

LE FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE A L'ECHELLE DU VERSANT

Olivier Planchon⁽¹⁾ et *Jean-Louis Janeau*⁽²⁾

(1) ORSTOM, B.P. 5045, 34032 Montpellier Cedex 1

(2) ORSTOM, Antenne auprès de l'Institut d'Ecologie, Apartado postal 632, 34100 Durango, DGO, Mexique.

INTRODUCTION

Valentin *et al.* (1990) ont montré comment l'association de l'étude des états de surface et de la simulation de pluie permet d'identifier les principales caractéristiques hydrodynamiques de la surface du sol à l'échelle du mètre carré, et de replacer ces caractéristiques dans l'organisation générale des versants.

Cependant, la possibilité de prédéterminer le ruissellement produit sur une placette d'un mètre carré n'aboutit pas automatiquement à la prédétermination de la réponse hydrologique de l'ensemble du versant.

On peut même partir de l'hypothèse inverse (à savoir, que, dans ce milieu, la connaissance des caractéristiques hydrodynamiques de la surface du sol à l'échelle du mètre carré est de peu d'utilité pour une étude menée à l'échelle du bassin), en se fondant pour cela sur les travaux d'Albergel (1987) : une simple règle de trois permettant l'extension des résultats d'un mètre carré à un bassin complet (le "Modèle simulateur"), sans prise en compte de la physique de la propagation du ruissellement entre les mètres carrés consécutifs qui composent le versant, n'est satisfaisante que dans là où les coefficients de ruissellement sont forts, les surfaces relativement homogènes et où l'on observe une imperméabilisation croissante des sols vers l'aval. Les travaux de Collinet (1986) sur la comparaison des résultats de simulation de pluie à deux échelles différentes (1 et 50 m²) permettent d'ajouter une contrainte supplémentaire : l'absence de rugosité. Ces conditions particulières se rencontrent fréquemment en zone sahélienne, ce qui a permis à ce modèle simple d'atteindre le succès qu'on lui connaît.

A Booro-Borotou, les conditions d'application du "modèle simulateur" ne sont pas remplies : les versants présentent un minimum d'infiltrabilité à la mi-versant, et non à l'aval, et le bassin est perméable au sens du bilan hydrologique. Il est donc nécessaire d'étudier le devenir du ruissellement du haut en bas du versant. L'enjeu d'une telle étude est une démarche cohérente, reposant sur des bases expérimentales, pour la modélisation du ruissellement sur les versants de la zone de savane humide.

En d'autres termes, nous cherchons une réponse pratique à la question suivante : les résultats de simulation de pluie sont-ils utiles, à quel niveau et au prix de quelles observations complémentaires, pour la modélisation hydrologique des petits bassins versants de savane humide ?

Nous avons choisi de mener cette étude par des observations sous pluie naturelle. Elles consistent à intercepter le flux de ruissellement au cours de sa propagation vers le bas de la pente, au moyen d'un dispositif expérimental appelé "mini-piège".

L'absence d'une méthodologie déjà éprouvée dans ce domaine nous a conduits à limiter nos ambitions à l'étude de quelques sites choisis avant tout pour leur valeur de modèle.

Dans cet article, après la description de la méthode et des sites de mesures, les résultats sont présentés. Dans la discussion qui suit, d'autres résultats, obtenus par les chercheurs de l'équipe HYPERVAV, sont utilisés pour mettre en évidence les relations entre les surfaces unitaires, le modelé, et le fonctionnement hydrodynamique d'un versant.

MATERIEL ET METHODE : LES MINI-PIEGES

Objectif et installations

Un mini-piège 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. Il s'agit donc d'une mesure de flux ruisselé. Plusieurs mini-pièges disposés le long de la pente permettent de mettre en relation le flux ruisselé et la position du mini-piège, caractérisée par une longueur de pente. S'il n'y a pas réinfiltration du ruissellement durant son parcours, comme le suppose le "modèle simulateur", le flux ruisselé doit être une fonction strictement croissante de la longueur de pente.

Le schéma général d'installation d'un mini-piège est présenté sur la figure 1. La longueur de la rigole interceptant le ruissellement est de 30 cm. Cette valeur est choisie volontairement faible pour minimiser les coûts d'installation et de maintenance, et permettre ainsi la multiplication des points de mesure. Elle correspond à peu près à l'écartement moyen séparant deux touffes d'herbe dans les zones de savane à herbacées cespiteuses¹ ; dans ce cas, la rigole collecte le ruissellement qui passe entre les deux touffes.

L'eau est recueillie dans un bidon de 60 litres disposé au fond d'une petite fosse aveugle. Le bidon doit être lesté de façon à ne pas flotter, et détruire l'installation, si la fosse se remplit plus vite que le bidon.

1 Herbacée cespiteuse : herbacée ayant une structure en touffes bien individualisées, par opposition à unicaule (à une seule tige).

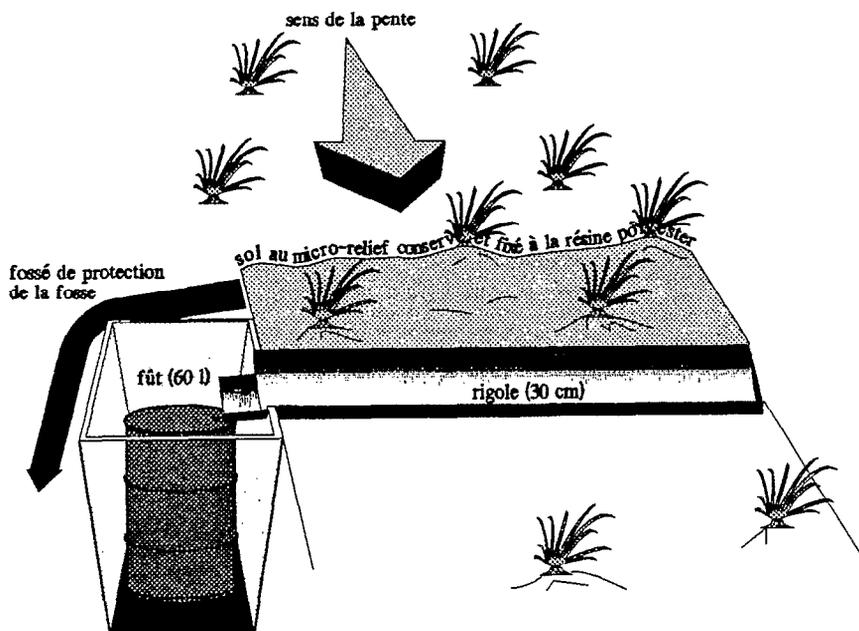
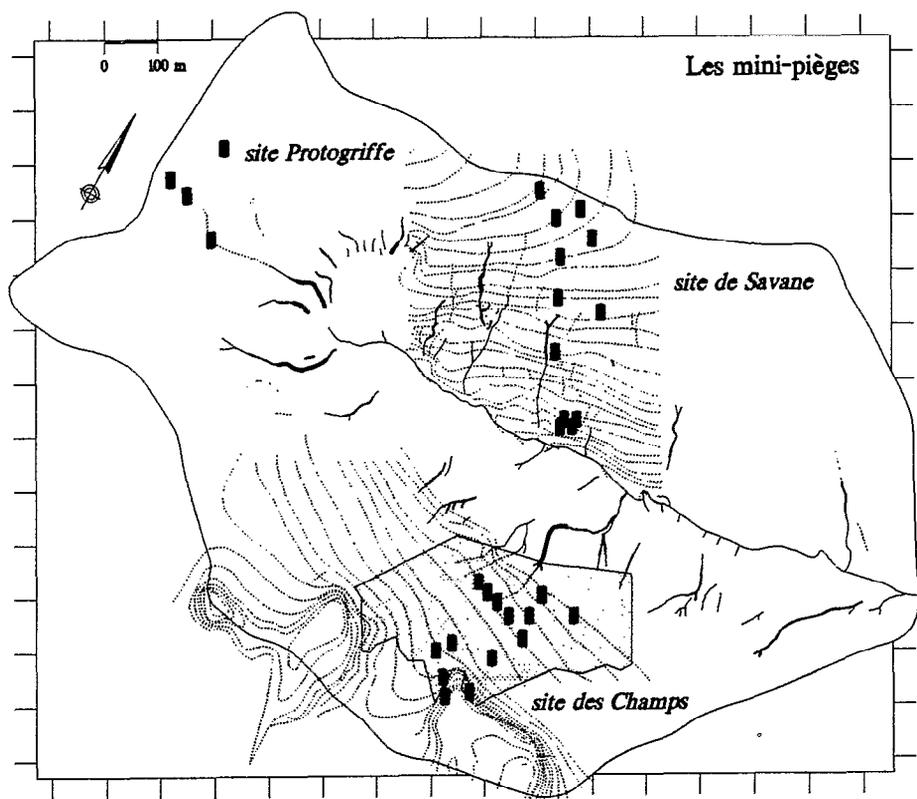


