



## 6

### **La propagation du ruissellement le long d'un versant : nouvelles mesures et perspectives de modélisation**

O. PLANCHON

*ORSTOM Montpellier, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex, France*

#### **Caractérisation du ruissellement et de l'infiltration : état de l'art**

Au milieu des années 70, apparaissent simultanément à l'ORSTOM un concept et une technique : les états de surface et la caractérisation de leur fonctionnement hydrique par simulation de pluie sur un mètre carré. Aujourd'hui, la perspicacité de cette association n'est plus à démontrer. Au Sahel, les réorganisation pelliculaires, qui sont une clé dominante pour la détermination des états de surface, conditionnent directement la capacité d'infiltration des sols qu'elles recouvrent, indépendamment de la nature de ceux-ci. En zone soudano-guinéenne, les réorganisations pelliculaires sont en relation avec les sols, mais aussi avec l'activité faunique, la végétation, et d'autres éléments qui sont également pris en compte dans la description des états de surface. Si bien qu'il est encore possible dans cette zone climatique, de prédéterminer les résultats d'une simulation de pluie par la seule description des états de surface, et ceci avec une précision de 10 ou 20 %.

L'échelle du mètre carré est donc, encore une fois, hydrologiquement bien connue. On sait en caractériser le ruissellement, l'infiltration, leurs variabilités spatiales et saisonnières, et prédéterminer l'ensemble de ces caractéristiques avec une marge raisonnable.

Il reste que, à l'évidence, cette échelle unitaire, imposée par un instrument de mesure, n'est d'aucune utilité opérationnelle. Maintenant que les travaux portant sur cette échelle ont abouti à des résultats probants, on doit la considérer comme une échelle de mesure et non comme une échelle d'étude.

Les échelles d'études pour lesquelles l'échelle unitaire doit être un outil sont celles de la parcelle, du versant et du bassin versant.

D'une façon logique pour une technique relativement jeune, la maîtrise de l'outil est en avance sur son utilisation, particulièrement en hydrologie. Ainsi, la seule utilisation des résultats de simulation de pluie tentée à ce jour dans cette discipline est le « Modèle Simulateur », qui consiste en une simple moyenne pondérée des résultats locaux, étendus à l'ensemble d'un bassin versant. Malgré sa simplicité et le peu de crédit que l'on peut accorder aux concepts qui régissent la méthode, ce « Modèle » permet de prédéterminer des crues de projet sur des bassins versants peu perméables et dont la perméabilité locale décroît vers l'aval. C'est le cas d'un certain nombre de bassins versants sahéliens, sur lesquels le haut des versants est imperméabilisé par des réorganisations pelliculaires, tandis que le bas est occupé par des formations verticales peu perméables.

Forte de sa maîtrise de l'échelle unitaire, l'UR 2B de l'ORSTOM<sup>(1)</sup> développe des recherches météorologiques et numériques dans le but de mieux intégrer la dynamique des mètres carrés consécutifs, qu'elle connaît, dans celle des parcelles, des versants ou des petits bassins versant, qu'elle cherche à connaître.

Cet article comprendra deux volets. Le premier est météorologique. Il a pour objet d'observer les flux de ruissellement sous averse naturelle pour étudier les règles qui en régissent la propagation et l'infiltration. Le second est numérique, il vise la prise en compte des phénomènes observés dans la modélisation des versants.

## Mesure des flux de ruissellement sur un versant

### 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.

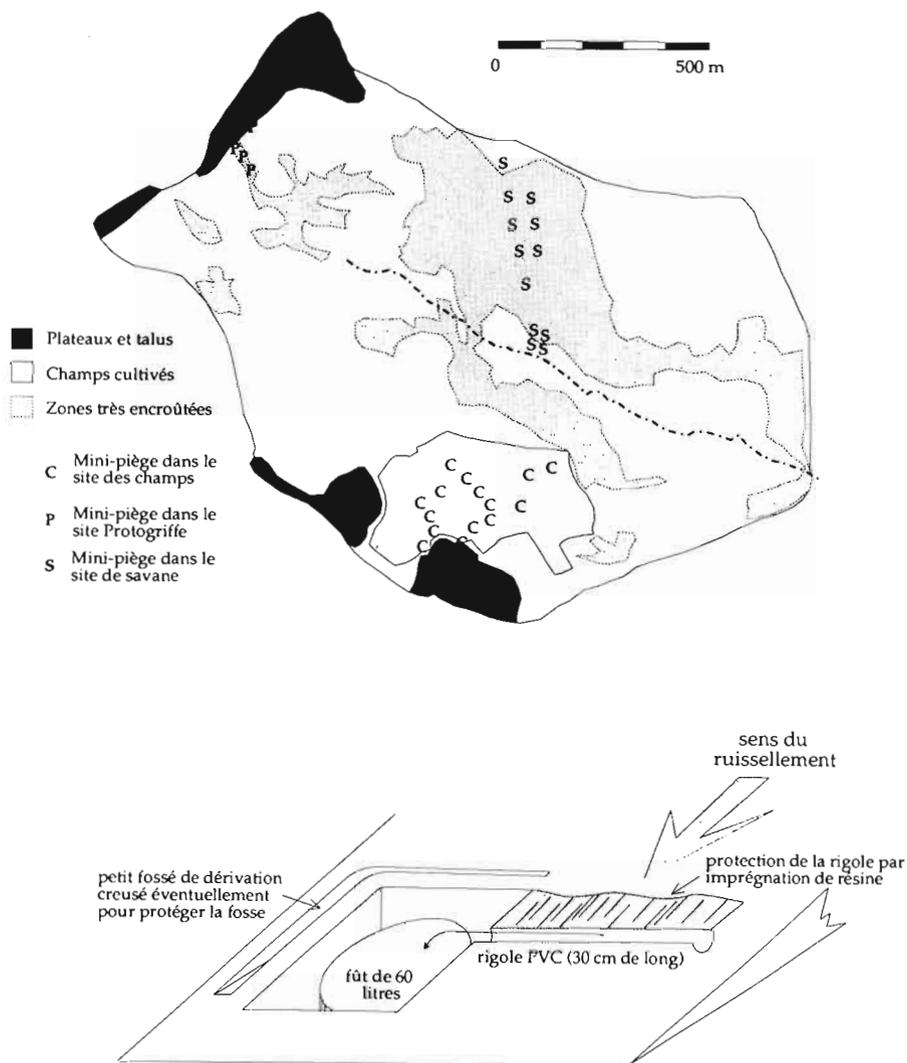
Le schéma général d'installation d'un mini-piège est présenté sur la figure 1. La longueur de la rigole interceptant le ruissellement est de 30 cm. Cette valeur est choisie volontairement faible pour minimiser les coûts d'installation et de maintenance, et permettre ainsi la multiplication des points de mesure. Elle

