

# **BILAN DES EAUX, TYPOLOGIE DES BAS-FONDS, EROSION ET MODELISATION SUR DES BASSINS EMBOITES DES HAUTES TERRES DE MADAGASCAR**

Béatrice DUSSARRAT  
Luc FERRY

## **RESUME :**

Les résultats d'une étude multidisciplinaire, géomorphologique, tectonique, hydroclimatologique et hydrogéologique réalisée de 1991 à 1993 dans la région d'Antananarivo (Hautes Terres de Madagascar) sont présentés. Les différents réservoirs aquifères de la région de Mahitsy sont décrits. La présence d'une néotectonique encore active influence le modelé de surface et conditionne la géométrie des aquifères et le fonctionnement hydrologique des bassins versants. Un accent particulier est donné aux ressources en eaux souterraines et à leur gestion ainsi qu'à la protection des bassins versants et des bas-fonds rizicoles.

## **FAMINTINANA :**

Ny vokatry ny fikarohana "multidisciplinaire", "géomorphologique", "tectonique", "hydroclimatologique" ary "hydrogéologique" natao tamin'ny faritra iray teto Antananarivo (afovoantany malagasy) dia efa naseho ny be sy ny maro. Ireo "réservoirs aquifères" samihafa na adika tsotsotra hoe sinibe mpitahiry ny rano ambanin'ny tany tao amin'ny faritry Mahitsy, fivondronana Ambohidratrimo dia novelabelarina tamin'ny antsipirihiny. Ny fisian'ny "néotectonisme" na adika hoe ny fihetsehin'ny tany izay mbola mitohy ankehitriny dia mandray anjara amin'ny firafitry ny nofo-tany, mametra ny bikan'ireo sinibe ireo sy ny "fonctionnement hydrologique" ny "bassins versants". Notsindriana kokoa ny momba ny rano ambanin'ny tany, ny fitantanana azy ary koa ny fiarovana ny "bassins versants" sy ny "bas-fonds" na adika hoe lembalemba fambolem-bary.

## AVANT PROPOS

Sur les Hautes Terres de Madagascar, les ressources en eau semblent, a priori, suffisamment abondantes. Toutefois, dans la région d'Antananarivo, la demande en eau à usage domestique, pour l'irrigation (essentiellement la riziculture) et l'industrie est telle que des problèmes pourraient se poser à terme.

De 1987 à 1989, une étude multidisciplinaire (agronomie, géomorphologie, hydrologie, hydrogéologie, tectonique) menée dans le cadre d'un programme FOFIFA<sup>1</sup>/CNRS<sup>2</sup>/ CIRAD<sup>3</sup> a été réalisée sur le site expérimental d'Ambohitrakoho, situé à environ 30 km au NW d'Antananarivo. L'objectif scientifique de cette étude était de réaliser un bilan hydrique et minéral d'une "unité bas-fond" (130 ha) qui semblait représentative de la région. Les résultats ont été présentés en décembre 1991, à Antananarivo lors de la tenue du colloque international "Bas-fond et riziculture".

Dans le domaine de l'hydrogéologie et de la tectonique, les résultats ont dépassé la simple application agronomique qui en était l'objectif essentiel. La mise en évidence d'un système aquifère bicouche et d'une tectonique récente dans la région d'Antananarivo est apparue d'un grand intérêt pour la connaissance des eaux souterraines de cette région, ressource peu étudiée jusqu'à présent.

Le programme CNRE/ORSTOM<sup>4</sup> "Bilan des eaux, typologie des bas-fonds, érosion et modélisation sur des bassins emboîtés des Hautes Terres de Madagascar" mené entre 1991 et 1993 a permis d'étendre ces résultats préliminaires à une zone plus vaste de 140 km<sup>2</sup> située dans la région de Mahitsy et incluant le bas-fond d'Ambohitrakoho précédemment étudié. Les principaux résultats de cette étude multidisciplinaire (morphotectonique, hydrologique, hydrogéologique) sont donnés dans cette note.

---

<sup>1</sup> FOFIFA : Centre National de la Recherche Agronomique Appliquée au Développement Rural.

<sup>2</sup> CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique.

<sup>3</sup> CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

<sup>4</sup> ORSTOM : Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération.