Figure 1. Localisation et installation des minipièges.

Méthodes de mesure et d'interprétation des résultats

Après une averse, trois cas peuvent être envisagés : le bidon peut être vide, contenir de l'eau sans avoir débordé, ou avoir débordé. Le volume d'eau ayant traversé la rigole pendant l'averse est donc mesuré selon trois classes : 0, de 0 à 60 litres, et supérieur à 60 litres.

Si l'on considère l'ensemble des averses, on peut calculer le nombre de fois que chacun de ces trois états a été observé pour chaque mini-piège au cours de la période de temps étudiée. Ce nombre est exprimé en pourcentage du nombre total d'averses observées. Chaque mini-piège est ainsi caractérisé par trois nombres, dont la somme est égale à 100 % ; le mini-piège peut être représenté sur un diagramme ternaire, comme le montre la figure 2.

Cette représentation étant un peu particulière, il est utile de s'y attarder avant de présenter nos résultats. Imaginons pour cela un versant homogène, de pente constante, et cherchons quelle serait la position sur le diagramme de trois mini-pièges H, M et B, disposés respectivement en haut, à mi-pente et en bas de ce versant.

Si les conditions initiales sont identiques en tout point, le ruissellement apparaît simultanément sur l'ensemble du versant lorsqu'un seuil est franchi (pluie limite de ruissellement, intensité maximale d'infiltration, ...). Il en résulte que le nombre d'averses n'ayant pas provoqué de ruissellement est le même pour tous les mini-pièges. Les trois mini-pièges de notre exemple sont donc situés sur un axe défini par une valeur unique de la variable "Vide", caractéristique du versant.

Sur l'axe "débordé" du diagramme, la position d'un mini-piège exprime la probabilité que le volume ruisselé au cours d'une averse excède 60 litres, et fasse déborder le bidon. Si l'on suppose que le ruissellement se propage sans se réinfiltrer, et que l'infiltration est indépendante de la hauteur de la lame d'eau à la surface du sol, la position d'un mini-piège sur l'axe "débordé" du diagramme est une fonction strictement croissante de la longueur de pente².

La figure 2 illustre la position des mini-pièges H, M et B selon ce schéma théorique : "Vide" constant et "Débordé" croissant.

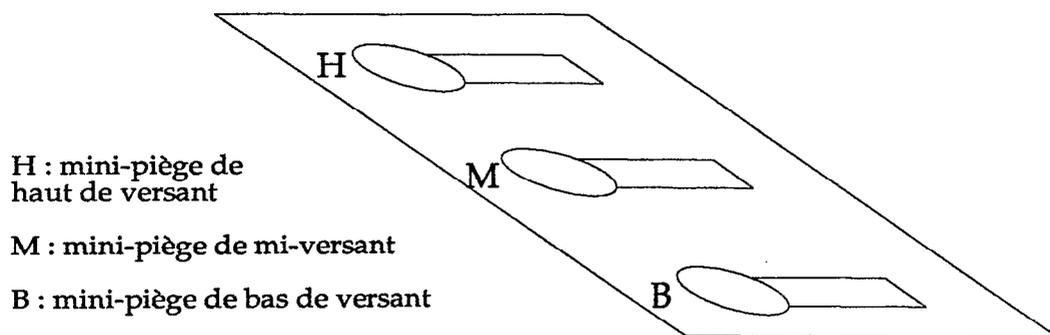
Choix des sites

Le choix des sites a répondu à un double objectif :

- tester l'aptitude de cette méthode de mesure à mettre en évidence le cumul du ruissellement le long de la pente. Il fallait pour cela choisir un site témoin pour lequel on pouvait raisonnablement supposer un fonctionnement de ce type ;
- mettre en évidence, par comparaison au témoin, le comportement des zones de savane présentant un micro-relief marqué, et une plus ou moins grande hétérogénéité dans la répartition des sols et des états de surface unitaires.

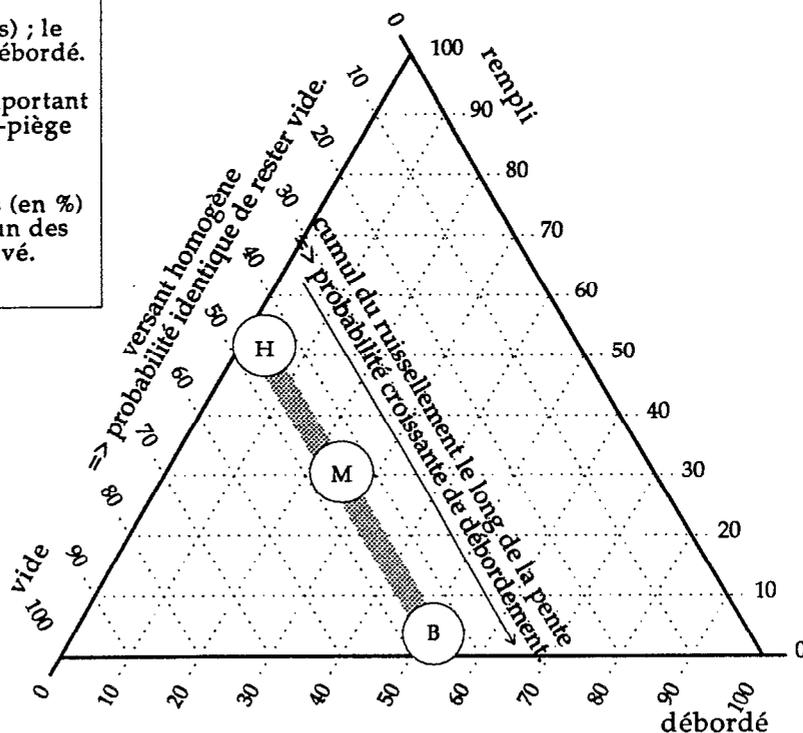
Pour répondre à ces objectifs, trois sites ont été équipés : le site de champs, le site protogriffe et le site de savane.

