

## 16

# **Les dégradations des sols en régions semi-arides au Brésil et en Afrique de l'Ouest Comparaison et conséquences Suggestions sur leurs réhabilitations respectives**

J.-C. LEPRUN <sup>1</sup>, F. BARRETO RODRIGUES E SILVA <sup>2</sup>,

1. *ORSTOM, C.P. 4010 Boa Viagem, 51020 Recife (PE), Brésil*

2. *EMBRAPA, CNPS, rua Antonio Falcão, 402, 51020 Recife (PE), Brésil*

Les zones arides et semi-arides, qui représentent le tiers de la surface du globe, sont composées d'écosystèmes fragiles qui constituent une importante partie des réserves en terres et en ressources écologiques pour l'avenir. Ces écosystèmes, qui supportent des densités de population pauvres croissantes, réagissent mal aux mises en exploitation — liées aux aléas climatiques — successives. Les données fiables et utilisables sur le fonctionnement de ces écosystèmes et leur transformation en agrosystèmes et surtout sur les types de dégradation et la possible récupération des sols affectés, sont peu abondantes, peu diffusées et peu exploitées. Les décideurs pressent pourtant toujours davantage les scientifiques de livrer leurs connaissances et de trouver des solutions de réhabilitation, car eux-mêmes sont questionnés toujours davantage par les politiques au niveau local et national. Il est proposé dans ce travail de comparer les facteurs écologiques et les dégradations des sols de deux régions semi-arides qui présentent de nombreux points communs mais qui réagissent de manière différente à la mise en valeur et, à la lumière de cette comparaison, de suggérer des recommandations et des solutions de réhabilitation.

## Les grands traits du milieu physique et humain

### Situation géographique

La zone semi-aride du Nordeste du Brésil, appelée Sertão, est comprise conventionnellement entre les isohyètes 400 et 800 mm (Figure 1b), et s'étend sur près de 927 000 km<sup>2</sup> (Silva *et al.*, 1992), soit 56 % de l'aire d'intervention de la SUDENE (Surintendance de développement du Nordeste). L'Afrique occidentale semi-aride délimitée par commodité par les isohyètes 400 et 800 mm, et qui sera dénommée ici zone sahélo-soudanienne, se présente sous la forme d'une bande ouest-est d'environ 250 km de large et plus de 2 000 km de long, qui va du Sénégal au Niger en traversant la partie sud de la Mauritanie, le Mali et le Burkina Faso (Figure 1a). Les deux régions sont situées de part et d'autre de l'équateur. Le Nordeste est délimité par le 3<sup>e</sup> et le 15<sup>e</sup> degré de latitude sud, le semi-aride ouest africain est compris entre le 10<sup>e</sup> et le 18<sup>e</sup> degré de latitude nord.

Du fait de sa forme allongée vers l'est, la zone semi-aride africaine présente un facteur de continentalité bien plus accentué que celui du Nordeste. Alors que Niamey se trouve placé à 2 000 km de l'océan Atlantique vers l'Ouest et à 800 km au sud, les points les plus extrêmes du Nordeste sec de l'État du Piauí ne sont jamais éloignés de plus de 400 km de la mer. Enfin, alors que le Nordeste semi-aride est entouré de zones humides, littorales ou pré-amazoniennes, la zone sahélo-soudanienne est située aux marges d'un grand désert, le Sahara.

### Climat

Le régime pluviométrique du Sertão est soumis, au Nord, aux déplacements du FIT (Front intertropical) et, au Sud, aux fronts froids venus de l'extrême sud du pays. Le début de la saison des pluies accuse de ce fait un décalage latitudinal important. Les pluies apparaissent en mars dans le Piauí et le Ceará et seulement en novembre dans le sud de la Bahia. Il en résulte que l'alternance saison sèche-saison des pluies n'est pas stricte et que l'examen des relevés pluviométriques des postes du Sertão sur plus de dix ans indique qu'il peut pleuvoir à tout moment de l'année. Les coefficients de variation de la pluviométrie (quotient de l'écart type sur la moyenne) atteignent et dépassent 50 % et sont parmi les plus élevés du monde [1, 2]. Ce degré de variabilité élevé de la pluviosité est pour ce dernier auteur un important facteur d'aridité écologique. L'agressivité des pluies, calculé au moyen du facteur R de Wischmeier et Smith [3] sur plus de 40 postes pluviographiques [4] et déterminé par la fraction R (unités USA)/P pluviométrie moyenne annuelle en mm fournit une valeur moyenne de 0,30. La température moyenne annuelle oscille autour de 25° C. L'insolation moyenne annuelle se situe entre 2 000 et 2 500 h.an<sup>-1</sup> et tout au long de l'année de nombreux jours sont nuageux. Les vents sont peu fréquents et peu puissants. L'humidité relative de l'air se situe en moyenne entre 50 % et 60%.

Le régime des précipitations de l'Afrique occidentale semi-aride est sous la dépendance du FIT qui se déplace du Nord vers le Sud entre janvier et août. Ce lent déplacement conduit à une disposition parallèle remarquable des isohyètes et à un régime climatique très contrasté (saison des pluies courte et stricte de 2 à 3 mois appelée hivernage). Le coefficient de variation moyen de la pluviosité pour 66 postes situés entre 400 et 800 mm de variation est égal à 0,26 [3]. L'agressivité des pluies est élevée et le quotient de R (USA)/P

moyen annuel est de 0,50 en moyenne [5]. Les valeurs moyennes annuelles de la température, de l'insolation et de l'évaporation se situent respectivement au dessus de 35° C, 2 500 h.an<sup>-1</sup> et de 3 000 mm.an<sup>-1</sup>. Les vents sont puissants et fréquents, soufflant du nord-est (alizés et harmattan), en particulier dans la partie sahélienne septentrionale la moyenne de l'humidité relative de l'air est inférieure à 50%.

