

Jean-Claude LEPRUN,
Clotario OLIVIER DA SILVEIRA

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

INTRODUCTION

Le Sahel africain et le sertão du Nordeste brésilien sont 2 régions semi-arides qui présentent de nombreuses analogies. Le climat, de type tropical contrasté, sec et chaud, y accuse d'importantes variations pluviométriques interannuelles et des sécheresses périodiques calamiteuses. Les formations géologiques dominantes, de même origine magmatique, ont un âge ancien égal. La végétation xérophyte arbustive ou arborée basse, plus ou moins continue, souvent épineuse, est adaptée à la sécheresse. Le réseau hydrographique est constitué de cours d'eau à écoulement temporaire violent de type oued. La pluviométrie, faible et extrêmement variable, ne permet pas aux cultures de plantes vivrières annuelles d'assurer une récolte suffisante et régulière. Dans les 2 cas, la population rurale, pauvre, est assujettie à une agriculture de subsistance de bas niveau technologique, à l'élevage extensif et aux exodes vers les villes. En dépit de tous ces points communs, les sols et les eaux de ces deux régions sèches accusent des différences telles qu'il convient d'en étudier le pourquoi et le comment, les causes et les conséquences.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Matériel

Le matériel utilisé pour cette comparaison provient des données pédologiques et hydrologiques accumulées au cours de dix années de prospection et de recherche dans la marge sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest et de celles obtenues par la Superintendance pour le développement du Nordeste (Sudene) et l'Entreprise brésilienne de recherches agropastorales (Embrapa), organismes brésiliens d'accueil de l'un des auteurs, depuis 1980. En particulier, pour le Sahel, il s'agit des données consignées dans les rapports de prospection et cartographie pédologiques au 1/500 000 du Burkina Faso (BOULET, 1968 ; BOULET et LEPRUN, 1970) et des études agrostologiques du Gourma malien (LEPRUN, 1978). Pour 7 États du Nordeste (Alagoas, Ceará, Bahia, Paraíba, Pernambouc, Rio Grande do Norte, Sergipe), les données sur les sols sont issues des travaux cartographiques, à des échelles variant du 1/500 000 au 1/1 000 000, réalisés entre 1971 et 1977 par le Service des sols de l'Embrapa, grâce

aux conventions avec divers organismes (ministère de l'Agriculture, United States Agency for International Development [Usaid], Sudene, etc.).

Les données hydrologiques et de qualité de l'eau du Nordeste ont été puisées dans divers rapports de la Division de l'hydrologie de la Sudene qui seront cités au moment voulu, des travaux d'une ATP Piren réalisée par une équipe de l'ORSTOM et divers chercheurs brésiliens (AUDRY *et al.*, 1987) et de rapports de synthèse (LEPRUN, 1981, 1983 et 1985). Celles du Sahel proviennent des travaux de l'ORSTOM au Sénégal et au Burkina Faso (COLLINET et LAFFORGUE, 1979) et en particulier de ceux du projet de la mare d'Oursi (CHEVALLIER, 1982).

Méthodes

Pour pouvoir comparer convenablement les sols et les eaux des 2 régions nous allons analyser, dans chacun des cas, les facteurs de pédogenèse et de l'hydrologie.

FACTEURS DE PÉDOGENÈSE

Situation géographique

La zone semi-aride de l'Afrique occidentale, intéressée par l'étude, se situe grosso modo entre 10° et 18° de latitude nord et entre 4° et 15° de longitude ouest. La zone semi-aride du Nordeste brésilien est comprise entre 3° et 15° de latitude sud et entre 34° et 45° de longitude ouest. Situées de part et d'autre de l'équateur, les 2 régions ont une même extension en longitude, mais le Nordeste sec est plus étendu en latitude. La continentalité des principales zones étudiées au Nordeste est bien moindre que celles du Sahel du Mali ou du Burkina Faso. Si environ 400 km séparent l'Océan du sertão de la Paraíba, il y a 1 200 km entre Dakar et le nord du Burkina Faso (fig. 1).

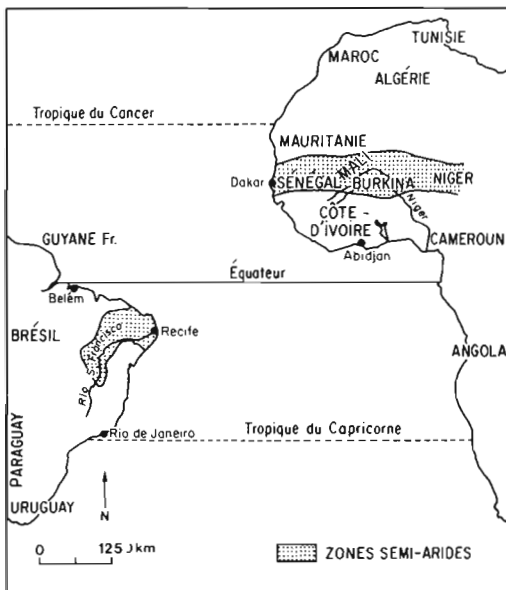


FIGURE 1 - Localisation des zones étudiées.

Climat

Les zones semi-arides traitées ici seront arbitrairement limitées par les isohyètes 200 et 600 mm.

Dans le Sahel, le régime des précipitations est soumis à la rencontre de 2 masses d'air - l'une continentale sèche, l'autre maritime humide -, qui détermine le front inter-tropical (FIT). Le FIT, par son déplacement vers le nord entre janvier et juillet, détermine le début de la saison des pluies ; ces dernières tombent exclusivement durant la saison chaude. La saison des pluies - courte, de un à trois mois, et estivale - et la saison sèche présentent une alternance stricte. Les variations de la pluviosité sont importantes et la température moyenne annuelle se maintient entre 27,5 et 30 °C.

La zone semi-aride du sertão présente 2 régimes pluviaux différents, celui des régions Nord et Centre - qui dépend, comme dans le cas du Sahel, du déplacement du FIT - et celui de la région Sud, influencé par des fronts froids en provenance du sud. Ces 2 régimes déterminent des dates différentes de saisons des pluies ; la première, au nord, se situe principalement en mars alors que la seconde, au sud, se concentre en novembre, décembre et/ou janvier. Les coefficients de variation de la pluviométrie, plus élevés que ceux du Sahel, atteignent 50 % et figurent parmi les plus importants connus au monde (NIMER, 1979). En revanche, l'alternance des 2 saisons, sèche et humide, n'est pas stricte et, à l'examen de 10 années consécutives de relevés, on remarque qu'il peut pleuvoir à n'importe quel moment de l'année. Pour des stations comparables des 2 zones et pour les mêmes périodes de retour, les valeurs d'intensité-durée des pluies conduisent à des déterminations d'érosivité des pluies sahéliennes qui, selon le concept de WISCHMEIER et SMITH (1958), sont bien supérieures à celles du sertão (LEPRUN, 1985) (tabl. I). L'insolation moyenne, tout en étant élevée - elle se situe entre 2 000 et 2 500 h.an⁻¹ -, demeure cependant inférieure à celle de l'Afrique, qui

Tableau I - Pluviométrie et valeurs du facteur d'érosivité des pluies pour des stations comparables du Sahel et du sertão.