2 Fonction strictement croissante, mais pas proportionnelle, car elle dépend de la fonction de répartition des caractéristiques des averses et des caractéristiques de l'infiltration sur le versant.



Localisation de trois mini-pièges sur un versant homogène fictif.

vide : pas de ruissellement
 rempli : ruissellement peu important (< 60 litres) ; le mini-piège n'a pas débordé.
 débordé : ruissellement important (> 60 litres) ; le mini-piège a débordé.
 0 à 100 : nombre d'averses (en %) pour lesquelles chacun des trois états a été observé.



présentation des résultats sur un diagramme ternaire : cas de l'exemple théorique ci-dessus.

Figure 2. Exemple théorique et mode de représentation des résultats.

Le site des champs

Le site a été choisi comme témoin. Il est situé à l'amont de la rupture de pente de mi-versant et sa couverture pédologique est relativement homogène. Il ne présente pas de formes de ruissellement concentré. Seule la surface unitaire de type ERO⁽³⁾ est représentée et il n'y a aucun micro-relief. Ce site est équipé de 14 mini-pièges.

Le site protogriffe

Le site protogriffe est situé sur le versant de tête de vallée et a été équipé de 4 mini-pièges. La séquence observée débute au talus du plateau cuirassé qui domine le bassin, et suit un "couloir" de savane claire d'une dizaine de mètres de largeur, limité de part et d'autre par une végétation plus boisée.

Sur le talus, les sols sont ferrallitiques, et la végétation boisée ; les herbacées sont hautes et ont un port tombant. Une simulation de pluie effectuée sur un autre de ces talus (Chevallier, 1988), indique une infiltrabilité importante malgré les fortes pentes. Deux mini-pièges y sont installés.

Dans le "couloir" de savane claire, la seule surface unitaire représentée est ERO, c'est-à-dire la même que pour le site des champs. La végétation y est en revanche naturelle ; les herbacées sont *Hyparrhenia smithiana* et quelques autres espèces de structure voisine : cespiteuse à port dressé et feuilles étroites. Le long de ce couloir, l'organisation des touffes d'herbe détermine un micro-relief de 3 à 5 cm d'amplitude orienté dans le sens de la pente sous la contrainte du ruissellement. Une simulation de pluie effectuée en fin de saison des pluies (Planchon, 1989), indique que le coefficient de ruissellement stabilisé Rx est de 100% en fin d'averse pour la partie aval de la séquence. Le "couloir" est équipé de deux mini-pièges.

Le site de savane

Le site de savane est situé dans un milieu à végétation ouverte et à réorganisations pelliculaires superficielles permanentes ; il est équipé de 12 mini-pièges. Les herbacées y sont du même type que dans la partie aval du site protogriffe, décrit précédemment, mais les ligneux peuvent appartenir à des faciès végétaux différents, allant de la savane arbustive claire à la savane arborée basse. Le micro-relief lié aux herbacées est marqué ; les surfaces unitaires sont de type ST2 ou ST3 (caractérisées respectivement par la dominance des croûtes à deux ou trois micro-horizons (Casenave et Valentin, 1989), et présentent localement quelques croûtes de type ERO.

En résumé

Nous retiendrons pour ces trois sites les caractères suivants :

- le site des champs : lisse, uniforme pour la surface et les sols ;
- le site protogriffe : rugueux, imperméabilisation croissante des sols vers l'aval ;
- le site de savane : rugueux, appartenant à une même unité cartographique pour la surface et les sols mais présentant une certaine hétérogénéité dans la structure de la végétation ligneuse et le type de surface unitaire.

3 Surface de type érosion, définie comme présentant moins de 20% de turrucules de vers, moins de 40% de charge grossière, et recouverte d'une croûte d'érosion (croûte à un seul microhorizon, plasmique, lisse ; Casenave et Valentin, 1989).

Les trois sites et les mini-pièges dont ils sont équipés sont localisés sur la carte de la figure 1a.

RESULTATS

Les résultats sont représentés sur les diagrammes de la figure 3. Les ronds blancs représentent les mini-pièges les plus hauts sur la pente dans chacun des sites, les ronds noirs représentent les plus bas, et quatre niveaux de gris intermédiaires permettent de comparer la longueur de pente qui caractérise chacun des mini-piège. De plus, les mini-pièges situés rigoureusement sur la même ligne de pente sont reliés par un trait plein.

Le site des champs

La figure 3a illustre les résultats obtenus pour le site des champs. On constate que le schéma théorique présenté sur la figure 2 est respecté pour ce site : le long d'une même ligne de pente (le long des traits pleins), les mini-pièges débordent d'autant plus souvent qu'ils sont plus bas dans la pente et, à longueur de pente égale (pour les points de même niveau de gris), le nombre de fois que le mini-piège a débordé reste à peu près constant.

Le site protogriffe

La figure 3b illustre les résultats obtenus sur le site protogriffe. On constate que le diagramme présente encore une organisation selon la longueur de la pente, mais que cette organisation diffère de celle que nous avons présentée dans le schéma théorique :

- les mini-pièges sont d'autant moins souvent vides qu'ils sont situés vers le bas de la séquence, ce qui s'interprète en considérant l'impérméabilisation croissante des sols décrite plus haut ;
- ils débordent d'autant plus fréquemment qu'ils sont situés vers le bas de la séquence. Ceci est conforme au schéma théorique, mais peut également être interprété comme l'expression de l'impérméabilisation croissante des sols vers l'aval. Face à cette alternative, une modélisation de la propagation de l'onde de ruissellement sur un versant dont l'infiltrabilité n'est pas uniforme serait nécessaire.

