

LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT

Pierre Chevallier⁽¹⁾, Olivier Planchon⁽²⁾ et Jean-Marc Lapetite⁽³⁾

(1) ORSTOM, IPH-UFRGS, C.P. 530, 90.000 Porto Alegre RS, Brésil.

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

(3) Institut International de Recherche Scientifique pour le Développement à Adiopodoumé, B.P. V-51, Abidjan, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION : LES CHEMINS DE L'EAU

On admet aujourd'hui qu'il existe une grande variété de fonctionnements hydrologiques et donc de processus de l'écoulement (Freeze, 1972 ; Chorley, 1978 ; Dunne, 1983 ; Kirkby, 1988). Il nous paraît important d'en présenter les principaux traits. Avec Dunne (1978), on distingue quatre grandes catégories de processus :

- l'écoulement de surface ;
- l'écoulement de base ;
- l'écoulement rapide interne ;
- l'écoulement sur surface saturée.

Ces processus font intervenir l'ensemble du système constitué par l'eau, le sol, la végétation et l'atmosphère. Ils sont en général décrits sur l'entité géomorphologique que constitue le *versant* (figure n°1).

L'écoulement de surface

Il est décrit par Horton dès 1933. Il admet que toute la pluie est absorbée dans le sol tant que son intensité ne dépasse pas la capacité d'infiltration du sol. La partie excédentaire ruisselle alors à la surface et est drainée par le réseau hydrographique.

L'écoulement de base

C'est l'écoulement permanent de l'eau stocké dans la zone saturée du sol par restitution dans le cours d'eau sous forme de vidange du réservoir phréatique.

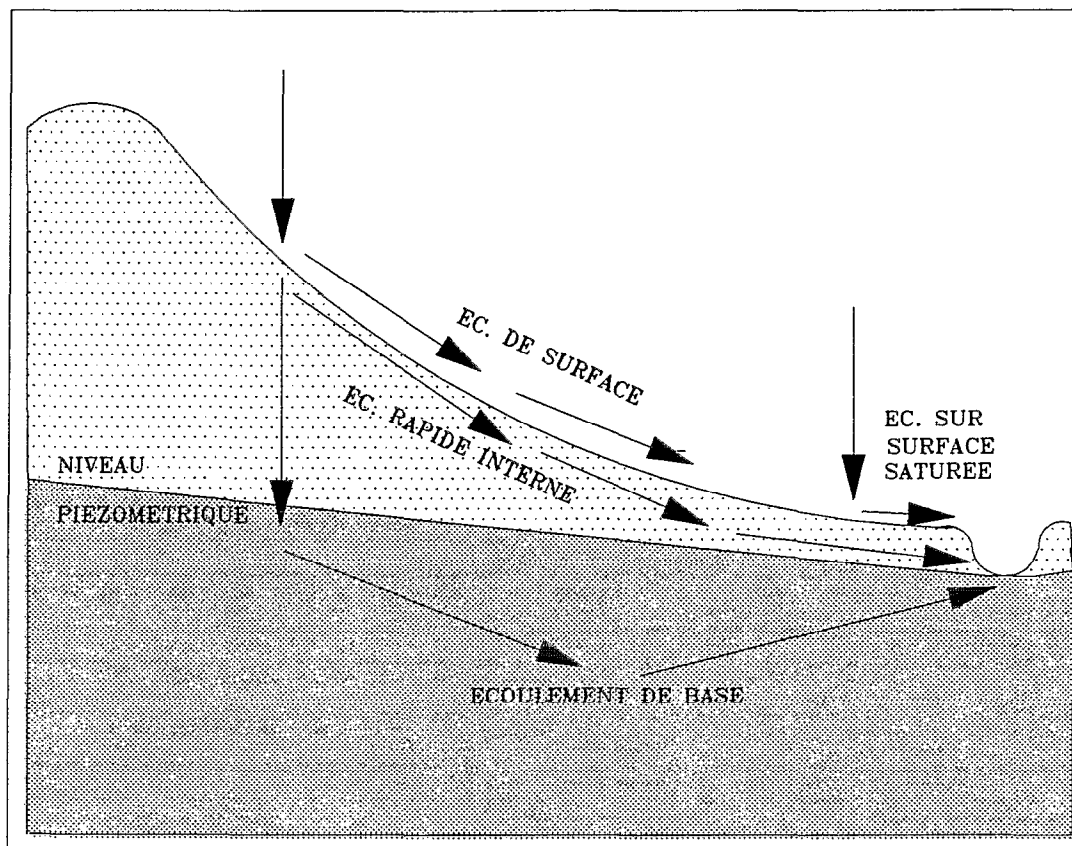


Figure 1. Les chemins de l'eau (d'après Dunne, 1978).

L'écoulement rapide interne

On trouve une grande variété de termes pour dénommer ce type d'écoulement (hypodermique, intermédiaire, de subsurface, etc...). Cela s'explique par le fait que ces mécanismes assez bien identifiés ne sont pas encore vraiment compris (Beven, 1988) et qu'ils ont des expressions différentes selon les bassins versants et les versants. Ils se produisent en milieux saturés comme non saturés et dans des directions verticales et latérales. Beven retient quatre types d'écoulements rapides internes, mais les limites entre ces classes sont probablement plus artificielles que réelles :

- effet piston ;
- écoulement dans la macroporosité tubulaire ;
- intumescence de nappe ;
- écoulement de retour.

L'écoulement sur surface saturée

Les mécanismes de l'écoulement sur surface (temporairement) saturée viennent compléter ceux de l'écoulement rapide interne. Ce type d'écoulement apparaît et se développe lorsque les sols deviennent saturés en surface avec la remontée de la nappe jusqu'à affleurer la surface du sol. Les variations saisonnières du niveau de la nappe règlent l'extension de cette surface.

BILANS HYDROLOGIQUES

Avant d'aborder dans le détail le fonctionnement hydrologique proprement dit, il est important de dresser un bilan des différents termes du cycle hydrologique que Roche (1986) définit comme le *décompte des entrées et des sorties d'un système d'eau dans un intervalle de temps donné* et de faire le point sur des notions simples. On s'intéressera d'abord au cycle saisonnier complet et le pas de temps sera annuel ; ensuite on tentera une analyse un peu plus détaillée avec un pas de temps mensuel.

Bilan annuel

L'évaluation des termes du bilan hydrologique doit être faite en années hydrologiques. Cette notion pour la région de Booro-Borotou est difficile à définir. On observe en effet que les réserves souterraines sont minimales vers la fin du mois de juin. Cependant la saison des pluies a déjà commencé depuis trois mois et le cycle végétatif est déjà bien amorcé. Il paraît donc logique de faire débiter l'année hydrologique au début du mois d'avril avec les premières pluies régulières.

