

La production de sédiments sur les versants et leur transport à l'échelle du km² en savane humide, Côte d'Ivoire

OLIVIER PLANCHON

ORSTOM, 2051 Avenue du Val de Montferrand, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex, France

Résumé L'étude se situe sur un bassin versant de 1.39 km² en Côte d'Ivoire. On a suivi la production des sédiments sur les versants par des petits pièges à sédiments et leur transport vers le bas-fond par l'étude de la propagation des crues le long des ravines d'érosion. L'étude montre que, à l'échelle du versant, l'érosion est plus importante en début de saison des pluies lorsque le paysage est encore ouvert par les feux de brousse, mais les crues dans les ravines d'érosion n'atteignent le marigot qu'en fin de saison, lorsque la nappe est au plus haut. Ainsi l'érosion à l'échelle du versant et celle à l'échelle du bassin sont contrôlées par des phénomènes différents et contradictoires. On montre également que la mise en culture, en augmentant à la fois l'érosion et le ruissellement, peut surmonter ces obstacles et provoquer de l'érosion à l'échelle du bassin.

Sediment production and transport on the square kilometre scale in humid savannah, Ivory Coast

Abstract The study took place on a 1.39 km² basin in the Ivory Coast. We have observed the sediment production on the slopes by means of small sediment pits and sediment transport downslope through the examination of floods propagation down the erosion ravines. The study shows that, at the level of the slopes, the erosion is more important at the beginning of the rainy season when the landscape is still bare after bush fires. However, the floods in the erosion ravines reach the backwater only at the end of the season when the water table is at its highest. Thereby, the erosion on the slope scale and the erosion on the basin scale are controlled by a number of contradictory phenomena. We also show how cropping can modify this equilibrium.

INTRODUCTION

L'équipe multidisciplinaire **HYPERBAV** (HYdro-PEdologie de Recherche sur BAssin Versant) cherche à modéliser les écoulements d'un bassin versant de 139

ha, situé au nord-ouest de la Côte d'Ivoire. Les versants de ce bassin sont soumis à des réorganisations pelliculaires importantes et on y observe fréquemment des signes marqués d'érosion en nappe. D'autre part les formes d'érosion linéaire sont nombreuses sur les versant. Nous montrerons d'abord quels sont les facteurs de l'érosion sur les versants, puis nous étudierons les modalités du transport des sédiments à l'extérieur du bassin. La comparaison des résultats de ces deux études nous permettra de discuter de l'évolution des phénomènes mis en jeu lors du passage de l'échelle de la portion de versant à celle du bassin dans la mesure de l'érosion.

MATERIEL ET METHODES

Le bassin versant

La végétation La végétation est composée, dans le bas-fond, d'une forêt galerie discontinue, et sur les versants, d'une savane arborée présentant des faciès très différents, en particulier par la densité de recouvrement des ligneux qui varie très largement de la savane arbustive à la savane boisée. Si le bassin n'est cultivé actuellement que sur 7.1% de sa superficie, les hauts de versants sont presque entièrement occupés par des jachères d'une quarantaine d'années au maximum.

Les formes d'érosion Trois systèmes d'érosion linéaire ont été différenciés (Planchon *et al.*, 1987): celui du haut de versant, constitué de proto-griffes, de griffes et de ravineaux, dépend du ruissellement superficiel. A la mi-versant, la formation de ravineaux et de ravines dont la section peut atteindre trois mètres de côté est induite par une pente plus marquée. En bas de versant, des griffes entaillent des dépôts colluvio-alluviaux. Elles se trouvent souvent dans le prolongement des incisions du versant, mais n'y sont généralement pas reliées morphologiquement, ce que l'on peut observer sur la Fig. 1.

Pluviographie La précipitation moyenne annuelle est de 1360 mm, répartie sur une seule saison des pluies pendant les mois d'avril à octobre. Le Tableau 1 donne une idée du type d'averse que l'on y rencontre.