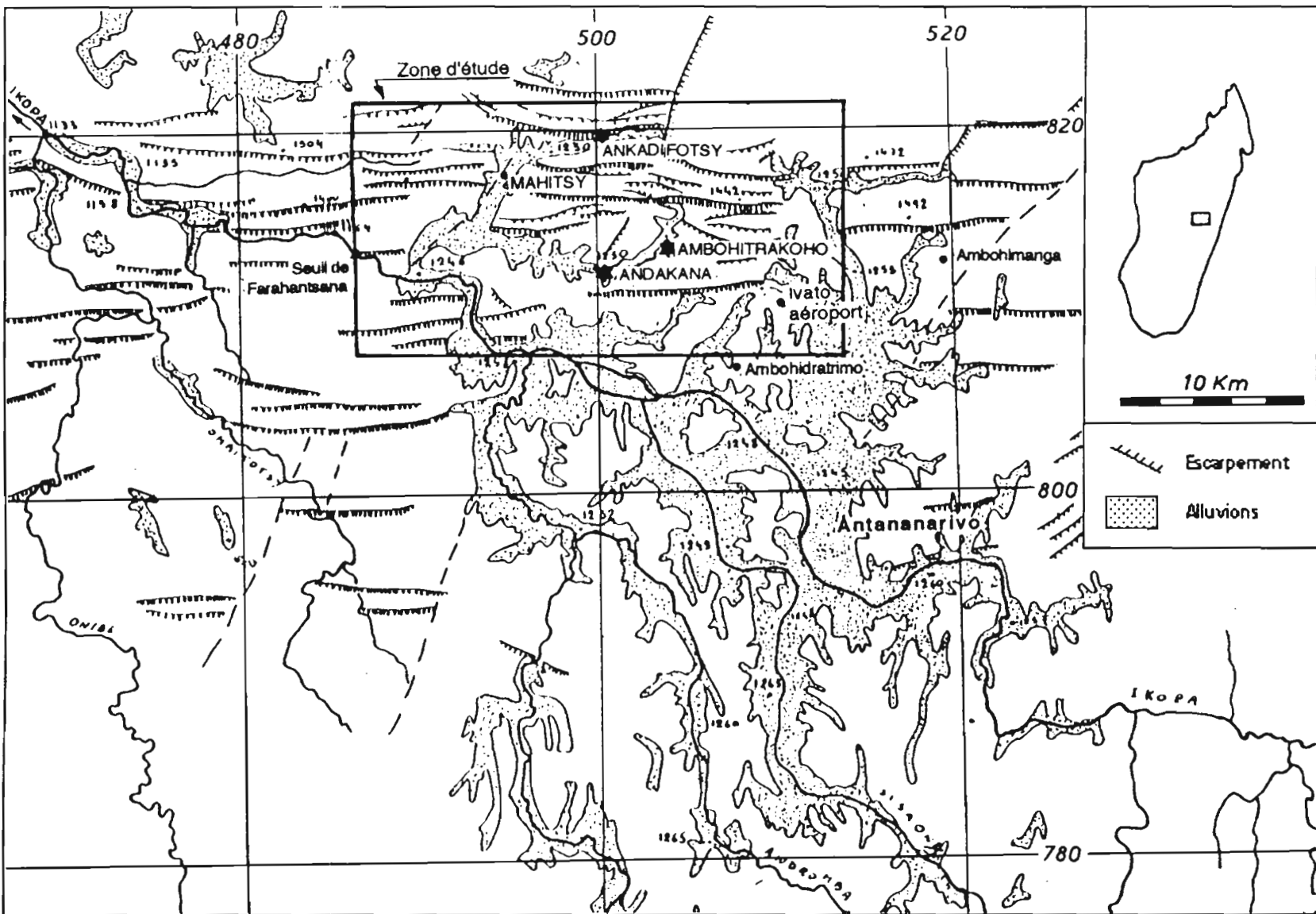


Fig. 1 : Région d'Antananarivo (d'après F. Arthaud et al., 1991)

## I . OBJECTIFS DE L'ETUDE

- confronter la connaissance du fonctionnement hydraulique d'une unité témoin à celle d'unités emboîtées de dimension croissante ;
- caractériser les composantes de l'écoulement souterrain et leur interférence avec les eaux de surface ;
- définir l'exploitabilité et la gestion des ressources en eau ;
- orienter la protection et l'aménagement des Hautes Terres de Madagascar vis à vis des phénomènes intenses d'érosion.

## II. METHODOLOGIE

Sur la base d'une description du milieu physique de la zone d'étude (Fig. 1), différentes approches (Fig. 2) ont permis :

- d'identifier et de caractériser les terrains aquifères de la région de Mahitsy : analyse pédologique, géomorphologique et géologique ;
- de déterminer la structure des réservoirs aquifères : analyse morphotectonique et microtectonique (étude des reliefs et des roches en fonction de la fissuration/fracturation des formations géologiques).

Cette dernière approche a également permis :

- de confirmer l'existence d'une tectonique récente sur les Hautes Terres malgaches ;
- de proposer une classification des bas-fonds rizicoles et de montrer qu'il existe une relation entre la tectonique et la reprise d'érosion des bassins versants.

La compréhension du fonctionnement des aquifères, objectif essentiel du programme, repose en grande partie sur les résultats préliminaires obtenus entre 1987 et 1989 sur le site d'Ambohitrakoho, par différentes analyses :

- piézométrique : enregistrement du niveau des nappes en écoulement naturel ;
- physico-chimique : détermination des teneurs en ions majeurs et en éléments isotopiques ;
- hydrodynamique : détermination des propriétés de stockage des aquifères et de l'aptitude des nappes aux écoulements souterrains (pompages d'essai et expérience de Darcy).

Les trois années d'observations supplémentaires réalisées sur tout le bassin de Mahitsy ont permis d'apporter des précisions aux résultats antérieurs et de proposer de nouvelles hypothèses. L'étude repose essentiellement sur une analyse physico-chimique des eaux de source : utilisation de certains ions naturels en solution et de l'oxygène dissous comme indicateurs et traceurs du fonctionnement hydrologique des aquifères. Cette approche a permis de proposer un modèle d'alimentation des différentes nappes, d'identifier et de caractériser différents types de domaines hydrogéologiques dans la région de Mahitsy.

Enfin, l'établissement de bilans hydrologiques sur 5 sous-bassins versants vient confirmer l'ensemble des hypothèses, notamment sur le fonctionnement des aquifères. Les bilans hydrologiques reposent sur une analyse des précipitations et des écoulements de surface et sur l'évaluation de l'évapotranspiration. Ils consistent au niveau d'un bassin versant, à identifier les différents réservoirs, à examiner le cheminement de l'eau et à quantifier leur volume suivant le principe de la conservation des masses.

Du point de vue pratique, les résultats de l'étude peuvent être considérés comme des éléments d'aide à la décision des planificateurs et concepteurs pour notamment :

- l'exploitation et la gestion des ressources en eaux (irrigation et alimentation en eau potable)
- la protection et l'aménagement des bassins versants (lutte contre l'érosion) et des bas-fonds rizicoles.

### III. RÉSULTATS

Les résultats des études multidisciplinaires menées sur le site d'Ambohitrakoho et dans la région de Mahitsy ont fait l'objet de nombreuses publications dont les références sont données en annexe.

Nous ne présenterons ici que quelques résultats concernant la géomorphologie du bassin de Mahitsy et l'hydrogéologie de ses réservoirs aquifères.

#### III.1. Géomorphologie de la région de Mahitsy

La morphologie des Hautes Terres de Madagascar a longtemps été considérée comme ne dépendant que de la lithologie des roches et du contexte climatologie. Les travaux menés dans la région de Mahitsy ont montré que ces facteurs sont insuffisants. Sur les Hautes Terres, les mouvements d'ensemble d'origine tectonique ont conditionné les modalités de l'érosion et du transport : drainage vers l'Ouest dominant, répartition des zones à érosion dominante sur l'altération.

On rencontre à Madagascar deux phases récentes de tectonique cassante correspondant à deux distensions. La première phase est E-W, la seconde est N-S. Ces deux phases sont bien caractérisées sur la côte ouest et dans la région d'Antsirabe, moins bien sur l'ensemble des Hautes Terres.

La première phase de fracturation affecte, dans l'ouest, les séries carbonatées éocènes (et oligocènes ?). Ses structures guident l'installation des systèmes karstiques anté-oligo-miocènes. Son âge est donc post-éocène et anté-miocène. Il s'agit d'une distension E-W réactivant des failles profondes N20E et N160E en failles à composante normale. Sur les Hautes Terres, des failles, en moyenne N-S, contrôlent le volcanisme précoce de l'Ankaratra, les bassins pliocènes et les morphologies antérieures à la surface d'aplanissement d'âge fini-tertiaire (S.F.T.). La tectonique est caractérisée par la microtectonique au Sud et à l'Est d'Antananarivo, par des microfailles et un tenseur de contraintes antérieures à la tectonique en extension N-S.

