

Effets de la mise en valeur sur la dégradation physique des sols

Bilan du ruissellement et de l'érosion de quelques grands écosystèmes brésiliens

J.-Cl. Leprun

Directeur de Recherches ORSTOM
CNPQ/EMBRAPA . Mission ORSTOM . C.P. 4010 Boa Viagem . 51020 Recife (PE) BRESIL

RÉSUMÉ

Les mesures de pertes en eau et en terre effectuées à différentes échelles : m² du simulateur de pluie, 100 m² des parcelles expérimentales, hectare et kilomètre carré des bassins hydrographiques et provenant de grands écosystèmes naturels et d'agrosystèmes brésiliens sont comparées et discutées. Les grands écosystèmes naturels analysés sont la «caatinga» semi-aride, la forêt amazonienne équatoriale, le «cerrado» ou savane tropicale et les forêts tropicales humides de la «Mata Atlântica» littorale et intérieure. Cette analyse permet de dresser un bilan global de la dégradation physique des sols après leur mise en valeur. Des études de cas plus détaillées, fondées sur la modification de l'espace poral, rendent possible un examen des différents facteurs de dégradation mis en jeu et une interprétation du comportement des sols. Des recommandations concernant la mise en valeur des sols de chacun des écosystèmes sont émises.

Mots clés

Mise en valeur, dégradation physique, sols, écosystèmes, agrosystèmes, Brésil.

SUMMARY

EFFECTS OF OCCUPATION AND USE OF LAND OVER PHYSICAL DEGRADATION OF SOILS. INVENTORY OF RUNOFF AND EROSION FOR SOME OF THE GREAT BRAZILIAN ECOSYSTEMS.

Measures of water and land losses, taken within different scales : m² with rain simulator, 100 m² in experimental plots, hectare and km² over hydrographic basins and coming from great Brazilian ecosystems examined were the semi-arid «caatinga», the Amazon forest, the tropical «cerrado», the humid tropical forests of the coastal «Mata Atlântica» and of the upcountry «Mata Atlântica». This examination allowed an over-all inventory of soil physical degradations after their use. Studies of more detailed cases, based on porosity changes allowed an examination of different factors of degradation studied and an interpretation of soil behaviour. Recommendations are proposed in relation to soil exploitation for each analyzed ecosystem.

Key words

Land management, physical degradation, soils, ecosystems, agrosystems, Brasil.

RESUMO

EFEITOS DA OCUPAÇÃO E DO USO DA TERRA SOBRE A DEGRADAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS. BALANÇO DO ESCOAMENTO E DA EROSÃO EM ALGUNS DOS GRANDES ECOSISTEMAS BRASILEIROS

As medições de perdas em água e solo efetuadas em diferentes escalas : m^2 com simulador de chuvas, $100 m^2$ em parcelas experimentais, hectare e km^2 nas bacias hidrográficas e provenientes dos grandes ecossistemas brasileiros, foram comparadas e discutidas. Os grandes ecossistemas brasileiros examinados são a "caatinga" semi-árida, a floresta amazônica, o "cerrado" tropical e as florestas tropicais úmidas da "Mata Atlântica" litoral e da "Mata Atlântica" interior. Esse exame permite estabelecer um balanço global da degradação física dos solos após a sua exploração. Estudos de casos mais detalhados, baseados na modificação da porosidade, possibilitam um exame dos diferentes fatores de degradação colocados em jogo e uma interpretação do comportamento dos solos. Recomendações a respeito da exploração dos solos de cada um dos ecossistemas analisados são propostas.

Palavras chaves

Uso da terra, degradação física, solos, ecossistemas, agrossistemas, Brasil.

Un certain nombre d'écosystèmes terrestres sont encore mal connus, en particulier lorsqu'il s'agit d'écosystèmes tropicaux. On manque cruellement de données scientifiques établies et utilisables pour entreprendre de manière rationnelle leur mise en valeur et l'utilisation optimale de leur potentiel.

Le besoin d'informations sûres sur l'inventaire, le fonctionnement, la disponibilité des ressources des écosystèmes naturels ainsi que sur les contraintes et les modifications qui sont liées aux formes de leur utilisation lorsqu'ils sont transformés en systèmes agro-sylvo-pastoraux, se fait ressentir chaque jour davantage. Les nécessités de production accrue et l'obligation d'un développement durable respectant l'environnement sont rarement compatibles avec des écosystèmes complexes et fragiles comme c'est le cas dans les régions tropicales et, en particulier, au Brésil. Des études récentes ont été consacrées au problème de la dégradation physique des sols brésiliens. Le moment semble donc particulièrement opportun pour tenter de dresser un bilan des pertes en terre et en eau des principaux grands écosystèmes brésiliens dans leur état naturel et au cours de leurs transformations en systèmes agricoles, sylvicoles et pastoraux.

Les modifications du ruissellement et de l'érosion peuvent en effet être considérées comme représentant l'effet global des dégradations physiques dont souffrent les sols, lorsque l'on passe du milieu naturel non perturbé aux milieux agricoles profondément modifiés par l'homme.

Dans ce travail, les cinq grands écosystèmes brésiliens seront présentés (fig. 1). Après discussion des données de référence, des interprétations seront avancées pour chacun d'eux. A partir des travaux récents consacrés à l'étude du comportement hydrodynamique de milieux naturels ou transformés, on tentera, chaque fois que cela sera possible, d'expliquer la

nature des processus conduisant aux différentes dégradations physiques des sols. Des recommandations tenant compte de cet acquis seront alors émises.

Dans ce qui suit, la notion d'écosystème est élargie à celle définie par Berg en 1931 (Duvigneaud, 1984), comme écorégion ou «paysage écologique» c'est à dire «combinaison ou groupement d'objets et de phénomènes dans lequel les faits du relief, du climat, de l'eau et du sol, du couvert végétal, de la vie et aussi de l'activité humaine se combinent en un tout harmonieux se répétant typiquement tout au long d'une aire territoriale donnée», quand il s'agit des grands écosystèmes. Lorsqu'il s'agit du milieu beaucoup plus réduit des études ponctuelles, le terme écosystème signifie alors milieu naturel non perturbé, par opposition au terme agrosystème s.l. qui regroupe toutes les transformations effectuées à des fins agricoles.

De même, dans les données qui suivent, il s'agira de **ruissellement superficiel** dans le cas des petites parcelles, mais d'**écoulement global** incluant le ruissellement superficiel instantané et l'écoulement plus profond retardé dans le cas des bassins hydrographiques.

Avertissement : les données disponibles de ruissellement et de pertes en terre concernent des échelles de mesure très différentes et la comparaison de leurs valeurs doit donc être relativisée.

Dans ce travail il ne sera pas question du grave problème des formes d'érosion ravinante profonde de type «lavaka» appelées au Brésil «vossorocas» qui se manifestent sur les sols développés sur grès et en particulier sur les latosols sableux contigus aux sols argileux sur basaltes dans les régions méridionales brésiliennes. En effet, ce type d'érosion linéaire et ses effets ne peuvent être étudiés par les méthodes classiques et en particulier à l'aide de parcelles expérimentales.

Figure 1 - Les différents écosystèmes brésiliens et la localisation géographique des sites d'études

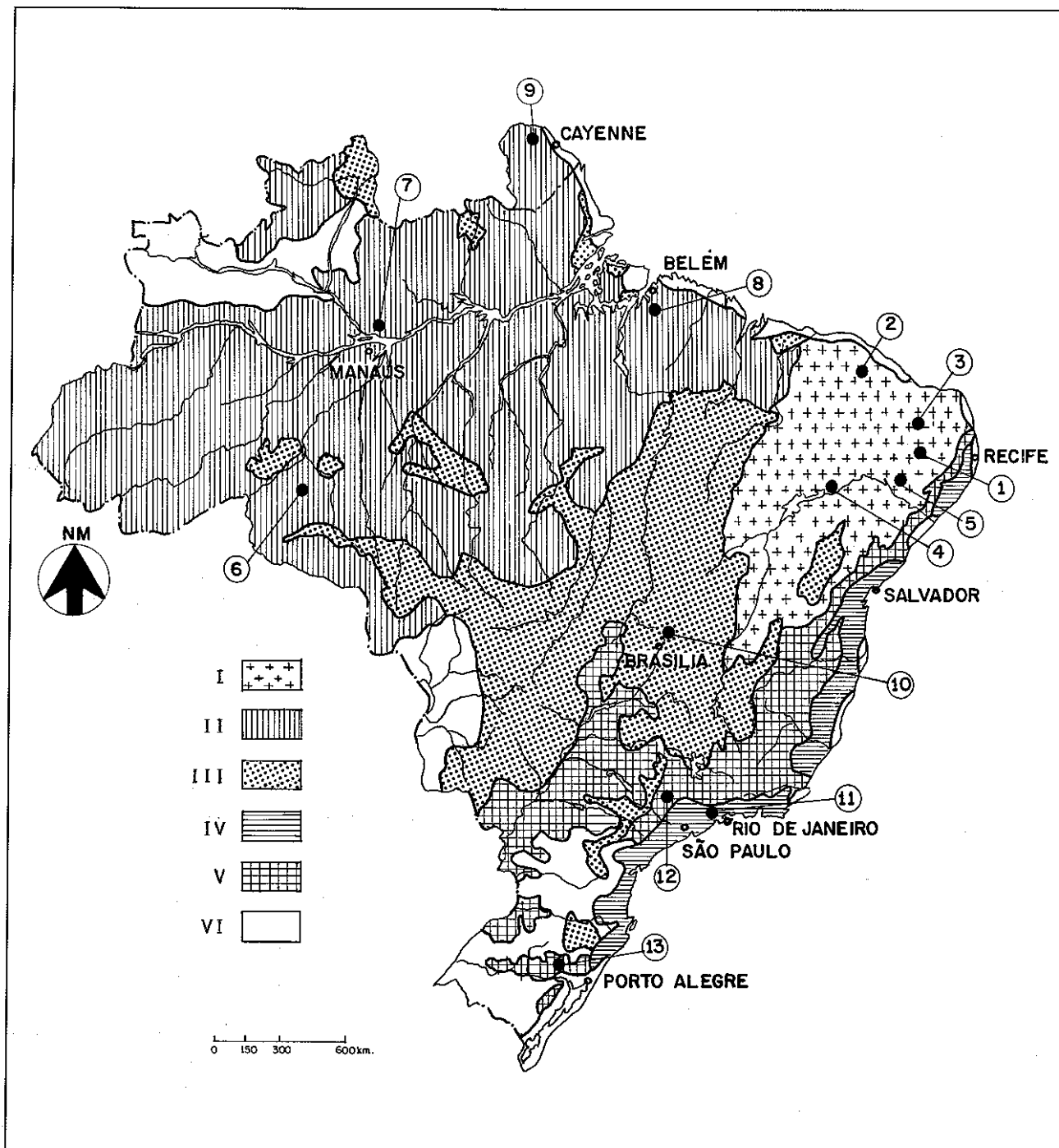
Ecosystèmes I : semi-aride «caatinga»; II : forestier amazonien équatorial; III : «cerrado» savane tropicale; IV : forestier tropical «Mata Atlântica» littoral; V : forestier tropical «Mata Atlântica» intérieur; VI : autres écosystèmes.

Sites d'études : 1 : Sumé (PB); 2 : Sobral (CE); 3 : Patu (RN); 4 : Petrolina (PE); 5 : Serra Talhada (PE); 6 : Ouro Preto do Oeste (RO); 7 : Manaus (AM); 8 : Tomé Açú (PA); 9 : ECEREX (Guyane); 10 : Planaltina (DF); 11 : Séropedica (RJ); 12 : Campinas (SP); 13 : Forquethinho (RS).

Figure 1 - Map of the different brazilian ecosystems and location of studied sites

Ecosystems I : semi-arid «caatinga»; II : equatorial forested amazonian; III : tropical savannah «cerrado»; IV : tropical forested littoral «Mata Atlântica»; V : tropical forested littoral continental «Mata Atlântica»; VI : others ecosystems.

Studied sites : 1 : Sumé (PB); 2 : Sobral (CE); 3 : Patu (RN); 4 : Petrolina (PE); 5 : Serra Talhada (PE); 6 : Ouro Preto do Oeste (RO); 7 : Manaus (AM); 8 : Tomé Açú (PA); 9 : ECEREX (Guyane); 10 : Planaltina (DF); 11 : Séropedica (RJ); 12 : Campinas (SP); 13 : Forquethinho (RS).



tales. Leur étude est en cours par une équipe de l'Institut de Recherche Technologique de São Paulo (IPT). Des milliers d'hectares de terres cultivées sont ravagées et rendues inutilisables par des ravins profonds de plusieurs mètres et longs de plusieurs centaines de mètres dont la formation et l'évolution sont rapides.