Le site de savane

Sur le site de savane en revanche, le schéma théorique n'est plus respecté (figure 3c) :

- en haut du versant (points blancs), les mini-pièges sont souvent vides (près de 9 fois sur 10). Pour les 10% restant, l'un d'entre eux déborde toujours et l'autre pratiquement jamais ;
- de l'amont vers l'aval du versant, même les mini-pièges situés exactement sur la même ligne de pente ne sont pas alignés sur l'axe théorique, ce qui signifie que les conditions locales d'infiltration dominent sur l'organisation générale du ruissellement à l'échelle du versant ;

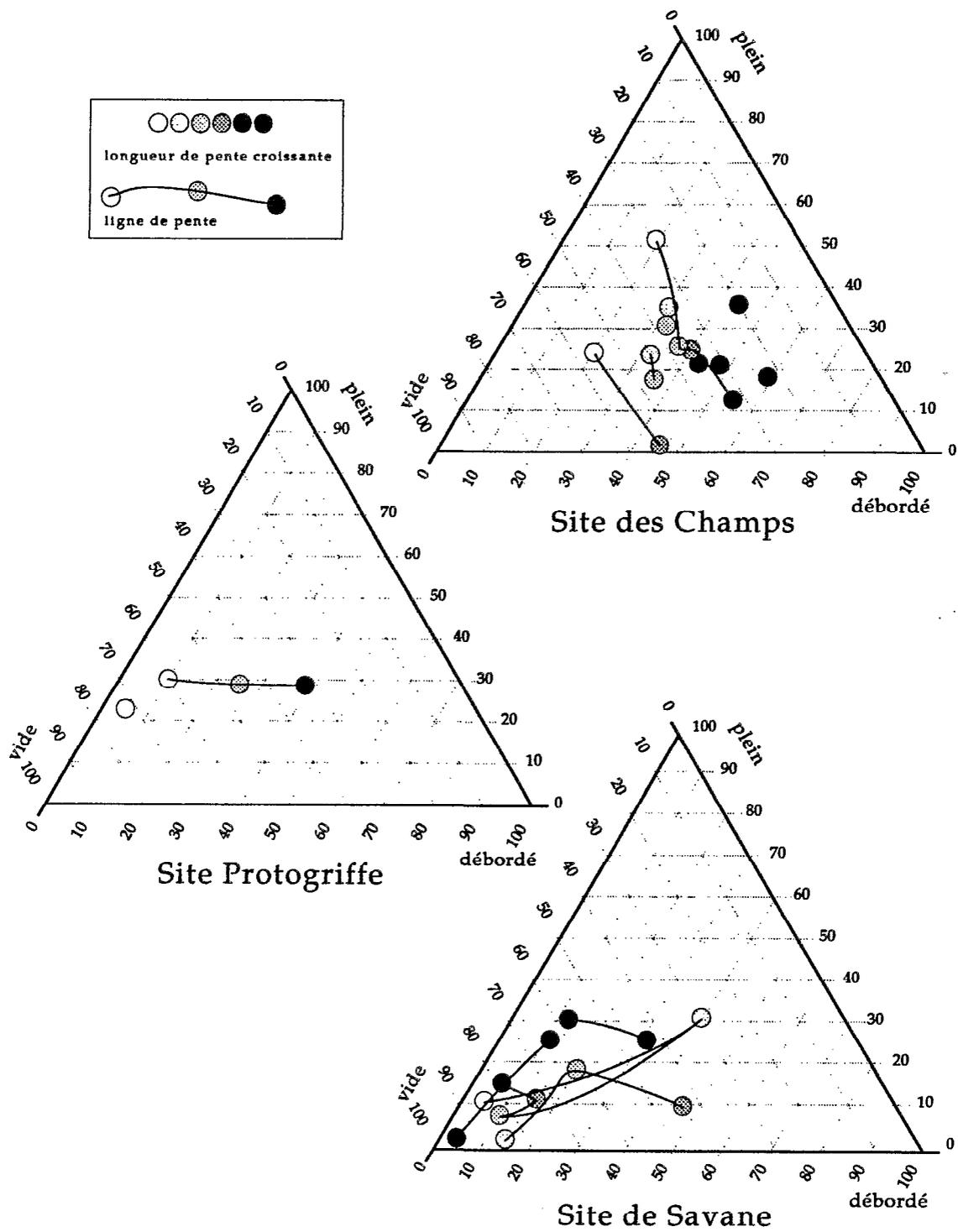


Figure 3. Résultats acquis à l'aide des mini-pièges.

- en bas du versant (points noirs), les mini-pièges débordent moins d'une fois sur trois, et trois d'entre eux moins de deux fois sur 10. Ces valeurs sont à comparer au résultat du site des champs, pour lequel les mini-pièges situés les plus bas sur le site, c'est-à-dire juste à l'amont de la rupture de pente de mi-versant, débordent près de deux fois sur trois. Ceci signifie, là encore, que quelles que soient les modalités du ruissellement dans la partie supérieure du versant, celui-ci est susceptible de se réinfiltrer avant d'atteindre le bas de la pente.

DISCUSSION

D'un mètre carré à l'autre

Les résultats du site des champs montrent que les mini-pièges sont à même de mettre en évidence l'influence de la longueur de pente sur l'augmentation du flux de ruissellement le long de la pente. Ce type de fonctionnement apparaît dans les champs, site qui a été caractérisé, rappelons-le, par l'homogénéité de ses sols et de sa surface, et par l'absence de micro-relief.

Le phénomène est d'autant moins bien mis en évidence que la surface est rugueuse (site protogriffe et site de savane), et que la surface (site de savane), ou les sols (site protogriffe), présentent une certaine hétérogénéité.

Ce résultat peut être comparé à ceux de Collinet (1986). Cet auteur a effectué des simulations de pluies avec deux simulateurs différents, l'un utilisant des parcelles de 1 m² et l'autre de 50 m². Il observe que sur les parcelles lisses, les écoulements produits par les deux types de simulateur sont proportionnels à leur surface respective, tandis que sur les parcelles rugueuses, la parcelle de 1 m² ruisselle proportionnellement davantage que celle de 50 m².

Une question demeure cependant : que devient l'eau qui ne se propage pas jusqu'à l'aval du versant, et, plus précisément, quelles sont les modalités de sa réinfiltration ?

L'étude de la répartition de la porosité nous permet de proposer une réponse à cette question. Les paragraphes suivants abordent cette étude successivement à l'échelle du mètre carré et à l'échelle d'une zone réputée homogène dans une représentation cartographique.

Répartition de la porosité à l'échelle du mètre carré

Dans la savane ouverte, la végétation herbacée est cespiteuse à port dressé, caractérisée par *Hypparrhenia Smithiana* et d'autres espèces de même structure, comme *Andropogon tectorum*. Les touffes d'herbe sont souvent surélevées de quelques centimètres par rapport à la surface du sol. D'autre part, la base des touffes n'est jamais exposée ni au soleil ni à la pluie, si bien que c'est un lieu privilégié pour le développement de la faune du sol, en particulier les vers de terre. À l'opposé, la zone située entre les touffes est exposée à l'impact des gouttes de pluies pendant une grande partie de l'année (voire toute l'année lorsque les touffes sont très espacées). Ces zones subissent des réorganisations pelliculaires importantes et la porosité d'origine faunique qui s'établit en fin de saison des pluies est obturée dès les premières pluies de fin de saison sèche, qui apparaissent après les feux de brousse.

