

EFFET D'ECHELLE OBSERVE SUR LE RUISSellement DANS LE NORDESTE BRÉSILIEEN

MOLINIER M¹., LEPRUN J.C.², AUDRY P.³

RESUME

Ce travail présente une partie des résultats des études effectuées dans une région du semi-aride du Nord-Est brésilien par une équipe de pédologues et d'hydrologues de l'ORSTOM. Il aborde notamment le problème d'effet d'échelle de la superficie sur le ruissellement; phénomène qui a pu être mis en évidence et chiffré sur des surfaces allant du mètre carré à l'hectare. Une explication liée à la structure du substrat rocheux et à la distribution des sols dans le paysage a pu être proposée. De plus, la mise au point d'un modèle vertical de simulation de l'infiltration sur des microparcelles de 1m² pourra permettre de préciser les règles de transfert des résultats de cette superficie élémentaire à des superficies plus grandes prenant en compte le rôle de la distribution des sols et de la végétation sur les différents termes du bilan hydrique.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre des travaux d'une ATP-PIREN intitulée : "*Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols*" dont les rapports finaux viennent d'être publiés (MOLINIER et al. 1989a; MOLINIER et al. 1990), les conditions d'extrapolation spatiale ont été abordées. Les résultats obtenus concernant le couple pluie-ruissellement de surface qui ont trait au transfert d'échelle sont repris et présentés ici.

¹Hydrologue ORSTOM - DNAEE, Brasilia.

²Pédologue ORSTOM - Représentation ORSTOM/CIRAD, Brasilia.

³Pédologue ORSTOM - CNPq, Recife.

2 - CADRE DE L'ETUDE

Le bassin expérimental de Sumé, Etat de la Paraíba, est situé dans la zone semi-aride du Nord-Est brésilien (7°40'S, 37°00'W) et fait partie d'un bassin représentatif de 137,4 km². Il est inclus dans le sous-bassin de Umburana de 10,7 km² dont le comportement hydrologique est étudié depuis 1971 (CADIER et FREITAS, 1982; CADIER et al, 1983) par la SUDENE (Surintendance de Développement du Nordeste).

A l'amont d'une retenue collinaire (açude) ont été installés divers dispositifs de mesure. Le site a été choisi en raison de l'homogénéité du sol et de la représentativité régionale des sols, du climat, des roches, du relief, de la végétation et des pratiques culturales.

Le climat est caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle de 590 mm dont le coefficient de variation peut dépasser 50%, 7 à 8 mois secs par an, une température moyenne de 24°C et une évaporation moyenne annuelle du bac de classe A de 2900 mm. Les roches dominantes sont des migmatites du socle cristallin précambrien. Le modelé, faiblement ondulé, est constitué de versants courts dont la pente varie de 4 à 9% en moyenne. La végétation, du type forêt épineuse basse et dense de 2 à 5 m de hauteur, appelée "caatinga", est riche en légumineuses arborées et arbustives et présente une strate graminéenne réduite. Son pouvoir de régénération est important. 85% des sols du bassin sont classés comme sols "bruns non calciques vertiques", les 15% restants étant composés de sols bruns non vertiques et de vertisols. Les sols dominants sont constitués de 4 horizons argilo-sableux: A1 à structure polyédrique, (B) cubique, (B)C vertique et C arénitique et ont une épaisseur de 50 à 90 cm. Ce sont des sols chimiquement riches mais dont la faible épaisseur et la perméabilité réduite limitent les potentialités agricoles. Ils sont cependant cultivés en coton arboré, maïs, haricot et palme fourragère en sec et en légumes divers sous irrigation.

3 - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Un dispositif expérimental constitué de microparcelles de 1m², de parcelles de 100 m² et de microbassins de 1 ha a permis d'étudier le ruissellement en fonction de ces trois échelles de superficie sur sol nu et sous végétation naturelle. Les sols sont, pour toutes les superficies utilisées, les mêmes sols bruns plus ou moins vertiques. Les microbassins comportent toutefois, à l'amont, une association de sols bruns non vertiques peu épais et de lithosols et affleurements rocheux et à l'aval des vertisols. La figure 1 illustre la succession ordonnée des sols et des roches. Cette distribution des sols dans le paysage est sous la dépendance étroite de la nature de la roche sous-jacente : sols bruns et lithosols sur les pegmatites des lignes de crête,

sols bruns vertiques sur les gneiss à amphiboles des versants, vertisols sur les amphibolites des dépressions.

Les ruissellements sur microparcelles ont été obtenus à partir de pluies simulées. L'appareil utilisé est l'infiltromètre à aspersion type ORSTOM (ASSELINÉ et VALENTIN, 1978; CASENAVE, 1982). Pour un examen plus détaillé du dispositif expérimental est il est demandé de se reporter au rapport final (MOLINIER et al. 1989a).