La deuxième phase correspond à une

distension N-S qui a été mise en évidence dans plusieurs sites de Madagascar, en particulier dans la région d'Antananarivo par une analyse microtectonique des petites fractures associées aux failles. Cette analyse a permis de caractériser le champ de contraintes (Fig. 3).

L'ensemble des mouvements correspond à un état de contrainte défini par une extension horizontale ( $\sigma_3$ ) en moyenne N-S. Du point de vue de l'âge : on considère qu'elle est actuelle, dans la mesure où les zones dans lesquelles elle est évidente sont également des zones sismiques, et où elle affecte les alluvions les plus récentes (plaine d'Antananarivo). Quant à la fracturation on peut dire qu'elle est d'âge quaternaire récent à actuel car elle est :

- postérieure à la distension E-W (dans plusieurs stations microtectoniques, les stries de la distension N-S recourent celles de la distension E-W) ;
- postérieure à la réalisation de la surface d'aplanissement fini-tertiaire ;
- probablement postérieure aux dépôts de la basse terrasse mis en place pendant le "displuvial vavaténién" défini par F. Bourgeat et daté de -25000 à -10000 B.P. ;
- antérieure à l'installation des dépôts du niveau organique correspondant à un épisode de stabilité bioclimatique situé entre -9000 à -2600 ans (M. Raunet).

Dans la région d'Antananarivo, des mouvements verticaux différentiels liés à la présence de failles accentuent ou diminuent le rôle du soulèvement d'ensemble. La morphologie du bassin de Mahitsy (Fig. 4) dépend principalement de deux facteurs dont les inter-férences se traduisent par des paysages différents.

Le premier facteur est le changement de niveau de base dans la période comprise entre la mise en place de la surface d'aplanissement fini-tertiaire (S.F.T.) et l'installation d'un réseau de bas-fonds à une altitude tendant vers 1250 m NGM, à partir du seuil de l'Ikopa (seuil de Farahantsana).

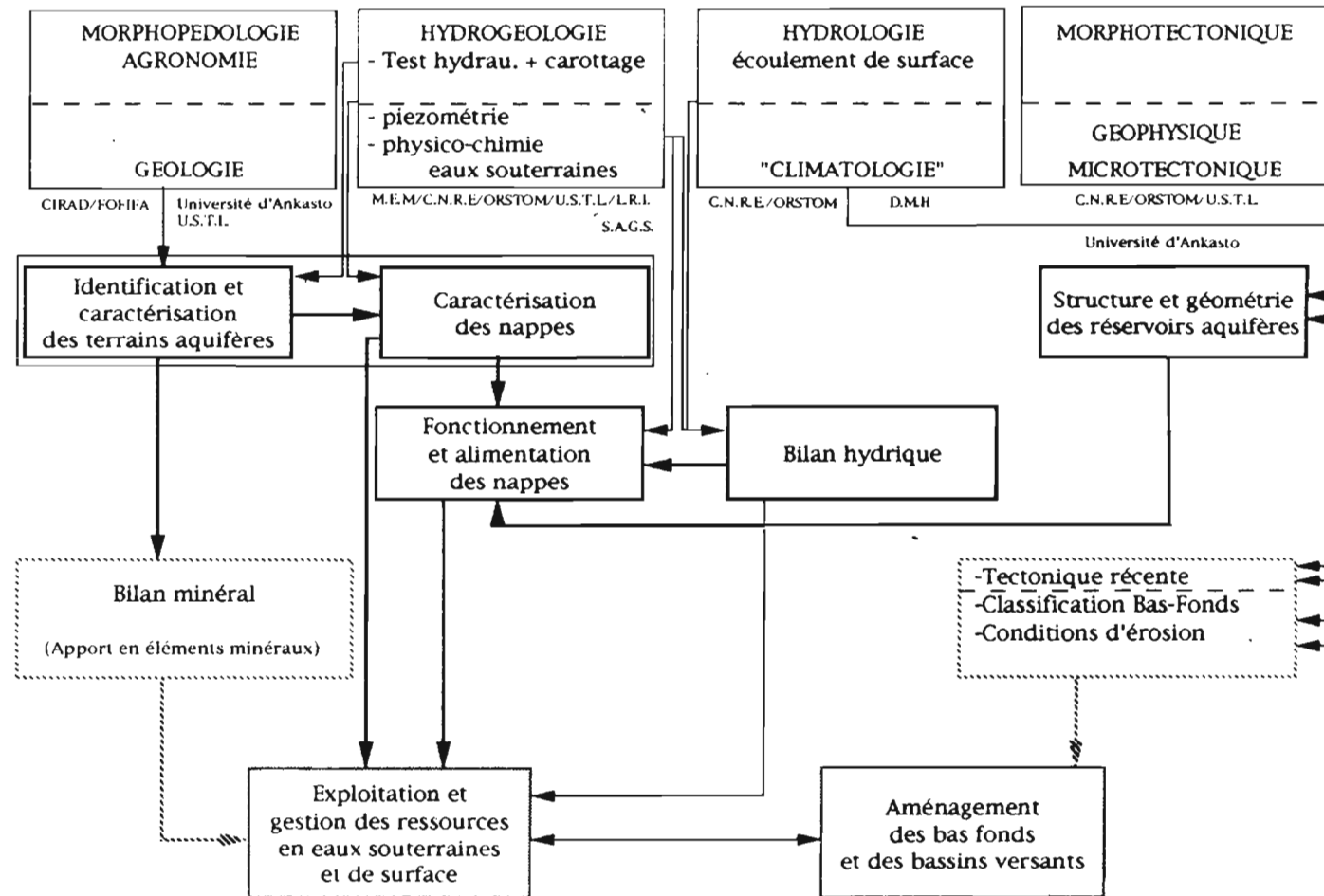


Fig. 2 : Méthodologie de l'étude de la région de Mahitsy.

Le second facteur correspond aux phases récentes de tectonique cassante qui du point de vue géomorphologique se manifeste essentiellement par des mouvements verticaux différentiels de blocs séparés par des failles (ces déplacements n'excluant pas les basculements d'ensemble). Compte tenu du recouvrement altéritique et des phénomènes d'érosion actuels, seule l'analyse morpho-tectonique et microtectonique a permis de mettre en évidence une tectonique encore active. Particulièrement bien développée, elle confère une grande originalité à cette région, où de nombreux types de bas-fonds et plaines alluviales sont représentés. Les failles majeures du secteur, à composante normale et d'orientation E-W à N110°, correspondent à une phase tectonique récente à actuelle d'extension N-S. Le jeu de ces failles dont le rejet peut être de l'ordre de la centaine de mètres s'accompagne du basculement de certains blocs, de la réactivation de fractures plus anciennes en particulier NE-SW et de l'apparition de failles secondaires d'orientation E-W à NW-SE.

