

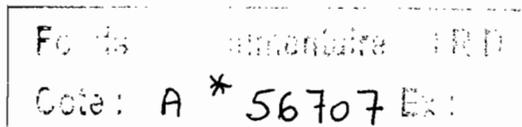
**FONCTIONNEMENT HYDRIQUE A DIFFERENTES ECHELLES
D'UN PETIT BASSIN VERSANT DE SAVANE HUMIDE EN
COTE D'IVOIRE. ANALYSE DE L'INFLUENCE DES
COUVERTURES PEDOLOGIQUES ET VEGETALES.**

**Christian VALENTIN*, Pierre CHEVALLIER, Emmanuel FRITSCH,
Dany MITJA et Olivier PLANCHON**

* ORSTOM, 70-74, route d'Aulnay, 93143 Bondy Cedex, France



219



1. INTRODUCTION

1.1 Le Programme Hyperbav

L'équipe de recherche hydro-pédologique sur bassin versant (HYPERBAV) s'est fixé comme objectif l'analyse fine des composantes du milieu, de leurs interactions, et de leurs influences sur les transferts hydriques. Ce programme a réuni 24 participants, français et africains, principalement des hydrologues et pédologues, auxquels se sont adjoints des géologues, un géomorphologue, un phytoécologiste et des termitologues. Commencé en 1984, date des premières mesures de terrain, il s'est achevé en septembre 1989, lors de la présentation de la synthèse des travaux, au cours de deux journées organisées par l'ORSTOM, à Montpellier. Nous nous limiterons ici à la présentation des principaux résultats ayant trait au thème de l' A.T.P. "Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols".

1.2 Le cadre de l'étude

1.2.1 Un zone charnière

Le petit bassin versant retenu s'étend sur 1,36 km². Il se situe en Côte d'Ivoire, à 25 km au nord de la ville de Touba, à proximité du village de Booro-Borotou (300 habitants). Cette région de savane humide appartient à une zone charnière entre :

- la zone de la forêt tropicale humide, et du domaine pédologique ferrallitique, au sud,
- la zone des savanes sèches et du domaine ferrugineux au nord.

1.2.2 Les principales composantes du milieu :

a) Le climat

Le climat, tropical de transition, se caractérise par :

- Une saison des pluies, de mai à octobre, et une saison sèche, de novembre à avril. La hauteur annuelle moyenne des précipitations du poste de Touba (calculée de 1939 à 1986) est de 1.360 mm, celle du poste de Booro-Borotou (de 1984 à 1987) de 1.225 mm. Juillet, août et septembre sont les mois les plus pluvieux, décembre et janvier les plus secs.
- Une évapotranspiration potentielle moyenne de 1.600 mm par an, évaluée par la formule de Penman.
- Une vitesse moyenne du vent de 1,0 m/s.
- Une température moyenne annuelle de 25°C. La valeur mensuelle maximale, 32°C, est enregistrée au cours de la saison sèche, en février et en mars. La température mensuelle minimale, 19°C, correspond à la période pendant laquelle souffle l'harmattan (décembre, janvier).
- Une humidité relative moyenne de l'air qui varie de 40% en janvier à plus de 90% en septembre.

b) La couverture pédologique

Deux grands domaines ont été identifiés au sein de la couverture pédologique :

- Le domaine ferrallitique* : il regroupe les quatre plateaux cuirassés et leurs rebords.

Deux systèmes le composent :

- o Le système cuirassé, épais en moyenne de 2 m, qui affleure localement sur les plateaux et coiffe localement le manteau d'altération.
- o Le système de sols rouges dont les horizons situés au-dessus de l'altérite se caractérisent par la présence de macropores tubulaires souvent comblés par des déjections de termites *Macrotermes*.

-*Le domaine ferrugineux et hydromorphe*. Il est constitué de l'emboîtement de 4 systèmes pédologiques :

- o Le système de dégradation superficiel. Il correspond à la transformation des sols ferrallitiques rouges, bien structurés, à l'amont des versants, en sols ferrugineux ocres et jaunes, massifs, à l'aval. En une première étape, le fer est exporté sélectivement sous forme d'hématite, ce qui conduit à une néoformation de goethite. La seconde étape exporte l'argile sous forme de kaolinite. Ces exportations déterminent non seulement le type d'agrégation, la cohésion et le mode d'assemblage des matrices, mais aussi leur spectre de porosité. L'apparition de croûtes superficielles sur des sols rouges non dégradés constitue le précurseur de cette dégradation. Ces croûtes se trouvent relayées, sur les sols ferrugineux à l'aval, par un système érosif emboîté, allant de la protogriffe à la ravine.
- o Le système cuirassé. Localisé préférentiellement dans les zones de bombement du socle, il présente une forme de chapeau de gendarme coiffant l'altérite. Il constitue ainsi une ceinture discontinue, de part et d'autre de la rupture de pente de mi-versant. Ce système se démantèle à la fois dans sa partie supérieure et à sa base, sous l'action remontante du système hydromorphe à l'aval.
- o Le système hydromorphe. Son développement doit être relié aux fluctuations de la nappe phréatique et à son écoulement dans le marigot. Deux sous-systèmes peuvent être différenciés:
 - *un sous-système à pseudogley et à gley qui exporte le fer,
 - *un sous-système éluvial-illuvial qui exporte l'argile en amont et l'accumule en profondeur et vers l'aval. Ce départ de matière s'accompagne d'un affaissement du modelé auquel peut être associé le développement des vallons dont la localisation se trouve orientée par les structures géologiques du gneiss migmatitique (zone de surcreusement).
- o Le système superficiel d'apport colluvio-alluvial. Son extension spatiale correspond assez bien à celle de la savane herbeuse haute du bas-fond. Ces horizons humifères noirs, bien agrégés, contiennent une faible proportion de smectite.

c) Les états de surface

Nous nous limiterons ici aux seules composantes végétales et pédologiques (réorganisations superficielles) des états de surface.

- o La couverture végétale. Dix unités végétales ont été identifiées sur le bassin versant en fonction de critères essentiellement structuraux: présence, recouvrement et hauteur des ligneux. Plusieurs types de couvert correspondent assez bien, en haut et en bas de versant, à certaines unités morpho-pédologiques : la savane herbeuse basse sur les plateaux, savane boisée haute sur les hauts de versant, la savane herbeuse haute sur les sols du système hydromorphe colluvio-alluvial et la forêt galerie dans le bas-fond. En revanche, sur les versants, l'hétérogénéité induite par les champs et les jachères entraîne une mauvaise adéquation entre la couverture pédologique et le couvert végétal.
- o Les réorganisations superficielles. Dans la définition des unités cartographiques, plusieurs critères ont été pris en compte : le type de croûte, fondé sur la granulométrie et l'épaisseur de ses microhorizons, l'épaisseur et l'extension de la litière, l'amplitude et l'orientation du micro-relief, l'hydromorphie superficielle, soulignée par la présence, dès la surface, de taches d'oxydo-réduction, et la pente.

Ces critères permettent de définir 12 unités cartographiques qui peuvent être regroupées en trois grands ensembles selon la présence ou non d'un encroûtement superficiel et son caractère saisonnier ou permanent. La carte met en évidence une apparition de l'encroûtement saisonnier en haut de versant qui devient permanent de part et d'autre de la rupture de pente de la mi-versant. Les croûtes superficielles disparaissent à l'aval des versants. Ce schéma général correspond assez bien à celui de la distribution des sols.

d) La gestion des sols

Dans cette région de faible densité humaine - moins de 10 habitants/km², la culture itinérante sur brûlis correspond à une perturbation faible du milieu :

- absence de compactage des sols,
- maintien après le défrichage des troncs et des branches des ligneux,
- associations culturales, par exemple, riz-maïs-manioc,
- abandon des champs après 7 ans de culture,
- durée supérieure à 40 ans de la jachère.

