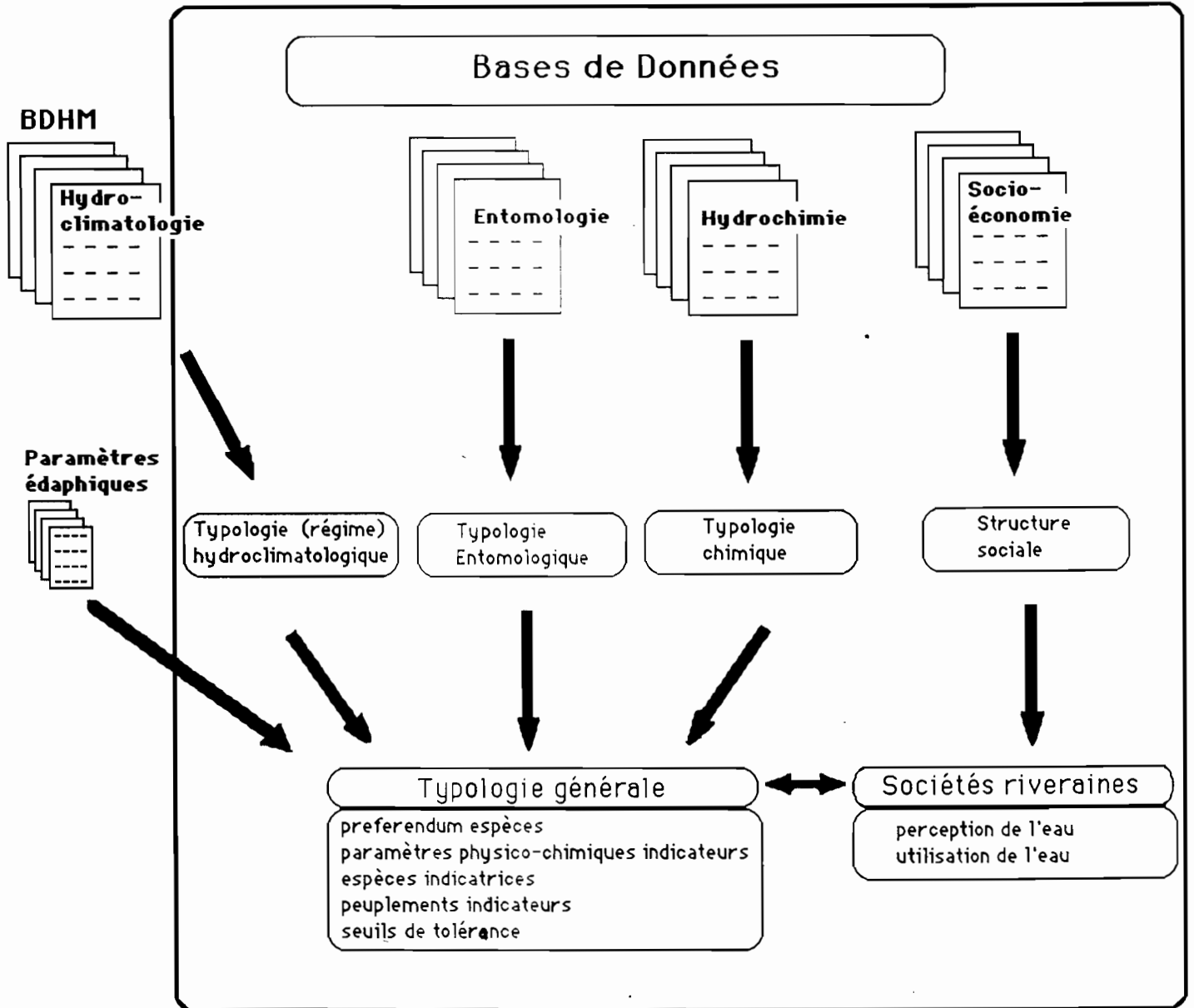
Ce programme projette d'établir une classification interdisciplinaire des eaux dormantes ou courantes malgaches, fondée sur leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques.

A terme, les résultats acquis, collectionnés dans des banques de données, permettront d'évaluer les grandes modifications naturelles ou engendrées par l'action de l'homme.

Aux recherches proprement dites devront s'ajouter en 1991:

- la réunion d'une table ronde sur les eaux continentales à Madagascar,
- la préparation d'un dossier technique et financier pour la prolongation du PEC III et le démarrage de thèmes complémentaires ou de nouveaux sous-programmes.

PROGRAMME PEC III



Utilisation des bases de données hydroclimatologiques, hydrochimiques, entomologiques et socio-économiques pour la caractérisation des eaux continentales et comme référence pour la mesure du changement.

Pour des raisons de présentation et de présence de spécialistes, quatre volets sont présentés.

B/ METHODES

1/ ENTOMOLOGIE

L'étude des invertébrés aquatiques et, plus particulièrement, des insectes des rivières et des lacs, se propose d'établir une base de données de référence permettant la caractérisation typologique des différents cours d'eau fondée sur la distribution de ces organismes en fonction des paramètres physico-chimiques des eaux, du régime hydrologique et des caractères morpho-édaphiques. Une telle base, permettant de suivre l'évolution du milieu, servira dans l'élaboration future de plans de protection et de gestion efficaces pour l'ensemble des aires aquatiques continentales malgaches.

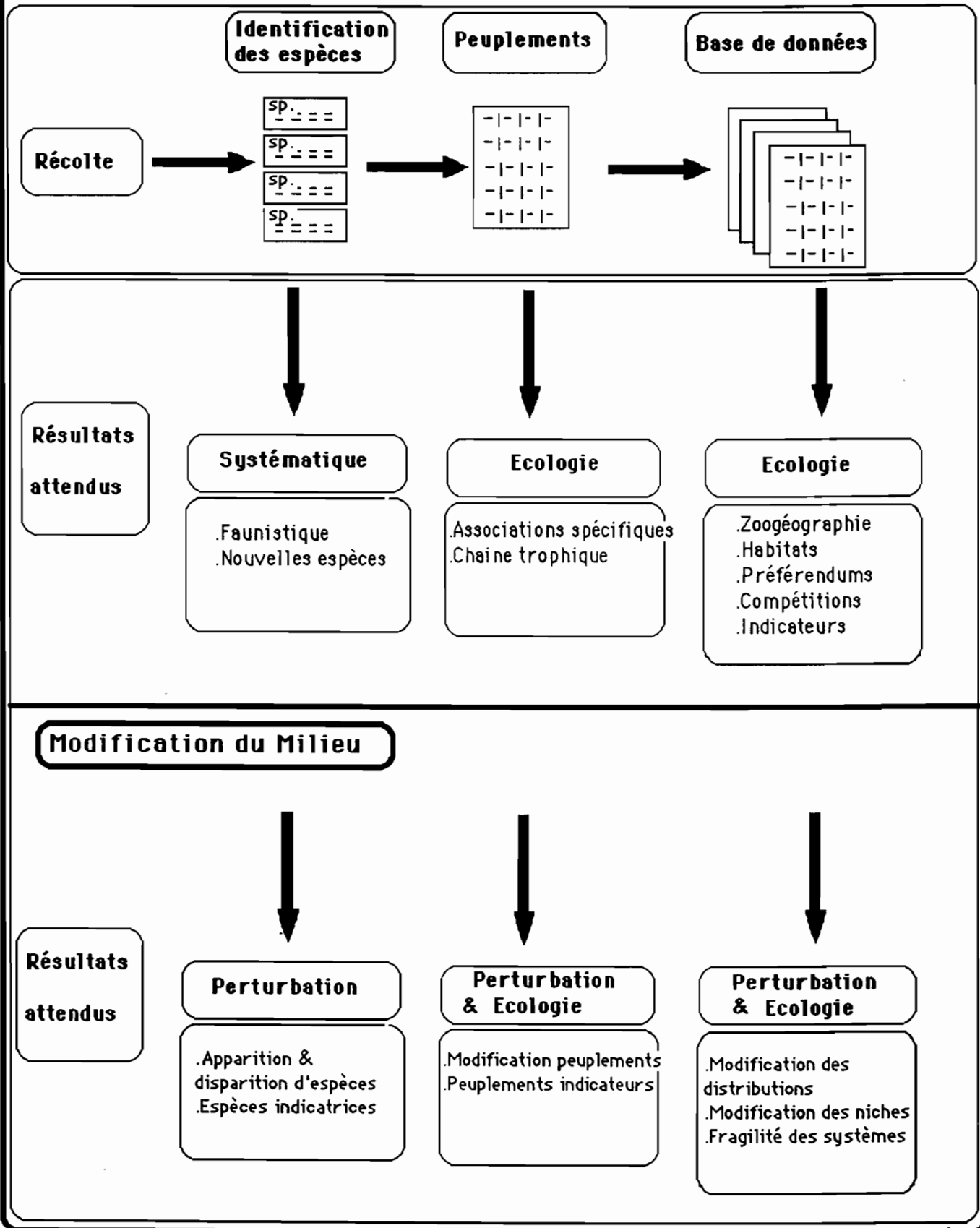
Les insectes aquatiques ont été retenus car ce sont de bons descripteurs du milieu, des indicateurs de la qualité des eaux et, d'une manière plus large, de toute perturbation. De plus, l'échantillonnage aisé ainsi que la brièveté des cycles de développement permettent de percevoir rapidement l'impact de toute modification du milieu (pollution, aménagement, déforestation). Le suivi des populations d'insectes aquatiques devrait donc permettre :