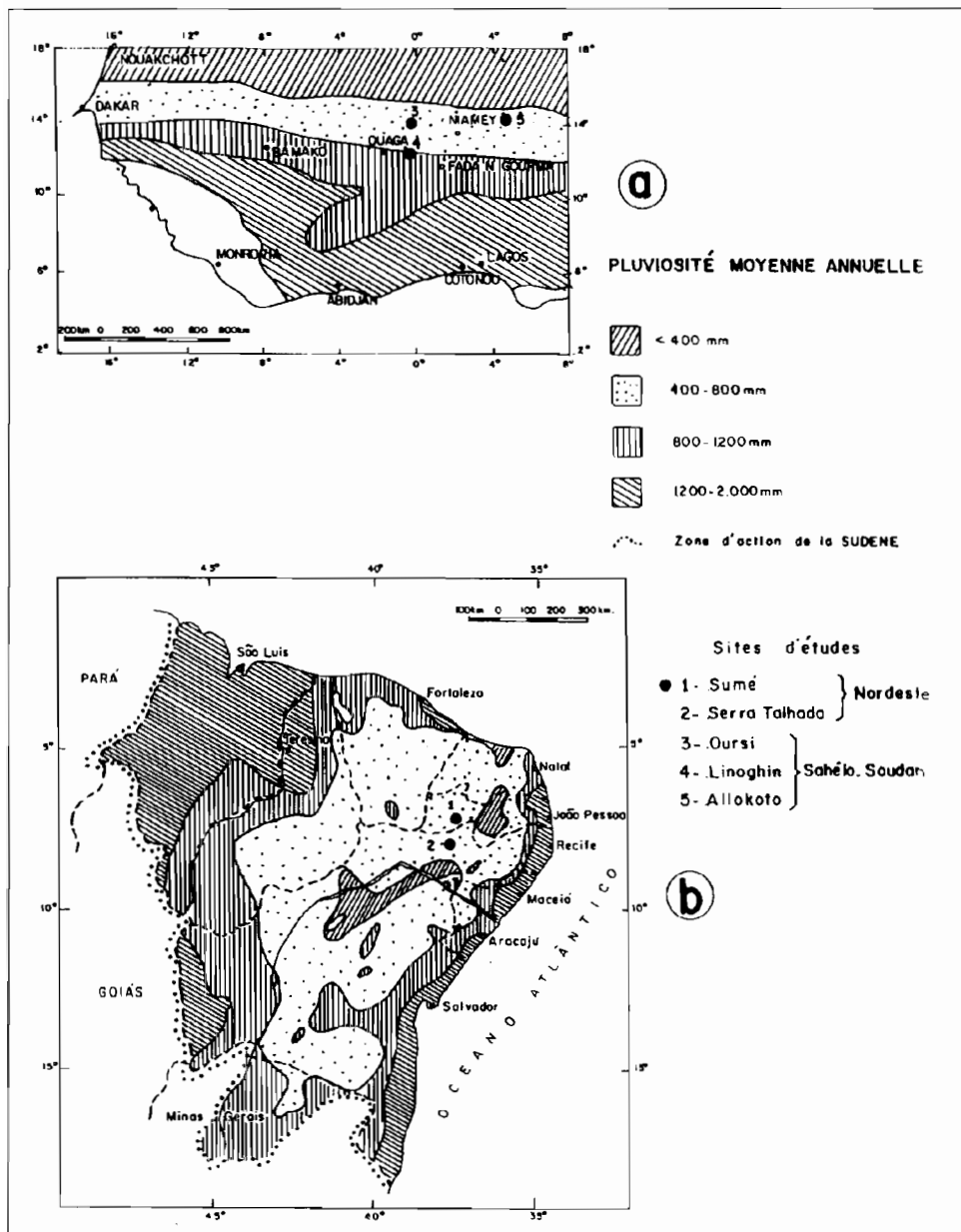


Figure 1. Pluviosité et localisation des sites d'études. (a) : Sahélo-soudanien, (b) : Nordeste brésilien.

L'ensemble des données précédentes met en évidence que le climat du Nordeste, malgré un degré plus élevé de variabilité de la pluviosité, et donc un facteur d'aridité plus important qu'en Afrique sahélo-soudanienne, est moins chaud, moins sec, moins évaporant que le climat de l'Afrique occidentale semi-aride pour la même tranche d'isohyètes 400-800 mm par an, et possède des pluies moins érosives et des vents faibles et moins constants. Les deux régions sont soumises à des sécheresses catastrophiques périodiques : 23 années déficitaires entre 1941 et 1975 dans le Nordeste contre 19 au Sahel dont onze fois les mêmes années [6].

Pour caractériser les conditions climatiques moyennes des deux régions, deux stations qui ont servi de base d'études, et dont les données seront utilisées plus loin, sont prises pour exemples. Il s'agit du bassin hydrologique expérimental de Sumé situé dans le Sertão de la Paraíba et de la mare d'Oursi située dans la zone sahélienne du Burkina Faso (Tableau I).

**Tableau I.** Caractéristiques climatiques de deux stations, Sumé (Paraíba) et Oursi (Burkina Faso).

	Sumé (Paraíba)	Oursi (Burkina Faso)
Pluviométrie moy. an. (mm)	540	460
Erosivité R (USA)	200	260
Température moy. an. (° C)	24	29,4
Evaporation moy. an. (mm)*	2 900	5 694
Insolation (heures/an)	2 800	3 978
Humidité de l'air (%)	60,0	34,1

\* Bac classe A.

## Géologie

Les formations géologiques des deux régions sont très semblables. Il s'agit tout d'abord des roches du vieux socle cristallin précambrien, constituées de granites, gneiss et roches basiques, qui était d'un seul tenant jusqu'à la séparation des deux continents durant le Jurassique.

Le Sertão cristallin représente près des 3/4 de la zone semi-aride. En Afrique de l'Ouest sec le socle cristallin altéré ou non n'occupe que 50 % de la surface et est quasi absent du Sahel septentrional. Les formations sédimentaires du secondaire et du tertiaire sont, dans les deux régions, constituées de grès, de schistes et de calcaires issues de l'érosion du socle précambrien dont les matériaux se sont déposées sur les marges. C'est le cas des formations détritiques grésio-argileuses très semblables de la Formation Barreiras brésilienne et du Continental terminal africain. Si les roches sont très proches, leur évolution géodynamique va, en revanche, être différente selon la région considérée. Resté tectoniquement stable et soumis à une intense altération météorique durant tout le tertiaire, le bouclier ouest-africain va développer une couverture latéritique puissante [7] de plusieurs dizaines, voire centaines de mètres. Durant ce temps, le bouclier nord-ouest brésilien est soumis à

une tectonique active au cours du tertiaire et à des mouvements épirogéniques continus au cours du quaternaire [8], et ne possède pas cet épais manteau d'altération kaolinique et ferrugineux. Dans les deux cas, ce sont des matériaux bien différents qui vont donc être livrés à la pédogenèse.

### Modelé, réseau hydrographique et qualité des eaux

Le relief des deux régions est différent. Les versants sur le socle cristallin du Sertão sont courts et pentus. De grands plateaux appelés "chapadas" et "tabuleiros" sont individualisés sur les roches sédimentaires. En région sahélo-soudanienne, les versants sont longs de plusieurs kilomètres et les pentes sont faibles. Les formations dunaires sableuses ondulées quaternaires qui recouvrent toute la partie septentrionale du Sahel, les grands glacis colluvio-alluviaux et les fréquentes surfaces planes constituées par les "bowé" cuirassés africains sont absentes du Sertão. La surface du Nordeste sec occupée par les alluvions est inférieure à 2%.

