

2

Caractérisation hydrogéologique de bassins versants emboîtés sur socle altéré en zone tropicale d'altitude: exemple des Hautes Terres de Madagascar

*Hydrogeological characterization of drainage basins
in weathered basement of a high-altitude tropical zone:
Hautes Terres, Madagascar*

Béatrice DUSSARRAT *, Joseph RALAIMARO **

Mots-clés: Système multicouche, Bassin versant, Contrôle tectonique, Zone tropicale, Socle Madagascar

Résumé

Dans le socle cristallin altéré des Hautes Terres malgaches, un site hydrogéologique et hydrologique a permis de fixer les caractéristiques du fonctionnement d'un aquifère bi-couche dans certaines conditions morphologiques et tectoniques (bassin versant d'Ambohitrakoho). La représentativité de ce site est testée sur un bassin plus vaste qui l'englobe (site de Mahitsy). Une étude préliminaire permet de montrer que le site de Mahitsy est complexe et que plusieurs domaines y sont présents. Les caractéristiques de ces domaines s'expliquent par des mélanges en proportions variables d'eaux d'origine de différentes nappes: eaux de socle, eaux des altérites, eaux de surface. La structure de l'ensemble socle-altérites, conditionnée par la tectonique récente, joue un rôle majeur dans la répartition des différents domaines.

Abstract

On the weathered crystalline basement of malagasy Highlands, an hydrological and hydrogeological site has permit to define the functioning characteristics of two-layered aquifer in some tectonic and morphological conditions (drainage basin of Ambohitrakoho). The representativity of this site is tested in a larger basin (site of Mahitsy) which includes it. A preliminary field survey allows to demonstrate that the site of Mahitsy is complex. Several hydrogeological domains are identified according to physico-chemical parameters of spring water are. Each area has its own morphotectonic structure. The mixing into variable proportions waters of different aquifers explain the characteristics of these areas. The structure of basement-alterites units derived by the recent brittle tectonics takes an importante place into the repartition of different areas.

The definition of different hydrogeological areas allows to think that the experimental basin of Ambohitrakoho (1,3 km²) to a peculiar hydrogeological area. It cannot be considered like representative of the whole basin of Mahitsy (117 km²).

* Laboratoire d'hydrogéologie et, URA CNRS 1359 USTL, Place E. Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 05. Adresse actuelle: ORSTOM, BP 434, Antananarivo, Madagascar.

** ORSTOM, BP 434, Antananarivo, Madagascar.

Introduction

Un site expérimental hydrogéologique (site de Mahitsy), situé sur les Hautes Terres malgaches, a été choisi pour étudier les caractéristiques d'un aquifère bi-couche (socle-altérites), en zone tropicale d'altitude (1 200 à 1 500 m NGM). Ce site expérimental est situé à environ 30 km au NW d'Antananarivo (Madagascar). Il est constitué par le bassin versant d'un affluent de la rive droite du fleuve l'Ikopa : la Maniandro.

Le site englobe dans son périmètre, le bassin expérimental d'Ambohitrakoho (1,3 km²), qui a été étudié très en détail du point de vue de l'hydrogéologie, de l'hydrologie et de la morphotectonique [Raunet, sous presse].

A la suite de ces études pluridisciplinaires, le problème de la représentativité du site d'Ambohitrakoho à l'échelle régionale s'est posé, en temps que type de bas-fond, modèle des circulations d'eau profonde et processus d'altération-érosion-transport.

Pour réaliser cet objectif, un certain nombre de données ont été retenues comme caractéristiques d'un modèle conceptuel de bas-fond de « type Ambohitrakoho ». Dans un deuxième stade de l'étude, ces caractéristiques ont été mesurées dans d'autres bassins versants du périmètre de Mahitsy et comparées au « modèle Ambohitrakoho ». Les paramètres physico-chimiques retenus (température, conductivité électrique, O₂ dissous, pH), sont des paramètres facilement mesurables sur le terrain. Ils ont été mesurés sur un nombre restreint, mais sélectionnés avec soin, de points de mesure (5 piézomètres et 24 sources). A ce stade initial de la recherche, des résultats significatifs ont été obtenus. Ils permettent de montrer qu'à l'échelle du bassin versant de Ma-

hitsy, un certain nombre de domaines hydrogéologiques différents peuvent être définis d'après leurs caractères physico-chimiques et hydrodynamiques.

L'étude morphotectonique du bassin versant, menée parallèlement à l'étude hydrogéologique, a montré que ces différents domaines correspondaient à diverses conditions de mélanges des eaux souterraines et de surface, étroitement contrôlées par des facteurs morphotectoniques, parmi lesquels, principalement, les mouvements verticaux par rapport au seuil hydraulique du bassin et la fracturation néotectonique du socle et des altérites.

Le « modèle Ambohitrakoho » de bassin versant

Le milieu physique

Le bassin versant est installé sur un socle cristallin altéré. Le socle est constitué par des gneiss précambriens plus ou moins anatectiques présentant une foliation à pendage faible en général vers le NNW. Les gneiss sont recoupés par des filons de granitoïdes subverticaux. Vers la surface, la roche saine passe, sous les interfluves, à des arènes micacées argilifiées au sommet, puis à un complexe altérite. Ce complexe comprend en général, à la base des altérites *in situ* et au sommet des altérites déplacées, avec entre les deux parfois des paléosols (stone-lines). L'ensemble est tronqué au sommet par une surface d'aplanissement d'âge supposé finitertiaire (SFT) [Raunet, 1986] qui matérialise le stationnement d'un ancien niveau hydrostatique de base, à l'échelle régionale. A Ambohitrakoho, l'alti-

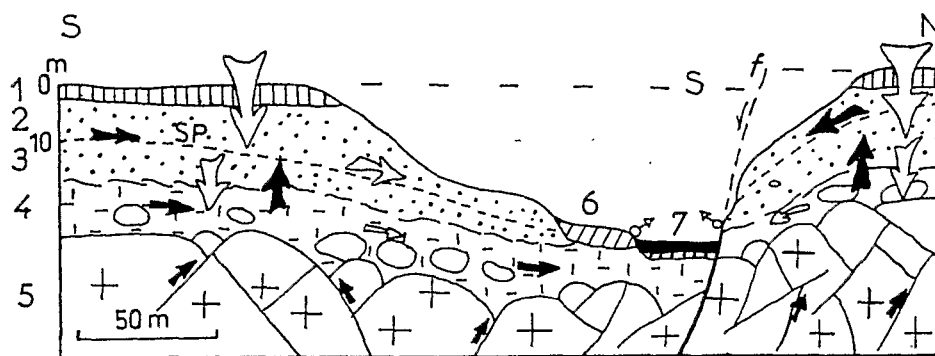


Fig. 1. - Modèle des échanges hydriques sur les interfluves du bas-fond d'Ambohitrakoho (Water exchange model for the interfluves of the Ambohitrakoho flat):