- de répertorier et de décrire les espèces de la faune aquatique malgache (sans doute plus de 1000 espèces dont une grande partie est inconnue);
- de cartographier la distribution géographique des espèces;
- de préciser leurs localisations dans les cours d'eau en fonction de la taille et du rang de la rivière, du régime hydrologique, de l'altitude, du couvert végétal et de la composition chimique des eaux. Le modèle numérique de terrain sera l'outil utilisé pour la caractérisation des profils hydrologiques;
- d'identifier les espèces descriptrices de milieux ou indicatrices d'événements ou de conditions particulières;
- d'établir une classification biologique générale des rivières de Madagascar en fonction des typologies entomiques obtenues.

La mise en oeuvre de ces recherches inclue :

- La documentation.
 - . Collecte des références et des publications concernant les insectes aquatiques de Madagascar (systématique, biologie, écologie).

Recherches entomologiques



- . Collecte des références et des publications concernant les insectes aquatiques de l'Afrique continentale (systématique, biologie, écologie). Ce complément documentaire est indispensable pour toute description d'espèces nouvelles ainsi que pour comparer les résultats obtenus à Madagascar en biologie et écologie, avec ceux acquis en Afrique continentale.
- La systématique.
 - . Constitution d'une collection de référence.
 - . Confection d'un catalogue photographique et iconographique.
 - . Description des nouvelles espèces.
 - . Micro-élevages pour établir les relations entre larves, nymphes et adultes.
 - . Constitution de clés de détermination.
- La récolte des données.
 - . Adaptation des techniques d'échantillonnage aux cours d'eau malgaches.
 - . Choix des cours d'eau.
 - . Tris et comptages des échantillons.
- Le stockage et l'analyse des données.
 - . Conception de la base de données.
 - . Saisie.
 - . Analyse des données.

2/ HYDROCHIMIE ET MICROBIOLOGIE

- Hydrochimie.

Les données physico-chimiques sur les eaux continentales malgaches sont très fragmentaires. Le Programme PEC III, se propose de faire un inventaire physico-chimique préliminaire d'aires aquatiques représentatives de l'ensemble des eaux continentales malgaches (lacs, cours d'eau), pour essayer :

- . de définir les états trophiques (oligo, méso ou autotrophe) et les typologies physico-chimiques des aires aquatiques;
- . de dresser la carte physico-chimique globale des eaux malgaches;
- . d'expliquer les distributions et les évolutions de certaines communautés biologiques (animales ou végétales) aquatiques;
- . d'évaluer d'un point de vue physico-chimique, l'impact des pollutions, déforestation, des aménagements sur l'environnement aquatique;
- . de compléter les données sur la pédologie et les régimes hydrologiques;

Sur chaque site des relevés de pH, de température, de turbidité, de quantité de matières en suspension seront réalisés. Les taux d'oxygène dissous, de nitrates, de sulfates, de phosphates, du cuivre, du fer seront également mesurés.

Les données seront regroupées en une base de référence informatisée, consultable pour toute étude.

Microbiologie.

Les bactéries jouent un rôle important dans l'environnement aquatique non seulement en tant qu'agents impliqués dans les divers processus du cycle de la matière, mais également et surtout en tant qu'indicateurs de la qualité des eaux.

Dans le programme PEC III, ces deux fonctions bactériennes seront recherchées pour essayer de mettre en évidence les effets des diverses perturbations (pollution et autres) sur l'état d'équilibre des écosystèmes aquatiques continentaux.

Pour les sites aquatiques non perturbés, les analyses bactériologiques porteront sur le dénombrement et l'identification de la microflore totale.

Pour les sites aquatiques touchés par des impacts précis, les microflore témoins seront recherchées et dénombrées en même temps que la microflore totale. Par exemple la microflore témoin de pollution domestique (coliformes, streptocoques...), et la microflore témoin de surcharge en composés (minéraux ou organiques) résultant de pollution par les résidus d'engrais, les rejets industriels ou autres.

Les évolutions de ces différentes communautés bactériennes, reliées aux variations des paramètres physico-chimiques devraient permettre de préciser :

- . l'état d'équilibre de l'écosystème aquatique;
- . son évolution à court et moyen terme.

3/ HYDROLOGIE.

Les études faites dans certaines régions lacustres et essentiellement sur la périphérie des lacs sont nombreuses (Alaotra). Mais, rares sont celles qui font référence au milieu aquatique, qui le relie à son environnement, ou qui proposent son utilisation de manière globale, et non par secteurs d'activité: hydro-électricité, irrigation, alimentation en eau des villes...

Les lacs de Madagascar sont donc très peu connus en tant que tels alors qu'ils sont déjà très exploités de manière traditionnelle (pêche) et qu'ils pourraient devenir un facteur non négligeable de développement (irrigation, alimentation en eau des villes, tourisme). D'où l'intérêt de lancer rapidement une étude fine et interdisciplinaire des milieux lacustres et de leur environnement.

Bien qu'une approche à l'échelle du bassin versant ou de la région soit nécessaire à la compréhension globale et qualitative du fonctionnement de chaque système, il ne s'agira pas là de procéder à une étude intégrée classique de bassins versants. Le domaine aquatique y compris ses berges et l'influence qu'il peut avoir sur son environnement restera le centre d'intérêt de l'étude.

Thèmes d'étude :

a) Réservoirs

La morphologie des cuvettes lacustres, les surfaces inondées, le volume et la qualité des eaux et leurs fluctuations dans le temps constituent les paramètres de base de l'étude. Ces facteurs sont déterminants et limitatifs dans une optique d'aménagement (irrigation, alimentation en eau des villes, élevage...). Se pose donc ici la question de l'alimentation de ces systèmes et de la gestion de leurs ressources.

Une étude hydrologique classique limitée dans le temps peut répondre avec une précision acceptable à ces questions.

b) Classification

Il est évidemment impensable de procéder à un inventaire exhaustif des lacs malgaches. Un choix devra être fait en fonction des intérêts scientifiques et/ou économiques ceci afin de proposer, a priori, une classification des lacs de Madagascar suivant leur morphologie, leur géologie, leur hydrochimie.

c) Pièges à sédiments

Les projets d'aménagement hydrauliques se heurtent actuellement au manque d'information concernant le transport solide des rivières. L'étude des lacs, véritables pièges à sédiments, est probablement le moyen le plus efficace pour quantifier ce phénomène dont l'estimation semble possible au moins pour les régions du lac Alaotra et d'Antananarivo (nombreuses retenues - existence de documents anciens).

Les résultats attendus apporteront des précisions quant à la connaissance du taux d'érosion des bassins versants; information d'une extrême importance pour la gestion des retenues (capacité - entretien - durée de vie).

d) Histoire des lacs et paléoclimats

Ce thème de recherche est très complémentaire du thème précédent.

La théorie astronomique des climats impliquerait une opposition de phases entre variations climatiques dans l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud. L'évolution climatique des zones tropicales de l'hémisphère Sud est assez mal connue, en particulier en Afrique, mais les résultats disponibles paraissent en désaccord avec la théorie astronomique. Ce fait est donc à vérifier sur des séquences lacustres bien datées.