Deux grands fleuves drainent chacune des deux régions, le rio São Francisco et le rio Parnaíba dans le Nordeste, le Sénégal et le Niger en Afrique de l'Ouest semi-aride. Leurs tributaires sont le plus souvent à régime temporaire violent et bref. Très dense dans le Nordeste sur le socle cristallin, le réseau hydrographique est lâche et les zones endoréiques fréquentes dans le Sahel. L'absence de nappes phréatiques dans le Nordeste semi-aride cristallin oblige à retenir l'eau de ruissellement dans des réservoirs appelés "açudes" dont le nombre dépasse 70 000 [9]. Ces nappes sont présentes dans les altérations profondes et dans les séries sédimentaires sahélo-soudanienues.

La composition chimique des eaux superficielles des deux régions est fort différente.

Les eaux de ruissellement du Nordeste se chargent rapidement au contact des roches et des minéraux altérables présents dans les sols peu épais et atteignent des taux de minéralisation importants de type chloruré sodique qui les situent souvent dans les classes C2S1 et C3S1 de l'*American Agriculture Handbook* [4, 8, 10]. Après infiltration dans le premier mètre de sol, les taux de chlore et de sodium des eaux de pluie se trouvent multipliés par 100 et les taux des autres éléments par des chiffres allant de 10 à 20 [12]. Les eaux de nappes localisées des fissures et diaclases du socle sont très minéralisées et peuvent atteindre des concentrations de plusieurs grammes par litre. Les eaux de ruissellement sahéliennes issues de sols lessivés et des altérations latéritiques lixivées sont en revanche peu minéralisées [4, 13-15, 17].

### Végétation

La végétation naturelle du Nordeste semi-aride est une formation xérophyte épineuse appelée *caatinga*, de type *bush*, qui peut passer à une forêt basse dense et difficile d'accès. Continue et haute de 2 à 5 m (certains arbres dépassent 10 m), la *caatinga* possède une strate herbacée graminéenne rare et une strate arborée et arbustive riche en légumineuses.

Sa composition et sa densité dépendent du sol. Hayashi [18] a dénombré 17 200 arbres et arbustes à l'hectare dont la phytomasse atteignait 23 t par hectare pour une *caatinga* basse sur sol brun. Le taux d'interception de la pluie, mesuré, varie de 14 % à 19%, soit le taux de forêts tropicales humides ou de forêts européennes (données non publiées). La

*caatinga* possède un remarquable pouvoir de régénération tant en phytomasse qu'en diversité biologique. La couverture végétale naturelle de *caatinga* de la zone semi-aride de trois des États du Nordeste représentait 90 % de la superficie totale à la fin des années 1970 [19].

La formation végétale de la zone sahélo-soudanienne est une savane arborée et arbustive ouverte constituée d'une strate graminéenne importante ponctuée d'arbres. Lamothe et Bourlière [20] citent les chiffres de 133 arbres et arbustes à l'hectare représentant une phytomasse de 1,8 t.ha<sup>-1</sup> pour une savane arborée lâche du Ferlo au Sénégal. A Oursi, la production moyenne annuelle de matière sèche de la strate herbacée est de 152 g MS/m<sup>2</sup> [21]. Une formation contractée typique appelée "brousse tigrée", constituée de bandes boisées denses alternées à des bandes nues, et à dynamique d'évolution rapide [15, 17] colonise une partie importante du Sahel septentrional. La couverture végétale naturelle de l'Ouest africain semi-aride ne représentait plus dans les années 1970 que 5 % de la superficie [16]. Selon des estimations [22], les besoins en bois des populations des savanes au sud du Sahara dépasseraient de beaucoup les ressources forestières de ces zones ce qui constitue un problème crucial pour la conservation des écosystèmes.

## Sols

L'analyse des principaux sols des deux régions et de leurs caractéristiques physico-chimiques sera empruntée à un travail antérieur [8]. Les principales données pédologiques sont constituées par les documents suivants : pour le Nordeste, la carte au 1/5 000 000 de l'ensemble du Brésil établie par le SNLCS de l'EMBRAPA en 1981 [23], les cartes de chacun des neuf États du Nordeste dont l'échelle varie selon la taille de l'État du 1/400 000 au 1/1 000 000, réalisées par l'EMBRAPA entre 1971 et 1989, et la synthèse au 1/2 000 000 qui vient d'être réalisée (Silva, 1993 inédit). Un "zonage" agro-écologique de tout le Nordeste au 1/2 000 000 vient d'être conclu [24] qui divise la région en 20 unités de paysage et 172 unités géo-environnementales. Pour l'Afrique de l'Ouest, les documents utilisés sont la carte de synthèse des sols de l'Afrique de l'Ouest utilisant la légende de la FAO [25] et l'ensemble des cartographies au 1/500 000 du Burkina Faso et du Niger et au 1/1 000 000 du Sénégal réalisée par les pédologues de l'ORSTOM.

Les principaux sols du Nordeste semi-aride sont, par ordre de présence décroissante, les suivants :

- sur les roches cristallines du socle, les sols bruns eutrophes non calciques vertiques ou non, les sols litholiques, les sols podzoliques (dans l'acceptation américaine du terme) rouges-jaunes dystrophes et eutrophes, les planosols, les cambisols, les solonetz, les vertisols ;
- sur les roches sédimentaires et sur les couvertures sableuses détritiques se développent préférentiellement des latosols, des sols podzoliques rouges et jaunes dystrophes et des sols de sables quartzeux. Les calcaires portent des cambisols, des latosols rouges, des rendzines et des sols carapacés.

Les sols de la zone sahélo-soudanienne se distinguent en fonction du matériau qui leur a donné naissance :

- sur l'épais manteau d'altération latéritique souvent cuirassé ou carapacé, les sols les plus fréquents sont les sols ferrugineux tropicaux lessivés et les sols peu évolués gravillonnaires issus du démantèlement de ces cuirasses ;

- sur les dunes sableuses fixées se développent des sols bruns sub-arides et des sols ferrugineux peu ou pas lessivés ;
- sur le socle dégagé du manteau d'altération kaolinique, on trouve les mêmes sols que ceux rencontrés dans le Nordeste, sols bruns eutrophes, vertisols et solonetz.

Un certain nombre de différences sont à noter. Il s'agit tout d'abord des sols podziques développés sur les roches acides ou neutres du socle en partie altéré antérieurement et sur certaines roches sédimentaires, qui sont différents des sols ferrugineux tropicaux et qui ne sont pas connus en Afrique de l'Ouest, et des sols gravillonnaires et lithosols sur cuirasse ferrugineuse, très fréquents en zone sahélo-soudanienne et qui ne sont pas présents dans le Sertão.