1, matériau ferrallitique rouge remanié; 2, altérites kaoliniques isovolumiques (non remaniées); 3, argile de néoformation; 4, « arènes » micacées isovolumiques (non remaniées); 5, socle fissuré; 6, terrasse ancienne; 7, bas-fond actuel; S, surface d'aplanissement fini-tertiaire; SP, surface piézométrique; f, faille; flèches: indiquent le sens de circulation des eaux souterraines, flèches noires: pendant la deuxième moitié du cycle pluvieux, flèches blanches: au début du cycle pluvieux

CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE DE BASSINS VERSANTS

Tabl. 1. - Caractéristiques hydrodynamiques du « modèle Ambohitrakoho » sous les interfluves (*Hydrodynamic features of the « Ambohitrakoho model » beneath the interfluves*)

TYPE D'AQUIFERE	Bicouche
CARACTERISTIQUES DES NAPPES	NAPPE LIBRE -altérites -très peu minéralisée (< 30 µS/cm) -alimentation par l'impluvium local -temps de réponse au signal pluie: 15 jours -infiltration rapide(1m/j); circulation lente dans la zone noyée(kh: E-6 à E-7 m/s)
	NAPPE SEMI-CAPTIVE -arènes+socle -assez minéralisée (> 100 µS/cm) -alimentation par impluvium régional -temps de réponse au signal pluie: 3 mois -emmagasinement S: 0,1%
EXUTOIRE	Lignes de suintements et sources
RELATIONS HYDRAULIQUES ENTRE LES NAPPES	Flux latéraux Flux descendant: en début de cycle pluvieux Flux ascendant: deuxième moitié du cycle

Tabl. 2. - Caractéristiques physico-chimiques des eaux du bassin versant d'Ambohitrakoho (*Physico-chemical characteristics of waters in the Ambohitrakoho drainage basin*)

	Température °C	Conductivité µS/cm	pH	O ₂ dissous	Remarques
Eau de surface	23-24	50-60 *			Conductivité sup. à celle de la nappe d'altérite
Sources	18-23	10-15 **	5,6	50-52	Conductivité très basse
Nappe d'alterite		< 40 ***			Conductivité faible
Nappe de socle		100-220 ****			Conductivité assez élevée
<p>Mesures effectuées au cours de: * Etiage 1991 ** Deux étages (1989 et 1991) *** Mois de Mai 1987 (pompage d'essai) **** Mois de Mai 1987 (pompage d'essai) et étage 1991 (forages bas-fond)</p>					

tude moyenne de la SFT est proche de 1300 à 1350 m NGM. Dans les environs immédiats du site, le socle est fracturé suivant des directions N40E, N90E, N130E [Arthaud et *al.*, 1989]. Les fractures sont activées par une distension N-S actuelle.

L'ensemble socle-altérites est sillonné par un ensemble de bas-fonds, dont celui d'Ambohitrakoho, qui correspond à une reprise de l'érosion et du transport en réponse à un abaissement relatif du niveau de base régional. Les bas-fonds se développent aux dépens des altérites et se raccordent à la SFT par des versants convexes ou plans. L'analyse de la géométrie du réseau de bas-fonds et celle des versants montrent que le développement des bas-fonds est guidé par les fractures du socle, surtout si elles sont réactivées par la néotectonique.

Dans le site expérimental d'Ambohitrakoho, le milieu physique est constitué d'un bas-fond à pente très faible dans la partie aval; il est à une altitude moyenne proche de 1250 m NGM et il est encaissé sur environ 1 km dans la SFT qui est à une altitude proche de 1350 m NGM.

Les caractéristiques hydrogéologiques du bassin versant d'Ambohitrakoho : le modèle hydraulique bi-couche

Les études hydrogéologiques menées pendant trois cycles climatiques ont montré que les eaux souterraines sont réparties suivant un modèle d'aquifère bi-couche [Grillot et *al.*, 1988]. Sous les interfluves, se superposent une nappe libre « d'altérites » et une nappe « de socle » semi-captive dans l'unité arènes micacées-socle. L'alimentation de la nappe des altérites est réalisée par l'impluvium local (interfluves), celle de la nappe de socle par un impluvium discontinu et régional (affleurement du socle fissuré). Les deux nappes ont des comportements piézométriques différents mais des échanges hydriques peuvent exister suivant l'évolution spatio-temporelle de la piézométrie. Les bas-fonds rizicultivés sont alimentés en partie en eau par des lignes de suintements et de sources à l'intersection du versant et du bas-fond.

Le modèle « Ambohitrakoho » peut être illustré par la figure 1 et caractérisé par les données du tableau I.

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux du bassin versant d'Ambohitrakoho

Les paramètres physico-chimiques caractéristiques du modèle conceptuel de bas-fond de « type Ambohitrakoho » ont été mesurés au cours de plusieurs cycles hydrologiques. Les mesures ont été effectuées

dans la rivière pour les eaux de surface et au niveau des sources ou des forages pour les eaux souterraines.

Les caractéristiques physico-chimiques des différentes eaux sont reportées dans le tableau II. La différence entre les valeurs de la conductivité électrique des eaux du système aquifère est bien marquée. Ce paramètre physico-chimique dépend de la minéralisation de l'eau par des ions du milieu qu'elle traverse. Cette caractéristique permet de l'utiliser comme marqueur de l'origine et/ou du temps de séjour dans le réservoir aquifère des eaux souterraines car elle est en accord avec les données isotopiques (^{18}O - ^2H) acquises au cours des mêmes périodes [Grillot et *al.*, 1990].

Données hydrogéologiques sur le bassin versant de Mahitsy

Le bassin d'Ambohitrakoho a bénéficié d'études suivies et détaillées et il constitue désormais un type de fonctionnement qui peut servir de référence pour des études à des échelles plus petites. Néanmoins, avant d'en arriver à ce stade des recherches, il convient de tester la représentativité de ce bassin en le situant par rapport à son environnement immédiat, et tout d'abord à des bas-fonds appartenant à un même bassin versant. C'est dans ce but que l'étude du bassin versant de Mahitsy (BVM) a été entreprise.

En ce qui concerne l'aspect hydrogéologique, les premières questions posées sont :

- i) - Existe-t-il d'autres bas-fonds de type Ambohitrakoho et si oui quelle est leur répartition dans le BVM ?
- ii) - Existe-t-il des bassins versants d'un autre type et si oui comment les caractériser ?
- iii) - Quelles sont les relations entre les différents types ?
- iv) - Peut-on définir un type Mahitsy qui décrive l'ensemble de ces types et de leur relation ?

