

Ecoulement et transfert de sédiments dans les bassins versants de grande culture sur basalte du Rio Grande do Sul (Brésil)

NILZA MARIA DOS REIS CASTRO

IPH, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Av. Bento Goncalves 9500, Caixa Postal 15029 CEP 91500-970 Porto Alegre, RS, Brésil

ANNE-VERONIQUE AUZET

CEREG-URA 95 CNRS, Université Louis Pasteur, 3 rue de l'Argonne, F-67083 Strasbourg Cedex, France

MARC BORDAS

IPH, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Av. Bento Goncalves 9500, Caixa Postal 15029 CEP 91500-970 Porto Alegre, RS, Brésil

PIERRE CHEVALLIER

ORSTOM, 911 avenue d'Agropolis, BP 5045, F-31032 Montpellier, France

JEAN-CLAUDE LEPRUN

CGS — UPR 6251 CNRS, 1 rue Blessig, F-67084 Strasbourg Cedex, France

MICHEL MIETTON

CEREG-URA 95 CNRS, Université Louis Pasteur, 3 rue de l'Argonne, F-67083 Strasbourg Cedex, France

Résumé La région sud du Brésil, située sur les plateaux basaltiques, est l'une des plus importantes régions agricoles du pays. Les bassins versants cultivés ont été largement aménagés en banquettes jusqu'au développement récent des techniques de semis-direct. L'épaisse couverture de sols ferrallitiques (*les latossolos roxos*) subit une érosion importante qui se manifeste au niveau des parcelles par des formes diffuses sur les banquettes, des accumulations dans les drains de celles-ci et, en sortie de drains, en limite de propriétés et de pistes et dans la partie amont des talwegs, par des ravines importantes, constituant un réseau connecté aux cours d'eau. Les préoccupations liées à la sédimentation dans les retenues existantes, en particulier celles des barrages hydroélectriques, sont à l'origine du projet POTIRIBU (collaboration entre l'IPH et le CNPq pour la partie brésilienne et l'ORSTOM pour la partie française), dans le cadre duquel a été mis en place un dispositif de bassins emboîtés représentatifs situés sur la commune de Pejuçara, près d'Ijuí. Le fonctionnement érosif du système, très structuré, est étudié à différents niveaux d'échelles spatiales. Les mesures conduites à l'échelle de microparcelles, sous pluies naturelles et sous pluies simulées, sont utilisées pour proposer un classement des différents types de préparations du sol vis-à-vis de la production du ruissellement et des pertes en sol à cette échelle. La cartographie des incisions, des mesures topométriques de la principale ravine effectuées à différentes dates et des mesures de la charge solide des eaux à l'exutoire de l'axe de drainage principal complètent le dispositif expérimental. Sans aboutir pour l'instant à un bilan exhaustif, les premiers résultats permettent de proposer un classement des pratiques culturales en fonction du ruissellement et des pertes en sol, ainsi qu'un schéma de fonctionnement de l'ensemble du système érosif.

INTRODUCTION

La région sud du Brésil est l'une des plus importantes régions agricoles du pays.

C'est là qu'est principalement produit le soja dont le Brésil est le deuxième exportateur sur le marché mondial.

Cette région est affectée par une érosion jugée importante (Bordas *et al.*, 1988), attribuée à une agriculture lourdement mécanisée et aux défrichements intenses. Les transferts solides sont préoccupants pour les nombreux ouvrages sur les cours d'eau (petites centrales hydroélectriques, stations de pompes ...). Ces préoccupations ont conduit, à partir de 1950, à un aménagement systématique en banquettes, progressivement abandonnées depuis 1992 avec l'adoption des techniques de semis direct. Elles sont à l'origine en 1989 du projet POTIRIBU (collaboration entre l'IPH et le CNPq pour la partie brésilienne et l'ORSTOM pour la partie française, cf. Leprun, 1994) dont l'objectif était d'étudier l'érosion sous ses différents aspects brièvement rappelés ici.