L'ÉCOSYSTÈME SEMI-ARIDE «CAATINGA»

Description et principales caractéristiques

L'écosystème «caatinga», qui a pris le nom de la formation végétale xérophylite caractéristique de toute la zone semi-aride du Nordeste brésilien, couvre une superficie d'environ 1 million de km², soit les trois-quarts de la région Nord-Est du pays (fig. 1). Il occupe la partie centrale du Nordeste dénommée «Polygone des sécheresses».

Le climat, semi-aride, est caractérisé par une pluviométrie annuelle inférieure à 800 mm, pouvant tomber à moins de 400 mm, très irrégulière et par une saison sèche de plus de huit mois. Le coefficient de variation interannuel (l'un des plus élevés au monde) peut atteindre 50% (Nimer, 1979). Les moyennes thermiques annuelles oscillent entre 23 et 27°C. Les moyennes annuelles de l'insolation qui se situent entre 2 000 et 2 500 h et de l'évaporation qui varient entre 1 500 et 2 000 mm, sont moyennement élevées. L'humidité de l'air se situe le plus souvent au dessus de 55% durant la saison sèche. Les vents sont peu fréquents et rarement violents. Tous ces éléments amènent à considérer le climat de l'écosystème «caatinga» comme étant plus clément que celui des steppes du Sahel de l'Ouest africain. En particulier, les érosivités des pluies du Nordeste sec déterminées par le facteur R (Wischmeier et Smith, 1960) sont inférieures à celles des pluies sahéliennes (Leprun, 1983).

La «caatinga» est une véritable forêt basse continue de 2 à 5 m de hauteur qui peut être très dense et comporter de grands arbres (*photo 1*). Les espèces ligneuses, souvent épineuses, sont constituées en majorité de légumineuses et la strate herbacée graminéenne est rare ou absente. Le nombre d'arbres et arbustes peut dépasser 17 000 par ha pour les «caatingas» hautes et denses (Hayashi, 1981). La couverture végétale naturelle arborée et arbustive de l'écosystème «caatinga» peu ou pas perturbé occupait encore, à la fin des années 1970, 90% de la zone semi-aride des États du Pernambuco, de la Paraíba et de l'Alagoas (Duque, 1980).

La «caatinga» colonise surtout les sols développés sur le socle cristallin précambrien composé de granites, migmatites, schistes et roches basiques. Le relief est alors ondulé et présente des versants convexes et courts à affleurements et inselbergs fréquents. Sur roches sédimentaires constituées en majorité de grès, de schistes et de calcaires d'âge secondaire

et tertiaire, le relief se présente sous la forme de grands plateaux ou «chapadas» et porte une «caatinga» haute qui constitue une transition vers le «cerrado» (savane).

Sur les roches du socle cristallin très peu altérées, les sols sont généralement riches chimiquement et contiennent encore une forte proportion de minéraux altérables. Ils regroupent des sols peu épais : sols bruns eutrophes non calciques vertiques ou non, planosols, lithosols et régosols; des sols d'épaisseur moyenne : brunizems, vertisols, solonetz solodisés et des sols épais d'un mètre et plus, principalement des sols podzoliques rouges et jaunes (dans le sens de la classification américaine du terme).

Sur les roches sédimentaires et les couvertures sableuses détritiques, les sols sont épais, drainants, mais pauvres chimiquement. Ce sont des latosols jaunes et rouges jaunes, distriques et parfois aluminiques, des sols de sables quartzueux, des sols hydromorphes minéraux.

Sur les calcaires se développent des rendzines, des cambisols et des latosols rouges.

L'existence de sols peu épais et riches en minéraux altérables, de pluies peu abondantes et d'une évaporation élevée, peut conduire à une forte minéralisation des eaux superficielles.

La faune, par manque d'eau et de végétaux verts durant une grande partie de l'année, est pauvre en espèces et en quantité.

Essentiellement rurale, la population métissée d'indiens et de portugais, dont la densité moyenne est de seize habitants au kilomètre carré, pratique une agriculture de subsistance non itinérante assez primitive (houe, traction animale) et le petit élevage, au sein de propriétés délimitées et protégées. L'exode rural réduit largement l'accroissement démographique. Les cultures regroupent, en les associant, le haricot, le maïs, le coton et l'agave fourragère. La pratique du brûlis est rare et limitée au défrichement initial.

Les données du ruissellement et de l'érosion

Ces données, regroupées dans le tableau 1, sont issues des travaux suivants (localisation géographique fig. 1) :

Sumé, (Paraíba) (*photo 2*)

Station expérimentale du projet SUDENE-CNPq-UFPA/ORSTOM; données de 1982 à 1988; pluviométrie moyenne annuelle (Px) 550 mm ; sols : bruns eutrophes modaux et vertiques développés sur roches migmatitiques; parcelles expérimentales de 100 m² et microbassins de un hectare ; pente des parcelles 4%; traitements : «caatinga» naturelle haute et dense, Palma fourragère (*Opuntia ficus indica*, Mill) plantée suivant les courbes de niveau, sol nu travaillé suivant la méthodologie de Wischmeier et Smith (1960) et maintenu sans végétation (*photo 2*); travaux de Cadier *et al.* (1983); Leprun, 1983; I.G. da Silva *et al.* (1986); Molinier *et al.* (1989).

Tableau 1 - Taux de ruissellement et d'érosion concernant l'écosystème «caatinga».**Table 1** - Runoff and erosion rates in "caatinga" ecosystem.

Lieu	Superficie	Pente %	Traitement	Pluviométrie moyenne annuelle Px en mm	Ruissellement % de Px	Érosion t.ha ⁻¹ .an ⁻¹
SUME (PB)	100 m ²	4 %	sol nu	550 mm	16,4	4,97
	100 m ²		Opuntia		2,4	0,15
	100 m ²		«caatingua»		0,2	0,05
	1 ha		sol nu		28,7	
	1 ha		«caatingua»		6,2	< 0,01
	10 km ²		«caatingua»		6,0	
SOBRAL (CE)	40,5 m ²	2 %	sol nu	542 mm	52,1	21,83
	40,5 m ²		pâturage		18,2	0,01
	40,5 m ²		«caatingua»		26,1	0,08
PATU (RN)	100 m ²	2,5 %	sol nu	750 mm	47,3	21,83
	100 m ²		cultures		33,6	12,35
	100 m ²		jachère		18,4	2,18
PETROLINA (Pe) CPATSA	2,1 ha	1,2 %	sol nu	650 mm	24,5	0,23
	2,1 ha		pâturage cult.		10,3	0,11
	2,1 ha		«caatingua»		ε	ε
SERRA THALHADA	1000 m ²	4 %	sol nu	922 mm		2,45
	1000 m ²		maïs conv.		8,3	1,99
	1000 m ²		maïs semis direct		7,1	1,50

Sobral (Ceará)

Px de 542 mm; sols lithologiques issus de roches granitiques acides; parcelles de 40,5 m² et pente de 2%; traitements : «caatinga» basse peu dense, pâturage naturel issu de la jachère de la «caatinga», sol nu (Wischmeier); données de Ramos et Marinho (1980).

Patu (Rio Grande do Norte)

Station expérimentale de l'École d'Agriculture de Mossoró; Px de 750 mm; sols podzologiques rouges-jaunes eutrophes issus de roches granito-gneissiques; parcelles de 100 m² et pente de 2,5%; traitements : jachère ancienne de «caatinga»,

cultures annuelles associées de coton herbacé, maïs et haricot plantées suivant la ligne de plus grande pente après labour par traction animale, sol nu (Wischmeier); données de 1986-87 de Moura *et al.* (1988).

Petrolina (Pernambuco)

Station expérimentale du CPATSA/EMBRAPA; Px de 650 mm; sols podzologiques jaunes rouges développés sur socle granito-gneissique; bassins de 1 à 2 ha, à pente ≤ à 1,2%; traitements : «caatinga» naturelle haute moyennement dense, pâturage cultivé à *Cenchrus ciliaris* (Buffel grass); sol nu (Wischmeier); données de Sharma et Silva (1987).

Serra Talhada (Pernambuco)

Station expérimentale de l'IPA; Px de 922 mm; sols podzologiques rouges jaunes eutrophes issus de migmatites; parcelles de 1000 m² à pente de 4%; traitements sur huit ans : maïs culture conventionnelle (un labour, deux hersages) mécanisée deux années puis par traction animale, maïs en semis direct, sol nu (Wischmeier) ; données de Lago (1981) et Nunes Filho *et al.* (1987).

Discussion

L'examen des données du tableau 1 permet de faire les constatations suivantes :

En ce qui concerne l'écosystème naturel :

- la couverture de la «caatinga» haute et dense (à Sumé et à Petrolina) ne permet, quel que soit le sol, que des taux de ruissellement et d'érosion très faibles, voire nuls;

- lorsque la «caatinga» est basse et clairsemée (à Sobral), ou correspond à une jachère évoluée (à Patu), la protection, indépendamment du type de sol, est bien moins efficace et les pertes en eau sont alors significatives et supérieures à celles obtenues dans les mêmes conditions sous pâturage, qu'il soit naturel ou planté. Les pertes en terre restent dans tous les cas très faibles;

En ce qui concerne les différentes mises en valeur et par rapport à l'écosystème naturel :

- la culture de l'Opuntia à Sumé et de plantes annuelles associées à Patu, n'accroissent que dans des proportions relativement modérées les pertes en eau (respectivement multipliées par 12 et 1,8) et les pertes en terre (multipliées par 2,7). La culture du maïs à Serra Talhada, pratiquée mécaniquement par la préparation dite «conventionnelle» (qui comprend un labour à disques et deux hersages exécutés dans le sens de la pente) ne provoque que des pertes en eau et en terre extrêmement réduites. La culture du maïs dite en semis direct, c'est à dire sans travail du sol, la moins dégradante, fournit des taux de ruissellement et d'érosion faibles proches des précédents;

- les pâturages, qu'ils soient naturels et extensifs ou cultivés, assurent une bonne protection du sol vis à vis de l'érosion mais déterminent un ruissellement de 15 à 20% de la pluie annuelle, soit, comme à Petrolina, beaucoup plus que le taux obtenu sous «caatinga». A Sobral, cependant, la «caatinga» basse et lâche provoque un taux de ruissellement supérieur à celui du pâturage de jachère.

En ce qui concerne les pertes mesurées sur sol nu,

travaillé selon la méthode établie par Wischmeier et Smith (1960) pour provoquer la dégradation maximale, les pertes en eau annuelles peuvent être importantes (maximum de 52,1 % de la pluie à Sobral, minimum de 16,4 % de la pluie à Sumé) et occasionner des pertes en terre importantes qui peuvent

atteindre 21,8 t par ha sur les sols «litólicos» et les sols podzologiques argileux (à Sobral et Patu). Sur les autres sols testés, sols bruns eutrophes à Sumé et sols podzologiques sableux à Petrolina et Serra Talhada, les taux d'érosion annuels restent faibles et inférieurs à 5 t par ha.

Tout ceci signifie que l'écosystème «caatinga» assure une très bonne protection du sol vis à vis de l'agressivité des pluies et que les agrosystèmes et systèmes pastoraux qui en sont issus conservent une grande partie des qualités de l'écosystème initial et opposent une bonne résistance aux dégradations physiques dues au défrichement et à la mise en valeur. Seuls les sols travaillés et maintenus sans aucune végétation subissent des pertes en terre et en eau qui peuvent être notables. Mais ces pertes sont toutefois sans communes mesures avec celles mesurées sur mêmes sols dans d'autres régions plus méridionales du Brésil où elles peuvent atteindre 200 t par ha par an sur des parcelles de 100 m² (Leprun *et al.*, 1986).

Les écoulements et leur charge solide ne sont pas proportionnels à la taille des surfaces testées : il s'agit du phénomène dit «d'effet d'échelle». Les résultats d'une opération de recherche sur cet effet d'échelle obtenus à Sumé à partir de pluies et de conditions d'humidité préalables dans des sols similaires, sur des surfaces allant du mètre carré à l'hectare ont montré que, aussi bien sur sols dénudés que sous végétation naturelle, la lame ruisselée diminuait lorsque la surface augmentait pour une même pluie (Molinier *et al.*, 1990). Les données de Sumé, issues du tableau 1 ne permettent pas de confirmer cette observation car il s'agit de données moyennes annuelles obtenues sous des pluviométries différentes. D'autre part, si l'on examine le taux d'écoulement et la charge solide du Rio São Francisco, le seul fleuve pérenne traversant le Nordeste sec, on obtient des taux correspondants à 8,2 % de la pluie et à 0,07 t par ha et par an pour un bassin versant de 85 000 km² entièrement situé dans l'écosystème «caatinga» moyennement mis en valeur entre Petrolina et Moxotó (Unesco, 1984).