La production globale des champs demeure sensiblement constante du fait de l'extension des surfaces cultivées. Ce système pallie la diminution de la fertilité des sols sensible après 3 ans.

2. LES FONCTIONNEMENTS HYDRIQUES AUX ECHELLES PONCTUELLES

2.1 La porosité des sols

La porosité des sols reflète leur organisation structurale et conditionne leur fonctionnement hydrodynamique. Elle a été analysée à l'aide d'un rétractomètre et d'un porosimètre à mercure. Les échantillons ont été prélevés le long d'une toposéquence à une profondeur de 40 cm. Le volume microporal déterminé à l'aide des deux méthodes décroît depuis les sols rouges de haut versant aux sols blancs de bas versant. Cette variation s'explique par celle des teneurs en argile (coefficient de corrélation supérieur à 0,95). Le volume macroporal passe par un minimum aux environs de la mi-versant.

Une étude particulière a été conduite sur la porosité des gravillons. Celle-ci dépend étroitement des 9 types identifiés sur le bassin versant : les gravillons altéritiques et les gravillons terreux sont les plus poreux. Viennent ensuite les gravillons pédoplasés, puis les gravillons pisolitiques et concrétionnés. Les gravillons à quartz hérissés ont une porosité totale plus importante que les gravillons gréseux. Les mesures de laboratoire ont montré que l'absorption d'eau par les gravillons dépend à la fois de leur type : les gravillons altéritiques sont les plus accessibles à l'eau, et les gravillons concrétionnés les moins poreux, et de la texture de la fraction fine : les plus fortes valeurs sont obtenues pour les matériaux argilo-sableux, les plus faibles pour les matériaux argileux. Le passage de l'eau des gravillons vers la gangue est très rapide. Ensuite, l'eau de la gangue diffuse lentement dans l'ensemble de la terre fine. Le pF de la gangue atteint des valeurs compatibles avec l'absorption de l'eau par les plantes (pF < 4,2). D'essais en pots, il ressort que c'est le type pédoplasé-nodulaire qui montre le plus de caractères favorables à la croissance et au développement de l'arachide. Toutefois, d'une manière générale, la teneur volumique de 30% semble constituer un seuil à ne pas dépasser pour le développement de cette plante.

2.2 La variabilité spatiale de l'infiltration

Quatorze parcelles d'un m² ont été implantées le long de la toposéquence type ayant servi de base aux études de la porosité. Des pluies ont été simulées au mois de février sur

des sols débarrassés de leur végétation et labourés manuellement. Les résultats font apparaître, en les accentuant, la même distribution que celle mise en évidence en rétractométrie et en porosimétrie à mercure, à savoir, l'existence d'un minimum d'infiltration, bien marqué à une distance d'environ 200 m du marigot. Cette analogie est à rapprocher également de facteurs plus superficiels : les distributions le long du versant du taux de matière organique, de l'instabilité structurale et de celle de l'épaisseur des croûtes formées sous simulation de pluie. En vue d'une meilleure prise en compte des conditions réelles, une seconde campagne de simulation de pluies a été entreprise, sur la même toposéquence, en fin de saison des pluies, en respectant, cette fois, les états de surfaces naturels : les organisations pédologiques superficielles (croûtes, microrelief, constructions fauniques,...) et le couvert végétal. Globalement, la distribution de l'infiltrabilité le long du versant reste inchangée. Il en est de même pour 17 parcelles réparties d'une manière plus aléatoire sur le bassin versant. Les mesures menées en février et en août sur ces parcelles mettent en évidence une permanence de valeurs élevées d'infiltration en haut de versant sur les sols à structure fragmentaire ainsi qu'en bas de versant sur les sols à structure particulière à cette époque, la nappe ne s'est pas encore rechargée. En revanche, à cette date, la progression lente du front d'humectation dans les sols à structure massive de la mi-versant entraîne une nette diminution de l'infiltration.

Ajoutons enfin, que les simulations de pluies opérées sur 6 autres parcelles ont fait apparaître un effet favorable sur l'infiltration de la présence de gravillons libres à la surface du sol.

2.3 Les variations de l'infiltration dans le temps

2.3.1 en milieu naturel

Afin de mieux analyser cette évolution saisonnière, nous avons simulé des pluies tous les deux mois, au cours d'une année complète (7 mesures), sur deux parcelles naturelles situées sur des sols ocres de la mi-versant. En vue de s'affranchir autant se faire que peut, des variations de l'état hydrique initial, les parcelles ont été amenées, avant chaque simulation, au même état hydrique. Celui-ci, contrôlé à l'aide de tensiomètres, correspond à un taux de saturation moyen de saison de pluies. Si l'infiltration reste sensiblement constante sur l'ensemble de l'année, une nette diminution s'observe néanmoins en août et septembre, période du développement maximum de l'encroûtement superficiel.

2.3.2 en milieu anthropisé

Les mesures effectuées, chaque mois, selon les mêmes protocoles, sur trois parcelles cultivées en arachide, en riz et en manioc, révèlent l'existence de trois grandes périodes : en un premier temps, l'infiltration diminue sensiblement lors de la formation des croûtes superficielles, elle dépend ensuite de la densité et du structure du couvert - forte infiltration sous l'arachide, faible sous le manioc - enfin, après la récolte, l'infiltration tend à nouveau à diminuer, le sol étant laissé nu alors que la saison des pluies n'est pas achevée.

Les mesures d'infiltrabilité sur les jachères ne portent que sur six parcelles d'âge différent. Elles ont été effectuées, en février, dans les mêmes conditions que la campagne de simulation de pluie sur la toposéquence. Les résultats font apparaître une tendance à l'augmentation de l'infiltrabilité après l'abandon de la culture et à une stabilisation après une dizaine d'années. Ces mesures sont corroborées par les données, plus nombreuses, d'instabilité structurale. La dégradation superficielle des sols rouges, observée sur les champs, à l'origine d'un ruissellement et d'une érosion marquée, n'est donc pas irréversible. La restauration des propriétés physiques suit plusieurs étapes liées à celles de la reconstitution végétale et de la dynamique des populations mésofauniques. Le couvert

tant ligneux qu'herbacé se développe très rapidement à la faveur de l'abandon des cultures. Toutefois, ces premières années de jachère correspondent au maximum de développement des termites fourrageurs *Trinervitermes* qui favorisent l'encroûtement et ralentissent d'autant l'augmentation progressive de l'infiltrabilité. Après un délai d'une dizaine d'années, la compétition végétale tourne à l'avantage des ligneux, avec pour corollaire, une augmentation de la litière de feuilles, une diminution du nombre de nids de *Trinervitermes* et un accroissement de la densité des nids de *Cubitermes*, termites humivores. Une période d'environ 40 ans s'avèrent toutefois nécessaire pour une restauration complète du milieu avec notamment la disparition totale d'herbes adventices comme *Imperata cylindrica* et le nouveau développement des termites lignivores comme les *Macrotermes*.