Madagascar semble tout indiqué pour ce complément d'étude en raison:

- . du nombre et la diversité de ces lacs, en particulier, existence de lacs de cratère ("lacs pluviomètres") ,
- . du caractère insulaire qui simplifie le signal climatique.

4/ SOCIO-ECONOMIE : Milieu aquatique et population

Le domaine d'étude est ici très vaste. Il pourrait s'articuler autour de plusieurs volets principaux dont:

- L'organisation et les systèmes de production traditionnels, appréhendés à partir de sources écrites et des traditions orales,
- les phénomènes d'urbanisation et de développement actuels en relation avec les eaux continentales.
- La perception de l'eau

C/ ETAT DU PROJET - LE PROGRAMME PEC III EN 1991

- Installation et organisation d'un laboratoire de recherche sur les eaux continentales.
- Début de formation à la recherche par la recherche
- Démarrage de chacun des volets de recherche sur des zones restreintes situées à proximité d'Antananarivo.
- Organisation d'une table ronde sur les eaux continentales.

D/ MOYENS

- Financement CNRE et ORSTOM pour 1991.
- Préparation d'un dossier de programme ultérieur et recherche des financements nécessaires.

VI-6 BILAN DES EAUX, TYPOLOGIE DES BAS-FONDS, EROSION ET MODELISATION SUR DES BASSINS EMBOITES DES HAUTES TERRES DE MADAGASCAR (PEC V)

A/ OBJECTIFS

- . Application du modèle des écoulements d'un bassin témoin (Ambohitrakoho) à trois bassins emboîtés de taille supérieure sur les hautes terres de Madagascar (Mahitsy).
 - . Etude du potentiel hydrogéologique de la région d'Antananarivo.
 - . Mise en évidence des interactions socle-couverture par approche hydro-géochimique.
 - . Formation de chercheurs (hydrogéologues et hydrochimistes) au sein du CNRE.
- Cours sur le thème "milieu physique tropical (plus spécialement sur les couvertures d'altération sur socle cristallin).

. **Retombées appliquées:**

- Cartographie intégrée des hauts plateaux:
 - . Contraintes et potentialités agricoles;
 - . fragilité du milieu et sa protection.
- Banque de données en eaux souterraines
- Sites de retenues et réservoirs (seuils hydrauliques naturels).
- Incidences de la néotectonique active sur les problèmes d'aménagement:
 - . Localisation des seuils hydrauliques locaux;
 - . zones à reforester en priorité;
 - . zones cultivables
 - . adductions d'eau (hydraulique villageoise par forages);
 - . fonctionnement du milieu souterrain;
 - . vulnérabilité et protection des eaux.

B/ METHODE

- . Vérification du fonctionnement hydraulique de chacun des bassins en comparant le mode des écoulements restitués par le modèle du site témoin aux variations des nappes (amplitude et évolution temporelle) et aux volumes évacués pour chacun des bassins emboîtés.
- . Intégration dans la modélisation des facteurs morphopédologiques et morphotectoniques selon la typologie des sous unités composant chacun des bassins (conditions aux limites hydrauliques des systèmes en fonction du contexte morpho-tectonique).

C/ MOYENS

Par bassin :

- Une station de contrôle des débits de surface
- Un piézographe (30 mètres environ jusqu'au bed-rock)
- Pluviographes et pluviomètres

D/ INTERVENANTS

CNRE
MIEM
ORSTOM
USTL/CNRS (URA 1359)
CIRAD/IRAT
MTMT (DMH)

E/ ETAT DU PROJET

Le programme a été soumis au MRSTD. Il pourrait démarrer avec son accord dès le début de l'année 1991 sur financement ATP/PIREN/CNRS (ORSTOM, CIRAD), organisme qui a prioritairement retenu le projet en octobre 1990.

A/ OBJECTIFS

Evaluation du taux de renouvellement des ressources en eaux souterraines en milieu de socle des zones semi-arides.

Retombées appliquées en zone semi-aride:

- Hydraulique villageoise (captage par forages des eaux souterraines du socle).
- développement rural par périmètres d'irrigation à partir des eaux souterraines.
- banque de données hydrauliques (projets régionaux).

B/ METHODES

Approche des bilans hydriques (hydrochimie isotopique, hydrologie, interaction eau de surface/eaux souterraines) et comportement piézométrique pluricyclique des aquifères:

- Cartographie régionale et fine du bassin versant (morphopédologie)
- Analyse tectonique du socle (réseau fissural) afin de proposer un schéma d'organisation des écoulements souterrains.
- Géophysique électrique (implantation des forages sur les axes conducteurs).
- Suivis hydrochimiques (ions majeurs et isotopes).
- Traçages en écoulement radial convergent (caractéristiques hydrodispersives du réservoir).
- Tests hydrauliques (caractéristiques hydrodynamiques du socle).
- Contrôle des apports et bilan d'écoulement.

C/ MOYENS

Un site pilote a été repéré sur le terrain en juin 1989 dans le sud-ouest de Madagascar (région d'Ejeda), sur environ 40000 m². Site très accessible, aux portes d'Ejeda, permettant une organisation concrète et efficace du projet.

Sur le périmètre:

- dix forages de 30 à 35 mètres de profondeur;
- équipement de surface par pluviographes (pluies et signal isotopique d'entrée) et limnigraphes (fluctuations piézométriques des eaux souterraines);
- Contrôle des débits de surface à l'exutoire du bassin.

D/ INTERVENANTS

CNRE
MIEM
USTL
ORSTOM
IRAT
MTMT (DMH)
CNRS
EESS (hydraulique) / UA

E/ ETAT DU PROJET

La Direction des relations internationales au CNRS a marqué son intérêt pour ce projet et attend une requête du gouvernement malgache.

VII PLAN DE FORMATION

Deux types de formation sont possibles, intervenant à deux niveaux différents dans le cursus des étudiants:

- 1) Le programme peut être l'occasion d'une formation de niveau universitaire, envisagée localement soit par des cours, soit des séminaires, travaux pratiques et conférences grâce à l'intervention de chercheurs seniors en place à Madagascar ou par des spécialistes en provenance de l'extérieur.

Dans le cadre de cette formation, un appui peut être donné à un nombre restreint d'étudiants (sans promesse d'avenir dans la recherche) pour la réalisation de mémoires de maîtrise ou de DEA s'inscrivant dans les thèmes de recherche développés dans le PEC. C'est à cette occasion que peuvent être identifiés et sélectionnés de jeunes étudiants susceptibles d'être recrutés par le CNRE.

- 2) La formation de chercheurs et techniciens du CNRE destinés à devenir les experts nationaux en matière d'eaux continentales.

C'est sur ce deuxième point qu'un effort considérable doit être entrepris et mené à long terme. Un véritable plan de formation doit être mis en place:

- . Pour les Techniciens la formation doit être menée sur place et éventuellement complétée par des stages de courte durée à l'extérieur (techniques de laboratoire, spécialisations).
- . Pour les chercheurs, il faut envisager une formation sur plusieurs années comprenant de longs séjours à l'extérieurs destinés à leur permettre d'accéder aux plus hauts diplômes (doctorat). Ces chercheurs devront travailler sur des "sujets malgaches" et sur des matériaux de recherche qu'ils auront eux-mêmes recoltés à Madagascar (terrain).

Cette formation doit s'appuyer sur:

- . le protocole de formation-insertion signé par le MRSTD et l'ORSTOM le 29/06/1988;
- . les possibilités d'accueil de l'ORSTOM;
- . les contrats d'association.

Dans l'état actuel du "Programme Eaux Continentales" une formation de haut niveau ne peut se concevoir ni entièrement à Madagascar ni sans son financement.

Dans le cas d'une formation complète, allant du DEA à la soutenance de thèse, on peut envisager en environ quatre ans le scénario suivant (cf. tableau page suivante):

- DEA: 1 an soutenu par un contrat de formation-insertion permettant à l'étudiant de se rendre en France pour y suivre des cours de spécialité.
- Thèse dont la partie "terrain" doit être réalisée à Madagascar et appuyée par un contrat d'association donnant au jeune chercheur des moyens d'équipement et de fonctionnement (tournées, petit matériel, consommables...).

Après trois années, la soutenance pourra avoir lieu soit à Madagascar, soit en France.