Les observations effectuées

Orientation méthodologique Lors de mesures effectuées à une échelle inférieure au bassin versant élémentaire, la notion de bassin versant correspondant à un point de mesure devient imprécise. Au niveau de la parcelle ou de la portion de versant, un chenal bien différencié à un endroit peut se dédoubler ou même disparaître pour redonner du ruissellement en nappe. Ainsi donc, l'eau qui passe en un point donné de la parcelle peut

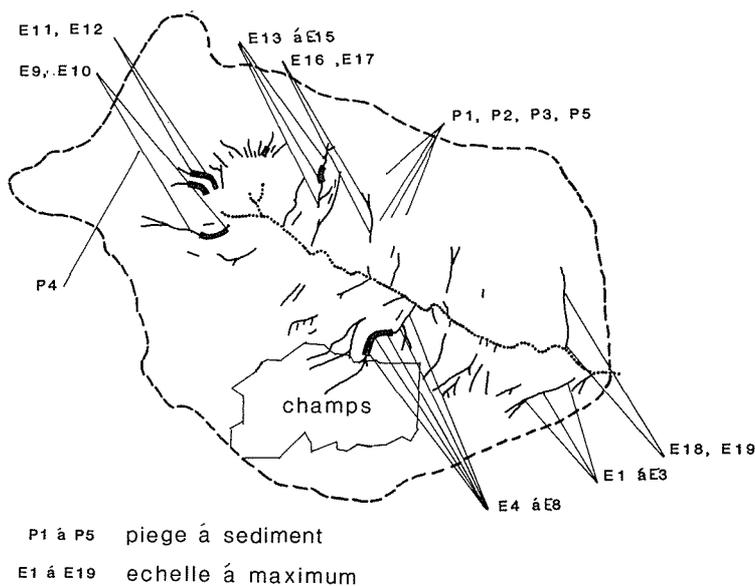


Fig. 1 Carte des formes d'érosion linéaire.

n'être collectée qu'en partie par le point de mesure installé à l'aval; de plus, ces perturbations ne sont pas constantes dans le temps mais dépendent en

Table 1 Caractéristiques des averses

		Valeurs dépassées pour une averse:		
		sur 2	sur 10	sur 20
Hauteur de l'averse*	(mm)	11	31	42
Hauteur précipitée à plus de 50mm h ⁻¹ **	(mm)	0	11.0	17.5
Intensité max. instantanée**	(mm h ⁻¹)	43	132	156
Intensité moyenne maximale sur 10mm*	(mm h ⁻¹)	34	67	81
Energie cinétique totale**	(Jm ⁻²)	210	881	1120

*D'après Kouamé (1987), après ajustement statistique de 4 années de mesures.

**Fréquences observées sur 2 ans.

particulier de la violence de la pluie. Il est donc impossible de définir un bassin versant. Un problème méthodologique se pose donc et il faut l'aborder d'emblée. On doit en effet faire un choix:

- ou bien matérialiser un bassin versant artificiel et effectuer une mesure précise, mais inexacte dans le sens où elle n'exprime pas ce qui se passerait réellement en l'absence de mesure. On peut alors parler d'expérimentation;
- ou bien observer exactement ce qui se passe à l'endroit choisi mais effectuer une mesure imprécise dans le sens où l'on doit alors renoncer à quantifier les résultats obtenus par rapport à une surface, en particulier en termes de coefficient de ruissellement et de pertes en terre.

Les résultats présentés ici proviennent tous d'observations du deuxième type: exacts mais "imprécis". Ce choix effectué, il faut s'affranchir de leur valeur brute, qui ne peut être rapportée à une surface, et concentrer notre attention sur leur structure, aussi bien dans le temps que dans l'espace. Nous pouvons ainsi former une analogie entre notre réseau d'observations et un film vidéo. Dans celui-ci, la luminosité d'un point de l'image en un instant donné n'a pas d'intérêt en elle-même mais fait partie d'un ensemble qui possède une organisation dans l'espace et dans le temps. C'est cette organisation qui est la matière du film.

Deux types d'observations sont utilisés ici, les uns sur les versants, les autres dans les ravines.