Nous proposons ici des éléments de réponse aux deux premières questions qui sont les préliminaires des deux autres. Ces éléments reposent sur une campagne de recherche pendant la période d'étiage du bassin (1991), au cours de laquelle ont été étudiées :

— 5 stations de piézomètres installées dans le bas-fond de façon à atteindre le socle sain ;

— les lignes de sources de deux bassins versants inclus dans le BVM mais situés dans des contextes géomorphologiques différents.

Parallèlement, une étude géomorphologique et tectonique du BVM a été entreprise pour préciser les caractéristiques du milieu physique.

Description sommaire du milieu physique du bassin versant de Mahitsy

Le bassin versant de Mahitsy (BVM) est constitué par un réseau très dense de bas-fonds affluents de trois vallées principales E-W, se jetant elles-mêmes dans la Maniandro. L'ensemble représente un réseau hydrographique récent qui se développe à partir du seuil de l'Ikopa situé en aval du confluent, à 1250 m NGM d'altitude environ.

Du point de vue des reliefs et de la morphologie, le BVM présente des aspects extrêmement variés car la morphologie résulte de l'interférence entre plusieurs facteurs, principalement : le jeu néotectonique de failles de rejets variés, l'importance variable des mouvements verticaux, l'érosion différentielle des granites plus résistants que les gneiss. Trois zones morphologiques peuvent cependant être distinguées : au nord, une zone d'escarpement très raide bordée par une vallée subrectiligne et plus au sud par une zone centrale constituée par une série de crêtes E-W séparées et recoupées par des vallons relativement étroits. Enfin les parties sud et est du bassin où la SFT est peu modifiée, correspondent à une zone à reliefs médiocres sillonnée de quelques crêtes (reliefs résiduels ou escarpement tectonique, fig. 2).

Le bassin versant de Mahitsy est le siège d'une tectonique en distension N-S récente à actuelle. Cette

néofracturation est à l'origine d'un système de failles normales orientées surtout E-W à N110E. Celles-ci compartimentent le socle et sa couverture altéritique, modifient l'altitude de l'interface des aquifères, guident le développement des bas-fonds. Dans les zones où la tectonique est la plus active, une certaine variabilité de la géométrie des aquifères ainsi que celle des écoulements est donc à envisager. C'est pourquoi un test sur les caractéristiques physico-chimiques a été entrepris sur les eaux de sources situées dans le bassin versant d'un bas-fond qui s'est développé au pied d'un escarpement de faille.

Etude d'un cas réel : le bassin versant d'Antangirika

Il s'agit d'un petit bassin de 2,7 km² environ, à la partie amont de la rivière Andakana. Il est localisé à la limite entre une zone où la SFT est à l'altitude de 1300 m NGM environ et un escarpement d'origine tectonique E-W correspondant à un rejet vertical de l'ordre de 100 m.

Ce bassin versant a été cartographié à l'échelle du 1/7 500 et même dans certains cas à une échelle plus grande (1/4 000). En même temps, les sources ont été inventoriées et caractérisées par certains paramètres physico-chimiques. Cinq sources ont été étudiées plus en détail, étant jugées représentatives de différents types d'exutoire.

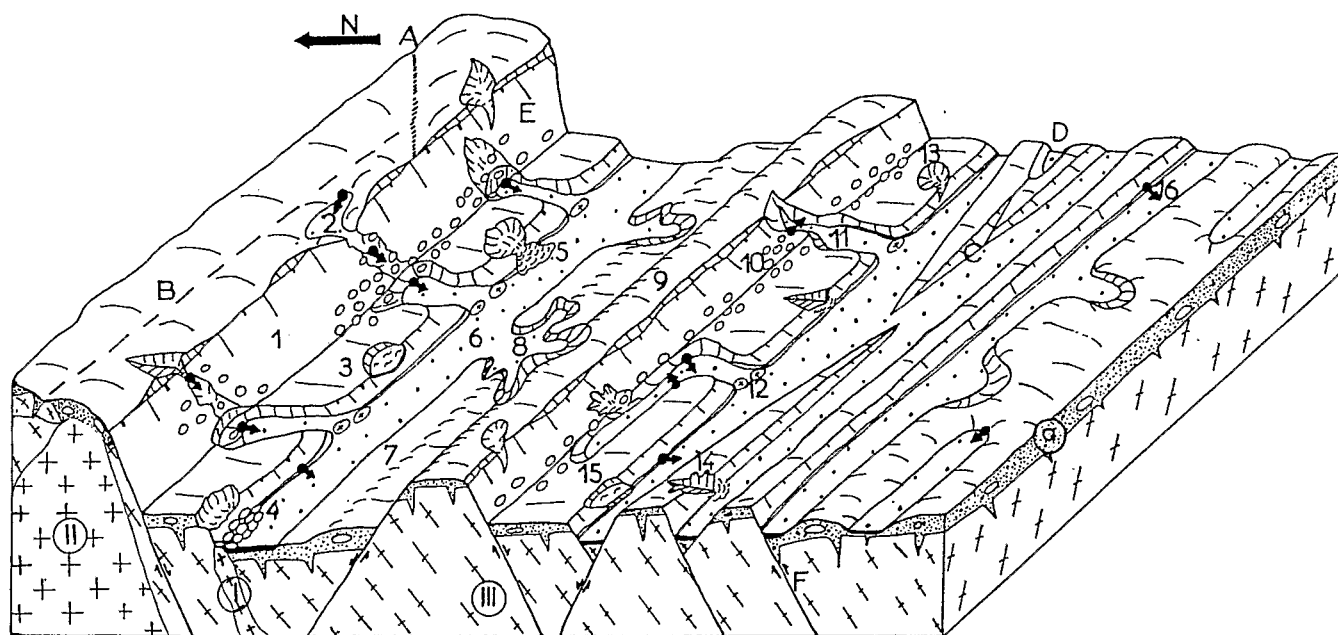


Fig. 2. - Différentes unités morphotectoniques du bassin versant de Mahitsy (Morphotectonic units of the Mahitsy drainage basin) 1, escarpement de faille; 2, thalweg; 3, SFT; 4, accumulation de boules; 5, coulées boueuses; 6, bas-fond alluvial; 7, terrasse; 8, bas-fond en doigt de gant; 9, relief résiduel; 10, éboulis; 11, bas-fond de transit; 12, filon rocheux; 13, lavakas; 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

Le contexte physique

Dans le bassin versant d'Antangirika, quatre zones peuvent être distinguées (fig. 3).

- au nord : le relief résiduel est bordé dans sa partie sud par un escarpement de faille avec éboulis, zones de fluage et lavakas.
- au centre du bassin : la SFT est recoupée par une série de bas-fonds de transit, d'orientation N-S, souvent bordés par des terrasses discontinues et des zones de fluage en bas de versant de raccordement ; les bas-fonds sont limités par un seuil rocheux dans leur partie aval ;
- plus au sud : le bas-fond principal (bas-fond de transit jusque dans sa partie aval) est bordé au nord par un escarpement de faille, au sud par une terrasse qui passe à une zone de fluage et/ou au versant de raccordement ; le bas-fond est barré dans sa partie aval par un seuil rocheux d'orientation NW-SE (même direction que le bas-fond) ;
- au sud : la SFT dont l'altitude est d'environ 1300 m NGM est bordée à l'ouest par un relief résiduel.