Pour ce qui concerne ce travail, les différences les plus importantes ont trait aux propriétés physico-chimiques des sols des deux régions. Les données morphologiques et analytiques moyennes des horizons de surface de plus de 1 500 sols du Sertão semi-aride et d'environ 200 sols sahélo-soudaniens (Tableau II) ont permis de montrer que les sols du Nordeste, développés en grande partie sur des roches fraîches du socle ou sur les racines d'une altération latosolique ancienne non cuirassée, avaient une fertilité chimique plus élevée et de meilleures propriétés physiques que les sols de l'Afrique de l'Ouest sec [8, 17]. Ces moyennes sont bien sûr fortement influencées par la présence des sols très pauvres sur sables dunaires fixés sahéliens, mais la comparaison des données de l'horizon A des sols bruns vertiques de Sumé (Parafba) et de Oursi (Burkina Faso) regroupées dans le Tableau III et des moyennes issues de plusieurs dizaines de sols bruns vertiques (Tableau IV) et d'une dizaine de vertisols issus de roches semblables du socle précambrien des deux régions (Tableau V) conduit aux mêmes constatations en faveur des sols du Nordeste brésilien.

**Tableau II.** Quelques caractéristiques moyennes de l'horizon de surface des sols des deux régions. Sources : Nordeste - données de la banque de données SISOLOS du SNLCS/EMBRAPA ; région sahélo-soudanienne : rapports des cartes pédologiques ORSTOM.

	Nordeste	Sahélo-soudanien
Granulométrie	argilo-sableux	sablo-argileux
Matière organique (%)	0,5 - 4,0 (2,0)*	0,3 - 1,5 (0,7)*
Ca <sup>2+</sup> échangeable (mEq/100g)	5,0 - 10,00	0,5 - 2,0
Perméabilité (mm.h <sup>-1</sup> )	élevée (50 - 400)	faible (15 - 25)
Structure	fragmentaire	massive
État de surface	non encroûté	encroûté

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

**Tableau III.** Comparaison des caractéristiques analytiques de l'horizon A des sols bruns vertiques de Sumé (Paraíba) et Oursi (Burkina Faso). (D'après [8].)

	Sumé (Paraíba)	Oursi (Burkina Faso)
Argile (%)	32,0	33,5
Limons (%)	13,0	16,5
Matière organique (%)	4,6	0,7
Carbone (%)	2,77	0,40
Azote (%)	0,23	0,02
pH eau	6,7	7,7
Ca <sup>2+</sup> échangeable (mEq/100g)	18,54	10,0
Mg <sup>2+</sup> échangeable (mEq/100g)	4,0	3,8
S (mEq/100g)	29,21	18,06
T (mEq/100 g)	31,99	18,24
log 10 Is	1,30	1,65
log 10 K	1,47	1,17
Profondeur de l'horizon A	10 cm	22 cm

**Tableau IV.** Valeurs de quelques paramètres physico-chimiques de l'horizon A des sols bruns vertiques des deux régions. Sources : Nordeste : données de la banque SISOLOS du SNLCS / EMBRAPA. Région sahélo-soudanienne : Boulet [42] ; Boulet et Leprun [43].

	Nordeste (N = 48)			Sahélo-soudanien (N = 23)		
	Moyenne	Maxima	Minima	Moyenne	Maxima	Minima
Argile (%)	19,5	50,0	7,0	27,3	37,3	16,8
M.O (%)	2,1	5,8	0,3	1,0	1,3	0,7
C/N	11,2	14,3	9,4	9,8	12,4	9,1
K <sub>2</sub> O (mEq)	0,42	1,38	0,09	0,31	0,53	0,16
S (mEq)	13,8	19,3	10,0	10,5	25,7	1,7
T (mEq)	14,6	19,8	11,4	12,4	25,7	3,5
S/T (%)	92,7	98,2	85,5	83,2	100,0	49,0
pH	7,2	7,8	6,6	6,4	8,1	5,0



**Tableau V.** Valeurs de quelques paramètres physico-chimiques de l'horizon A des vertisols des deux régions. Sources : Nordeste : données de la banque SISSOLOS du SNLCS/EMBRAPA. Région sahélo-soudanienne : Boulet [42] ; Boulet et Leprun [43].

	Nordeste (N = 10)			Sahélo-soudanien (N = 11)		
	Moyenne	Maxima	Minima	Moyenne	Maxima	Minima
Argile (%)	45,6	68,0	30,9	30,7	50,8	15,9
M.O (%)	3,27	9,90	0,88	1,23	1,63	0,58
N (%)	0,19	0,36	0,08	0,10	0,30	0,05
C/N	9,7	11,0	8,0	13,2	15,7	11,7
K <sub>2</sub> O (mEq)	0,68	1,80	0,15	0,17	0,35	0,09
S (mEq)	33,7	52,6	18,2	17,2	33,9	7,1
T (mEq)	35,0	47,0	19,0	17,8	32,5	9,0
S/T (%)	90,0	100,0	37,0	91,0	100,0	78,0
pH	7,3	8,4	6,6	7,3	8,8	6,8

### Milieu humain et activités agricoles

Les populations des deux régions, dont la densité est d'environ 16 habitants au kilomètre carré, sont essentiellement rurales. Elles pratiquent une agriculture de faible technologie, manuellement ou à l'aide de la traction attelée, mais les façons culturales sont différentes.

La population du Sertão, métissée d'indiens et de portugais, exerce une agriculture diversifiée et localisée qui associe les grains (maïs, haricot), le coton et l'agave fourragère et le petit élevage sédentaire au sein de propriétés closes et protégées. Les activités agricoles ont moins de 400 ans. Le labour se fait généralement dans le sens de la plus grande pente. La pratique du brûlis n'est utilisée qu'après le défrichement initial ("a roça") et le charbon n'est pas utilisé pour la cuisine, le gaz domestique étant largement distribué. Introduit depuis une cinquantaine d'années, l'Algaroba (*Prosopis juliflora*), issue des pays andins, est maintenant largement exploitée comme légumineuse fourragère arborée, associée à l'agave et au *Cenchrus ciliaris* (*buffel grass*). Depuis une vingtaine d'années, la pratique de l'irrigation de cultures industrielles par aspersion et pivots centraux sur de grandes surfaces en bordure du Rio São Francisco et par irrigation gravitaire et par aspersion de petites propriétés dans tout le Sertão, s'est considérablement développée. Des techniques simples d'irrigation et d'utilisation des "açudes" par les petits producteurs ont été mises au point récemment [26].

Pratiquée de manière itinérante et extensive depuis deux millénaires, l'agriculture sahélo-soudanienne est largement dominée par la monoculture (mil, sorgho, maïs, niébé, ignames...). Le brûlis annuel avant la préparation du sol est de règle. Chaque année, d'immenses "feux de brousse" mettent à nu des milliers d'hectares de savanes et jachères. Les villages de cultures se déplacent sans cesse dans un espace agricole communautaire,

mais le temps de jachère, qui était d'une dizaine d'années, se réduit de plus en plus. L'élevage est itinérant sur de grandes distances dans le Sahel et se regroupe autour des rares puits et mares permanentes. Le bois constitue la principale source d'énergie qu'il faut aller chercher de plus en plus loin et les villes et villages sahélo-soudaniens sont entourés d'une zone "dénudée" qui peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres.

