Bas-fonds et riziculture

CIRAD

ORSTOM

Actes
du séminaire
d'Antananarivo
Madagascar
9-14 décembre
1991

Bas-fonds et riziculture
Antananarivo, 9-14 décembre 1991
CIRAD, 1993

Modélisation des écoulements souterrains entre interfluves et bas-fonds rizicoles : cas d'un bassin versant élémentaire des hauts plateaux malgaches

A. DURBEC [1], C. DUBAR [1], J.C. GRILLOT [2], M. RAUNET [3]

Résumé — Le bassin versant d'Ambohitrakoho fait l'objet d'un suivi métrologique depuis plusieurs années, dans le cadre d'un programme de collaboration franco-malgache inscrit dans l'action thématique « Bilans en eaux » du CNRS. Les données partielles sont examinées pour apprécier les modalités du fonctionnement hydrique des différents compartiments du système complexe formé du socle granitique faillé, de matériaux altéritiques, de sables lavés et de matériaux d'origine anthropique, liés à l'exploitation rizicole du bas-fond. Le rôle de ces grands compartiments est apprécié grâce à une modélisation numérique des écoulements souterrains basée sur un schéma conceptuel en plans multicouche. On propose d'étudier le rôle spécifique de l'horizon sableux lavé présent dans le bas-fond au moyen d'un second modèle, en plan vertical, pour préciser la distribution verticale des flux échangés entre l'eau superficielle et l'eau souterraine. Des tests de sensibilité sont conduits et un éventail de mesures complémentaires *in situ* est proposé pour améliorer le calage des modèles qui, dans leur état actuel, restent trop approximatifs pour être appliqués à la gestion du bassin.

Mots-clés : échanges eaux superficielles-eaux souterraines, modélisation numérique, rizière, bas-fond, Madagascar.

Introduction

Ce travail de modélisation s'inscrit dans la deuxième partie d'un programme de recherche initié par le CNRS en 1986. Les investigations conduites dans le cadre « PIREN » ont donné lieu à une action thématique programmée (ATP) intitulée « Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar ». Les organismes associés dans ces investigations sont, du côté malgache, le Centre national de recherche sur l'environnement (CNRE) et la Direction de l'eau du ministère de l'Industrie, de l'Energie et des Mines, et, du côté français, l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), le Centre national de la recherche scientifique (CNRS, URA 1359) et, depuis 1991, le Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (CEMAGREF).

[1] CEMAGREF, Division hydrologie-hydraulique, 3, quai Chauveau, 69336 Lyon Cedex 09, France.

[2] Université des sciences et techniques, Laboratoire d'hydrologie et URA CNRS 1359, 34095 Montpellier Cedex 5, France.

[3] CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 01, France.

On rencontre deux types fondamentaux de milieux agricoles sur les hauts plateaux de Madagascar :

– les bas-fonds, où l'on pratique la riziculture aquatique systématique ;

– les versants ou « tanety » à sols ferrallitiques très appauvris, encore faiblement cultivés en cultures sèches (manioc, haricot, taro...).

L'enjeu des recherches entreprises est important puisqu'il s'agit, par la compréhension du fonctionnement de ces systèmes, de proposer des améliorations de gestion pour une meilleure valorisation des terroirs. Les objectifs généraux du programme actuel, sur quatre bassins emboîtés, sont :

– la typologie et la structuration spatiale des bas-fonds et interfluves ;

– la compréhension des « fonctionnements » ;

– la définition des conditions d'extrapolation.

Précisons, pour ce qui concerne le travail présenté ici, qu'on entend essentiellement par « fonctionnement » le circuit des eaux (entrées, transits, sorties) lors des échanges entre les unités structurales. Dans le cadre de l'approche pluridisciplinaire qui fonde ce programme, ces connaissances seront exploitées pour l'interprétation de la distribution de la qualité physico-chimique des eaux, ainsi que pour la définition d'une série de recommandations opération-

nelles de gestion. On analysera en particulier les contraintes hydriques que subissent les sols de différente nature, pour adapter les pratiques culturales à un calendrier optimal de gestion de l'eau, laquelle sera facilitée par la définition de petits aménagements.

Les données exploitées sont extraites des rapports édités à l'occasion des comptes rendus annuels PIREN (1987, 1988, 1989) ainsi que des différentes publications scientifiques produites par les équipes impliquées. Des données récentes concernant le bilan hydrologique du bassin d'Ambohitrakoho ne nous sont pas parvenues en raison de difficultés conjoncturelles apparues en 1991 à Madagascar ; elles seront donc examinées ultérieurement pour conforter les hypothèses adoptées au stade de cette synthèse préliminaire.

Le bassin d'Ambohitrakoho

Description générale

Le bassin étudié (138 ha) est le plus petit des quatre bassins emboîtés, objets du programme général. Situés aux alentours de Mahitsy, à 35 km de la capitale, ces unités appartiennent au système du Maniandro, affluent de rive droite de l'Ikopa. La « maille » d'Ambohitrakoho couvre 138 ha et, comme le montre la figure 1, elle est représentative de cette région de vallées et bas-fonds rizicultivés des hautes terres malgaches.

La structure géomorphologique de ce bassin est décrite par GRILLOT et RAUNET (1988), et son incidence sur les écoulements est abordée par ARTHAUD *et al.* (1989). Nous retiendrons les éléments fondamentaux suivants dans le cadre de cette présentation volontairement succinte.

Le bas-fond proprement dit, aménagé en rizières aquatiques, est le siège d'écoulements pérennes, à la surface, dus à la lente vidange de l'horizon aquifère altéritique libre des interfluves et au ruissellement sur ces mêmes interfluves pentus. Ces écoulements ont lieu sur un niveau anthropique d'argiles limoneuses rapportées des terrasses quaternaires adjacentes. Ils sont souterrains dans le complexe sables lavés-arènes grenues-socle (figure 2) et drainent l'horizon aquifère profond semi-captif siégeant sous les inter-fluves.

Les matériaux du plateau ondulé se distinguent du bas-fond qui s'y encastre de 20 à 30 m. Un épais manteau d'altérites (20 m sous les interfluves) est coiffé de sols ferrallitiques et couvre le socle précambrien composé de roches fortement métamorphiques. Les sommets de ces interfluves se situent autour de 1 300 m d'altitude alors que le bas-fond rizicultivé s'étale entre 1 260 et 1 271 m.