Le tableau n°1 récapitule les principaux termes du bilan hydrologique annuel sur le bassin versant :

Tableau n°1

Années	Précipitations	Ecoulement	Ruissellement	ETP Penman	Déficit écoulement
1984-85	1161	59	10	1620	1102
1985-86	1528	205	33	1602	1323
1986-87	1073	31	6	1604	1042
1987-88	1244	86	26	1590	1158

La figure n°2 présente le bilan hydrologique sur la bassin pour la période d'étude. Le cercle complet représente l'apport pluviométrique (P). On y a découpé deux parts qui constituent ensemble le volume écoulé (E), l'une représentant le volume des écoulements rapides de crues (R), l'autre l'écoulement de base (E-R).

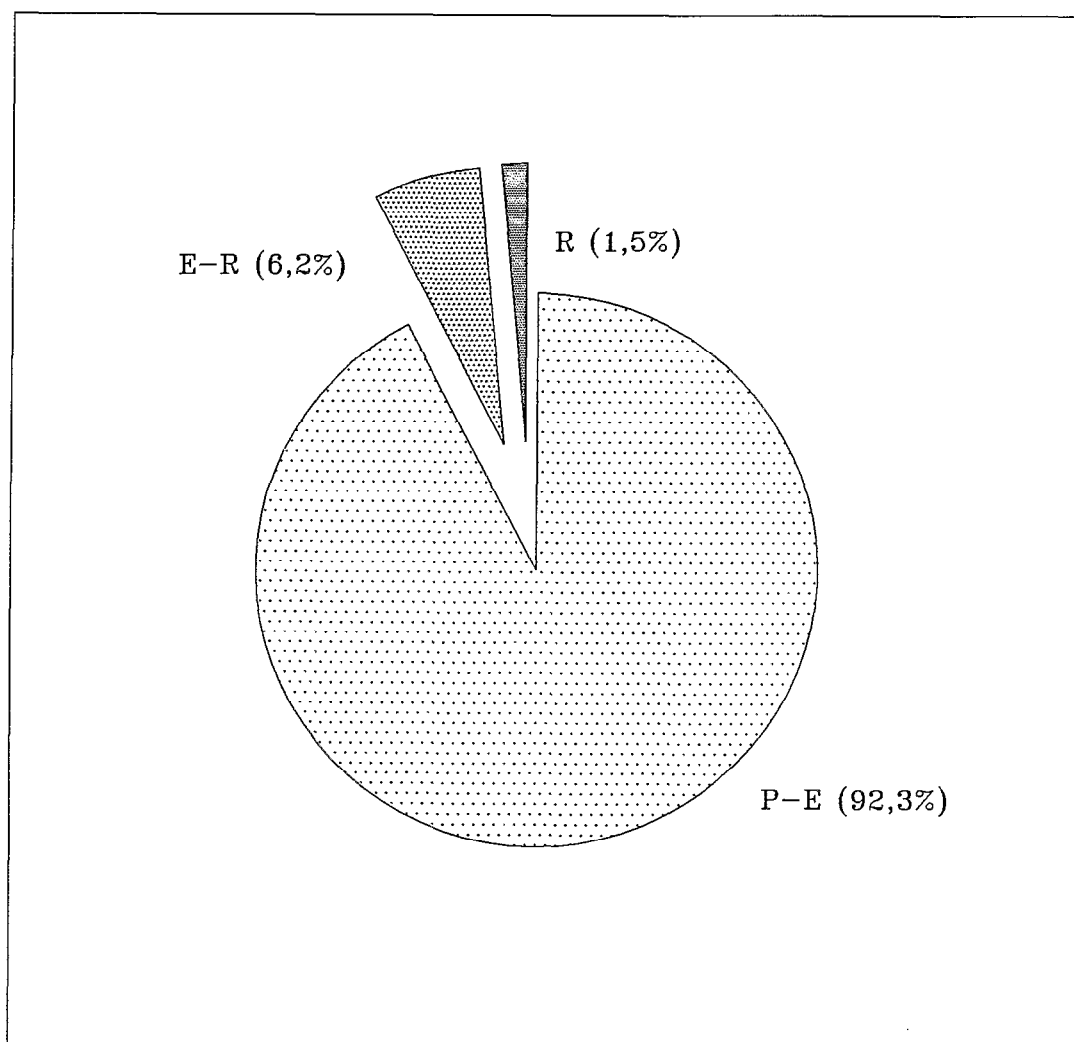


Figure 2. *Bilan hydrologique annuel (moyenne 1984-1988).*

Ce bilan fait apparaître clairement la faible part de l'écoulement au regard des apports par précipitation et la part encore plus faible des écoulements rapides de crue. Si on assimile en moyenne le déficit d'écoulement à l'évapotranspiration réelle (ce qui revient à adopter l'hypothèse que le système hydrologique étudié ne fuit pas), on constate un déficit évapotranspiratoire d'environ 400 mm par an. Malgré le faible échantillon disponible, une régression a été tentée entre la pluviométrie annuelle (P) et, d'une part, l'écoulement annuel (E), d'autre part, l'écoulement de crue cumulé annuel (R) (figure n°3).