Les pièges à sédiments Au nombre de cinq, ce sont des rigoles de 2 m de long creusées perpendiculairement à la pente. C'est une observation ponctuelle des flux qui transitent en un point donné du bassin pendant l'averse. La capacité des pièges est de 225 l et tant que celle-ci n'a pas été dépassée, on connaît pour chaque averse le volume ruisselé. La construction de la rigole est identique à celle proposée par Planchon & Janeau (1987) pour la simulation de ruissellement. La méthode consiste à imprégner le sol à l'amont de la rigole avec de la résine polyester. On protège ainsi la parcelle des érosions parasites dues à la rigole sans pour autant installer de barrière mécanique qui provoquerait un dépôt de sable.

Pour connaître la charge solide totale, on procède en deux étapes. La cuve est d'abord siphonnée avec précaution. L'eau de vidange est prélevée plusieurs fois pour en connaître la charge en suspension. Ensuite, les dix derniers litres sont prélevés intégralement avec tous les dépôts.

La Fig. 1 indique l'emplacement des cinq pièges. Ils sont installés dans des zones de savane arborée claire qui présentent des formes marquées d'érosion en nappe: les touffes d'herbe sont déchaussées de 2 à 5 cm et entre les touffes alternent, en forme de marches d'escalier, des zones peu pentues, de 25 à 50 cm de diamètre, recouvertes de sables grossiers et raccordées entre elles par des zones plus abruptes, recouvertes d'une pellicule d'érosion telle que la décrivent Casenave & Valentin (1988) et où, parfois, le chevelu racinaire affleure. Dans ces zones, les pièges s'échelonnent du haut jusqu'à la mi-versant et se trouvent dans des conditions de pente et de couverture gravillonnaire variées.

Les échelles à maximum 19 échelles à maximum ont été installées sur sept des plus grosses ravines du bassin (Fig. 1). L'installation comprend une cornière métallique plantée au milieu de la ravine et sur laquelle est soudé un godet tous les 5 mm. Ces godets sont remplis de gasoil. Après chaque crue, on détermine la limite entre les godets inférieurs, remplis d'eau par la crue, et les godets supérieurs, contenant encore du gasoil. L'épaisseur de cette limite détermine la précision de la mesure.

Les méthodes d'analyse

Nous disposons de deux groupes de données: la masse de sédiments transportée dans les pièges à sédiment et la cote maximale de chaque crue dans les ravines. Chaque groupe respecte l'analogie avec le film vidéo formulée plus haut: autant d'images qu'il y a eu d'averses pendant les campagnes de mesures 1986 et 1987, cinq points par image pour les versants, 19 pour les ravines. Comme nous l'avons vu, les choix méthodologiques que nous avons fait nous imposent d'analyser chaque groupe de données d'un seul bloc. Nous utiliserons pour cela l'analyse en composantes principales (ACP). Les individus de l'analyse sont les averses et les variables actives sont les valeurs mesurées sur chaque point d'observation. Les variables supplémentaires sont les variables dont on veut tester le pouvoir explicatif – au sens de la corrélation – vis à vis des axes factoriels. Pour nous, ce sont les caractéristiques de la pluie:

- Hauteur:* hauteur de l'averse au pluviographe le plus proche du milieu du bassin;
- IntMax:* intensité maximale de l'averse. Huit pas de temps ont été utilisés pour le calcul de l'intensité maximale, allant de l'instantané à une heure.
- IPA:* indice des précipitations antérieures. C'est la hauteur d'eau dans un réservoir qui reçoit la pluie et dont la vidange est simulée par une exponentielle décroissante:

$$IPA(n) = [IPA(n-1) + P(n-1)] \cdot \exp(-\beta t)$$

$IPA(n)$: IPA pour l'averse n (mm)
 $IPA(n-1)$: IPA pour l'averse $n-1$ (mm)
 $P(n-1)$: hauteur de l'averse $n-1$ (mm)
 β : coefficient de décroissance, (jour)
 t : temps entre les averses $n-1$ et n (jours)

Si β est élevé, IPA exprimera la proximité de l'averse précédente, et lorsque β tend vers zéro, IPA tend vers la précipitation cumulée reçue (pas de vidange du réservoir). Nous avons conservé deux valeurs: 0.5 et 0.05.