Interprétations

L'«effet d'échelle» (Molinier *et al.*, 1990) qui fait décroître l'écoulement de plus de trois fois quand les surfaces passent du mètre carré au milliers de kilomètre carré peut être expliqué par 1) l'hétérogénéité édaphique aux petites et grandes échelles 2) le fait que le ruissellement superficiel important mesuré sur parcelles est relayé sur bassins par un écoulement hypodermique et profond, 3) par des infiltrations profondes dans les fissures et diaclases du socle cristallin ou les épaisses formations sédimentaires et par la recharge importante sous climat semi-aride, des sols, des nappes et des quelques 70 000 réservoirs de stockage de l'eau superficielle ou «açudes» dont certains ont un volume de plusieurs centaines de millions de mètre cube (Cadier, 1991).

Pour essayer de comprendre le bon comportement hydrodynamique des sols bruns eutrophes de l'écosystème

«caatinga» (20% de la surface du Nordeste semi-aride, l'un des meilleurs potentiels agricoles de la région), on peut comparer les données obtenues à Sumé, sous pluies simulées, pendant quatre ans (Molinier *et al.*, 1989) à celles obtenues par Chevalier (1982) à Oursi (région sahélienne du Burkina Faso) sur le même type de sol brun eutrophe à l'aide du même simulateur de pluies (infiltromètre à aspersion) conçu par Asseline et Valentin (1978).

Les deux sols bruns eutrophes ont une granulométrie de l'horizon de surface identique dont 32% d'argile et 20% de sables grossiers (Leprun et Silveira, 1992). Pour des protocoles d'expérimentation très semblables, la hauteur de la pluie d'imbibition (hauteur d'eau qui s'infiltre avant le premier ruissellement) est environ huit fois plus élevée à Sumé qu'à Oursi. La première pluie simulée appliquée sur sol sec à la fin de la saison sèche ne provoque aucun ruissellement à Sumé alors que le ruissellement atteint 30% à Oursi. A Sumé, il a fallu appliquer sur un jachère de «caatinga» de cinq ans, 203 mm en deux jours avec une intensité de 63 mm.h^{-1} , soit 2/5 du total des pluies annuelles, pour n'obtenir qu'un ruissellement de 2 mm, tandis qu'à Oursi, sous jachère, avec la même intensité, une seule pluie de 40 mm a provoqué un ruissellement de 13 mm.

En fait, les deux sols, s'ils ont la même granulométrie, diffèrent beaucoup sur de nombreux autres points, en particulier au niveau de l'horizon de surface. La structure, lamellaire et compacte sur 3 cm à Oursi, est fragmentaire fine à grumeleuse à Sumé. Le taux de carbone de 0,7% à Oursi atteint 2,7% à Sumé. La somme des cations de 18,06 mé à Oursi monte à 29,21 mé à Sumé. Enfin, l'indice de stabilité structurale et le test de perméabilité K de Henin (1938) respectivement de 1,65 et 1,17 à Oursi, présentent les valeurs de 1,30 et 1,47 à Sumé. Ces éléments mettent en évidence les meilleures qualités physico-chimiques de surface du sol de la «caatinga» et permettent d'expliquer les notoires différences de comportement hydrodynamique relevées lors des pluies simulées.

Au total, les résultats obtenus à Sumé (Molinier *et al.*, 1989) lors de deux pluies simulées de forte intensité prolongées durant deux jours consécutifs (près de 200 mm) ont permis d'établir que :

- sur sol nu non travaillé à structure lamellaire de sub-surface, le ruissellement apparaît rapidement. Le taux d'infiltration initial de 63 mm.h^{-1} , correspondant à l'intensité de la pluie, chute à 40 mm.h^{-1} au bout de 10 mm et tend rapidement à se stabiliser à une valeur voisine de 19 mm.h^{-1} ;

- sur sol sous végétation, à structure superficielle fragmentaire, l'infiltration se maintient à la valeur de l'intensité de la pluie, soit 64 mm.h^{-1} durant les deux heures de la première pluie. Le ruissellement survient rapidement au cours de la seconde pluie et l'intensité d'infiltration se stabilise alors lentement aux environs de 30 mm.h^{-1} .

L'infiltration paraît donc être réglée :

- sur sol nu, par la conductivité hydraulique de la structure lamellaire superficielle. Sur les 621,8 mm de pluie tombée, seulement 197,2 mm, soit 21,7% se sont infiltrés;

- sur sol sous végétation à l'inverse, sans structure lamellaire superficielle, le ruissellement ne surviendrait que lorsque l'humectation du profil atteint le niveau limite de sa capacité de stockage. Sur les 395,5 mm de pluie tombée, 309,4 mm soit 68,3% se sont infiltrés.

L'expérience suivante réalisée met en évidence l'influence du travail du sol à Sumé.

Sur les mêmes sols bruns eutrophes vertiques, deux parcelles contigües ont reçu deux pluies simulées de hauteurs (30 mm) et intensités (40 mm.h^{-1}) similaires. Dans l'une des parcelles, le sol nu est non travaillé, dans l'autre il est sarclé à la houe sur environ 10 cm de profondeur, selon la pratique régionale. Le pourcentage d'eau ruisselée obtenu sur la parcelle sarclée est près de treize fois inférieur à celui obtenu sur le sol nu non travaillé. On a, par ailleurs, vérifié que le surplus d'eau infiltrée était entièrement stocké dans l'horizon A. A la fin de cette pluie on pouvait noter que le microrelief de la structure fragmentaire grossière du sarclage initial s'était effondrée, que la surface était mollement ondulée et sans aspérités, mais qu'aucune perte en terre n'était survenue. Le lendemain, une autre pluie de 30 mm, avec une forte intensité de 100 mm.h^{-1} , appliquée sur les deux parcelles provoquait le même taux de ruissellement de 66%. Les pertes en terre, équivalentes à $0,82 \text{ T.ha}^{-1}$ dans le cas de la parcelle non travaillée, n'étaient plus que de $0,58 \text{ T.ha}^{-1}$ pour la parcelle sarclée.

On a vérifié ainsi que le sol sarclé acquiert, après une forte pluie, les mêmes paramètres hydrodynamiques que ceux du sol nu non travaillé ; la dégradation de la structure superficielle de ces sols sous l'impact des pluies de fortes intensités (croûte «structurale» de Casenave et Valentin, 1989) est un **phénomène rapide** dont les conséquences sont importantes et immédiates.

Pour tester la durabilité de cette dégradation des caractères hydrodynamiques, on a soumis l'année suivante la parcelle sarclée et dégradée précédente, laissée en repos durant douze mois, à quatre pluies fortes simulées sommant 164 mm en deux jours. Ces pluies n'ont occasionné qu'un ruissellement de 22,3 mm, soit 13% de la hauteur de pluie et aucun perte en terre. Cette dernière expérience prouve qu'en un an une structure dégradée peut, sous l'effet de l'activité biologique durant la saison des pluies, «se récupérer» et retrouver presque totalement ses bonnes propriétés physiques originelles.

Conclusions et recommandations sur l'écosystème «caatinga» et sa mise en valeur

Ce qui précède nous permet d'avancer que l'écosystème «caatinga», grâce aux bonnes caractéristiques physico-chi-

miques des sols et à sa végétation (dont l'action sur le sol et le pouvoir de régénération sont exceptionnels), constitue un milieu écologique extrêmement favorable en dépit de conditions climatiques adverses. La comparaison avec les écosystèmes semi-arides africains est éloquent (Leprun et Silveira, 1992; Leprun, 1993a). Les sols du Nordeste sec en raison de l'absence de manteau d'altération profond et la présence de minéraux altérables sont chimiquement plus riches que leurs homologues sahéliens. Cette richesse minérale liée à une richesse en matière organique provenant d'une végétation plus dense, à majorité de légumineuses riches en azote, peu ou non brûlée, confèrent aux sols des qualités de structure de surface qui favorisent l'infiltration et réduisent l'écoulement et l'érosion hydrique. En particulier, ces sols ne développent que très rarement et seulement sur certains solonetz solodisés et planosols, ces épaisses croûtes et pellicules de surface qui colmatent une grande partie des sols sahéliens et entravent l'infiltration et la germination, formant ainsi de grandes étendues de sol entièrement nues (Leprun, 1978; Valentin, 1981; Casenave et Valentin, 1989).

L'écosystème «caatinga», caractéristique du Nordeste brésilien semi-aride, peut donc être considéré comme un système climatique, c'est à dire en équilibre avec les conditions du milieu actuel. Son comportement vis-à-vis des facteurs de dégradation est satisfaisant dans les conditions naturelles ou d'utilisation peu agressives (Leprun, 1993b). Les essais de mise en valeur observés permettent d'avancer qu'il est stable et qu'il ne passe à un agrosystème dégradé qu'après plusieurs années de cultures successives, en particulier lorsque ces cultures sont mécanisées et lourdes. Mais même dans ces conditions, les phénomènes de tassement et compaction superficiels ou hypodermiques sont rares. Abandonnées, les cultures devenues jachères passent en quelques années à une «caatinga» secondaire, botaniquement pauvre, puis à une «caatinga» vraie, dont la taille dépendra essentiellement de la qualité des sols. Le vrai danger de la mise en valeur des sols de cette région semi-aride est la pratique quasi générale du labour et du semis dans le sens de la plus grande pente qui, en raison de la fréquence des pentes de 5 à 10%, occasionnent une érosion linéaire en griffes conduisant rapidement à des incisions et ravines dont l'évolution est pratiquement irréversible.

Les pratiques culturales efficaces de conservation du sol et de l'eau sont connues (Leprun *et al.*, 1986). La culture selon les courbes de niveau avec ou sans cordons herbeux réduit de près de 90% les pertes en terre et en eau. La pratique du billon cloisonné isohypse donne des résultats spectaculaires : elle élimine pratiquement les pertes et permet donc le stockage intégral de l'eau dans une région de pluies peu abondantes où trois années sur dix en moyenne l'irrégularité des pluies interdit toute récolte.

L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER ÉQUATORIAL AMAZONIEN

Description et principales caractéristiques

L'écosystème forestier amazonien couvre une superficie totale de plus de quatre millions de kilomètres carrés sur les quelques six millions que comptent les surfaces de forêts tropicales humides du pays. Comme dans les autres régions humides et subhumides du monde tropical, les forêts et formations boisées du Brésil représentent le type de végétation naturel et climatique. L'écosystème forestier amazonien joue un rôle très important non seulement sur le plan économique (besoins en bois, en minerais et en produits alimentaires), mais aussi sur le plan socio-culturel et ethnologique. Il joue un rôle de plus en plus grand sur le plan écologique et météorologique en raison de son influence régulatrice sur le climat du globe.

Le climat tropical, humide et chaud toute l'année, a une pluviométrie annuelle supérieure à 1 500 mm et peut atteindre et dépasser 3 000 mm. L'agressivité des pluies est très élevée (facteur R de Wischmeier supérieur à 10 000 MJ.mm/ha.h).

L'impression d'homogénéité donnée par la forêt est trompeuse. Le terme forêt amazonienne désigne en effet plusieurs formations végétales : la forêt ou «Mata» de terre ferme hors de l'influence directe des fleuves et jamais inondée; et les formations forestières périodiquement inondées. Des savanes arborées plus ou moins denses appelées «cerrados», que l'on retrouvera dans le centre du Brésil, ont une certaine extension.

Les données présentées ici traitent surtout de la forêt de terre ferme qui occupe la plus grande partie de l'Amazonie brésilienne et déborde sur tous les pays voisins et en particulier sur la Guyane française. La compétition pour la lumière favorise un développement rapide des arbres en hauteur et de ce fait, les troncs dépassent rarement 1 m de diamètre. La densité des arbres et la diversité des espèces sont élevées : sur 200 millions d'hectares de forêts, on a inventorié plus de 400 espèces d'arbres dont la densité moyenne d'individus à diamètre supérieur à 25 cm par hectare, atteint 117. La forêt amazonienne a un taux d'interception de la pluie qui est de 20 à 26% (Leopoldo *et al.*, 1984). L'écosystème est complexe, mais en équilibre (climax) et caractérisé par un recyclage presque parfait des éléments nutritifs entre la pluie, la végétation et les sols au niveau desquels les exportations sont grossièrement compensées par les entrées.