Schéma conceptuel du fonctionnement hydrologique

Les échanges hydriques entre les différents compartiments du domaine étudié sont naturellement complexes et très fluctuants dans le temps. L'originalité de ce système réside dans trois éléments présentés sous la forme du schéma conceptuel de la figure 3 (RAUNET, 1991, communication personnelle).

En premier lieu, le socle ou plutôt le complexe « altérites + socle ». GRILLOT *et al.* (1989) constatent que sa mise en charge est très déphasée par rapport aux pluies. Pour le cycle 1987-1988, le déphasage est de l'ordre de 90 jours. On peut avancer que la crue des piézomètres des interfluves (F1 à F10) correspond au début de la mise en charge du socle. Les zones d'alimentation directe du milieu fissuré doivent être recherchées en dehors des limites du site. La similitude des écarts piézométriques entre ces forages (GRILLOT *et al.*, 1990) va dans le sens d'interactions hydrauliques qui tendent à équilibrer les pressions entre les deux aquifères, au moins en phase de recharge ascendante. Par ailleurs, l'hétérogénéité des teneurs isotopiques dans le système bicouche altérites-socle est provoquée par le bedrock cristallin (GRILLOT, 1990). Ainsi, il est très probable que le milieu aquifère que représente le socle provoque des mélanges d'eau entre les deux réservoirs superposés dans des proportions variables d'une part spatialement, selon les pressions respectives de chacun d'eux, d'autre part dans le temps, en fonction de leurs débits respectifs. Ceci laisse prévoir une alimentation non uniforme à l'échelle du bassin.

En second lieu, l'existence dans le bas-fond d'un horizon de sables lavés « pincé » entre le complexe argile colluvio-anthropique-tourbes et les altérites permet d'augurer de relations complexes régies par des phénomènes de drainance tantôt ascendante, tantôt descendante entre ces trois niveaux. L'alternance de ce mode de fonctionnement est vérifiée par les suivis piézométriques réalisés sur certains doublets, comme l'illustre la figure 4 pour le cas du P4.

Enfin, la ligne de sourcins qui longe le périmètre du bas-fond, dans son axe principal comme dans ses diverticules, représente la troisième originalité. Cette ligne de sourcins apparaît au lieu où les dépressions ramifiées du bas-fond entaillent les matériaux altéritiques. GRILLOT (1990) décrit l'intérêt de ces émergences pour la compréhension des écoulements dans les matériaux d'altération et de l'hydrodynamique du socle fissuré.

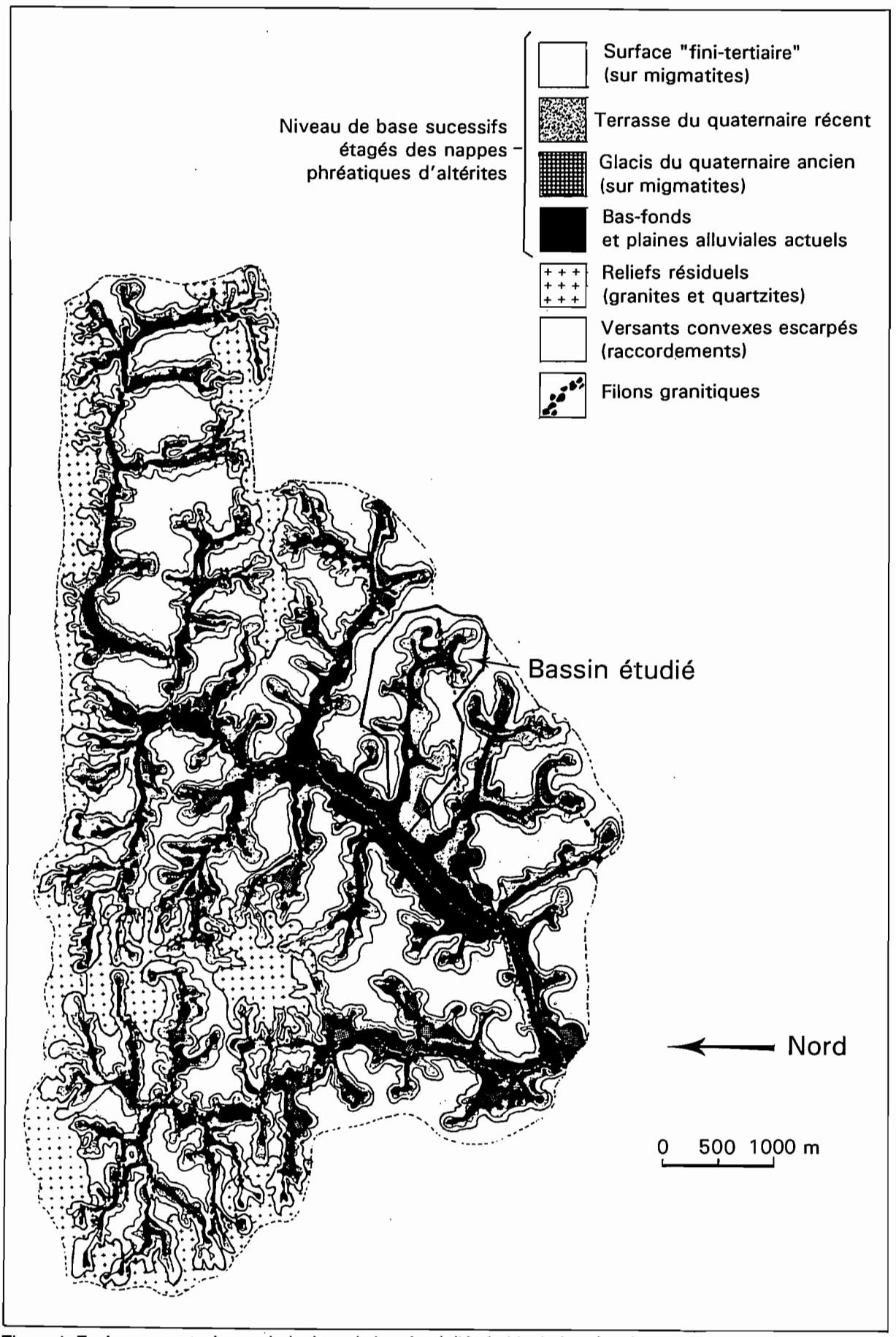


Figure 1. Environnement géomorphologique du bas-fond d'Ambohitrakoho (d'après RAUNET, 1987).

