

Approche des échanges surface-souterrain en milieu cristallin altéré aquifère

Jean-Claude GRILLOT (1), Luc FERRY (2)

RÉSUMÉ

Sur les hauts plateaux cristallins de Madagascar, un bassin versant rizicole de 130 ha fait actuellement l'objet d'études pluridisciplinaires (bilans hydriques et minéraux, représentativité du système à l'échelle des hautes terres). Ce bassin bénéficie d'un bon équipement hydraulique, ce qui permet d'évaluer avec fiabilité les volumes évacués d'une part en surface et d'autre part venant d'un milieu souterrain bicouche (aquifère libre supérieur dans les altérites argileuses, réservoir semi-captif dans le complexe de base socle fissuré-arènes grenues).

Trois caractéristiques majeures ayant trait aux transferts hydriques entre surface et souterrain se dégagent :

- les écoulements superficiels dépendent dans une large mesure, selon les époques considérées du cycle climatique, du régime des eaux souterraines de l'aquifère libre des altérites (système hydrogéologique limité aux interfluves environnants);
- des infiltrations s'opèrent à travers le recouvrement argileux anthropique du bas-fond, au moins en début de recharge. Elles alimentent (drainance par descensum) la nappe semi-captive sous-jacente (socle-arènes);
- au cours et en fin de recharge, les écoulements de surface sont conjointement soutenus par l'aquifère altéritique local et par la mise en charge retardée (drainance par ascensum) de l'aquifère régional (socle-arènes).

Des exemples numériques pris en saison sèche et au cours d'un cycle pluvieux illustrent ces conclusions. Un modèle physique des modes de transfert hydrique dans le bassin peut dès lors être proposé et une orientation des recherches menées actuellement sur les transferts de masse vers la zone d'enracinement du riz (bilans minéraux du système dans un but agronomique) est suggérée.

MOTS-CLÉS: Echanges surface-souterrain — Aquifère cristallin — Modèle physique de transfert hydrique — Hauts plateaux de Madagascar.

ABSTRACT

SURFACE-SUBSURFACE EXCHANGE IN A CRYSTALLINE AQUIFER

Multi-disciplinary studies (of water and mineral balances and the representativity of the system) are being carried out on a 130 ha rice-growing basin on the crystalline rocks of the High Plateaus of Madagascar. The good hydrometric network permits reliable estimates of surface runoff on the one hand and on the other hand flow from a two-layered sub-surface system (an unconfined aquifer in weathered clay; a semi-confined aquifer in fissured granitic basement).

Three major characteristics of surface-subsurface exchange are found:

- surface flows depend largely, according to the stages of the climate cycle, on the groundwater regime of the unconfined aquifer of the weathered clay (limited to the surrounding interfluves);
- some infiltration occurs through the anthropic clay cover of the lower ground, at least at the start of recharge (vertical drainage to the underlying semi-confined aquifer (sand-basement));
- during and at the end of recharge, surface flows are jointly maintained by the local weathered aquifer and by delayed rising recharge of the regional aquifer (sand-basement).

Some numerical examples during the dry season and during a rainy cycle illustrate these conclusions. A physical model of modes of water transfer in the basin may then be proposed and focussing of present research on mass transfer towards the rooting zone of rice (system mineral balance in a agronomical context) is suggested.

KEY WORDS: Surface-subsurface exchanges — Crystalline aquifer — Physical model of water transfer — High Plateaus of Madagascar.

(1) Laboratoire d'Hydrogéologie, URA CNRS 1359, Université des Sciences et Techniques, Place E. Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5.

(2) ORSTOM, BP 434, Antananarivo, Rep. Démocratique Malgache.

INTRODUCTION

Dans le cycle de l'eau, et sous la plupart des latitudes, l'acquisition des paramètres régissant les écoulements superficiels est actuellement relativement bien maîtrisée. Résultant d'observations et d'expérimentations hydrologiques sur bassins versants placés dans des contextes climatologiques variés, cette maîtrise débouche de plus en plus fréquemment sur l'élaboration de modèles (déterministes, conceptuels, globaux, distribués), qui sont le complément souvent indispensable à l'interprétation du fonctionnement hydraulique des unités étudiées. Mais on sait que l'établissement des bilans hydriques doit parfois prendre en compte les écoulements souterrains, particulièrement lorsqu'une nappe peut influencer sur la quantification et l'étalement dans le temps des débits d'un système. C'est pourquoi, un autre type de modèle, dit couplé, a été proposé (LEDOUX, 1980; GIRARD *et al.*, 1981), qui résulte de la conjonction de deux autres modèles: l'un hydrologique superficiel (GIRARD *et al.*, 1972); l'autre hydrogéologique profond de type multicouche (MARSILY *et al.*, 1978; LEDOUX, 1986).

Cette double conception des écoulements dans un bassin nécessite dès lors l'acquisition de données sur le milieu souterrain. Mais celle-ci n'est pas toujours aisée, et reste dans bien des cas partielle. Concernant par exemple l'hydrodynamique souterraine, les méthodes d'investigation s'appuient sur un équipement hydraulique généralement onéreux (forages, tests par pompages); par ailleurs, le problème de la variabilité spatiale des paramètres acquis (perméabilités, transmissivités, coefficients d'emmagasinement), inhérent aux changements d'échelle d'observations et de mesures, est et reste souvent sous-jacent aux extrapolations nécessaires (passage de données «ponctuelles» à tout un système aquifère).