Les sols dominants sont les latosols jaunes, les sols podzoliques et les podzols. La majorité des sols sont pauvres, lixiviés, acides et présentent une toxicité aluminique ainsi qu'un taux de phosphore assimilable inférieur au niveau de carence. Une étude groupée des horizons de surface de 1 700 échantillons de tous les types de sols prélevés en Amazonie

Tableau 2 - Taux de ruissellement et d'érosion mesurés sous l'écosystème forestier amazonien.**Table 2** - *Runoff and erosion rates in amazonian forest ecosystem*

Lieu	Superficie	Pente %	Traitement	Pluviométrie moyenne annuelle Px en mm	Ruissellement % de Px	Érosion t.ha ⁻¹ .an ⁻¹
OURO PRETO DO OESTE (RD)	10 m ²	20 %	forêt naturelle	1 922 mm	1,0	0,35
	10 m ²		jachère		10,3	0,44
	10 m ²		pâturage cultivé		47,9	1,72
	10 m ²		cacaoyer		2,1	0,18
MANAUS (AM)	10 m ²	20 %	forêt naturelle	2 430 mm	1,1	0,16
	10 m ²		pâturage cultivé		12,0	4,93
	10 m ²		sol nu		7,7	6,86
TOME-ACU (PA)	100 m ²	4 %	pâturage	2 742 mm	3,4	5,83
	100 m ²		cultures		31,1	25,37
	100 m ²		sol nu		23,4	54,02
GUYANE FRANÇAISE ECEREX	100 m ²		sol nu	3 500 mm		80,10
Bassins A	1,3 ha	20 %	forêt naturelle		15,2	0,35
	1,3 ha		nu défriché		38,0	12,02
	1,3 ha		pâturage cultivé		25,8	0,54
Bassins C	1,6 ha	17-20 %	forêt naturelle		4,3	0,05
	1,6 ha		nu défriché		14,2	1,50
	1,6 ha		pomelos		14,2	0,10

brésilienne réalisée grâce à la Banque de données pédologiques de l'EMBRAPA (SISSOLOS) a fourni les moyennes suivantes : pH : 4,49; matière organique : 3,29%; C/N : 10,61; S : 3,00 mé; T : 10,21 mé; S/T : 24,22 %; Al échangeable : 2,10 mé (Freire *et al.*, 1992).

La région Nord du Brésil, entièrement incluse dans l'écosystème forestier a, avec une densité de 1,6 habitants par kilomètre carré (dix fois moins que le Nordeste sec), la plus faible population du pays. Le taux de déforestation croît chaque année davantage et selon les données satellitaires de l'INPE,

Institut brésilien de Recherches spatiales, les principaux États atteints sont le Rondonia 18%, l'Acre, 4,8%, le Pará 1,6% et l'Amazonas 0,1%) soit, en 1988, plus de 7 millions d'hectares. Cependant, sous la pression écologiste nationale et internationale le volume de bois divers exploités autres que les grumes a fortement diminué ces dernières années. L'agriculture est peu développée et la principale activité est l'élevage, qui suit la déforestation après brûlis. Mais une grande partie des pâturages, mal gérés et peu productifs, est rapidement abandonnée et passe à des jachères.

Les données du ruissellement et de l'érosion

Ces données chiffrées sont consignées dans le tableau 2. Elles ont été obtenues en différents endroits (localisation, fig. 1), par différents auteurs, dans les conditions suivantes :

Ouro Preto do Oeste (Rondônia)

Pluviométrie annuelle moyenne (Px) : 1.922 mm; sol podzologique rouge-jaune; parcelle de 10 m² type Gerlach (1967) et pente de 20%; traitements : forêt naturelle; jachère de pâturage de trois ans, pâturage cultivé (*Panicum maximum*), cacaoyers adultes, données de 1986-87 (Fearnside, 1986).

Manaus (Amazonas)

Station réserve de l'INPA située à 77 km au nord du port, Px estimée à 2 430 mm; latosol jaune; parcelles de 10 m² type Gerlach; traitements : forêt naturelle; pâturage à *Bracharia decumbens*; sol nu après coupe et brûlis; données de 1984-86 (Fearnside, 1986).

Tomé-Açu (Pará)

Station expérimentale du CPATU/EMBRAPA; Px : 2 742,2 mm; latosol jaune; parcelle de 100 m² et 4% de pente; traitements : pâturage cultivé *Brachiaria humidicola*, rotation de cultures annuelles associées (maïs, haricot caupi, manioc, suivis d'un an de légumineuses engrais vert) en préparation «conventionnelle du sol» (labour à disques + deux hersages); données de 1989 (Nunes Lopes *et al.*, 1990).

Guyanne française

Bassins expérimentaux du Projet ECEREX, situés à Sinnamary; Px variant de 3 100 à 3 500 mm; sols ferrallitiques à drainage vertical et à drainage oblique; traitements : parcelle de 100 m² : sol nu de type Wischmeier et Smith (1960); bassins A de 1,3 ha : forêt naturelle, coupe puis débardage au tracteur, puis défrichement à la lame Rome et andainage au râteau, deux ans après plantation, par bouturage du pâturage à *Digitaria swazilandensis* et broutage par trois bovins par hectare; bassins C de 1,6 ha : même traitement; bassin A : forêt naturelle puis coupe et plantation d'un verger à pomelos avec en plante de couverture *Brachiaria* USDA; données de 1977 à 1984 (Fritsch, 1986; Fritsch et Sarrailh, 1986; Sarrailh et Bereau, 1990; Fritsch, 1990).

Discussion

L'examen des données du tableau 2 met en évidence :

En ce qui concerne le milieu naturel :

■ sous forêt les taux de ruissellement de l'ordre de 1% sur petites parcelles (Ouro Preto à Manaus) passent respectivement à 4,3 et 15,2% sur les bassins C et A de l'ordre de l'hectare. Il semble bien qu'un «effet d'échelle» déjà perçu par Fritsch (1990) à ECEREX, se manifeste, mais d'une manière plus évidente, lorsque l'on se place au niveau de la région toute entière. En effet, le taux de ruissellement et d'écoulement

sous forêt, qui croît de 1% sur 10 m² à 20-26% en moyenne sous petits bassins (Leprun, 1993b), atteint le chiffre élevé de 46% quand on considère les très grands bassins hydrographiques, l'Amazonie et l'Orénoque (Unesco, 1978);

■ les taux d'érosion sont toujours très faibles et inférieurs à 0,35 t.ha⁻¹.an⁻¹, quels que soient le sol et la superficie de la parcelle ou du bassin;

En ce qui concerne les pâturages cultivés :

■ le taux de ruissellement varie beaucoup, indépendamment de la superficie, et peut atteindre des valeurs élevées (47,9 % près de Manaus où il est alors supérieur au ruissellement sur sol nu, 25,8% en Guyane);

■ les charges solides restent assez faibles (0,5 à 5,8 t.ha⁻¹.an⁻¹);

En ce qui concerne les cultures :

sous cultures arborées, tant dans le cas du cacaoyer que dans celui des pomelos, les taux de ruissellement sont peu importants et les taux d'érosion insignifiants (0,1 t.ha⁻¹.an⁻¹). Sous cacaoyers adultes, le taux d'érosion serait encore plus faible que sous forêt. Il n'en va pas de même sous cultures annuelles où, à Tomé-Açu, les pertes en eau et en terre sont importantes, et le ruissellement supérieur à celui sur sol nu.

En ce qui concerne le sol nu :

les taux de ruissellement augmentent avec la taille du dispositif de mesure et les pertes en eau et en terre peuvent atteindre des valeurs très élevées sur sols à drainage superficiel et latéral (38% de ruissellement sur le bassin A après défrichement; 80,1 t.ha⁻¹.an⁻¹ sur la parcelle Wischmeier en Guyane).

Sur les petits bassins A et C d'ECEREX, le défrichement a pour effet de multiplier le taux d'écoulement par 2,5 à 3,3 et l'érosion par un chiffre voisin de 30. Après installation du pâturage cultivé et du verger à pomelos, la lame ruisselée et la charge solide diminuent de nouveau dans des proportions notables, mais restent, dans tous les cas, supérieures à ce qu'elles étaient sous couvert naturel initial. Cela signifie que le défrichement, effectué à l'aide d'engins lourds, a provoqué des modifications hydrodynamiques qui se manifestent pendant plusieurs années après les dégradations occasionnées aux horizons de surface des sols. Sur sol nu des parcelles de 100 m² de type Wischmeier et Smith (1960), les pertes en terre sont très élevées tant dans le Pará qu'en Guyane. Cela signifie que les dégradations physiques provoquées dans l'horizon superficiel du sol par le défrichement, le labour et le hersage annuels exécutés dans le sens de la pente sont importantes. Fritsch (1990) a déterminé, en comparant les effets de méthodes de défrichement différentes sur plusieurs bassins, que 65 à 72% de l'accroissement du ruissellement après défrichement étaient à mettre au compte de la dégradation des caractères hydrodynamiques de surface par les engins mécaniques dont certains pèsent jusqu'à 32 t.

Interprétations

Il convient donc d'essayer d'expliquer, à la lumière des résultats déjà obtenus et des travaux en cours, quelle est la nature de ces dégradations et quels sont les processus mis en jeu.

L'effet d'échelle sur le taux d'écoulement sous forêt, accru avec la surface des dispositifs et donc contraire à celui mis en évidence en milieu semi-aride, est en revanche difficilement explicable. On peut, en première hypothèse, avancer, contrairement à ce qui avait été proposé sous «caatinga», la grande homogénéité et l'épaisseur des couvertures pédologiques et leur teneur en eau élevée souvent proche de la saturation. La reconstitution des réserves en eau du sol et la recharge des nappes étant rapidement assurées, tout l'excédant des énormes quantités de pluie qui tombent sur la région s'écoule et rejoint les fleuves et la mer.

Bien que très proches les uns des autres et sensiblement de la même taille, les petits bassins ECEREX, par ailleurs tous situés sous forêts et sur même roches, montrent une grande disparité des taux d'écoulement (7 à 34 %).

Les différences de ruissellement et corrélativement de charge solide des bassins peuvent être expliquées par la dynamique hydrique différente des sols, principalement superficielle et latérale dans ceux du bassin A, verticale et profonde dans ceux du bassin C.

Grimaldi et Boulet (1989-1990) ont étudié le comportement hydrodynamique spécifique de chaque catégorie de sols des bassins d'ECEREX après avoir caractérisé leur espace poral.

Les sols à drainage vertical libre du bassin C sont caractéristiques d'une couverture ferrallitique initiale constituée d'horizons microagrégés épais à spectre de porosité nettement bimodal. Les pores intramicroagrégats sont beaucoup plus petits que les fissures et pores d'origine biologique. L'eau s'infiltre et chemine verticalement grâce à un réseau de fines fissures (10 µm) séparant les microagrégats.

Les horizons des sols à drainage latéral sont pour leur part constitués à partir d'altérites à spectre de porosité pratiquement unimodal et fissuration peu développée. Ces altérites développent des horizons peu épais à structure polyédrique à macropores millimétriques; cette macroporosité permet l'écoulement latéral des eaux.

C'est également par les changements de distribution de l'espace poral, mis en évidence dans les horizons des latosols argileux de l'Amazonie centrale après déforestation mécanique, que Chauvel *et al.* (1991) expliquent les réductions importantes du stock d'eau disponible pour les plantes. L'emploi de machines lourdes au cours du défrichement diminue en effet, par tassement, le volume des micro- et mésopores de 1 à 100 µm de diamètre et la rétention d'eau utile.

La déforestation mécanique aurait donc pour effet non seulement de réduire de façon importante le volume des fissures

et des pores biologiques, mais aussi d'uniformiser les pores interparticulaires (Grimaldi *et al.*, 1993). Cette uniformisation diminuerait les propriétés de gonflement et retrait du sol. Les conséquences sur le transfert et la rétention de l'eau sont importantes. Après passage d'un engin lourd sur un latosol argileux d'Amazonie brésilienne, Toledo et Navas (1986) ont mis en évidence une réduction de près de dix fois de la conductivité hydraulique.

Conclusions et recommandations pour la mise en valeur de l'écosystème forestier amazonien

Les latosols à texture très argileuse qui occupent plus de 10% de l'écosystème forestier amazonien soit près de 40 millions d'ha (carte pédologique au 1/5 000 000 de l'EMBRAPA/SNCS 1981), sont, en raison de leur texture excessivement fine et de l'humidité souvent élevée de surface, des sols difficiles à défricher et à labourer mécaniquement. L'emploi d'engins lourds au moment de l'abattis et de charrues à disques au moment des labours provoque un tassement et une compaction caractéristiques entre 20 et 40 cm de profondeur, une forte diminution (70 à 80%) du volume des grands pores et une dégradation de la structure qui, par coalescence des agrégats, devient massive (Grimaldi *et al.*, 1990). Ce phénomène de compaction atteint une grande partie des sols amazoniens soumis au défrichement agricole (mise à nu du sol à la lame et arrachage des souches) et au labour mécanisé dès le moment où ils sont argileux et humides, ce qui est fréquent.

Lorsque le défrichement se fait manuellement ou en employant des machines légères, et à la condition d'utiliser des pratiques agricoles adéquates et des aménagements compatibles avec le milieu (expérience ECEREX), un retour à des valeurs comparables à celles du milieu naturel survient après au moins quatre années d'aménagement (Fritsch, 1990).

Les possibilités de récupération de la structure du sol après défrichement, par les racines d'une légumineuse du genre *Pueraria* sont également étudiées par Grimaldi *et al.* (1993). Cette légumineuse est déjà largement employée comme plante de couverture sous cultures arborées et en particulier sous Hévée et Palmier à huile dans toutes les régions humides du Brésil; son emploi est préconisé par les services de vulgarisation de l'EMBRAPA.