---

(1) Unité de Recherche appartenant au Département Eaux Continentales, et dont le thème concerne les « Processus de transformation, fonctionnement et transferts aux interfaces sol-plante-atmosphère ».

## Ruissellement le long d'un versant

correspond à peu près à l'écartement moyen séparant deux touffes d'herbe dans les zones de savane à herbacées cespiteuses<sup>(2)</sup>; dans ce cas, la rigole collecte le ruissellement qui passe entre les deux touffes.



**Figure 1.** Installation . **1a** : schéma de localisation des mini-pièges. **1b** : schéma d'installation d'un mini-piège.

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

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, ni détruire l'installation, si la fosse se remplit plus vite que le bidon.

### Méthodes de mesure et d'interprétation des résultats

Après une averse, trois cas sont pris en compte : 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 deux classes : 0,0 à 60 litres, et supérieur à 60 litres.

Si l'on considère l'ensemble des averses d'une période, on peut calculer le nombre de fois que chacun de ces trois états a été observé pour chaque mini-piège. 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 %, et qui peuvent donc être représentés sur un diagramme ternaire (figure 2).

La figure 2 illustre cette représentation. Etant un peu particulière, il est utile de s'y attarder avant de présenter nos résultats. Imaginons pour cela un versant homogène, et plan, 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 pente<sup>(3)</sup>.

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

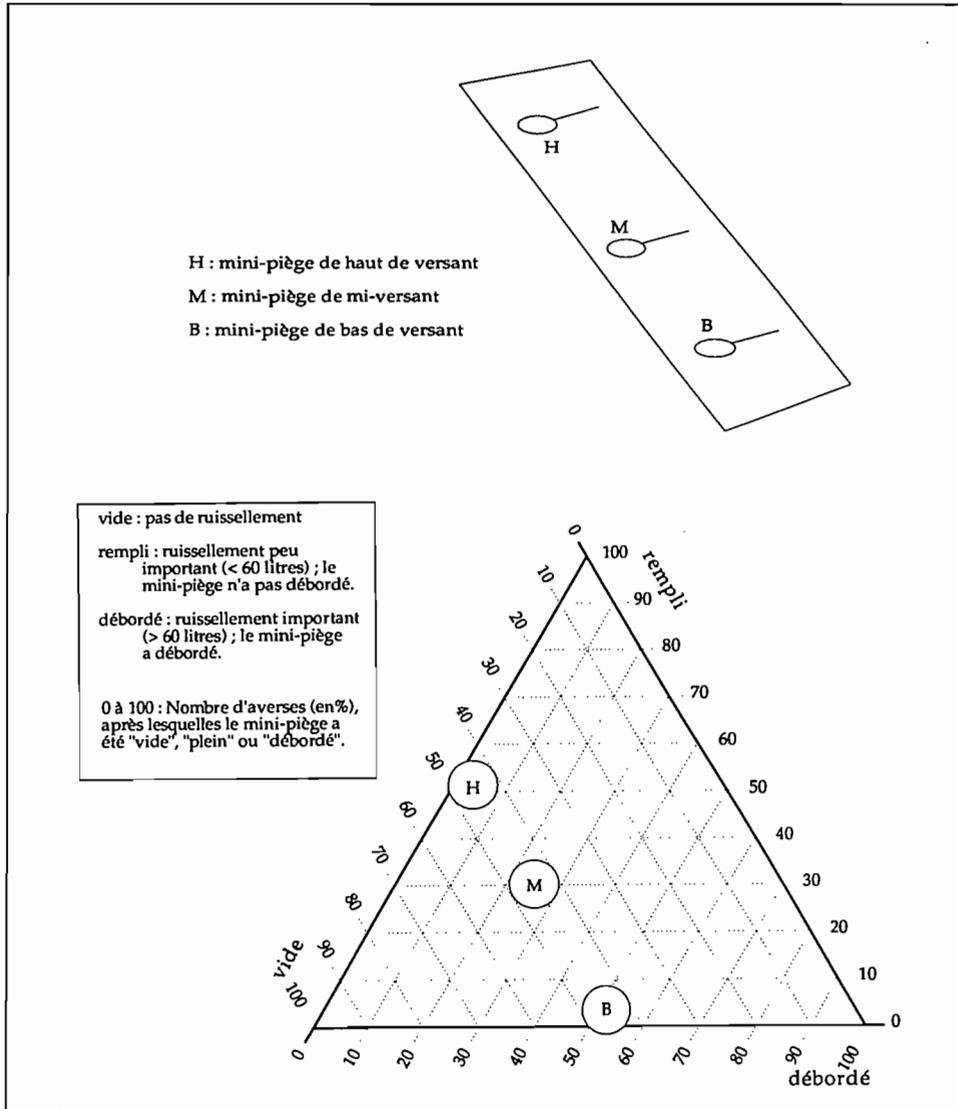
Le choix des sites a répondu à un double objectif :

- 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;

---

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

## Ruissellement le long d'un versant



**Figure 2.** Schéma explicatif de la méthode d'interprétation des résultats. **2a** : un exemple de localisation pour trois mini-pièges. **2b** : présentation des résultats sur un diagramme ternaire : cas de l'exemple théorique ci-dessus.