Total annuel: hauteur cumulée précipitée entre le premier janvier et le début de l'averse.

EnCin: énergie cinétique de l'averse, calculée, selon la formule ci-dessous proposée par Wischmeier & Smith (1978):

$$EnCin = 21 + 8.9 \log_{10}(\text{intensité})$$

EnCin : énergie cinétique d'une mm de pluie ($J m^{-2}$),
Intensité : intensité de l'averse ($mm h^{-1}$).

Les coefficients proposés ne correspondent pas à des averses intertropicales, mais cette erreur n'introduit pas de biais dans notre analyse car l'ACP utilise des variables centrées et réduites et toutes les combinaisons linéaires d'une même variable sont confondues dans l'analyse. Il nous suffit donc d'accepter l'identité de nature entre la relation énergie-intensité constatée par Wischmeier & Smith, et celle qui existe dans notre échantillon d'averses. La relation proposée est suffisamment simple pour que nous puissions le faire.

RESULTATS

La masse totale de sédiments transportés sur les versants

La première ACP a été effectuée sur la masse totale des sédiments recueillis dans les pièges. La Fig. 2 montre le premier plan d'inertie. On remarque que les cinq variables actives ont la même position sur l'axe 1 alors qu'elles sont très éloignées les unes des autres sur l'axe 2. L'axe 1 exprime donc les facteurs généraux, qui sont toujours source d'érosion, tandis que l'axe 2 exprime les facteurs qui expliquent la variabilité des observations.

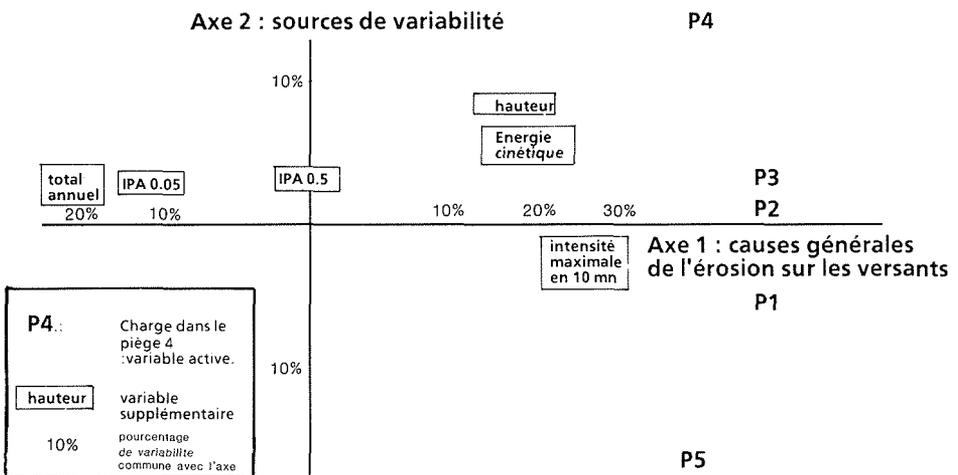


Fig. 2 Les transports solides sur les versants: 1^{er} plan factoriel.

Causes générales On remarque d'abord l'importance de l'intensité maximale de l'averse. La Fig. 2 montre la position de l'intensité maximale en 10 minutes. Les valeurs calculées pour des pas de temps inférieurs ont des positions voisines. L'énergie cinétique, telle que nous l'avons calculée, est

également bien corrélée à l'axe 1 tandis que la hauteur de l'averse a moins de 20% de variabilité commune avec cet axe. C'est donc la notion d'agressivité de la pluie qui est représentée par l'axe 1.

La pluviométrie cumulée depuis le début de l'année, que nous utilisons comme un indice de l'avancement de la saison des pluies, est également bien corrélée à l'axe 1. L'érosion sur les versants est donc soumise à l'influence combinée de l'agressivité de la pluie et de l'avancement de la saison. Cette relation peut être étudiée plus en détail en observant les caractéristiques des averses qui ont causé le plus d'érosion, reportées sur le Tableau 2.