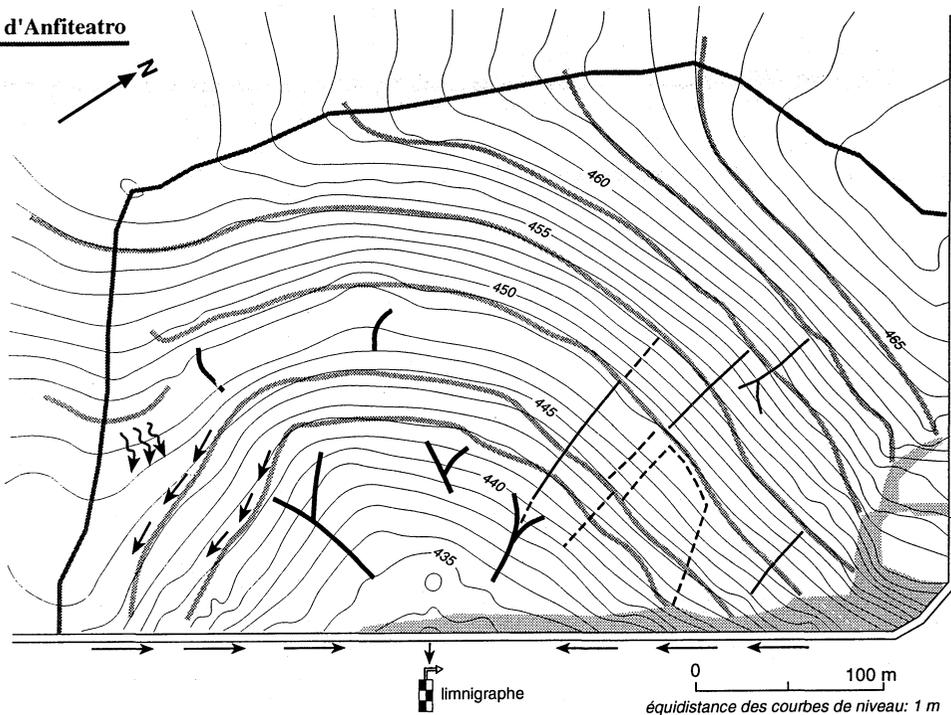
Des phénomènes d'érosion diffuse sur les parcelles cultivées en amont sont relayés plus en aval par un ravinement important en sortie de banquettes, aux limites de propriétés et en bord de routes puis dans les talwegs. La présence de ravines est d'autant plus préoccupante qu'elles constituent un réseau secondaire connecté au réseau hydrographique. L'objectif de cet article qui s'appuie sur les données issues d'une thèse de doctorat (Castro, 1996), est de tenter une évaluation de l'impact du mode d'aménagement et des pratiques culturales sur les transferts des sédiments à différentes échelles spatiales.

MATERIEL ET METHODES

La zone d'étude se situe sur l'épanchement basaltique le plus étendu au monde, vaste plateau où se sont développés des sols ferrallitiques (*latossolos roxos* selon la classification brésilienne), qui atteignent jusqu'à quinze mètres d'épaisseur. Malgré une teneur en argile (essentiellement de la kaolinite) particulièrement élevée (supérieure à 60%), leur structure en microagrégats très résistants de la taille des sables leur assure un bon drainage. Les altitudes s'échelonnent entre 400 et 470 m et les pentes des versants sont comprises entre 3 et 10%. Le climat est de type tempéré humide, avec des précipitations moyennes annuelles de 1700 mm, réparties de manière homogène sur l'ensemble de l'année; les hauteurs mensuelles s'échelonnent entre 120 et 160 mm en moyenne (Chevallier & Castro, 1991). Les températures clémentes, avec des moyennes mensuelles comprises entre 14°C en juillet et 24°C en janvier, et un rayonnement solaire intense permettent jusqu'à deux cultures par an: avoine ou blé en hiver, soja ou maïs en été.