- 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 des champs, le site protogriffe et le site de savane.

### **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<sup>(4)</sup> est représentée, et il n'y a pas de 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 d'hivernage (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, 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, 1988), 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;

---

(4) Surface de type érosion, définie comme présentant moins de 20 % de turricules de vers, moins de 40 % de charge grossière, et recouverte d'une croûte d'érosion (croûte à un seul micro-horizon, plasmique; elle correspond à l'érosion de croûtes structurales à 2 ou 3 micro-horizons) (Casenave et Valentin, 1988).

## *Ruissellement le long d'un versant*

— 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.

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

### **Résultats**

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-pièges. 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 : 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 couleur), 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 présenté 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'imperméabilisation 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'imperméabilisation 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;

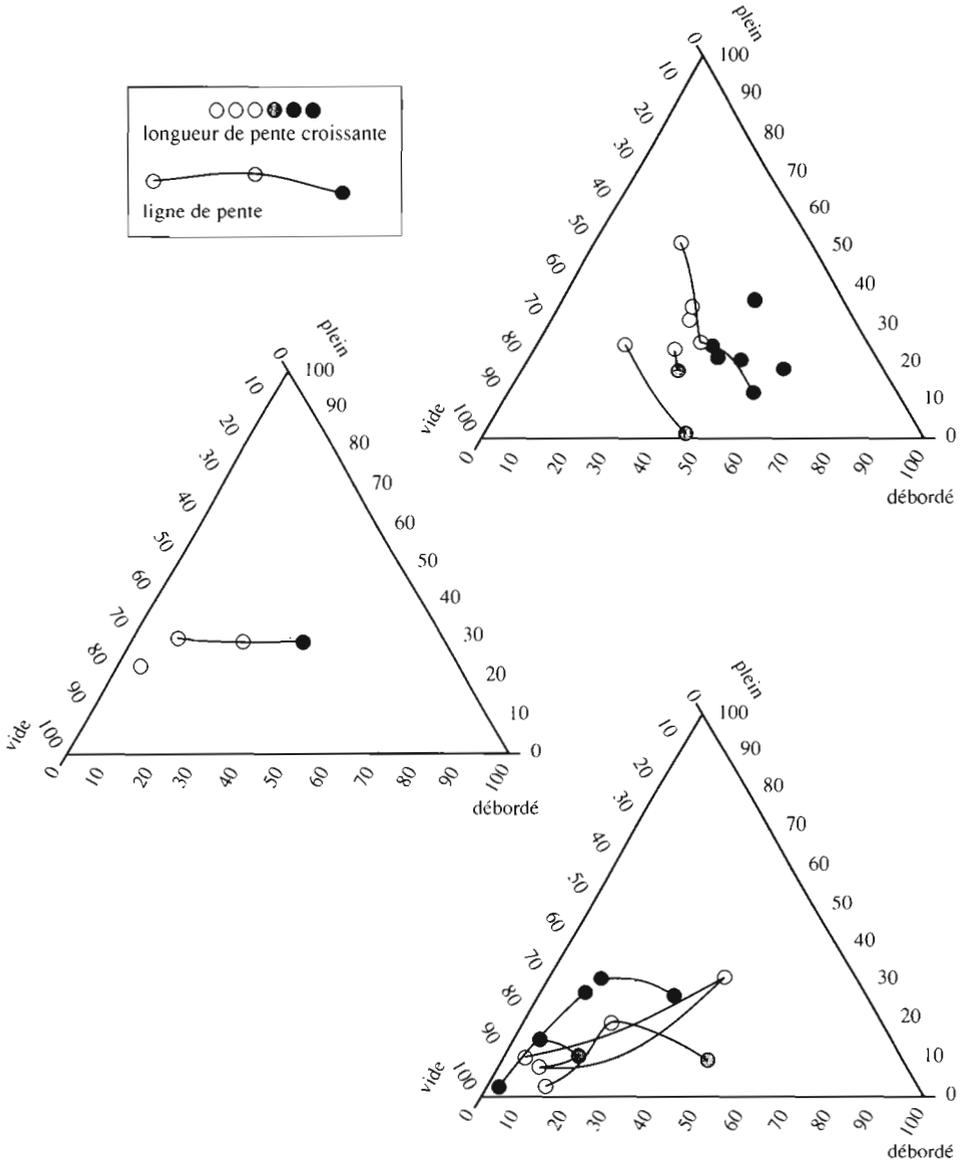


Figure 3. Résultats : 3a : site des champs. 3b : site protogriffe. 3c : site de savane.

- 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;
- 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 dix. 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 ré-infiltrer avant d'atteindre le bas de la pente.

## **Discussion**

Deux thèmes de discussion doivent être développés pour aboutir à des propositions de modélisation. Il s'agit de l'organisation de l'infiltration le long d'un versant, et de sa variabilité locale.

### ***Variabilité locale de l'infiltration***

Le site des champs possède une faible variabilité locale de l'infiltration en raison de la dégradation uniforme de celle-ci introduite par la culture du riz.