La région de Mahitsy est un exemple particulièrement démonstratif de l'influence de la fracturation sur la typologie des bas-fonds et l'hydrographie, dans un contexte d'interaction entre le soulèvement régional et le jeu de failles.

L'étude morphotectonique a permis de proposer une classification des bas-fonds qui prend en compte l'amplitude des mouvements verticaux d'ensemble, soit positifs (soulèvement), soit négatifs (enfouissement), par rapport au niveau hydraulique de base (NBH) et l'intensité de la tectonique, appréciée par le rejet moyen des failles, leurs dimensions ou leur densité.

L'analyse statistique des fréquences directionnelles a montré qu'il existe une relation entre l'orientation des failles en surface et celle des bas-fonds et cours d'eau. Ces contrôles tectoniques permettent de proposer un mode d'organisation des écoulements de surface : outre l'influence de l'héritage des fractures anciennes N40E, des seuils liés à l'érosion différentielle et des aménagements humains, les cours d'eau principaux se sont installés sur des zones de failles d'orientation E-W.

A l'échelle locale, les déplacements verticaux liés au jeu des failles ont également un rôle important dans les circulations hydrauliques souterraines (taille et forme des différents réservoirs aquifères) et les conditions d'érosion des bassins versants.

### **III.2. Identification, caractérisation et fonctionnement du système aquifère de la région de Mahitsy**

Les terrains aquifères identifiés sur le bassin de Mahitsy (Fig. 5) renferment tous des nappes aux caractéristiques hydrodynamiques et physico-chimiques différentes : altérites, arènes micacées, socle fissuré, matériaux de bas-fonds et de plaines alluviales et formations d'éboulis.

Bien qu'en relation hydraulique, certaines d'entre-elles ont un mode de fonctionnement très différent, notamment en ce qui concerne leur alimentation (Fig. 6).

#### Aquifère des altérites :

La partie supérieure des formations altérées (AL : Altérites) des interfluves renferme une nappe bien développée mais d'extension limitée. Cette nappe peu minéralisée (conductivité électrique  $< 30 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) est rapidement alimentée (infiltration de l'ordre de 1m/jour) par les précipitations depuis la surface.

Des échanges hydriques (Fig. 7) peuvent s'opérer par drainances verticales descendantes (début du cycle pluvieux) ou ascendantes (seconde moitié du cycle pluvieux) avec les nappes arènes micacées/socle sous-jacentes. La fin de la recharge de la nappe des altérites est marquée par un retour rapide à des conditions de lente décrue relativement constante durant la saison sèche.

L'eau de cette nappe contribue à l'irrigation des rizières par son émergence au niveau de lignes de sources et de suintements situées en bordure des bas-fonds et des plaines alluviales.

**me** : porosité efficace en % (rapport du volume d'eau de gravité au volume total) ; **K** : coefficient de perméabilité de Darcy (volume d'eau libre qui percole pendant l'unité de temps à travers l'unité de surface d'une section totale de la couche aquifère sous un gradient hydraulique égale à l'unité, à la température de 20°C) ; **Kv** et **Kh** : perméabilités verticale et horizontale en m/s (caractérise et régit respectivement l'écoulement vertical et horizontal) ; **T** : Transmissivité en m<sup>2</sup>/s (produit du coefficient de perméabilité par la puissance de la couche aquifère) ; **S** : coefficient d'emmagasinement en % (volume d'eau libéré par un prisme vertical de la couche aquifère, de section égale à l'unité, pour une baisse unitaire du niveau piézométrique) ; **CE** : conductivité électrique en  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  pour une température ramenée à 20°C (est fonction de la concentration et de la nature des sels dissous).

#### Aquifère des arènes micacées :

La formation altérée (AM : Arènes micacées), comprise entre les altérites et le socle sain fissuré (SF) renferme une nappe plus minéralisée (conductivité électrique  $> 100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) et d'extension régionale. Un niveau argileux discontinu formé au sommet des arènes micacées confère localement à la nappe des conditions d'écoulement différentes de celles de la nappe sus-jacente et une bonne protection à d'éventuelles pollutions.

L'alimentation de cette nappe semi-captive se ferait soit par des écoulements provenant de la nappe de socle sous-jacente (SF) soit depuis la surface, au niveau des plaines alluviales, lacs et marécages situés dans le bassin.

#### Aquifère de socle (SF) :

Dans ce type de réservoir, les circulations souterraines importantes se font essentiellement par le réseau des failles. L'étude tectonique et morphotectonique a montré que, dans la région de Mahitsy, de telles circulations étaient possibles.

L'alimentation de la nappe de socle serait réalisée depuis des zones, situées dans ou hors du bassin, à faible couverture altérite (foliation métamorphique des roches favorisant l'infiltration des précipitations

depuis la surface) et par des échanges avec la nappe des arènes micacées sus-jacente avec laquelle elle serait en continuité hydraulique. Ces échanges hydriques sont probablement accrus dans les zones affectées par des failles et les zones dépressionnaires : zones de lacs, marécages... Soulignons que les bilans hydrologiques ont mis en évidence l'existence d'apports souterrains extérieurs au bassin. Le système de fracturation E-W favoriserait des échanges avec d'autres bassins (Fig. 1), notamment ceux situés dans la région d'Ivato.

Soulignons que la nappe de socle demanderait à être plus étudiée, notamment en ce qui concerne ses propriétés hydrodynamiques.

#### Aquifère des matériaux de bas-fonds et de plaines alluviales :

Les matériaux situés sous les bas-fonds et les plaines alluviales (LT : Limons tourbeux, T : Tourbe franche et SL : Sables "lavés") renferment des "nappes" très superficielles et de faibles épaisseurs.

Les pratiques culturales qui précèdent la saison des pluies (labours, édification des diguettes de retenue et de régulation du plan d'eau des rizières...) modifient le comportement du recouvrement argileux anthropique de surface. Ces pratiques ont pour effet de déstructurer cet horizon, favorisant les infiltrations depuis la surface : des transferts de flux verticaux descendants peuvent ainsi s'opérer au début du cycle pluvieux (6, Fig. 7).

Durant la seconde moitié du cycle pluvieux et la première moitié de la saison sèche, des transferts de flux verticaux ascendants (7, Fig. 7) s'opéreraient depuis les arènes micacées jusqu'au recouvrement argileux anthropique globalement restructuré et dans lequel s'enracine le riz. Au cours de la seconde moitié de la saison sèche ces transferts s'inverseraient (8, Fig. 7).