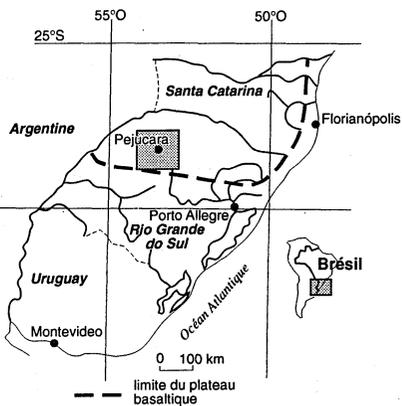
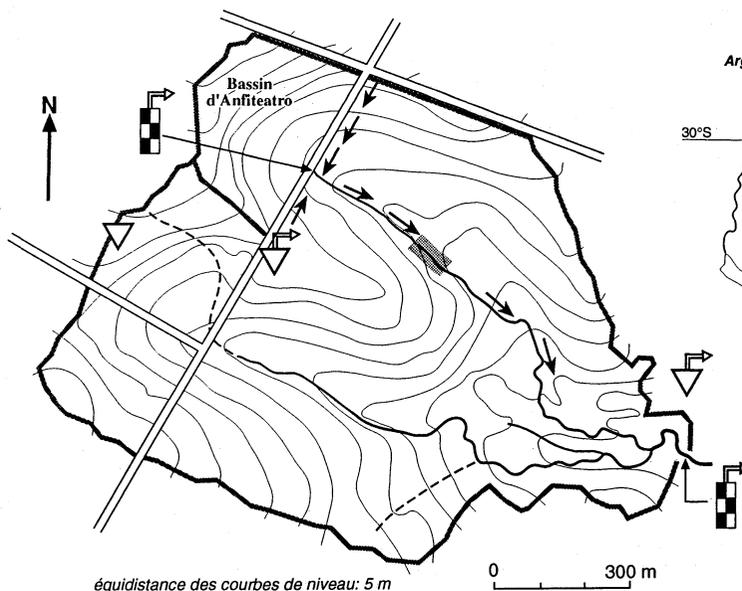
Dans le but de comparer les effets des pratiques culturales sur les pertes en terre et en eau, deux bassins emboîtés ont été choisis, celui d'Anfiteatro (14 ha) et celui de Donato (1 km²), situés à Pejuçara à une trentaine de kilomètres du centre urbain d'Ijuí, dans une zone bien représentative de la région (Fig. 1). Ces deux bassins aménagés en banquettes sont cultivés par trois exploitants suivant deux techniques. La première, répandue majoritairement parmi les agriculteurs de la région, dite *conventionnelle*, consiste avant chaque semis en un labour à la charrue à disques sur 20 cm, suivi de deux hersages. Un labour plus profond à la charrue à soc est pratiqué, tous les cinq ans environ, pour décompacter le sol. La seconde est celle du semis direct réalisé sur les résidus de la culture antérieure, sans labour préalable

Bassin d'Anfiteatro



- | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| route | rigole formée: | ruissellement diffus |
| végétation arbustive dense | - - - - 1 fois au cours de deux ans | ruissellement concentré |
| bourrelet des banquettes | — — — 2 fois au cours de deux ans | |
| | — — — 3 fois au cours de deux ans | |

Bassin de Donato



- | | | |
|--|--|------------------|
| | | cours d'eau |
| | | la grande ravine |
| | | route |

Fig. 1 Cartographie du réseau des rigoles (bassins d'Anfiteatro et de Donato).

(Derpsch *et al.*, 1991). Elle ne concerne qu'une partie du bassin de Donato au moment de l'étude.