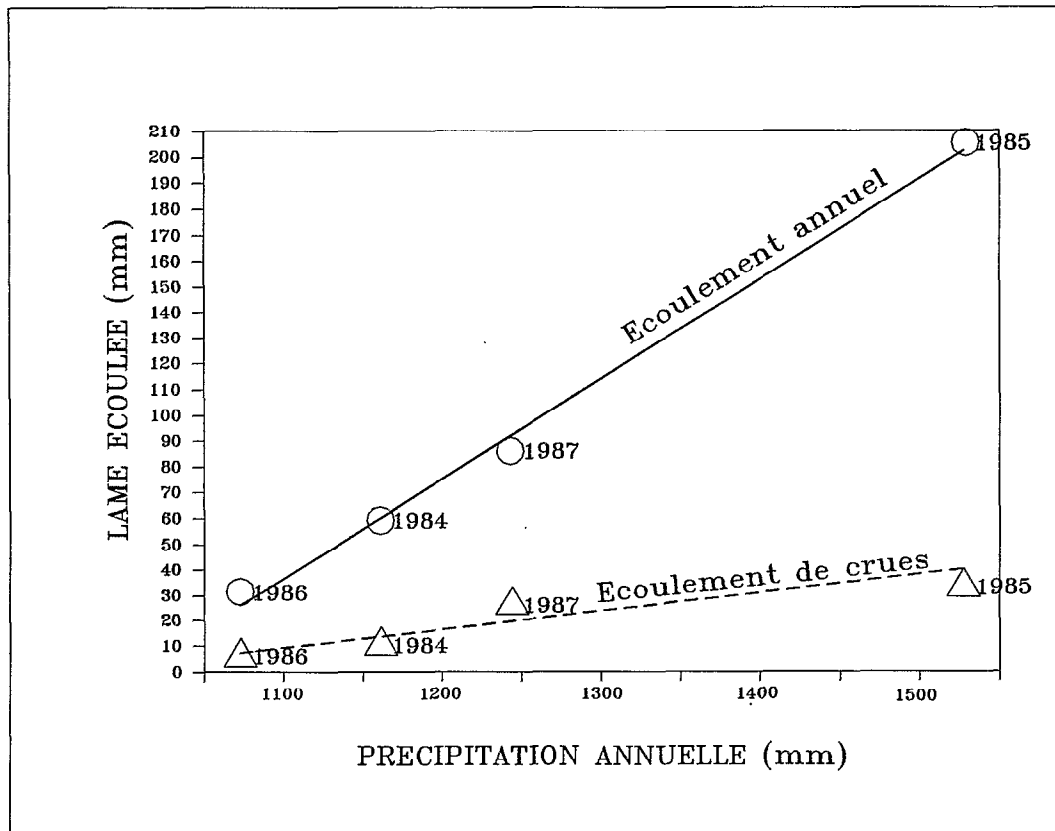


Figure 3. Bilan annuel. Relation Précipitation / Ecoulement.

On obtient (en mm)¹ :

$$E = 0,387 P - 390$$

$$R = 0,0597 P - 55,9$$

$$\text{avec } r^2 = 0,996$$

$$\text{avec } r^2 = 0,838$$

Bilan hydrologique mensuel

Observations

Toutes les valeurs mensuelles du bilan hydrologique sont données en mm dans le tableau n°2 pour les quatre années d'observation où :

- P, pluie moyenne sur le bassin versant
- ETP, évapotranspiration calculée par la formule de Penman
- E, écoulement total à l'exutoire
- R, écoulements de crues cumulées

1 Il ne faut néanmoins pas trop s'illusionner sur l'apparente bonne qualité de ces corrélations

Tableau n°2

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars
1984-85												
P	96,4	113,0	218,1	165,8	225,5	151,7	147,5	14,2	0,0	1,7	11,0	16,5
ETP	175,5	149,6	133,0	104,4	124,6	115,3	129,3	121,7	96,5	154,2	147,8	165,1
E	0,1	0,7	6,2	5,2	9,5	21,3	11,9	2,8	1,0	0,4	0,0	0,0
R	0,0	0,0	2,0	0,5	1,1	4,1	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1985-86												
P	101,7	67,6	131,7	331,8	398,5	265,5	107,7	2,2	0,0	0,0	46,4	74,4
ETP	161,6	150,4	121,5	103,8	107,8	111,7	130,1	126,1	101,2	149,6	165,7	168,3
E	0,0	0,0	0,1	13,5	80,1	70,3	27,0	8,2	2,9	1,3	0,8	1,2
R	0,0	0,0	0,0	3,4	19,6	7,6	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1986-87												
P	66,0	128,0	112,8	157,1	129,1	207,3	152,3	24,8	0,0	1,1	35,4	58,7
ETP	159,3	148,4	137,8	99,8	108,7	103,5	120,7	115,4	97,0	149,0	163,6	169,3
E	1,3	1,9	2,8	1,9	2,9	8,0	5,8	4,6	1,0	0,4	0,0	0,0
R	0,0	0,0	0,1	0,2	0,6	3,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1987-88												
P	23,0	172,3	166,4	135,1	334,5	242,4	74,8	15,6	15,8	0,0	0,2	34,9
ETP	184,1	151,5	123,3	126,1	103,5	101,4	123,6	118,7	98,4	132,0	152,7	171,9
E	0,0	0,0	1,5	1,2	21,7	36,4	20,1	3,2	1,4	0,2	0,0	0,0
R	0,0	0,0	0,7	0,2	9,8	13,1	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Pluviométrie - évapotranspiration potentielle

L'analyse en données mensuelles permet de bien comprendre les évolutions saisonnières. En admettant que le bassin versant de Booro-Borotou constitue un système fermé, on peut assimiler le déficit d'écoulement à l'évapotranspiration réelle. La figure n°4 présente sous forme d'histogramme la différence entre la pluviométrie mensuelle et l'évapotranspiration potentielle. On constate que seuls les mois de juin, juillet, août et septembre sont régulièrement nettement excédentaires. Ces quatre mois correspondent à la période où la variation du stock est continûment croissante. Ce n'est que pendant cette période d'excédent pluviométrique que le stockage est possible, d'abord dans la zone saturée, et ensuite dans la nappe. En dehors de cette période, il s'établit un régime d'équilibre entre les stockages dans la zone non-saturée, les écoulements de surface et de base et les reprises par évapotranspiration réelle.