Table 2 Caractéristiques de quatre averses à l'origine des plus forts événements érosifs mesurés sur les versants

<i>Masse totale de sédiments transportés (moyenne des 5 pièges)</i>	286	213	206	199
<i>Hauteur de l'averse (mm)</i>	16.5	34.0	16.0	28.0
<i>Hauteur précipitée à plus de 50 mm h⁻¹ (mm)</i>	13.5	13.5	11.5	16.0
<i>Intensité max. instantanée (mm h⁻¹)</i>	150	180	150	113
<i>Intensité moyenne maximale sur 10 min (mm h⁻¹)</i>	83	86	72	75
<i>Energie cinétique totale (J m⁻²)</i>	612	1117	593	978
<i>Précipitation annuelle cumulée (mm)</i>	192	219	271	163

En comparant les valeurs du Tableau 2 à celles du Tableau 1, on constate que la hauteur de ces quatre averses n'est pas exceptionnelle. Par contre elles ont été brutales: plus de la moitié des valeurs d'intensité maximales correspondent à des fréquences inférieures à 5%. De plus, ces averses sont précoces: elles sont toutes tombées en mai 1987, alors que la pluviométrie cumulée depuis le début de l'année n'avait pas atteint 200 mm. Une pluie analogue est apparue deux mois plus tard, en juillet: 21 mm et 93 mm h⁻¹ pour l'intensité maximale en 10 minutes. La charge moyenne mesurée ne fût que de 39 grammes, soit cinq fois moindre que les valeurs du Tableau 2. La Fig. 3 résume ces remarques. On y voit que la masse de sédiment observée, toutes stations confondues, n'est importante que pour des pluies violentes et précoces.

Sources de variabilité Aucune des variables pluviographiques n'arrive à expliquer correctement l'axe 2. La variabilité serait donc purement spatiale, liée à l'érodabilité des sols par exemple.

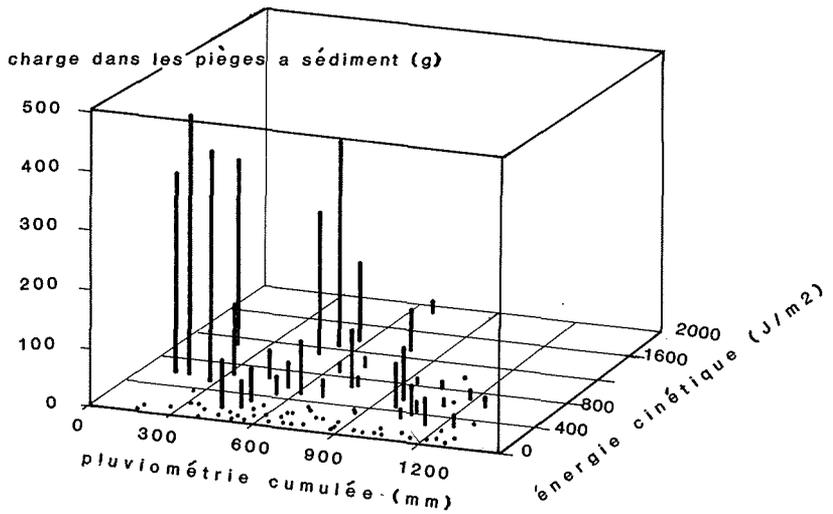


Fig. 3 L'érosion des versants: rôle de l'énergie cinétique de l'averse et son évolution au cours de la saison.

Les écoulements dans les ravines

Examinons maintenant les échelles à maximum. Elles nous fourniront des informations sur la propagation des crues dans les ravines et donc sur le transport des sédiments de l'échelle du versant à celle du bassin.

L'analyse nous fournit toujours les deux mêmes axes principaux: fonctionnement général du bassin et variabilité spatiale (Fig. 4).