STATIONS	PLUVIOMÉTRIE MOYENNE ANNUELLE (mm)	R É.-U.	NOMBRE de PLUIES ÉROSIVES ANNUELLES
Taperoá (NE)	515	168	16
Lages (NE)	500	160	15
Dori (B. F)	510	260	13
Ouricouri (NE)	607	185	17
Ouahigoya (B. F)	600	301	16
Pau de Ferros (NE)	751	266	29
Mogtedo (B. F)	753	378	20

NE : Nord-est brésilien ; B. F : Burkina Faso

Sources : Burkina Faso : ROOSE, 1977 ; Nordeste : Banque de données DHM/Sudene, Conventions Sudene/ORSTOM et Sudene/UFPB/CCA Areia.

dépasse généralement 2 500 h.an⁻¹ pour atteindre quelquefois 3 000 h.an⁻¹. L'observation des images satellitaires de saison sèche laisse apparaître des nébulosités de plus de 50 % alors que dans le Sahel les mois secs sont souvent peu nuageux. Les moyennes thermiques annuelles oscillent entre 23 et 27°C avec une amplitude journalière moyenne assez constante de 10°C. De ce fait, l'humidité de l'air et l'évaporation sont moins élevées que dans le Sahel. Les vents sont peu puissants et continus contrairement à ce qui se passe dans le Sahel : la vitesse de 8 m.s⁻¹ n'est atteinte que 20 j.an⁻¹ dans un couloir entre Natal et le Rio São Francisco ; partout ailleurs, la moyenne annuelle est inférieure à 5 j.an⁻¹ (PIOGER, 1964 ; MENDES, 1986). Au Sahel, et en particulier dans sa zone septentrionale, le vent souffle de 7 à 14 m.s⁻¹, pendant 20 à 30 j.an⁻¹, et à 5-6 m.s⁻¹, environ 10 j.an⁻¹.

Le tableau II regroupe les valeurs moyennes de quelques paramètres climatiques relevés pendant la même période, 1931-1960, pour les stations de Quixeramobim (Ceará), Matam (Sénégal) et Dori (Burkina Faso).

Tous les éléments qui précèdent conduisent à considérer le climat du sertão comme plus clément, moins altérant et moins agressif que celui du Sahel.

Tableau II - Valeurs moyennes annuelles de quelques paramètres climatiques de stations comparables des deux régions

	STATIONS	MOYENNE	MAXIMA	MINIMA
Température en °C	Quixeramobim	24,7	25,8	23,4
	Matam	37,0	42,6	33,0
	Dori	36,4	41,4	32,0
Humidité air en %	Quixeramobim	59,4	73,2	50,8
	Matam	47,0	71,0	26,0
	Dori	45,0	77,0	22,0
Évaporation en mm			MAXIMA MENSUELS	
	Quixeramobim	1 764,2	198,8	
	Matam	3 291,4	444,8	
	Dori	3 817,6	460,6	

Période : 1931-1960. Sources : LEPRUN, 1986.

(Cette période est considérée comme relativement «humide» en Afrique de l'Ouest).

Histoire géologique et roches

La partie sahélienne de l'Afrique de l'Ouest étudiée ici comprend une portion de la vieille plate-forme cristalline, ou socle précambrien, et 2 des principaux bassins sédimentaires, celui de Taoudéni, d'âge primaire, et le bassin sénégal-mauritanien, d'âge secondaire et tertiaire. Les formations du continental terminal, mises en place à la fin du Tertiaire, recouvrent en partie les formations plus anciennes.

L'absence du socle, entre le 15° et le 20° degré de latitude nord, empêche l'observation de sols développés sur roches cristallines au-dessus de l'isoyète 500 mm, ce qui

n'est pas le cas pour le Nordeste brésilien. Sur le socle, les roches les plus fréquentes sont les migmatites, les granites et les roches basiques ; sur les formations sédimentaires, ce sont les grès et les grès argileux. Pour plus de la moitié de sa surface, le Nordeste sec est constitué par les mêmes roches cristallines issues du socle précambrien unique lorsque les deux continents se trouvaient encore réunis. Les bassins sédimentaires ourlent les parties littorale et occidentale du socle qui occupe toute la partie centrale de la région. Outre les grès, les roches sédimentaires comprennent une portion non négligeable de calcaires et de schistes.

Si les roches sont très semblables, voire identiques, comme nous venons de le voir, l'histoire géologique postjurassique, après la séparation des deux continents, est différente. Alors que le socle africain, qui semble être demeuré très stable durant tout son passé, a permis la formation d'un épais manteau d'altération météorique lequel peut atteindre, par endroit dans le Sahel, plusieurs centaines de mètres, tous les spécialistes s'accordent pour constater que depuis la fin du Précambrien le bouclier oriental brésilien n'a cessé de s'élever épirogénétiquement. De ce fait, le socle affleure fréquemment et les altérations sont très peu épaisses.

Végétation

Selon les données de la *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) (1975), seulement 5,3 % de la superficie de 3 des pays du Sahel (Sénégal, Mali et Burkina Faso) possèdent une couverture arborée et arbustive contre plus de 90 % pour la zone semi-aride de 3 des États du Nordeste (Pernambouc, Paraíba et Alagoas) (DUQUE, 1980).

Alors que la *caatinga* brésilienne est une véritable forêt basse et sèche, continue et souvent dense, de 2 à 5 m de hauteur, à strate graminéenne rare et à espèces ligneuses à dominante de légumineuses, la savane arborée et arbustive ouverte et les brousses tigrées contractées du Sahel sont constituées en grande partie d'une strate herbacée qui sèche rapidement après la saison des pluies. Très différentes, les densités de ligneux et les biomasses sont respectivement de plus de 17 000 individus.ha⁻¹ et de 23 t.ha⁻¹ dans la *caatinga* (HAYASHI, 1981) alors que ces chiffres tombent à 133 individus.ha⁻¹ et 1,8 t.ha⁻¹ au Sénégal (LAMOTTE et BOURLIERE, 1978), pour des pluviométries comparables.

Milieu humain

Essentiellement rurales, les 2 régions ont une même densité moyenne de 16 habitants au kilomètre carré, mais les facteurs socio-économiques et les pratiques culturelles y sont bien différents. En Afrique sèche, l'agriculture, extensive, manuelle, est menée de façon traditionnelle. Les villages de culture se déplacent après quelques années et laissent derrière eux les terrains en jachère. Le brûlis annuel avant culture et la monoculture sont généralisés. L'élevage transhumant est en particulier pratiqué par des pasteurs peul.

Dans le sertão, la population est métissée de portugais et d'indiens. L'agriculture et l'élevage, qui ne sont pas itinérants, se complètent au sein de propriétés délimitées et interdites d'accès. Les pratiques culturelles les plus communes sont le labour à la main, ou à la traction animale légère, selon la ligne de plus grande pente, et les cultures associées (haricot, maïs et coton, par exemple). La pratique du brûlis, rare, n'est pas annuelle. Contrairement à l'Afrique, l'usage du charbon de bois n'est pas généralisé dans le Nordeste brésilien, bien qu'il y soit produit artisanalement car le gaz est distribué jusque dans les endroits les plus éloignés.

Au niveau agricole, comme au niveau de la géologie, l'histoire des 2 régions est très différente ; les premières cultures, notamment celle de la canne à sucre sur la côte du

Nordeste brésilien, ont commencé il y a 400 ans. Dans la zone semi-aride, elles sont apparues bien plus tard. Dans le Sahel en revanche, les activités humaines, agricoles et pastorales, ont près de 4 000 ans ; la pratique du défrichement par le feu et la métallurgie artisanale datent de plus de 2 000 ans. En Afrique occidentale sèche, 1 fosse pédologique sur 3 contient des charbons de bois et des débris de poteries ; cela n'arrive pratiquement jamais dans le sertão.