## Les principaux types de dégradations physiques

### Les modifications des propriétés hydrodynamiques des sols

#### Effet sur le ruissellement

Deux sols bruns eutrophes développés sur des migmatites, sous pluviométries comparables et qui possèdent une composition granulométrique très proche, l'un à Sumé (Parafba), l'autre à Oursi (Burkina Faso), présentent des indices de stabilité structurale *I<sub>s</sub>* et de perméabilité *K* de Hénin [27] différents (Tableau III). Le sol de Sumé, plus riche en matière organique et en cations, a une meilleure structure et perméabilité que son homologue sahélien.

Sous mêmes pluies simulées et à l'aide du même appareil dénommé infiltromètre à aspersion conçu par Asseline et Valentin [28], sur des parcelles de 1 m<sup>2</sup>, ces deux sols se comportent de manière différente [12, 29]. La hauteur de la pluie d'imbibition, qui est la quantité d'eau qui s'infiltre sur sol sec avant le premier ruissellement après une pluie de récurrence annuelle, est de plus de 8 fois supérieure à Sumé qu'à Oursi, et cela aussi bien sur sol nu que sous végétation. Le taux de ruissellement de cette pluie, qui est nul à Sumé est de l'ordre de 30 % à Oursi. Sous végétation naturelle, une pluie de 1 h à 60 mm.h<sup>-1</sup> ne provoque aucun ruissellement à Sumé (Tableau VI). Après une série de pluies rapprochées sommant, en quelques jours, 364,5 mm à Sumé et 350,1 mm à Oursi, les taux de ruissellement sont respectivement de 31,7 % à Sumé contre 86,4 % à Oursi, soit près de 3 fois plus.

**Tableau VI.** Comparaison des ruissellements sur sol brun eutrophe sous pluies simulées.

	Sumé	Oursi
Pente (%)	2 à 4	1 à 1,5
Pluie de récurrence an.	48 mm	40 mm
Intensité moy. pluie	48 mm h <sup>-1</sup>	60 mm h <sup>-1</sup>
Parcelle nue 1 m <sup>2</sup>		
Pluie d'imbibition	48 mm	6,2 à 8,4 mm
Taux de ruissellement	0 %	30,0 à 63,1 %
Taux de ruissellement après des pluies sommant env. 350 mm	31,7 %	86,4 %
Parcelle 1 m <sup>2</sup> sous végétation		
Pluie d'imbibition	96 mm	11 mm
Taux de ruissellement après une pluie de 1 h à 60 mm. h <sup>-1</sup>	0 %	29,9 %

Les données recueillies durant plusieurs décades par les hydrologues de l'ORSTOM dans la zone sahélo-soudanienne [29, 30] permettent d'avancer des taux d'écoulements moyens supérieurs à 25 % de la pluviométrie annuelle pour des petits bassins hydrologiques dont les pentes sont inférieures à 2 % à 3%. Les moyennes des coefficients de ruissellement des 7 bassins versants de la Mare d'Oursi (Chevallier *et al.*, 1992) s'échelonnent de 13 % à 37 % (moyenne de 21,6%). Le bassin de Jalafanka, où sont situés les sols bruns subarides testés sous pluies simulées, est celui qui ruisselle le plus (37%). Sous climat sahélien (pluviosité de 200 à 600 mm) dont les sols sont encroûtés, Valentin *et al.* [31] citent le taux moyen de ruissellement de début de saison des pluies (sol sec) de 50%. Ce taux tombe à 25 % en climat soudanien (600-1 200 mm). L'influence du type d'encroûtement sur le ruissellement en région semi-aride africaine a été étudiée par Casenave et Valentin [32]. Sur certaines croûtes, le taux de ruissellement dépasserait 80 % et pourrait même atteindre 100%.

Les taux de ruissellement moyens mesurés sur petits bassins versants en milieu naturel ou peu perturbés dans la zone semi-aride du Sertão durant plus de 30 ans, font état de coefficients inférieurs à 6 % de la pluviométrie annuelle pour des pentes souvent supérieures à 5 % [33].

Les chiffres de pertes en eau des parcelles de 100 m<sup>2</sup> du Tableau VIII, confirment ces résultats.

Les sols des bassins versants de la zone semi-aride sahélo-soudanienne ruissellent donc de 5 à 10 fois plus que ceux de leurs homologues du Nordeste semi-aride.

### **Les modifications de la structure. La formation des croûtes**

La structure de l'horizon de surface des sols du Nordeste semi-aride est le plus souvent du type fragmentaire. Les structures grumeleuses ou polyédriques fines assez bien à bien développées sont fréquentes, les structures massives rares, excepté dans le cas des solonetz. Les sols bruns eutrophes non calciques modaux ou vertiques et les vertisols ont une structure de surface polyédrique, fine en assemblage, polyédrique ou cubique plus grossier et une cohésion d'ensemble moyenne à faible. Les données de plus de 400 horizons de surface de sols sous *caatinga* [8], regroupant tous les types de sols (latosols, sols podzoliques et sols à argiles 2:1) indiquent un taux de matière organique moyen de 1,8%. Cette matière organique est bien minéralisée (C/N moyen de 9,6) et de type mull. Le taux moyen de la somme des cations échangeables S est de 7,3 mEq et celui du taux de saturation de 67%.

Les sols sahélo-soudaniens, et en particulier les sols ferrugineux tropicaux, ont une structure de surface généralement massive à cohésion d'ensemble moyenne à forte. Les sols sur sables dunaires fixés présentent une structure de surface lamellaire. La structure grossière des sols bruns développent généralement un assemblage compact. La présence de croûtes et pellicules superficielles argilo-limoneuses durcies est très fréquente.