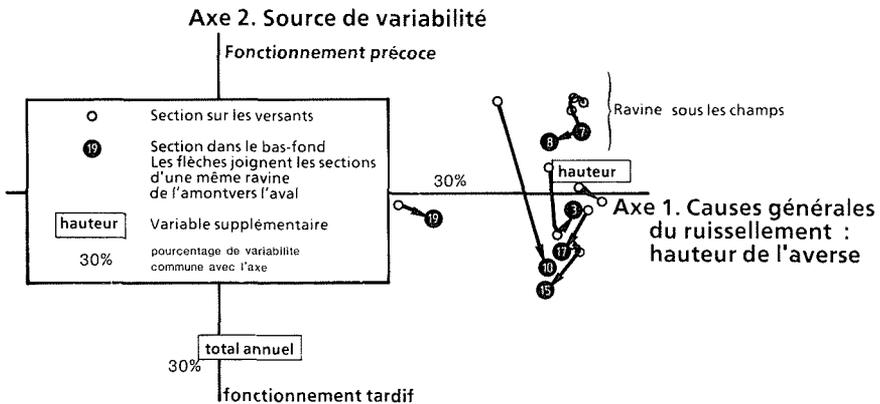


Fig. 4 Le fonctionnement des ravines: 1^{er} plan factoriel.

Causes générales Le bassin dans son ensemble réagit assez simplement: les crues sont d'autant plus importantes que l'est l'averse. Les autres paramètres pluviographiques n'exercent pas d'influence contradictoire.

Source de variabilité La pluviométrie cumulée dans l'année, c'est à dire la variable qui représente l'avancement de la saison des pluies, définit à elle seule l'axe 2. Celui-ci oppose donc les sections au fonctionnement précoce, à celles qui ont un fonctionnement tardif. Le sens qualitatif ainsi donné à l'axe 2 nous permet de comparer entre elles la position des sections sur cet axe. Cette remarque est importante car une comparaison quantitative est impossible. Nous avons vu dans la première partie que nous devions nous affranchir des valeurs brutes de nos données. Ceci est vrai ici plus qu'ailleurs puisque nous ne connaissons pour aucune des sections ni le bassin versant, ni la relation hauteur-débit.

Sur la Fig. 4, les flèches rejoignent les sections implantées le long d'une même ravine de l'amont vers l'aval. On constate que, systématiquement, la partie aval des ravines a un fonctionnement plus tardif que l'amont. D'autre part, la ravine qui a le fonctionnement le plus précoce est celle qui collecte le ruissellement des champs.

DISCUSSION

De la portion de versant au bassin

A l'échelle de la portion de versant Les sédiments recueillis dans les pièges ont été d'abord détachés, puis transportés jusqu'à la rigole. L'analyse porte donc sur la combinaison des facteurs de détachement et de transport. Or, les deux facteurs explicatifs que nous avons retenus sont l'agressivité de l'averse et l'avancement de la saison des pluies, exprimée par la précipitation cumulée depuis le début de l'année.

L'agressivité de l'averse exprime la capacité de la pluie à détacher les sédiments. L'évolution au cours de l'année est à mettre en relation avec l'évolution de la couverture du sol par les graminées: elle est très faible pendant la période qui suit les feux de brousse (décembre et janvier), puis augmente rapidement pour atteindre 90 à 100% en fin d'année. L'avancement de la saison des pluies exprimerait donc ici le rôle protecteur de la végétation vis à vis de l'impact des gouttes de pluies. Cette hypothèse est confirmée par les travaux de Valentin & Janeau (en préparation) qui ont étudié l'évolution saisonnière de la détachabilité par simulation de pluie sur un mètre carré.

Ainsi, à l'échelle de la portion de versant, l'érosion en nappe suit des lois caractéristiques du détachement des sédiments par la pluie. Ce qui signifie que, à cette échelle, la capacité de transport des sédiments n'est pas un obstacle à l'érosion.

A l'échelle du versant Les ravines sont le lieu privilégié des transports de sédiments depuis les versants jusqu'au marigot, où ils pourront être transportés à l'extérieur du bassin. Lors de ce changement d'échelle, un nouveau facteur apparaît: la propagation des crues le long des ravines, et donc le transport des sédiments, sont soumis à l'avancement de la saison des pluies. Nous formulerons l'hypothèse que cette relation exprime la recharge de la

nappe. Cette hypothèse s'appuie sur la très forte perméabilité du fond des ravines à partir de la rupture de pente de mi-versant. Elle est due en particulier à la texture de plus en plus grossière du matériau vers le bas de versant et a pu être vérifiée *de visu* pendant les averses. Dans ces conditions, ce n'est que quand le niveau de la nappe est suffisamment élevé qu'une onde de crue partie de la mi-versant peut atteindre le bas-fond.