Le site protogriffe possède une variabilité locale de l'infiltration faible d'un mètre carré à l'autre, mais importante à l'intérieur de chacun d'entre eux :

- infiltration pratiquement nulle à travers les croûtes présentes entre les touffes d'herbe. C'est ce que mesure la simulation de pluie, qui ne crée au sol qu'une lame d'eau trop peu épaisse pour atteindre le collet des touffes d'herbe;
- infiltrabilité très importante sur chacune des touffes, au pied desquelles l'activité faunique importante remanie en permanence les réorganisations pelliculaires susceptibles de s'y développer. Pour autant que le sol sous-jacent ne soit pas saturé, celui-ci est suffisamment poreux pour permettre une infiltration importante de l'eau qui y tombe directement, ou de celle provenant d'une lame d'eau ruisselant depuis le haut du versant, et qui aurait atteint une épaisseur suffisante pour accéder à cette porosité.

La figure 4 illustre schématiquement l'effet de cette variabilité sur l'infiltration, en présentant une coupe transversale entre deux touffes d'herbe.

Enfin, le site de savane présente le même type de variabilité locale. Une variabilité supplémentaire s'y superpose. La végétation y est en effet composée d'arbres irrégulièrement disséminés. Ceux-ci peuvent former localement des groupements de quelques arbres au milieu desquels se développe une végétation herbacée différente. *Andropogon gayanus* réapparaît et les conditions d'infiltration redeviennent favorables. Si ces groupements occupent une faible partie de l'espace, il reste que la distance séparant deux d'entre eux le long d'une même ligne de pente est bornée, et que l'infiltration importante que l'on peut y observer par simulation de pluie (pas de ruissellement pour une averse décennale) limite probablement à cette même distance la longueur de pente le long de laquelle il peut y avoir cumul du ruissellement.

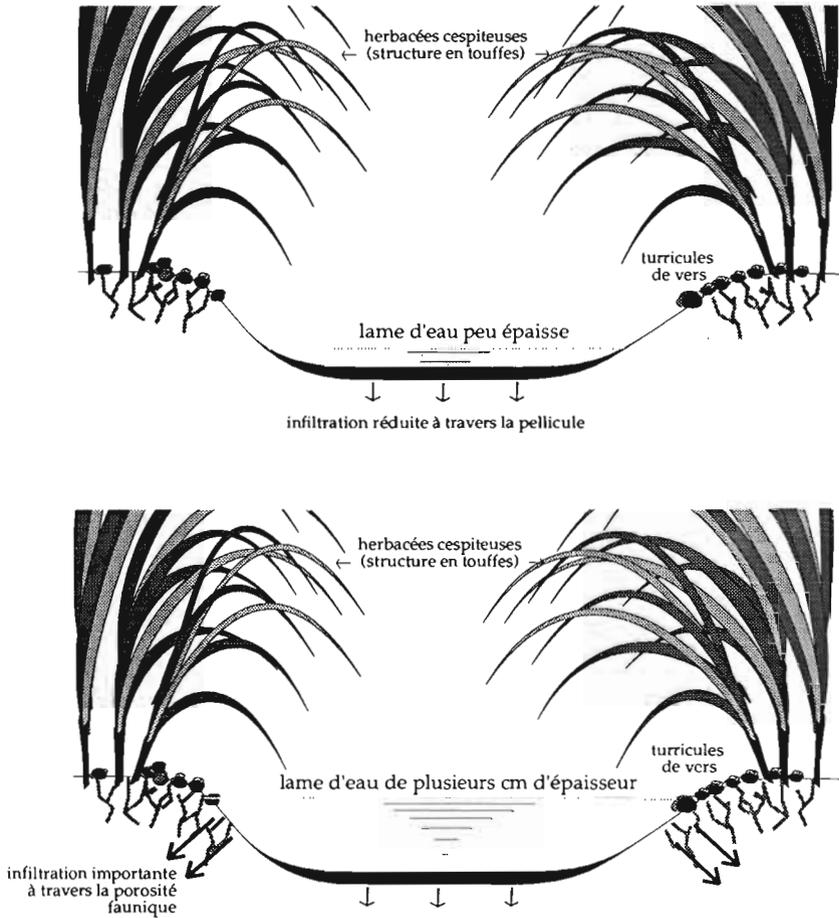


Schéma explicatif de l'influence de la hauteur de la lame d'eau sur l'infiltration, dans le cas d'une surface présentant un micro-relief important

Figure 4. Schéma de l'accès différentiel à la porosité.

### Organisation de l'infiltration le long d'un versant

Le site de savane, pour lequel le modèle théorique est particulièrement mis en défaut, est le seul des trois qui intègre un versant complet depuis la ligne de crête jusqu'au cours d'eau. Le long de ce versant, l'infiltration présente une organisation spatiale particulière, importante en haut de versant, minimale à mi-pente et quasi illimitée dans les sables de haut et de bas de versant.

Sur ce site, qui combine une variabilité spatiale de l'infiltration à plusieurs échelles, celle de la touffe d'herbe et celle du groupement de quelques arbres, à une organisation de la perméabilité, croissantes vers le bas de la pente à partir de la mi-versant, on comprend que les résultats des mini-pièges indiquent que les flux de ruissellement sont soumis aux seules caractéristiques locales et ne sont pas organisés le long du versant.

## **Modélisation**

Il ressort de la discussion précédente que la variabilité locale d'un paramètre quelconque utilisé pour le calcul de l'infiltration prend au moins autant d'importance que sa valeur moyenne.

Une modélisation de la propagation du ruissellement le long de la pente devra donc tenir compte de l'organisation longitudinale et de la variabilité de chacun de ses paramètres.

L'organisation longitudinale peut être prise en compte en privilégiant la direction de la pente dans la modélisation. L'importance de la variabilité des paramètres nous impose une prise en compte stochastique de chacun d'eux.

Ce paragraphe traite successivement de la discrétisation de l'espace que nous proposons, du calcul de la propagation le long de chacun des éléments discrétisés, et de l'aspect stochastique qu'il nous faudra introduire dans les calculs.