2.4 La recherche d'indicateurs d'infiltrabilité

Une approche moins descriptive et plus analytique des facteurs d'infiltrabilité a également été entreprise. Elle a porté sur le traitement statistique des données acquises sur 38 parcelles de simulation de pluie sous végétation naturelle. Le pourcentage en surface de trois types de croûte, déterminés par la méthode des points quadrats, suffit à extraire plus des deux tiers de la variance, indépendamment du couvert végétal et de l'état hydrique initial. A lui seul, le pourcentage de croûte d'érosion, constituée d'un microhorizon plasmique lisse, extrait 43% de la variance. Les réorganisations superficielles semblent ainsi constituer des indicateurs pertinents d'infiltrabilité pour cette zone. Elles résultent, il est vrai, de nombreux facteurs liés tant au sol, à la végétation et à l'activité faunique que ceux ayant trait à leur dynamique saisonnière ou à plus long terme.

Ces résultats nous ont conduits à adapter à cette région la typologie des surfaces proposée pour les savanes sèches (CASNAVE et VALENTIN, 1988). Cette approche s'avère très satisfaisante ($r^2=81\%$, $n=38$), pour peu que l'on définisse deux nouveaux types dépourvus de croûte superficielle, avec ou sans gravillons en surface.

3. LES FONCTIONNEMENTS HYDRIQUES A L'ECHELLE DU VERSANT

3.1 Les mini-pièges : une méthode simple et pertinente

Un mini-piège à ruissellement permet la mesure, après chaque averse, de la quantité d'eau qui a franchi un segment de versant, matérialisé par une rigole perpendiculaire à la pente. L'objectif consiste à déterminer, sous pluie naturelle, non pas un coefficient de ruissellement, tributaire de la définition, au reste très imprécise d'un micro-bassin sur une portion de versant, mais l'effet de l'accroissement de la longueur de pente sur l'augmentation du flux de ruissellement.

Après une averse, trois cas peuvent être envisagés : le bidon de 60 litres qui recueille les eaux de ruissellement est vide, contient de l'eau, ou a débordé. En fin de saison des pluies, chaque mini-piège peut être caractérisé par le nombre de fois que chacun de ces états a été observé. Pratiquement, on reporte les résultats selon un diagramme ternaire dont chaque côté représente le pourcentage de ces états, exprimés par rapport au nombre total d'averses observées.

Trois sites ont été retenus. Le premier, équipé de 13 mini-pièges correspond à un champ de riz, caractérisé par un sol et un état de surface homogène en termes de couvert, d'absence de micro-relief et de type unique de croûte (d'érosion). Le second, équipé de 5 mini-pièges, a été implanté le long d'un couloir de dégradation de surface, à l'amont d'un versant. Par rapport au site précédent, s'ajoute une hétérogénéité due au microrelief des touffes d'herbes et une complexité plus forte de la couverture pédologique. Enfin, le troisième site, équipé de 11 mini-pièges, et installé le long d'une toposéquence en savane,

présente une hétérogénéité des sols et de leurs états de surfaces (en termes, notamment, de couvert ligneux et de type d'encroûtement). En somme, ces trois sites ont été choisis pour présenter une complexité croissante des conditions d'infiltration internes et superficielles.

Sur le premier site, le ruissellement augmente avec la longueur de pente. Cette relation s'avère moins nette sur le second site et n'existe pas sur le troisième.

Ces résultats rejoignent ceux obtenus sous simulation de pluie sur des parcelles d'1 m² et de 50 m² par COLLINET (1988) : le transfert d'échelle n'est aisé que dans les cas d'état de surface homogène. En effet, dans le cas inverse, il faut tenir compte de la distribution de la porosité ouverte en surface et plus particulièrement de son hétérogénéité:

- latérale : localement, la présence d'une litière peut, par exemple, favoriser l'infiltration des eaux de ruissellement reçues de l'amont,
- verticale : la porosité, d'origine faunique, à la base des touffes d'herbes n'est accessible qu'aux lames de ruissellement suffisamment épaisses.

3.2 Le système ravinaire

Les très nombreuses mesures de ruissellement réalisées sur les diverses formes d'érosion linéaire montrent que ce sont les têtes de ravines qui subissent les ruissellements les plus importants. L'incision elle-même permet, au contraire, une infiltration rapide de l'écoulement qui disparaît le plus souvent avant d'atteindre le bas-fond. Le système ravinaire ne se distingue pas fondamentalement de celui du reste des versants : sauf exception, le ruissellement ne parvient pas directement au marigot. Toutefois, il assure une propagation plus rapide de l'écoulement, ce qui peut provoquer, particulièrement en tête de bassin, une alimentation rapide de la nappe.

4. LES FONCTIONNEMENTS HYDRIQUES A L'ECHELLE D'UN SYSTEME PEDOLOGIQUE : LE BAS DE VERSANT

Six sites tensio-neutroniques espacés de 25 m chacun, ont été implantés le long de l'axe de drainage d'un vallon perpendiculaire au marigot. Les mesures neutroniques, espacées tous les 10 cm, recourent la majeure partie des organisations pédologiques : ce micro-transect intègre la partie aval du système de dégradation superficiel qui rejoint en aval le sous-système hydromorphe éluvial-illuvial. Les profondeurs atteintes varient de 1,75m à 3,55m. Les potentiels de charge ont été mesurés, sur chaque site, à l'aide d'une batterie de 12 bougies tensiométriques (de 10 cm à 1,60m). L'intervalle des mesures a varié entre un jour, en pleine saison pluvieuse, à deux semaines en saison sèche. Elles ont été conduites pendant deux années.

En fin de phase de ressuyage, les courbes d'iso-teneur en eau se confondent peu ou prou avec celles relatives à la microporosité (évaluée à partir d'une très forte corrélation avec la teneur volumique en eau au pF 4,2). Tant en phase de recharge qu'en phase de vidange, deux types de fonctionnement hydrique ont pu être mis en évidence. Le premier concerne la quasi-saturation des horizons superficiels et la progression très lente (environ 3 mois) du front d'humectation en profondeur. Le ressuyage à une profondeur déterminée s'effectue ensuite de façon exponentielle et se poursuit sur une période de 3 à 6 mois. Ce ressuyage débute en surface et progresse avec le temps en profondeur. Le deuxième fonctionnement assure la recharge de la nappe. Précisons que la zone de stockage maximal en eau de la nappe dépasse le volume du réservoir sableux en année excédentaire et, à l'inverse, qu'elle n'exploite pas tout le volume en année déficitaire.

Ces résultats montrent que les grandes structures pédologiques à l'aval des versants conditionnent leur fonctionnement hydrodynamique. En particulier, le système de

dégradation superficielle sert d'impluvium au système hydromorphe. Dès lors, le développement du sous-système éluvial-illuvial n'est-il pas étroitement lié à l'extension du système de dégradation superficielle de la couverture ferrallitique initiale ?

5. LES FONCTIONNEMENTS HYDRIQUES A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT

5.1 Bilan hydrologique

Le bilan annuel fait apparaître la faible part de l'écoulement (7,7%), particulièrement sous forme de crue (1,5%). En admettant que le bassin constitue un système fermé, le déficit d'écoulement (92,3%) peut être assimilé à l'évapotranspiration réelle. Au pas de temps mensuel, le stockage de l'eau, d'abord dans la zone non saturée, ensuite dans la nappe, n'est possible qu'en période de pluviométrie supérieure à l'évapotranspiration potentielle, à savoir de juin à septembre inclus.