Objectifs de la modélisation

La modélisation entreprise a pour objectif global l'identification de la recharge des différents compartiments aquifères, à savoir les sables lavés et la nappe des altérites. Le bilan de leur fonctionnement devra être précisé sur un cycle hydrologique en pratiquant une analyse de sensibilité au zonage retenu et aux différentes conditions aux limites. On s'attachera en particulier à préciser le rôle de la couche des sables lavés dans le bas-fond par la quantification des drainances verticales.

Dans le cadre de cette présentation préliminaire, nous montrons que le choix d'une schématisation multicouche (rizières inondées de surface sur sables lavés sur altérites sur socle) permet de reproduire la configuration de la piézométrie de façon acceptable. Un premier zonage de l'alimentation par le socle en régime permanent non pluvieux est proposé. On examine également l'alternance amont-aval du sens des échanges verticaux.

De nombreuses données hydrométéorologiques n'étant pas disponibles pour des raisons conjoncturelles, nous avons choisi de sélectionner, au vu des chroniques piézométriques, un épisode correspondant à un régime stabilisé en l'absence de pluie. La première quinzaine de mai 1988 a ainsi été retenue pour le calage du régime permanent (figure 5). Un modèle exprimant d'une manière synthétique la qualité et la densité des données qui ont servi à son élaboration, le fait de disposer de la piézométrie des interfluves en mai 1988 et de la piézométrie du bas-fond en 1989 nous incite à considérer les premiers résultats seulement du point de vue des modalités de fonctionnement, beaucoup plus que comme des éléments de gestion du bassin d'Ambohitrakoho.

Modélisation numérique des écoulements souterrains

Le modèle mis en œuvre

Le modèle utilisé, WATASI, est conceptuel, déterministe et basé sur l'application des lois fondamentales de la mécanique des fluides à l'écoulement de l'eau en milieu poreux (loi de Darcy et hypothèse de Dupuit). Ce modèle numérique utilisant la méthode des éléments finis permet de représenter les écoulements monophasiques dans des aquifères superposés, chacune des nappes étant indifféremment libre ou captive ; la connexion avec un réseau hydrographique de surface est possible (CHASTAN *et al.*, 1985). Enfin, le régime de la nappe peut être permanent ou transitoire. Le domaine spatial étudié est discrétisé en mailles carrées de taille variable.

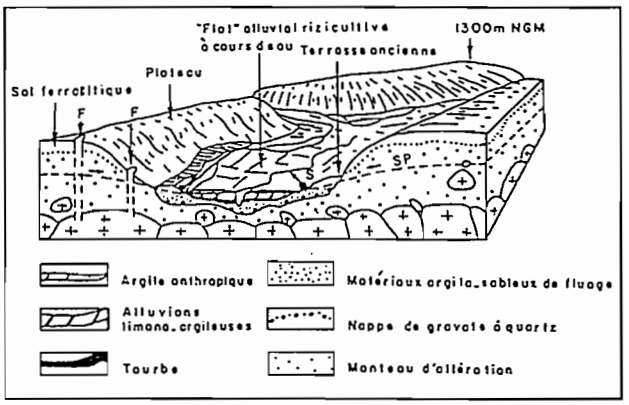


Figure 2. Structure morphopédologique type d'un bas-fond (d'après GRILLOT *et al.*, 1990).