### **Discrétisation de l'espace**

La première étape de la modélisation consiste à partager le domaine étudié, un petit bassin versant par exemple, en un certain nombre de sous-ensembles le long desquels la propagation sera modélisée. La traditionnelle discrétisation en mailles régulières ne correspond à aucune réalité physique. Ce mode d'appréhension de l'espace s'est longtemps imposé pour des raisons purement informatiques de facilité de mise en œuvre; raisons qui ne résistent pas à l'augmentation croissante de la puissance de calcul de nos ordinateurs. Nous lui avons préféré une discrétisation selon les lignes de pente. Le premier travail consiste à déterminer des lignes de pentes caractéristiques et à isoler les portions de versant se trouvant entre celles-ci. Par définition, il n'y a pas d'échange latéral entre deux portions contiguës ainsi définies, ce qui nous permet de les modéliser séquentiellement.

Sur chacune de ces portions de versant, tous les points situés à égale distance de l'exutoire sont confondus en un seul, et la propagation n'est calculée que le long de la ligne de pente fictive ainsi construite. La dimension transversale, assimilée à la largeur, est connue en tout point de cette ligne. Les lois de répartition des autres paramètres, tels que la pente et les caractéristiques de l'infiltration, sont également connues en tout point de la ligne.

### **Propagation sur un versant à largeur variable**

Le problème se résume ainsi à la modélisation de la propagation sur un versant à largeur variable d'une part, et à la prise en compte des paramètres pour lesquels on ne connaît que la loi de répartition, d'autre part. Ce paragraphe aborde le problème de la propagation.

#### *Description de la lame d'eau*

La seule discrétisation de l'espace qui est apparente à l'utilisateur de notre futur modèle est celle en portions de versant. Il choisit le nombre et la position des lignes de pente caractéristiques qui vont cloisonner l'espace en autant de sous-systèmes indépendants. A l'intérieur de chaque portion de versant, le modèle doit se charger de propager l'eau entre chaque pas de temps, en utilisant pour cela une discrétisation qui lui sera propre et, autant que faire se peut, indépendante de l'échelle d'étude.

Dans cet objectif, la discrétisation eulérienne, en biefs fixes, n'est pas justifiée car, au moins dans un premier temps, seul le débit à l'exutoire de la portion de versant doit être connu pour alimenter, au pas de temps suivant, le réseau hydrographique ou une éventuelle portion de versant située à l'aval. Nous proposons d'adopter un point de vue lagrangien en discrétisant le volume d'eau sur le versant plutôt que l'espace.

Les caractéristiques de la lame d'eau (hauteur, vitesse, etc.) ne sont calculées qu'en un certain nombre de sections de référence, mobiles dans l'espace et caractérisées par le volume total d'eau se trouvant à l'amont.

Soit  $Q$  le débit traversant une section donnée du versant située à la distance  $X$  du haut du versant, soit  $c$  la vitesse moyenne caractéristique de ce débit, soit  $S$  la surface mouillée de la section.

$$c = Q/S$$

Soit  $dx$  la distance parcourue à cette vitesse  $c$  pendant le pas de temps  $dt$ , si l'on suppose que la vitesse ne varie pas pendant  $dt$ , les molécules d'eau appartenant initialement à la section  $X$  se trouveront « équitablement » réparties de part et d'autre de la section  $X + dx$  au bout du temps  $dt$  (figure 5).

La section  $X + dx$  a donc « derrière elle » le même volume que, précédemment, la section  $X$ . La seule possibilité pour que cette condition ne soit pas vérifiée est que la vitesse moyenne  $c'$  de la section située immédiatement à l'amont de la section  $X$  soit supérieure à  $c$ . Or ceci est une condition de non application des lois classiques de la propagation. Elle reviendrait à simuler le déferlement d'une vague.

L'idée de la modélisation est de suivre les positions successives  $X, X + dx, \dots$  d'un certain nombre de sections caractéristiques. Le pas de discrétisation n'est pas un pas d'espace mais un pas de volume  $pV$  qui peut être soit fixe, soit une proportion fixe du volume total d'eau se trouvant à la surface du versant à chaque instant.

## Ruissellement le long d'un versant

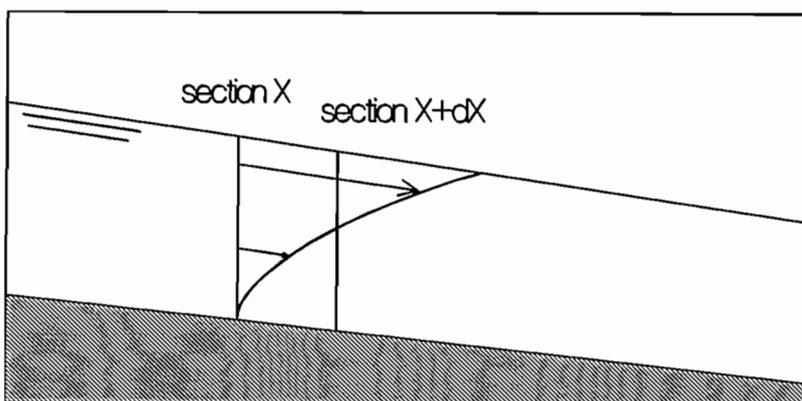


Figure 5. Déplacement d'une section X et construction de la section X + dx.

### Méthode de calcul

La méthode peut être expliquée sur la base de la fonction  $V(X,t)$  ou  $t$  : temps.

Soit  $x$  = distance hydrologique à l'exutoire, soit  $\text{Max}(X)$  = plus grande distance  $x$  existant sur le versant,

$$X = \text{Max}(X) - x$$

$X$  est donc une représentation de la distance à l'exutoire. Par commodité,  $X$  est compté nul en haut du versant. Il ne faut pourtant pas que ce changement de signe prête à confusion :  $X$  n'est pas la distance à la crête.