5.2 La forme des crues

Deux types de crues ont été identifiés sur des hydrogrammes réduits. L'analyse factorielle des correspondances a permis de les caractériser :

- le premier par des débits de pointe élevés, des temps de montée et de base courts,
- le second, à l'inverse, par des débits de pointe faibles, des temps de montée et de base longs.

Des observations *de visu* des écoulements dans les ravines et le cours d'eau ont été effectuées au moyen de marquage colorimétrique. Elles ont montré que la nappe est susceptible de fluctuations très rapides au cours d'une averse. La forme de la crue peut être partiellement expliquée par deux variables : le débit de base avant la crue, qui représente l'état initial de la nappe, et la hauteur maximale précipitée en 30 minutes qui reflète l'intensité de l'averse.

5.3 Les chemins de l'eau

Tous les résultats acquis aux différentes échelles depuis le m² jusqu'à l'ensemble du bassin conduisent à proposer un schéma de fonctionnement hydrodynamique le long d'un versant. Au comportement endoréique des plateaux cuirassés, fait suite un fonctionnement hydrodynamique essentiellement vertical sur les sols rouges. Néanmoins, ces sols peuvent localement produire du ruissellement. Celui-ci traduit une dégradation de la surface des sols qui résulte de causes pédologiques (apparition de croûtes superficielles, précurseur du système de passage des sols ferrallitiques aux sols ferrugineux) ou anthropiques (champs, jachères récentes). A la mi-versant, les sols ocres, fortement encroûtées, sont à l'origine d'un ruissellement important. La reprise évapotranspiratoire sur la zone non saturée reste importante et l'apport à la nappe sans doute faible. A l'aval, l'apparition de sols à structure particulière, très poreux, dépourvus de croûtes superficielles, entraîne une disparition quasi-totale et permanente du ruissellement tant en nappe que concentré. Ainsi, l'écoulement superficiel, issu de l'amont, s'infiltré progressivement. Cette eau alimente la nappe qui, en remontant, se rapproche de la surface. Son niveau de base minimum se situe légèrement en dessous du fond du lit du marigot, mais à une profondeur telle que la nappe demeure soumise à l'évapotranspiration très importante de la végétation dense.

Les fluctuations de la nappe jouent un rôle primordial dans le fonctionnement du bassin versant de Booro-Borotou. Elles influencent les mécanismes de l'écoulement et les chemins de l'eau :

- A l'échelle saisonnière : le bilan hydrologique fait apparaître une courte période d'excédent pluviométrique sur la reprise évapotranspiratoire. C'est pendant cette

période de quatre mois que la nappe est susceptible de se recharger et, en se rapprochant de la surface du sol, d'être à l'origine d'écoulements sur surface saturée ou d'écoulements de retour.

- A l'échelle de l'événement pluvieux : les variations rapides du niveau piézométrique de base peuvent provoquer des crues de nappe et expliquer, dès lors, les formes variables des hydrogrammes observés.

5.4 Modélisation

L'application de modèles mathématiques aux observations et aux expérimentations hydrologiques sur des petits bassins versants constitue le complément logique et nécessaire à l'interprétation de leur fonctionnement. A cet effet, plusieurs modèles ont été testés :

- Au pas de temps journalier : trois modèles globaux (CREC5, MODGLO et MODIBI) et un modèle distribué (MODCOU),
- Au pas de temps de 30 minutes : TOPMODEL.

D'une manière générale, aucun modèle n'a donné satisfaction. Sans doute, avec de meilleures données sur le domaine souterrain, nous aurions pu réaliser une modélisation plus fine avec le modèle couplé (MODCOU), mais à quel prix ? et dans quel but ? lorsque l'on considère que les informations seraient restées sommaires, et somme toute, non transposables à d'autres bassins. Il semble que les problèmes se situent :

- Dans le type de mécanismes hydrologiques qui combinent, entre autres, un fonctionnement de type "aire contributive variable" et une alimentation rapide du bas-fond par le ruissellement superficiel qui se se manifeste sur les versants.
- Dans la zone d'étude : région charnière, la savane humide présente une variabilité spatiale très marquée des composantes du milieu qui se double d'une variabilité dans le temps à l'échelle saisonnière. Or, à ce jour, cette complexité n'est que fort imparfaitement approchée par les outils de programmation, même les plus sophistiqués.
- Dans l'échelle d'étude : le petit bassin versant représente l'une des échelles les plus difficiles à étudier à travers la modélisation. A des échelles plus grandes ou plus petites, l'un des aspects de production et de transfert, pratiquement toujours distingués dans les modèles hydrologiques, prend une part prépondérante sur l'autre, particulièrement dans le cas des écoulements internes.

6. CONCLUSION

6.1 Des difficultés qui ouvrent de nouvelles perspectives

Au terme de cette étude, il convient de formuler certains regrets, tout d'abord de ne pas avoir pu bénéficier de la coopération de collègues d'autres disciplines, en particulier dans les domaines de la Bioclimatologie et de la Géochimie. Davantage de moyens auraient, en outre, probablement permis de mieux caractériser les chemins de l'eau dans le domaine souterrain. Toutefois, certaines insatisfactions débouchent sur la mise en route de nouveaux programmes relatifs à :

- La modélisation : l'identification des formes et des mécanismes de l'écoulement devraient permettre l'élaboration de nouveaux types de modèles qui prendraient en compte autant cette forme de connaissance que les données numériques. A cet égard, l'importante banque de données alimentée par ce programme peut servir de base à cette voie de recherche.
- L'extension spatiale des résultats : les images satellitaires (SPOT) seront utilisées, dans le cadre d'une thèse en liaison avec l'INRIA, pour étendre spatialement les observations réalisées sur ce petit bassin versant.

6.2 Le transfert d'échelle

A l'issue de ce travail, plusieurs remarques restent à formuler :

-La transposition à des échelles plus larges de résultats acquis à des échelles ponctuelles ne paraît aisée que dans les cas où l'hétérogénéité du sol et des états de surface reste limitée. Une des voies de recherche ayant trait au transfert d'échelle en milieu hétérogène concerne l'étude de la distribution, non seulement latérale, mais aussi verticale de la porosité ouverte en surface .

-Plus l'échelle de mesure augmente depuis le m² jusqu'à celle du bassin versant, moins les résultats acquis semblent être facilement extrapolables, y compris à la même échelle concernée : une typologie des surfaces unitaires constitue un outil opérationnel à l'échelle du m², même dans d'autres milieux (identité de la typologie des surfaces cultivées et modification mineure de la typologie des surfaces naturelles des savanes sèches à celle des savanes humides). A l'échelle d'un champ relativement homogène, la transposition à d'autres sites non étudiés demeure, semble-t-il, aisée. En revanche, la prise en compte de caractères à la fois de plus en plus en plus complexes mais aussi de plus en plus particuliers au site d'étude, rend, aux échelles plus larges, non seulement le transfert d'échelle, mais également la modélisation et la transposition mal assurés. Au demeurant, cette modélisation eût-elle abouti, serait-elle pour autant transposable à un autre petit bassin versant de la même zone ?

-Cette difficulté du transfert d'échelle doit être attribuée à la région d'étude où s'interpénètrent le domaine ferrallitique plus représenté au sud et le domaine ferrugineux caractéristique de la zone plus septentrionale. Rappelons que les mesures réalisées à l'échelle du m² ont été aisément extrapolées à l'échelle du petit bassin versant tant dans les régions forestières, où l'infiltrabilité généralement décroît de l'amont vers l'aval, que dans les régions arides où l'état d'encroûtement superficiel favorise la production d'un ruissellement généralisé sur l'ensemble des versants. La perméabilité aval du bassin de Booro-Borotou interdit ce type de transfert.