Deux pluviographes et un pluviomètre ont été installés à proximité des sites. Les deux bassins sont équipés chacun d'un limnigraphe. Outre l'enregistrement des hauteurs d'eau à l'exutoire permettant d'évaluer les débits par l'intermédiaire des courbes de tarage établies sur la base de mesures réalisées en routine ou à l'occasion de crues, des prélèvements d'eau ont été effectués au cours de deux crues sur le bassin du Donato et d'une crue sur le bassin d'Anfiteatro. Il a fallu se contenter de ce petit nombre d'observations, l'installation de préleveurs automatiques ayant dû être différée.

Des mesures de ruissellement et d'érosion ont été réalisées à l'échelle de microparcelles de 1 m² sous pluies simulées à l'aide d'un dispositif expérimental mobile et sous pluies naturelles. Simultanément, des observations détaillées de l'état de la structure du sol en surface ont été réalisées, le taux de recouvrement du sol par le couvert végétal a été évalué et des profils hydriques ont été mesurés sur des prélèvements à la tarière avant et après chaque pluie simulée.

Les campagnes de simulation de pluie ont été effectuées quelques jours après les semis et juste avant la récolte. Au total six campagnes ont été menées: deux sur une parcelle d'avoine semée après une préparation à la charrue à soc suivi de deux hersages (campagnes 1 et 2), deux sur une parcelle semée en soja et préparée à la charrue à disques suivie de deux hersages (campagnes 3 et 4) et deux sur une parcelle d'avoine préparée en semis direct (campagnes 5 et 6).

Le simulateur de pluie employé est celui mis au point par l'ORSTOM (Asseline & Valentin, 1978). Il est muni d'un asperseur monté sur un balancier, d'un cadre métallique récepteur de 1 m², et d'un limnigraphe à vitesse de déroulement rapide. L'intensité est contrôlée par l'angle de balancement et des paliers successifs d'intensité constante peuvent être programmés. Le protocole expérimental a consisté à appliquer sur chaque microparcelle quatre pluies identiques espacées de 24 h, avec cinq paliers d'intensité de 60, 100, 80, 60 et 40 mm h⁻¹. Les simulations sont répétées trois fois à l'identique sur des microparcelles contigües ayant la même histoire culturale.

Par ailleurs, des mesures et des observations ont été réalisées sous pluies naturelles sur des parcelles de 1 m² semblables à celles utilisées sous pluies simulées. Les relevés des volumes d'eau ruisselée et des particules transportées ont été effectués après chaque événement pluvieux (averse ou série d'averses) pendant la rotation culturale avoine/soja du 22 août 1992 au 18 septembre 1993.

En outre, la totalité des rigoles d'érosion a été cartographiée dans le bassin d'Anfiteatro en 1992, 1993 et 1994 et des levés topométriques précis de la partie la plus active de la ravine principale du bassin de Donato ont été effectués à trois reprises en 1991, 1992 et 1993.

Les principales données disponibles sont donc :

- les hauteurs et les intensités des pluies;
- pour les microparcelles, les volumes ruisselés et les concentrations en sédiments ainsi que des relevés sur la nature et le taux de couvert végétal, l'état structural du sol en surface, les teneurs en eau initiale et finale des horizons jusqu'à 80 cm de profondeur (pluies simulées);
- les débits liquides pour chacun des bassins ainsi que les charges solides pour quelques crues;

- la localisation et la longueur des rigoles sur le bassin d'Anfiteatro (1992, 1993 et 1994);
- le volume de la partie la plus active de la principale ravine du Donato (1991 1992 et 1993).

RESULTATS ET DISCUSSION

Faute de mesures hydrodynamiques directes, les paramètres d'infiltration ont été appréciés en appliquant le modèle de Green & Ampt (1911) aux données critiquées des simulations de pluie obtenues pour les quatre campagnes 1, 2, 3 et 6, (Castro, 1996). Les valeurs de conductivité hydraulique à saturation obtenues (Tableau 1) varient entre une soixantaine de mm h⁻¹ dans le cas de la première pluie appliquée après le semis d'avoine sur le labour profond, à une dizaine de mm. h⁻¹ dans le cas de la dernière pluie sur semis de soja préparé à la charrue à disques ou de la troisième pluie sur semis direct.