La méthode de calcul est présentée sur les figures 6a et 6b. Elle consiste à calculer pour chaque pas de temps la courbe  $V(X)$ . Pour ce faire, soit  $V_i$  le volume caractéristique de la  $i$ ème section et  $X_i$  sa position sur le versant, on effectue successivement les calculs suivants :

- calcul de la section  $S(X_i) = dV/dx(V_i)$ ;
- calcul de la hauteur d'eau  $Y(X_i) = S/L(X_i)$ ;  $L(X)$  = largeur du versant au point  $X$ ;
- calcul de la vitesse moyenne  $c(X_i)$  de la section;
- calcul de la distance parcourue  $dx$  pendant le pas de temps  $dt$ .  $dx = c(X_i).dt$ ;
- calcul de la nouvelle abscisse  $X_i = X_i + dx$ .

### Conservation du volume

On s'étonne un peu de l'absence d'équations différentielles dans cette méthode. L'équation de continuité a été « ignorée ». Y a-t-il conservation du volume ?

La réponse est Oui. L'équation de continuité est en effet un problème spécifique des méthodes eulériennes. La figure 7 montre d'ailleurs qu'elle est vérifiée par construction. Cette méthode n'est pourtant pas une solution miracle sur ce point : la dérivation, à chaque pas de temps, de la représentation intégrale du volume pour connaître la section est le pendant de la résolution analytique classique de l'équation de continuité dans les méthodes eulériennes.

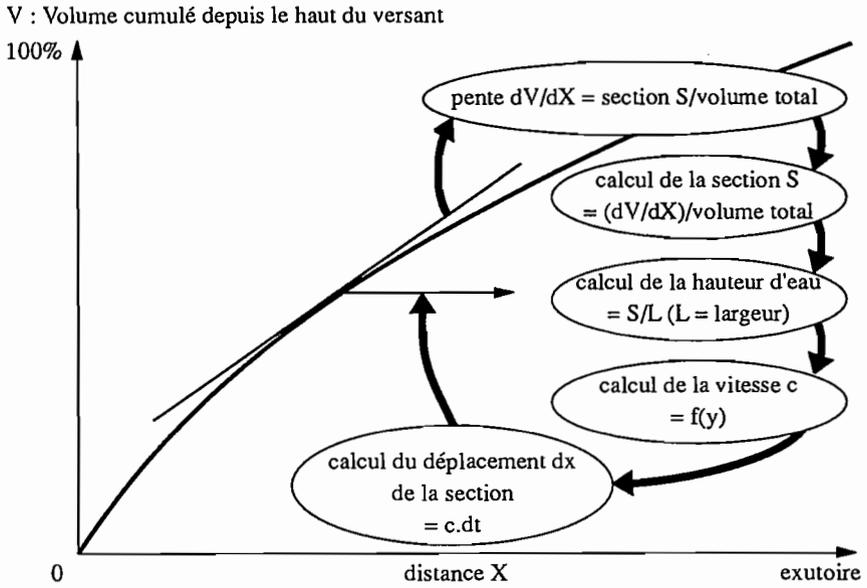


Figure 6a. Calcul du déplacement d'une section.

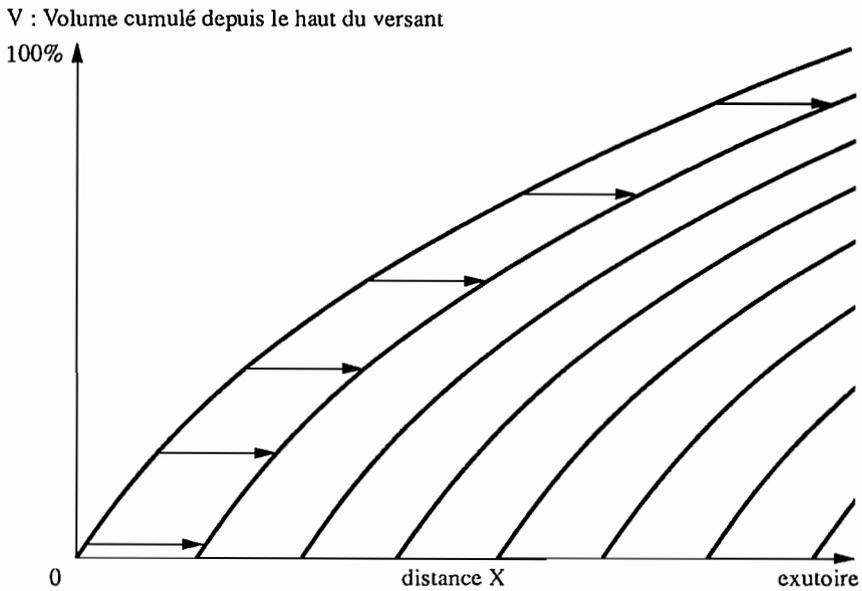


Figure 6b. Déplacement de toutes les sections.

### **Avantages**

- La discrétisation spatiale fixe, en biefs, avec calcul du débit d'entrée et du débit de sortie oblige à puiser uniformément sur l'ensemble du bief pour fournir le débit de sortie. La pente de la lame d'eau à l'intérieur du bief est ainsi toujours parallèle au sol. Sur un versant où, par nature, l'écoulement est destiné à devenir rapidement nul, elle a le gros défaut de provoquer un amortissement parasite directement fonction du nombre de biefs pris en compte. Cette approximation, et les amortissements parasites qu'elle provoque, sont évités par la méthode proposée.
- La structure du programme informatique est évolutive : on peut lui « brancher » n'importe quel module de calcul de la vitesse et refaire tourner le modèle sans changer ni sa formulation ni même la valeur des autres paramètres, en particulier les paramètres de discrétisation. De façon plus générale, cette structure est à même de supporter un véritable générateur de modèles hydrologiques, dans la mesure où elle ne repose que sur l'équation de conservation de la masse. On peut ainsi envisager d'implémenter sur cette structure aussi bien les équations classiques de l'hydraulique que des équations entièrement empiriques si les hypothèses simplificatrices nécessaires aux premières sont jugées par trop irréalistes, et dans la mesure où des observations spécifiques permettent de proposer d'autres solutions.
- L'augmentation du nombre de sections prises en compte pour le même pas de temps aboutit toujours à un résultat identique ou meilleur. Il n'y a plus de conditions de stabilité et d'algorithmes oscillants qui obligent à un choix concerté des pas de temps et d'espace.
- Inversement, l'augmentation du pas de temps aboutit à une dégradation régulière du résultat, sans franchissement de la même limite de stabilité, qui n'existe plus.