Localisation des sources

Sur le bassin versant d'Antangirika, bien que 31 venues d'eau ont été reconnues, 12 points d'eau seulement ont permis de faire des mesures de façon satisfaisante. La localisation de ces 12 sources est portée sur la figure 3.

La position de quelques sources dans différentes unités géomorphologiques est schématiquement représentée sur la figure 2.

Les données physico-chimiques

Le résultat des mesures physico-chimiques de terrain effectuées sur les 12 points d'eau est reporté dans le tableau 3. Les mesures ont été réalisées en fin d'étiage. Dans ce tableau, le classement des sources est effectué suivant les unités géomorphologiques auxquelles elles appartiennent et leur éloignement par rapport aux failles E-W.

Une deuxième campagne de mesures a été réalisée en début de recharge de l'aquifère, sur 4 des 5 sources jugées représentatives (2, 3, 4, 5 et 8) de différents types d'exutoire. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

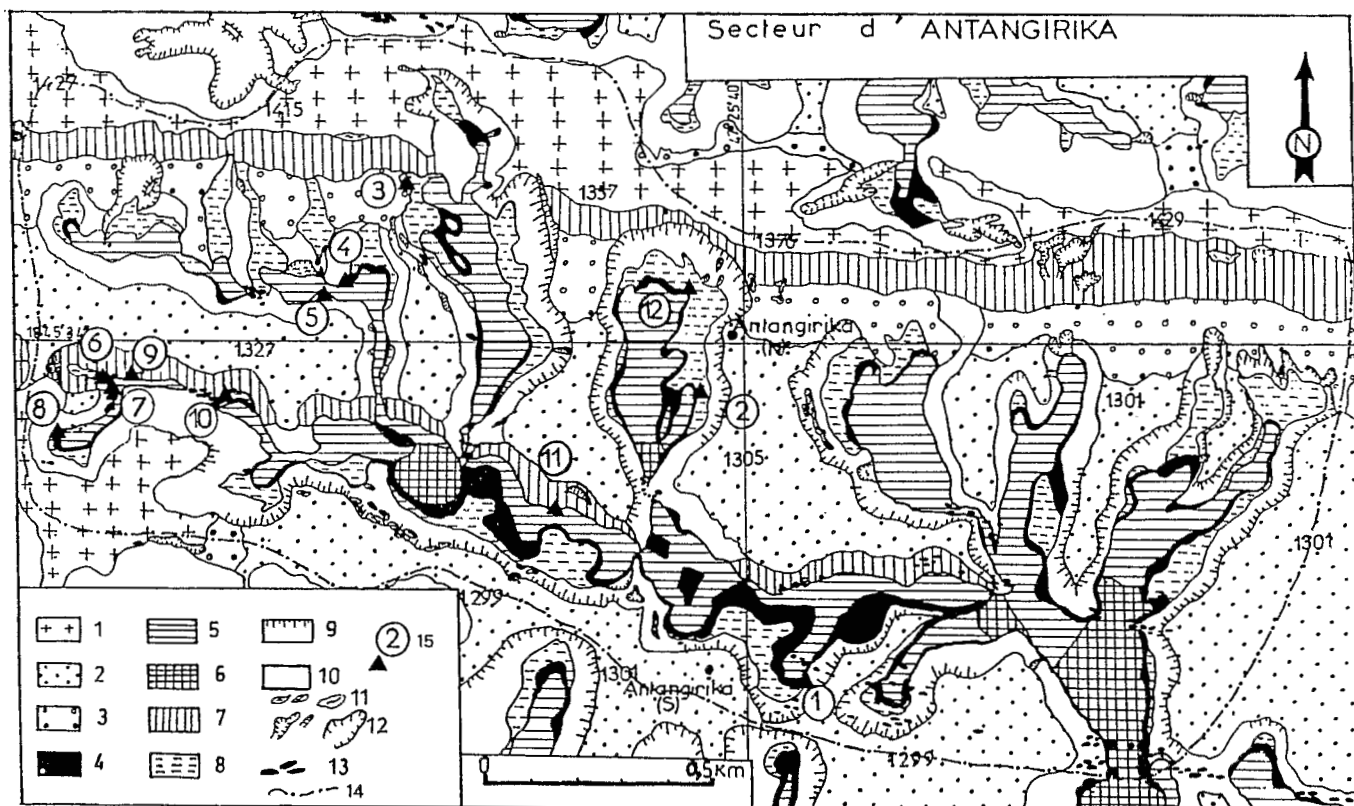


Fig. 3. - Contexte géologique et localisation des sources sur le bassin versant d'Antangirika (Geological setting and location of springs in the Antangirika drainage) 1, relief résiduel ; 2, surface fini-tertiaire ; 3, zone d'éboulis ; 4, terrasse ; 5, bas-fond de transit ; 6, bas-fond alluvial ; 7, escarpement de faille ; 8, zone de suffosion-fluage ; 9, versant soliflué ; 10, versant de raccordement ; 11, glissement de terrain ; 12, lavaka ; 13, filon granitique ; 14, limite du bassin versant ; 15, source

CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE DE BASSINS VERSANTS

 Tabl. 3. - Caractéristiques physico-chimiques des eaux des sources du bassin versant d'Antangirika (*Physico-chemical characteristics of spring waters in the Antangirika drainage basin*)

Les sources sont classées suivant leur éloignement aux failles E-W du secteur étudié

Type de source	Unité géomorphologique	N°	Date	Température T°C	Conductivité C:µS/cm	pH	
F							
A N	Source équipée	Eboulis	3	14/10/91	20	29,4	6,04
I O	Suintement	Sous terrasse en aval zone de fluage	12	16/10/91	20	33,3	5,49
L R	Emergence	Bas de versant de raccordement sur terrasse	4	14/10/91	21	55,0	5,58
L D	Emergence	Bas de versant de raccordement	5	14/10/91	21	30,0	5,73
E	Suintement	Bas de versant de raccordement avec zone de fluage	2	14/10/91	20	59,4	5,50
F	Emergence	Bas escarpement de faille	11	16/10/91	18	55,5	5,48
A	Suintement	Dans escarpement de faille	10	16/10/91	21	34,6	4,36
I S	Suintement	Dans escarpement de faille	9	16/10/91	20	30,6	5,30
L U	Suintement	Bas de versant de raccordement	6	16/10/91	20	28,0	5,05
L D	Suintement	Bas de versant de raccordement	7	16/10/91	20	31,0	4,90
E	Emergence	Sous terrasse en aval zone de fluage	8	16/10/91	18	37,0	5,10
	Emergence	Bas de versant de raccordement	1	14/10/91	22	26,6	6,40