Ces nappes sont alimentées par des écoulements verticaux ou latéraux provenant soit du réseau de surface (rivières, drains, canaux, rizières inondées...) soit des autres nappes.



Du point de vue agronomique, l'eau de ces nappes a probablement une grande importance, car elle contribuerait à l'alimentation des rizières en éléments nutritifs (potassium) pouvant provenir des nappes des arènes micacées et du socle.

#### Aquifère des formations d'éboulis :

Les formations d'éboulis renferment des nappes d'extension limitée. En fonction de l'état de consolidation des éboulis, elles sont alimentées soit directement par les précipitations soit par des écoulements provenant de la nappe de socle.

Ces nappes sont déjà très utilisées par gravité pour l'alimentation en eau des villages.

### **III.3. Représentativité du bassin de Mahitsy à l'échelle des Hautes Terres**

L'approche morphotectonique couplée à l'étude hydrologique au sens large et notamment la définition de domaines hydrogéologiques identifiables par certains paramètres physicochimiques des eaux a permis de tester la représentativité d'un bassin témoin (bas-fond d'Ambohitrakoho) à l'intérieur d'un système considéré, à plus petite échelle (bassin de Mahitsy).

Le bas-fond unitaire d'Ambohitrakoho ne serait pas représentatif de l'ensemble du bassin de Mahitsy mais correspondrait à une structure comprenant un ensemble de bas-fonds, et appartenant à un domaine hydrogéologique en relation avec des conditions morphotectoniques.

Cette approche a également permis de montrer que le bassin versant de Mahitsy est un ensemble complexe, non représentatif des Hautes Terres. Pour un domaine hydrogéologique considéré, les bas-fonds n'ont pas la même structure que l'ensemble du bassin mais les phénomènes hydrodynamiques doivent rester assez identiques.

Cela signifie que, si l'on veut changer d'échelle en vue d'une étude hydrogéologique, il est nécessaire de réaliser, sur la zone considérée, une approche multidisciplinaire couplée à une

analyse morphotectonique (identification des seuils, du niveau hydraulique de base, des failles...). En cela, la méthodologie mise en place pour l'étude du bassin de Mahitsy pourrait servir d'exemple.

## **IV. RESSOURCES EN EAUX ET PROTECTION DES BASSINS VERSANTS (RECOMMANDATIONS)**

### **IV.1. Exploitation par pompage et gestion des ressources en eaux souterraines**

En raison de son extension réduite aux interfluves et de sa rapide alimentation depuis la surface, une éventuelle exploitation de la nappe des altérites pour l'alimentation en eau villageoise ne pourrait être que limitée et nécessiterait une surveillance particulière d'une part de son niveau et d'autre part vis à vis des risques de pollutions. Un abaissement de son niveau aurait probablement des conséquences sur l'alimentation en eau des rizières à partir des lignes de sources et de suintements (exutoires de la nappe), notamment lors des périodes sèches. Toutefois des pompages excessifs n'auraient probablement que des répercussions très localisées.

Les nappes des arènes micacées et du socle d'extension régionale sont mieux protégées contre d'éventuelles pollutions, et elles semblent avoir des potentialités plus intéressantes du point de vue quantitatif. A cela, ajoutons que leur exploitation par pompage provoquerait des écoulements descendants (mis en évidence au cours des tests hydrauliques) provenant de la nappe sus-jacente des altérites et traversant la couche argileuse (protection contre les pollutions). C'est seulement par des études morpho-tectoniques préliminaires (localisation des failles et implantation des forages en conséquence) que des échecs sur les forages dans les nappes arènes micacées/socle pour l'alimentation en eau villageoise pourraient être évités.

Rappelons que de manière générale, l'exploitation par pompage des eaux souterraines exige un suivi très rigoureux des fluctuations des nappes.

#### IV.2. Protection et aménagement des bas-fonds rizicoles et des bassins versants

Les seuils rocheux barrant les cours d'eau (seuils de Farahantsana, d'Andakana...) jouent un rôle déterminant dans la dynamique des écoulements de surface et souterrains, la stabilisation des niveaux piézométriques de l'ensemble du système aquifère et la stabilité des terrains. Leur modification pourrait avoir de graves conséquences qu'il est difficile d'estimer à terme : abaissement ou remontée locale du niveau des nappes (assèchement ou engorgement des rizières), perte des surfaces rizicoles par reprise d'érosion ...

L'étude morphotectonique a montré une relation entre la tectonique et l'importance des phénomènes d'érosion. Les projets de lutte contre l'érosion par reboisement et le développement de nouvelles surfaces cultivables devraient prendre en compte ce

type d'étude. Le choix des sites devrait se porter en priorité sur des zones tectoniquement stables, pour réaliser des aménagements à moindre coût et à moindre risque de dégradation.

#### V. PERSPECTIVES DE RECHERCHE

L'identification et la cartographie des unités morphotectoniques peut servir pour une application au niveau des ressources en eau et de la protection des bassins versants à l'échelle des Hautes Terres.

L'acquisition d'une meilleure connaissance de l'aquifère de socle est nécessaire pour une gestion durable et efficace des ressources en eaux souterraines, non seulement sur les Hautes Terres malgaches mais également dans d'autres régions comme par exemple la région cristalline du sud malgache (zone semi-aride).

TERRAINS AQUIFERES	NATURE PEDOLOGIQUE et/ou LITHOLOGIQUE	EPAISSEUR MOYENNE (M)	CARACTERISTIQUES DES AQUIFERES ET DES NAPPES
Altérites des interfluves	Altérites kaoliniques limono-argilo-sableuses	20	Nappe libre Bien développée D'extension limitée Infiltration de l'ordre de 1m/jour Faiblement minéralisée : CE < 30 me : 6% ; Kv > 1E-4 1E-5 < T > 5E-5
Arènes micacées	Niveau argileux discontinu	2	Semi-perméable
	Arènes argilo-sableuses quartzo-feldspato-micacées	6	Nappe semi-captive D'extension régionale S : de l'ordre de 0,1% T : de l'ordre de 5E-6
Socle fissuré	Granitoïdes et orthogneiss		Nappe d'extension régionale Porosité de fissure/fractures
Matériaux de bas-fonds et de plaines alluviales	Tourbe franche	0,40-1,50	Nappes très superficielles De faible épaisseur Kv et Kh < 1E-9
	Limon tourbeux	0,40-1,50	Kv : 4E-4 ; Kh : 3E-6
	Sables grossiers "lavés"	0,20-0,60	Kv et Kh de l'ordre de 1E-5
Formations d'éboulis	Blocs, pierres, graviers, sables, argiles... (plus ou moins consolidés)		Nappes libres ou semi-captives à captives D'extension limitée

Fig. 5 : Identification et caractérisation des terrains aquifères et de leur nappe (B. Dussarrat, 1994).