On a pu établir des relations donnant la lame ruisselée (LR) en fonction de l'averse correspondante (P) et de l'indice d'humidité (IP) représentatif de l'état d'humectation préalable des sols.

L'indice d'humidité choisi est de la forme suivante :

$$IP_n = (IP_{n-1} + P_{n-1}) * K^{Tr}$$

où :

- Tr est le temps séparant l'averse étudiée P_n de l'averse antérieure P_{n-1}
- IP_n est l'indice d'humidité avant la pluie P_n du jour n
- IP_{n-1} est l'indice d'humidité avant la pluie P_{n-1}
- K est un coefficient d'ajustement qui dépend de la perméabilité du sol et de la cinétique de ressuyage de ses horizons.

4 - RESULTATS OBTENUS

4.1 - Les relations pluie-ruissellement

Pour mieux représenter la lame ruisselée LR, on a retenu deux types de relation LR=f(P,IP) :

$$LR = a.P + b.IP + c \quad [\text{sols nus}] \quad [1]$$

$$LR = A.P + B.P.IP + C.IP + D \quad [\text{sols sous végétation}] \quad [2]$$

Le tableau I ci-dessous donne les différents coefficients de ces 2 relations pour chacune des trois superficies étudiées sur sol brun vertique et la figure 2 donne la représentation graphique de ces mêmes relations dans les 6 cas étudiés et dans des conditions comparables d'humidité préalable des sols (conditions médianes IP=125).

TABLEAU I : Valeurs des coefficients des relations [1] et [2]

SOLS NUS			SOLS SOUS VEGETATION				
	a	b	c	A	B	C	D
1m2	0.691	0.009	-3.1	0.165	0.00064	0.0116	-5.26
100 m2	0.605	0.016	-4.5	0.149	0.00052	0.0090	-6.01
1ha	0.558	0.020	-7.9	0.134	0.00039	0.0065	-6.94

Les coefficients a, b, A, B, C et D sont directement fonction de la superficie correspondante, ou plus exactement de son logarithme. Si bien que l'on peut calculer la valeur de la lame ruisselée en fonction de la pluie (P), de l'indice d'humidité (IP) et de la superficie (S) à l'aide des relations suivantes, pour des superficies comprises entre 1m2 et 1ha :

Sols nus

$$LR = 0,69.P - (0,033.P - 0,003.IP).logS + 0,010.IP - 5 \quad [3]$$

Végétation :

$$LR = 0,165.P + 0,00064.P.IP + 0,0116.IP - 5,26 - logS (P/129 + P.IP/16000 + IP/784 \ 0,42) \quad [4]$$

Ces résultats montrent que, dans des conditions moyennes d'humidité, le ruissellement sur les sols nus de Sumé diminue d'environ 5% chaque fois que la superficie double.

Le graphique de la figure 3 donne les valeurs du ruissellement sous végétation en fonction de celui sur sol nu, pour une même pluie et pour 2 indices d'humidité :

IP = 50 ----> sol sec

IP = 300 ----> sol très humide

On constate que la réduction de ruissellement est d'autant plus importante que le sol est plus sec. En effet, sur sols secs, l'influence de la végétation sur l'infiltration est prépondérante. Mais lorsque les sols sont très humides, cette influence diminue, et l'horizon A fortement saturé devient un des facteurs principaux limitant l'infiltration.

Ce graphique montre, en outre, que sur microbassins de 1ha, les sols sous végétation naturelle retiennent, selon l'état d'humidité des sols, les 10 à 20 premiers millimètres qui s'écoulent sur les microbassins dénudés. Par la suite, dans le cas des fortes pluies, 60 à 85 % de la part supérieure à ces 10 ou 20 premiers millimètres seront retenus dans le sol. Sur 1m², la première interception se réduit à 5-15 mm et la suivante à 50-80 % de la part supérieure à ces 5-15 mm.

4.2 - Autres résultats

Le rôle prépondérant de deux facteurs a été mis en évidence dans le déterminisme de la circulation des solutions dans l'écosystème. Il s'agit du couvert végétal qui règle l'infiltration superficielle et de l'organisation de la couverture pédologique qui règle les circulations internes. Un schéma du fonctionnement de l'écosystème à l'échelle du versant a été proposé (fig. 4). A partir de ce schéma des différents flux circulant dans le sol, il a été possible de déterminer chacune des composantes d'un modèle vertical de circulation de l'infiltration. Ce modèle (MOLINIER et al, 1989b) est constitué d'un module unidimensionnel vertical, basé sur la loi de Darcy, calé sur les deux grands types de sols présents, sols bruns vertiques et sols bruns modaux. Il simule l'infiltration et le remplissage des réservoirs correspondants aux divers horizons, ainsi que la redistribution verticale et l'évapotranspiration. Chaque fois que les horizons A et C arrivent à saturation, les transferts latéraux sont réalisés sous la forme d'une vidange des réservoirs qui interfèrent, bien entendu, avec l'ensemble des profils hydriques de chaque unité de l'espace discrétisé.