Une approche récemment effectuée sur les bases de ce double concept, dans un petit bassin versant en domaine de socle altéré (Côte-d'Ivoire), illustre bien ces difficultés (CHEVALLIER, 1988): le calage d'un modèle couplé sur des paramètres hydrodynamiques de la zone noyée mal évalués (ou simplifiés), par manque de moyens d'investigations adaptés, est en partie responsable d'une inadéquation dans la représentation des transferts d'eau (débits d'étiage sur-évalués et ceux des hautes eaux sous-estimés). Autrement dit, l'insuffisance des connaissances sur les mécanismes de l'écoulement souterrain, et a fortiori de celles des échanges entre surface et profondeur, peut peser défavorablement sur la fiabilité du modèle. Mais la démarche reste prometteuse. C'est pourquoi nous avons abordé l'analyse des écoulements superficiels et souterrains de *manière concomitante dans un même bassin*. Nous nous proposons ici d'exposer ces résultats et leur interprétation, en mettant l'accent sur les échanges hydriques entre les deux domaines.

CADRE D'ÉTUDE ET ÉQUIPEMENTS DE MESURES

Cette analyse s'appuie sur la mise en place d'un site expérimental sur les hautes terres de Madagascar. Le bassin versant superficiel, d'une superficie totale d'environ 130 ha (fig. 1) bénéficie d'un équipement hydraulique important adapté tant aux mesures de surface que souterraines.

HYDROLOGIE (fig. 2)

Dans le bas-fond, les écoulements de surface se font au niveau de deux drains latéraux et épisodiquement, en fonction du calendrier des cultures, de rizière en rizière par ouverture de brèches dans les diguettes. Ils ne sont mesurés qu'au niveau d'une seule section située à l'exutoire du bas-fond. Deux diguettes en forme de V ont été construites au niveau de cette section canalisant, en toute période, les écoulements vers deux stations de contrôle (1250109901 et 902, fig. 2), équipées chacune d'un déversoir métallique, d'une échelle limnigraphique (élément de 1 m gradué en mm) et d'un limnigraphe OTT type X (rotation hebdomadaire, réduction 1/10).

Concernant les mesures pluviométriques et d'évaporation, le bassin est équipé de trois pluviographes «Précis Mécaniques» (station n° 250300, 301, 302, fig. 2) d'un pluviomètre situé au niveau du sol (station n° 250303, fig. 2) et d'un bac d'évaporation type Colorado modifié ORSTOM (1 m × 1 m) enterré près de l'exutoire du bassin et à proximité des stations limnigraphiques (aval du système).

HYDROGÉOLOGIE (fig. 2 et 3)

Dans un premier temps, 10 forages ont été foncés dans les interfluves (fig. 3), et ont fait l'objet de tests hydrauliques. Neuf d'entre eux pénètrent dans le socle sain, le dixième (F9) restant dans les altérites. Par la suite, deux ouvrages supplémentaires ont été ajoutés près du F9 (cimentation des altérites dans l'un) afin de caractériser l'hydrodynamique de chacun des deux horizons. Des relevés piézométriques sont périodiquement effectués depuis février 87, soit manuellement par sonde (fréquence décadaire), soit par enregistrements limnigraphiques (site F9). Des prélèvements pour analyses hydrochimiques (forages, sources, rizières) sont couplés à ces observations.

Dans le bas-fond, un piézomètre de 3 m de profondeur pénétrant dans l'horizon aquifère (socle-arènes micacées-sables lavés) sous-jacent au recouvrement argileux anthropique (n° 1250109907, fig. 2), est équipé d'un limnigraphe et installé au niveau des stations limnigraphiques.

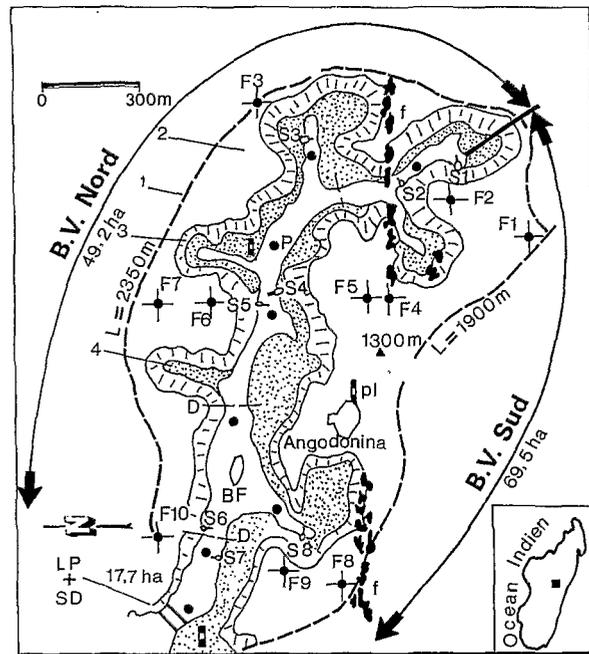


FIG. 1. — Site expérimental d'Ambohitrakoho (hautes terres de Madagascar)

1: limites du bassin versant superficiel (BV nord et BV sud avec surfaces (ha) et L, longueur de crête); 2: interfluves; 3: versant convexe; 4: terrasse; BF: bas-fond; LP + SD: batteries de piézomètres et section déversante à l'aval (P et D à l'amont); F1: forage; S1: émergence pérenne; f: filons granitiques; pl: pluviographes.