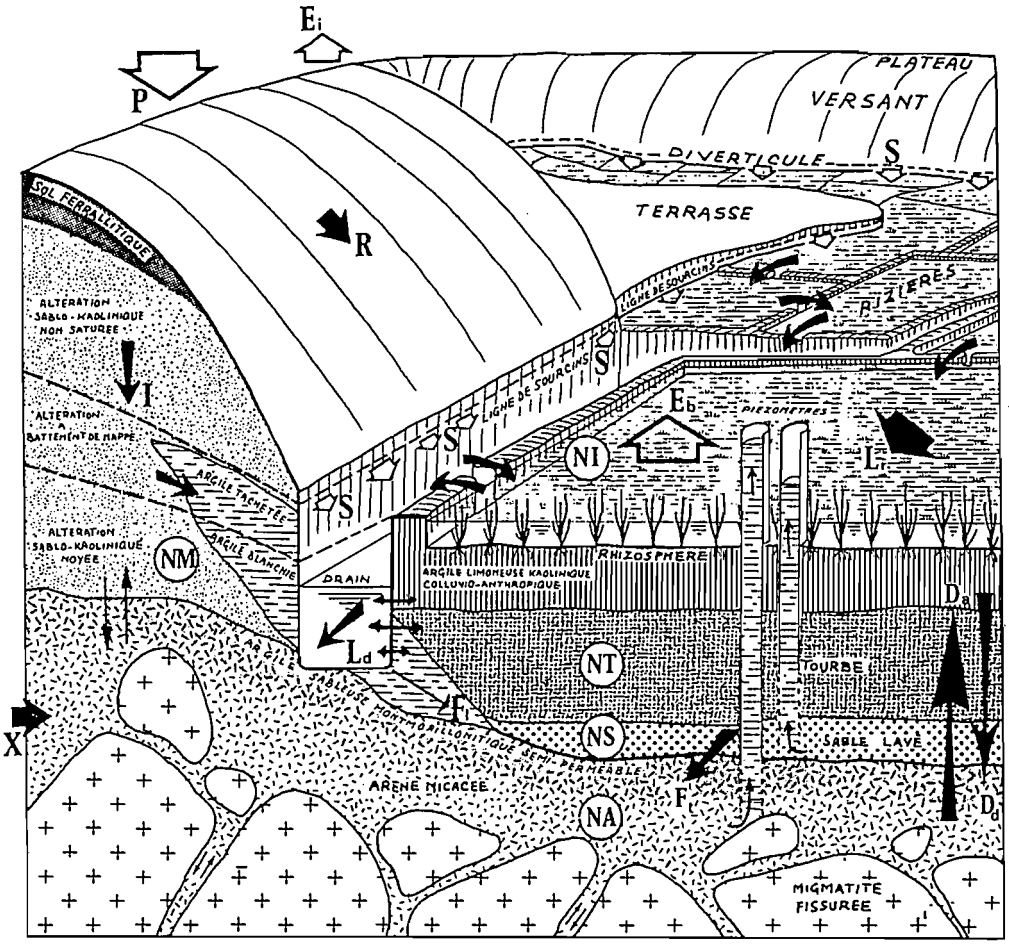
La discrétisation spatiale

La superposition de trois couches de mailles de type gigogne schématise le bassin, totalisant 1 622 éléments. Dans le bas-fond, 409 mailles représentent les rizières de surface parfaitement superposées aux 409 éléments qui se rapportent à la nappe des sables lavés. La figure 6 illustre cette partition de l'unité de 138 ha et situe les piézomètres d'observation. La maille élémentaire a 25 m de côté. La crête externe du bassin est traitée à priori comme une limite à flux nul, mais permet de prendre en compte des échanges latéraux avec les unités voisines ; le niveau d'eau maintenu dans les rizières joue le rôle de limite à potentiel imposé sur la première couche. Nous considérons que la topographie disponible (1/2 500) augmentée de 30 cm définit correctement cette limite. Les drains de ceinture sont schématisés par une limite à drainage libre sur tout le périmètre de la première couche. Enfin, la ligne de sourcins, lieu où l'aquifère libre des altérites émerge au-dessus du bas-fond, est prise en compte par une recharge négative de suintement des mailles concernées de la troisième couche.

La géométrie des niveaux aquifères est extrapolée de la description des 10 forages situés dans les interfluves et des huit doublets du bas-fond. La puissance aquifère des altérites est comprise entre 2 et 35 m, les sables lavés ont 40 cm d'épaisseur. L'éponte comprise entre ces sables et les altérites est en moyenne de 5 cm. Le toit du niveau sableux définit ainsi une épaisseur locale d'éponte variable sous le matériau colluvio-anthropique des rizières.

Les caractéristiques hydrodynamiques (GRILLOT, 1991)

Nous nous limitons à un régime permanent, les coefficients de porosité ou d'emmagasinement ne sont donc pas mentionnés dans ce paragraphe.



NAPPES
NA = Nappe arène-socle
NM = Nappe d'altérites
NI = Nappe d'inondation des rizières
NT = Nappe de la tourbe
NS = Nappe des sables lavés

FLUX
P = Pluie
R = Ruissellement sur interfluves
I = Infiltration
S = Suintements de la ligne de sourcins
Ld = Lame d'écoulement des drains
Lr = Lame d'écoulement des rizières
Ft = Inféro-flux total longitudinal
Fl = Inféro-flux latéral
Da = Drainance ascendante
Dd = Drainance descendante
Ei = Evapotranspiration des interfluves
Eb = Evapotranspiration du bas-fond
X = Alimentation extérieure au bassin local

Figure 3. Modelé, matériaux et fonctionnement hydrologique du bas-fond d'Ambohitrakoho (d'après RAUNET *et al.*, comm. pers.).

❑ Les conductivités hydrauliques

Le matériau altéritique est réputé sensiblement homogène. Les perméabilités horizontales mesurées *in situ* sont faibles. Nous retenons une distribution homogène à $7 \cdot 10^{-7}$ m s^{-1}.

La perméabilité des sables lavés a été mesurée uniquement en laboratoire. Les résultats varient entre 1,5 et $2 \cdot 10^{-5}$ m s^{-1}. Nous retenons dans un premier temps la valeur de 10^{-5} m s^{-1}.

❑ Les drainances

Entre les altérites et les sables, les drainances sont initialisées à $2,5 \cdot 10^{-8}$ m s^{-1}, sur l'ensemble de la couche. Les différenciations et les transitions

Figure 4. Relation entre la nappe des altérites et la nappe des sables au niveau du P4 d'août à novembre 1989.

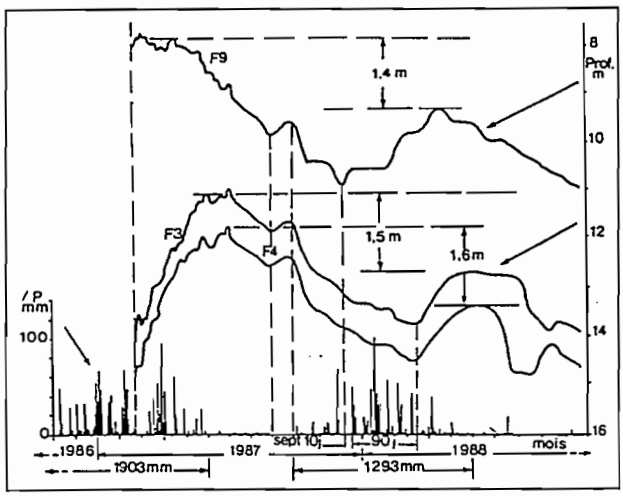


Figure 5. Corrélations pluvio-piézométriques dans les forages implantés sur les interfluves (d'après GRILLOT *et al.*, 1990).

longitudinales caractérisées dans les matériaux du bas-fond nous conduisent à affecter une distribution plus nuancée du coeffient de drainance entre couche de surface et sables : à l'amont des diverticules 10^{-7} m s^{-1}, en présence de tourbe fibreuse, 5 . 10^{-7} m s^{-1} sous les limons tourbeux et 10^{-6} m s^{-1} sous les limons organiques.