A Sumé, les travaux ont permis de montrer que sur les plages de sol brun eutrophe verticale nu qui possède une structure lamellaire fragile de sub-surface, l'infiltration initiale qui est de 63 mm.h<sup>-1</sup>, c'est-à-dire la valeur de l'intensité de la pluie, tombe à 40 mm.h<sup>-1</sup> au bout de 10 mm, puis se stabilise rapidement autour de 19 mm.h<sup>-1</sup>. En revanche, sur le même sol contigu, mais sous végétation, dont la structure est fragmentaire, l'infiltration se maintient à 64 mm.h<sup>-1</sup> qui est la valeur de l'intensité de la pluie durant des deux pre-

mières heures et se stabilise ensuite autour de 19 mm.h<sup>-1</sup>. Le ruissellement ne survient qu'au cours des pluies suivantes et l'intensité d'infiltration se stabilise alors autour de 30 mm.h<sup>-1</sup>. L'infiltration du sol nu paraît donc être réglée par la conductivité hydraulique de la structure lamellaire superficielle. Sur sol sous végétation, dont la structure n'est pas lamellaire mais fragmentaire, le ruissellement n'intervient que lorsque l'humectation du profil atteint son niveau limite de capacité de rétention. Sur le même sol nu, deux parcelles voisines de 1 m<sup>2</sup> chacune, l'une non travaillée, l'autre sarclée à la houe sur 10 cm d'épaisseur, soumises aux mêmes pluies simulées, ont permis de tester l'influence du travail du sol. Après la première pluie, le taux de ruissellement de la parcelle sarclée est près de 13 fois inférieur à celui de la parcelle non travaillée, mais la structure polyédrique grossière due au sarclage s'est effondrée laissant une surface ondulée sans aspérités. Le lendemain, une pluie de 30 mm à intensité de l'ordre de 100 mm.h<sup>-1</sup> appliquée aux deux parcelles produit le même taux de ruissellement de 66 % et une perte en terre supérieure à 580 kg. ha<sup>-1</sup>. Cette expérience met en évidence le fait que la dégradation de la structure du sarclage sous l'effet d'une forte pluie, qui s'apparente au phénomène de la "croûte structurale" sahélienne [34], est un phénomène rapide dont les conséquences sur l'infiltration et l'érosion sont importantes et immédiates. Cette "croûte" élimine rapidement l'effet du sarclage sur l'infiltration et la parcelle sarclée se comporte alors comme une parcelle nue à structure lamellaire. Laissée en repos durant douze mois, la parcelle sarclée précédente a été soumise durant deux jours à des fortes pluies simulées sommant 164 mm. Ces pluies n'ont occasionné qu'un ruissellement de 22,3 mm et aucune perte en terre. Ceci prouve qu'en un an, sous l'effet de l'activité biologique, le sol peut reconstituer sa structure et ses propriétés physiques initiales dégradées par le travail du sol et l'impact des pluies.

A Oursi, une expérience similaire a mis en évidence qu'un labour d'une dizaine de centimètres, suivi d'un planage au râteau, a pour conséquence d'augmenter de manière importante la pluie d'imbibition (13,3 mm contre 4,2 mm sur sol nu non travaillé), mais que, très vite, une croûte de battance à texture fine de 1 mm et plus se forme et la parcelle devient alors presque imperméable [29]. On ne sait, dans le cas présent, si le sol récupère rapidement sa structure, mais les observations de terrain indiquent que ce n'est malheureusement pas le cas. En effet, la généralité du phénomène d'encroûtement en zone sahélo-soudanienne [34], la présence de graminées uniquement dans les traces de roues de véhicules ayant brisé la croûte plusieurs années auparavant et la nécessité d'une scarification superficielle pour rendre possible toute germination en milieu naturel, à l'exception des placages et microdunes sableuses [35, 36], indiquent que le phénomène est permanent sans être irréversible. Les mises en défens du Ferlo sénégalais et du Gourma malien indiquent des durées nécessaires à la récupération du sol et de la végétation de l'ordre de la dizaine d'années et plus.

En ce qui concerne les facteurs favorisant la formation des croûtes, Piéri [37], après avoir testé près de 500 échantillons de sols, propose pour juger du maintien de la stabi-

lité structurale, les valeurs du quotient suivant :  $St (\%) = \frac{\text{matière organique} (\%)}{\text{argiles} + \text{limons} (\%)} \times 100$

- si  $St < 5\%$ , l'horizon est déstructuré et présente une grande sensibilité à l'érosion ;
- si  $St < 7\%$ , l'horizon est instable et présente un risque élevé de déstructuration ;
- si  $St > 9\%$ , l'horizon ne présente pas de risque immédiat de déstructuration.

De leur côté, Valentin [38, 39] et Hoogmoed [40] avancent qu'une texture sableuse avec approximativement 90 % de sables et 10 % d'argile ou de limon serait la plus favorable à la formation de croûtes. La présence d'argiles 2:1 accentuerait le phénomène. Enfin, les tests sous pluies simulées incitent Collinet [41] à proposer pour les sols sahéliens l'indice Mg/CEC. Lorsque celui-ci est supérieur à 50 %, les risques d'encroûtement seraient élevés.

Si l'on applique l'indice proposé par Piéri aux sols des deux régions, il en vient :

- pour le sol brun de Sumé avec 4,6 % de M.O et 45 % A+L;  $St = 10$ , il n'y a aucun risque de déstructuration ;
- pour 48 sols bruns du Nordeste (Tableau III) avec 2,16 % kaolinitiques M.O et 44,3 % A+L;  $St = 4,7$ , il y a un risque élevé de déstructuration ;
- pour tous les sols du Nordeste avec 1,8 % M.O et 35 % A+L [8] ;  $St = 5,1\%$ , il y a un risque de déstructuration ;
- pour le sol brun d'Oursi avec 0,7 % M.O et 50 % A+L (Tableau III) ;  $St = 1,4$ , le sol est physiquement dégradé ;
- pour les valeurs moyennes des sols bruns subarides vertiques du N du Burkina Faso [42, 43] soit 0,8 % M.O et 44 % A+L ;  $St = 1,8$ , le sol est physiquement dégradé.

Pour ce qui concerne le rapport Mg/CEC, si pour les sols bruns de Sumé et Oursi qui possèdent des valeurs de Mg échangeables de l'ordre de 3,5 à 4 mEq et des CEC variant de 15 à 32 mEq, les valeurs sont inférieures à 50 % et indiquent peu de risques d'encroûtement, les valeurs de ce rapport calculées à partir des données des cartographies pédologiques du Burkina Faso sont supérieures à 50 % pour de nombreux sols kaolitiques pauvres de la zone sahélo-soudanienne. En revanche, pour l'ensemble des sols du Nordeste, ce rapport moyen est de 26 et éloigne le risque d'encroûtement, ce qui, dans les deux cas précédents confirme les faits d'observation et les tests de simulation de pluies. On peut donc avancer qu'en règle générale les sols de la zone sahélo-soudanienne sont, soit déjà dégradés physiquement, soit enclins à des risques élevés de déstructuration, alors que dans le Nordeste semi-aride, ces risques, lorsqu'ils existent, sont bien moins élevés.

### **Le compactage de l'horizon de surface**

Les principaux sols du Nordeste semi-aride ne présentent pas, grâce à leur structure fragmentaire, et quelle que soit leur texture, à l'exception des solonetz, une forte cohésion de leur horizon superficiel. Le phénomène de compactage vérifié par des valeurs élevées de la densité apparente est rare, même dans le cas de cultures mécanisées. Le compactage du type semelle de labour n'a été observé que sur certains latosols et sols podzoliques à texture sableuse, labourés au tracteur à disques dans les régions les plus humides du Sertão (Piauí et Bahia). Les sols bruns eutrophes et les vertisols de Sumé ont, malgré leur texture relativement lourde, des valeurs de densité apparente ne dépassant pas 1,40, valeurs qui restent plus ou moins constantes en profondeur.