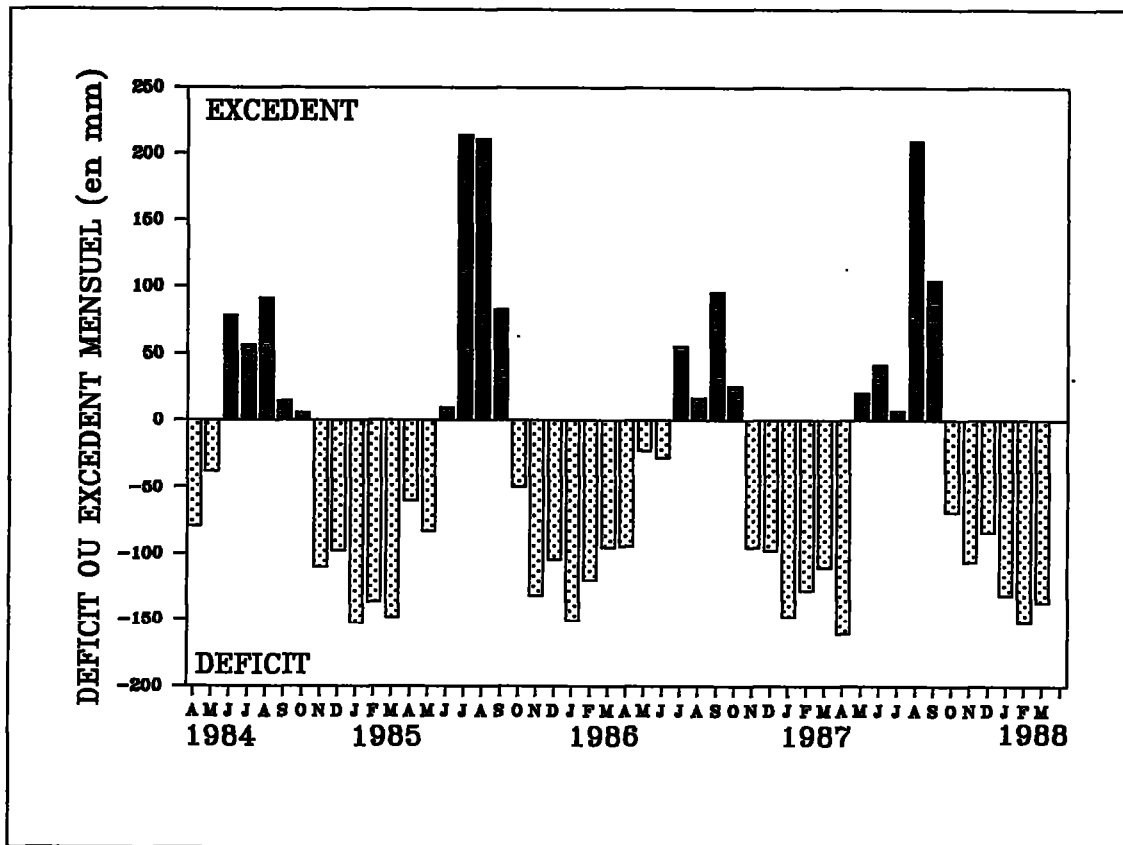


Figure 4. Bilan hydrologique mensuel. Différence Précipitation - ETP.

LA FORME DES CRUES

Généralités et échantillon d'analyse

La crue est par définition *la réponse d'un bassin à une averse ou à un épisode pluvieux* (Roche, 1986). A l'occasion d'un tel événement l'eau est susceptible de suivre des chemins différents liés à des mécanismes induits par l'état du bassin récepteur. Il est nécessaire de préciser que dans la suite on admet que la crue est prise comme *une augmentation significative du débit à l'exutoire d'un bassin versant consécutive à une averse ou à un train d'averses*. On distingue trois types de grandeurs qui décrivent :

- la précipitation (pluie moyenne, durée de l'averse, intensité maximale sur une durée donnée, hauteur totale de précipitation,...) ;
- l'écoulement (débit de base au début et à la fin de la crue, débit maximal, temps de montée, temps de base, lame ou volume écoulé,...) ;

- l'état du milieu (débit de base au début de la crue, indice de précipitations antérieures, cumul pluviométrique annuel,...)².

Sur les 4 années d'étude, 87 crues ont été retenues à la station principale du bassin versant de Booro-Borotou (carte de situation sur la figure n° 5). Il n'est guère possible d'analyser la totalité de cet échantillon. En effet certaines des crues résultent de la combinaison de plusieurs épisodes pluvieux ou d'épisodes pluvieux complexes qui présentent plusieurs maxima. L'analyse est donc faite sur un échantillon réduit de 30 événements dont la lame écoulée est supérieure à 0,5 mm avec une pointe unique (correspondant donc à des pluies individualisées).

De la même façon un échantillon d'étude de 20 crues a été constitué pour la station amont (situation sur la figure n°5), chacune d'elles correspondant à une crue de l'échantillon réduit à la station principale. L'échantillon est plus faible pour deux raisons :

- la station amont ne fonctionnait pas en 1984 ;
- il arrive qu'une crue enregistrée à la station principale ne puisse pas être considérée comme telle à l'amont sur les critères choisis.

Forme des crues

Hydrogrammes réduits

L'analyse de la forme des crues se fait habituellement par comparaison des hydrogrammes des principales crues observées, réduits à un hydrogramme de volume constant. L'échelle des débits est multipliée par un facteur permettant de ramener la lame écoulée de crue à une valeur constante, en général égale à 1 mm. L'échelle des temps est conservée, mais le zéro est fixé à l'instant où la crue est maximale.

Types de crues et hydrogrammes médians

On note à l'examen des hydrogrammes réduits, construits par interpolation des débits instantanés avec un pas de temps régulier de 5 minutes, qu'il y a plusieurs formes de crues nettement différenciées aussi bien à la station principale qu'à la station amont. On peut identifier les deux extrêmes :

- Crues de type 1 : le maximum est de l'ordre de 250 à 300 l/s à la station principale (respectivement, 150 l/s pour la station amont) pour un temps de base compris entre 2 et 6 heures (respectivement, 150 minutes).
- Crues de type 2 : le maximum est de l'ordre de 40 à 70 l/s à la station principale (respectivement, 30 l/s pour la station amont) pour un temps de base compris entre 5 et 18 heures (respectivement, 500 à 600 minutes).