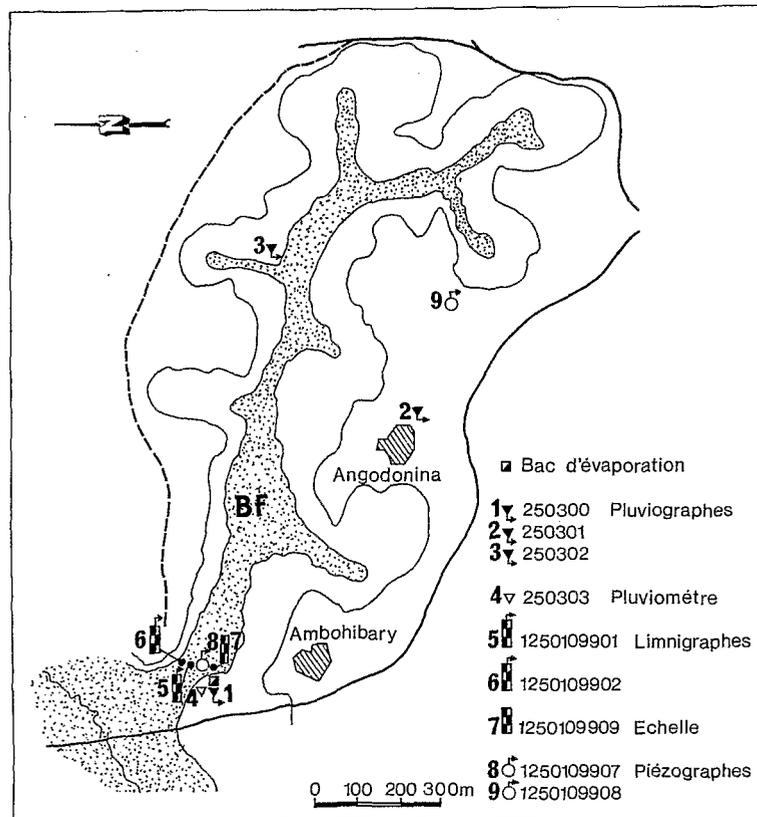


FIG. 2. — Equipement hydrométrique du bassin (eaux de surface et domaine souterrain au droit du flat alluvial).

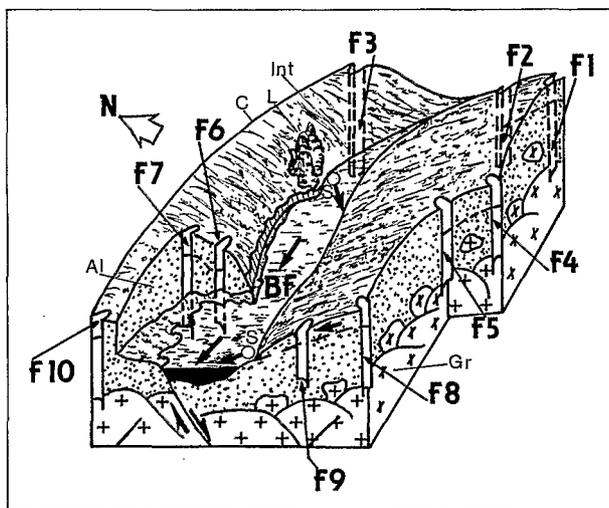


FIG. 3. — Equipement hydraulique du bassin (eaux souterraines)

F1 à F10: forages dont l'un (F9) reste dans les altérites argileuses et autour duquel des piézomètres ont été foncés afin de caractériser l'hydrodynamique de cet horizon et du réservoir sous-jacent semi-captif (socle-arènes grenues). S: émergences pérennes; C: ligne de crête; Int: interfluves; AL: altérites argileuses; Gr: socle cristallin fissuré; BF: bas-fond rizicultivé; L: Lavaka.

CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE (fig. 4)

Sur les hautes terres de Madagascar (900 à 2 600 m NGM), le substratum granito-gneissique très ancien (-1 500-500 MA) est altéré et pénéplané par plusieurs phases d'érosion (BOURCEAT et PETIT, 1969). La morphologie qui en résulte induit une forte densité de dépressions rizicultivées, ou bas-fonds, à structure complexe (RAUNET, 1985), dont l'une d'elles (fig. 1) fait l'objet d'études pluridisciplinaires dans le cadre d'une Action Thématique Programmée (1). Le climat est marqué par deux saisons bien tranchées: un épisode pluvieux qui dure environ six mois (15 oct.-15 avril); une période sèche le reste de l'année.

Sur le cycle climatique 87-88 (1 290 mm de précipitations sur le bassin), les pluviographes ont témoigné d'une répartition homogène des pluies sur tout le site. Par ailleurs, les hauteurs d'eau sont bien corrélées avec celles de la station météorologique d'Ivato, située à 6 km du bassin et à la même altitude (1 300 m NGM). En cette station, 40 années d'observations (fig. 4) permettent de situer l'année hydrologique 87-88 au voisinage (moins 7%) de la moyenne établie sur la période quadridécennale (1 390 mm).