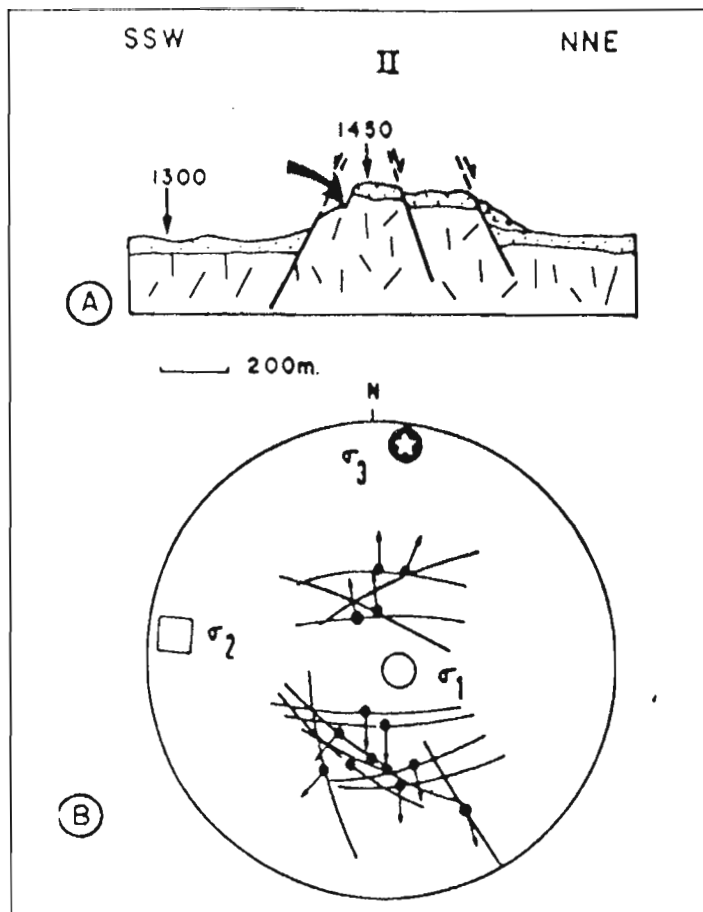


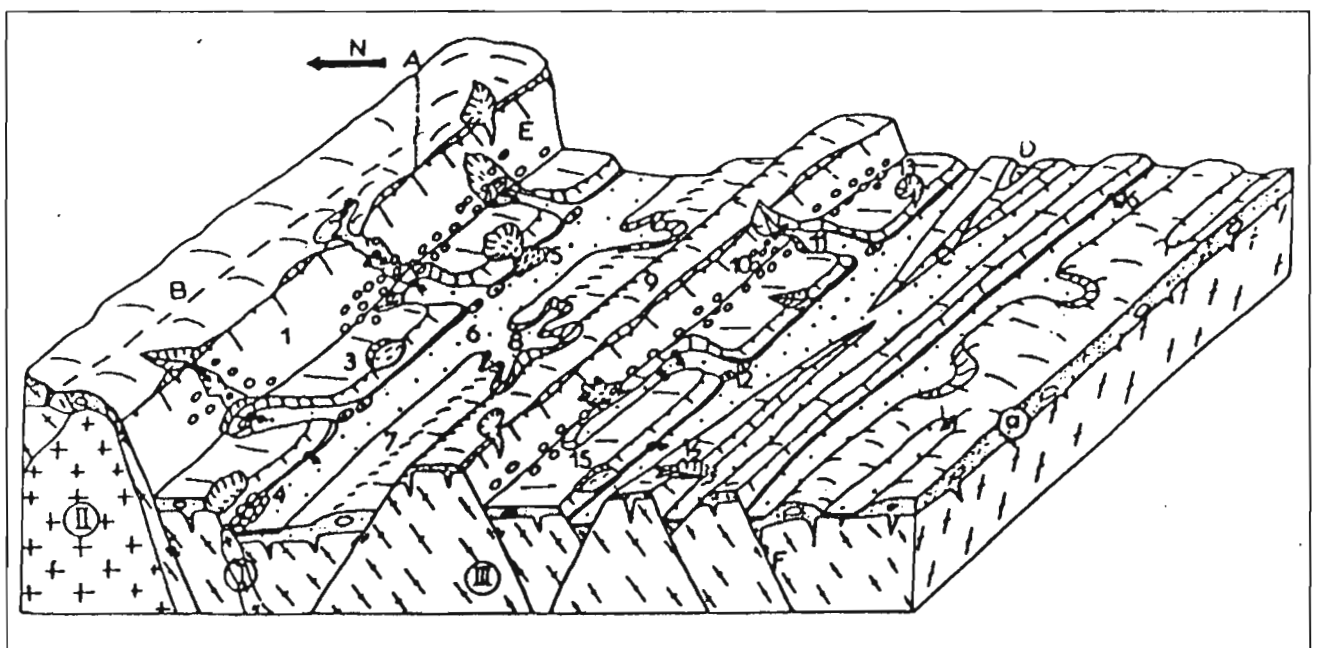
Fig. 3 :

Données microtectoniques d'une station de la région de Mahitsy

Carrière dans les migmatites  
x = 508 ; y = 814  
(F. Arthaud et al., 1989)

3.A : Coupe schématique passant par le point de mesure des microfailles

3.B : Projection cyclographique des microfailles (plan et direction des stries ainsi que l'orientation des trois directions principales)



1 : Escarpement de faille ; 2 : Thalweg ; 3 : Surface d'aplanissement fini-tertiaire (S.F.T.) ; 4 : Accumulation de boules ; 5 : Coulées boueuses ; 6 : Bas-fond alluvial ; 7 : Terrasse ; 8 : Bas-fond en doigt de gant ; 9 : S.F.T. surélevée par rapport à 3 ; 10 : Eboulis ; 11 : Bas-fond de transit ; 12 : Filon rocheux ; 13 : Lavaka ; 14 : Vallon perché ; 15 : Glissement de terrain ; 16 : Ligne de suintement et de sources ; A : Relief de ligne de faille ; B : Faille ancienne ; C : Faille récente ; D : Escarpement de ligne de faille ; E : Escarpement ; F : Faille ; a : Altérites ; I : Filon ; II : Granitoïdes ; III : Gneiss et migmatites.