2 Les grandeurs de ce troisième type peuvent être liées aux précipitations précédentes ou à l'écoulement initial.

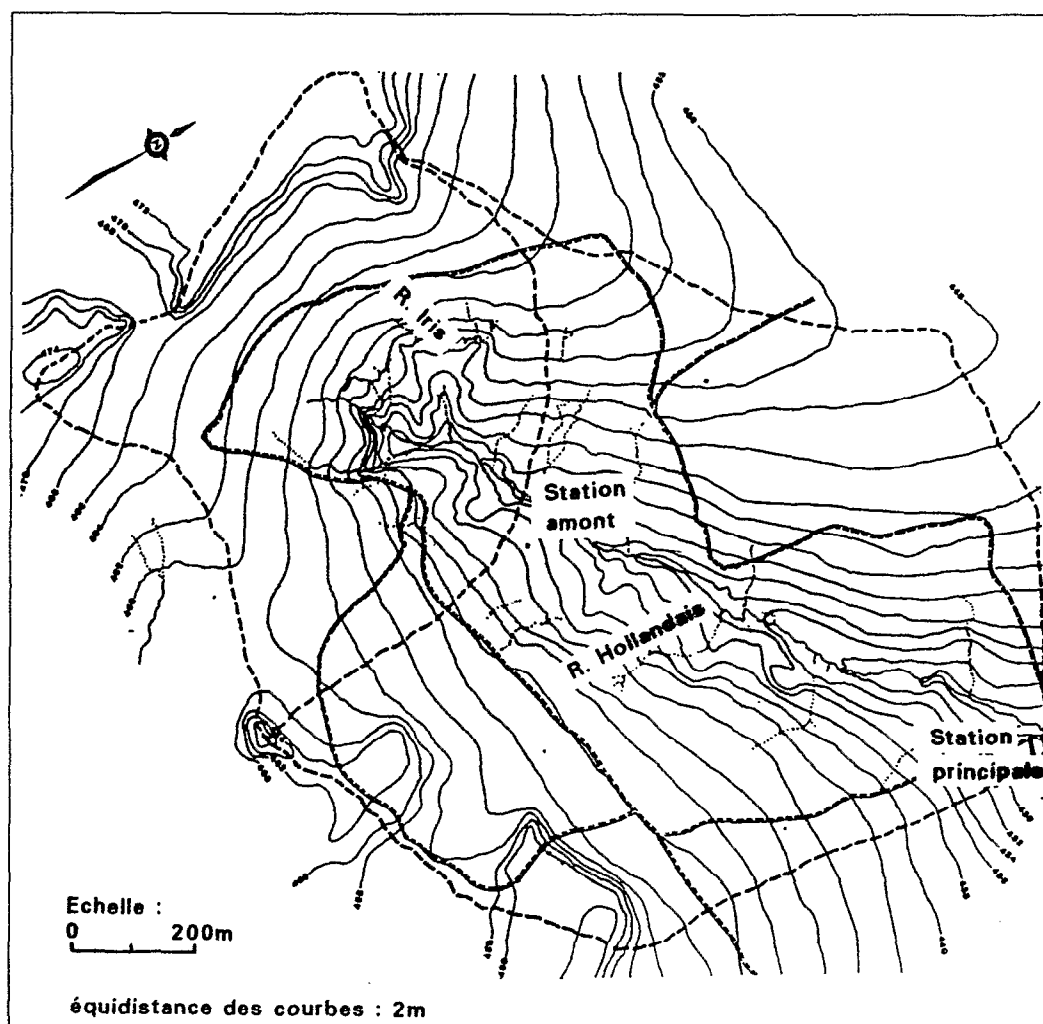


Figure 5. Le bassin versant de Booro-Borotou.

Il est possible de construire pour chacun de ces types un *hydrogramme médian*, en attribuant à chaque pas de temps de 5 minutes le débit moyen calculé sur la base des débits du pas de temps correspondant des crues d'une même classe. On obtient les hydrogrammes-type de la figure n°6.

Interprétation

Les crues de type 1 et 2 qui ont été retenues correspondent aux situations extrêmes ; on trouve évidemment tous les cas intermédiaires que nous n'avons pas retenus ici. Il est logique d'attacher chacune de ces formes de crues à un mode de fonctionnement particulier lié à la fonction de transformation de la pluie en débit et donc à un mode de

cheminement de l'eau à l'intérieur du bassin plus ou moins rapide. Nous avons donc cherché à expliquer ces formes par les grandeurs mesurées sur le terrain.

Comparaison des formes de crues à la station amont et à la station principale

On observe qu'il n'y a pas de contradiction entre le type de crue observée à la station amont et le type de crue observée à l'aval et que les classes 1 et 2 recouvrent bien les mêmes ensembles disjoints de l'échantillon des crues. Cela tend à montrer que le comportement du bassin n'offre pas d'anomalie spatiale particulière et que son fonctionnement est parfaitement déterminé dès l'amphithéâtre de la tête de cours d'eau, c'est-à-dire dès que l'ensemble géomorphologique complet dans la totalité de son continuum versant / bas-fond.

Analyse par des méthodes statistiques multivariées

Deux méthodes d'analyse ont été utilisées par Chevallier (1988). L'une utilise la *notion de tableau de contingence généralisé*, l'autre une *analyse factorielle des correspondances* (AFC). Les principaux résultats obtenus sont :

- Les crues de type 1 qui sont caractérisées par des débits de pointe élevés, des temps de montée et de base courts, sont provoquées par des averses importantes avec de fortes intensités en 30 ou 60 minutes, ainsi que des hauteurs élevées tombées avec des intensités supérieures à 10, 20, 30, 40 ou 60 mm/h. Inversement les crues de type 2 à débits de pointe faibles, temps de montée et de base longs, apparaissent pour de faibles intensités en 10, 30 et 60 minutes, ainsi que de faibles hauteurs tombées avec des intensités supérieures aux seuils choisis.
- L'AFC confirme que le principal descripteur des crues est d'abord leur forme et ensuite les conditions initiales du milieu récepteur. On peut d'ailleurs ramener la description de forme à l'étude de la variable *débit maximal / temps de montée* qui représente la *vitesse de montée de l'hydrogramme* ; en effet les temps de montée et de base sont assez étroitement corrélés et il vaut mieux choisir le temps de montée dont la détermination est plus précise.
- Les variables de durée d'averse, d'indice de précipitations antérieures ou de ressuyage n'interviennent pas dans l'analyse des crues.

Influence de l'état initial

L'analyse multivariée donne un certain nombre d'indications, mais n'a pas permis de lier la forme de crue à une relation mathématique avec les grandeurs descriptives de la précipitation ou du milieu récepteur. En particulier l'influence de l'état du milieu récepteur n'apparaît pas à travers cette approche.

Une analyse sommaire a cependant été tentée en séparant grossièrement les crues en deux sous-ensembles au dessus et au dessous d'une valeur seuil prise comme la médiane du logarithme de la variable de forme donnée par l'AFC (*débit maximal / temps de montée*). Pour l'échantillon réduit cette valeur est de -4. La classe A (1 sur la figure n°7) est constituée par les valeurs qui sont au dessus de cette valeur ; et la classe B (2 sur la figure n°7) par les autres. La classe A comporte donc des crues qui tendent plutôt vers le type 1 et la classe B par des crues qui tendent plutôt vers le type 2.