Les sujets d'étude retenus tant pour le DEA que pour la thèse devront porter sur une problématique malgache.

| HYDROLOGIE | | Lab. Prof. BOCQUILLON (USTL) et Lab. Hydrol. de l'ORSTOM | | | | | | MONTPELLIER |
|------------|------------|--|------|------|------|------|------|-------------|
| | | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 |
| 1 | L. ROBISON | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | |
| 2 | A identif. | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | |

| HYDROGEOLOGIE | | Lab. J.C. GRILLOT et F. ARTHAUD (USTL) | | | | | | MONTPELLIER |
|---------------|------------|--|------|------|------|------|------|-------------|
| | | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 |
| 3 | A identif. | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | |

| HYDROCHIMIE | | Lab. Prof. J.C. FONTES (PARIS SUD / ORSAY) | | | | | | PARIS |
|-------------|------------|--|------|------|------|------|------|-------|
| | | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 |
| 4 | A identif. | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | |

| HYDROGEOLOGIE | | Lab. J.C. GRILLOT et F. ARTHAUD (USTL) | | | | | | MONTPELLIER |
|---------------|------------|--|------|------|------|------|------|-------------|
| | | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 |
| 5 | A identif. | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | |

| HYDROBIOLOGIE | | | | | | | | TOULOUSE |
|---------------|------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| | | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 |
| 6 | A identif. | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | |
| 7 | A identif. | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

■ Contrat de formation-insertion ou accueil
(cours de DEA / rédaction et soutenance de thèses)

▨ Contrat d'association
(moyens à mettre en oeuvre à Madagascar)

ANNEXE I
BIBLIOGRAPHIE

-
- [1] SEPTEMBRE 1984
CONVENTION SOMALAC/ORSTOM POUR LA REALISATION D'ETUDES
HYDROLOGIQUES DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA - ETAT
D'AVANCEMENT AU 31 AOUT 1984
BAUDUIN D.
-
- [2] DECEMBRE 1984
ETUDES HYDROLOGIQUES ET CLIMATOLOGIQUES DANS LA REGION DU
LAC ALOTRA - SYNTHESE PROVISOIRE
ANNEXE I: DEBITS JOURNALIERS RECONSTITUES
MPARA/SOMALAC
IFRSDC (ORSTOM)
IBIZA D.
-
- [3] OCTOBRE 1985
ETUDES HYDROLOGIQUES ET CLIMATOLOGIQUES DANS LA REGION DU
LAC ALAOTRA - ETAT D'AVANCEMENT AU 1er OCTOBRE 1985 ET
PROGRAMME PREVISIONNEL (Contrat n° 11/84/BIRD/SLAC)
IFRSDC (ORSTOM)
FERRY L.
-
- [4] AOUT 1986
ETUDES HYDROLOGIQUES DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA
FASCICULE N° 1 - LA SAHAMILAHY A MAHERIARA - OBSERVATIONS DE
TERRAIN ET ACTUALISATION DES RESULTATS
(Contrat n° 11/84/BIRD/SLAC)
MPARA/SOMALAC
IFRSDC (ORSTOM)
FERRY L.
-
- [5] AOUT 1986
ETUDES HYDROLOGIQUES DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA
FASCICULE N° 2 - L'ANDRANOBE AU PONT DE FANALAMANGA
MPARA/SOMALAC
IFRSDC (ORSTOM)
FERRY L.
-
- [6] JANVIER 1987
ETUDES HYDROLOGIQUES DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA
FASCICULE N° 3/86 - REALIMENTATION DU P.C. 23
OBSERVATIONS DE TERRAIN ET ACTUALISATION DES RESULTATS
(Contrat n° 11/84/BIRD/SLAC)
MPARA/SOMALAC
IFRSDC (ORSTOM)
FERRY L.
-
- [7] AOUT 1986
ETUDES HYDROLOGIQUES DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA
FASCICULE N° 4/86 - CONTROLE DE LA NAPPE PHREATIQUE APRES LA
MISE EN EAU PRECOCE DES CANAUX ET DES DRAINS SUR DEUX
MAILLES DU P.C. 23 (Contrat n° 11/84/BIRD/SLAC)
MPARA/SOMALAC
IFRSDC (ORSTOM)
FERRY L., MERCY M.
-

-
- [8] MARS 1987
ETUDES HYDROLOGIQUES DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA
FASCICULE n° 5/86 - LES DEBITS DE LA SAHABE A BETAMBAKO
OBSERVATIONS DE TERRAIN ET ACTUALISATION DES RESULTATS
(Contrat n° 11/84/BIRD/SLAC)
IFRSDC (ORSTOM)
MPARA/SOMALAC
FERRY L.
-
- [9] MARS 1987
ETUDES HYDROLOGIQUES DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA
FASCICULE n° 6/86 - LES DEBITS DU MANINGORY A ANDROMBA
OBSERVATIONS DE TERRAIN ET ACTUALISATION DES RESULTATS
(Contrat n° 11/84/BIRD/SLAC)
MPARA/SOMALAC
IFRSDC (ORSTOM)
FERRY L.
-
- [10] MARS 1987
ETUDES HYDROLOGIQUES DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA
FASCICULE n° 7/86 - LA CAPACITE DE LA RETENUE D'ANTANIFOTSY
COURBE 1987 ET RESULTATS ANTERIEURS
(Contrat n° 11/84/BIRD/SLAC)
MPARA/SOMALAC
IFRSDC (ORSTOM)
FERRY L.
-
- [11] AOUT 1987
ETUDES HYDROLOGIQUES DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA
FASCICULE n° 8 - LE BASSIN DE LA SAHAMALOTO - OBSERVATIONS
DE TERRAIN ET ACTUALISATION DES RESULTATS (Contrat
n° 11/84/BIRD/SLAC)
MPARA/SOMALAC
IFRSDC (ORSTOM)
FERRY L., GARRETA Ph.
-
- [12] DECEMBRE 1987
ETUDES HYDROLOGIQUES DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA
FASCICULE 9 - ACTIVITES DE L'ORSTOM DE 1984 A 1987, REMISE
DU MATERIEL ET RECOMMANDATION
MPARA/SOMALAC
IFRSDC (ORSTOM)
FERRY L.
-
- [13] FEVRIER 1988
ETUDES HYDROLOGIQUES DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA
FASCICULE n° 10 - INVENTAIRE DES Jaugeages AU 31/12/87
(document de travail - usage interne)
MPARA/SOMALAC
IFRSDC (ORSTOM)
FERRY L.
-

[14]

NOVEMBRE 1989

ETUDES HYDROLOGIQUES DANS LA REGION DU LAC ALAOTRA
TOME I : RAPPORT FINAL
TOME II : ANNEXE I / BAREMES D'ETALONNAGE FICHIER DES
DEBITS JOURNALIERS
TOME III : ANNEXE II / PLUVIOMETRIE JOURNALIERE
MPARA/SOMALAC
IFRSDC (ORSTOM)
FERRY L., GARRETA Ph.

[15]

AOUT 1985

ETUDE BATHYMETRIQUE DE LA RETENUE DE LA SAHAMALOTO
(lettre de commande n° 32/85/SLAC/DG/EAE)
MPARA/SOMALAC
IFRSDC (ORSTOM)
FERRY L.

[16-17-18]

BILAN HYDRIQUE ET MINERAL D'UN BAS FOND SUR LES HAUTES TERRES
DE MADAGASCAR :
_ Rapport d'avancement / Premiers résultats et perspectives
(juin 1987)
_ Rapport d'avancement (juin 1988)
_ Rapport d'avancement (juin 1989)

[19]

APPROCHE DES ECHANGES SURFACE-SOUTERRAIN EN MILIEU CRISTALLIN
ALTERE (Hautes terres de Madagascar)
A paraître dans les cahiers de l'ORSTOM
GRILLOT J. C., FERRY L.

[20]

COMPORTEMENT PIEZOMETRIQUE DES NAPPES D'ALTERITES EN ZONE
INTERTROPICALE HUMIDE D'ALTITUDE (hauts plateaux de
Madagascar)
A paraître dans "Journal of hydrology"
GRILLOT J.C., RAUNET M., FERRY L.

[21]

DECEMBRE 1987

BIBLIOGRAPHIE POUVANT INTERESSER LES RECHERCHES HYDROLOGIQUES
ET CLIMATOLOGIQUES A MADAGASCAR (première édition)
MRSTD/CNRE
MIMT/DMN
IFRSDC (ORSTOM)
FERRY L.