Ainsi, non seulement le passage de l'échelle de la portion de versant à celle du versant entier fait intervenir un facteur nouveau dans la prise en compte du transport des sédiments, qui est la dépendance vis à vis de la recharge de la nappe, mais en plus, ce facteur et ceux qui régissent la production des sédiments évoluent de façon contradictoire dans l'année.

A l'échelle du bassin La station de jaugeage à l'exutoire du bassin versant principal est composée de deux déversoirs séparés par un bassin cimenté de huit mètres de long. Ce bassin aurait pu fonctionner comme une fosse à sédiments. Il n'a retenu que quelques kilos de terre chaque année. Même en considérant que les sédiments sont aussi transportés en suspension, ceci reste le signe d'une érosion faible au niveau du bassin.

Nos résultats proposent une explication partielle de cette faible érosion en montrant que le système ravinaire est peu apte à transporter les sédiments détachés sur les versants.

L'effet de la mise en culture

Nous avons vu que la ravine qui draine les champs se distingue de l'ensemble des autres par deux points (Fig. 4):

- (a) Cette ravine possède les trois sections qui ont le fonctionnement le plus précoce. Ceci est à mettre en relation avec le plus fort coefficient de ruissellement des champs en début de saison, juste après le travail du sol.
- (b) Parmi les sections de bas-fond, les plus précoces appartiennent également à cette ravine. Le fort ruissellement des champs en début d'année semble donc provoquer dans la ravine des crues suffisamment fortes pour qu'elles puissent atteindre le bas-fond même avant que la nappe n'y soit très haute. Ainsi, au niveau de la jonction entre versant et bas-fond, la mise en culture a un effet qualitatif sur la relation entre des phénomènes normalement contradictoires. Ces modifications font que cette ravine est la seule du bassin à pouvoir éventuellement transporter jusqu'au marigot les sédiments détachés sur son versant en début de saison.

CONCLUSION

L'extension spatiale des données d'érosion collectées à la parcelle a toujours été un problème pour les aménageurs. Cette étude a permis de mettre en évidence, dans un cas particulier, la nature des phénomènes qui sont la clé de

ce problème: lors du changement d'échelle apparaissent des phénomènes nouveaux, comme la dépendance vis à vis du fonctionnement *de la nappe*, qui peuvent être régis par des lois contradictoires à celles en *vigueur* sur la parcelle. En milieu naturel cette ambiguïté explique en partie la faiblesse de l'érosion constatée à l'échelle du bassin.

L'étude montre également comment la mise en culture peut perturber cet équilibre en modifiant la nature des phénomènes qui contrôlent les exportations de sédiments hors du bassin: le niveau de la nappe n'est plus une limite absolue au transport des matériaux. Ainsi une modification du milieu peut modifier l'ordre de grandeur des phénomènes qui régissent son fonctionnement, mais aussi les relations qui lient ces phénomènes les uns aux autres, compliquant passablement les tentatives de prévision.

REFERENCES

- Casenave, A. & Valentin, C. (1988) *Les Etats de Surface de la zone Sahélienne. Influence sur L'infiltration*. ORSTOM.
- Kouamé, B. (1987) Forme des averses, variabilité spatiale et temporelle au nord de la Côte d'Ivoire. *DEA, Univ. des Sciences et Techniques du Languedoc*.
- Planchon, O. & Janeau, J. L. (1987) La simulation de ruissellement: un nouveau protocole expérimental. *Gouttes et Splash: Bull. Groupe Méthodologique de Simulation de Pluie* 4, 5-13.
- Planchon, O., Fritsch, E. & Valentin, C. (1987) Rill development in a wet savannah environment. *Catena suppl.*, 8, 55-70.
- Valentin, C. & Janeau, J. L. (en préparation) Evolution saisonnière des états de surface en savane humide.
- Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. (1978) *Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning*. USDA Agriculture Handbook no. 537.