FACTEURS DE L'HYDRODYNAMIQUE ET DE L'HYDROGÉOCHIMIE

Eaux de pluie

Alors que les valeurs d'intensité-durée des pluies pour les mêmes pluviométries sont proches dans les 2 régions, les très fortes pluies annuelles et les pluies exceptionnelles du Sahel fournissent des valeurs bien plus élevées que celles de leurs homologues brésiliennes. De fait, les pluies du Sahel sont plus agressives que celles du sertão (LEPRUN, 1981). Le rapport du facteur de l'érosivité des pluies de WISCHMEIER et SMITH (1958) sur la pluviométrie moyenne annuelle, qui varie de 0,20 à 0,50 avec une moyenne de 0,33 au Brésil, se situe autour de 0,50 en Afrique sèche (ROOSE, 1977). Comme les sols africains sont bien moins perméables, nous le verrons plus loin, que ceux du Nordeste, les eaux de pluies sahéennes, pour des intensités-durées semblables, ont tendance à ruisseler alors que celles du Nordeste s'infiltrent.

Eaux de ruissellement

Les taux de ruissellement des eaux de pluie sont considérablement plus élevés dans les zones sahéennes que dans le sertão. Dans cette zone, les études de la Sudene (CADIER *et al.*, 1982 ; CADIER et CAMPELLO, 1983 ; LEPRUN, 1983 ; VIERA *et al.*, 1983) ont mis en évidence des coefficients d'écoulement moyens inférieurs à 5 % de la pluviométrie, y compris pour des bassins à modelé accentué. Dans le Sahel, les données recueillies par les hydrologues de l'ORSTOM et, en particulier, celles de CHEVALLIER (1982) à Oursi sous une pluviométrie moyenne annuelle de 450 mm, indiquent des taux de ruissellement, en moyenne supérieurs à 25 %, qui peuvent atteindre 60 % pour des pentes de 1 à 3 % au maximum, donc bien plus forts que ceux du sertão (LEPRUN, 1986).

Charges solides et sédiments

Pour des sols et des pentes semblables ou proches, si un examen de l'ensemble des données obtenues sur parcelles, nues ou cultivées, d'une superficie unitaire de l'ordre de la centaine de mètres carrés, ne fournit pas de différences fondamentales des masses érodées et entraînées, en revanche les petits bassins sahéens sous végétation naturelle perdent plus de terre par érosion que leurs homologues nordestins. Quelques exemples sont cités par LEPRUN (1986).

Retenues d'eau superficielle

Ces retenues intéressent surtout la région Nordeste, car les réservoirs artificiels ou naturels sont rares dans les régions sahéennes étudiées. Les réservoirs du sertão - açudes ou barrages -, sont des retenues collinaires aménagées dans des dépressions et des vallées du modelé des zones de roches cristallines dont les fissures sont colmatées par le matériel fin sédimenté mais où persiste néanmoins, dans de nombreux cas, une certaine infiltration. Le barrage qui ferme un resserrement naturel de la vallée est généralement réalisé en terre compactée retirée des alluvions et altérations du lit ou des

berges. La roche saine est donc atteinte et l'eau qui s'accumule provient non seulement du ruissellement superficiel mais aussi de l'écoulement hypodermique des sols du bassin. On distingue 2 types d'açudes selon qu'ils sont publics ou privés. Si les premiers sont généralement de grande taille (plus de 100 millions de mètres cubes), les seconds, le plus souvent de l'ordre de 100 000 m³, peuvent n'atteindre que 20 000 m³. Au total, il en existe plusieurs milliers ; dans certaines régions leur densité dépasse 1 par 2 km² et leur nombre ne cesse de croître. En 1960, le DNOCS avait construit 987 açudes publics ou en coopération qui représentaient un volume stocké de 16 milliards et demi de mètres cubes d'eau. Aujourd'hui, ces chiffres sont probablement à multiplier par 3.

Fleuves et rivières

Les 2 régions possèdent chacune un réseau hydrographique constitué de 2 grands fleuves pérennes (Rio São Francisco et Rio Parnaíba au Brésil, Sénégal et Niger en Afrique de l'Ouest) qui reçoivent des tributaires à écoulement temporaire. Plus long fleuve à régime temporaire du monde, le Rio Jaguariba, qui coule dans l'État du Ceará, possède un bassin de 74 000 km². De nombreux *riachos* et marigots ont des écoulements violents et brefs, de type oued ; quelquefois, ils ne coulent qu'à 1 ou 2 occasions par an et il arrive que leur écoulement se produise seulement sur une partie du cours. Dans le Nordeste, le chevelu hydrographique est plus dense que dans le Sahel. Les raisons principales en sont les conditions édaphiques :

- d'une part, en Afrique, présence d'une couverture sédimentaire généralement perméable et gréseuse, de sables dunaires fixés et d'un manteau épais d'altérations ;
- d'autre part, dans le Nordeste : sols peu épais sur cristallin.

Les zones endoréiques, qui se localisent dans la boucle du Niger et le Nord du Burkina Faso, ne sont pas présentes dans le sertão.

Nappes profondes

Les roches du socle oriental brésilien ne possèdent pas de nappes profondes importantes, d'où la nécessité et la profusion des açudes. Seules, quelques zones de failles et de diaclases denses localisées fournissent des nappes d'importance réduite. Dans le Sahel, les formations sédimentaires constituent des roches magasins pour des nappes phréatiques de grande capacité comme dans le Gourma malien (REICHEL, 1960). Les altérations profondes du socle occidental africain (LEPRUN, 1979 ; PION, 1979 ; BLOT, 1980) ne fournissent que des nappes perchées de volume réduit.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Principaux sols et leurs caractéristiques

PRINCIPALES CLASSES DE SOLS DU SAHEL

La carte des sols, au 1/500 000, de *l'Atlas international de l'Ouest africain* (BOULET *et al.*, 1971) permet une visualisation rapide des grandes classes de sols réparties sous climat sahélien. Du nord vers le sud à la verticale du méridien international, on passe successivement :

- à un premier groupe constitué de sols minéraux bruts d'apport et d'ablation sur sables dunaires ou sur regs (lithosols), de sols peu évolués ou peu différenciés d'éro-

sion ou d'apport sur les mêmes matériaux et aussi sur cuirasses et carapaces ferrugineuses plus ou moins démantelées et de sols bruns subarides ;

- à un groupement de sols peu évolués et de lithosols associés à des sols ferrugineux tropicaux peu ou non lessivés de solonetz solodisés ou non et de sols bruns eutrophes ;

- à des sols ferrugineux tropicaux lessivés, des vertisols, des sols bruns eutrophes vertiques ou non et des sols hydromorphes minéraux.

La pédogenèse développée sur les sables dunaires et sur le socle suit donc un certain gradient latitudinal climatique, et les sols deviennent de plus en plus différenciés et évolués du nord vers le sud. La succession de différenciation la plus nette concerne les sols ferrugineux et les sols bruns. On peut donc parler d'une certaine zonalité de la répartition des sols. Sur l'épais manteau d'altération kaolinique, hérité de périodes anciennes plus humides, la pédogenèse, oblitérée par la marque de cet héritage, ne parvient pas à se différencier en fonction de la pluviométrie.

LES PRINCIPALES CLASSES DE SOLS DU NORDESTE

Établie par le SNLCS de l'Embrapa en 1981, la carte des sols, au 1/5 000 000, du Brésil fournit la composition et la répartition des grandes classes de sols du Nordeste sec. Du nord vers le sud, de part et d'autre du 40^e méridien ouest, on trouve, sans aucun gradient latitudinal de succession, la juxtaposition des classes suivantes de sol :

- sur les roches du socle, des planosols, des sols bruns eutrophes non calciques vertiques ou non, des lithosols et régosols, des sols podzoliques rouges et jaunes distrophes et eutrophes, des sables quartzeux, des brunizens, des vertisols lithomorphes, des solonetz solodisés, des cambisols ;

- sur les roches sédimentaires et sur les couvertures sableuses détritiques, des sols sableux quartzeux, des latosols jaunes et rouges jaunes distrophes et aluminiques, des sols hydromorphes minéraux ;

- sur les calcaires des rendzines, des cambisols et des latosols rouges sombres.