[22]

SEPTEMBRE 1990

NOTE HYDROLOGIQUE SUR LA STATION DE L'IKOPA A ANOSIZATO
BDHM - Document de travail n° 1
MRSTD/CNRE
MIMT/DMN
IFRSDC (ORSTOM)
GREVE A., ROBISON L.

-
- [23] SEPTEMBRE 1990
NOTE HYDROLOGIQUE SUR LA STATION DE L'IKOPA A AMBOHIMANAMBOLA
BDHM - Document de travail n° 2
MRSTD/CNRE
MIMT/DMN
IFRSDC (ORSTOM)
GREVE A., ROBISON L.
-
- [24] NOVEMBRE 1990
NOTE HYDROLOGIQUE SUR LA STATION DE L'IKOPA A BEVOMANGA
BDHM - Document de travail n° 3
MRSTD/CNRE
MIMT/DMN
IFRSDC (ORSTOM)
GREVE A.
-
- [25] Décembre 1990
NOTE HYDROLOGIQUE SUR LA STATION DE L'IKOPA A FARAHANTSARA
BDHM - Document de travail n° 4
MRSTD/CNRE
MIMT/DMN
IFRSDC (ORSTOM)
GARRETA Ph., RAZAFINDRAKOTO H.
-

ANNEXE II
REGIMES HYDROLOGIQUES DE MADAGASCAR
(monographie)

RESUME ET SOMMAIRE

Etude réalisée par P. CHAPERON
avec la collaboration de J. DANLOUX et L. FERRY.

RESUME

L'étude des régimes hydrologiques de MADAGASCAR comporte trois parties:

1 - Facteurs conditionnels des régimes:

- . facteurs géographiques: géologie, relief, sols, couverture végétale et réseau hydrographique.
- . facteurs climatologiques: circulation des masses d'air, saisons, vents, températures, humidité, évaporations, insolation, précipitations, régions climatiques.

Cette première partie est essentiellement basée sur des documents et données élaborés par des géographes et climatologues extérieurs à l'ORSTOM, sans que la contribution des chercheurs de l'ORSTOM soit négligeable en particulier pour les études concernant les sols et l'évaporation. Elle a été rédigée par M. ALDEGHERI.

2 - Analyse des données hydrométriques:

Cette analyse concerne une quarantaine de stations de base du réseau géré entre 1950 et 1975 par la section hydrologique de l'ORSTOM à MADAGASCAR. Les bassins étudiés sont répartis sur toute l'île et permettent une bonne caractérisation de la diversité des régimes malgaches. Cependant deux grands bassins du versant occidental (l'ONILAHY et la SOFIA) restent peu connus (observations fragmentaires de faible durée).

Les fichiers opérationnels de débits des stations ont été entièrement révisés (correction des courbes de tarage pour les plus forts débits). D'autre part, nous disposons pour ces bassins des tableaux de pluviométrie moyenne mensuelle couvrant partiellement (ou dépassant) la période des observations hydrométriques. Les valeurs mensuelles ont été calculées par la méthode de THIESSEN et éventuellement corrigées à partir des isohyètes. Lorsque la densité et la répartition des postes utilisés sont satisfaisantes, et à condition que le gradient pluviométrique du bassin ne soit pas trop prononcé, les résultats sont convenables. Pour un certain nombre de bassins, essentiellement situés sur le versant oriental, les postes utilisés sont en bordure des bassins ou sur les voies de communication et prennent mal en compte les effets de relief et d'altitude: La pluviométrie moyenne est généralement très sous-estimée et a dû être corrigée (à partir des isohyètes interannuelles et en attribuant aux bassins des déficits d'écoulement régionalement homogènes).

Pour l'ensemble des bassins étudiés, et pour les années concomitantes, les liaisons statistiques ont été effectuées à l'échelle mensuelle pour répondre à un triple objectif:

- Vérifier sur deux échantillons réalisés indépendamment la fiabilité des données. Les résultats des régressions ont été généralement satisfaisants et ont permis de constater la bonne qualité moyenne des données hydro-pluviométriques.
- Etudier (à partir des coefficients de corrélation) les influences respectives des précipitations et débits

antérieurs sur les différents débits mensuels en saison des pluies et en saison "sèche", première approche des mécanismes de bassins.

- Permettre à partir des modèles linéaires simples ou multiples le complètement des données mensuelles manquantes (ou leur correction dans le cas d'anomalies flagrantes).

Des corrélations à l'échelle annuelle entre modules et précipitations ou entre modules de bassins voisins ou emboîtants ont permis d'étendre les échantillons sur une période voisine de 30 ans.

L'analyse des données est pratiquement terminée.

3 - Synthèse régionale des éléments caractéristiques des régimes:

Cette synthèse portera sur les apports annuels, les crues maximales, les débits de basses eaux, etc..., en regard des caractéristiques géographiques conditionnelles et aboutira à la sectorisation géographique des différents régimes de l'île.

Cette synthèse est actuellement en cours.

La date d'achèvement de la monographie est prévue pour la fin du premier semestre 1990.

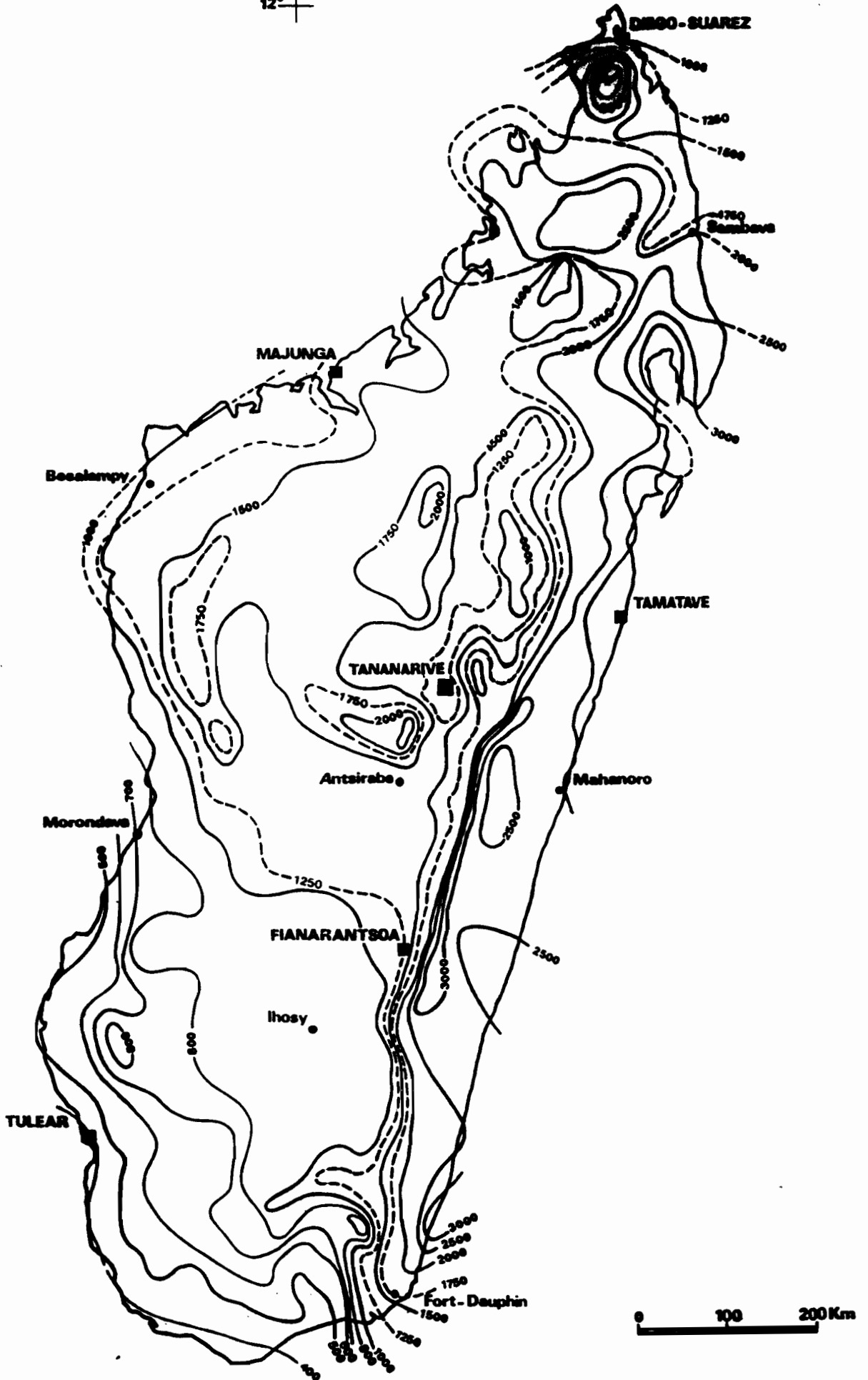
Les principaux résultats exposés de façon sommaire sont les suivants:

PLUVIOMETRIE

Les précipitations moyennes interannuelles d'environ 300 postes (dont la majeure partie a fait l'objet d'une homogénéisation sommaire par correction d'hydraulicité) ont permis de tracer une carte des isohyètes interannuelles de Madagascar.