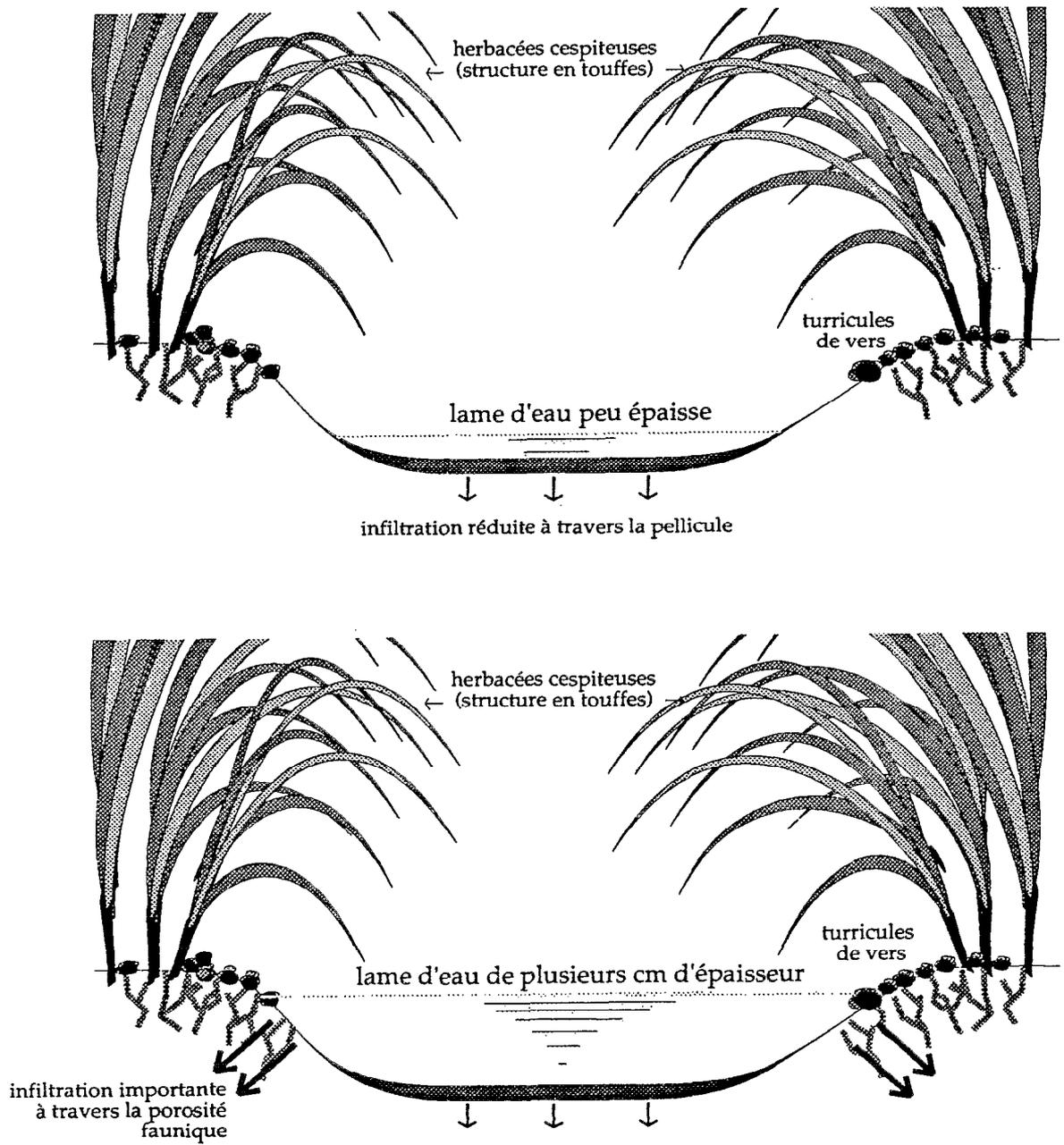


Schéma explicatif de l'influence de la hauteur de la lame d'eau sur l'infiltration, dans le cas d'une surface présentant un micro-relief important

Figure 4. Coupe entre deux touffes d'herbe.

On observe donc que la porosité de la surface du sol varie très largement selon la proximité d'une touffe d'herbe. Par ailleurs, les pores de fort diamètre se trouvent être surélevés de plusieurs millimètres par rapport aux pores des pellicules, de diamètre plus petit.

Il en résulte que la porosité réellement accessible à une nappe d'eau dépend de son épaisseur : si elle est faible, seuls les pores de la pellicule seront accessibles et l'infiltration sera faible ; si l'épaisseur de la nappe d'eau est importante, celle-ci aura accès aux pores de fort diamètre situés à la base des touffes et l'infiltrabilité ne sera plus limitée par la porosité de surface. Ceci est exprimé sur le schéma de la figure 4.

La conséquence de ce type de comportement est que, au fur et à mesure que la longueur de pente augmente, l'épaisseur de la lame ruisselante augmente également, et permet l'accès aux pores de plus grand diamètre. L'épaisseur de la lame d'eau et, par là même, le flux de ruissellement, se stabilisent à des valeurs bien inférieures à celles prévues par les schémas les plus simples. Cette hypothèse de fonctionnement explique les différences de résultat entre les sites rugueux (site protogriffe et site de savane) et le site témoin lisse (site des champs).

Cette hypothèse d'accessibilité différentielle de la porosité trouve des éléments de confirmation dans les travaux de Janeau et Valentin (1987), qui ont mesuré spécifiquement l'infiltration de l'eau interceptée par une touffe d'*Hyparrhenia smithiana*. Celle-ci s'est révélée totale quelque soit l'intensité de la pluie incidente, et malgré la faible perméabilité de la surface environnante. L'hypothèse reste pourtant de peu de poids face à la complexité des phénomènes physiques mis en jeu lors de l'interaction entre la pluie, le sol, et une nappe d'eau circulant à la surface de ce dernier. Le point commun entre toutes les hypothèses que nous pourrions émettre est qu'elles nécessitent une démarche expérimentale nouvelle, qui consisterait à faire varier à la fois l'intensité de la pluie et l'épaisseur de la lame d'eau au sol. Ceci est possible si l'on songe à compléter les protocoles de simulation de pluie couramment utilisés :

- soit en ajoutant, à l'amont de la parcelle, un débit connu de façon à simuler un apport d'eau venant de l'amont, et à provoquer l'augmentation de l'épaisseur de la lame d'eau ;
- soit en mesurant directement l'épaisseur de la lame d'eau, et en modifiant l'exutoire de la parcelle de simulation de pluie de façon à pouvoir en modifier le niveau de base à volonté, par exemple en équipant cet exutoire d'un batardeau réglable en hauteur.

La seconde méthode présenterait l'intérêt de mesurer directement le phénomène que l'on cherche à étudier, c'est-à-dire la variation d'infiltrabilité en fonction de l'épaisseur de la lame d'eau.

Répartition de la porosité dans une zone réputée homogène

La répartition de la porosité à l'échelle de la touffe d'herbe n'est pas la seule mise en cause dans notre expérimentation, en effet, le site protogriffe et le site de savane présentent une végétation herbacée identique et un micro-relief comparable. Or si, sur le premier, l'influence de la longueur de pente n'est qu'atténuée, elle disparaît complètement sur le second.

Lorsque l'on regarde en détail les descriptions des différentes cartes concernant cette zone, on constate que la végétation n'y est pas homogène, et que la densité des ligneux dans certaines zones est intermédiaire entre des valeurs faibles, qui permettent le

développement des espèces herbacées caractéristiques des milieux ouverts, et les valeurs plus élevées qui caractérisent les milieux fermés. Le milieu se présente alors comme une mosaïque, à l'échelle du groupement de quelques arbres. On y trouve des îlots plus ombragés sous lesquels peuvent se développer des herbacées à port tombant comme *Andropogon gayanus*, qui couvrent bien le sol et évitent la formation de pellicules.