PUBLICATIONS

- BOA (D.), 1989.** Caractérisation, propriétés hydrodynamiques, contraintes et potentialités des sols gravillonnaires : cas de Booro-Borotou (région de Touba, nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de 3ème cycle, Université d'Abidjan.
- CAMARA (M.), 1989.** Les systèmes de culture et leurs influences sur quelques propriétés physiques et hydrodynamiques du sol : cas de Booro-Borotou (région de Touba, nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de 3ème cycle, Université d'Abidjan.
- CHEVALLIER (P.), 1988.** Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide, Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Thèse, Université de Montpellier.
- CHEVALLIER (P.), GIRARD (G.), 1988.** Utilisation d'un modèle distribué sur un petit bassin versant de savane (Booro-Borotou, Côte d'Ivoire). Séminaire sur l'état de l'art en hydrologie et hydrogéologie dans les zones arides et semi-arides d'Afrique. Ouagadougou, novembre 1988. UNESCO, CIEH.
- CHEVALLIER (P.), LAPETITE (J.M.), 1986.** Note sur les écarts de mesure observés entre les pluviomètres standards et les pluviomètres au sol en Afrique de l'Ouest. *Hydrologie Continentale*, vol 1(2), 111-119, 4 fig., 4 tabl., 7 réf.

- FRITSCH (E.), PLANCHON (O.), BOA (D.), 1987 :** Les transformations d'un paysage cuirassé au nord-ouest de la Côte d'Ivoire sur formations gneisso-migmatitiques. Séminaire régional de Yaoundé sur les latérites. *Colloques et Séminaires de l'ORSTOM*, 12 p., 11 fig.
- FRITSCH (E.), HERBILLON (A.J.), JEANROY (E.), PILLON (P.), BARRES (O.),** à paraître. Variations minéralogiques et structurales accompagnant le passage "sols rouges-sols jaunes" dans un bassin versant caractéristique de la zone de contact forêt-savane de l'Afrique occidentale (Booro-Borotou, Côte d'Ivoire). soumis pour publication à Sciences Géologiques (Strasbourg).
- IRIS (J.M.), 1986.** Analyse et interprétation de la variabilité spatiale de la densité apparente dans trois matériaux ferrallitiques. *Science du sol*, 24 (3) : 245-256.
- IRIS (J.M.),** à paraître : Effet de la variabilité spatiale du ruissellement sur l'estimation des crues. *Third International Geostatistics Congress*. 5-9 Sept 1988 Avignon. Reidel & Co. edit., 12 p., 8 fig., 17 réf.
- JANEAU (J.L.), VALENTIN (C.), 1988 :** Relations entre les nids de *TRINERVITERMES* et la surface du sol: réorganisations, ruissellement et érosion. *Rev.Ecol.Biol.Sol*, 24 (4) : 637-647, 3 fig., 4 tabl.
- KOUAME (B.), 1987 :** Forme des averses, variabilité spatiale et temporelle au nord-ouest de la Côte d'Ivoire. *Mémoire de DEA, USTL Montpellier*, 110 p. + annexes.
- LEPAGE (M.), TANO (Y.), 1986.** Les termitières épigées d'un bassin versant en zones soudanienne. Premiers résultats obtenus. *Actes Coll. Insectes Sociaux, CNRS*, Paris, 3 : 133-142.
- MITJA (D.), PUIG (H.),** à paraître. Phytomasse de la strate herbacée de cinq jachères en zone de savane humide (Booro-Borotou, Côte d'Ivoire). Accepté pour publication, *Bull.Ecologie*, 21 (1).
- PLANCHON (O.), FRITSCH (E.), VALENTIN (C.), 1987:** Rill development in a wet savannah environment. *CATENA Suppl.*, 8 : 55-70, 7 fig, 5 tabl, 4 photo., 13 réf.
- PLANCHON (O.),** à paraître. La production de sédiments sur les versants et leur transport à l'échelle du km² en savane humide, Côte d'Ivoire. in : *Sediment budget*, Proc. Porto Alegre symp., dec.1988. 10 p., 2 tabl., 4 fig., 6 réf.
- TANO (Y.), LEPAGE (M.), 1987 :** Distribution of termite mounds in a drainage basin of the Sudanian zone (Côte d'Ivoire). in : *EDER/REMBOLD, Chemistry and Biology of Social Insects*, Verlag J.PEPEPONY, München, pp. 613-614, 1 tabl., 4 réf.
- VALENTIN (C.), 1987.** Soil surface crusting. Some agronomic implications. in : *Land development management of acid soils, IBSRAM proc.n°4*, pp.53-66, 1 tabl., 7 fig., 10 ref.
- VALENTIN (C.), 1989.** Les états de surface des savanes de l'Ouest africain : relations avec les sols et incidences sur l'économie en eau. in : *SOLTROP 89. Premier séminaire franco-africain de Pédologie tropicale*. Lomé, 6-12 février 1989, 243-252, 6 fig., 11 réf.
- VALENTIN (C.), FRITSCH (E.), PLANCHON (O), 1987.** Sols, surfaces et formes d'érosion linéaire en milieu ferrallitique de savane. L'exemple d'un bassin versant du nord-ouest de la Côte d'Ivoire. in : *Land development management of acid soils, IBSRAM proc.n°4*, pp.67-81, 5 fig., 21 réf.
- VALENTIN (C.), JANEAU (J.L.),** à paraître. Les risques de dégradation structurale superficielle en savane humide. *Cah.ORSTOM, sér.Pédol, 1989, n°1.*

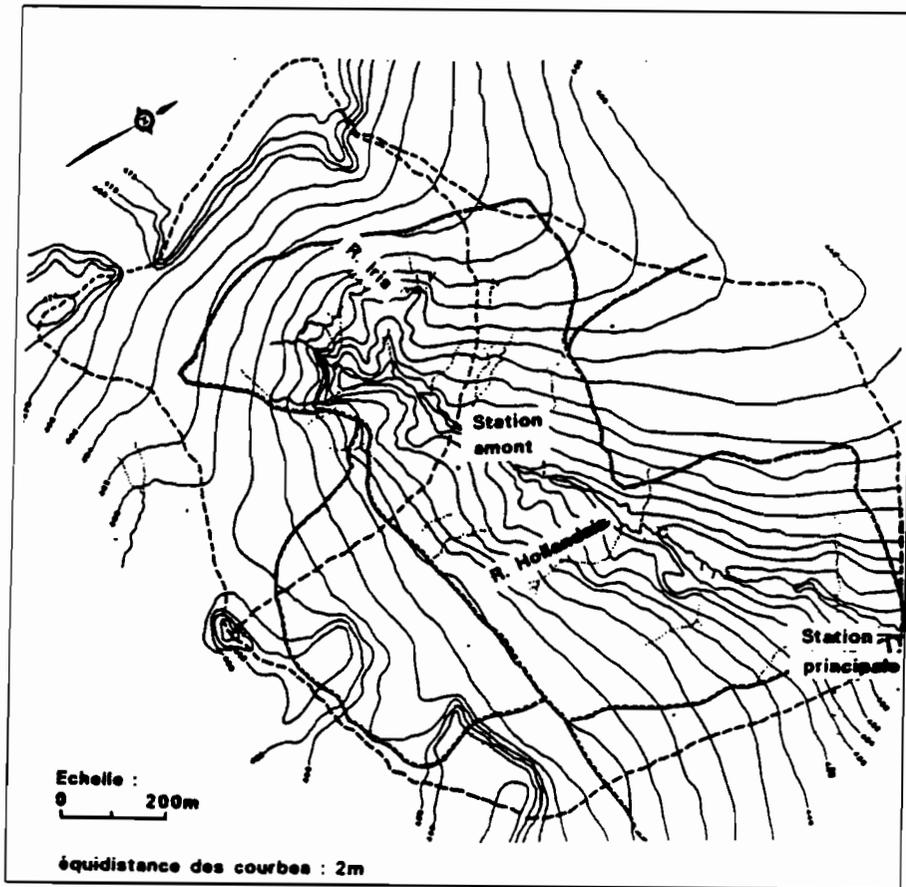


Figure 1 . Le Bassin versant de Booro-Borotou.