Fig. 4 : Unités morphotectoniques du bassin versant de Mahitsy  
(B. Dussarrat, J. Ralaimaro, 1993).

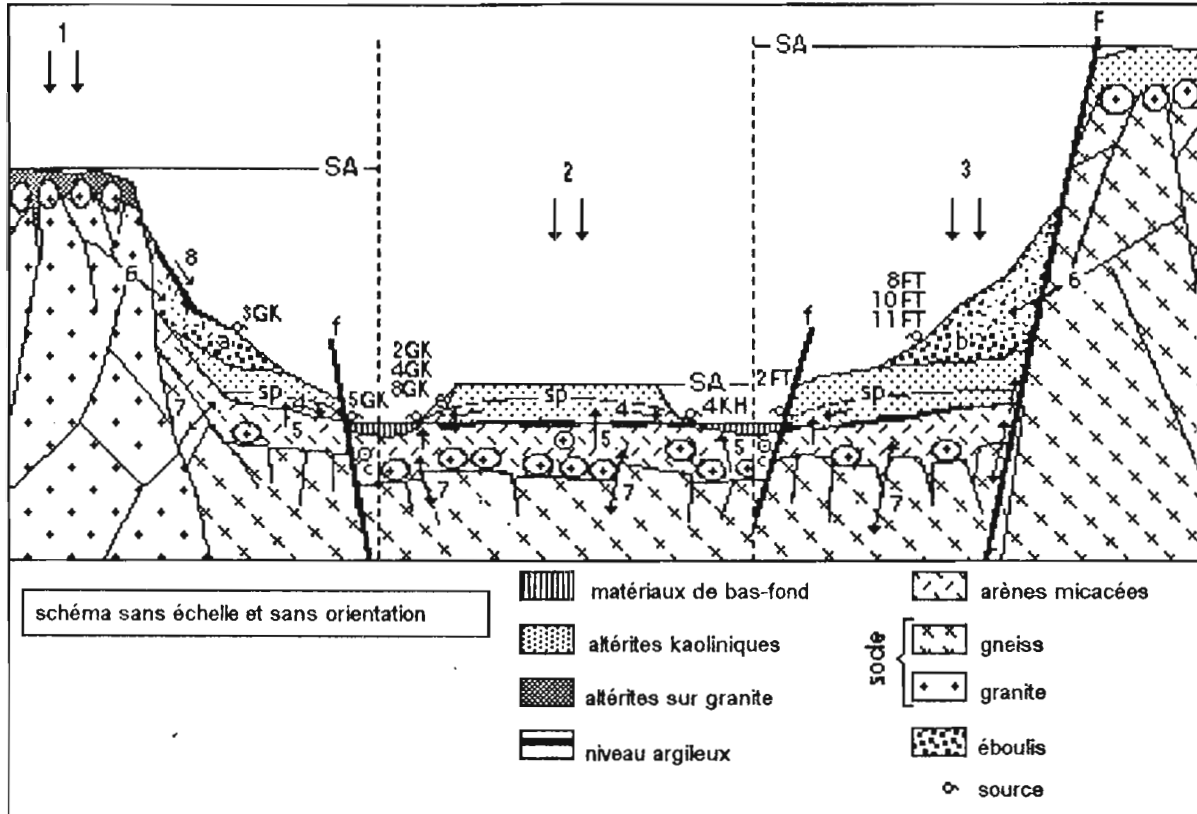
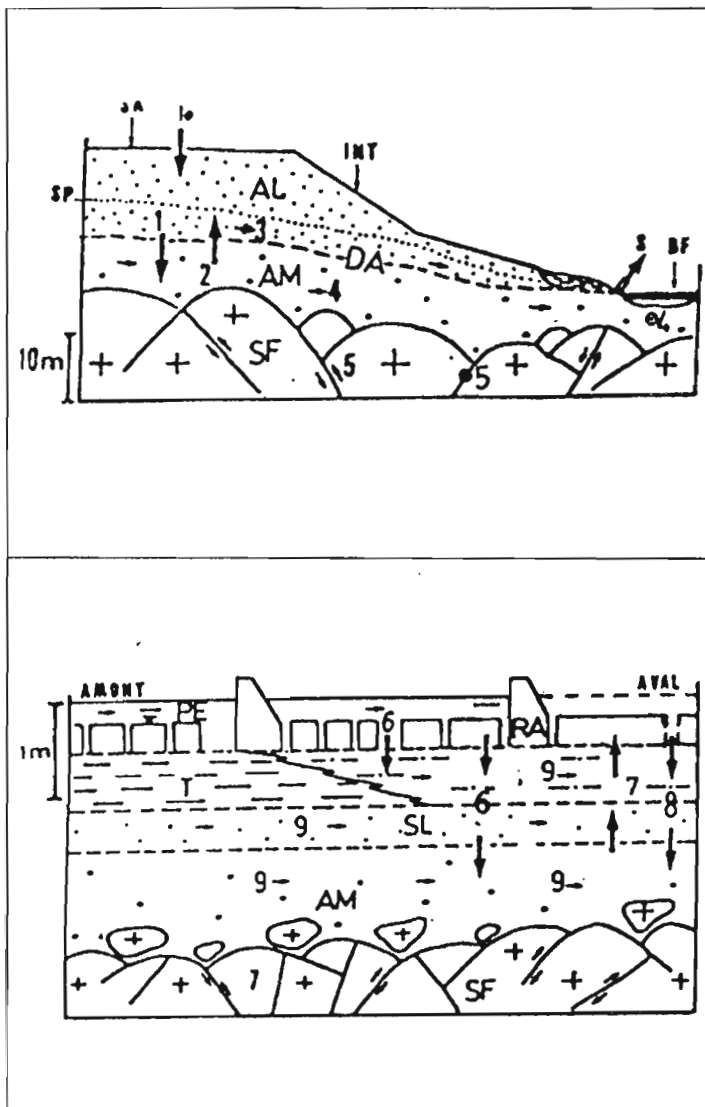


Fig. 6 : Modèle d'alimentation des exutoires des différentes nappes du bassin versant de Mahitsy. (B. Dussarrat, J. Ralaimaro, 1993)

a : éboulis stabilisés ; b : éboulis actifs ; e : zone d'altération-érosion ; F : faille majeure ; f : faille affectant les altérites ; sp : surface piézométrique de la nappe libre ; s : source ; 1, 2 et 3 : précipitations sur les reliefs, les interfluves et les éboulis non stabilisés ; 4 : écoulements provenant de la nappe des altérites ; 5 : écoulements provenant de la nappe des arènes micacées ; 6 : écoulements descendants provenant du socle fissuré ; 7 : échanges hydriques entre la nappe des arènes micacées et celle du socle ; 8 : ruissellement et/ou écoulements hypodermiques ; c : circulations souterraines contrôlées par le réseau de failles ; KH : Ambohitrakoho ; GK : Antangirika ; FT : Ankadifotsy



7.1 : Sous les interfluves.