Ces îlots sont minoritaires dans la zone étudiée mais la probabilité pour que le ruissellement traverse l'un ou l'autre d'entre eux durant son parcours n'est pas négligeable. Leur infiltrabilité importante est susceptible d'atténuer fortement ou même de faire disparaître l'onde de ruissellement.

Ce phénomène peut expliquer le fait que, sur le site de savane ouverte, chaque mini-piège réagit selon les conditions d'infiltrabilité locale plutôt qu'en fonction de sa position topographique.

Conclusion : de l'utilisation de la simulation de pluie

Le site des champs a un comportement que l'on peut, de façon un peu caricaturale, qualifier de "sahélien". Il présente en effet une infiltrabilité réduite, principalement régie par ses caractéristiques de surface, et le flux de ruissellement y augmente régulièrement de l'amont vers l'aval. Ceci permet de supposer que les caractéristiques locales de l'infiltration, mesurées par le simulateur de pluie, sont suffisantes pour reconstituer les débits mesurés. C'est exactement la démarche du "Modèle simulateur", utilisé avec succès sur un grand nombre de bassins sahéliens.

Ce comportement "sahélien" des champs peut être rapproché de nombreux autres travaux concernant la conservation de l'eau et des sols. En réduisant le stock organique, la mise en culture des sols entraîne un certain décalage, voire une certaine azonalité des croûtes superficielles (Valentin, 1989). Ainsi, près de Lomé, les terres de Barre, cultivées sans restitution organique ni période de jachère, présentent une forme d'encroûtement et une infiltration très réduite, analogues à celles observées dans les régions sahéliennes (Poss *et al.*, à paraître).

L'élément nouveau apporté par notre étude est la mise en évidence de phénomènes plus complexes dans la composition du ruissellement "d'un mètre carré à l'autre" lorsque le milieu présente une végétation naturelle importante. Notre analyse nous a permis de proposer la répartition de la porosité, tant à l'échelle du mètre carré qu'à celle du versant, pour expliquer que, dans ce type de milieu, le ruissellement n'est pas forcément cumulatif de l'amont vers l'aval, même au sein d'une zone réputée homogène à l'échelle cartographique. Un enrichissement des protocoles de simulation de pluie s'avère nécessaire pour poursuivre la recherche dans cette voie.

Le long d'un versant complet

Nous avons pour l'instant limité la discussion de nos résultats à des sources de variabilité pouvant être observées à l'intérieur d'une unité homogène pour les sols et les états de surface.

A l'échelle du versant, deux nouvelles sources de variabilité apparaissent : d'une part la répartition des sols sur le versant, et d'autre part, latéralement, l'existence de ruissellement concentré dans des ravines d'érosion. Nous considérerons successivement la variabilité longitudinale, qui fait ici intervenir la répartition des sols, et la variabilité latérale qui fait intervenir le type d'écoulement, diffus ou concentré.

Du haut en bas du versant

A Booro-Borotou, le bas des versants est occupé par des formations pédologiques sableuses très filtrantes, susceptibles de fonctionner comme de véritables éponges et d'absorber tout ruissellement venant de l'amont.

Les mini-pièges nous ont permis de vérifier ce type de fonctionnement. Rappelons (figure 3c) que les mini-pièges de bas de versant débordent rarement, ce qui indique que le flux de ruissellement qui parvient au bas-fond est sous l'influence des caractéristiques de l'infiltration du seul bas de versant. On peut ajouter qu'il a été constaté de visu (Planchon, 1989) que les écoulements dans les ravines d'érosion de la tête du bassin s'infiltrent en totalité avant de rejoindre le cours d'eau. Sur la foi de témoignages recueillis auprès de paysans ayant cultivé des champs dans le bas-fond, ce phénomène ne connaît que de rares exceptions. Le simple fait qu'un champ de riz situé cent mètres à l'aval de l'exutoire d'une de ces ravines ait pu être cultivé plusieurs années donne foi au témoignage.

Il est donc évident que la localisation en bas de pente de cette zone à forte infiltrabilité est primordiale, et doit être prise en compte dans toutes les tentatives de modélisation, qu'il s'agisse :

- des écoulements de surface : dès lors que l'infiltrabilité n'est plus décroissante de l'amont vers l'aval, la localisation des différents états de surface devient au moins aussi importante que leur caractérisation, et doit être prise en compte au moyen d'un véritable modèle de propagation ;
- des transports solides le long des versants : Planchon (1988) montre en effet que les sédiments détachés du haut des versants sont susceptibles de se déposer en bas de pente plutôt que d'être exportés hors du bassin ;
- de l'hydrologie du bassin : la présence de ces matériaux très filtrants en bas de pente est probablement à l'origine du rôle particulièrement important joué, dans le fonctionnement hydrologique du bassin, par la nappe superficielle liée au cours d'eau (Chevallier, 1988). En effet, cette nappe se trouve être un passage obligé pour tous les transferts hydriques, qu'ils soient internes ou superficiels, et qu'ils arrivent sous forme diffuse ou concentrée.

Ruissellement diffus et ruissellement concentré

Les résultats qui ont été présentés concernent exclusivement le ruissellement diffus. Or, 80 protogriffes, ravineaux et ravines ont été dénombrés, soit une forme d'érosion tous les trente mètres le long de la rupture de pente de rive droite. A l'échelle du versant, ces formes d'érosion interviennent dans le transfert des écoulements vers la rivière.

Des observations menées le long des ravineaux et des ravines ont montré qu'elles sont effectivement fonctionnelles. Ce sont dans la plupart des cas les têtes d'incision qui subissent les écoulements les plus importants, l'incision elle-même permettant au contraire une infiltration rapide de l'écoulement, qui disparaît toujours avant d'avoir atteint le fond de vallée.

Le fonctionnement du système ravinaire n'est donc pas fondamentalement différent de celui du reste des versants, dans le sens où ni lui ni les versants ne sont susceptibles de fournir d'eau au cours d'eau par un chemin entièrement superficiel.

Le système ravinaire se distingue en revanche par une plus grande rapidité de propagation de l'écoulement, ce qui provoque, en particulier à la tête du bassin, un

apport d'eau important et rapide dans la vallée. Ce phénomène est susceptible de contribuer au gonflement rapide de la nappe durant l'averse. Chevallier *et al.* (1990) montrent comment ce type de fonctionnement peut servir de base à l'interprétation de la forme des crues à l'exutoire du bassin.

Hydrodynamique et modelé

Dans toute la discussion qui a précédé, nous n'avons cessé de mettre en évidence l'importance de l'infiltration. Tout d'abord en invoquant la répartition de la porosité aux échelles du mètre carré et du versant, puis en montrant que, quelles que soient les modalités du ruissellement sur les versants, l'infiltration est totale en bas de pente.

Cette importance de l'infiltration s'exprime d'ailleurs clairement dans le bilan hydrologique du bassin, où il apparaît que le ruissellement, évalué comme étant le volume total écoulé à l'exutoire pendant les crues, ne représente que 4% du bilan hydrologique du bassin (Chevallier, 1988).