 Tabl. 4. - Caractéristiques physico-chimiques des sources représentatives du bassin versant d'Antangirika. (*Physico-chemical characteristics of representative springs in the Antangirika drainage basin*)

N°	Date	Température T°C	Température de l'air T°C	Conductivité C:µS/cm	pH	O ₂ Dissous %	O ₂ mg/l
2	4/12/91	20,5	28	54,6	5,70	65	5,0
3	4/12/91	19,8	28	28,8	5,70	67	5,3
4	4/12/91	20,1	28	38,5	5,80	83	6,3
5	4/12/91	21,9	28	33,0	5,61	82	6,2

Interprétation des résultats et discussion

Dans un premier stade, 9 sources (n°s 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11) ont été différenciées d'après des critères géomorphologiques comme étant des exutoires de la nappe des altérites. Dans un deuxième stade, il s'agissait de caractériser l'eau de ces sources par un paramètre physico-chimique caractéristique et d'en définir la valeur type.

Compte tenu des résultats obtenus sur le site expérimental d'Ambohitrakoho, le paramètre retenu a été la conductivité électrique. La valeur la plus fréquente se situe entre 30 et 40 µS.cm⁻¹ (sources n°s 1, 5, 6, 7, 8, 9). Cette valeur est prise comme caractéristique des eaux des sources alimentées par la nappe d'altérite en période d'étiage, sur le bassin d'Antangirika. Elle est plus élevée que celle mesurée sur les sources du site expérimental d'Ambohitrakoho (moyenne de 10 µS.cm⁻¹). Pour tenter d'expliquer ceci, plusieurs hypothèses peuvent être avancées :

- l'influence de la nappe de socle dans le bassin d'Antangirika est plus importante que dans le secteur d'Ambohitrakoho (épaisseur de la nappe des altérites plus faible, interface argileux séparant les deux nappes moins développée et/ou remontée de l'eau du socle au niveau des fractures) ;
- l'hydrolyse chimique des migmatites (à l'origine des altérites) est moins poussée que dans le secteur d'Ambohitrakoho.

Le résultat des mesures effectuées lors de la deuxième campagne sur la source n° 5 montre que la valeur de la conductivité électrique reste sensiblement constante après la recharge de l'aquifère pour ce type d'exutoire.

La valeur de la conductivité de l'eau mesurée à l'étiage au niveau des sources n° 2, 4 et 11 est de l'ordre de 55 µS.cm⁻¹. Cette valeur met en évidence le phénomène de mélange (déjà décrit dans le « mo-

dèle Ambohitrakoho») entre l'eau des nappes des altérites et du socle. L'interprétation des résultats des mesures de la conductivité de l'eau réalisées en début de recharge au niveau de ces sources permet de décrire les relations hydrauliques existant entre les deux nappes. Deux cas de figure peuvent se rencontrer :

- dans un premier cas, après la recharge de l'aquifère, les caractéristiques physico-chimiques de la nappe d'altérites redeviennent prépondérantes (source n° 4) ;
- dans un deuxième cas, l'influence des caractéristiques de l'eau du socle reste prédominante (source n° 2).

Le premier type de source (n° 4) est l'exutoire de la nappe des altérites qui, en fin d'étiage, est en partie alimentée par la nappe du socle. Ce mécanisme a déjà été décrit dans le « modèle Ambohitrakoho ». Le deuxième type de source (n°s 2 et 11) est l'exutoire d'une nappe d'altérites de faible épaisseur où le socle est proche de la surface.

Deux sources (n°s 3 et 12), situées dans des éboulis, montrent des valeurs de conductivité de l'ordre de 30 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Cette valeur reste sensiblement constante après la recharge de l'aquifère. Ce type d'exutoire n'avait pas encore été identifié sur le bassin versant de Mahitsy.

Les caractéristiques hydrogéologiques du bassin versant d'Antangirika

La répartition des eaux souterraines, suivant le modèle hydraulique bi-couche (nappes d'altérites et de socle) défini précédemment sur le site expéri-

mental d'Ambohitrakoho, reste vraie sur le secteur d'Antangirika. Dans le mécanisme des relations hydrauliques du système aquifère, l'importance de l'influence de la nappe de socle en période d'étiage est bien marquée.

Une troisième nappe dite « d'éboulis » a été identifiée.

Les caractéristiques hydrogéologiques du bassin versant d'Antangirika sont reportées dans le tableau 6.

Cas d'un escarpement de faille : la bordure nord du bassin versant de Mahitsy-Secteur d'Ankadifotsy

L'escarpement de faille du secteur d'Ankadifotsy est situé en rive droite de la rivière « Maniandro » en limite nord du bassin versant de Mahitsy. Ce secteur, d'une superficie de 6,4 km², a été cartographié à l'échelle du 1/25 000 lors de l'étude sur l'ensemble du bassin. Les points d'eau ont été inventoriés et 12 sources ont été caractérisées par certains paramètres physico-chimiques.

Le contexte physique

La succession des entités géomorphologiques du sud au nord du secteur d'Ankadifotsy (fig. 4) est la suivante :

- le bas-fond principal d'altitude 1250 m NGM qui est drainé par la rivière ;
- ce bas-fond est bordé au nord par un escarpement de faille de rejet vertical apparent d'environ 30 m :

Tabl. 5. - Caractéristiques physico-chimiques des eaux des sources du secteur d'Ankadifotsy (*Physico-chemical characteristics of spring waters in the Anfadifotsy area*) Les sources sont classées suivant leur éloignement à la faille E-W du secteur étudié

	Type de source	unité géomorphologique	N°	Date	Température T°C	Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH
F	Emergence	Dans éboulis, au pied d'un escarpement	8	18/11/91	21,8	41,9	5,31
A	Emergence	Sous éboulis et zone de lavakas	6	12/11/91	18,0	41,5	6,00
I	Emergence	Sous éboulis	5	12/11/91	19,1	37,9	6,60
L	Emergence	Sous éboulis	4	12/11/91	19,9	45,5	6,00
L	Suintement	Sous escarpement, dans altérites	3	12/11/91	17,8	27,3	6,33
E	Emergence	Sous terrasse	9	18/11/91	19,6	40,0	5,32
	Emergence	Sous éboulis avec zone de fluage	10	19/11/91	20,8	53,6	6,21
N	Emergence	Sous éboulis, en bas de versant	12	19/11/91	20,4	38,1	6,13
O	Emergence	Dans escarpement, sous un rocher en place	11	19/11/91	19,1	40,6	6,07
R	Emergence	Bas de versant	1	12/11/91	20,0	44,0	6,10
D	Suintement	Bas de versant dans altérites	2	12/11/91	20,0	28,8	5,80
	Emergence	Dans un thalweg (lavaka?)	7	18/11/91	20,0	46,4	6,24

- puis la SFT d'altitude 1285 m NGM environ, qui est recoupée par des bas-fonds de transit de direction N-S et affectés par des lavakas :
- cette surface d'aplanissement est bordée au nord par un escarpement de faille de rejet vertical apparent d'environ 150 m avec éboulis et lavakas ;
- au nord du secteur, une surface d'aplanissement d'altitude 1435 m NGM environ qui est affectée par des lavakas.