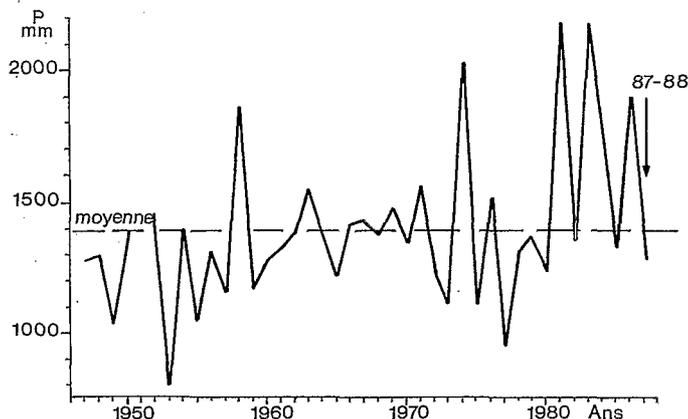


FIG. 4. — Pluviométrie quadridécennale à la station météorologique d'Ivato (6 km du site et à la même altitude de 1 300 m NGM).

(1) ATP PIREN: «Bilan hydrique et minéral dans un bas-fond des hautes terres de Madagascar».

MESURES ET INTERPRÉTATIONS

DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES

On sait que le socle cristallin sous couverture altéritique est le siège d'interactions hydrauliques plus ou moins complexes (RUSHTON et WELLER, 1985; FAILLAT, 1986; GRILLOT et *al.*, 1987), résultant de la structure bicouche de l'aquifère (ENGALENC et *al.*, 1979; MARGAT, 1983). Sur le site, les tests hydrauliques pratiqués sur tous les forages confirment cette structure et la précisent (GRILLOT et *al.*, à paraître). Deux aquifères superposés s'individualisent en effet, séparés par un interface argilo-sableux semi-perméable reconnu par sondage: le premier est superficiel, libre, très faiblement minéralisé (conductivité électrique inférieure à $35 \mu\text{S cm}^{-1}$) et alimenté par l'impluvium local (interfluves). Cet horizon se situe au niveau du complexe hétérogène des altérites supérieures sablo-argileuses. Le second est plus profond (10 à 12 m en moyenne sous les interfluves), semi-captif et nettement plus minéralisé (conductivité électrique supérieure à $200 \mu\text{S cm}^{-1}$). Il siège dans le milieu constitué par le socle sain fissuré et des arènes micacées sus-jacentes, son alimentation et ses axes de drainage étant conditionnés par l'organisation fissurale du socle affleurant en rides résiduelles, et par une néotectonique active privilégiant les directions fissurales E-W dans le drainage des écoulements (ARTHAUD et *al.*, 1989).

Des effets de drainance hydraulique per descensum sont nettement apparus au cours des pompages, confirmés par des baisses progressives de conductivité électrique des eaux pendant l'exhaure et se stabilisant autour de $35 \mu\text{S cm}^{-1}$ (drainance hydrochimique avec dilution des eaux profondes par les eaux très faiblement minéralisées des altérites argileuses).

Ces suivis hydrochimiques, couplés à des analyses isotopiques (^2H et ^{18}O), ont démontré clairement que l'aquifère libre des altérites est drainé par une ligne d'émergences circonscrite autour du bas-fond (fig. 1 et 3). De plus, le marquage isotopique des eaux souterraines (zone noyée et émergences), par rapport au signal pluie, rend compte d'une absence d'évaporation tant durant l'infiltration (qui est donc rapide) que pendant le cheminement souterrain des eaux.

Toutes ces données montrent que le flat alluvial rizicole est alimenté en partie par l'aquifère des altérites, ce qui lui assure un écoulement de surface partiellement pérenne (environ 9 mois par an).

Le nombre de tests hydrauliques, et l'aménagement adapté afin de cerner les caractéristiques hydrodynamiques des deux horizons (site F9 avec piézomètres à différents niveaux), permettent de proposer à l'échelle du bassin une extrapolation fiable des caractéristiques hydrodynamiques. C'est ainsi qu'au seuil de probabilité de 95 %, les paramètres suivants peuvent être retenus pour tout le bassin:

— horizon des altérites: porosité utile de 6%; perméabilité verticale (K_v) supérieure à 10^{-4} m s^{-1} ; perméabilité horizontale (K_h) inférieure à 10^{-6} m s^{-1} ;

— socle-arènes: emmagasinement (S) 0,1 %.

Dans tous les forages pénétrant dans le socle (F1 à F10, fig. 3), le comportement piézométrique est sensiblement identique et peut être illustré par deux forages (F3, F4, fig. 5). Dans les altérites (F9 et piézomètre associé) les fluctuations sont différentes (F9, fig. 5). Dans cet horizon, la décrue présente entre les cycles pluvieux 86-87 et 87-88 une pente régulière, perturbée toutefois par des remontées de niveau qui s'opèrent en pleine saison sèche (sept. 87). Ces remontées, d'ailleurs synchrones dans tous les forages, résultent vraisemblablement d'une activité sismique (ULOMOV, 1968), des microséismes ayant affecté la région à cette époque. En effet, les conséquences des feux de brousse avancés en Côte-d'Ivoire (CHEVALLIER, 1988) ne peuvent être invoqués en raison de la profondeur de l'aquifère (au moins 9,5 m, F9). De même, celles des variations barométriques sur l'horizon semi-captif (BESBES, 1969) bien que perceptibles, n'expliquent pas une remontée qui atteint 30 cm.