Les analyses physiques des sols de l'étude pédologique de la région centre-nord de la Haute-Volta (Burkina Faso) situés en zone sahélo-soudanienne révèlent des valeurs de densité apparente en moyenne supérieures à 1,70 et pouvant même dépasser 2,0 sous végétation naturelle ou sous jachère [42]. C'est le cas, non seulement des sols ferrugineux tropicaux, mais également des sols bruns du type de ceux d'Oursi (valeurs allant de 1,4 à 2,2 soit une moyenne de 1,66, relevées sur les sols de la Mare d'Oursi, par Leprun [44] et

Sicot, [45]). Le problème du compactage des sols sahéliens est passé en revue par Valentin [46].

Les stabilités structurales, en règle générale, sont médiocres et les perméabilités faibles. En zone soudano-sahélienne, Charreau et Nicou [47] ont mis en évidence que la mise en culture a pour effet, en une dizaine d'années :

- 1) de réduire de 15 % la porosité du sol, ce qui a pour conséquence d'augmenter la densité apparente dont les valeurs dépassent alors 1,50 ;
- 2) de provoquer un doublement et même un triplement de la cohésion du sol ;
- 3) de réduire fortement la stabilité structurale et la perméabilité à l'eau.

### **La mobilisation des constituants granulométriques par l'eau et le vent Les effets de l'érosion**

L'effondrement des structures de surface en milieu naturel peu protégé par la végétation soumis à la mise en culture ou au piétinement des troupeaux, livrées à l'impact des gouttes de pluie, va libérer et mobiliser les constituants granulométriques de l'horizon de surface. Ceux-ci vont être repris par l'eau de ruissellement et le vent et contribuer aux phénomènes d'érosion. Il a été montré qu'à Sumé l'effondrement de la structure était rapide mais facilement réversible dans les conditions naturelles, et que les sols du Nordeste semi-aride ne présentaient pas les croûtes superficielles de leurs homologues sahélo-soudaniens, étaient mieux structurés et plus perméables et qu'ils ruisselaient donc beaucoup moins.

Or, l'eau qui ruisselle entraîne les constituants du sol, libérés par la déstructuration de l'horizon de surface, et constitue la charge solide érodée.

La comparaison des facteurs de la susceptibilité des sols [48] des deux régions semi-arides à l'érosion hydrique a été tentée par ailleurs [49-51]. L'ordre de variation de ces facteurs est donnée dans le Tableau VII.

**Tableau VII.** Ordre de variation des valeurs des facteurs de l'érosion hydrique pour les deux régions. Sources : Nordeste, Leprun [51] ; région sahélo-soudanienne, Roose [5].

Facteurs	Nordeste	Sahélo-soudanien
R (érosivités des pluies)	1 à 5	1 à 10
K (érodibilité du sol)	1 à 10	1 à 12
SL (topographie)	1 à 80	1 à 25
C (couverture végétale)	1 à 1 000	1 à 1 000
P (pratiques culturales)	1 à 20	1 à 10

On peut remarquer que si ces variations sont du même ordre de grandeur, la fourchette de variation des facteurs topographiques SL et des pratiques culturales P est plus large dans le cas du Nordeste en raison du modelé plus pentu et des façons culturales plus variées et associées qu'en Afrique sèche. La remarquable efficacité de la couverture végé-

tale qui, dans les deux cas, peut réduire jusqu'à 1 000 fois les pertes en terre est à souligner. Les données de ce tableau ne permettent en revanche pas de se faire une idée des quantités de terre érodées dans chacune des deux régions. Pour permettre cette comparaison, diverses données de pertes en terre et en eau obtenues à partir de parcelles expérimentales et de petits bassins hydrologiques dans des conditions les plus proches possibles ont été regroupées dans le Tableau VIII. Sous pluviosité de l'ordre de 850 mm, limite du climat semi-aride, les données proviennent de parcelles de 100 m<sup>2</sup> sur sol bruns eutrophes de Serra Talhada, Sertão du Pernambuco [52] et de Linoghin, Burkina Faso [53]. Sous pluviosité moyenne de l'ordre de 400 à 500 mm et sur petits bassins sur sols bruns vertiques, les données sont issues de Sumé, Sertão de la Paraíba [54] et l'Allokoto, Niger [55]. L'examen des chiffres de pertes en terre et en eau de ce tableau indiquent que ces pertes sont plus élevées dans la zone sahélo-soudanienne que dans le Sertão du Nordeste dont les pentes sont pourtant plus accentuées.

**Tableau VIII.** Comparaison des valeurs de pertes en terre et en eau pour des stations comparables des deux régions.

Stations	Serra Talhada (Pernambuco)	Linoghin (Burkina Faso)	Sumé (Paraíba)	Allokoto (Niger)
Superficie (ha)	0,1	0,1	0,42	0,48
Type de sol	Brun	Brun	Brun vertique	Brun vertique
Pluvio. an. (mm)	850	800	540	440
Pente (%)	4,7	1,5	7,0	3,0
Sol nu				
Pertes en terre (t.ha <sup>-1</sup> )	2,45	13,92	0,36	1,10
Pertes en eau (%)	-	35,8	4,4	5,2

Cette tendance plus érosive est conservée à l'échelle des grands bassins hydrographiques de plusieurs milliers de kilomètres carrés : la partie semi-aride du bassin du Rio São Francisco présente une érosion spécifique de 7,18 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> [56] contre 10,4 pour le fleuve Sénégal [57]. Alors que l'érosion dans le Nordeste est de nature hydrique et de forme linéaire fréquente due à des pratiques agricoles erronées comme le travail et le semis exécutés dans le sens de la pente, l'érosion en zone sahélo-soudanienne est à la fois hydrique de forme laminaire généralisée et éolienne et atteint non seulement les sols cultivés, mais également certains milieux naturels fragiles.

## **Les principales dégradations physico-chimiques**

### **L'appauvrissement de surface**

Soumis au ruissellement et à l'érosion différentielle durant la saison des pluies, l'horizon superficiel des sols va perdre des éléments fins et des substances nutritives organiques et minérales. Ces pertes vont naturellement dépendre des conditions pluviométriques, édaphiques et biologiques rencontrées par la pluie à son contact avec le sol.

L'horizon de surface de nombreux sols de l'Afrique de l'Ouest semi-aride sont dits appauvris. Cet horizon est plus sableux et plus lixivié que les horizons sous-jacents. C'est le cas des sols ferrugineux tropicaux lessivés ou non.