La confrontation des ordres de grandeur obtenus avec les informations concernant le type de préparation du sol, l'état de la structure du sol en surface et l'état hydrique initial, la période du cycle cultural, permet de proposer un classement pouvant servir de base à l'élaboration d'une typologie de l'infiltrabilité (Tableau 2). Celle-ci reste évidemment à compléter et affiner. Néanmoins, les résultats obtenus sur des sols que l'on peut considérer comme homogènes et bien filtrants montrent que les situations sont assez contrastées suivant le type de préparation du sol.

L'infiltration, après plusieurs pluies, est plus élevée dans le cas des préparations avec labour à la charrue à soc, faible dans le cas de préparations conventionnelles, utilisant la charrue à disques, et moyenne à faible dans le cas du semis direct.

Cela conduit à penser que, à l'échelle de petits bassins versants aux sols relativement homogènes, le système de culture appliqué aux différentes parcelles est le facteur essentiel de différenciation spatiale vis-à-vis de l'infiltration et du ruissellement. Ceci ne fait que confirmer les résultats obtenus par d'autres auteurs dans des conditions de sols et de climat assez similaires (Roth *et al.* 1986) ou nettement différentes (Boiffin & Papy, 1988 ; Vauclin & Chopart, 1992 ; Auzet *et al.*, 1993, 1995 ; Ludwig *et al.*, 1995, 1996).

Tableau 1 Résultats du paramètre K_{sat} de Green & Ampt (1911).

	Pluie 1		Pluie 2		Pluie 3		Pluie 4	
	K_{sat} (mm h ⁻¹)	classe						
Campagne 1 (charrue à soc)			56		39		27	
Campagne 2 (charrue à soc)	46		31		25		21	
Campagne 3 (charrue à disques)	45		19		17		13	
Campagne 6 (semis direct)	38		14		13		23	

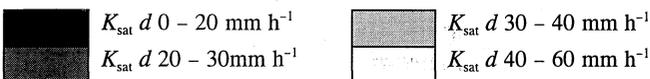
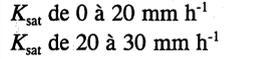
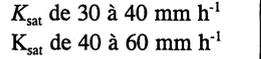


Tableau 2 Typologie de l'infiltrabilité du sol.

Temps écoulé depuis le semis Etat hydrique initial OPS	Une semaine (< 10% de couvert végétal)						Une centaine de jours (> 70% de couvert végétal)					
	Peu humide Non dégradé		Humide Moyennement dégradé		Dégradé		Peu humide Non dégradé		Humide Moyennement dégradé		Dégradé	
Rugosité	élevée	faible	élevée	faible	élevée	faible	élevée	faible	élevée	faible	élevée	faible
Semis direct	X	?	X	?	X	X	X		X		X	X
Charrue à disques à 20 cm	X		X	?	X		X	X	X	?	X	?
Charrue à soc (sous-solage) à 50 cm		X		X	X		X	X			X	

	K_{sat} de 0 à 20 mm h ⁻¹		K_{sat} de 30 à 40 mm h ⁻¹		absence de données
	K_{sat} de 20 à 30 mm h ⁻¹		K_{sat} de 40 à 60 mm h ⁻¹		situations impossibles

Cependant l'extrapolation de ces valeurs d'infiltrabilité ne peut servir à l'évaluation d'intensités de ruissellement pour un ensemble spatial de plus grande dimension que celui des microparcelles: les valeurs relativement élevées d'infiltrabilité témoignent de la capacité qu'un ruissellement formé en un endroit puisse s'infiltrer en grande partie lors de son cheminement. Ce constat, renforcé par des observations effectuées sous la pluie, est d'ailleurs confirmé par les résultats globaux obtenus sous pluie naturelle à différentes échelles (Tableau 3) pour les microparcelles et pour les bassins versants, qui peuvent être comparés à ceux obtenus des parcelles de type Wischmeier (Wischmeier & Smith, 1978) de 77 m², situées sur la même formation pédologique à la station expérimentale d'Augusto Pestana à une trentaine de kilomètres des sites. Ces derniers résultats, publiés par le Secretaria da Agricultura do Rio Grande do Sul (1986) ne concernent toutefois pas les mêmes années.