Discussion du régime permanent de mai 1988

Nous avons insisté plus haut sur le choix de cette période, compte tenu des données disponibles. Classiquement, le but du calage en régime permanent est d'ajuster les valeurs de perméabilité pour aboutir à la représentation la plus proche de la réalité observée, en supposant l'ensemble des débits entrants et sortants parfaitement connus. Nous ne sommes pas dans cette situation idéale et notre démarche consiste plutôt à évaluer l'ordre de grandeur des recharges positives ou négatives du

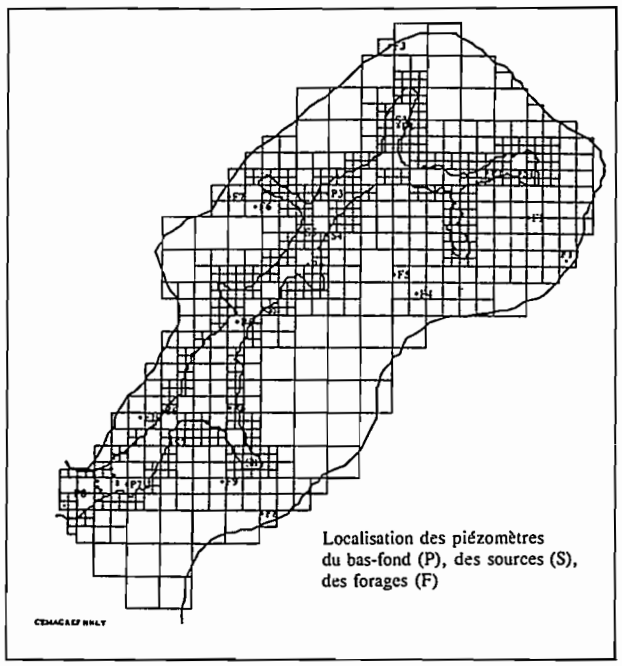


Figure 6. Bas-fond d'Ambohitrakoho et maillage.

système pour obtenir une piézométrie acceptable, en partant du principe que la distribution des conductivités est connue (ANDRIEUX *et al.*, 1990). Deux hypothèses de calage sont testées :

– hypothèse 1 : aucune modification des perméabilités n'est autorisée, la recharge est le paramètre de calage (socle, échanges latéraux éventuels) ;

– hypothèse 2 : l'unité étudiée est indépendante des unités voisines, seule l'alimentation par le socle est susceptible de soutenir ce régime permanent post-pluvial de mai 1988.

Les débits des sourcins sont distribués sur le périmètre du bas-fond en extrapolant les données concernant deux d'entre eux (GRILLOT, 1990). La figure 7 contient les valeurs retenues qui sont utilisées pour les deux hypothèses. Les zones d'affectation respectives sont montrées en figure 8.

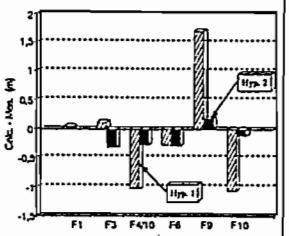
❑ Discussion de l'hypothèse 1

La recharge imposée par le socle fissuré ne peut pas être répartie uniformément. Il s'avère que la zone amont est le siège d'apports significativement plus importants que la zone médiane et que la zone aval. Le rôle des filons granitiques a été testé ; l'augmentation de leur apport est immédiatement compensée par un drainage plus important de la couche de surface. Si la piézométrie des altérites est par endroit acceptable, les points F4, F9 et F10 sont très mal restitués (figure 7). Conformément au schéma conceptuel commenté plus haut, des recharges latérales sont envisagées : positives pour la proximité de F4 et F10, négatives pour F9. Les ordres de grandeur testés ne sont pas acceptables pour

Régime permanent de mai 1988 :

Représentation des interfluves :

St.	mesures	calcul hyp 1	- mesure hyp 2
F1	1288,6	0,05	-0,01
F3	1278,0	0,11	-0,33
F4/10	1282,0	-1,03	-0,26
F6	1273,2	-0,28	-0,30
F9	1263,6	1,70	0,19
F10	1261,3	-1.06	-0.11



Situation du bas-fond :

Calculs de mai 1988				Obs.mai 89
St.	Sables	Alt.	sens	sens
P1	1268,39	1267,82	Sa -> Al	Sa -> Al
P3	1262,87	1263,00	Al -> Sa	Al -> Sa
P4	1261,63	1261,72	Al -> Sa	Al -> Sa
P5	1260,32	1260,42	Al -> Sa	Al -> Sa
P6	1260,27	1260,35	Al -> Sa	Al -> Sa
P7	1259,30	1259,35	Al -> Sa	Al -> Sa
P8	1259,24	1259,22	Sa -> Al	Sa -> Al

Zonage des sourcins :

Zones	mailles	hyp 2 m3/s
A	30	-6,7E-06
B	26	-7,7E-06
C	29	-6.9E-06
D1	9	-1.7E-06
D2	16	-3.0E-06
E	18	-8.3E-06
F	12	-8.3E-06
G1	31	-4.0E-06
G2	16	-2.7E-06
H	17	-2.9E-06

Figure 7. Comparaison des deux hypothèses de calcul.

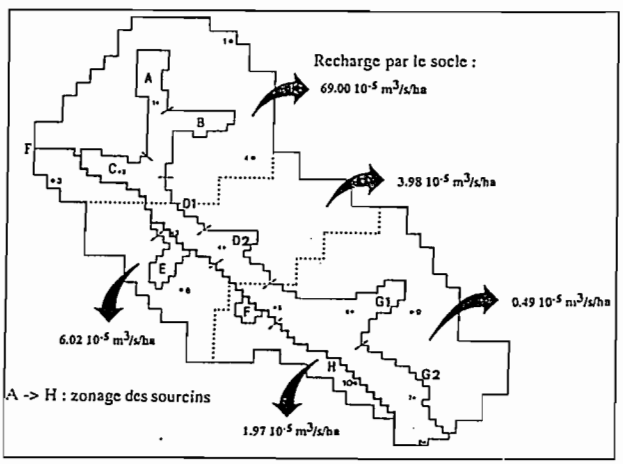


Figure 8. Partition du domaine étudié.

corriger l'écart supérieur à 10 m obtenu en F4. La piézométrie dans le bas-fond est assez mal restituée, mais dans tous les cas un ajustement des coefficients de drainance ne permet évidemment pas non plus de corriger l'écart en F4. La piézométrie obtenue est présentée pour mémoire en figure 9 a.

Nous sommes donc conduits à abandonner cette hypothèse de calcul et à conforter pour la période de calage le choix des crêtes d'interfluves comme limite de bassin versant.

❑ Discussion de l'hypothèse 2

Les recharges latérales sont abandonnées et nous procédons à des ajustements locaux des conductivités hydrauliques sur les interfluves. Le rôle du socle dans l'alimentation se confirme, seule la ligne de sourcins G1-G2 est augmentée. La figure 7 illustre le gain de représentativité obtenu par rapport à l'hypothèse 1. Les écarts entre les piézométries calculées et mesurées sont tout à fait acceptables dans les conditions actuelles de calage. La figure 9 b présente la meilleure configuration piézométrique obtenue dans les interfluves. La distribution retenue pour les conductivités (figure 10) est dans une gamme très acceptable. La zone sud présenterait un gradient positif vers l'aval, la zone nord serait homogène.