Localisation des sources

Dans le secteur d'Ankadifotsy, 89 points d'eau ont été inventoriés : 34 sources et venues d'eau sous éboulis (18 à proximité de l'escarpement) : 3 puits ; 52 bacs creusés dans les altérites.

Douze sources seulement ont rempli de façon satisfaisante les conditions de mesure des paramètres physico-chimiques. La localisation de ces sources est indiquée sur la figure 4 et les unités géomorphologiques sont précisées dans le tableau 5.

Les données physico-chimiques

Les résultats des mesures des paramètres physico-chimiques réalisées sur les 12 sources sont reportés dans le tableau 5. Les mesures ont été réalisées en fin d'étiage. Dans ce tableau, un classement des sources a été réalisé en fonction des unités géomorphologiques auxquelles elles appartiennent et de leur éloignement par rapport à la faille E-W.

Interprétation des résultats et discussion

D'après des critères géomorphologiques, les sources n^{os} 2 et 3 du secteur d'Ankadifotsy sont des exutoires de la nappe des altérites. La valeur de la conductivité de l'eau est de l'ordre de 30 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (équivalente à celle du bassin d'Antangirika).

La valeur de la conductivité mesurée au niveau des autres sources de ce secteur se situe entre 40 et 50 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Elle met en évidence le phénomène de mélange des eaux des nappes d'altérites et de socle.

Compte tenu du contexte géomorphologique, ces sources pourraient être l'exutoire de la nappe de socle. La valeur de la conductivité inférieure à celle caractéristique de ce type d'exutoire peut s'expliquer de la façon suivante : la proximité d'une zone de réalimentation de la nappe (relief au nord) et des exutoires (sources) a pour conséquence de diminuer le temps de séjour des eaux souterraines dans le réservoir ; il en résulte une minéralisation de ces eaux moins poussée que pour celles qui auraient séjourné plus longtemps en contact avec le socle.

Les valeurs de la conductivité des sources situées en aval des éboulis (n^{os} 4, 5, 6, 8, 10, 12) sont semblables à celles obtenues à l'exutoire précédemment décrit. Ces points d'eau ne sont pas les exutoires de la nappe des éboulis.

Les caractéristiques hydrogéologiques du secteur d'Ankadifotsy

Le modèle hydraulique bi-couche reste vrai pour le secteur d'Ankadifotsy.

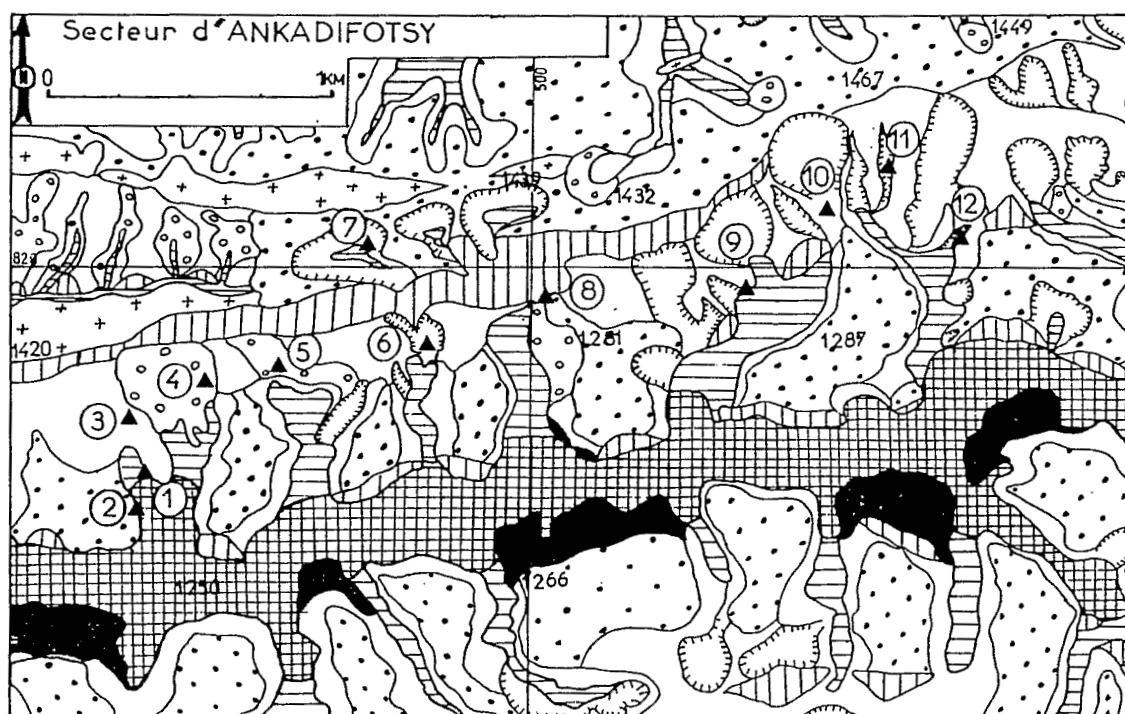


Fig. 4. - Contexte géologique et localisation des sources sur le secteur d'Ankadifotsy. (Geological setting and location of springs in the Ankadifotsy)

Voir figure 3 pour la légende des figurés

Tabl. 6. - Caractérisation des différents types de domaines hydrogéologiques du bassin versant de Mahitsy (*Characteristics of the different types of hydrogeological domain in the Mahitsy drainage basin*)

Type	"Modèle" correspondant	Les conditions morphotectoniques	Les conditions hydrogéologiques	Conductivité mesurée aux sources		
				Exutoire	Conductivité $\mu\text{S/cm}$	N° sources
I	Ambohitrakoho	Bas-fond contrôlé par une faille à faible rejet $r < 30\text{m}$	Nappe libre d'altérite bien développée	Altérites	15	S4, S9
		Orientation dominante des failles NW - SE	Nappe de socle n'intervenant qu'occasionnellement			
II	Antangirika	Bas-fond contrôlé par une faille à rejet moyen $30\text{ m} < r < 100\text{ m}$	Nappe libre d'altérite moyennement développée	Altérites dominantes	30-40	1, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11
			Nappe de socle intervenant	Altérites-Socle	étaillage: 55 après recharge: 30-40	4
		Socle dominant		55	2	
		Nappe d'éboullis	Eboullis	30	3, 12	
III	Ankadifotsy	Bas-fond contrôlé par une faille à fort rejet $r > 100\text{m}$	Nappe libre d'altérite peu développée	Altérites dominantes	30	2, 3
		Orientation dominante des failles E - W	Nappe de socle intervenant beaucoup	Altérites-socle Eboullis	40-50	4, 5, 6, 8, 12 1, 7, 9, 10, 11
IV		Bas-fond non contrôlé par une faille récente ou actuelle	Nappe libre d'altérite bien développée Nappe de socle intervient peu			

La faille E-W joue un rôle dans les échanges hydriques entre les deux nappes.