Il est donc temps d'étudier le devenir de cette eau infiltrée ; plus particulièrement son rôle dans l'hydrodynamique des versants et ses relations avec l'évolution des sols et du modelé.

Nous présenterons pour cela le site de la Croix de Lorraine, pour lequel l'évolution pédogénétique des sols est très avancée, et fournit ainsi un bon exemple du fonctionnement hydrodynamique de systèmes particuliers, fonctionnant selon des axes perpendiculaires à celui du cours d'eau, et qui ont été dénommés talwegs secondaires (Planchon, 1989).

La toposéquence de la Croix de Lorraine présente les étagements suivants :

- un plateau cuirassé ;
- un haut de versant peu pentu et de pente constante ;
- une rupture de pente de mi-versant, cuirassée et entaillée par un ravineau de 50 cm de profondeur au maximum ;
- un bas de versant concave.

La granulométrie du bas de versant, présentée sur la figure 5 sous la forme d'isoteneur en argile, montre que le bas de versant s'appauvrit en argile selon deux mécanismes :

- une éluviation superficielle, due à l'infiltration. C'est la caractéristique du fonctionnement du système transformant amont (Fritsch *et al.*, 1986) ;
- une éluviation interne, due à la circulation interne d'eau sous la surface du sol. C'est ce deuxième mécanisme qui provoque le développement des formes en langue, remontant vers le haut du versant, et qui caractérisent le profil de la figure 6.

D'un point de vue morphogénétique, il est important de constater que le ravineau qui draine le système est situé à l'amont du talweg secondaire. L'incision disparaît peu après la rupture de pente, à l'endroit où commence à se développer le talweg secondaire. On peut donc formuler le schéma phénoménologique suivant :

- depuis le haut du versant : existence dans le sol d'un axe privilégié pour le drainage des eaux d'infiltration, et appauvrissement en fer et en argile le long de cet axe ;
- à l'aplomb du ravineau : alimentation de l'axe de drainage par l'eau s'infiltrant le long du ravineau ;

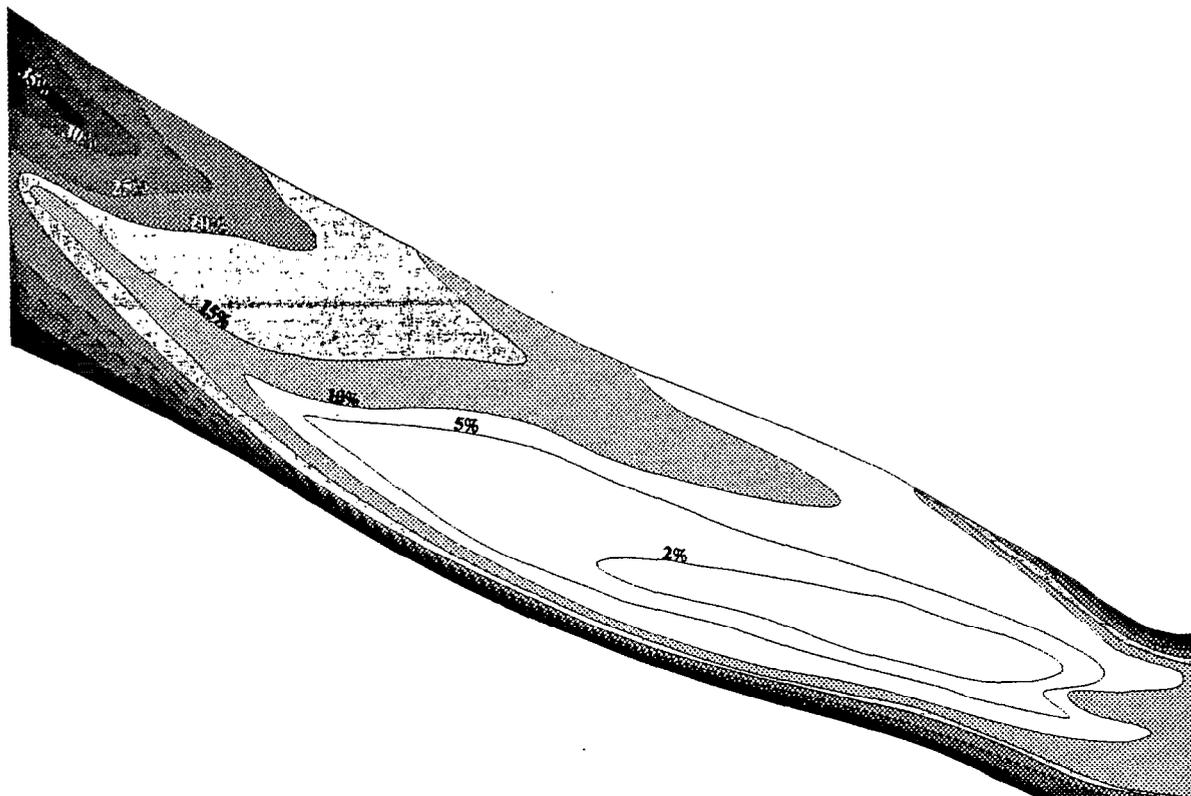


Figure 5. Teneurs en argile le long de la toposéquence de la Croix de Lorraine (d'après Fritsch)

- à l'aval de la disparition de l'incision du ravineau : l'activité érosive de l'axe de drainage est maximale. Suite à la disparition de l'argile, la surface du sol est abaissée et le talweg secondaire se différencie.

Modelé et état de surface unitaire

Au cours des différents paragraphes de cette discussion, nous avons abordé en premier lieu les états de surface élémentaires, et la répartition particulière de la porosité que l'on peut y observer ; nous avons ensuite éloigné notre regard pour considérer successivement des portions de versant réputées homogènes sur les documents cartographiques, puis le versant dans son ensemble. Nous avons été ainsi amenés à parler rapidement du rôle de l'eau infiltrée dans la morphogénèse du bassin. Pour finir cette discussion, nous reviendrons à notre point de départ en constatant, toujours sur le site de la Croix de Lorraine, l'influence du modelé sur les états de surface unitaires.

La figure 6 représente, sous forme de bloc diagramme, une cartographie des états de surface sur le talweg secondaire, établie par C. Valentin sur la base d'un relevé systématique tous les 10 mètres. On y observe une dégradation des états de surface sur les pentes les plus fortes qui bordent le talweg, avec l'apparition des surfaces de type ERO.

Ainsi, si nous avons émis l'hypothèse que le développement des talwegs secondaires correspond à un déterminisme interne dont le "moteur" est la circulation de l'eau à l'intérieur du sol le long d'axes privilégiés, on peut constater également que le système est auto-entretenu : l'érosion interne provoque la différenciation d'un talweg secondaire ; sur les versants les plus pentus de celui-ci se forment des réorganisations pelliculaires favorables au ruissellement, lequel atteint le fond du talweg secondaire, s'y infiltre et alimente ainsi l'axe de drainage.