Le tracé des isohyètes prend en compte les effets orographiques et nous avons tenu à rectifier certaines anomalies constatées sur les cartes antérieurement publiées.

Par exemple, en l'absence de stations pluviométriques sur le massif du TSARATANANA, la pluviométrie de ce secteur est généralement caractérisée par un "thalweg" inférieur à 1500 mm (!) encadré par des zones de forte pluviométrie à l'est (baie d'ANTONGIL) et à l'ouest (littoral du Canal de Mozambique). Cela constitue manifestement un contre-sens climatologique. Le massif d'altitude élevée (MAROMOKOTRA: 2876 m) est en effet frappé sur sa façade sud-est par l'alizé humide, sur sa façade nord-est par le contre-alizé ("mousson" du Canal de Mozambique). Les lames écoulées mesurées sur certains des tributaires du massif (SAMBIRANO, LOKOHO, etc...) sont relativement fortes (1500 à 2000 mm). Nous avons donc été



conduit à attribuer au massif une pluviométrie moyenne supérieure à 2500 mm et très probablement, pour la partie centrale, supérieure à 3500 mm.

BILAN ANNUEL HYDROLOGIQUE DES PRINCIPAUX BASSINS

Le tableau ci-joint rassemble les données principales des bassins (pluviométrie moyenne interannuelle, lame écoulée, déficit d'écoulement).

Les valeurs entre parenthèses corrigées sont approximatives.

Les bassins présentent des caractéristiques régionales assez nettes (déjà mises en évidence par PELLERAY (1953) et ALDEGHERI (1972)) répondant à la sectorisation climatologique (cf. carte des régions climatiques établie par J. RIQUIER - Article de HERVIEU in cahiers ORSTOM - Série Pédologique 1967).

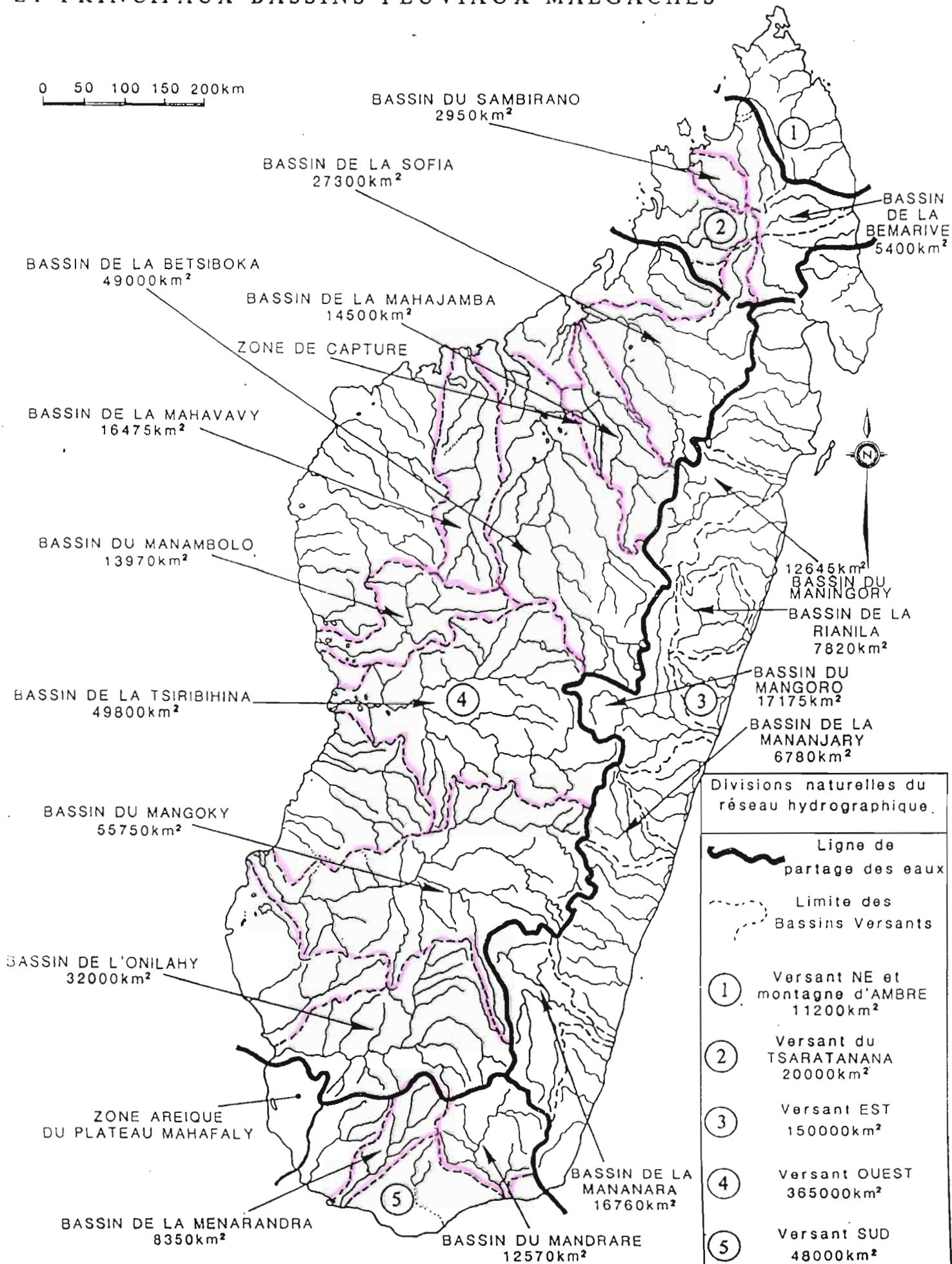
Les bassins du versant oriental sont de faible développement et à fort relief. Ils sont situés dans la région climatique "perhumide" (pluviométrie comprise entre 1500 et 3500 mm, ETP comprise entre 900 et 1300 mm, ETR voisine de l'ETP). Pour ces bassins (RIANILA, MANANJARY, NAMORONA, FARAONY, etc...) les lames annuelles sont généralement supérieures à 1000 mm et peuvent approcher les 2000 mm (Ke : 40 à 60 %, les déficits d'écoulement (équivalents à l'ETR) sont de l'ordre de 1000 à 1200 mm. Les valeurs estimées du déficit d'écoulement de l'IVOANANA et de la NAMORONA (1340 et 1405 mm?) sont probablement un peu fortes (surestimation de 5 à 10% de la pluviométrie moyenne des bassins assez mal définie) et constituent probablement la limite supérieure de l'ETR à Madagascar.

Quelques bassins de la cote Est échappent à ce schéma. Il s'agit du MANINGORY et du MANGORO dont les bassins correspondent à la dépression du MANGORO-ALAOIRA (zone climatique "humide": pluviométrie comprise entre 1200 et 1500 mm). Le déficit d'écoulement de ces bassins est réduit à 800 à 900 mm.

De la même façon, les formateurs de la MANANARA du sud, situés sous le vent de la prolongation de la "première falaise", ont une pluviométrie de l'ordre de 1100 mm. Le déficit d'écoulement, voisin de 600 mm, se rapproche des valeurs observées dans le sud de l'île.