### **Inconvénient**

Le volume cumulé  $V$  est dérivé à chaque pas de temps, et la méthode est sensible au calcul des dérivées. Ce calcul est un peu long et fait perdre une partie du temps de calcul économisé par la réduction du nombre de sections à prendre en compte à qualité équivalente du résultat.

### **Résultats**

Ce modèle est actuellement à l'état de maquette programmée sur un tableur. Ceci a permis de vérifier que la méthode numérique présentée ci-dessus ne provoque aucun des amortissements parasites reprochés à l'approximation de l'onde cinématique résolue par des réservoirs se vidangeant les uns dans les autres. Il a été testé sur un versant fictif de 100 mètres de long et de 0,5 ha de superficie, aux pas de temps de 20 et 80 secondes, et avec, comme condition initiale, 10 mm d'eau uniformément répartis sur le versant. Le débit est constant sur un versant plan, croissant sur un versant conique concave et décroissant sur un versant conique convexe. Dans tous les cas, le débit s'annule brutalement, sans amortissement, lorsque la section située en haut du versant à  $t = 0$  atteint l'exutoire.

La programmation du modèle avec un compilateur classique est en cours. Elle permettra de tester des conditions initiales moins sommaires, et d'apprécier sa robustesse lorsque la largeur du versant ne varie pas continûment le long de la

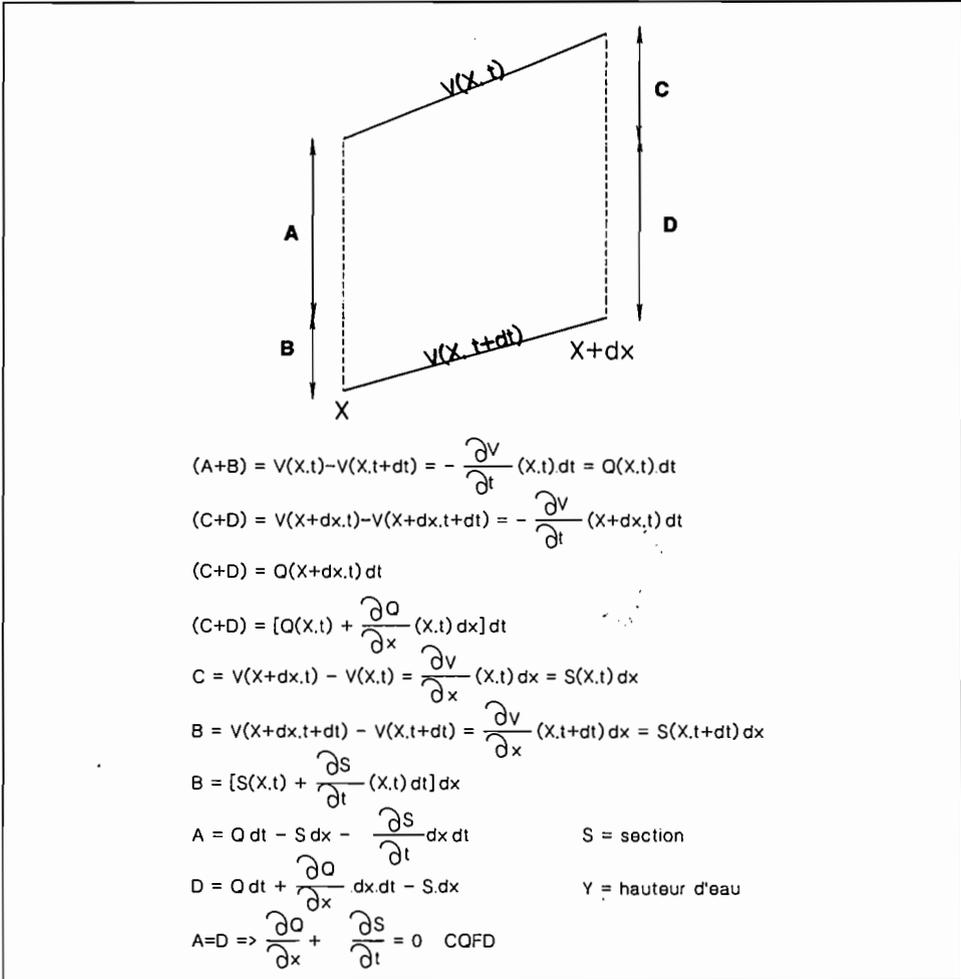


Figure 7.

penne, comme c'est le cas pour les versants c6niques, seuls 2 avoir 6t6 test6s jusqu'2 pr6sent.

Enfin, pour introduire l'infiltration dans ce mod6le purement propagatif, il faudra d6terminer s'il est possible de mod6liser s6quentiellement l'infiltration et la propagation, c'est-2-dire ind6pendamment l'un de l'autre, ou si l'on devra calculer l'interaction entre les deux ph6nom6nes.