En conclusion, l'écosystème forestier amazonien, dont la productivité primaire nette est élevée, (plus de 10t par ha et par an), a pu faire penser qu'il constituait une réserve de terres agricoles à fort potentiel; il est en réalité un *écosystème fragile, édaphiquement pauvre*. Toute modification de la couverture végétale originelle, en particulier le défrichement agricole de ses sols, doit se faire avec le plus grand soin.

La pratique du semis direct, efficace et adoptée dans le reste du pays, étant difficilement utilisable en raison de la masse et de la vitalité des mauvaises herbes, il convient, dans

le cas de cultures annuelles, de préconiser un labour léger ou réduit, effectué dans des conditions d'humidité minimales du sol pour éviter le tassement.

Les rendements peu élevés obtenus pour les cultures annuelles classiques, comme le maïs, le soja et le haricot, quels que soient le type d'exploitation et la technologie utilisée, et leur chute inexorable 3 ou 4 ans après le défrichement, rendent ces cultures économiquement peu rentables. Il leur est nettement préféré une exploitation de type agro-forestier, de cultures arborées fruitières, industrielles ou sylvicoles, plus rentables car moins exigeantes, moins sensibles aux conditions phytosanitaires drastiques locales et plus respectueuses de l'environnement.

L'ECOSYSTEME «CERRADOS» OU SAVANES TROPICALES

Description et principales caractéristiques

L'écosystème «cerrados» qui occupe environ deux millions de kilomètres carrés est, par sa taille, après la forêt amazonienne, le second écosystème de l'espace brésilien. Il couvre pratiquement toute la région Centre-Ouest qui est une région en pleine expansion. Il est caractérisé par sa formation végétale de type savane arborée plus ou moins ouverte : le «cerrado», très semblable aux savanes soudanaises africaines. Il existe plusieurs types de «cerrados» qui vont du «Cerradão» forestier dense au «campo cerrado» savane herbeuse peu arborée. Le climat est de type tropical chaud et humide (pluviométrie supérieure à 1 500 mm/an) dans sa partie pré-amazonienne au nord, et plus sec (pluviométrie de l'ordre de 1 500 mm/an mais existence de 4 à 5 mois secs) dans les régions centrales et méridionales. Une petite saison sèche, appelée «veranico», peut interrompre brusquement la saison des pluies et compromettre les cultures. La température moyenne annuelle est de 20°C avec des minimas de 5 à 6°C en août. L'évaporation de l'ordre de 400 mm/an doit sa faible valeur au fait que la saison sèche correspond à la période la plus fraîche. L'humidité relative de l'air peut, en revanche tomber à 20% et moins en saison sèche. L'érosivité des pluies se situe entre celle du Nordeste et de la région amazonienne. Les sols, en majorité des latosols et des sols podzoliques jaunes et rouges sont profonds et drainants, acides, souvent aluminiques, et de fertilité chimique basse. Le modelé peu accentué et les sols drainants favorisent une infiltration importante et le réseau hydrographique est, de ce fait, peu développé (photo 3).

Le développement, essentiellement agricole, est récent, l'agriculture extensive et mécanisée. La monoculture est la règle. Selon des données récentes de l'EMBRAPA (Resk, 1991), près de 25% de l'écosystème, soit 50 millions d'hectares sont utilisés à des fins agricoles ou pastorales. Seraient encore disponibles au moins 90 millions d'hectares de terres cultivables.

La région des «cerrados» produit plus du tiers des récoltes de riz et près du tiers des récoltes de soja du pays. Avec un cheptel bovin de 34 millions de têtes, elle est la première région d'élevage du Brésil.

L'exploitation récente des sols des «cerrados» s'est fortement accélérée depuis une dizaine d'années et la tendance à l'extension des surfaces cultivées en soja ne fait que s'accroître.

Les données du ruissellement et de l'érosion

Les données du ruissellement et de l'érosion sont exposées dans le tableau 3 et concernent les travaux suivants :

Planaltina (DF), c'est la station expérimentale du Centre de Recherche sur les «cerrados» de l'EMBRAPA (CPAC) situé à Planaltina à 18 km de Brasília; pluviométrie moyenne annuelle (Px) : 1 600 mm; latosol rouge foncé; parcelles de 77 m² et 5,5% de pente; traitements : pâturage cultivé : (*Brachiaria decumbens*), soja en semis direct; soja, maïs, et riz pluvial : en préparation «conventionnelle» (un labour et un hersage léger annuels), pâturage : en préparation «conventionnelle» initiale puis deux coupes annuelles; données établies de 1977 à 1983 par Dedecek *et al.* (1986).

En l'absence de données sur le milieu naturel (problème repris au niveau des interprétations), les commentaires sur les données du tableau 3 concernent uniquement des agrosystèmes issus de l'écosystème «cerrado» défriché deux années avant l'étude, et auront trait à la comparaison des traitements entre eux.

Discussion

Les taux de ruissellement, extrêmement faibles sur pâturages, sont multipliés par 10 sous cultures de soja et par environ 16 sous riz et maïs. Sur sol nu (parcelle Wischmeier), le taux de ruissellement de 23,6% est proche de ceux obtenus sous cultures en préparation dite «conventionnelle» de riz et maïs.

Les quantités de terre érodée, extrêmement faibles sous pâturage, sont multipliées par 50 à 90 dans le cas du soja et par près de 300 fois dans le cas du maïs. Elles sont très élevées sur sol nu et correspondent à plus de 500 fois les valeurs obtenus sous pâturages.

Les données du tableau 3 peuvent être comparées à celles obtenues à plus de 250 km de là, près de Goiânia (GO) dans le même écosystème «cerrado» transformé, sur même type de sol, et dans des conditions de climat et d'expérimentation semblables : parcelles, pentes, plantes et pratiques culturales (Blancaneaux *et al.*, 1992). Les taux de ruissellement et d'érosion sont proches de Planaltina sur sol nu et sur pâturage.

Interprétations

A notre connaissance, il n'existe pas de données sur les pertes en eau et en terre sous végétation de «cerrados» mesurées sur parcelles ou petits bassins. En revanche, on dispose de quelques données sédimentologiques sur bassins hydrographiques (IPH/ELECTROBRAS, 1992). Ces données

Tableau 3 - Taux de ruissellement et d'érosion sous «cerrados»

Table 3 - Runoff and erosion rates on "cerrados"

Lieu	Superficie	Pente %	Traitement	Pluviométrie moyenne annuelle Px en mm	Ruissellement % de Px	Érosion T.ha ⁻¹ .an ⁻¹
PLANALTINA (DF) CPAC	77 m ²	5,5 %	sol nu soja semis direct soja «convent» maïs «convent» riz «convent» pâturage cult. conv.	1 600 m	23,6 13,5 14,5 21,3 20,6 1,3	53,0 5,0 9,0 29,0 8,0 0,1

permettent d'établir que sous «cerrados» en partie exploités, la charge solide en suspension est assez faible et se situe entre 0,10 et 0,50 t.ha⁻¹.an⁻¹. Le rio Tocantins, dont le bassin versant a une surface de 727 900 km² et qui est presque entièrement situé dans l'écosystème «cerrado» peu perturbé, a un taux de d'écoulement de 23% et une charge solide en suspension de 0,23 t.ha⁻¹.an⁻¹ (Vanoni, 1979).

Ces chiffres autorisent à penser que l'écosystème «cerrado» naturel et sa variante pastorale assurent de manière efficace la conservation de ses sols et de ses eaux vis à vis de l'agressivité pluviale, mais que les agrosystèmes qui en sont issus et, en particulier, les cultures de maïs et de riz, ont des comportements beaucoup moins conservateurs. Ces comportements sont indicateurs de dégradations physiques liées à la mise en valeur, exacerbées et amplifiées sur sol nu.

Quelles sont ces dégradations ? Peu d'études ont été conduites pour caractériser les propriétés hydrodynamiques des sols sous «cerrados». Les principaux facteurs agronomiques limitants cités par Seguy *et al.* (1989) sont les suivants :

- une dégradation rapide de la fertilité physico-chimique des latosols due à une mauvaise gestion du sol induite par des modes d'exploitation spéculatifs;
- l'absence ou l'inadéquation de la protection antiérosive;
- la pratique de la préparation dite «conventionnelle» en sol humide qui, après trois années de cultures, conduit à la compaction de l'horizon 10-30 cm (semelle de labour) et à une prolifération incontrôlable des adventices. Cette compaction favorise l'érosion laminaire par diminution de l'infiltrabilité;
- l'absence de rotations de cultures.

Pour combattre ou empêcher les dégradations précédentes, Seguy *et al.* (1984; 1989) ont élaboré une pratique originale de préparation du sol en utilisant la technique du labour profond (sous 40 cm), réalisé en sol humide à l'entrée de la saison des pluies et précédée par la trituration et la pré-incorporation des résidus de récolte. Mise au point initialement pour le riz, cette pratique associe les systèmes de rotation de cultures maïs-riz et légumineuses-riz. A l'usage elle s'est montrée toujours nettement supérieure à la préparation dite «conventionnelle». L'effet restaurateur des propriétés physiques du profil cultural s'exprime en effet rapidement par une décompaction des horizons superficiels sur les trente premiers centimètres. La densité apparente 1,44 kg.dm⁻³ dans la sole compactée, passe à 1,27 après le labour profond. Dans un autre cas la densité passe respectivement de 1,30 à 1,10. Cette baisse de densité se traduit par une augmentation de plus de 6% de la porosité globale sur l'horizon de 0-20 cm et porte davantage sur la macroporosité que sur la microporosité. On observe, de plus, une répartition plus homogène de la matière organique, un meilleur maintien des macroagrégats et une meilleure infiltration. Le coefficient de perméabilité après saturation qui était de 9,6 cm.h⁻¹ en préparation conventionnelle passe à 37,0 cm.h⁻¹ après labour profond. Ce dernier favorise l'infiltration verticale et diminue donc le ruissellement et l'érosion à la condition de ne pas se placer sur pentes trop fortes. Plusieurs milliers d'hectares sont déjà cultivés de cette manière avec succès et l'acceptation par les agriculteurs est bonne.

Centurion et Dematté (1985) ont montré pour un latosol rouge foncé argileux du Mato Grosso do Sul issu de «cerra-

dos» défrichés depuis sept ans et cultivés en soja, que les techniques de préparation mécanisée dérivées de la préparation classiquement utilisée : réduite (un hersage), «conventionnelle» (un labour et deux hersages), «super» (deux labours et deux hersages), ont toutes conduit à la formation de semelles de labour à des profondeurs différentes. Seule la pratique du semi direct sans travail du sol ne produit pas de semelle et provoque une meilleure infiltration et une rétention en eau plus importante tout en présentant des densités apparentes élevées en surface (1,54 contre 1,46 sous labour).

Conclusions et recommandations sur la mise en valeur de l'écosystème «cerrado»

L'écosystème «cerrado», tout comme celui de la forêt amazonienne, est donc un écosystème fragile dont les sols, lorsqu'ils sont soumis à des préparations mécaniques inadéquates, acquièrent des niveaux compactés au sein des horizons supérieurs. Ces niveaux, qui s'apparentent à des semelles de labour, modifient les caractères hydrodynamiques en réduisant l'infiltration et la rétention d'eau utile. Ils limitent également la pénétration des racines, favorisent la prolifération des adventices et font diminuer les rendements. Il convient donc de veiller à travailler le sol, soit le moins possible (pratique du semis direct) et le moins humide possible, soit par labour profond et enfouissement des pailles. Les pâturages constituent une mise en valeur protectrice des sols et de l'eau.

L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER «MATA ATLANTICA»

Description et principales caractéristiques

L'écosystème forestier «Mata Atlântica» est subdivisé dans la nouvelle carte éditée par le département des ressources naturelles de l'IBGE (in : Enge-Rio, 1988) en deux écosystèmes forestiers différents : l'écosystème forestier tropical «Mata Atlântica» dit littoral et la «Mata Atlântica» dit intérieur (fig. 1). La première est une formation forestière ombrophylle dense, la seconde est une formation forestière stationnelle semi-décidue. Différents sur bien des points, ces écosystèmes seront traités ensemble dans ce travail.

La végétation de la «Mata Atlântica» littorale est proche de la forêt amazonienne de terre ferme. Elle se localise sur les reliefs souvent vigoureux qui ourlent toute la façade atlantique. L'altitude élevée (700 à plus de 2 000 m) détermine une pluviométrie annuelle abondante (plus de 2 000 mm au sud de Rio de Janeiro) sans pratiquement aucun mois sec, et des températures moyennes variant de 14 à 20°C et des hivers frais où la température peut tomber à 0°C en montagne. L'érosivité des pluies est comparable à celle de la région des

«cerrados». Les sols, en majorité des latosols et sols podzologiques, sont profonds et relativement désaturés, mais plus riches toutefois que les latosols amazoniens. Ils sont développés sur des roches cristallines acides ou sur grès sablo-argileux continentaux. La faune, protégée par l'accès difficile, est abondante et diversifiée.