Dans l'aquifère libre, l'abaissement piézométrique moyen est d'environ 1 cm j^{-1} ce qui, compte tenu de la porosité utile des altérites (6%), correspond à une diminution de la hauteur d'eau de $0,6 \text{ mm j}^{-1}$. Ce chiffre est comparable à celui qui est avancé ($0,5 \text{ mm j}^{-1}$) en Afrique de l'Ouest (LELONG, 1966; MARTIN et *al.*, 1987). Cet abaissement représente ainsi un débit de $600 \text{ m}^3/\text{km}^2 \text{ j}^{-1}$ libéré par les altérites et évacué en période sèche par le flat alluvial.

La nappe des altérites réagit rapidement aux précipitations puisque la première crue du cycle hydrologique 87-88 se manifeste environ 10 jours après le début des pluies (F9, fig. 5). En tenant compte de la profondeur de l'aquifère à cette époque (10,5 m en F9, fig. 5), la vitesse moyenne d'infiltration sur les interfluves serait de l'ordre de 1 m j^{-1} . Cette forte valeur, peu courante pour un milieu altéritique, corrobore cependant l'absence d'évaporation (isotopes) et la bonne perméabilité verticale (supérieure à 10^{-4} m s^{-1}).

Dans les forages atteignant le socle (F3, F4, fig. 5), la pente de décrue (86-87) est semblable à celle observée dans les altérites. La mise en charge postérieure est toutefois nettement déphasée par rapport aux pluies puisqu'elle est de l'ordre de 3 mois. Ce retard confirme que les zones d'alimentation directe de l'horizon semi-captif se situent en dehors du bassin versant superficiel (rôle des rides granitiques résiduelles et de leur géométrie fissurale).

Enfin, entre deux cycles climatiques successifs (86-87 et 87-88) et aux plus hautes eaux (fig. 5), l'écart d'amplitude des niveaux piézométriques est sensiblement le même dans tous les forages (1,5 m en moyenne). La similitude

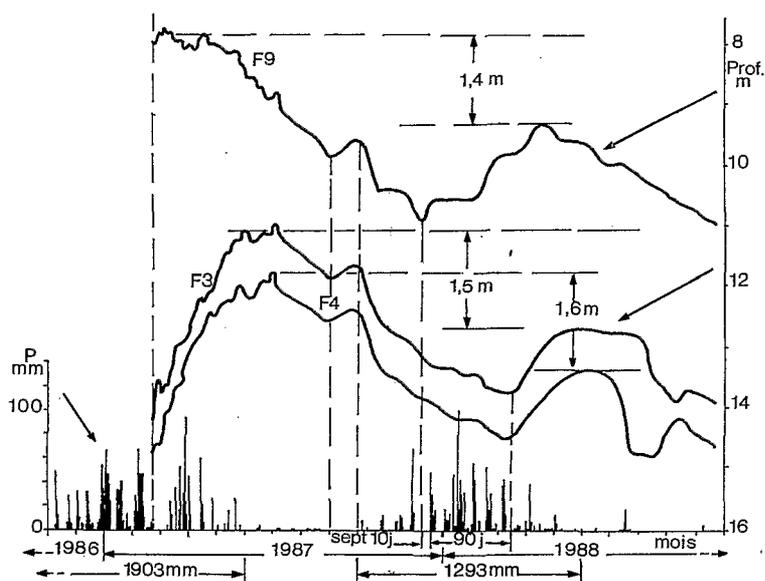


FIG. 5. — Correlations pluvio-piézométriques dans les forages implantés sur les interfluves (fig. 3).
P: précipitations; Prof: profondeur sous le sol (forages nivelés) des eaux souterraines.

de cet écart, quel que soit l'horizon aquifère, va dans le sens d'interactions hydrauliques qui tendent à équilibrer les pressions (caractère semi-perméable de l'interface argilo-sableux).

DONNÉES HYDROLOGIQUES

Les mesures de débit à l'aval du bassin, et les contrôles piézométriques de la nappe souterraine du bas-fond, sont fiables depuis nov. 87, date à laquelle l'infrastructure est devenue entièrement opérationnelle (fig. 6).

De décembre 87 à avril 88, les débits jaugés au pas de temps journalier se calent bien sur les précipitations (fig. 6.1 et 6.2). A partir de fin avril, l'écoulement se prolonge au-delà de la fin de la saison des pluies, rehaussé par quelques apports accidentels comme par exemple à la mi-juillet. Cet écoulement qui couvre ainsi toute la saison sèche (jusqu'en septembre) démontre que les apports directs sur le flat alluvial, et le ruissellement sur les interfluves, sont insuffisants pour assurer une telle pérennité durant toute cette période. L'écoulement de surface est donc bien alimenté aussi par l'écoulement souterrain, provenant comme nous l'avons vu précédemment de la lente vidange du réservoir libre altéritique (émergences).