À ce niveau des interprétations, une mise au point, qui concerne les sols de la classification brésilienne actuellement en cours d'élaboration (CAMARGO *et al.*, 1987) devient nécessaire. En effet, lorsque l'on parcourt les noms des classes des sols brésiliens, on observe que certains sont identiques ou très proches de ceux de la classification française : il s'agit des sols bruns eutrophes, des vertisols et des solonetz. Ces sols des deux régions sont tout à fait comparables entre eux. Par ailleurs, d'autres ont des noms et des morphologies qui permettent de les rapprocher ; c'est le cas, par exemple, des latosols qui s'apparentent aux sols ferrallitiques africains. C'est également le cas avec les planosols ou les régosols et les lithosols, à la différence près que ces derniers, au Brésil, sont des sols peu évolués, développés à partir des roches désagrégées, et non des cuirasses et carapaces ferrugineuses, comme c'est le cas en Afrique. Certains, en revanche, ont des noms, des morphologies et des pédogenèses suffisamment différents pour empêcher tout rapprochement. En particulier, il s'agit des sols podzoliques qui n'ont rien de commun avec les sols du même nom dans la classification française et qui, en outre, sont absents de la zone semi-aride occidentale africaine ; de même, les sols ferrugineux n'ont-ils pratiquement jamais été reconnus dans le Nordeste. C'est également le cas des brunizens et des cambisols, issus de la classification américaine, qui n'ont pas d'homologues sahéliens.

Dans l'ordre décroissant des superficies couvertes par les diverses classes de sols du Nordeste, on trouve successivement les latosols (34 %), les sols podzoliques eutrophes

(11,7 %), les sols lithologiques (11,3 %), les sols sableux quartzeux (11,1 %), les sols bruns non calciques (6,5 %), les sols podzoliques dystrophes (4,8 %), les planosols (4,1 %), les cambisols (3,2 %), les solonetz (1,1 %), les vertisols (0,2 %) etc. Si l'on considère seulement la région semi-aride, cet ordre devient le suivant : latosols, sols lithologiques, sols bruns non calciques, sols podzoliques eutrophes, planosols, cambisols, etc.

LES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS

Les déterminations analytiques de 2 classes de sols semblables, développées sur les roches du même socle précambrien, seront juxtaposées de manière à pouvoir comparer les caractéristiques physico-chimiques des sols des 2 régions. Il s'agit des sols bruns vertiques (sols bruns eutrophes tropicaux vertiques de l'Afrique de l'Ouest et sols bruns non calciques vertiques du Nordeste brésilien) et des vertisols lithomorphes. Les déterminations concernant les sols bruns sont présentées dans le tableau III.

L'examen de ce tableau met en évidence l'analogie des 2 sols et confirme la validité du taxon. Il vérifie la plus grande richesse chimique des sols bruns du Nordeste. Les taux de matière organique de ces sols sont plus de 2 fois supérieurs ; les teneurs en potassium et la somme des cations échangeables de l'horizon A sont plus élevées que celles de leurs homologues africains, et ce, pour des taux d'argiles inférieurs. Les mêmes constatations peuvent être faites pour l'horizon B, à l'exception du taux de potassium et de la capacité d'échange liée au taux d'argile plus faible.

Les moyennes des déterminations relatives à l'horizon A des vertisols lithomorphes sont consignées dans le tableau IV. On vérifie que la totalité des caractéristiques chimiques de l'horizon supérieur des vertisols nordestins est plus favorable que celle des vertisols sahéliens. Les taux de matière organique, d'azote, de potassium, la somme des cations et la capacité d'échange, sont plus élevés, le taux de saturation et le pH restant du même ordre.

Si l'on compare les résultats analytiques de 2 sols bruns vertiques de texture semblable mais d'épaisseur différente (tabl. V), le premier, prélevé à Oursi, au Burkina Faso (pluviométrie annuelle de 450 mm, roche mère : migmatites et ortho-gneiss) (LEPRUN, 1979), le second, prélevé à Sumé, dans la Paraíba (pluviométrie annuelle de 550 mm, sur migmatites), on observe que la richesse chimique du sol brun de Sumé est bien plus élevée que celle du sol d'Oursi. Les teneurs en matière organique, en calcium, en cations échangeables (Ca+Mg+K+Na), le taux de saturation et la capacité d'échange du sol du sertão sont supérieurs à ceux du sol sahélien. L'indice de stabilité structurale I_s de Hénin et le test de perméabilité K fournissent des informations intéressantes sur les qualités physiques des 2 sols en présence. En fonction des normes établies à partir des données de nombreux sols, les valeurs de $\log 10I_s$ et de $\log 10K$ attribuent au sol de Sumé une bonne structure et une bonne perméabilité, tandis que le sol d'Oursi se caractérise par une mauvaise stabilité structurale et une perméabilité médiocre à mauvaise. Les effets de ces différences de qualités physiques sur le comportement hydrodynamique seront analysés plus loin.

Dans le tableau VI, ont été relevées les moyennes des principaux paramètres analytiques d'un grand nombre de sols (plus de 300) qui appartiennent aux principales classes de sols du Nordeste et qui vont des épais latosols kaoliniques aux sols montmorillonitiques peu épais.

L'examen de ce tableau permet de mettre en évidence, une fois encore, la bonne fertilité chimique moyenne de l'ensemble des sols du Nordeste brésilien. Un même

Tableau III - Valeurs de quelques paramètres physicochimiques des sols bruns vertiques des deux régions étudiées

		HORIZON A		HORIZON B	
		Nordeste (N = 48)	Sahel (N = 23)	Nordeste (N = 46)	Sahel (N = 23)
Argile %	Maxima	50,0	37,3	69,0	43,0
	Minima	7,0	16,8	21,7	15,0
	Moyenne	19,5	27,3	35,3	40,9
Matière organique (%)	Maxima	5,8	1,3		
	Minima	0,3	0,7		
	Moyenne	2,1	1,0		
C/N	Maxima	14,3	12,4		
	Minima	9,4	10,6		
	Moyenne	11,2	9,8		
K20 (mé)	Maxima	1,38	0,53	0,23	1,22
	Minima	0,09	0,16	0,09	0,02
	Moyenne	0,42	0,31	0,15	0,18
S (mé)	Maxima	19,3	25,7	25,9	32,4
	Minima	10,0	1,7	11,8	4,0
	Moyenne	13,8	10,5	22,4	19,1
T (mé)	Maxima	19,8	25,7	24,5	33,6
	Minima	11,4	3,5	12,7	6,8
	Moyenne	14,6	12,4	19,4	21,1
S/T (%)	Maxima	98,2	100	100	100
	Minima	85,5	49,0	89,2	51,9
	Moyenne	92,7	83,2	96,2	89,3
pH	Maxima	7,8	8,1	8,6	8,4
	Minima	6,6	5,0	6,6	5,0
	Moyenne	7,2	6,4	7,6	6,4

Sources : données sahéniennes : BOULET, 1968 ; BOULET et LEPRUN, 1970 ; données brésiliennes : Brasil, 1971, 1972, 1973 et Embrapa/SNLCS, rapports pédologiques de 7 États du Nord-Est (1971, 1972, 1973, 1975, 1976, 1977).

examen des sols sahéniens à partir de l'ensemble des rapports pédologiques établis par l'ORSTOM dans cette zone fournit des fourchettes de valeurs dont la moyenne estimée n'est, pour ce qui concerne les taux de matière organique et la somme des cations échangeables que de la moitié environ de ceux du tableau VI.