L'importance du phénomène de mélange des eaux est la caractéristique typique de ce secteur.

Les caractéristiques hydrogéologiques du secteur d'Ankadifotsy sont reportées dans le tableau 6.

Les domaines hydrogéologiques du bassin versant de Mahitsy

L'étude morphotectonique des paramètres physico-chimiques met donc en évidence différents domaines hydrogéologiques sur le bassin versant de Mahitsy. Ces domaines correspondant à diverses conditions de mélange des eaux souterraines étroitement contrôlées par des facteurs morphotectoniques.

Trois types de domaines hydrogéologiques ont ainsi été définis: Ambohitrakoho, Antangirika et Ankadifotsy. Un quatrième type de domaine complète cette typologie.

Définitions des domaines hydrogéologiques

Les différents types de domaines hydrogéologiques ont été individualisés essentiellement d'après des facteurs tectoniques. Ainsi, pour les trois premiers types, la géométrie du réservoir aquifère et les conditions de mélange des eaux souterraines et de surface sont contrôlées par la présence de failles récentes à actuelles. L'importance du rejet et l'orientation dominante de ces failles varient suivant les différents types de domaines. Ces derniers sont définis par des paramètres physico-chimiques et hydrodynamiques (type I) mesurés sur le terrain (tabl. 6).

Un quatrième type présente des conditions morphotectoniques très différentes de celles rencontrées

sur les domaines II et III. Certaines analogies avec celles du type I apparaissent toutefois, notamment le développement de la couverture altéritique et la profondeur du socle. Ceci permet d'établir une similitude des conditions hydrogéologiques entre les domaines de types I et IV. Mais la différence réside dans le fait que la zone IV n'est pas affectée par la néotectonique (distension N-S). Sur ce domaine, les paramètres physico-chimiques et hydrodynamiques n'ont pas encore été mesurés.

Répartition des différents domaines sur le bassin versant de Mahitsy

Les domaines hydrogéologiques du bassin versant de Mahitsy ont été délimités en fonction des différents types précédemment définis. Le critère de délimitation choisi est l'appartenance d'un ensemble de bas-fonds aux mêmes conditions morphotectoniques.

Les limites des domaines hydrogéologiques sont reportées sur la figure 5.

Discussion et perspectives

Une analyse rapide de la carte de répartition des domaines hydrogéologiques (fig. 5) conduit à faire

quelques commentaires. Les domaines sont orientés E-W, ce qui correspond à l'orientation des entités morphotectoniques du bassin. L'intensité des mouvements verticaux est croissante du sud au nord et la succession IV, I, II, III des différents types de domaines hydrogéologiques suit cette logique.

Le domaine de type I se répète plusieurs fois sur le bassin. Il semble être un type intermédiaire entre deux autres domaines hydrogéologiques. Il est possible que les caractéristiques physico-chimiques des domaines I varient légèrement du sud au nord du bassin de Mahitsy car l'altitude de l'interface altérites-socle augmente. Ces remarques peuvent s'avérer utiles lors du changement d'échelle et de l'étude de la représentativité du site expérimental.

En ce qui concerne la définition des domaines hydrogéologiques, deux observations peuvent être faites. D'une part, certaines venues d'eau diffuses n'ont pu être exploitées comme point de mesure, notamment dans la partie nord du bassin d'Antangirika. Ce manque de données a peut-être sensiblement modifié la compréhension du fonctionnement de l'aquifère qui s'appuie sur l'interprétation des valeurs des seuls points d'eau mesurables. D'autre part, les mesures ont été effectuées à l'étiage. Cet état de l'aquifère permet de mettre en évidence les éventuelles remontées d'eau de la nappe du socle, ce

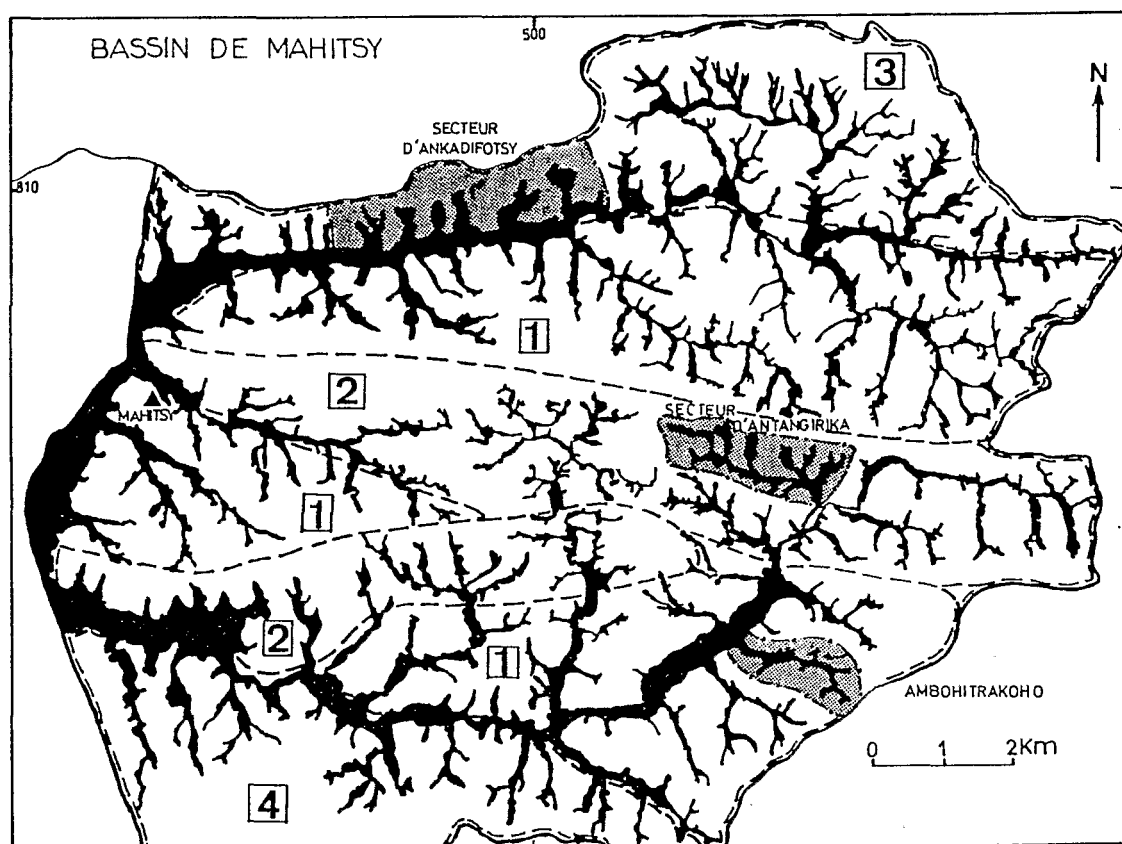


Fig. 5. - Les domaines hydrogéologiques du bassin versant de Mahitsy (Hydrogeological domains of the Mahitsy drainage basin)
 1 à 4: les différents types de domaines définis dans le tableau 6: zone hachurée: zone de définition du domaine: en noir: tracé des bas-fonds