Un bilan géochimique des solutions permet de chiffrer les flux d'entrée, des stagnations et de transit ou de sortie des eaux de l'écosystème, et les processus d'acquisition de leur minéralisation.

5 - EFFET D'ECHELLE

Les résultats obtenus sur les microparcelles de 1m², les parcelles de 100m² et les microbassins de 1ha du bassin versant expérimental de Sumé (tableau I, fig. 2 et 3), ont montré que, tant sur sols dénudés que sous végétation naturelle, la lame ruisselée diminuait lorsque la superficie augmentait, pour une même pluie et dans des conditions comparables d'humidité préalable des sols. Ce phénomène d'effet d'échelle de la superficie sur l'écoulement est assez connu des hydrologues qui ont souvent des difficultés à extrapoler les résultats obtenus sur petites superficies à des superficies plus grandes. Cependant, il est parfois possible d'obtenir, localement, des résultats assez intéressants. Ainsi, on a pu montrer (MOLINIER, 1981) que dans la région de Comba au Congo, certaines caractéristiques des crues des petits bassins versants de superficies comprises entre 1 et 100 km² étaient directement proportionnelles à ces superficies.

Une explication de ce phénomène peut être donnée par la différence de chemin parcouru par l'eau avant d'arriver à l'exutoire. En effet, on admet que l'eau de pluie qui ruisselle sur une microparcelle de 1m^2 parvient intégralement au dispositif d'enregistrement. Sur des parcelles plus grandes, ou des bassins versants, on conçoit parfaitement que l'eau ruisselant de l'amont puisse s'infiltrer en aval avant de parvenir à l'exutoire, et ceci avec une probabilité d'autant plus importante que le bassin, donc le chemin parcouru, est plus grand. Ces pertes par infiltration peuvent donc expliquer, en partie, l'effet d'échelle.

Mais dans le cas des sols de Sumé, un facteur explicatif supplémentaire de ce phénomène est la nature diversifiée et la structure plissée-faillée du substrat rocheux qui commande, aux différentes échelles, la distribution et les proportions relatives de sols à comportements hydrologiques différents. Dans ce système où dominent les sols peu perméables (bruns vertiques) associés à des sols plus perméables (bruns modaux passant à lithosols), la proportion de ces derniers augmente à mesure qu'on embrasse une superficie croissante en remontant un versant jusqu'à intégrer l'ensemble du bassin. L'augmentation de la proportion des zones perméables - qui favorisent l'infiltration - lorsqu'on augmente la superficie peut aussi expliquer l'effet d'échelle constaté. On peut ajouter qu'à une échelle plus ample, on intégrerait des sédiments des marges d'axes de drainage qui augmentent la capacité moyenne d'infiltration à l'aval.

On a aussi constaté que sur sol sec et sous végétation naturelle, l'effet d'échelle est pratiquement inexistant. Une explication de ce phénomène pourrait être la suivante: si l'on considère que l'intensité du ruissellement est maximum lorsque le réservoir constitué par l'horizon A est très proche de la saturation (indépendamment de l'échelle), l'effet d'échelle pourrait être du à l'apparition croissante de "fuites" (drainage latéral et profond du à l'influence de la végétation et des racines) éliminant une partie de l'eau de ce réservoir au fur et à mesure qu'augmente la superficie.

6 - CONCLUSION

Les études réalisées sur le bassin versant expérimental de Sumé ont permis de mettre en évidence un effet d'échelle sur la lame ruisselée pour des superficies comprises entre le mètre carré et l'hectare (et même 10km^2 pour les forts ruissellements). Ce phénomène a pu être quantifié grâce aux relations donnant la lame ruisselée en fonction de la pluie, de l'état d'humidité préalable des sols et de la superficie étudiée (Cf. relations [3] et [4] ci-dessus). Une explication spécifique au système des sols de la région a pu être apportée. Celle-ci s'appuie sur l'hétérogénéité du sol et du sous-sol dont la distribution et les proportions relatives influent sur les comportements hydrologiques de chaque superficie étudiée.

Outre la possibilité d'évaluer les différents termes du bilan hydrique au niveau de la parcelle élémentaire (unité géographique), le modèle vertical cité ci-dessus doit permettre de préciser les règles de transfert des résultats en fonction des superficies considérées, simulant ainsi l'effet d'échelle qui, dans ce cas, est représenté par la diminution de la lame ruisselée lorsque la superficie drainée augmente. Ce facteur d'échelle pourrait être mis en évidence par l'interconnexion entre eux des modules verticaux de simulation. Pour ceci, chaque superficie plus importante sera divisée en zone élémentaire de caractéristiques physiques homogènes (sol, végétation, pente, état de superficie), où seront appliqués les modèles de simulation verticaux calés précédemment sur des superficies élémentaires de 1m² possédant les mêmes caractéristiques physiques que chaque zone élémentaire choisie.