Tableau IV - Valeurs de quelques paramètres physicochimiques de l'horizon A des vertisols des deux régions étudiées

		NORDESTE (N = 10)	SAHEL (N = 11)
Argile (%)	Maxima	68,0	50,8
	Minima	30,9	15,9
	Moyenne	45,6	30,7
Matière organique (%)	Maxima	9,90	1,63
	Minima	0,88	0,58
	Moyenne	3,27	1,23
N (%)	Maxima	0,36	0,30
	Minima	0,08	0,05
	Moyenne	0,19	0,10
C/N	Maxima	11,0	15,7
	Minima	8,0	11,7
	Moyenne	9,7	13,2
K ₂₀ (mé)	Maxima	1,80	0,35
	Minima	0,15	0,09
	Moyenne	0,68	0,17
S (mé)	Maxima	52,6	33,9
	Minima	18,2	7,1
	Moyenne	33,7	17,2
T (mé)	Maxima	47,0	32,5
	Minima	19,0	9,0
	Moyenne	35,0	17,8
S/T (%)	Maxima	100,0	100,0
	Minima	37,0	78,0
	Moyenne	90,0	91,0
pH	Maxima	8,4	8,8
	Minima	6,6	6,8
	Moyenne	7,3	7,3

Sources : les mêmes que pour le tableau III.

Les données du tableau VII, issues d'un travail antérieur (LEPRUN, 1986) permettent de comparer quelques caractéristiques moyennes des horizons supérieurs des sols des 2 régions et de confirmer la meilleure fertilité chimique et la meilleure qualité physique des sols du Nordeste semi-aride.

Tableau V - Comparaison des caractéristiques analytiques de l'horizon A des sols bruns vertiques de Oursi (Burkina Faso) et de Sumé (Paraíba)

	SUMÉ (Paraíba)	OURSÍ (Burkina)
Argile (%)	32,0	33,5
Sables grossiers (%)	21,0	18,8
Matière organique (%)	4,6	0,7
Carbone (%)	2,77	0,40
Azote (%)	0,23	0,24
C/N	12,0	15,9
pH eau	6,7	7,7
Ca (mé)	18,54	10,0
Na (mé)	0,49	0,69
S (mé)	29,21	18,06
T (mé)	31,99	18,24
S/T (%)	91	99
log 10 Is	1,30	1,65
log 10 K	1,47	1,17
Profondeur du sol (cm)	70	190
Profondeur de l'horizon A (cm)	10	22

Sources : Oursi : LEPRUN (1977), SUMÉ : LEPRUN in CADIER et al. (1982).

Tableau VI - Moyennes des paramètres analytiques de sols sous *caatinga*

	HORIZON A (N = de 403 à 485)		HORIZON B (N = de 299 à 345)	
	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type
Épaisseur (cm)	16,5	9,5	37,1	23,5
pH eau	6,0	0,9	5,8	1,1
Carbone (%)	1,05	1,5	0,34	0,20
Azote (%)	0,15	0,9	0,05	0,02
C/N	9,6	2,0	6,7	2,1
Matière organique (%)	1,8	-	-	-
Ca (mé)	5,6	7,1	5,1	5,2
Mg (mé)	2,0	2,4	4,2	4,1
K (mé)	0,4	0,5	0,2	0,2
Na (mé)	0,1	0,3	0,5	1,3
S (mé)	7,3	8,8	9,0	8,6
T (mé)	9,2	8,5	10,7	8,4
S/T (%)	67,2	26,2	70,0	28,1
Phosphore assimilable	7,1	12,8	2,3	5,2

Sources : ensemble des rapports des cartes pédologiques établis par le SNLCS de l'Embrapa dans les 7 États du Nordeste brésilien.

Tableau VII - Quelques caractéristiques moyennes des horizons supérieurs des sols du Nordeste brésilien et du Sahel occidental africain

Granulométrie	NORDESTE	SAHEL
	Argilo-sableux	Sablo-argileux
Matière organique (%)	0,5 - 4,0 (2,0)*	0,3 - 1,5 (0,7)*
Calcium échangeable (mé/100 g)	5,0 - 10,0	0,5 - 2,0
Perméabilité (mm.h ⁻¹)	élevée 50 - 400	faible 15 - 25
Structure	fragmentaire	massive
État de surface	non pelliculaire	pelliculaire

* le chiffre entre parenthèses indique la valeur la plus communément rencontrée.

CARACTÈRES HYDRODYNAMIQUES COMPARÉS DES SOLS

Il a été montré plus haut que la moyenne des coefficients de ruissellement des bassins versants du Nordeste semi-aride atteint à peine 5 % de la pluviométrie, alors que ceux du Sahel dépassent le plus souvent 25 %. Les données de perméabilité et de taux d'infiltration des sols des 2 régions sont peu nombreuses ; aussi est-il intéressant de comparer les résultats des mesures obtenues sous pluies simulées à l'aide du même appareil, l'infiltromètre à aspersion conçu par l'ORSTOM (ASSELINE et VALENTIN, 1978 ; CASNAVE, 1982 ; CHEVALLIER, 1982) sur sols bruns vertiques, de part et d'autre de l'Atlantique. Les 2 stations semi-arides choisies sont celles de Sumé (Parafiba) et d'Oursi (Burkina Faso) dont les analyses (tabl. V) ont montré l'analogie des sols. Les résultats des pluies simulées d'Oursi sont tirés du travail de CHEVALLIER (1982) ; ceux de Sumé proviennent du rapport d'ATP CNRS (AUDRY *et al.*, 1987), dont les études ne sont pas encore terminées.

Ces résultats ont été regroupés dans le tableau VIII.

Pour des conditions expérimentales très semblables, on vérifie que la hauteur des pluies d'imbibition, qui représente la hauteur d'eau qui s'infiltré avant le premier ruissellement, sur sol nu et sous végétation, est considérablement plus élevée à Sumé (environ 8 fois plus). Alors que le taux de ruissellement, sur sol sec en fin de saison sèche, après la première pluie, est toujours nul à Sumé, il avoisine 30 % à Oursi, aussi bien sur parcelle nue que sous couvert végétal. À Sumé, sur une jachère de cinq ans, il a fallu appliquer 203 mm en deux jours, avec une intensité de 63 mm.h⁻¹, pour obtenir un ruissellement de 2 mm à peine tandis qu'à Oursi, avec la même intensité, une seule pluie de 40 mm a provoqué un ruissellement de 13 mm.

Ces chiffres prouvent les différences fondamentales de qualités physiques de surface des 2 sols bruns et sont précieux pour comprendre le processus de la minéralisation différente des eaux superficielles des deux régions sèches.

Tableau VIII - Résultats des ruissellements et infiltrations sous pluies simulées

	OURSİ	SUMÉ
<i>Conditions expérimentales</i>		
Pente (%)	1 à 1,5	2 à 4
Pluie de récurrence annuelle (mm)	40	48
Intensité moyenne de la pluie (mm.h ⁻¹)	60	48
<i>Résultats</i>		
Parcelle 1 m ² nue		
Pluie d'imbibition (mm)	6,2 à 8,4	> 48*
Taux de ruissellement efficace (%) après la première pluie	30,0 à 32,0	0
Parcelle 1 m ² sous végétation		
Pluie d'imbibition (mm)	11	96
Taux d'infiltration efficace (%) après une pluie de 1 h à 60 mm. h ⁻¹	29,9	0

* pluie dont les intensités successives sont : 10 min à 45 mm.h⁻¹, 5 min à 110 mm.h⁻¹, 15 min à 60 mm.h⁻¹, 15 min à 40 mm.h⁻¹, 15 min à 25 mm.h⁻¹.