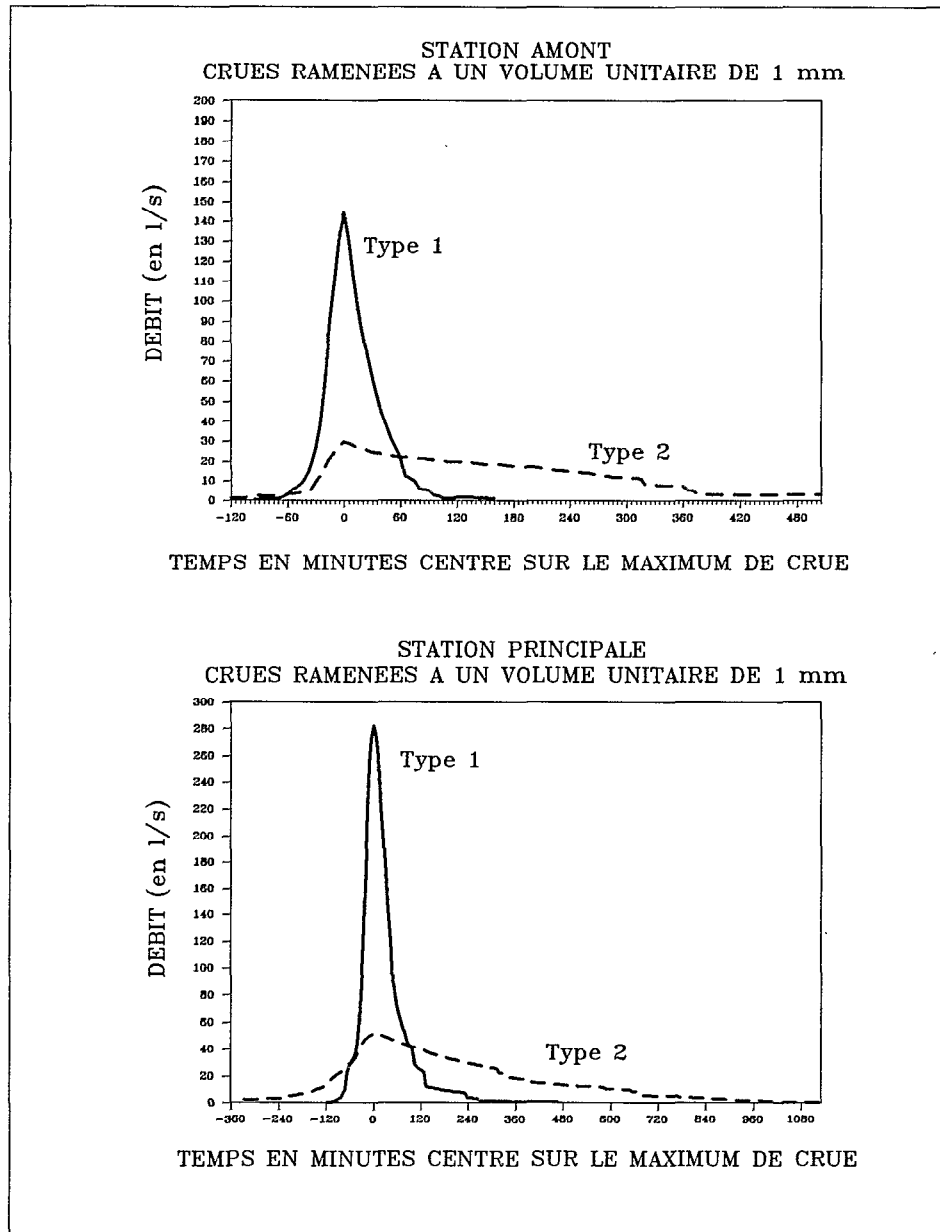


Figure 6. Les deux types de crues.

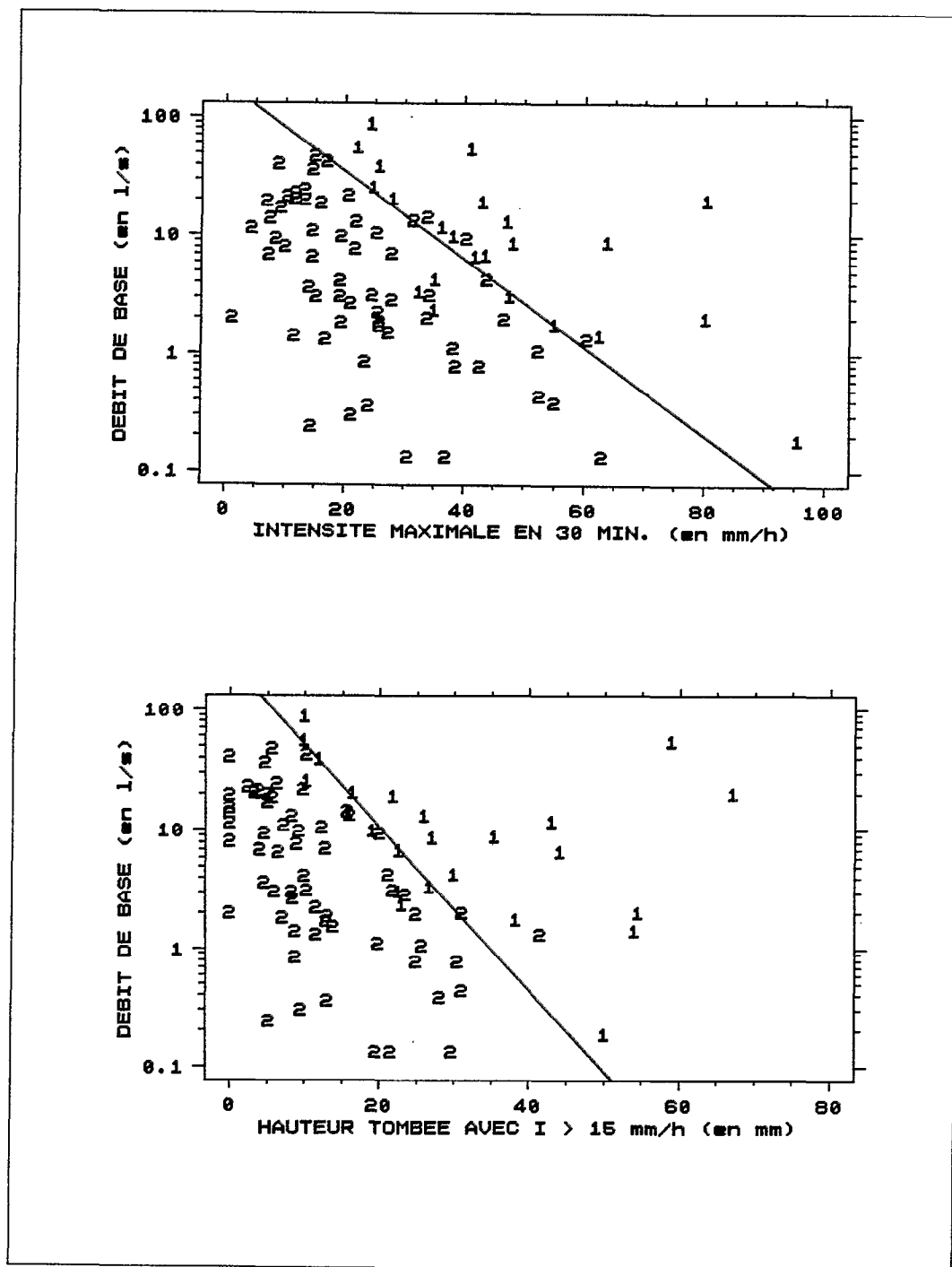


Figure 7. Forme des crues. Influence de l'état initial.

Le résultat est présenté sur la figure n°7, où toutes les crues (et non pas seulement les crues de l'échantillon réduit) sont prises en compte. On s'aperçoit qu'il est possible de nettement séparer les deux familles de part et d'autre des droites d'équation :

$$\text{Log}(Q_b) = 2,253 - 0,036 I_{x30}$$

$$\text{Log}(Q_b) = 2,333 - 0,067 P_{15}$$

avec :

- Q_b , débit de base (en l/s) ;
- I_{x30} , intensité d'averse en 30 minutes (en mm/h) ;
- P_{15} , hauteur d'averse tombée avec une intensité supérieure à 15 mm/h (en mm).

Si les conditions initiales données ici par le débit de base et les conditions d'averse sont telles que :

$$\text{Log}(Q_b) > 2,253 - 0,036 I_{x30}$$

ou
$$\text{Log}(Q_b) > 2,333 - 0,067 P_{15}$$

on a toute chance d'observer une crue de type 1 rapide et pointue (et une crue de type 2 retardée et plate dans le cas inverse).