BIBLIOGRAPHIE

- ASSELIN, J., VALENTIN, C., (1978), "Construction et mise au point d'un *infiltramètre à aspersion*". Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. Volume XV, n°4.
- CADIER, E., FREITAS, B.J.de, (1982), "*Bacia representativa de Sumé. Primeira estimativa dos recursos de água. Campanhas de 1973*" a 1980. Recife, SUDENE-DRN, Série Hidrologia, n°13.
- CADIER, E., FREITAS, B.J.de, LEPRUN, J.C., (1983), "*Bacia experimental de Sumé. Instalação e primeiros resultados*". Recife, SUDENE-DRN, Série hidrologia, n°16.
- CASENAVE, A., (1982), "Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures". Cah., ORSTOM, Sér. Hydrol. Volume XIX n°4.
- MOLINIER, M. (1981) - "Etude hydrologique des bassins de la Comba (République Populaire du Congo)". Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., Volume XVIII, n°2-3, pp. 75-190.
- MOLINIER, M., AUDRY, P., DESCONNETS, J.C., LEPRUN, J.C., (1989a) Projet : "Dynamique de l'eau et des matières dans un écosystème représentatif du Nordeste brésilien. Conditions d'extrapolation spatiale à l'échelle régionale". Rapport final. ATP-PIREN, ORSTOM, Recife.
- MOLINIER, M., AUDRY, P., LEPRUN, J.C., (1989b) "Modelagem do escoamento e da infiltração em um solo bruno não cálcico do Nordeste". VIII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, 26-30 nov. 1989, Vol. 1, pp
- MOLINIER, M., AUDRY, P., DESCONNETS, J.C., LEPRUN, J.C., (1990) Projet : "Dynamique de l'eau et des matières dans un écosystème représentatif du Nordeste brésilien. Conditions d'extrapolation spatiale à l'échelle régionale". ATP : "Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols", juin 1986-juin 1989. Rapport final, IMG, Grenoble, pp. 159-177.

RELATIONS AVERSE-RUISSELLEMENT

Sols de Sumé-Brésil

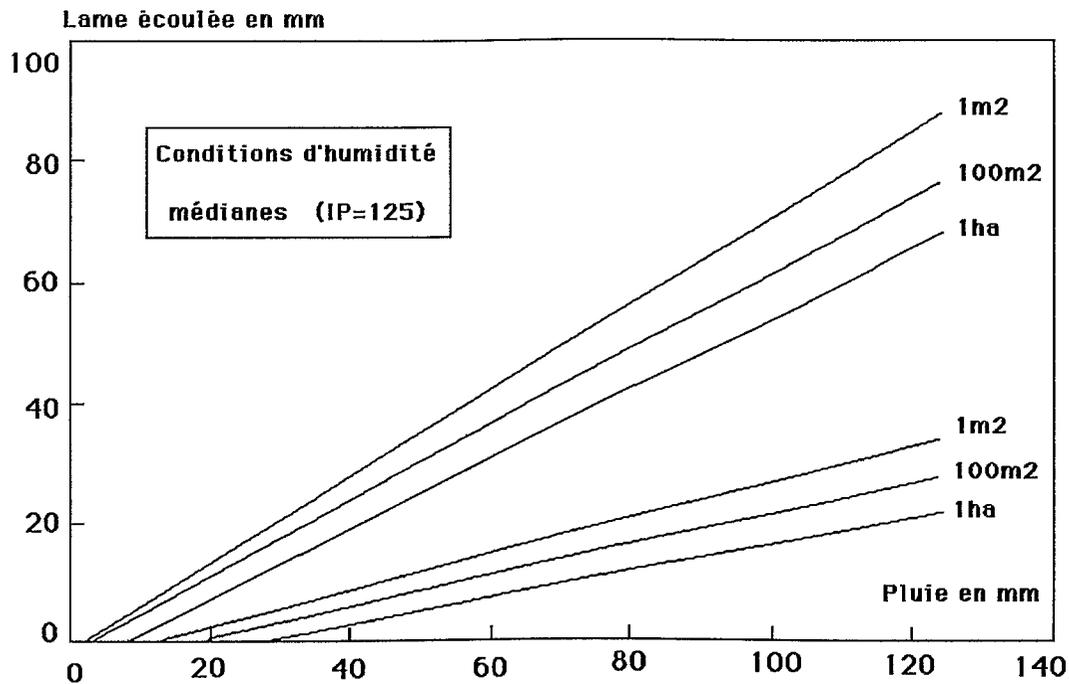


Figure 2