Tableau IX - Compositions des différentes eaux des deux régions

	pH	Ca	Mg	K	Na	Cl	S04	CO3H
	<-----mg.l ⁻¹ ----->							
<i>Les eaux de ruissellement superficiel</i>								
Sahélo-soudanien (N = 10) *	7,0	4,2	1,2	0,7	1,8	0,5	ND	24,8
Sertão (N = 6)**	7,1	6,2	1,5	4,3	0,7	1,2	2,5	24,4
<i>Les eaux des rivières</i>								
Sahélo-soudanien (N = 29) *	7,4	7,3	3,9	2,2	3,1	1,4	ND	50,5
Sertão (N = 27) **	7,2	23,8	19,2	5,5	79,7	157,5	8,9	81,3
<i>Eaux de réservoirs</i>								
Açudes du sertão (N = 364) **	7,7	25,9	12,7	9,6	53,7	80,9	7,1	117,9
<i>Eaux des nappes profondes</i>								
Afrique sahélienne (N = 11) ***	6,9	19,7	13,7	8,3	20,5	13,1	10,7	75,0
Sahélo-soudanien (N = 101) *	6,8	7,3	3,9	2,2	3,1	1,4	ND	50,5
Sertão (N = 32) **	7,6	79,0	41,8	9,2	103,0	96,6	37,3	270,0

Sources : * BLOT (1970 et 1980) ; ** LEPRUN (1983) ; *** LEPRUN (1979).

Tableau X- Variations de la composition des eaux en fonction de la percolation à Sumé (sertão de la Paraíba)

	pH	Ca	Mg	K	Na	CL	SO4	CO3H
		<-----mg.l ⁻¹ ----->						
pluie	7,3	1,1	0,3	0,8	0,5	2,0	0,0	3,0
pluie sous caatinga	8,3	3,2	0,8	0,7	1,3	3,0	4,3	11,0
ruissellement bassin	7,1	6,4	0,5	3,0	0,8	2,2	0,0	24,4
ruissellement nu	7,8	15,2	12,1	5,0	1,7	20,0	0,5	81,0
açude saison humide	7,0	20,8	16,0	6,6	37,0	60,0	8,6	144,0
açude saison sèche	7,5	19,2	28,2	9,2	75,0	120,0	10,7	202,5
puits profond	7,5	104,0	72,9	7,6	96,0	180,0	69,5	531,9

Eaux et caractéristiques des eaux

CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DE PLUIE

Une analyse des rares données sur les caractères physico-chimiques des eaux de pluie des 2 régions indique :

- des minéralisations assez différentes pour diverses localisations du sertão. Ainsi, la moyenne des analyses fournit les valeurs suivantes :

* à Sumé dans le sertão de la Paraíba, pour 8 pluies :

- Ca = 1,70 ; Mg = 0,46 ; K = 0,64 ; Na = 0,93 ; Cl = 2,65 ; SO₄ = 2,67 mg.l⁻¹ (LEPRUN, *inédit*),

* à Pérolina dans le sertão du Pernambouc, pour 12 eaux de pluie :

- Ca = 0,15 ; Mg = 0,11 ; K = 0,02 ; Na = 0,02 ; Cl = 0,09 ; SO₄ = 0,04 mg.l⁻¹ (FOTIUS *et al.*, *inédit*) ;

- en Afrique, une moyenne de :

- Ca = 1,24 ; Mg = 0,18 ; K = 0,14 ; Na = 0,32 ; Cl = 0,40 ; SO₄ = 1,55 mb.l⁻¹ (TARDY, 1969 ; ROOSE, 1980 ; etc.).

La raison de la différence des compositions des eaux de pluies du sertão pourrait être la continentalité différente des zones de prélèvement des études des teneurs en éléments majeurs des pluies nordestines (BUAT-MENARD *et al.*, 1974) qui montre une influence des aérosols marins et la décroissance graduelle de ces teneurs du littoral vers l'intérieur.

Faute de plus d'informations, la composition des eaux de pluies des 2 régions sera considérée comme identique.

CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DES 2 RÉGIONS

Les compositions successives des eaux des 2 régions depuis l'arrivée au sol des eaux de pluies, leur premier ruissellement superficiel, leur écoulement dans les

rivières, leur stockage dans les réservoirs et leur infiltration et accumulation dans les nappes profondes des roches, sont consignées dans le tableau XI.

Tableau XI - Quelques caractéristiques des eaux de ruisseaux à écoulement temporaire d'une même région à sols différents dans le sertão de l'État de Sergipe

N° de l'échantillon	Classe de sol dominant	pH	Cond. (*)	Na	K <-----mg.1 ⁻¹ ----->	Cl	S04
147	Litholique	8,5	1756	154,4	4,0	450,9	30,0
120	Planosol solodisé	7,7	1709	180,0	8,3	381,0	20,5
126	Podzolique eutrophe	7,4	368	38,9	4,5	75,7	16,5
130	<i>idem</i>	6,9	53	4,8	0,6	13,8	4,0
119	Sables quartzeux	6,0	71	12,3	0,2	17,2	3,2

Sources : LEPRUN (1983). * = en micromhos. cm⁻¹.

À partir des eaux de pluies qui ont été considérées en première analyse comme chimiquement identiques dans les zones sèches des deux continents, l'examen de l'évolution de ces compositions en surface, puis en profondeur, permet de mettre en évidence, dans le sertão, une minéralisation croissante et rapide des eaux dans le temps et dans l'espace. En revanche, le même cheminement ne fait pas varier de manière notable la minéralisation des eaux sahéliennes. Alors que les eaux de ruissellement superficiel issues de la première concentration des eaux de pluies ont pratiquement la même composition chimique, les eaux du Nordeste semi-aride se chargent de plus en plus en sels dissous à mesure que l'écoulement se prolonge et que l'infiltration s'approfondit. Les élévations les plus spectaculaires concernent les teneurs :

- en Na et en Cl, qui sont multipliées par 100 et plus lorsque les eaux atteignent les nappes fissurales ;

- en Ca, Mg et CO₃H, qui accusent des augmentations de 10 à 20 fois.

Les taux de K et de S04 augmentent de manière beaucoup plus lente.

Les données du tableau X ont été recueillies à Sumé et concernent des eaux de différentes natures. Elles ont été collectées au même endroit sur le bassin expérimental constitué de sols bruns vertiques associés à des sols bruns non vertiques et à des taches de vertisols développés sur migmatites et gneiss (CADIER, FREITAS et LEPRUN, 1983a et b), en mai 1982 ; une eau de l'açude a été prélevée en saison sèche (février 1982).

L'augmentation rapide des concentrations, avec la distance parcourue en surface et vers la profondeur, telle qu'elle apparaît à l'observation des valeurs de tous les éléments, à l'exception du potassium, renforce encore la constatation précédente du rôle prépondérant de la circulation interne dans les sols et dans les roches sur la minéralisation des eaux du socle cristallin nordestin.

Un dernier exemple (tabl. XI ; fig. 2), issu d'un travail antérieur (LEPRUN, 1983), va illustrer le rôle du type de sol sur la qualité de l'eau superficielle dans le Nordeste semi-aride.

La figure 2 fournit la localisation géographique des sols et des prélèvements d'eaux du tableau IX et montre qu'il y a moins de 4 km entre les 2 prélèvements les plus éloignés. Les sols qui contiennent le plus de minéraux altérables et qui sont les plus riches chimiquement donnent naissance aux eaux les plus minéralisées.