On montre ainsi que la forme de la crue est aussi fortement liée à l'état du réservoir souterrain au moment où elle intervient, en considérant que le volume du débit de base est directement corrélé au niveau de la nappe, ce qui est confirmé par les observations piézométriques dans le bas-fond.

LES CHEMINS DE L'EAU A BOORO-BOROTOU

Chemin de l'eau sur un versant type

Tous les éléments étudiés à l'échelle de la parcelle de simulation de pluie, de l'unité élémentaire, du système de transformation ou du versant conduisent à proposer un schéma de fonctionnement, c'est-à-dire une description des chemins de l'eau sur un versant type du bassin tel qu'il est décrit par Fritsch *et al.* (1986) (figure n°8). Nous résumons ici en quelques lignes les résultats présentés dans les exposés qui précèdent.

Haut de versant

Par haut de versant nous entendons le domaine ferrallitique et les sols rouges, soit environ 50 % de la superficie totale du bassin.

Les buttes cuirassées et piémonts de cuirasse ont un comportement hydrodynamique très hétérogène, la structure chaotique du sol autorisant en certains endroits une infiltration totale et en d'autres endroits une imperméabilisation parfaite. Sur le sommet des buttes apparaissent, même en saison des pluies, des petites mares significatives d'un endoréisme local. On admettra ce comportement endoréique globalement sur la partie haute des buttes, confirmé par les analyse des structures pédologiques.

La structure des sols rouges les rend particulièrement bien drainants et l'infiltration est totale dans les conditions normales de précipitation. Le fonctionnement se fait verticalement dans la zone non-saturée où la plus grande part de l'eau est stockée

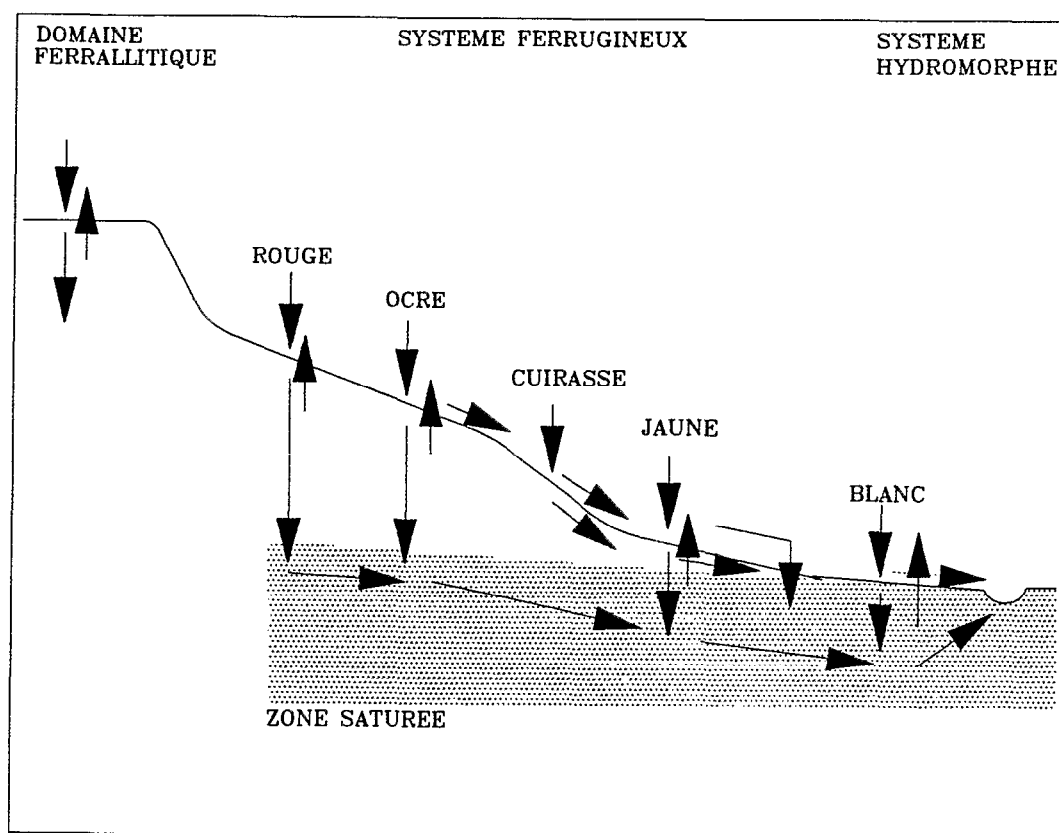


Figure 8. Représentation schématique des chemins de l'eau sur un versant type de Booro-Borotou.

temporairement, puis reprise par évaporation. Cependant le remaniement des horizons superficiels sur certaines jachères récentes a induit des organisations pelliculaires susceptibles d'initier du ruissellement de surface.

Mi-versant

La zone de mi-versant couvre les sols ocres, les indurations cuirassées et les sols jaunes, soit environ 42 % de la superficie totale du bassin.

Dans toute cette zone, on ne note pas d'intervention directe de la nappe sur les mécanismes de l'écoulement ; mais sa remontée dans les sols jaunes est susceptible de les influencer.

Sur les sols ocres le mécanisme est comparable à celui des sols rouges avec en plus un écoulement de surface qui se produit dès que les conditions d'humectation sont suffisantes. La reprise évapotranspiratoire sur la zone non saturée reste importante et l'apport à la nappe sans doute faible.

Sur l'induration de mi-versant l'écoulement de surface atteint sa valeur maximale et le drainage profond est bloqué. La carapace induit une dynamique latérale et conduit à des écoulements latéraux internes. Immédiatement à l'aval, les sols jaunes ont d'abord un fonctionnement semblable à celui des sols ocres, puis en se dégradant deviennent bouillants et extrêmement bien drainants ; ce drainage est facilité encore par la macroporosité d'origine faunique. L'écoulement de surface issu de l'amont s'infiltre progressivement pour disparaître totalement. Cette eau va pour une grande part alimenter la nappe qui, en remontant se rapproche de la surface. La zone non-saturée, en effet, ne suffit pas pour stocker l'excédent non évapotranspiré et les nouveaux apports dus à l'infiltration de l'écoulement de surface venant de l'amont.

Bas du versant

Le bas du versant est constitué par le système hydromorphe (sols blancs). Il couvre environ 8 % de la superficie du bassin.

Il est directement influencé par les fluctuations de la nappe. Son niveau de base minimum se situe légèrement en dessous du fond du lit de la rivière, mais à une profondeur telle que la nappe reste soumise à l'évapotranspiration très importante de la végétation dense à racines profondes (forêt galerie) qui s'y trouve installée et dont le système racinaire exploite directement les réserves.