CONCLUSION

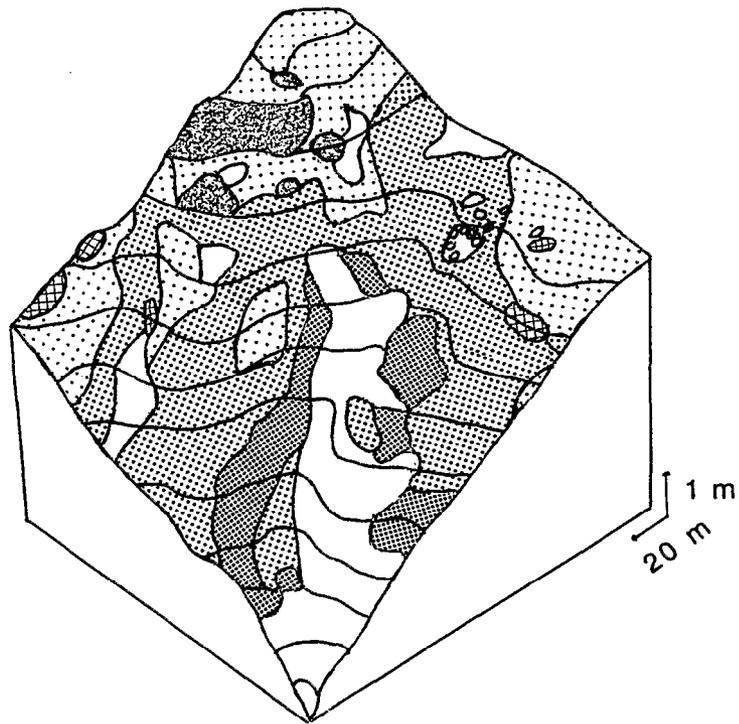
Dans cet article, nous avons tout d'abord présenté un nouveau type de mesure du ruissellement des versants sous averse naturelle. Nous avons ensuite intégré les conclusions tirées de ces résultats dans une vision globale de la dynamique de l'eau sur un versant. Nous avons enfin rapidement évoqué le rôle que pouvait avoir cette dynamique sur la morphogenèse et, en retour, le rôle du modelé sur les états de surfaces unitaires dont était partie l'analyse de nos résultats.

Cette approche nous permet d'émettre plusieurs conclusions, dont le thème général vise à une meilleure appréhension de ces phénomènes dans un objectif de modélisation.

Méthodologie

La première conclusion est méthodologique. Les mini-pièges installés à Booro-Borotou ne permettent pas de répondre à toutes les questions que l'on peut se poser au vu des premiers résultats ; ils ne donnent en particulier que des indications qualitatives sur le transfert du ruissellement le long d'un versant. Cette limite tient au contexte dans lequel ces mesures ont été réalisées : il s'agissait avant tout de mettre au point une nouvelle technique de mesure, et d'en tester l'intérêt. Cet objectif est atteint. L'étape suivante devra consister en un protocole d'observation plus intensif, dont l'objectif sera le test rigoureux de la portée et des limites de cette nouvelle méthode.

Les premiers résultats ont également mis en évidence une lacune dans les protocoles de simulation de pluie actuels : ceux-ci fournissent des caractéristiques de l'infiltration et du ruissellement qui ne tiennent pas compte de la position topographique de la parcelle étudiée. Il semble difficile, voir impossible à partir de ces seuls résultats, d'extrapoler le comportement de cette même parcelle lorsqu'une lame d'eau arrive de l'amont du versant. Cette limite est reconnue par les concepteurs même du simulateur de pluie ; l'analyse des résultats présentés dans cet article a permis de proposer une solution concrète pour dépasser ces limites, et obtenir des données pertinentes pour la modélisation de la propagation du ruissellement sur les versants.



équidistance des courbes de niveau : 1m

-  SANS ENCROÛTEMENT
-  ENCROÛTEMENT SAISONNIER
-  ENCROÛTEMENT PERMANENT FAIBLE
-  ENCROÛTEMENT PERMANENT FORT
-  AFFLEUREMENT DE CUIRASSE
-  AFFLEUREMENT DE PYROXÉNO-AMPHIBOLITE

Figure 6. Les encroûtements superficiels du site de la Croix de Lorraine (d'après Valentin).

Modélisation

La répartition des états de surface sur le versant, la propagation du ruissellement le long de la pente en fonction de l'état de surface et de son hétérogénéité, l'hydrodynamique interne et modelé sont à intégrer dans une même vue globale du fonctionnement des versants afin de comprendre celui-ci, et à plus forte raison pour le modéliser.

L'ensemble des phénomènes étant généralement appréhendés dans le sens de la pente, il est donc souhaitable de ne pas briser cette unité lors de la modélisation, par un découpage du domaine en mailles arbitraires. Le découpage de l'espace en "lanières", limitées de part et d'autre par des lignes de pente, semble donc mieux convenir dans ce type d'approche. Un tel découpage, dans une future modélisation, présente le triple avantage de :

- prendre en compte le versant dans toute sa longueur ;
- permettre une économie de temps de calcul en ne modélisant les transferts que dans le sens de la pente ;
- pouvoir être couplé à un modèle numérique de terrain, ce qui permet à ce type d'approche d'évoluer vers un autre type de recherches : la prise en compte du modelé dans la modélisation hydrologique.

Les bases analytiques de ce type d'approche existent déjà. Il y a donc lieu d'être optimiste, et d'espérer une concrétisation rapide à cette future recherche.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Albergel (J.)**, 1987. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au Km² étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. *Thèse doct.* Univ. Paris VI, 336 p., multigr.
- Casenave (A.), Valentin (C.)**, 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Paris, sér. *Didactiques*, 230 p.
- Chevallier (P.), Planchon (O.), Lapetite (J.M.)**, 1990. Le fonctionnement hydrologique du bassin versant. Cet ouvrage
- Chevallier (P.)**, 1988. Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide, Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). *Thèse*, Université de Montpellier.
- Collinet (J.)**, 1986. Hydrodynamique superficielle de quelques types de sols du Sahel africain, comparaison des données fournies par deux dimensions de parcelles de simulation de pluie. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, *Colloques et Séminaires*, p.117-153.
- 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.
- Janeau (J.L.), Valentin (C.)**, 1987. Relations entre les nids de *Trinervitermes* et la surface du sol : réorganisations, ruissellement et érosion. *Revue d'Ecol. et Biol. des Sols*, 24 (4) : 637-647, 4 tabl., 3 fig., 14 réf.
- Planchon (O.)**, 1989. Le relief, le paysage et les formes d'érosion linéaires : leur importance dans le fonctionnement d'un petit bassin versant (Booro-Borotou, Côte d'Ivoire). *Thèse*, USTL, Montpellier.
- 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 : *Sédiment budget*, Proc. Porto

- Alegre symp., déc. 1988. 10 p., 2 tabl., 4 fig., 6 réf.
- Poss (R.), Pleuvret (C.), Saragoni (H.),** à paraître. Influence des réorganisations superficielles dans la pénétration de l'eau dans les terres de Barre (Togo méridional). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*
- 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. Actes du 1^{er} séminaire franco-africain de pédologie tropicale. Lomé, 6-12 février 1989. ORSTOM, Collection *Colloques et Séminaires*. 243-252, 11 réf. 6 fig.
- Valentin (C.), Chevallier (P.), Fritsch (E.), Janeau (J.L.)**, 1990. Le fonctionnement hydrodynamique aux échelles ponctuelles. Cet ouvrage.