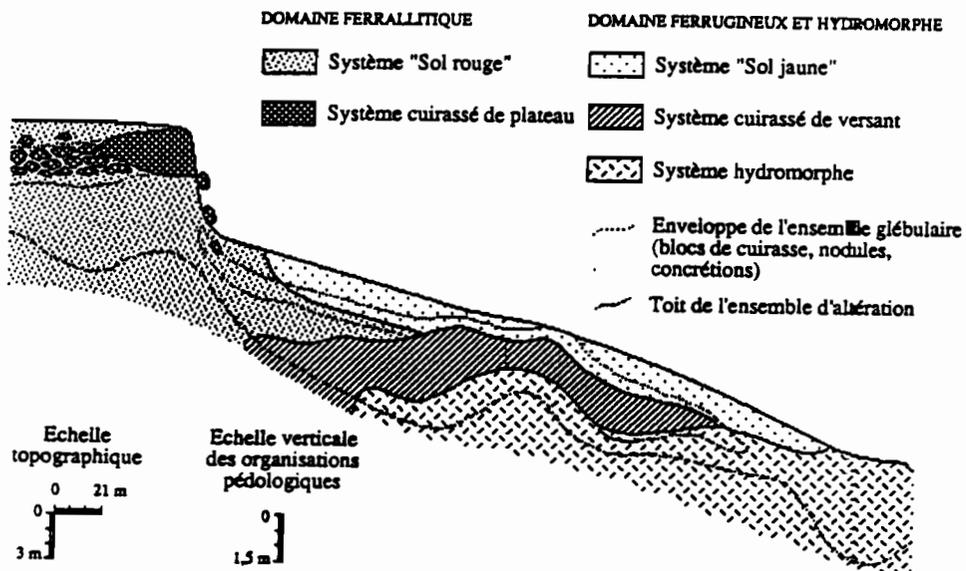


Figure 2. Distribution des domaines pédologiques le long d'une toposéquence type.

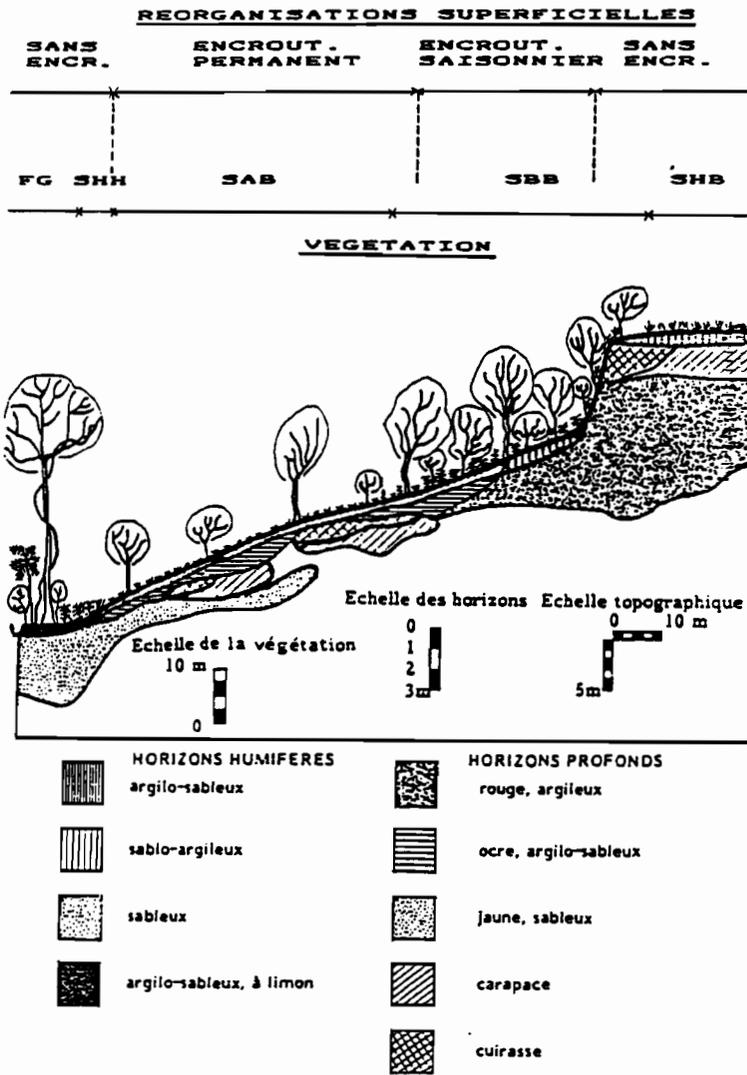


Figure 3. Distribution de la végétation et des réorganisations superficielles le long de la toposéquence type.