Du point de vue des pertes en sol à l'échelle des microparcelles de 1 m² et des parcelles de 77 m², les différents types de préparation se différencient nettement. Les pertes en sol sont très limitées dans le cas du semis direct, inférieures à 0.4 t ha⁻¹ an⁻¹ et les plus fortes dans le cas des préparations conventionnelles utilisant la charrue à disques où elles sont supérieures d'un ordre de grandeur, atteignant des valeurs de plusieurs tonnes par hectares et par an (Tableau 3).

À l'échelle des bassins versants, les faibles valeurs des coefficients de ruissellement ne doivent pas conduire à considérer celui-ci comme localement inexistant. La cartographie répétée des rigoles éphémères — parce qu'effacées lors du travail du sol suivant — est éloquent (Fig. 1, bassin d'Anfiteatro): il y a bien collecte du ruissellement, et les chemins empruntés par l'eau, à l'exception notable de ceux imposés par les collecteurs à l'amont des banquettes, ne sont pas aléatoires.

Tableau 3 Mesures du coefficient de ruissellement et des pertes en sol pour les différents échelles spatiales et temporelles.

Echelle	Préparation du sol	Coefficient de ruissellement (%)	Perte en sol	Observations
Simulation de pluie (parcelles 1 m ²)	Charrue à soc 50 cm	25	0.64 t ha ⁻¹ an ⁻¹	moment du semis
	Charrue à soc 50 cm	56	0.79 t ha ⁻¹ an ⁻¹	moment de la récolte
	Charrue à disques 20 cm	57	1.90 t ha ⁻¹ an ⁻¹	moment du semis
	Semis direct	56	0.03 t ha ⁻¹ an ⁻¹	moment de la récolte
Pluie naturelle (parcelles 1 m ²) août 1992-septembre 1993	Charrue à disques 20 cm	16	4 t ha ⁻¹ an ⁻¹	51 événements
	Semis direct	6	0.2 t ha ⁻¹ an ⁻¹	31 événements
Pluie naturelle (parcelles 77 m ²) moyenne 1978-1981	Charrue à disques 20 cm	3.1	8.5 t ha ⁻¹ an ⁻¹	Secretaria Agricultura do RS (1986)
	Semis direct	0.5	0.4 t ha ⁻¹ an ⁻¹	
Bassin d'Anfiteatro (1 événement)	Charrue à disques 20 cm	2.3	15 g l ⁻¹	Concentration maxima en sédiment mesurée pendant la crue
Bassin de Donato (2 événements)	Charrue à disques et Semis direct	1.9	11 g l ⁻¹	
		2.3	3 g l ⁻¹	

* Compte-tenu du trop faible nombre d'événements couverts, les pertes en sol ne peuvent être exprimées en t ha⁻¹ an⁻¹; ces résultats, exprimés en concentration maximale, confortent cependant le classement relatif entre types de préparations du sol obtenu aux autres échelles.

En revanche, la contribution de ce système à la charge solide des cours d'eau reste probablement limitée, car ces rigoles ont une section réduite (quelques cm de profondeur et 1-20 cm de largeur) et surtout elles sont très localisées. Le bilan annuel estimé de manière grossière de la charge solide entraînée est de l'ordre de $0.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour le bassin d'Anfiteatro.