Les bassins du sud de Madagascar, d'orientation générale nord-sud sont situés dans la zone climatique "semi-aride" ou "sèche", sous le vent de la chaîne anosyenne. A l'exception des hauts-bassins tributaires des contreforts sud et ouest du MANAMBY et de l'ANOSY, la pluviométrie moyenne est inférieure à 800 mm. L'ETR est fortement réduite et comprise entre 400 et 600 mm. Les écoulements de saisons sèches sont faibles et peuvent annuler certaines années.

RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET PRINCIPAUX BASSINS FLUVIAUX MALGACHES



Les bassins du versant occidental correspondent aux plus grands fleuves malgaches (ONILAHY, MANGOKY, TSIRIBIHINA, BETSIBOKA) à régimes mixtes : hauts bassins en climat "humide" ou sub-humide", bassins inférieurs en climat "sub-humide" à "semi-aride".

Pour le MANGOKY, la pluviométrie est comprise entre 1100 à 1200 mm (ZOMANDOA, MANANTANANA, etc) et 800 mm pour le bassin inférieur. Le déficit d'écoulement est compris entre 600 et 700 mm.

La pluviométrie moyenne de la TSIRIBIHINA est comprise entre 1700 mm (haut bassin) et 1000 mm (bassin inférieur). Le déficit d'écoulement est compris entre 1000 mm (haut bassin) et 600 mm (ensemble du bassin).

Le bassin de la BETSIBOKA, presque entièrement situé sur les hauts plateaux et d'orientation sud-nord, est caractérisé par un faible gradient pluviométrique de l'aval vers l'amont (1500 à 1300 mm). Le déficit d'écoulement est compris entre 600 et 800 mm.

Les bassins du nord, en raison de la forte pluviométrie du massif du TSARATANANA, se rapprochent des régimes observés sur le versant oriental: Pluviométrie annuelle comprise entre 2500 et 3000 mm (à l'exception du MAEVARANO supérieur situé dans la cuvette de l'ANKAIZINA où la pluviométrie est inférieure à 1500 mm) et le déficit d'écoulement compris entre 1000 et 1100 mm. Ils s'en distinguent par une pluviométrie moins importante en saison "sèche" (avril-octobre).

BILANS HYDROLOGIQUES MENSUELS ET MECANISMES DE L'ECOULEMENT

Pour un certain nombre de bassins, les bilans hydrologiques (précipitations, évapotranspirations potentielles et réelles, lames écoulées, stockages et déstockages) ont été établis à l'échelle mensuelle. L'évapotranspiration potentielle et sa répartition mensuelle ont été évaluées à partir des données régionales (stations climatologiques, bassins versants expérimentaux). Le bilan est calculé par la méthode THORNTHWAITTE simplifiée: Pour la commodité du calcul, les deux réservoirs (nappes phréatiques et réserve utile des sols) ont été confondus sans vouloir attribuer une dimension arbitraire à la réserve utile. Seules figurent les variations de stock en fin de mois, après transfert. Le mécanisme général est le suivant:

En saison des pluies (décembre à mars en général), les excédents pluviométriques, une fois satisfaits l'ETR (égale à l'ETP) et l'écoulement, permettent la recharge des différentes réserves (stockage) : Latérites et zones altérées du socle sous-jacentes. En fin de saison des pluies, la réserve mobilisable est comparée à la lame écoulee en saison "sèche" (avril-octobre en général). Cette réserve peut satisfaire entièrement l'écoulement de saison "sèche" et dégager éventuellement un excédent dans la réserve utile pour le soutien de l'ETR. Dans certains cas (bassins du versant

oriental), les écoulements de saison "sèche" sont alimentés conjointement par les nappes et par la pluviométrie encore abondante.

Le tableau ci-joint illustre la diversité des comportements hydrologiques de Madagascar.

Les bassins de la côte est (RIANILA - FARAONY - MANANARA du sud) recueillent des précipitations abondantes de décembre à mars qui, une fois satisfaites, l'ETR (égale à l'ETP) et l'écoulement, permettent la constitution, fin mars, d'un stock abondant (400 à 150 mm dans le sud du versant oriental). D'avril à novembre, la pluviométrie est plus réduite mais encore abondante avec une amorce, pour les bassins les plus arrosés, d'une seconde "saison des pluies" en juillet-août (tendance pseudo-équatoriale). Les débits de cette période, bien soutenus sont alimentés conjointement par les précipitations et la vidange des réserves. L'ETR peut être équivalente à l'ETP 9 à 10 mois sur 12 et ne connaître qu'une relativement faible réduction (80 à 90% dans le nord, 60% dans le sud). Le comportement du SAMBIRANO (cote nord ouest) est assez voisin bien que les précipitations de saison "sèche", beaucoup moins importantes que sur le versant oriental, ne participent que faiblement à l'écoulement de mai à octobre. L'ETR est réduite (83% de l'ETP) mais bénéficie du soutien d'une réserve utile importante.

Dans le sud de l'île, les bassins ne recueillent qu'une pluviométrie relativement faible (moins de 800 mm) et sont caractérisés par une absence quasi-totale de réserves mobilisables. La MANANARA (affluent du MANDRARE) ne dispose d'aucun réservoir drainable. L'écoulement est réduit au ruissellement sur les zones imperméables et l'ETR est réduite pour les douze mois. Le MANDRARE a un comportement très voisin. Un stockage réduit (de l'ordre de 20 mm) dans certains compartiments fracturés et dans les formations alluviales encaissant le lit majeur permet un faible report de drainage en février. L'écoulement de mars à novembre est ensuite réduit à une faible fraction des averses ruisselant sur certaines zones imperméables. L'ETR est très réduite (60% ETP) et n'égale l'ETP que deux mois sur douze.

Les grands bassins du versant occidental (MANGOKY, BETSIBOKA etc) ont une pluviométrie intermédiaire (1000 à 1500 mm) présentant un contraste très marqué entre la saison des pluies (décembre à mars) et la saison sèche (mai à octobre) qui ne représente que 10 à 20% du total annuel. Les excédents pluviométriques de la saison des pluies stockés dans les réservoir de socle altéré (forte latéritisation) permettent de soutenir des débits encore relativement importants en saison sèche (les lames écoulées mensuelles sont voisines ou même supérieures aux précipitations mensuelles entièrement mobilisées pour satisfaire l'ETR). Celle-ci, bien que bénéficiant pendant le début de la saison sèche d'un soutien de la réserve utile des sols, est assez fortement réduite (60% de l'ETP).