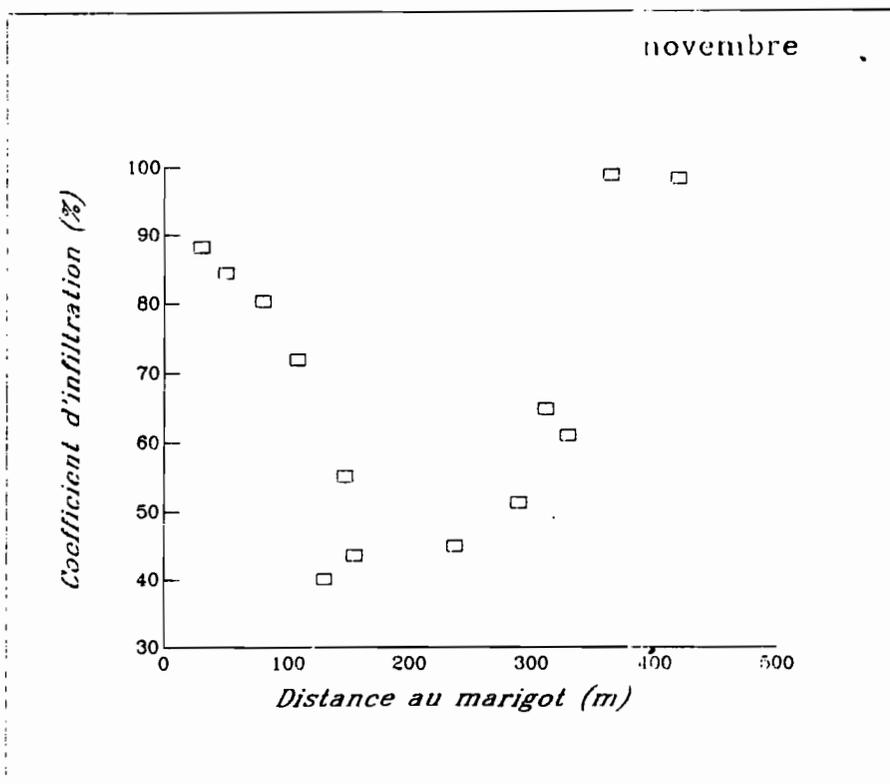
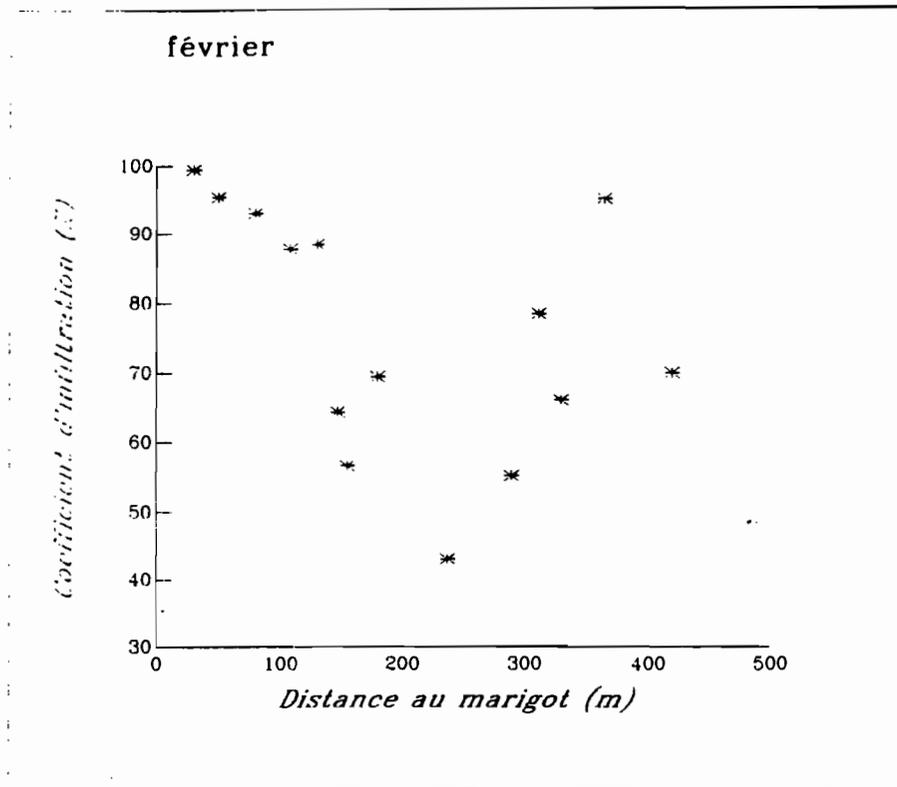


Figure 4. Variation, le long du versant, du coefficient d'infiltration mesuré sous simulation de pluies sur sol nu (février) et sur sol couvert de végétation (novembre).

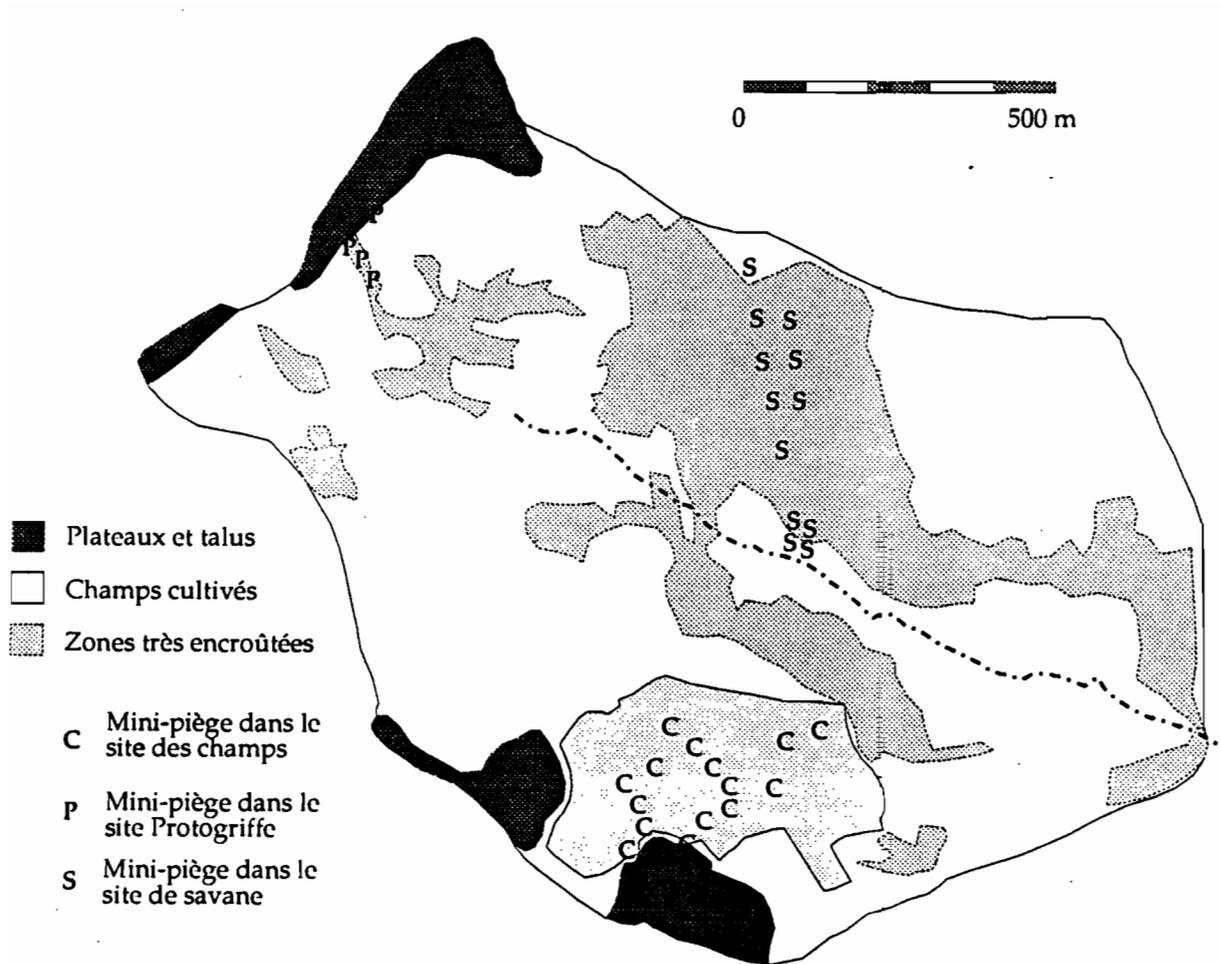


Figure 5. Schéma de localisation des mini-pièges.