L'évolution du tronçon le plus actif de la principale ravine dans le bassin de Donato, dont la localisation est représentée sur la Fig. 1, a été estimée à partir de trois levés topométriques réalisés en 1991, 1992 et 1993. Le volume érodé annuellement représente 346 m^3 . En considérant une valeur de 1.5 g cm^{-3} pour la densité apparente moyenne du matériau en place et la surface du bassin en amont, la perte moyenne en sol sur le bassin versant peut être évaluée à $7 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. L'érosion évaluée à l'échelle des microparcelles dans le sous-bassin d'Anfiteatro, sous pluies naturelles, atteignait $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Il est évident cependant que la totalité des sédiments arrachés au niveau des parcelles n'arrive pas jusqu'au réseau hydrographique mais se dépose avant, comme en témoignent les nombreuses accumulations notamment dans les drains de rebord des banquettes. L'érosion en ravine, qui n'a été étudiée que sur la partie la plus active de la principale ravine, représente donc probablement bien plus de 60% des pertes en sol à l'échelle des bassins versants. La contribution à la charge solide des cours d'eau est de ce fait probablement très importante, le système de ravines débouchant dans le réseau hydrographique.

CONCLUSION

Les mesures sous simulation de pluies, confortées par celles sous pluies naturelles, permettent de préciser l'influence des pratiques culturales sur le ruissellement et l'érosion dans ce type de milieu. Ainsi, le semis direct apparaît plus protecteur vis-à-vis des pertes en sol et ne semble pas, dans ce type de sols bien structurés, conduire à une diminution de l'infiltrabilité comme cela est le cas dans de nombreux autres sols brésiliens. La différence des dégradations provoquées par les deux types d'outils utilisés pour le labour, même s'ils n'ont pas été appliqués à la même profondeur, devrait conduire à proscrire la charrue à disques et à lui préférer la charrue à soc, peu utilisée de manière courante au Brésil et réservée au travail plus profond.

Concernant le fonctionnement érosif, seule la prise en compte de l'ensemble du système — zones contributives au ruissellement, zones sources de sédiments et leurs relations — et de la structure qu'il impose aux transferts d'eau et de sédiments pourra conduire à l'identification des solutions efficaces pour limiter les pertes en terre agricole et leur contribution aux apports solides arrivant aux barrages hydroélectriques.

Les aménagements en banquettes, mis en place à l'aide de formules empiriques, limitent les dégâts lors d'événements particulièrement exceptionnels (Chevallier & Dhein, 1993) mais n'empêchent à l'évidence pas la mise en place d'un réseau de ravines dans des conditions habituelles. Ce constat incite à la prudence pour l'adoption définitive de toute technique nouvelle, y compris celle, prometteuse, du semis direct. Il faudrait d'une manière générale mieux comprendre la totalité des chemins de l'eau dans ce type de milieu.

Les premières évaluations des pertes en sol dues aux ravines soulignent

l'importance de leur contribution à la charge solide des cours d'eau. La part relative importante, supérieure à 60%, de cette érosion concentrée par rapport à l'érosion diffuse est à mettre en rapport avec les chiffres publiés récemment pour différents sites en Europe (Poesen *et al.*, 1996). Ces résultats justifient les recherches sur les différents types d'érosion et les processus en cause.

Remerciements Marc Bordas a été l'instigateur et longtemps le responsable du Projet POTIRIBU. Cet article est largement inspiré de la thèse de Nilza M. dos Reis Castro, dont Marc Bordas a pu voir l'achèvement quelques jours avant son décès. Les recherches ont été financées grâce au soutien du CNPq, de l'ORSTOM et de l'Université Fédérale du Rio Grande do Sul, Brésil.