qui facilite la définition du type de domaine hydrogéologique. Dans un deuxième stade de cette étude, il sera intéressant de réaliser des mesures en période de crue afin d'affiner la modélisation du fonctionnement de l'aquifère. Ces mesures seront effectuées mensuellement sur une douzaine de sources de l'ensemble du bassin versant de Mahitsy (en cours).

L'extrapolation cartographique des différentes zones d'étude (zones pointillées, fig. 5) à chaque domaine hydrogéologique correspondant repose sur l'appartenance de tous les points de ce domaine à un même contexte morphotectonique. Cette approche préliminaire doit conduire dans un deuxième stade de l'étude à la vérification de la délimitation des différents domaines sur l'ensemble du bassin versant de Mahitsy. C'est pourquoi, l'inventaire des sources sera étendu à tout le bassin. Ceci afin d'analyser leurs positions dans les différentes unités géomorphologiques et de vérifier par la mesure de quelques paramètres physico-chimiques simples que l'eau de ces sources a bien les caractéristiques propres au domaine préalablement défini. En ce sens, des analyses chimiques sur quelques ions majeurs choisis en raison de la nature pétrographique du socle (essentiellement gneissique, migmatitique et granitique) sont actuellement menées en parallèle.

Conclusion

En domaine de socle altéré à fort contraste morphologique, comme c'est le cas sur les Hautes Terres de Madagascar, l'étude préliminaire réalisée sur les sources propres au niveau altéritique permet de caractériser des domaines hydrogéologiques identifiables par certains paramètres physico-chimiques. La définition de ces domaines est une méthode d'approche qui s'avère donc prometteuse. Elle permet de tester la représentativité d'un bassin témoin à l'intérieur d'un système considéré à plus petite échelle. Ainsi à Madagascar, le bassin expérimental d'Ambohitrakoho (1,3 km²) ne peut être jugé représentatif de l'ensemble du bassin de Mahitsy (117 km²) mais comme une structure appartenant à un domaine hydrogéologique comprenant un ensemble de bas-fonds. Il en résulte que d'une part l'analyse de la répartition et des relations des différents domaines hydrogéologiques et d'autre part celle de la répétitivité du bassin témoin dans un plus grand ensemble permettent de déboucher sur une définition de la structure et du fonctionnement hydraulique des unités de bas-fonds-interfluves à l'échelle régionale, voire à celle de l'ensemble des Hautes Terres.

Références bibliographiques

- ARTHAUD F., GRILLOT J.C., DUSSARRAT B. (1991). - Rôle des facteurs tectoniques et géomorphologiques dans l'organisation des systèmes de bas-fonds rizicoles (exemples des Hauts Plateaux de Madagascar). *Séminaire international Bas-fond et riziculture*. Antananarivo, décembre 1991.
- ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M. (1989). - Contrôle néotectonique des directions de drainage sur les Hauts Plateaux de Madagascar. - *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 308 (2), pp. 527-530.
- ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M. (1989). - Mise en évidence d'une néotectonique en distension N-S à Madagascar (Hauts Plateaux). - *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 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. *J. Can. Earth Sci. Ottawa Canada*, 27, pp. 1391-1407.
- GRILLOT J.C. (1989). - Analyse de l'estimation des débits souterrains en domaine altéritique (Hauts Plateaux de Madagascar). - *J. Afr. Earth Sci.*, vol. XIII, n° 1, pp. 51-55.
- GRILLOT J.C. (1990). - Caractéristiques d'émergences en milieu altéritique d'altitude: leur apport à la compréhension de l'aquifère bi-couche arènes-socle (Hauts Plateaux de Madagascar). *C.R. Acad. Sci., Paris*, t. 311 (2), pp. 227-232.
- GRILLOT J.C. (1992). - Régime des eaux souterraines en milieu cristallin altéré: un exemple en zone intertropicale humide d'altitude (Madagascar). *Hydrological Sci. J.*, 37, 2, (4), pp. 105-117.
- GRILLOT J.C., BLAVOUX B., RAKOTONDRAINIBE J.H., RAUNET M., RANDRIANARISOA N. (1987). - A propos des aquifères d'altérites sur les Hauts Plateaux cristallophylliens de Madagascar. - *C.R. Acad. Sci., Paris*, t. 305 (2), pp. 1471-1476.
- 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., BLAVOUX B., RAUNET M. (1990). - Recharge des aquifères de socle en zone intertropicale d'altitude: exemple de Madagascar. *Geodinamica Acta.*, Paris, 4, 4, pp. 227-235.
- 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*, t. 313 (2), pp. 959-964.
- GRILLOT J.C., DUSSARRAT B. (1992). - Hydraulique des unités d'interfluves et bas-fond tourbeux: un exemple en zone de socle altéré Madagascar. *J. of Hydrology*, 135, pp. 321-340.
- GRILLOT J.C., FERRY L. (1990). - Approche des échanges surface-souterrain en milieu cristallin altéré. *Cab. de l'ORSTOM, Sér. Hydrol. cont.*, vol. X, n° 1, pp. 3-12.
- GRILLOT J.C., RAUNET M. (1988). - Aquifère d'arènes granitiques sous recouvrement argilo-limoneux et organique (Hauts Plateaux cristallophylliens de Madagascar). - *C.R. Acad. Sci., Paris*, t. 306 (2), pp. 611-614.
- 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.
- RAUNET M. (1985). - Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar: *Géomorphologie, géochimie, pédologie, hydrologie, z. Géomorph. N.F., Suppl. Bd 52*, mars 1985, pp. 25-52.
- RAUNET M. (1986). - Environnements physiques et aménagements des terroirs rizicoles sur les Hautes Terres de Madagascar. *In collection « Document Systèmes agraires »*, n° 6-1986, t. II, pp. 489-503.
- RAUNET M. - Séminaire Intern. « Bas-fond et riziculture, Tananarivo (Madagascar), 9-15 décembre 1991 (sous-pression).