Cette partition peut-elle être rapprochée de l'existence d'une faille en limite nord du bas-fond ? ARTHAUD *et al.* (1990) ont montré que la tectonique cassante récente à Madagascar a une incidence sur les écoulements.

Pour parvenir à cette piézométrie « finale » restituant le régime de mai 1988, la recharge par le socle est ajustée en tenant compte d'un gradient négatif vers l'aval et en respectant la dualité Nord-Sud liée à l'existence de la faille F (figure 8).

Quelle est la situation dans le bas-fond ?

Une difficulté non négligeable résulte du fait que la piézométrie de 1988 n'est pas connue dans le bas-fond. Nous avons néanmoins tenté une comparaison avec les mesures effectuées en 1989 à la même période. Pour obtenir des résultats acceptables, les drainances entre sables lavés et altérites doivent à leur tour être ajustées. Les valeurs initiales se révèlent trop fortes. Lorsque le coefficient de drainance varie entre $2{,}5 \cdot 10^{-7}$ et $2{,}5 \cdot 10^{-9}$ m s^{-1}, la piézométrie est localement influencée, mais les interfluves fluctuent de quelques décimètres. Le maximum de cette fluctuation se rencontre dans la zone médiane. Le meilleur calage est obtenu pour $2{,}5 \cdot 10^{-9}$ m s^{-1} en zone amont et $0{,}5 \cdot 10^{-9}$m s^{-1} en zone aval (figure 7). La séparation se situe entre P4 et P5.

Sans aller jusqu'à la quantification des échanges, nous représentons en figure 11, sous forme de maillages renseignés, le sens et l'intensité des échanges entre les trois couches. Ces indications constituent les premiers éléments de description du « fonctionnement » que nous évoquions dans l'introduction.

Représentation des flux en plan vertical

Sous-domaine représenté

La présence de sables lavés dont les conductivités sont très sensiblement plus élevées que celles des matériaux d'altération susjacents laisse prévoir un rôle très particulier à cet horizon préférentiellement drainant. La figure 11 met en évidence un diverticule du bas-fond au sein duquel se réalise une alternance amont-aval du sens des échanges entre les couches. Nous avons choisi ce sous-domaine pour mettre en œuvre un second modèle, dans le plan vertical.

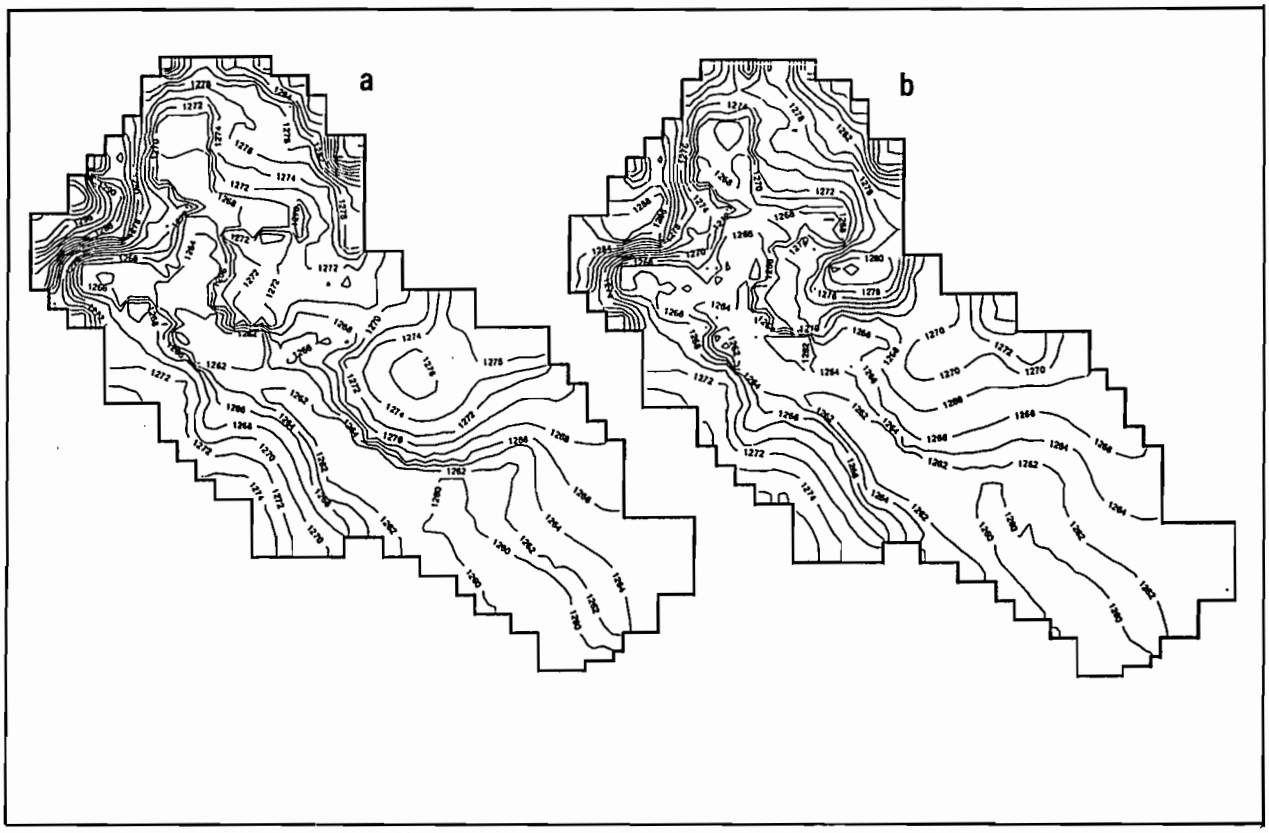


Figure 9. Piézométries calculées. a. Hypothèse 1. b. Hypothèse 2.

Egalement conceptuel et déterministe, ce second modèle diffère du précédent par la méthode de discrétisation spatiale adoptée.