Pour sa part, la «Mata Atlântica» intérieure est une formation forestière plus sèche dite semi-décidue. Le climat tropical au nord passe à subtropical humide sans saison sèche à tempéré vers le sud. La pluviométrie moyenne annuelle varie de 1 250 à 2 000 mm et la température de 12 à 20°C selon l'altitude. Le modelé, constitué en grande partie de plateaux basaltiques d'altitude moyenne souvent supérieure à 1 000 m, est donc moins accidenté que sur le littoral. Ces plateaux portent des sols variés dominés par les latosols «roxo», les «terras roxas» et les brunizens, ces derniers chimiquement riches et parmi les plus fertiles du Brésil.

Ces deux écosystèmes ont en commun de représenter le Brésil riche, européen, peuplé par les immigrants allemands et italiens à partir de la fin du siècle passé. Ce sont les régions les plus peuplées et les plus développées socio-économiquement. Véritables paysans, les habitants exploitent mécaniquement de façon intensive des propriétés de taille moyenne. Malheureusement ces colons ont fortement entamé la forêt de la «Mata Atlântica» primitive qui, dans certains États comme le Paraná, ne persiste plus que sous la forme d'îlots.

Données de ruissellement et pertes en terre

Les données regroupées dans le tableau 4 sont issues des travaux suivants :

Campinas (SP)

Stations expérimentales de la Section de conservation des sols de l'Institut Agronomique (IAC); pluviométrie moyenne annuelle (Px) 1 300 mm; sols : latosols roxos et sols podzologiques; parcelles de 100 m² et pente de 6 à 12%; traitements : cultures préparées suivant la pratique «conventionnelle»; moyennes de 30 ans de données (Bertoni *et al.*, 1972);

Forquethinho (RS)

Bassins expérimentaux de l'Institut de Recherches Hydrauliques de Porto Alegre (IPH); Px de 1 700 à 2 000 mm; sols : brunizens et sols líticos sur basaltes; bassins : 3 à 9 hectares et pentes 20 à 40%; traitements : cultures de maïs et soja en préparation «conventionnelle» (photo 4); données de 1978-79 (Bordas et Canali, 1980).

Séropedica (RJ)

Station expérimentale du SNLCS/EMBRAPA au lieu dit km47 (Université Rurale); pluviométrie moyenne annuelle (Px) de 1 250 mm; sol podzologique rouge-jaune; parcelles de 77 m² et pente de 7% (photo 5); traitements : sol nu (type Wischmeier),

pâturage cultivé à *Digitaria decumbens*, maïs préparé soit suivant la méthode «conventionnelle» avec charrue à disques ou charrue à soc, soit en semis direct ; soit en rotation quadriennale avec : arachide, manioc, *Vigna sinensis*, et canne à sucre en culture «conventionnelle»; données (moyennes de cinq ans) du SNLCS non publiées et Leprun, 1988.

Cunha (SP)

Bassin expérimental D de l'Institut de Recherche Forestière de São Paulo; Px 1 848 mm; sols podzolique et latosol rouge-jaune; bassin de 56,04 ha et pente moyenne de 10%; végétation : «Mata Atlântica» dense; données de 1983-84 (Cicco *et al.*, 1985).

Discussion

Les données du tableau 4 appellent les commentaires suivants :

En ce qui concerne la «Mata Atlântica» intérieure :

■ à Campinas, les moyennes de 30 ans réalisées sur parcelles par l'IAC prouvent que le ruissellement, très faible sous forêt, n'augmente pas sur pâturage et est multiplié seulement par 1,5 sous caféiers. Sous culture de coton qui protège peu le sol, le ruissellement est par contre dix fois plus élevé que sous forêt. Les pertes en terre, insignifiantes sous forêt sont en revanche fortement multipliées sur pâturage, sous caféiers et surtout sous culture de coton (X par 65 000);

■ les taux d'écoulement mesurés sur bassins hydrographiques à Forquethinho sont également faibles sous forêt, malgré les fortes pentes, et augmentent relativement peu lorsque les bassins, toujours très pentus, sont presque entièrement cultivés en maïs et soja. En revanche, le taux d'accroissement des pertes en terre est élevé dès que l'on défriche (X 5.000 pour les bassins de même pente A1 et A3) même si ces pertes sont faibles en valeur absolue.

En ce qui concerne la «Mata Atlântica» littorale :

■ le dispositif expérimental de Rio de Janeiro ne comporte malheureusement pas l'écosystème forêt «Mata Atlântica» dense, le défrichement de cette région étant pratiquement total. On se reportera à Cunha, situé à quelques 250 km au Sud. Ce taux, le plus élevé des données à notre disposition, comprend sur les 65,5% mesurés, un ruissellement superficiel immédiat qui est seulement de 7,4% et un écoulement profond retardé qui atteint 58%. Les pertes en terre sont insignifiantes;

■ les pertes en eau et en terre des parcelles de Séropedica établies sur cinq années mettent en évidence les très faibles quantités de terre érodées quelles que soient la culture ou la préparation, et les valeurs excessives, sans commune mesure avec les précédentes obtenues à la sortie de la parcelle nue. On peut également noter que pour la même culture de maïs, le labour réalisé à l'aide de disques est plus dégradant que celui qui emploie les socs.

Interprétations

Il se dégage des considérations précédentes, que l'écosystème forestier littoral, situé sur fortes pentes et sols pauvres, permet un écoulement global important, mais un ruissellement superficiel réduit et aucune érosion. Après défrichement, il offre sous cultures une bonne protection au sol. Laissé nu et travaillé il manifeste une très forte susceptibilité au ruissellement et à l'érosion. Si l'on tente d'analyser les processus conduisant à ce comportement excessif et, en particulier, vérifier l'opinion des agriculteurs et techniciens de l'agriculture locaux qui attribuent à la monoculture prolongée de la canne à sucre le développement, sur ces sols, d'une semelle de labour responsable des chutes de rendements (Fernandez *et al.*, 1981), on doit faire appel aux travaux réalisés par Carvalho (1990) et Carvalho *et al.* (1991) :

■ près de Campos, à 280 km au Nord de Rio de Janeiro sur le même type de sol podzolique que celui de Séropedica, trois sites ont été étudiés : une parcelle sous forêt secondaire constituant la situation non tassée de référence, une parcelle cultivée depuis 35 ans, une ancienne culture de canne à sucre laissée en jachère et utilisée depuis huit années en pâturage. Les densités apparentes des échantillons prélevés à la profondeur potentiellement la plus tassée après vérification morphologique du profil pédologique sur les deux sites cultivés et à la profondeur correspondante dans le profil sous forêt, ne sont pas différentes. Les analyses granulométriques et minéralogiques donnent une composition minéralogique semblable, mais une teneur en argile différente. L'étude détaillée de la porosité met en évidence la présence de deux volumes poraux distincts résultant, l'un de l'assemblage des particules d'argile, l'autre d'un assemblage de pores de bien plus grande taille. Ces deux volumes poraux varient d'une situation à l'autre, mais les variations se compensent, ce qui permet d'expliquer l'absence de variation de la densité apparente. Il est également montré, que sous culture de canne à sucre, le volume poral correspondant aux pores les plus grands est effectivement plus faible que dans les horizons correspondants des deux autres situations;

■ sur le site d'études de Séropedica (Université Rurale), les parcelles nues, pâturage, et canne à sucre dont les données de pertes en eau et en terre figurent dans le tableau 4 ont été étudiées de la même manière par Carvalho (1990). L'étude a conclu en la presque totale absence de relation entre le mode d'utilisation et les variations du mode d'organisation des constituants du sol, la géométrie de l'espace poral et la distribution des pores de grande taille. Contrairement à ce qui avait été mis en évidence à Campos, l'espace poral occupé par la macroporosité n'est pas différent de celui des autres situations. Il n'y a pas tassement. On peut interpréter cette particularité comme la conséquence de la pratique culturale «douce» utilisée sur les parcelles de Séropedica : une seule culture, un temps moins long de culture et une mécanisation légère.

Tableau 4 - Taux de ruissellement et d'érosion affectant l'écosystème «Mata Atlântica»**Table 4** - Runoff and erosion rates in "Mata Atlântica" ecosystem

Lieu	Superficie	Pente %	Traitement	Pluviométrie moyenne annuelle Px en mm	Ruissellement % de Px	Érosion t.ha ⁻¹ .an ⁻¹
CAMPINAS IAC (SP)	100 m ²	6 à 12 %	forêt	1 300 mm	0,7	ε
	100 m ²		pâturage cultivé		0,7	0,40
	100 m ²		caféiers		1,1	0,90
	100 m ²		coton		7,2	26,00
FORQUETINHO (RS) IPH A1	3	20 à 40 %	cultivé	1 700 à 2 000 mm	2,1	0,20
	à		cultivé		5,1	0,61
	9 ha		forêt		0,7	ε
SEROPEDICA (RJ) SNLCS/EMBRAPA	77 m ²	7 %	sol nu	1 250 mm	38,4	198,42
			pâturage cultivé			0,10
			maïs «conv.» disq.		6,5	1,42
			maïs «conv.» socs		0,9	0,55
			rotation cultures		1,7	0,15
			canne à sucre		6,4	20,86
CUNHA (SP)	56 ha	10 %	forêt «Mata Atlantica» dense		65,5	

Il est en revanche difficile d'expliquer comment dans ces conditions de même constitution granulométrique et minéralogique, de même densité apparente et de même géométrie de l'espace poral, ces parcelles peuvent se comporter de manière si différentes vis à vis de l'agressivité pluviale. Il faut en effet rappeler que lorsque l'on passe successivement de la parcelle nue Wischmeier à la parcelle sous canne à sucre puis à la parcelle cultivée en pâturage, les taux de ruissellement sont respectivement de 38,4%, 3,6% et 0,8% de la hauteur moyenne des pluies annuelles et les quantités moyennes annuelles de terre érodée mesurées sont respectivement de 198,42; 0,95 et 0,10 t.ha⁻¹.an⁻¹.

Lorsque l'on passe à l'écosystème forestier intérieur, les travaux de simulation de pluies conduits dans la région d'Ijuí dans le Rio Grande do Sul à 400 km à l'Ouest de Porto Alegre par

Castro et Chevalier (1993), apportent quelques informations. A l'aide du simulateur de pluie conçu par l'ORSTOM et déjà utilisé à Sumé sous l'écosystème «caatinga», le fonctionnement hydrosédimentologique de différentes parcelles placées sur «terra roxa» fournissent quelques éléments de compréhension des comportements lors de la mise en culture.

Les résultats obtenus mettent en évidence la dépendance du comportement hydrodynamique vis à vis de deux facteurs essentiels qui sont : *l'état de surface du sol* après le travail mécanique de préparation agricole, d'une part *la nature et le développement de la couverture végétale* (avoine et soja) d'autre part. Ainsi, l'influence du sous-solage qui augmente l'infiltration et réduit la perte en terre est comparée à celle du labour et hersage en préparation «conventionnelle» qui a des

effets contraires. Le sous-solage produit une structure superficielle qui laisse le sol poreux et rugueux alors que la préparation «conventionnelle» conduit à la formation d'une croûte «structurale» (Casenave et Valentin, 1989).

Les données obtenues non loin de là, sur des parcelles de 100 m² à Ijuí par Cassol *et al.* (1980), permettent de constater que les pertes en eau et en terre sous différentes cultures (avoine, soja, blé, maïs) sont relativement faibles, même lorsque la préparation du sol est celle dite «conventionnelle» (moyennes de taux de ruissellement de 3,5% et 8 t.ha⁻¹.an⁻¹ de terre érodée). La préparation «minima» qui correspond à un labour léger sur les résidus de la culture antérieure diminue dans de grandes proportions ces taux. La pratique du semis direct sans labour les réduit presque à zéro.

Conclusions et recommandations sur la mise en valeur de l'écosystème forestier «Mata Atlântica»

Les données globales de ruissellement et d'érosion collectées provenant des forêts littorales et intérieures de l'écosystème «Mata Atlântica» et de diverses mises en cultures caractérisent des milieux qui se comportent très bien lorsqu'ils sont mis en valeur et soumis à une intensification des cultures annuelles mécanisées. Sauf exception (comme dans le cas de la culture du coton dans l'État de São Paulo), grâce aux qualités physico-chimiques des sols de ces régions, les dommages causés par les activités agricoles intensives ne sont pas préoccupants. Il n'en est pas de même lorsque le sol travaillé est laissé sans végétation. Le ruissellement emporte plus d'un tiers de l'eau des pluies et provoque des pertes en terre qui peuvent atteindre des niveaux alarmants en particulier sur sol podzolique et sur fortes pentes des reliefs littoraux. Des études détaillées permettent de vérifier que les dégradations sont dues à la modifications des propriétés hydrodynamiques par changements de structure de subsurface ou tassement d'horizons à faible profondeur. Dans certains cas, comme dans la région de Rio de Janeiro, des comportements hydrosédimentaires disproportionnés peuvent provenir d'horizons de surface à caractérisations physiques apparemment identiques. L'analyse physico-chimico-minéralogique approfondie effectuée ne suffit donc pas à expliquer les pertes en terre et en eau, conséquences du travail du sol et de la mise en culture, et les dégradations qui en sont responsables.