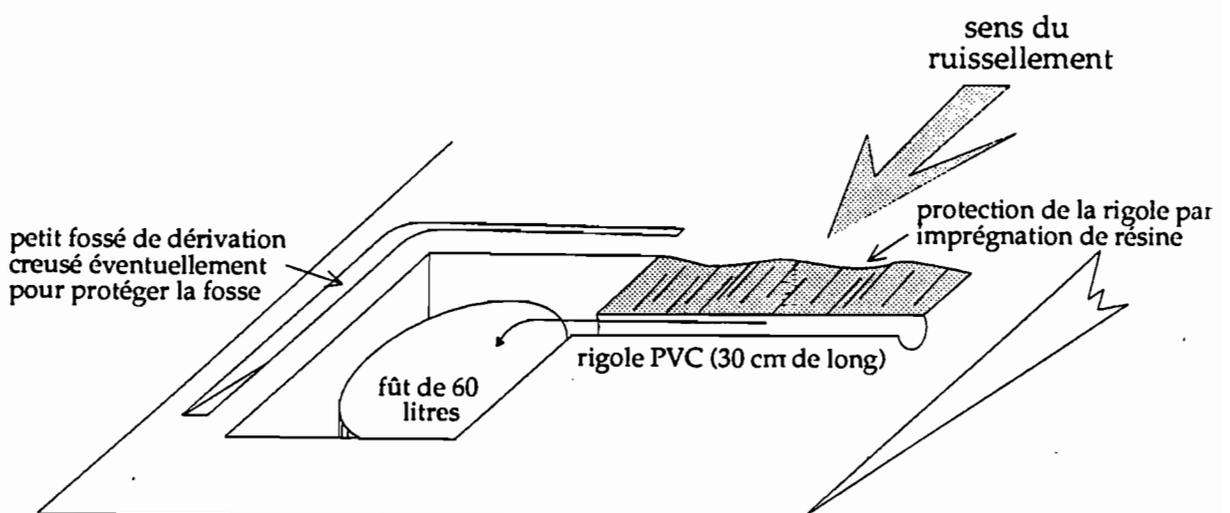


Figure 6 . Schéma d'installation d'un mini-piège.

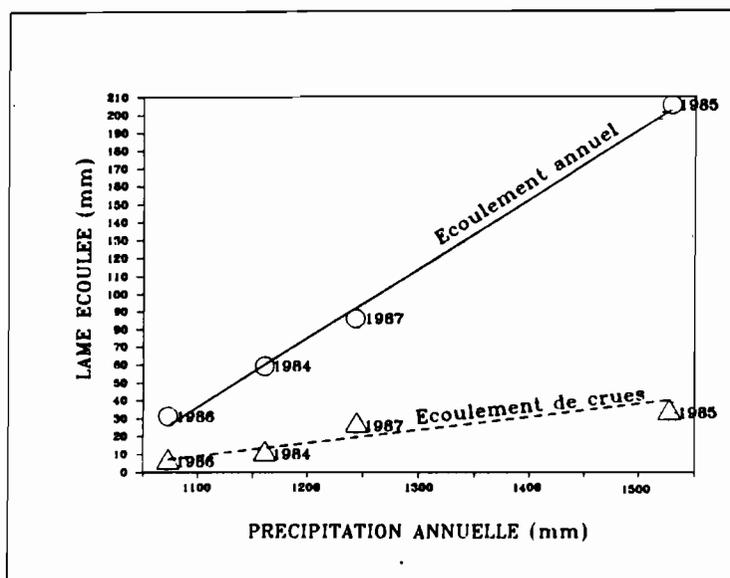


Figure 7. Bilan annuel. Relation précipitation/écoulement.

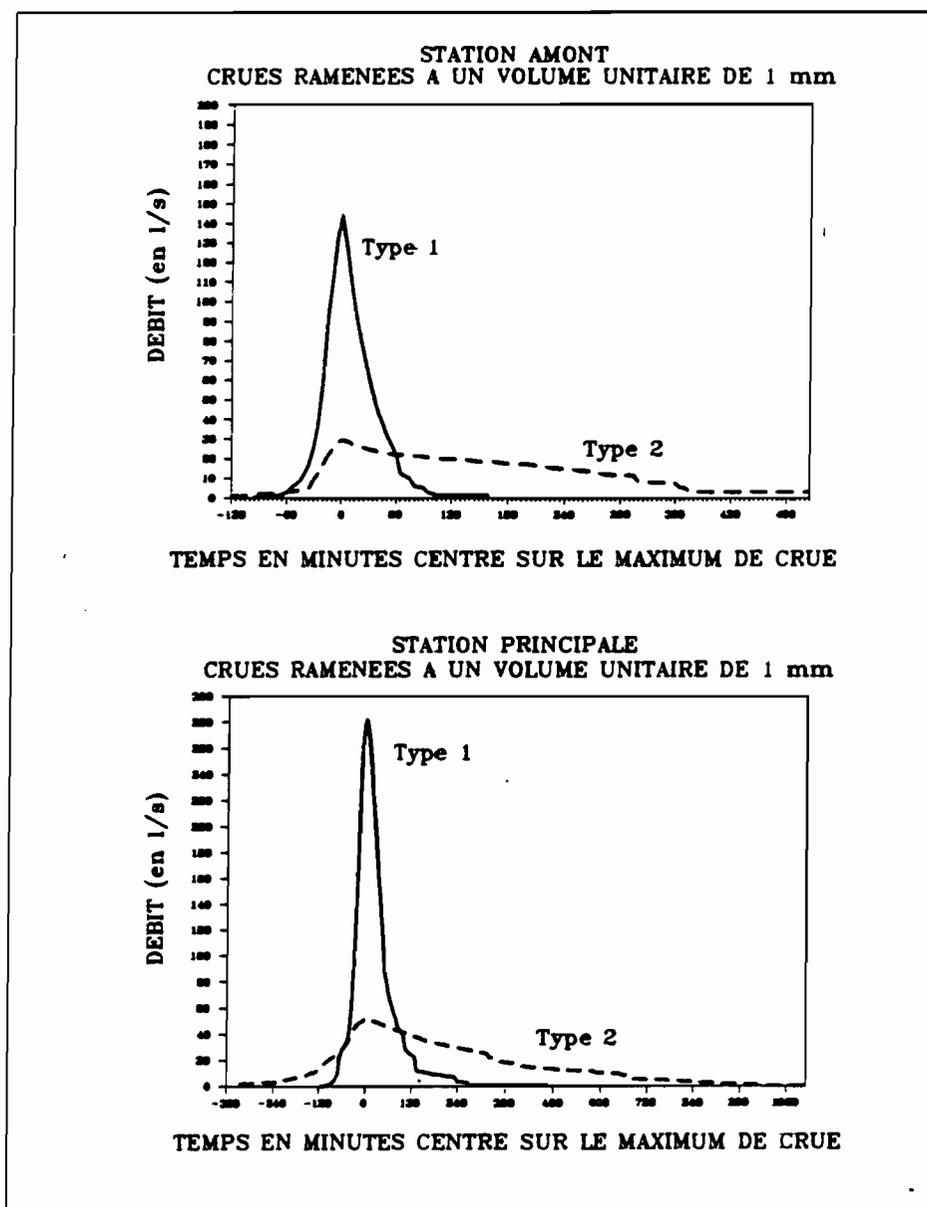


Figure 8 . Les deux type de crues.



PIREN



CRSTOM



ACTION THEMATIQUE PROGRAMMEE

**INFLUENCE A L'ECHELLE REGIONALE DES COUVERTURES
PEDOLOGIQUES ET VEGETALES SUR LES BILANS
HYDRIQUES ET MINERAUX DES SOLS**

JUIN 1986 - JUIN 1989

RAPPORT FINAL

Edité par G. VACHAUD
Institut de Mécanique de Grenoble
Unité Mixte 101 (CNRS - Université Joseph
Fourier, Institut National Polytechnique de
Grenoble)
BP 53 X - 38041 GRENOBLE CX