La piézométrie calculée (figure 9 b) indique qu'un prisme vertical centré sur le bas-fond est bordé par deux plans de courant ; des échanges latéraux ne sont donc pas à craindre et cette approche est de ce fait fondée (figure 12 a). La partition du système, faite aux éléments finis, compte 104 mailles triangulaires dont 48 représentent les sables, 76 les altérites et 48 les tourbes (figure 12 b), pour un domaine de 300 m de longueur et d'épaisseur comprise entre 5 et 10 m.

Conditions aux limites

Ce sont :

– la partie supérieure rizicultivée comme une limite à potentiel affectée d'un coefficient d'échange ;

– la partie inférieure comme limite à flux imposé (recharge par le socle) ;

– les bordures verticales, calculables, où les échanges avec les altérites de l'interfluve peuvent être pris en compte.

Les caractéristiques hydrodynamiques retenues reflètent les contrastes mesurés par Grillot *et al.* (1991) entre les perméabilités horizontales et verticales dans les sables et dans l'horizon tourbeux.

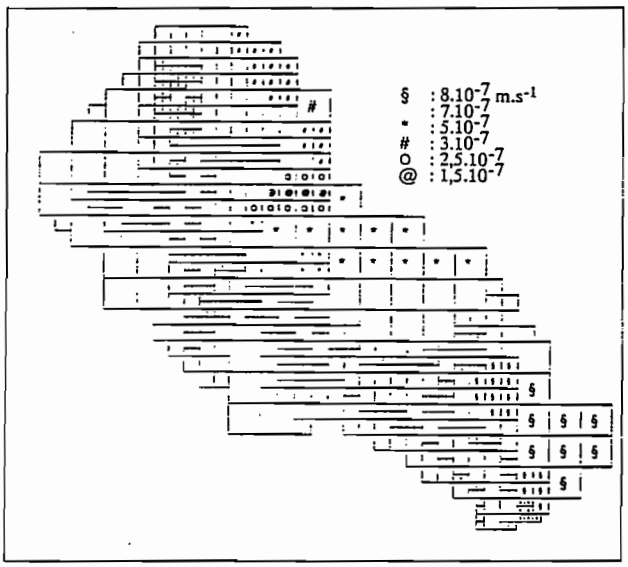


Figure 10. Carte de répartition des conductivités (nappe des altérites).

Les altérites posent davantage de problèmes. Les conductivités verticales mesurées au laboratoire nous semblent très surévaluées. Les valeurs testées et retenues pour donner des résultats acceptables se situent dans la gamme de 10^{-6} à 10^{-7} m s^{-1}. Cette schématisation en plan vertical permet donc d'exploiter et de critiquer ces mesures, ce que

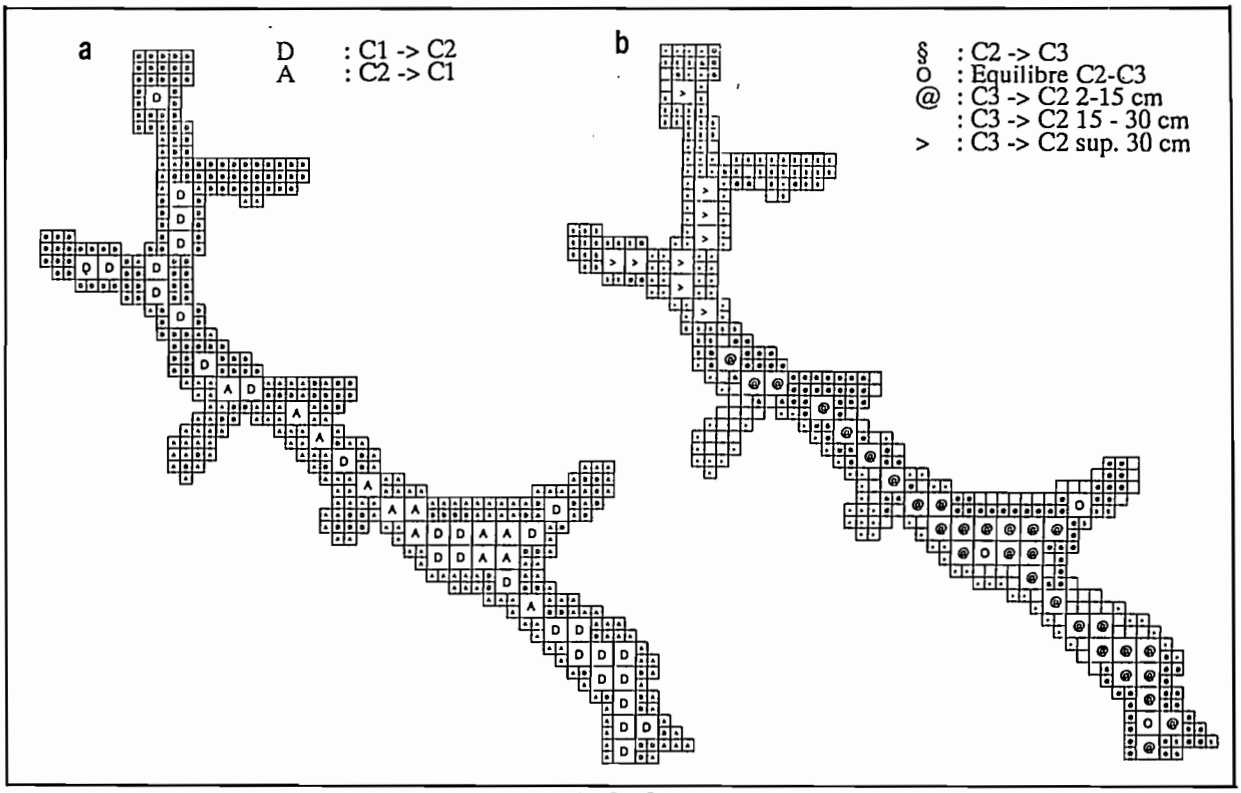


Figure 11. Partition du sens des échanges. a. C1-C2. b. C2-C3.