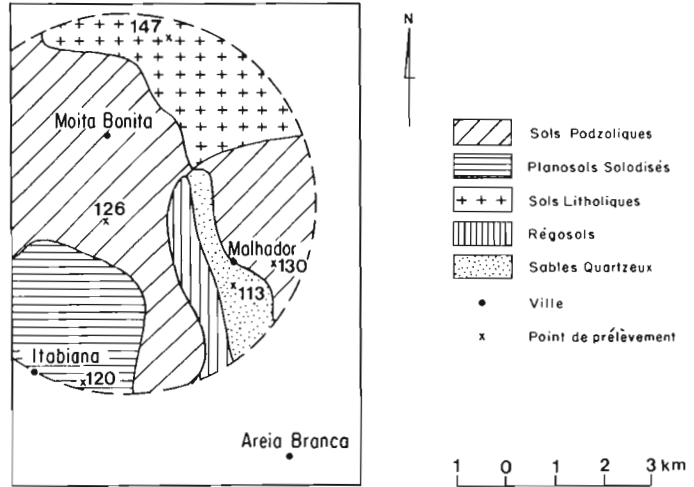


FIGURE 2 - Localisation des prélèvements d'eaux en fonction des sols.

CONCLUSIONS

Après avoir passé en revue les différents facteurs de la pédogenèse et du devenir des eaux pluviales dans les 2 régions semi-arides, il convient de dégager les analogies et les particularités des sols et des eaux de ces 2 régions, objectif de ce travail.

Dans la première partie, il a été établi qu'à partir de roches identiques d'un même socle cristallin originel et de roches sédimentaires diverses, les sols des 2 régions sèches étudiées présentaient :

- des morphologies semblables, vertisols, sols bruns, solonetz, rendzines ;
- des sols morphologiquement proches, latosols-sols ferrallitiques, régosols et sols litholiques-sols peu évolués et lithosols ;
- des sols morphologiquement différents, sols podzolitiques, sols ferrugineux tropicaux, cambisols et brunizens.

Bien qu'un peu différentes et plus accentuées en Afrique de l'Ouest, les conditions des facteurs climatiques actuelles ne peuvent suffire à expliquer les différences morphologiques importantes lorsqu'elles existent. Plus accentué, le relief du Nordeste brésilien permet de comprendre en partie le soutirage plus important des solutions internes des sols de cette région. Les vertisols lithomorphes, par exemple, sont moins épais et ne présentent qu'exceptionnellement des nodules calcaires (plaines de l'État de Bahia), alors que la concentration de ces nodules est l'une des caractéristiques des vertisols du Sahel. Si les différences de nature et de densité du couvert végétal reflètent les conditions différentes de climat et des fertilités chimique et physique des sols, elles ne semblent pas pouvoir expliquer la présence de sols de classes différentes.

En revanche, plusieurs facteurs majeurs de différenciation pédologique se dégagent de l'ensemble des considérations de l'analyse précédente. En toute première place apparaît l'histoire géologique postjurassique et la tectonique, responsables de la faible épaisseur du manteau d'altération et des sols du Nordeste. De ce fait unique, moteur puissant de la géodynamique externe, découlent d'importantes conséquences qui différencient les 2 régions :

- au Nordeste :
 - drainage externe limité par la bonne perméabilité des sols et par la quasi-absence de pellicules de battance, bon drainage interne favorisé par la structure du sol et par la densité de la couverture végétale,
 - soutirage continu des solutions,
 - sur le socle cristallin, altérations faibles ou nulles, sols peu épais, riches en minéraux altérables, présents quelquefois jusqu'en surface et qui montrent une faible altéroplassation,
 - argilification de type mixte mono- et bisiallitique,
 - absence quasi totale de formations ferrugineuses carapacées et cuirassées,
 - les sols podzoliques se développent sur des altérations peu profondes (1 à 3 m) de roches granitiques ou migmatitiques acides à moyennement basiques,
 - présence de latosols sur les couvertures sédimentaires,
 - juxtaposition de sols très différents au même endroit (sols peu évolués et latosols par exemple sous 400 mm) ;
- au Sahel :
 - socle stable depuis l'ère tertiaire,
 - drainage externe bon, favorisé par la présence très fréquente des pellicules et croûtes de battance,
 - drainage interne réduit ou nul,
 - manteau d'altération latéritique kaolinique et désaturé, très épais, surmonté de cuirasses et de carapaces ferrugineuses de très grande extension,
 - absence de sols ferrallitiques et gradient de différenciation latitudinale des sols ferrugineux sur les sédiments et sur les sables dunaires. Lorsque ce manteau kaolinique ancien est absent, les roches du socle fournissent les mêmes sols partiellement montmorillonitiques que dans le Nordeste. Sur ce manteau et sur les cuirasses ferrugineuses plus ou moins démantelées se développent des sols ferrugi-neux.

Comme cela a été observé pour les mesures obtenues sous pluies simulées et pour les coefficients de ruissellement des bassins hydrographiques, les sols du sertão infiltreront beaucoup plus que leurs homologues africains, et l'eau de pluie, qui va traverser sur le socle un sol peu épais, riche en minéraux altérables, et pénétrer dans les fissures et les diaclases de la roche, va se charger considérablement en sels dissous. Seront peu minéralisées en revanche, les eaux de pluie infiltrées en faible quantité dans les sols moins riches dépourvus de minéraux altérables et dans les épaisses altérations sahé-liennes désaturées, et qui ruissellent sur des horizons sablo-argileux encroutés et peu perméables.

BIBLIOGRAPHIE

- ASSELIN (J.) et VALENTIN (C.), 1978. - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XV, n° 4 : 321-349.
- AUDRY (P.), CADIER (E.), LEPRUN (J.-C.) et MOLINIER (M.), 1987. - Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux du sol. Rapport d'avancement des travaux. Rapp. multic. ATP-PIREN. Dynamique de l'eau et des matières dans un écosystème représentatif du Nordeste brésilien. ORSTOM, Recife, juin 1987, 78 p., *multigr.*
- BARRY (J.-P.), BOUDET (G.), BOURGEOT (A.), CELLES (J.-C.), COULIBALY (A.-M.), LEPRUN (J.-C.) et MANIERE (R.), 1983. - Étude des potentialités pastorales et de leur évolution en milieu sahélien au Mali. Rapport ACC-GRIZA-LAT, minist. Recher. et Indust. Départ. Recher. et technol. dans les zones trop. arides, 114 p.
- BLOT (A.), 1970. - Les nappes phréatiques du Sénégal oriental. Données géochimiques sur les eaux. Rapp. ORSTOM, *multigr.*, Dakar, 34 p.
- BLOT (A.), 1980. - L'altération climatique des massifs de granite au Sénégal. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, n° 114, 434 p.
- BOULET (R.), 1968. - Étude pédologique de la Haute-Volta. Région Centre-Nord. Rapp. ORSTOM *multigr.*, Dakar, 351 p.
- BOULET (R.) et LEPRUN (J.-C.), 1970. - Étude pédologique de la Haute-Volta. Région Est. Rapp. ORSTOM *multigr.*, Dakar, 331 p.
- BOULET (R.), FAUCK (R.), KALOGA (B.), LEPRUN (J.-C.), RIQUIER (J.) et VIEILLEFON (J.), 1971. - Carte pédologique au 1/5 000 000 de l'Afrique de l'Ouest avec notice explicative. Atlas intern. Ouest afric. Commission sci. techn. rech. OUA.
- BRASIL, 1971. - Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa agropecuária. Divisão de Pesquisa pedológica. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Norte. Recife, 530 p. Sudene, *ser. Pedologia*, 9.
- BRASIL, 1972. - Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa agropecuária. Divisão de Pesquisa pedológica. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado da Paraíba. Recife, 683 p. Sudene, *ser. Pedologia*, 8.
- BRASIL, 1973a. - Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa agropecuária. Divisão de Pesquisa pedológica. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Ceará. Recife, 301 p. Sudene, *ser. Pedologia*, 16.
- BRASIL, 1973b. - Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa agropecuária. Divisão de Pesquisa pedológica. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Pernambuco. Recife, 359 p. Sudene, *ser. Pedologia*, 14.
- BUAT-MENARD (P.), TANURE (H.S.), RIBEIRO (A.) et SAKAI (T.) 1974. - Sources of Mg, K and Ca enrichment in coastal and inland precipitations over the Bahia state (Brazil). *J. Rech. Atmos.*, VIII (3-4) : 995-997.
- CADIER (E.) et FREITAS (B.J.), 1982. - Bacia representativa de Sumé. Primeira estimativa dos recursos de agua. Campanhas de 1973 à 1980. Sudene, *ser. Hidrologia*, 14, Recife, 195 p.
- CADIER (E.), FREITAS (B.J.) et LEPRUN (J.-C.), 1983a. - Bacia experimental de Sumé (PB). Instalações e primeiros resultados. *Sudene, ser. Hidrologia*, 16, Recife, 87 p.
- CADIER (E.), FREITAS (B.J.) et LEPRUN (J.-C.), 1983b. - Bacia experimental de Sumé (PB). Instalações e primeiros resultados. V Simpósio brasileiro de hidrologia e recursos hídricos. Blumeneau, SC.
- CADIER (E.) et CAMPELLO (S.), 1983. - Avaliação dos recursos hídricos de pequenas bacias do Nordeste semi-árido. V Simpósio brasileiro de hidrologia e Recursos hídricos. Blumeneau, SC.
- CAMARGO (M.N.), KLANT (E.) et KAUFFMAN (J.H.), 1987. - Sistema brasileiro de classificação de solos. Separata do B. *Inf., Soc. bras. Ci. Solo, Campinas*, 12 (1) : 11-33.