Nous n'avons pas abordé, au cours de cet exposé l'écosystème forestier à Araucaria du Paraná qui fait partie de la «Mata Atlântica» intérieure et dont les sols riches développés sur les basaltes et intensément travaillés durant des années, présentaient des dégradations sévères de type compaction qui provoquent une érosion ravinante catastrophique. Le phénomène a heureusement été enrayé. En employant, une technique indigène indienne dite du «murundu», dans laquelle ados ou billons sont érigés dans le sens des courbes de niveau ignorant les limites de propriétés. Cette mesure radicale a stoppé

net les ablations. La technique s'est ensuite perfectionnée par l'association du semis direct et du paillage et l'aménagement intégré de microbassins entiers. Le succès a été tel que la presque totalité de l'État du Paraná est couvert de ces microbassins qui sont parfois des versants entiers de bassins hydrographiques plus grands (photo 6).

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Toute modification du couvert végétal et du sol d'un écosystème naturel supposé en équilibre se traduit nécessairement par une modification plus ou moins importante de la structure du sol entraînant une altération plus ou moins grande de ses caractères hydrodynamiques. Une manière globale et relativement aisée de juger ces modifications (dans la quasi totalité des cas des dégradations), et d'évaluer l'impact des transformations sur le comportement hydrodynamique, est de mesurer et comparer les valeurs du ruissellement et de l'érosion avant et après les modifications apportées au milieu naturel. Mais cette estimation globale des dégradations, si intéressante qu'elle soit, ne permet pas d'expliquer la nature et les mécanismes des processus de dégradations. Il faut pour cela étudier dans le détail la composition et les structures des horizons avant et après les perturbations.

Dans ce travail, selon l'écosystème considéré, plusieurs types de dégradations superficielles ont été mis en évidence après l'élimination du couvert végétal et le travail du sol.

C'est d'abord, dans le cas des sols bruns de l'écosystème semi-aride «caatinga», le développement lorsqu'ils sont nus, d'une structure lamellaire de surface qui diminue l'infiltration. Le travail du sol modifie instantanément cette structure et rétablit l'infiltration élevée des sols sous végétation, mais rapidement la structure régénérée se dégrade et le ruissellement augmente. La mise en repos permet en peu de temps au sol de retrouver ses capacités originelles. Grâce aux bonnes qualités physico-chimiques des sols et à la grande activité biologique, ces dégradations de la surface ne semblent donc être ni importantes, ni durables comme c'est le cas dans le Sahel africain. Dans les cas les plus inquiétants, des mesures de conservation simples permettent de résoudre les problèmes.

C'est ensuite, dans le cas de l'écosystème forestier amazonien, le tassement par les engins lourds lors du défrichement et la modification de l'espace poral des latosols argileux et la formation de macropores qui orientent latéralement l'écoulement.

C'est également, dans le cas de l'écosystème «cerrado», la compaction par la pratique mécanisée «conventionnelle» et la formation de semelles de labour qui modifient la porosité, augmentent les mauvaises herbes et diminuent les rendements.

C'est, dans le cas de l'écosystème «Mata Atlântica» littorale, le tassement, par modification contraire et compensée de

volumes poraux de tailles différentes sous culture de canne à sucre. Il reste néanmoins à expliquer pourquoi, sur sol podzologique nu près de Rio de Janeiro, les ablations considérables, de plus d'un centimètre par an, ne déterminent aucune modification de la porosité et de la distribution des volumes poraux de l'horizon érodé de surface. C'est enfin, concernant l'écosystème «Mata Atlântica» intérieure, la dégradation de type croûte d'effondrement structural de la surface lorsque le sol est soumis à la préparation mécanisée «conventionnelle» des exploitations agricoles.

Il n'a pas été question, dans ce travail, des phénomènes d'érosion ravinante profonde qui touchent non seulement l'écosystème forestier intérieur mais également les sols à texture sableuse très drainants des autres écosystèmes (Latosols et sols podzologiques de la «Mata Atlântica» littorale de l'État de Rio de Janeiro et du Sud de l'État du Minas Gerais jusqu'au Pernambuco et des «cerrados» des États du Minas Gerais, du Goiás et du Mato Grosso, podzols de la forêt amazonienne). Ces phénomènes apparaissent brusquement suite à une mauvaise gestion des pâturages (surcharge et piétinement) ou à des travaux routiers ou hydrauliques et s'apparentent à de véritables catastrophes naturelles avec mouvements de masse brutaux de plusieurs milliers de tonnes de terre (Jones, 1973; Journaux, 1978; De Ploey et Cruz, 1979). **Ces phénomènes érosifs de grande ampleur, dont on peut observer les cicatrices le long de nombreuses routes brésiliennes et en particulier dans la Serra do Mar, qui défigurent le paysage et ont des implications économiques et sociales graves, constituent à nos yeux le plus important problème de dégradation actuelle du pays à étudier et à combattre.**

Dans un souci de simplification, il semble donc qu'à partir des cas analysés, deux types de dégradations physiques principales se manifestent après le défrichement et la mise en valeur :

- l'une est un effondrement sur place de la structure appelée «croûte structurale» par Casenave et Valentin (1989). Il y a destruction partielle des agrégats et léger colmatage. C'est le cas des sols riches à structure fragmentaire macroagrégée bien développée comme les sols bruns eutrophes et les «terras roxas»,

- l'autre se présente comme un tassement de profondeur par modification de la distribution des volumes poraux et s'apparente à une semelle de labour. Elle se produit dans le cas des sols argileux et pauvres à structure microagrégée type latosol ou à structure polyédrique médiocrement développée ou à tendance massive, comme dans le cas des sols podzologiques.

Toutes ces dégradations peuvent être évitées et corrigées par l'adoption de pratiques culturales connues et testées. Dans tous les cas, le défrichement doit être le plus «léger» possible, le sol doit être travaillé le moins possible, en conditions d'humidité raisonnables, par des machines les moins lourdes possible, et ne doit pas être laissé à nu.

Les mises en valeur qui conservent le mieux les écosystèmes fragiles et en particulier les écosystèmes forestiers et les «cerrados» sont connues. Ce sont les pâturages, les cultures arborées telles que café, cacao, arbres fruitiers, hévéa, palmier à huile et canne à sucre à la condition de défricher et labourer avec prudence et d'utiliser une plante de couverture. Pour conserver l'espace poral dont on a vu l'importance et le rôle dans les dégradations, il convient de maintenir le statut organique des sols au niveau le plus haut.

L'objet de ce travail étant la dégradation physique, il n'a pas été fait référence aux constituants organiques du sol.

BIBLIOGRAPHIE

- Asseline J., Valentin C., 1978 - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. XV, 4 : 321-349.
- Bertoni J., Pastana F.I., Lombardi Neto F., Benatti JR, 1972 - Conclusões gerais das pesquisas sobre conservação do solo no Instituto Agrônomo. Circular n° 20, IAC, Campinas, 56p.
- Biancaneaux P., Freitas de P.L., Amabile, R.F., Carvalho de A., 1992 - Le «zerotillage» et les méthodes alternatives comme pratique de conservation des sols sous végétation de «cerrado» du Goiás, Brésil. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., n°4, à paraître.
- Bordas M.P., Canali G.E., 1980 - The influence of land use and topography on the hydrological and sedimentological behaviour of basins in the basaltic region of south Brazil. In : Proceedings of the Helsinki Symp. IAHS-AISH, Publ. n° 130 : 55-60.
- Boulet R., 1983 - Organisation des couvertures pédologiques des bassins versants. In : «Le projet ECEREX, compte-rendu des journées de Cayenne», 4-8 mars 1983, GERDAT/INRA/MUSEUM/ORSTOM, p. 23-52.
- Castro N.M.R. dos Chevalier P., 1993 - Hydrosedimentological mechanisms in a structured Terra Roxa throughout the agricultural cycle under simulated rainfalls (Potiribu Project - Rio Grande do Sul, RS). X Simpós. bras. Recursos Hídricos e I Simpós. Recursos Hídricos do Cone Sul, 7-11/1993, Gramada (RS), Anais, (2): 456-465.
- Cadier E., Freitas R.J., Leprun J.C., 1983 - Bacia representativa de Sumé-PB; instalação e primeiros resultados. In: Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. Blumenau, ABRH, 1 : 69-90.
- Cadier E., 1991 - Hydrologie des petits bassins du Nordeste brésilien semi-aride. Thèse Sci. Univ. Montpellier II, 396 p.
- Carvalho S.R. de, 1990 - Tassement de sols ferrallitiques mis en culture. Apport d'une analyse compartimentale de l'espace poral de sols «podzolicos» (État de Rio de Janeiro, Brésil). Thèse Univ. Paris VI, 183 p.
- Carvalho S.R.de, Bruand A., Hardy M., Leprun, J.C., Jamagne M., 1991 - Tassement des sols ferrallitiques podzólico vermelho amarelo sous culture de canne à sucre (État de Rio de Janeiro, Brésil). Apport d'une analyse de la porosité à une connaissance détaillée de la phase minérale. Cah. ORSTOM, sér. pédol., vol. XXVI, (3) : 195-212.
- Casenave A., Valentin C., 1989 - Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Coll. Didactiques, ORSTOM, 229 p.
- Cassol E.A., Eltz F.L.F., Guerra M., Viau L.V.M., 1980 - Perdas por erosão sob chuva natural em solo «Santo Angelo» (Latosolo Roxo Distrófico) em diferentes sistelas de manejo do solo. Resultados anuais de pesquisa. IPRNR, Secretária da Agricultura, RS. rapp. mimeogr.