REFERENCES

- Asseline, J. & Valentin, C. (1978) Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM, série Hydrol.* **15**(4), 321-350.
- Auzet A. V., Boiffin, J., Papy, F., Ludwig, B. & Maucorps, J. (1993) Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the north of France. *Catena* **20**(1/2), 41-62.
- Auzet, A. V., Boiffin, J. & Ludwig, B. (1995) Concentrated flow erosion in cultivated catchments : influence of soil surface state. *Earth Surf. Processes and Landforms* **20**, 759-767.
- Boiffin, J. & Papy, F. (1988) Prévision et maîtrise de l'érosion: Influence des systèmes de culture. *Perspectives Agricoles* **122**, 93-98.
- Bordas, M. P., Lanna, A. E. & Semmelman, F. R. (1988) Evaluation des risques d'érosion et de sédimentation au Brésil à partir de bilans sédimentologiques élémentaires. In: *Sediment Budgets* (Proc. Porto Alegre Symp., décembre 1988) (ed. par M.P. Bordas & D.E. Walling), 359-368. IAHS Publ. no. 174.
- Castro, N. M. R. (1996) Ruissellement et érosion sur des bassins versants de grande culture du plateau basaltique du sud du Brésil (Rio Grande do Sul). Thèse doctorat Univ. L. Pasteur, Strasbourg, France.
- Chevallier, P. & Castro, N. M. R. (1991) As precipitações na região de Cruz Alta e Ijuí (RS-Brasil). In: *Simp. Brasileiro de Rec. Hid.* **10**, 183-192, Rio de Janeiro: ABRH/APRH.
- Chevallier, P. & Dhein, R. A. (1993) Les précipitations exceptionnelles des 26 et 27 mai 1992 dans la région d'Ijuí (Rio Grande do Sul, Brésil). *Sécheresse* **4**, 159-164.
- Derpsch, R., Roth, C. H., Sidiras, N. & Köpke, U. (1991) *Controle da erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. (Contrôle de l'érosion au Paraná, Brésil: systèmes de couverture du sol, semis direct et préparation conservatoire du sol)*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn, Allemagne.
- Green, W. H. & Ampt, C. A. (1911) Studies of soil physics. Flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* **4**, 1-24.
- Leprun, J.-C. (coord.) (1994) Dimensionnement et gestion de petits ouvrages hydrauliques au sud du Brésil, projet Potiribu. In: *Brésil, Trente Ans de Coopération Scientifique*, 391-398. ORSTOM, Ed. du cinquantenaire, Paris, France.
- Ludwig, B., Boiffin, J., Chadoeuf, J. & Auzet, A. V. (1995) Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments. *Catena* **25**, 227-252.
- Ludwig, B., Auzet, A. V., Boiffin, J., Papy, F., King, D. & Chadoeuf, J. (1996) Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigole de bassins versants cultivés du Nord de la France. *Etudes et Gestion des Sols* **3**, 53-70.
- Poesen, J. W., Vandaele, K. & Van Wesemael, B. (1996) Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. In: *Erosion and Sediment Yield* (Proc. Exeter Symp., juillet 1996) (ed. by D. E. Walling & B. W. Webb), 251-266. IAHS Publ. no. 236.
- Roth, C. H., Meyer, B., Frede, H. G. & Derpsch, R. (1986) The effect of different soybean tillage systems on infiltrability and erosion susceptibility of an oxisol in Paraná, Brazil. *J. Agron. Crop Sci.* **157**, 217-226.
- Secretaria da Agricultura do Rio Grande do Sul (1986) *Erosão do Solo — Influência do Uso Agrícola, do Manejo e Preparo do Solo*. (L'Erosion du Sol - Influence de l'Utilisation Agricole, de la Gestion et de la Préparation du Sol). (ed. par E. A. Cassol), Publicação IPRNR 15, Porto Alegre, Brésil.
- Vauclin, M. & Chopart, J.-L. (1992) L'infiltrométrie multidisques pour la détermination *in situ* des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte-d'Ivoire. *L'Agronomie Tropicale* **46**(4), 259-270.
- Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. (1978) *Predicting Rainfall Erosion Losses*. USDA Agriculture Handbook 537, Washington DC, USA.