- CASENAVE (A.), 1982. - Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIX, n° 4 : 207-227.
- CHEVALLIER (P.), 1982. - Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi - Haute-Volta). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIX, n° 4 : 253-297.
- COLLINET (J.) et LAFFORGUE (A.), 1979. - Mesure du ruissellement et d'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute-Volta. Rap. ORSTOM, Ouagadougou, 129 p., 2 vol., *multigr.*
- DUQUE (J.G.), 1980. - O Nordeste e as lavouras xerófilas. 3° éd. Mossoro, Escola sup. Agric. Fundação Guimaraes Duque, Coleção Mossoroense, 238 p.
- EMBRAPA, 1975a. - Centro de pesquisas Pedológicas. Levantamento exploratorio - reconhecimento de Solos do Estado de Alagoas. Recife, (Boletim Técnico, 35). Sudene, ser. *Recursos de Solos*, 5, 532 p.
- EMBRAPA, 1975b. - Centro de Pesquisas Pedológicas. Levantamento exploratorio - reconhecimento de Solos do Estado de Sergipe. Recife, (Boletim Técnico, 36). Sudene, ser. *Recursos de Solos*, 6, 506 p.
- EMBRAPA, 1976. - Serviço nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Levantamento exploratorio - reconhecimento de solos da margem esquerda do Rio Sao Francisco - Estado de Bahia. Recife, (Boletim técnico, 38). Sudene, ser. *Recursos de Solos*, 7, 404 p.
- EMBRAPA, 1977. - Serviço nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Levantamento exploratorio - reconhecimento de solos da margem direita do Rio Sao Francisco - Estado da Bahia. Recife, (Boletim técnico, 52). Sudene, ser. *Recursos de Solos*, 10, 735 p.
- EMBRAPA/SNLS, 1981. - Mapa de solos do Brasil a 1/5 000 000.
- FAO, 1975. - Formulation of a tropical forest cover monitoring project, FAO/UNEP. Rome.
- HAYASHI (I.), 1981. - Plant communities and their environments in the caatinga of Northeast Brazil. *Latin American studies*, 2, Univ. Tsukuba Skura-mura Ibarahi, Japon.
- LAMOTTE (M.) et BOURLIÈRE (F.), 1978. - Problèmes d'écologie : structure et fonctionnement des écosystèmes terrestres. Paris, Masson.
- LEPRUN (J.-C.), 1977. - Esquisse pédologique à 1/50 000 des alentours de la mare d'Oursi (Haute-Volta) avec notice et analyse des sols. ACC DGRST "Lutte contre l'érosion dans l'Oudalan (Haute-Volta). *Rapp. multigr.* ORSTOM, Paris, 53 p.
- LEPRUN (J.-C.), 1978. - Compte-rendu de fin d'études sur les sols et leur susceptibilité à l'érosion, les terres de cures salées, les formations de «brousse-tigrées» dans le Gourma. *Rapp. multigr.* ORSTOM-DGRST., Dakar, 45 p.
- LEPRUN (J.-C.), 1979. - Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse, transformations, dégradation. Thèse doctorat, Strasbourg, 1979 et *Mém. Sc. Géol.* Strasbourg, n°59, 224 p.
- LEPRUN (J.-C.), 1981. - A erosão, a conservação e o manejo do solo no Nordeste brasileiro. Balanço, diagnostico e novas linhas de pesquisas. Sudene, ser. *Recursos de solos*, 15, Recife, 107 p. Carte annexe.
- LEPRUN (J.-C.), 1983. - Relatório de fim de convênio de manejo e conservação do solo no Nordeste brasileiro (1982-1983). Rapport Sudene-ORSTOM, Recife, 290 p. 5 Cartes annexes.
- LEPRUN (J.-C.), 1985. - La conservation des sols dans le Nord-Est brésilien. Particularités, bilan et perspectives. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* vol. XXI, n° 4 : 39-66.
- LEPRUN (J.-C.), 1986. - Étude comparée des facteurs et des effets de l'érosion dans le Nordeste du Brésil et en Afrique de l'Ouest. Colloque Nordeste-Sahel, Inst. Hautes études Amérique Latine, Paris, 10 p.
- MENDES (B. V.), 1986. - Alternativas tecnológicas para a agropecuária do semi-árido. Ed. Nobel, São Paulo, 2° ed., 171 p.

- Ministério da Agricultura, 1973a. - Departamento Nacional de Pesquisa agropecuária. Divisão de Pesquisa pedológica. Brasil. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado da Pernambuco. Recife, 359 p. Sudene, ser. *Pedologia*, 14.
- Ministério da Agricultura, 1973b. - Departamento Nacional de Pesquisa agropecuária. Divisão de Pesquisa pedológica. Brasil. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Ceará. Recife, 301 p. Sudene, ser. *Pedologia*, 16
- NIMER (E.) 1979. - Climatologia do Brasil. IBGE, Rio de Janeiro, *Recursos Naturais e Meio ambiente*, 4, 421 p.
- PIOGER (R.), 1964. - Ressources en eau du Nord-Est du Brésil : les eaux fluviales. Recife, Sudene-FAO, 11 p.
- PION, (J.-C.), 1979. - L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Etude de quelques toposéquences en haute-Volta. Thèse Sci. Strasbourg et *Sci. Géol., Mém.*, 57, 220 p.
- REICHELDT (R.), 1972. - Géologie du Gourma (Afrique occidentale). Un seuil et bassin du Précambrien supérieur. *Mém. BRGM*, 53, 213 p.
- ROOSE (E. J.), 1977. - Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest ; vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, 78, 108 p.
- ROOSE (E. J.), 1980. - Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Thèse Doctorat, Univ. Orléans, 587 p.
- TARDY (Y.), 1969. - Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Sci. Strasbourg et *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 31, 199 p.
- VIEIRA (H. P. J.), CADIER (E.), LINS (M. J. A.) et ASSUNCAO (M. S.), 1983. - Descrição da rede de bacias representativas e experimentais do Nordeste brasileiro. V Simpósio brasileiro de Hidrologia e recursos hídricos. Blumenau, Sc.
- WISCHMEIER (W. H.) et SMITH (D. D.), 1958. - Rainfall energy an its relation ship to soil loss. *Trans. Amer. Geophys. Union*, Washington, 39 : 285-291.