MADAGASCAR

| RIVIERE | STATION | LATITUDE ° ' " | LONGITUDE ° ' " | S Km ² | P mm | H mm | DB | Ke % |
|--------------|------------------|-------------------|--------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| SAMBIRANO | AMBANJA | 13 41 | 48 27 | 2830 | (2500) | 1502 | (998) | 60 |
| RAMENA | AMBODIMANGA | 13 45 | 48 30 | 1080 | (3000) | 1900 | (1100) | 63 |
| MAEVARANO | AMBODIVOHITRA | 14 36 | 48 34 | 2585 | 1730 | 577 | 1153 | 33 |
| IVONDRO | RINGA-RINGA | 18 11 | 49 15 | 2560 | (2500) | 1320 | (1180) | 53 |
| RIANILA | Bac FETRAOMBY | 18 40 | 48 56 | 1863 | (3270) | (2070) | (1200) | (63) |
| VOHITRA | ANDEKALEKA | 18 30 | 48 30 | 2615 | (2700) | 1710 | (990) | 63 |
| RIANILA | BRICKAVILLE | 18 48 | 49 48 | 6000 | 2900 | 1840 | 1060 | 63 |
| VOHITRA | ROGEZ | 18 48 | 48 36 | 1910 | (2200) | 1145 | (1055) | 52 |
| MANGORO | MANGORO Gare | 19 00 | 48 00 | 3600 | 1500 | 769 | 731 | 51 |
| ONIVE | TSINJOARIO | 19 37 | 47 42 | 3200 | 1590 | 721 | 869 | 45 |
| AMBOROMPOTSY | ANTSAMPANDRANO | 19 30 | 47 03 | 95 | (2000) | 891 | 1109 | 45 |
| MANANJARY | ANTSINDRA | 20 58 | 47 43 | 2260 | (2850) | 1653 | (1197) | 58 |
| IVOANANA | PATIHITA | 21 03 | 47 45 | 835 | (3200)? | 1860 ? | (1340)? | 58 |
| MANINGORY | ANDROMBA | 17 24 | 48 38 | 6850 | 1200 | 310 | 890 | 26 |
| NANORONA | VOHIPARARA | 21 14 | 47 23 | 445 | (2300)? | 895 ? | (1405)? | 39 |
| PARAONY | VOHILAVA | 21 46 | 47 55 | 2005 | (3000) | 1840 | (1160) | 61 |
| MANANARA Sud | MAROANGATY | 22 57 | 46 55 | 14160 | 1125 | 507 | 618 | 45 |
| EPAHO | PANJAHIRA | 24 54 36 | 46 53 46 | 196 | (3100) | 2068 | (1032) | 67 |
| MANDRARE | ANDABOLAVA | 24 00 | 46 30 | 4045 | 820 | 304 | 516 | 37 |
| MANDRARE | AMBOASARY | 25 02 | 46 27 | 12435 | 790 | 184 | 606 | 23 |
| MANANARA | BEVIA | 24 51 | 46 27 | 1085 | 600 | 179 | 421 | 30 |
| MANAMBOVO | TSIHOMBE | 24 30 | 45 30 | 2712 | 585 | 54 | 531 | 9 |
| MBENARANDRA | TRANOROA | 24 42 | 45 04 | 5330 | 760 | 189 | 571 | 25 |
| IHOZY | IHOZY | 22 23 | 46 07 | 1500 | 923 | 336 | 587 | 36 |
| ZOMANDAO | ANKARAMENA | 21 56 41 | 46 39 00 | 610 | 1296 | 574 | 722 | 44 |
| MANANTANANA | TSITONDROINA | 21 29 | 45 59 32 | 6510 | 1104 | 441 | 663 | 40 |
| MATSIATRA | MALAKIALINA | 20 57 | 45 51 | 11715 | 1294 | 625 | 669 | 48 |
| MANGOKY | BANIAN | 21 49 | 44 15 | 50000 | 994 | 311 | 683 | 31 |
| MORONDAVA | DABARA | 21 00 | 45 00 | 4640 | (1000) | (350) | (650) | 35 |
| MANIA | PASIMENA | 20 17 | 46 48 | 6795 | 1680 | 735 | 945 | 44 |
| MANANDONA | SAHANIVOTRY | 20 08 | 47 05 | 1450 | 1530 | 615 | 915 | 40 |
| SAHANIVOTRY | PK 197 | 20 06 | 47 05 | 432 | 1690 | 681 | 1009 | 40 |
| TSIRIBIHINA | BBTOMBA | 19 39 | 44 57 | 45000 | 1320 | 695 | 625 | 53 |
| SISAONY | ANDRAMASINA | 19 11 | 47 35 | 318 | 1250 | 578 | 672 | 46 |
| ANDROMBA | TSINJONY | 19 08 | 47 31 | 350 | 1460 | 835 | 625 | 57 |
| IKOPA | AMBOHIMANAMBOLA | 18 56 43 | 47 35 56 | 1407 | 1310 | 620 | 690 | 47 |
| IKOPA | Pont de MAHITSY | 18 51 47 | 47 27 29 | 1780 | 1315 | 545 | 770 | 41 |
| IKOPA | BEVOMANGA | 18 48 30 | 47 19 12 | 4290 | 1320 | 575 | 745 | 44 |
| IKOPA | Bac de FIAOANANA | 18 09 45 | 46 56 54 | 9450 | 1385 | 587 | 798 | 42 |
| IKOPA | ANTSATRANANA | 17 26 | 46 53 | 18645 | 1515 | 770 | 745 | 50 |
| ISINKO | AMBODIROKA | 16 56 56 | 46 57 39 | 600 | 1760 | 1115 | 645 | 63 |
| BETSIBOKA | AMBODIROKA | 16 55 | 46 57 | 11800 | 1500 | 780 | 720 | 52 |

SOMMAIRE

PREMIERE PARTIE

FACTEURS CONDITIONNELS DES REGIMES

CHAPITRE I - FACTEURS GEOGRAPHIQUES

- 1 - Situation
- 2 - Aperçu géologique
- 3 - Le relief
 - 3.1 Caractères d'ensemble
 - 3.2 Les Hautes Terres centrales
 - 3.3 Les bordures des Hautes Terres centrales
 - 3.4 Le versant orientale
 - 3.5 La couverture sédimentaire
- 4 - Les sols, l'eau et l'érosion
 - 4.1 Les sols : généralités
 - 4.2 Les sols et l'eau
 - 4.3 L'érosion
- 5 - La couverture végétale
- 6 - Le réseau hydrographique
 - 6.1 Généralités
 - 6.2 Les caractères du tracé du réseau hydrographique
 - 6.2.1 Sur le socle ancien
 - 6.2.2 Sur la couverture sédimentaire
 - 6.2.3 Les versants naturels
 - 6.3 Description sommaire des versants malgaches et de quelques rivières importantes
 - 6.3.1 La montagne d'AMBRE
 - 6.3.2 Le TSARATANANA
 - 6.3.3 Les versants orientaux
 - 6.3.4 Les versants occidentaux :
Grands fleuves fleuves côtiers
 - 6.3.5 Les versants méridionaux

CHAPITRE II - FACTEURS CLIMATOLOGIQUES

- 1 - Généralités sur les climats de MADAGASCAR
 - 1.1 Influence de la circulation des masses d'air
 - 1.2 Influence des facteurs géographiques
 - 1.3 Les saisons
 - 1.3.1 La saison fraîche
 - 1.3.2 La saison chaude
 - 1.3.3 Les intersaisons

2 - Les vents

2.1 La direction des vents

2.2 La vitesse des vents

2.3 Les régimes des vents

2.3.1 Le long de la cote orientale

2.3.2 Sur la bordure de la falaise orientale

2.3.3 A l'Ouest des Hautes Terres

2.3.4 Le long du canal de MOZAMBIQUE

3 - Les températures

4 - L'humidité relative

5 - L'évaporation

5.1 L'évaporation PICHE

5.2 L'évaporation sur bac et nappe libre

5.2.1 Dispositif de mesure

5.2.2 Contrôle et correction des résultats

5.2.3 Résultats

5.2.4 Comparaison de l'évaporation sur bac et de l'évaporation PICHE

5.2.5 Evaporation sur nappe d'eau libre

5.2.6 Variabilité interannuelle et distribution mensuelle

5.3 L'évapotranspiration

6 - L'insolation et le rayonnement solaire

7 - Les précipitations

7.1 Les précipitations annuelles

7.1.1 Les isohyètes interannuelles

7.1.2 Distribution statistique des précipitations annuelles

7.2 Précipitations moyennes sur les bassins fluviaux

7.3 Variations saisonnières des précipitations

7.4 Les pluies journalières

7.4.1 Les pluies d'orages

7.4.2 Les précipitations dépressionnaires

7.4.3 Etude statistique des intensités de pluies journalières

7.4.4 Pluies exceptionnelles

8 - Les régions climatiques

8.1 Région perhumide

8.2 Région humide

8.3 Région sub-humide à semi-aride

8.4 Région sèche

DEUXIEME PARTIE

ANALYSE DES DONNEES HYDROMETRIQUES

CHAPITRE I - PRESENTATION DE L'ANALYSE

- 1 - Données disponibles
- 2 - Méthodologie de l'analyse

CHAPITRE II - NORD DE MADAGASCAR

- 1 - Montagne d'Ambre
- 2 - TSARATANANA
 - 2.1 Versant ouest
 - 2.2 Versant est

CHAPITRE III - COTE EST

CHAPITRE IV - SUD DE MADAGASCAR

CHAPITRE V - VERSANT OCCIDENTAL

- 1 - Fleuves côtiers
- 2 - Bassin du MANGOKY
- 3 - Bassin de la TSIRIBIHINA
- 4 - Bassin de la BETSIBOKA

Annexe : Fiches récapitulatives des stations principales

TROISIEME PARTIE

SYNTHESE REGIONALE DES REGIMES

HYDROLOGIQUES

CHAPITRE I - APPORTS ANNUELS

(lames écoulées, modules, distributions,
coefficients d'écoulement)

CHAPITRE II - DISTRIBUTIONS MENSUELS - BILANS HYDROLOGIQUES

CHAPITRE III - LES BASSES EAUX

(étiages, tarissements)

CHAPITRE IV - LES CRUES

CHAPITRE V - ZONIFICATION DES REGIMES HYDROLOGIQUES