Les mises en charge de la nappe souterraine au droit du bas-fond (fig. 6.3) obéissent aux mêmes influences pluviométriques, se prolongeant aussi après la fin des pluies mais sur une période plus courte que l'écoulement de surface (environ 3 mois). Ainsi jusqu'à la fin juillet, la charge hydraulique de la nappe est supérieure au plan d'eau libre des rizières (comportement d'un milieu captif) dont l'état d'inondation (fig. 6.4) se cale bien sans déphasage significatif sur les apports pluviométriques (fig. 6.2) et sur les fluctuations piézométriques (fig. 6.3).

ÉCHANGES HYDRIQUES SURFACE-SOUTERRAIN

De toutes les observations qui précèdent, se dégagent trois caractéristiques majeures concernant les fonctions de transfert hydrique entre surface et souterrain :

- dans une large mesure et selon les saisons, les écoulements de surface peuvent dépendre du régime des eaux souterraines de l'aquifère libre des altérites;
- des infiltrations s'effectuent à travers le recouvrement anthropique du bas-fond au moins en début de recharge, et atteignent la nappe sous-jacente (drainance per descensum);
- au cours et en fin de recharge, les écoulements de surface semblent soutenus conjointement par le tarissement de l'aquifère altéritique et par la mise en charge retardée (drainance per ascensum) du complexe profond socle fissuré-argènes grenues micacées).

Des applications numériques peuvent illustrer ces conclusions tant en saison sèche qu'en période humide (tab. I et II).

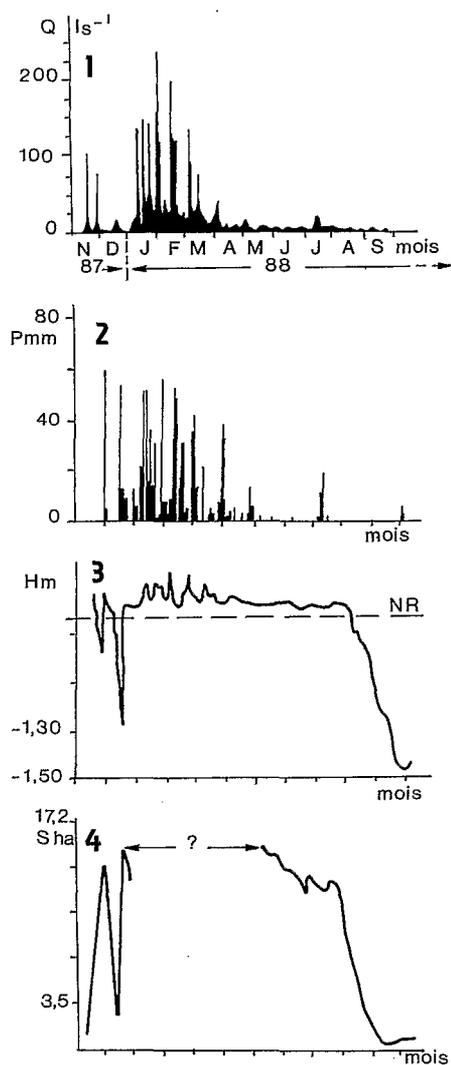


FIG. 6. — Données hydrométriques de surface et souterraines au droit du flat alluvial.
 6.1: débits jaugés au pas de temps journalier à l'aval du bassin (fig. 2); 6.2: pluviométrie journalière sur le bassin; 6.3: piézométrie de la nappe sous-jacente au flat alluvial (limnigramme) exprimée en profondeur (Hm) par rapport au sommet du piézomètre — NR: niveau moyen de la rizière; 6.4: état des surfaces inondées des rizières, exprimées en ha.

TABLEAU I

Paramètres entrant dans l'évaluation des écoulements de surface en période sèche (août-sept. 88) et en période humide (déc. 87-avril 88)

Mois	Déc. 87	Janv. 88	Fév.	Mars	Avril	V Total m ³	Août	Sept.	V Total m ³
Donnée									
P mm	71	285,7	316	121,5	79,5		0	0	
Q l s ⁻¹	3,6	39,9	62,9	26,8	10,4	3,6.10 ⁵	2,5	1,4	10 ⁴
Ha inondés	← 17,7 →						6	1	
Ev mm	-?	-?	-?	-?	-?		124	184	10 ⁴

TABLEAU II

Paramètres entrant dans l'évaluation des écoulements souterrains (altérites argileuses) au cours des mêmes périodes

Période Données	Dec. 87 Avr. 88	V Total m ³ A ha. S % dH.	Août-Sept 88	V Total m ³
A (ha)	118,7	10 ⁵	118,7	4. 10 ⁴
S %	6		6	
dH(m)	1,5		0,6	

SAISON SÈCHE

Considérons par exemple deux mois d'étiage sans pluie (août et sept. 88, fig. 6.2). Le volume libéré par la nappe libre des altérites (tab. I) s'élève à environ 4.10⁴ m³. Les jaugeages à l'aval du bassin donnent (tab. I) un volume écoulé d'environ 10⁴ m³. En tenant compte de l'évaporation des surfaces inondées (fig. 6.4) qui correspond sensiblement à un volume de 10⁴ m³ (tab. I), les volumes théoriquement disponibles (3.10⁴ m³), en l'absence de pertes par infiltration, devraient se retrouver à l'aval du bassin. Ce n'est pas le cas (10⁴ m³). La *drainance per descensum* vers la nappe représente ainsi une proportion importante des volumes mesurés à l'exutoire de bas-fond.