### Variabilit6 des param6tres

Si les param6tres du mod6le ne sont plus parfaitement connus en un point, la hauteur d'eau devient une fonction al6atoire. Pour chaque hauteur d'eau, la vitesse

est également une fonction aléatoire. Par combinaison des deux, on obtient la fonction aléatoire de la distance parcourue par chaque section. L'introduction de cette variabilité dans un modèle initialement déterministe ne pose pas de problème technique majeur, si ce n'est le temps de calcul nécessaire à la simulation, pour une même période, d'un nombre suffisant de réalisations de l'ensemble des fonctions aléatoires à prendre en compte.

Il restera à vérifier que l'hydrogramme fourni par un versant donné converge vers un hydrogramme limite qui correspond à une discrétisation en un grand nombre de portions de versant à l'intérieur desquels la variabilité des paramètres devient faible.

## **Conclusion et perspectives**

Le travail présenté est l'expression d'une démarche naturaliste. La simulation de pluie couplée à la description des états de surface, technique éprouvée en milieu sahélien, a été utilisée au nord-ouest de la Côte d'Ivoire, dans un milieu hétérogène et complexe. Les limites atteintes par la méthode dans ce nouveau milieu ont été analysées et ont conduit dans un premier temps à mener les observations complémentaires que constituent les mini-pièges. Les résultats, une fois analysés, ont permis de définir de nouveaux besoins en terme de modélisation : prise en compte privilégiée de l'organisation du milieu le long de la pente, et traitement de la variabilité spatiale des paramètres.

Ces besoins, issus du terrain, ont ensuite été analysés mathématiquement pour aboutir à une formulation numérique originale, dans laquelle les raccourcis sont choisis en fonction de besoins propres.

Dans l'état actuel de l'avancement des travaux, qui n'en sont qu'à leurs prémices, les résultats sont satisfaisants. S'ils le restent, nous aurons à notre disposition une chaîne de traitement de l'information complète adaptée aux incessants problèmes de transfert d'échelle, incontournables dans les nombreuses disciplines où il n'y a pas identité des échelles d'étude et des échelles de mesure.

Appliqué aux petits bassins versants, cet outil pourra bénéficier de la facilité de mise en œuvre des campagnes de simulation de pluie, et fournir ainsi à faible coût les prédéterminations nécessaires à la mise en œuvre de petits aménagements agricoles, de versant ou de bas-fond.

D'autres perspectives lui sont également ouvertes. Pour nous limiter à celles d'ores et déjà envisagées, nous citerons l'Hydrologie, aux échelles plus couramment étudiées par cette discipline, et la Conservation de l'Eau et des Sols.

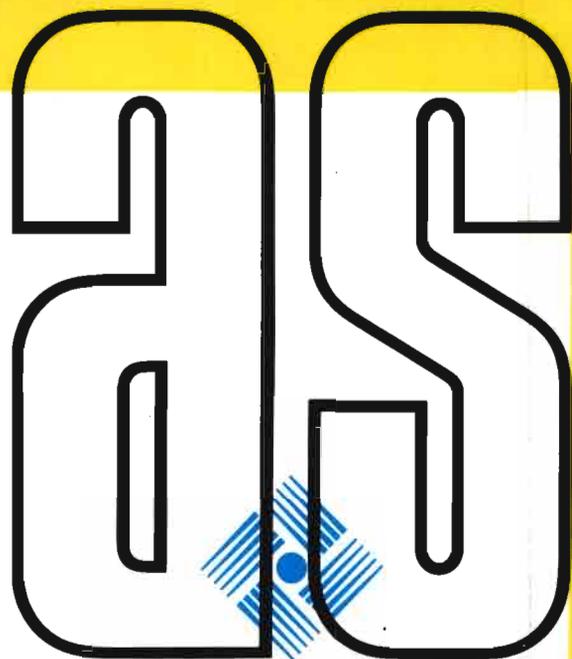
En Hydrologie, le simple fait que le relief soit explicitement pris en compte au travers du découpage selon des lignes de pente caractéristiques rend cette méthode proche des nombreuses questions portant sur le rôle du relief et de la forme des réseaux hydrographiques dans les processus de transfert.

Dans le domaine de l'étude de la sensibilité des sols agricoles à l'érosion, le modèle pourra fournir des probabilités de dépassement des seuils de vitesse correspondant à l'apparition de griffes d'érosion.

André Kergreis  
Jacques Claude

**UTILISATION  
RATIONNELLE**  
de L'EAU  
des  
**PETITS  
BASSINS  
VERSANTS**  
en **ZONE  
ARIDE**

AUPELF



**actualité scientifique**

**British Library Cataloguing in Publication Data**

Kergreis, André

Utilisation rationnelle de l'eau des petits  
bassins versants en zone aride.

1. Hydrology

I. Title

551.49

ISBN 0-86196-315-6

**Editions John Libbey Eurotext**

6, rue Blanche, 92120 Montrouge,  
France

Tél : (1) 47 35 85 52

**John Libbey and Company Ltd**

13 Smith Yard, Summerley Street,  
London SW18 4HR, England

Tél : (81) 947 27 77

**John Libbey CIC**

Via Spallanzani 11,  
00161, Rome, Italy

Tél : (06) 862.289

© 1991, Paris

Il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage — loi du 11 mars 1957 — sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français du Copyright, 6 bis, rue Gabriel-Laumain, 75010 Paris, France.

# **UTILISATION RATIONNELLE DE L'EAU DES PETITS BASSINS VERSANTS EN ZONE ARIDE**

Journées scientifiques du Réseau  
« Génie Para-Sécheresse » de l'UREF  
organisées avec la collaboration  
du Réseau Recherche Résistance à la Sécheresse (R3S)  
et de l'Ecole Inter Etats d'Ingénieurs de l'Equipement  
Rural (EIER)  
EIER, Ouagadougou, 12-15 mars 1990

## **COORDINATION**

André Kergreis

Jacques Claude