- Centurion J.F., Dematte J.L.I., 1985 - Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. R. bras. Ci. Solo, 9 : 263-266.
- Chauvel A., Grimaldi M., Tessier D., 1991 - Changes in pore-space distribution following deforestation and revegetation : An example from the central Amazon basin, Brazil. Forest Ecology and Management, 38 : 259-271.
- Chevalier P., 1982 - Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi-Haute Volta). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX, 4 : 253-297.
- Cicco V., Faria A.J., Arcova F.C.S., Shimomichi P.Y., 1985 - Determinação do balanço hídrico com emprego de bacia hidrográfica experimental em mata natural secundária. In : VI Simp.bras. e Hidrol. e Recursos Hídricos. Simp. intern. de Recursos Hídricos em regiões metropolitanas, São Paulo, Anais 3 : 234-246.
- Dedecek R.A., Resck D.V.S., De Freitas JR., E., 1986. - Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em Latossolo Vermelho-Escuro dos cerrados em diferentes cultivos sob chuva natural. R. Bras. Ci. Solo, Campinas, 10:265-72.
- De Ploey J., Cruz O., 1979 - Landslides in the Serra do Mar, Brazil. Catena, 6 : 111-122.
- Duque J.G., 1980 - O Nordeste e as lavouras xerófilas. 3° ed. Mossoro, Escola sup. Agric. Fundação Guimarães Duque, Coleção Mossoroense, 238 p.
- Duvigneaud P., 1984 - La synthèse écologique. Doin éd., 2° éd., 380 p.
- Gerlach T., 1967 - Hillslope troughs for measuring sediment movement. Rev. Géomorph. Dynam., 17 : 173.
- Grimaldi M., Boulet R., 1989-1990 - Relation entre l'espace poral et le fonctionnement hydrodynamique d'une couverture pédologique sur le socle de Guyane française. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 3 : 263-275.
- Grimaldi M., Sarrazin M., Chauvel A., Luizão F., Nunes N., Rodriguez M.R.L., Amblard Ph., Tessier D., 1990 - Effets de la déforestation et de diverses cultures sur la structure des latossols argileux d'Amazonie brésilienne. In : «Atelier sur l'aménagement et la conservation de l'écosystème forestier tropical humide. Etude de cas». MAB/UNESCO, Kourou, Guyane, 8 p.
- Grimaldi M., Sarrazin M., Chauvel A., Luizão F., Nunes N., Rodriguez M.R.L., Amblard Ph., Tessier D., 1993 - Effets de la déforestation et des cultures sur la structure des sols argileux d'Amazonie brésilienne. Cahiers Agriculture, 2 : 36-47.
- Eltz F.L.F., Cassol E.A., Scopel I., Guerra M., 1984 - Perdas de solo e água por erosão em diferentes sistemas de manejo e coberturas vegetais em solo Laterítico Bruno Avermelhado distrófico (São Jerônimo), sob chuva natural. Resultados dos primeiros cinco anos. Rev. Bras. Ci. Solo, Campinas, 8: 117-25.
- EMBRAPA/SNLCS, 1981 - Mapa de solos do Brasil a 1/5 000 000. Rio de Janeiro.
- Enge-Rio, 1988 - Ecossistemas brasileiros. ed. Index, Rio de Janeiro, 200 p.
- Fritsch J.M., 1986 - L'augmentation du ruissellement après défrichement mécanisé de la forêt amazonienne. les bassins-versants «ECEREX» en Guyane Française. In : Soc. Hydrotech. de France, XIX journées de l'Hydraulique, Paris, 9-11 sept. 1986, 8 (1) : 1-10.
- Fritsch J.M., Sarraillh J.M., 1986 - Les transports solides dans l'écosystème forestier tropical humide guyanais. Les effets du défrichement et de l'aménagement de pâturages. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Paris, vol. XXII, 2: 209-22.
- Fritsch J.M., 1990 - Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Opération ECEREX en Guyane française. Thèse Univ. Montpellier II. Coll. Etudes et Thèses, ORSTOM, 1992, 392 p.
- Fernandez J., Furlani Net V.L., Stolf R., 1981 - Sistema de plantio e a competição do solo na cana de açúcar. Brasil Açucareiro, 97 (3) : 20-31.
- Fearnside P.M., Leal Filho N., Chaves R.G., Fernandes F.M., Custodio R.A., Ahmad I.T., Rodrigues F.J.A., 1986 - Erosão do solo na Amazônia Brasileira : métodos de medição e resultados preliminares. Rapp. INPA/Dep.Ecologia, Manaus, 24p.
- Freire E.M.da S., Sechet P., Leprun J.C., 1992 - Valorização de dados de solos na região amazônica brasileira. I Symp. Intern. de Pesquisas ambientais sobre florestas tropicais úmidas (FOREST'90), Manaus 7 a 13/10/1990. Anais, Biosfera éd., Rio de Janeiro, 1992, pp. 479-483.
- Hayashi I., 1981 - Plant communities and their environments in the caatinga of Northeast Brazil. Latin American Studies, 2, Univ. Tsukuba Skura-mura Ibarahi, Japon.
- Henn S., 1938 - Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres. thèse Doct. Univ. Paris; monographie Stations et Lab. de Rech. Agr., Paris, 1938.
- IPH/ELECTROBRAS, 1992 - Diagnóstico das condições sedimentológicas dos principais rios brasileiros. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH, UFRS, ELECTROBRAS ed., 100 p. Rio de Janeiro.
- Jones F.O., 1973 - Landslides of the Rio de Janeiro and the Serra das Araras escarpment, Brazil. US Geol. Surv. Prof. Pap., n° 697, 42 p.
- Journeaux A., 1978 - Éboulements, ravinements et mouvements de masse dans la Serra do mar (Brésil). Bull. Soc. Geogr. fr. pp. 75-81.
- Lago C.J., 1981 - Erodibilidade de um solo Podzólico Vermelho-Amarelo eutrófico pelos métodos de chuva, simulador de chuvas e nomograma, no Sertão de Pernambuco. Recife, UFRPE, 78 p.(Tese de Mestrado).
- Léopoldo P.R., Franken W., Matsui, E., 1984 - Hydrological aspects of the tropical rain forest in Central Amazon. Interciencia, 9 (3) : 125-131.
- Leprun J.C., 1978 - Compte-rendu de fin d'études sur les sols e leur susceptibilité à l'érosion, les terres de cure salées, les formations de «brousse tigrées» dans le Gourma. Rapp. multigr. ORSTOM-DGRST, Dakar, 45 p.
- Leprun J.C., 1983 - Relatório de fim de convênio de manejo et conservação do solo no Nordeste brasileiro (1982-1983). Relatório SUDENE-ORSTOM, Recife, 290 p., 5 cartes annexes.
- Leprun J.C., 1985 - La conservation et la gestion des sols dans le Nordeste brésilien. particularités, bilan et perspectives. Cah. ORSTOM, sér. pédol. vol. XXI, 1984-85, (4) : 257-284.
- Leprun J.C., Silveira C.O. da, Sobral Filho R.M., 1986 - Efficacité des pratiques culturales antiérosives testées sous différents climats brésiliens. Cah. ORSTOM, sér. Pedol., vol. XXII, (2) : 223-233.
- Leprun J.C., 1988 - A situação da conservação do solo e da água no Brasil. O papel do SNLCS da EMBRAPA. Rapp. interne, EMBRAPA, Rio de Janeiro, 42 p.
- Leprun J.C., Silveira C.O. da., 1992 - Analogies et particularités des sols et des eaux de deux régions semi-arides : le Sahel de l'Afrique de l'Ouest et le Nordeste brésilien. In : «L'aridité, une contrainte au développement». Didactiques, Ed. ORSTOM, Paris, pp. 221-244.
- Leprun J.C., 1993a - Sertão brésilien et Sahel africain : écologie comparée de deux régions sèches et conséquences sur l'environnement. Les colloques de l'Académie des Sciences et du CADS. H. Paquet et N. Clauer éd., Paris, avril 1993. Coll. «Sédimentologie et Géochimie de la Surface» à la mémoire de G. Millot, pp. 127-140.
- Leprun J.C., 1993b - Water production by runoff and sediments by érosion on different brazilian ecosystems and agrossystems. X Simp. bras. Recursos Hídricos et I Simpós. Recursos Hídricos do Cone Sul, 7-11/1993, Gramada (RS), Anais (2) : 515-524.
- Maak P., 1968 - Geografia Física do Estado do Paraná. Banco desenv. Paraná, UFPR e IBPT, Curitiba, PR, 350 p.
- Molinier M., Audry P., Desconnets J.C., Leprun J.C., 1989 - Dynamique de l'eau et des matières dans un écosystème représentatif du Nordeste brésilien. Conditions d'extrapolation spatiale à l'échelle régionale.

Photo 1 - «Caatinga» en fin de saison sèche sur l'un des bassins expérimentaux de Sumé (Paraíba)

Photo 1 - «Caatinga» at the end of dry season in one of the experimental basins of Sumé (Paraíba)



Photo 3 - Paysage de «cerrado» en fin de saison sèche (état de Goiás)

Photo 3 - «Cerrado» landscape at the end of the dry season (state of Goiás)



Photo 2 - Dispositif expérimental de mesures d'un petit bassin défriché à Sumé (Paraíba)

Photo 2 - Experimental equipment of measurement on a micro basin clear of vegetation in Sumé (Paraíba)



Rapp. final ATP-PIREN, Rapp. multigr. ORSTOM, Recife, 25 p., annexes 56 p.

Molinier M., Leprun, J.C., Audry P., 1990 - Effet d'échelle observé sur le ruissellement dans le Nord-est brésilien. IV Séminaire informatique SEMINFOR 4, ORSTOM, Brest. In : «Le transfert d'échelle», ORSTOM éd., pp. 33-41.

Moura A.R.B., Menezes J.B., Liberaline Filho J., 1988 - Características das chuvas e correlações entre as perdas de solo e água em um Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico (Alfisol) na região do Médio-Oeste do Rio Grande do Norte. In : XXII Congr. bras. C. do Solo, Recife, resumos, p.246.

Mimer E., 1979 - Climatologia do Brasil. Recursos Naturais e Meio Ambiente, IBGE, Rio de Janeiro, 4, 421p.

Nunes Filho J., Souza A.R. de, Mafra R.C., Jacques O.F. de, 1987 - Efeito do preparo do solo sobre as perdas por erosão e produção de milho num Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico de Serra Talhada (PE). R. bras. Ci. Solo, 11 : 183-186.

Nunes Lopes O.M., Ego R.S., Kato O.H., Oliveira JR., R.C de Carvalho E.J.M., 1990 - Perdas de solo, água e nutrientes em dois sistemas de produção do Nordeste Paraense. EMBRAPA/SNLCSolos/CRNorte, Belém (PA); 8 p. non publié.

Sarrailh J.M., Bereau M., 1990 - Transformation de la forêt guyanaise par les écosystèmes simplifiés ECEREX. In : «Atelier sur l'aménagement et la conservation de l'écosystème forestier tropical humide. Etude de cas». MAB/UNESCO, Kourou, Guyane, pp. 23-25.

Seguy *et al*, 1984 - Técnicas de preparo do solo. Efeitos na fertilidade e na conservação do solo, nas ervas daninhas e na conservação de água. CNPAF/EMBRAPA, circ. téc. n° 17, 26 p.

Seguy L., Bouzinac S., Kluthcouski J., Moreira, J.A.A., Raissa M.M. de, Couto E.G., 1989 - Élaboration de systèmes de culture à base de riz pluvial et adaptées aux conditions agro-socio-économiques des régions du Brésil central. A paraître.

Sharma P.N., Silva A.D.S., 1987 - Native forest («caatinga») watershed management for runoff induced for irrigation. Forest Ecology and Management, 18: 73-84.

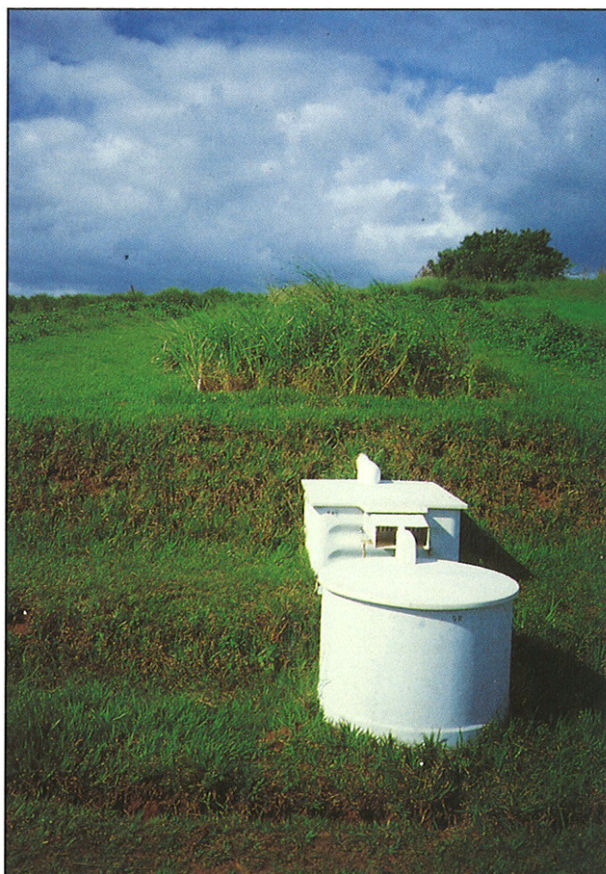
Photo 4 - Bassin A1 du dispositif expérimental de l'IPH à Forquetinho (Rio Grande do Sul)

Photo 4 - Experimental equipment of the IPH basin A1 in Forquetinho (Rio Grande do Sul)



Photo 5 - Parcelle expérimentale de pertes en terre et en eau à la station de Séropedica (SNLCS/EMPRAPA de Rio de Janeiro)

Photo 5 - Experimental plot of rainfall soil and water losses at the Séropedica station (Rio de Janeiro)



Silva A.P. da, Libardi P.L., Camargo O.A., 1986 - Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. R. bras. Ci. Solo, 10 : 91-95.

Silva I.G. da, Leprun J.C., Cadier E., 1986 - Primeiros resultados de perdas de solo e água no cultivo da palma forrageira (*Opuntia ficus indica* Mill) no Sertão da Paraíba. VI Congr. bras. e Enc. naç. Pesq. sobre Cons. do Solo. Campo Grande (MT), Anais, Fundação Cargill ed. pp 79-80.

Ramos A.D., Marinho, H.E., 1980 - Estudo da erodibilidade de um solo Litólico sem cobertura vegetal e sob duas condições de pastagem nativa de «caatinga». CNPCOT/EMBRAPA, Sobral (CE), Bol. de Pesquisa, n° 2 : 1-16.

Resck D.V.S., 1991 - Uso e ocupação do solo no Brasil Central. EMBRAPA/CPAC, Documentos n° 35, 29 p.

Toledo J.M., Navas J., 1986 - Land clearing and pastures in the Amazon. In : Lal R, Sanchez, P.A.; Cummings, R.W.; Balkema, A.A., eds. Land and development in the Tropics. Rotterdam, 4.951 p.

UNESCO, 1978 - World water balance and water resources of the earth. Studies and reports in hydrology 25, Paris, 663 p.

UNESCO, 1984 - Regulated River Basins: a review of hydrological aspects for operational managements working group on IHP-II. Project A22. Techn. Doc in hydrology, Paris, 122 p.

Valentin C., 1981 - Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques (Agadez-Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie de l'eau. Thèse 3^e cycle, Univ. paris VII, Etudes et Thèses, ORSTOM, 1985, 259 p.

Vanoni V.A., 1979 - Estudos de sedimentologia nos rios da Bacia Amazônica brasileira. Relatório técn. n° 49, PHLA (Projeto de hidrologia e climatologia da Amazônia), 50 p.

Wischmeier W.H., Smith D.D., 1960 - A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. In: Intern. Congr. Soil Sc. 7, Madison, v. 1 : 418-25.

Photo 6 - Microbassin aménagé cultivé par semis direct dans la région de Londrina (état du Parana)

Photo 6 - Managed and no-tillage cropped micro basin of the Londrina region (state of Parana)