SAISON HUMIDE

Dans la période déc. 87-avril 88 (68% des précipitations du cycle hydrologique), le volume libéré par la nappe libre est d'environ 10⁵ m³ (tab. II). Les jaugeages à l'aval du bassin ont donné un volume évacué de 3.6.10⁵ m³ (tab. I). Ce volume englobe les précipitations sur le bas-fond de 17,7 ha (fig. 1) diminuées de l'évaporation de la surface probablement totale des rizières (fig. 6.4). Les mesures sur bac n'ayant débuté qu'en juillet 88, cette évaporation ne peut être quantifiée pour la période considérée. Toutefois si l'on se réfère aux données de la saison des pluies du cycle suivant (nov. 88, 175 mm), elle pourrait sensiblement annuler l'apport des pluies sur le bas-fond. De toute manière, compte tenu de l'écart entre le volume libéré par la nappe des altérites (10⁵ m³) et celui qui a été jaugé à l'aval du bassin (3.6.10⁵ m³), donc après que l'évaporation et l'ETr du riz nature aient été compensées, une part importante du volume d'eau évacué par la surface du bassin provient dès la mi-mars (époque de mise en charge du complexe socle-arènes, fig. 5) d'une *drainance per ascensum* de la nappe semi-captive (GRILLOT et RAUNET, 1988) sous-jacente au flat alluvial. Dans ce sens, on notera que la brusque décrue de cette nappe qui s'amorce en juillet (fig. 6.3), soit deux mois environ après le début de réduction des surfaces inondées du bas-fond (fig. 6.4), coïncide avec l'époque de décrue observée dans les forages profonds (F3, F4, fig. 5).

SYNTHÈSE ET CONCLUSION (fig. 7)

Sur les hautes terres de Madagascar, les bas-fonds rizicoles appartiennent à différents types selon leur contrôle néotectonique actuel (ARTHAUD et al., 1989). Le site expérimental auquel il vient d'être fait référence appartient ainsi à des unités où le jeu récent de failles normales, orientées E-W, induit l'évolution des bassins entre deux versants dissymétriques (fig. 3) avec un cours rectiligne du drainage aérien, et probablement aussi souterrain, calqué sur la direction de faille (fig. 7.1). Ce type de structure s'oppose à celui de zones tectoniquement stables où les produits alluvionnaires, plus ou moins encaissés dans les altérites autochtones, prennent la forme de larges plaines à pente très faibles (0,2%), drainées vers les dépressions où affleurent l'aquifère de socle (fig. 7.2).

Dans le bassin expérimental, les fonctions de transfert entre surface et souterrain qui viennent d'être discutées permettent de proposer un *modèle physique* rendant compte en particulier des échanges hydriques au niveau du bas-fond. Sachant par ailleurs que les eaux souterraines ont des minéralisations très différentes selon leur appartenance à l'horizon altéritique ou au complexe socle-arènes grenues, il faut envisager l'étude des bilans minéraux de ces unités rizicoles en fonction des sens *verticaux de drainance*, et des époques du cycle où ces *mouvements s'inversent*. Il y a là, semble-t-il, une orientation précise proposée à la recherche actuellement menée sur les transferts de masse vers les zones d'enracinement du riz.

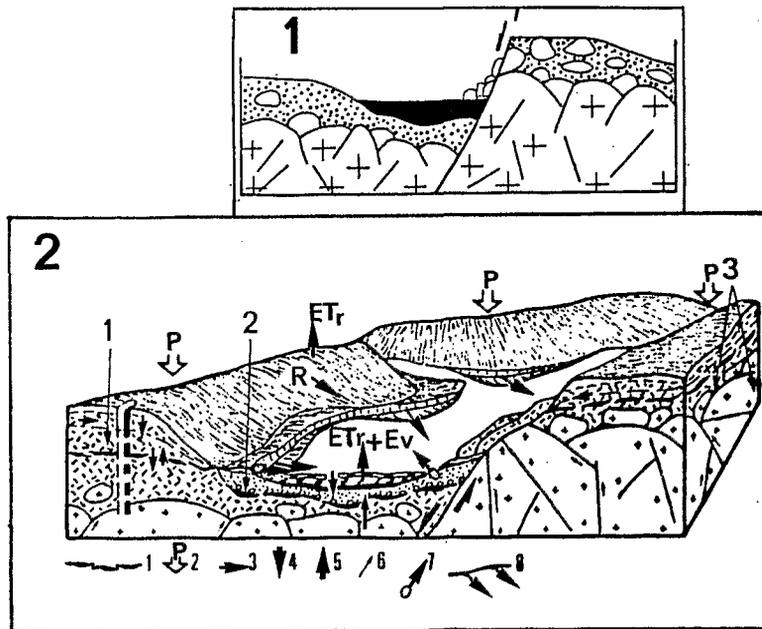


FIG. 7. — Contrôle structural et fonctionnement hydraulique des bas-fonds rizicoles.

7.1: (type Ambohitrakoho): structure d'un bas-fond contrôlé par une faille normale à jeu actuel; 7.2: fonctionnement hydraulique — (1) aquifère libre des altérites argileuses, (2) aquifère semi-captif des sables de fluage; (3) aquifère semi-captif du complexe argènes grenues micacées-socle fissuré.