Les premières pluies ne font pas remonter tout de suite le niveau de la nappe. Jusqu'à la fin de juillet ces apports restent en équilibre avec la reprise évapotranspiratoire. Le cours d'eau débite dès la remontée de la nappe, d'abord par percolation au travers du fond sableux du lit mineur, ensuite par les apports de petites sources situées à la limite de la zone hydromorphe et des sols blancs.

Les précipitations qui tombent sur le bas de versant se répartissent selon des chemins différents en fonction du niveau de la nappe :

- Lorsque la nappe n'est pas proche de la surface, l'infiltration est totale comme sur le bas des sols jaunes.
- Lorsque la nappe est affleurante dans le bas-fond et subaffleurante dans les sols blancs, le comportement devient typique des écoulements sur surface saturée : ruissellement sur les surfaces saturées, écoulement de retour sur les bas de versants à la limite de l'affleurement de nappe.

Marquage colorimétrique des crues

Pour tenter d'étayer le schéma théorique des chemins de l'eau sur un versant type, une tentative de traçage coloré des eaux d'écoulement de surface a été entreprise lors de trois crues de la fin de la dernière saison d'observation (Planchon, 1989).

La première expérimentation a été faite dans la ravine des Hollandais (situation sur la figure n°5) qui est hydrologiquement connectée au cours d'eau. Le colorant injecté à la pointe de crue de la ravine est observé à la pointe de crue à la station principale. L'hypothèse selon laquelle une onde de crue provenant des versants peut, en fin de saison, rejoindre l'exutoire du bassin par un chemin entièrement superficiel est donc presque démontrée : en effet, si l'eau avait transité par le sol, ne serait-ce que sur une courte distance, il est peu probable que le colorant ait atteint l'exutoire de façon aussi concentrée. La forme de crue était pointue.

Les deux expériences suivantes ont été faites dans la ravine Iris (situation sur la figure n°5) dont la connexion n'est pas assurée et dépend du niveau de la nappe. Une infiltration totale de l'écoulement en provenance de la ravine s'est produite ; parallèlement on a observé une augmentation régulière et rapide du niveau de base dans le bas-fond qui s'est traduite par la progression de la zone inondée de l'aval vers l'amont. Entre le début de l'averse et le moment où la pointe de crue atteignait la station amont, la tête du court d'eau est remontée d'une centaine de mètres le long du cours d'eau principal sans qu'aucun écoulement superficiel ne lui parvienne. Dans les deux cas la forme de crue était pointue et aucune trace du colorant n'a été retrouvée à la station principale.

Commentaires

On s'aperçoit donc que les mécanismes de l'écoulement sont particulièrement complexes puisqu'il apparaît que ce n'est pas uniquement l'écoulement superficiel qui explique la forme pointue de certaines crues, mais qu'il faut y associer aussi la plus ou moins grande rapidité de fluctuation du niveau de la nappe sous l'averse :

- Lorsque le chemin superficiel est établi de façon généralisée sur le bassin (ce qui n'est arrivé qu'une seule fois pendant les quatre années d'observation), la crue est obligatoirement pointue.
- Le rôle spécifique des ravines dans la genèse des crues ne semble pas essentiel. Certes les ravines de la tête de vallée contribuent à un apport rapide d'eau à la nappe et à une montée rapide de celle-ci au cours de l'averse ; mais, on a vu que l'écoulement sur les versants et dans ces ravines est à son tour en relation avec le niveau de la nappe parfois situé à plusieurs mètres de profondeur.

La variation plus ou moins rapide du niveau de la nappe sous l'averse semble donc être la principale cause de la forme des crues en l'absence de ruissellement direct généralisé. La relation établie entre cette forme des crues et l'association *intensité d'averse / débit de base* ne peut qu'aller dans le même sens.

Il est probable que le mécanisme de production d'écoulement rapide (et même très rapide, puisque certaines des crues sont bien *pointues*) corresponde au mécanisme d'*intumescence de nappe* décrit par Ragan (1968). Les fluctuations rapides de la nappe seraient liées à une transmission de la pression exercée par le front d'humectation sur une grande partie du versant, entraînant la saturation presque immédiate de la couche limite non saturée de la nappe. La forme du réservoir sableux en poche remontant sous le système cuirassé (Fritsch *et al.*, 1990) favorise évidemment ces mises en pression confirmées par deux tubes piézométriques du bas-fond au fonctionnement artésien.

CONCLUSION

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 de deux façons :

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

période 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 les formes variables des hydrogrammes observés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Beven (K.J.)**, 1989. Interflow. In : Morel-Seytoux H.J. (editor), *Unsaturated Flow in Hydrologic Modelling. Theory and Practice. NATO ASI Series, Series C: Mathematical and Physical Sciences - Vol. 275*, pp. 191-220.
- Chevallier (P.)**, 1988. Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide : Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). *Thèse Université des Sciences et Techniques du Languedoc*. 332 p. + cartes.
- Chorley (R.J.)**, 1978. The hillslope hydrological cycle. In : Kirkby M.J. (editor), *Hillslope Hydrology*. John Wiley & Sons, pp. 1-41.
- Dunne (T.)**, 1978. Field studies of hillslope flow processes. In : Kirkby M.J. (editor), *Hillslope Hydrology*. John Wiley & Sons, pp. 227-293.
- Dunne (T.)**, 1983. Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff. In : Rodriguez Iturbe I. and Gupta V.K. (guest-editors), *Scales problems in hydrology. J. Hydrol.*, 65 : 25-48.
- Freeze (R.A.)**, 1972. Role of subsurface flow in generating surface runoff. 2. Upstream source areas. *Water Resour. Res.*, 8(5) : 1272-1283.
- Fritsch (E.), Planchon (O.), Boa, (C.)**, 1986. Les transformations d'un paysage cuirassé au nord-ouest de la Côte d'Ivoire sur formations gneisso-migmatitiques. In : *Land development - management of acid soils. IBSRAM Proc. n°4*.
- Fritsch (E.), Chevallier (P.), Planchon (O.)**, 1990. Le fonctionnement hydrodynamique du bas de versant : le système hydromorphe. Cet ouvrage.
- Horton (R.E.)**, 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, 14, pp. 446-460.
- Kirkby (M.)**, 1988. Hillslope runoff processes and models. *J. Hydrol.*, 100 : 315-339.
- Planchon O.**, 1989. Le relief, les paysages et les formes d'érosion linéaire : leur importance dans le fonctionnement d'un petit bassin versant (Booro-Borotou, Côte d'Ivoire). *Thèse, Univ. Montpellier*. 163 p. + fig. h.t. (édition provisoire).
- Ragan (R.M.)**, 1968. An experimental investigation of partial area contributions. *Berne Symposium Proc., LAHS Publ. n°76*, pp. 241-249.
- Roche M.**, 1986. Dictionnaire français d'hydrologie de surface. *Masson, Paris*, 288 p.