AL : Altérites kaoliniques ; SP : surface piézométrique ; DA : discontinuité argileuse ; AS : ensemble arènes micacées/socle ; SA : surface d'aplanissement ; INT : interfluve ; 5 : source des altérites ; BF : bas-fond : le : infiltration efficace ; 1 : drainances verticales descendantes (début du cycle pluvieux) ; 2 : ascendantes (seconde moitié du cycle pluvieux) ; 3, 4 et 5 : directions de drainage souterrain

7.2 : Sous le bas-fond.

1 : plan d'eau libre des rizières ; 2 : recouvrement argileux anthropique déstructuré par les labours et l'édification des diguettes ; 3 : tourbe franche ; 4 : limons tourbeux ; 5 : sables lavés ; 6 : arènes micacées ; 7 : socle fissuré ; 8 : directions de drainage souterrain ; A : drainances verticales descendantes (début du cycle pluvieux) ; B : ascendantes (seconde moitié du cycle pluvieux et première moitié de la saison sèche) ; C : à nouveau descendantes (seconde moitié de la saison sèche).

Fig. 7: Modèles des transferts de flux entre la surface et le milieu souterrain. (J.C. Grillot et B. Dussarrat, 1992).

## REFERENCES

- ARTHAUD (F.), GRILLOT (J.-C.), RAUNET (M.), 1989 : Mise en évidence d'une tectonique en distension N-S. à Madagascar. C.R. Acad. Sci., Paris, 309 (2), pp. 125-128.
- ARTHAUD (F.), GRILLOT (J.-C.), RAUNET (M.), 1990 : La tectonique cassante à Madagascar: son incidence sur la géomorphologie et sur les écoulements. Can. J. Earth Sci. 27, pp.1394-1407.
- ARTHAUD (F.), DUSSARRAT (B.), GRILLOT (J.-C.), 1991 : Rôle des facteurs tectoniques et géomorphologiques dans l'organisation des systèmes de bas-fonds rizicoles (exemples des hauts-plateaux de Madagascar). Séminaire international, Madagascar, Tananarive, 9-14 décembre 1991. Bas-fonds et riziculture. 9 pages.
- BRENON (P), 1952 : La plaine de Tananarive et les possibilités d'abaissement du niveau de l'Ikopa. Document du Bureau géologique A.465.
- DE GUIDICI (P.), 1991 : Etude agro-pédologique du périmètre d'Andakana. Projet MAG/86/004. Laboratoire Radio-isotope-Antananarivo.
- DURBEC (A.), DUBAR (C.), GRILLOT (J.-C.), RAUNET (M.), 1991 : Modélisation des écoulements souterrains entre interfluves et bas-fond rizicoles : cas d'un bassin versant élémentaire des Hauts Plateaux malgaches. Séminaire international, Madagascar, Tananarive, 9-14 décembre 1991. Bas-fonds et riziculture. 10 pages.
- DUSSARRAT (B.), RALAIMARO (J.), 1993 : Caractérisation hydrogéologique de bassins versants emboîtés sur socle altéré en zone tropicale d'altitude: exemple des Hautes Terres de Madagascar. Rev. Hydrogéologie, n°1 : pp. 53-64.
- DUSSARRAT (B.), 1994 : Structure et fonctionnement des aquifères de socle altéré en zone tropicale d'altitude : cas du bassin de Mahitsy (Hautes Terres de Madagascar) . Thèse de Doctorat- Université de Montpellier II.
- GRILLOT (J.-C.), BLAVOUX ( B.), RAKOTONDRAINIBE (J.-H.), RAUNET (M.), 1989 : Dynamique en hautes eaux des aquifères des altérites sur les Hauts Plateaux cristallophylliens de Madagascar. J. Afr. Earth Sci., vol. IX, n° 3/4, pp.599-607.
- GRILLOT (J.-C.), FERRY (L.), 1990 : Approche des échanges surface-souterrain en milieu cristallin altéré aquifère. Cahiers ORSTOM, Sér. Hydrol. Cont., Vol. X, n°1, pp.3-12.
- GRILLOT (J.-C.), RAUNET (M.), FERRY (L.), 1990 : Comportement piézométrique des nappes d'altérites en zone intertropicale humide d'altitude (Hauts Plateaux de Madagascar). J. Hydrol. 120, pp.271-282.
- GRILLOT (J.-C.), DE ENDOLENKO (D.), DUSSARRAT (B.), 1991 : Perméabilités de matériaux reposant sur socle cristallin: un exemple en zone intertropicale ( Madagascar). C.R. Acad. Sci., Paris, 313 (2), pp.959-964.
- GRILLOT (J.-C.), DUSSARRAT (B.), 1992 : Hydraulique des unités d'interfluves et de bas-fond tourbeux : un exemple en zone de socle altéré (Madagascar). J. Hydrol. 135, pp.321-340.
- NOIZET (G.), 1965 : La plaine de Tananarive, site géologique et problème d'assainissement. Communication à l'Académie malgache. Séance du 18 Février 1965.
- NOIZET (G.), 1966 : Note sur la nature et l'échelonnement dans le temps des travaux géologiques nécessaires dans l'opération "Plaine de Tananarive". Document du Service Géologique AU.125.
- RAUNET (M.), 1991 : Bas-fond et riziculture. Actes du Séminaire d'Antananarivo, Madagascar, 9-14 décembre 1991. CIRAD, 517 pages.
- RAMANANJATO (Z.), A paraître : Phénomènes d'érosion accélérée sur socle altéré sur les Hautes Terres Centrales de Madagascar : Cas du bassin versant de Mahitsy. Mémoire de maîtrise - Université d'Antananarivo.

**REPOBLIKAN' I MADAGASIKARA**  
**Tanindrazana-Fahafahana-Fahamarinana**

**BULLETIN**  
**DE**  
**L'ACADEMIE NATIONALE**  
**MALGACHE**  
**NUMERO SPECIAL**

**DU 50ème ANNIVERSAIRE**  
**DE**  
**L'ORSTOM**

*Institut Français de Recherche Scientifique  
pour le Développement en Coopération*  
**1994**

**ANTANANARIVO**  
**1995**