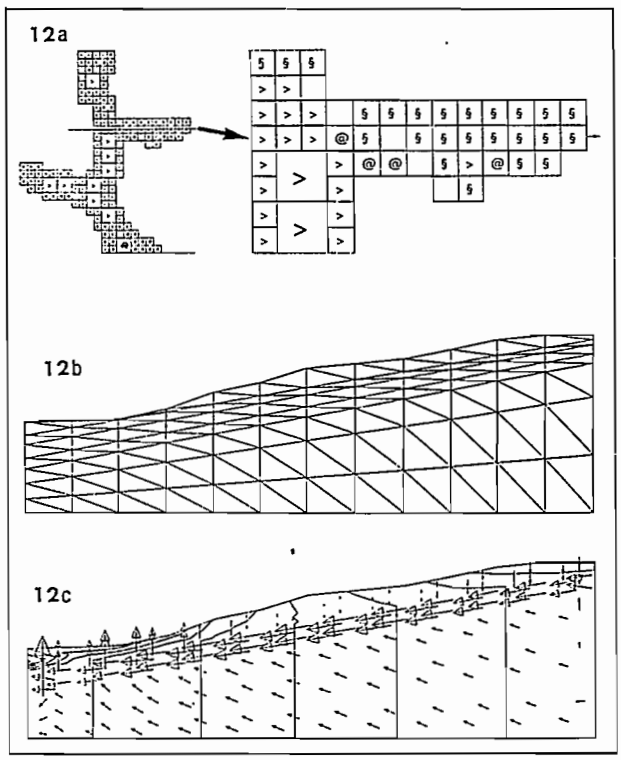


Figure 12. Modélisation en plan vertical.
a. Situations du sous-domaine étudié.
b. Discrétisation spatiale.
c. Champs de vitesse (divisés par 10 dans les sables) et de pression calculés.

n'autorise pas directement le précédent modèle en plans horizontaux multicouche.

Répartition du champ des pressions et des flux

La répartition du champ des pressions calculées est présentée (figure 12 c) sous forme d'un ensemble de courbes isopièzes dans le prisme vertical. On observe en premier lieu que ce modèle permet de rendre compte de l'alternance du sens des échanges entre surface et profondeur dans le diverticule retenu comme support de cette modélisation. La partie amont est drainée par la couche des sables, la partie aval est alimentée. Cette configuration relative des échanges est compatible avec la présentation des résultats du premier modèle multicouche (figure 11). Les valeurs absolues sont acceptables mais les différences de pression entre sables et altérites ne sont pas encore restituées de façon correcte. Cette prémodélisation est prometteuse, les flux (figure 12 c) calculés confirment le rôle particulier de l'horizon sableux. Les vitesses horizontales calculées dans les sables sont de l'ordre de 10^{-3} m j^{-1}, et de 10^{-5} verticalement, alors qu'elles sont respectivement de 10^{-5} et 10^{-6} m j^{-1} dans les altérites. Une meilleure restitution des pressions pourra être obtenue en densifiant le maillage. Dans la schématisation présentée ici, les 48 éléments pour

représenter les sables sont insuffisants. L'évaluation des apports amont par les altérites reste approchée. Un moyen de pallier cette évaluation serait d'élargir le domaine vertical jusqu'à la limite amont des interfluves et de représenter la jonction existante entre les interfluves et le bas-fond.

Conclusion

S'il convient de considérer les résultats présentés ici avec prudence, dès lors que les données exploitées sont partielles, nous insisterons sur le fait que la chaîne des outils numériques de modélisation des écoulements souterrains en liaison avec les eaux superficielles est prête. Les mesures hydrologiques recueillies sur place peuvent désormais être valorisées pour préciser le fonctionnement hydrique du système étudié par les nombreuses équipes scientifiques impliquées dans ce programme de recherche.

Seul un régime permanent a pu servir de base à la mise au point des deux modèles ; l'étape suivante devra comporter une validation sur d'autres périodes stables, et aborder les régimes transitoires sans lesquels la gestion du bassin à des fins opérationnelles ne pourra être ébauchée.

Le schéma d'équipement métrologique actuel est satisfaisant. Les informations concernant les fluctuations de niveau piézométrique dans les doublets du bas-fond sont capitales pour quantifier les échanges par phénomène de drainance entre les horizons superposés. Il est donc très important que ces données soient aquises à l'aide de stations automatiques paramétrées à un pas de temps assez court. L'hypothèse faite dans ce travail sur la prise en compte d'une seule couche de matériaux d'altération serait à nuancer si des doublets opérationnels étaient disponibles dans les interfluves.

Références bibliographiques

ANDRIEUX P., DURBEC A., VOLTZ M., 1990. Identification of recharge in a highly heterogeneous tropical soil system : the old offshore bars in french Guyana. *In :* 14th International Congress of Soil Science, Kyoto, Japan, August 12-18, 1990, vol. 1, p. 196-201.

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, 308, 2 : 527-530.

ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M., 1990. La tectonique cassante récente à Madagascar et son incidence sur les écoulements. Can. J. Earth Sci., 27 : 1394-1407.

CHASTAN B., GAMET R., LEDUC C., RIEU T., 1985. Exemple de gestion des eaux souterraines à l'aide d'un modèle numérique : le système aquifère des sables astiens et des alluvions de l'Hérault. Hydrogéologie, 4 : 279-284.

GRILLOT J.C., 1990. Caractéristiques d'émergences en milieu altéritique d'altitude : leur apport à la compréhension de l'aquifère bicouche arènes-socle. Hauts plateaux de Madagascar. C.R. Acad. Sci., Paris, 311, 2 : 227-232.

GRILLOT J.C., BLAVOUX B., RAKOTONDRAINIBE J.H., RAUNET M., 1989. Dynamique en hautes eaux des aquifères d'altérites sur les hauts plateaux cristallophylliens de Madagascar. J. Afr. Earth Sci., 9 (3-4) : 599-607.

GRILLOT J.C., ENDOLENKO D. de , DUSSARRAT B., 1991. Perméabilités de matériaux reposant sur socle cristallin : un exemple en zone intertropicale. Madagascar. C.R. Acad. Sci., Paris, 313, 2 : 959-964.

GRILLOT J.C., FERRY L., 1990. Approche des échanges surface-souterrain en milieu cristallin altéré aquifère. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. Continent., 5 (1) : 3-12.

GRILLOT J.C., RAUNET M., 1988. Aquifère d'arènes granitiques sous recouvrement argilo-limoneux et organique. Hauts plateaux cristallophylliens, Madagascar. C.R. Acad. Sci., Paris, 306, 2 : 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 : 271-282.

RAUNET M., 1987. Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport PIREN, juin 1987.