En légende: (1) horizons semi-perméables sablo-argileux, (2) précipitations locales, (3) flux latéraux permanents en provenance de l'aquifère latéritique argilo-sableux, (4) flux verticaux descendants: au cours de la recharge (interfluves); en début de recharge (flat alluvial), (5) flux verticaux ascendants: au cours de la décrue dans les altérites (interfluves), au cours et en fin de recharge du socle (flat alluvial), (6) circulations dans le bed-rock (fractures), (7) émergence pérenne de vidange de l'horizon altéritique supérieur libre, (8) ligne d'émergences plus ou moins diffuses du même horizon.

ET_r: évapotranspiration réelle sur les interfluves; ET_r + Ev: évapotranspiration du riz et évaporation du bas-fond inondé; R: ruissellement sur les interfluves.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 5 janvier 1990

BIBLIOGRAPHIE

- ARTHAUD (F.), GRILLOT (J.C.) et RAUNET (M.), 1989. — Contrôle néotectonique des directions de drainage sur les hauts plateaux de Madagascar. *CR Acad. Sci. Paris*, t. 308, série II: 527-530.
- BESBES (M.), 1969. — L'effet barométrique dans les puits en relation avec le coefficient d'emménagement et l'étanchéité du toit des nappes captives. *Bull. BRGM*, 2, III, n° 2: 57-76.
- BOURGEAT (F.) et PETIT (M.), 1969. — Contribution à l'étude des surfaces d'aplanissement sur les hautes terres de Madagascar. *Ann. Géogr.*: 157-158.
- CHEVALLIER (P.), 1988. — Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide Booro-Borotou (Côte-d'Ivoire). Thèse Doct., Univ. Montpellier II, 328 p., *multigr.*
- ENGALENC (M.), GRILLOT (J.C.) et LACHAUD (J.C.), 1979. — L'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Ed. CIEH et Géohydraulique, Paris, 193 p.
- FAILLAT (J.P.), 1986. — Aquifères fissurés en zone intertropicale humide: structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest). Thèse Doct. ès Sci., Univ. Montpellier II, 533 p., *multigr.*
- GIRARD (G.), MORIN (G.) et CHARBONNEAU (R.), 1972. — Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. IX, n° 4: 1-10.
- GIRARD (G.), LEDOUX (E.) et VILLENEUVE (J.P.), 1981. — Modèle intégré pluie-eau de surface — eau souterraine. Relations pluie-débit. *Houille blanche*, vol. 35, n° 4-5: 315-320.

- GRILLOT (J.C.), BLAVOUX (B.), RAKOTONDRAINIBE (J.H.) et RAUNET (M.), 1989. — Dynamique en hautes eaux des aquifères d'altérites sur les hauts plateaux cristallophylliens de Madagascar. *Journal of African Earth Sci.*, vol. 9, n° 3-4 : 599-607.
- GRILLOT (J.C.), BLAVOUX (B.), RAKOTONDRAINIBE (J.H.), RAUNET (M.) et RANDRIANARISOA (N.), 1987. — A propos des aquifères d'altérites sur les hauts plateaux cristallophylliens de Madagascar. *CR Acad. Sci. Paris*, t. 305, série II: 1471-1476.
- GRILLOT (J.C.) et RAUNET (M.), 1988. — Aquifère d'arènes granitiques sous recouvrement argilo-limoneux et organique (hauts plateaux cristallophylliens, Madagascar). *CR Acad. Sci. Paris*, t. 306.
- LEDOUX (E.), 1980. — Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Thèse Doct. Ing., Ecole Mines, Paris, Univ. P. et M. Curie, 200 p, *multigr.*
- LEDOUX (E.), 1986. — Modèles mathématiques en hydrogéologie. Ecole Mines, Paris, rapport LHM/RD/86/12, 120 p.
- LELONG (P.), 1966. — Régime des nappes phréatiques contenues dans les formations d'altération tropicale. *Sci. de la Terre*, 2, 201-244.
- MARGAT (J.), 1983. — Rapport sur le thème 3 du colloque «les milieux discontinus en hydrogéologie», Orléans 16-17 nov. 82. *Hydrogéologie, Géologie de l'Ingénieur*, 1. BRGM: 25-33.
- MARSILY de (G.), LEDOUX (E.), LEVASSOR (A.), POITRINAL (D.) et SALEM (A.), 1978. — Modelling of large multilayered aquifer system: theory and applications. *Journal of Hydrology*, 36: 1-34.
- MARTIN (J.) et THIERY (D.), 1987. — Analyse d'une longue série piézométrique au Burkina-Faso. Etude de la variabilité climatique. *Hydrogéologie*, 2: 137-145.
- RAUNET (M.), 1965. — Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar. *Géomorphologie-Pédologie-Hydrologie. Zeit Geomorph.*, NF, suppl. Bd 52: 25-62.
- RUSHTON (K.R.) et WELLER (J.), 1985. — Response to pumping of a weathered fractured granite aquifer. *Journal of Hydrology*, 80: 299-309.
- ULOMOV (V.I.), 1968. — On the way to prognosis of earthquakes. *Zemlya i Vsedennaya, Acad. Sci. USSR*. 3: 23-30.