L'appauvrissement par l'érosion et le ruissellement peut être évalué en analysant les eaux et les sédiments évacués hors des parcelles ou des bassins expérimentaux. Cette évaluation a été faite à Patu, dans le Sertão du Rio Grande do Norte, sous 750 mm de pluviométrie annuelle sur parcelle de 100 m<sup>2</sup> et pente de 2,5 % d'un sol podzolique rouge-jaune (alfisol) sous cultures associées de maïs, haricot et coton dont la moyenne annuelle des pertes en terre est de 7,51 t.ha<sup>-1</sup> et la moyenne de perte en eau de 33 % des précipitations annuelles [58].

Les pertes moyennes annuelles par érosion solide sont les suivantes en kg. ha<sup>-1</sup> : 0,77 de Ca ; 0,14 de Mg ; 0,16 de K et 70,8 de matière organique (MO).

A Saria (Burkina Faso), sur sol ferrugineux tropical lessivé comparable chimiquement au sol précédent, sous 850 mm de pluviométrie annuelle, la pente de la parcelle cultivée en sorgho étant de 0,7 %, et qui accuse une perte en terre et en eau annuelles de 7,3 t/ha et 24,9 %, les pertes en cations de la charge solide atteignent en kg/ha/an : 6,1 de Ca ; 6,9 de Mg ; 38,2 de K et 257,5 de matière organique [59], soit respectivement 8, 45, 238 et 3,6 fois les taux de Ca, Mg, K et de MO obtenus dans le Sertão du Nordeste.

L'appauvrissement de surface par ruissellement et érosion est donc bien plus important en zone sahélo-soudanienne que dans le Nordeste semi-aride.

### **Les risques de salinisation**

Issues d'eaux de pluies considérées en première analyse comme de composition identique, les rares analyses d'eaux de ruissellement des deux régions indiquent des compositions très proches. Mais, alors que la charge minérale de ces eaux croît rapidement à mesure que l'écoulement vers les rivières, les réservoirs et l'infiltration dans les nappes se prolonge et que l'infiltration s'approfondit dans le Sertão, leur composition évolue très peu en zone sahélo-soudanienne [8].

L'aménagement agricole des eaux de surface du Nordeste semi-aride pose, en raison de la profondeur généralement faible des sols, de leur richesse en cations échangeables et en minéraux altérables, de la présence constante d'affleurements des roches cristallines du socle et de conditions de température et d'évaporation élevées, de réels problèmes [60]. En 1978, la superficie affectée par les problèmes de salinisation atteignait déjà, quelques années seulement après le début de la mise en valeur, 25 % à 30 % des périmètres irrigués [61]. La plupart des zones mises en irrigation par le DNOCS (Département national des ouvrages contre les sécheresses), soit plus de 100 000 ha se sont trouvées rapidement sali-



nisées [62]. Faute de mesures de prévention et de systèmes de drainage efficaces, cette situation s'est encore aggravée aujourd'hui. La totalité des périmètres irrigués de São Gonçalo (Paraíba) soit 1 340 ha, une très forte proportion des périmètres de Custódia (Pernambuco), de Cerafma (Bahia) et de Morada Nova (Ceará) sont atteints par les sels et quasi improductifs. Ce n'est que récemment que le danger de l'utilisation des eaux superficielles transitant par certains sols a été soulevée [4] et la dynamique des sels étudiée [9] (Laraque, 1991), alors que la forte minéralisation des eaux avait été étudiée et signalée dès 1964 par Pioger. Les eaux souterraines sont également souvent très minéralisées. Reboucas [63] indique que 80 % des 130 analyses d'eaux de nappes du bassin du Potiguar (Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte) atteignent ou dépassent la qualification C3 et sont donc très restrictives pour l'irrigation.

A l'exception de certaines zones de sols salés, en particulier au Sénégal, l'usage des eaux superficielles peu minéralisées sahélo-soudaniennes pour l'irrigation ne pose pas de réels problèmes de salinisation.

## **Les leçons issues de la comparaison des facteurs écologiques et des dégradations en milieu semi-aride brésilien et africain**

Les caractéristiques comparées des facteurs de l'écologie et des dégradations des deux régions sont résumées et regroupées dans le Tableau IX.

L'examen de ce tableau et les considérations précédentes permettent de proposer un scénario aux processus de dégradations et de tirer quelques enseignements.

### **Le milieu semi-aride sahélo-soudanien ouest-africain**

Chimiquement pauvres du fait de la nature de leurs roches mères issues d'un épais manteau d'altération latéritique kaolinique, soumis à un climat plus agressif et en particulier à des pluies concentrées et érosives et à des vents puissants soufflant du N.-E., situés aux marges d'un grand désert, les sols de la zone semi-aride ouest africaine sont en majorité de texture sableuse et sont colonisés par une végétation naturelle de type savane arbustive à arborée lâche et localement à des "brousses tigrées" contractées. Cultivés depuis plus de 2 000 ans de manière itinérante, soumis à des feux annuels de fin de saison sèche qui laissent le sol totalement exposé à l'impact des gouttes de pluie, appauvris et dégradés superficiellement par le ruissellement et l'érosion hydrique qui entraînent les éléments nutritifs, cations échangeables et matière organique, ces sols vont perdre leur structure de surface et libérer leur constituants granulométriques. Les éléments fins les plus riches sont exportés par l'érosion et une partie va colmater la porosité intergranulaire des glacis bas et collatures et favoriser l'encroûtement. Une autre partie, surtout constituée de sables, va alimenter des microdunes et des placages sableux mobiles. Il en résulte une forte diminution de l'infiltration et des réserves en eau du sol et une diminution corrélative de la végétation qui se contracte dans les collatures humides. C'est ainsi que se formeront les "brousses tigrées" avec leurs bandes boisées et leurs bandes nues encroûtées alternées animées d'une active dynamique de déplacement [17, 35].

La dramatique péjoration climatique qu'a connue la zone sahélo-soudanienne depuis 1968, et qui se prolonge encore, est particulièrement défavorable à la régénération de la

**Tableau IX.** Caractéristiques comparées des facteurs de l'écologie et des dégradations des deux régions semi-arides.

Facteur	Nordeste	Sahélo-soudanien
Situation géographique Continentalité	Entouré de zones humides Peu accentuée	Au sud du Sahara Accentuée
Climat Erosivité des pluies	Moins contrasté, chaud et évaporant Moins érosives	Plus contrasté, chaud et évaporant Plus érosives
Roches	Cristallines peu altérées dominantes	Sédimentaires et roches altérées dominantes
Tectonique	Active (surrection)	Stable
Modelé et réseau hydrographique	Ondulé, non cuirassé, non dunaire, exoréique	Plat, cuirassé, dunaire, endoréique fréquent
Végétation	<i>Caatinga</i> , forêt xérophyte basse et fermée, régénération rapide	Savane graminéenne ouverte et "brousse tigrée" contractée
Sols	Plus argileux, peu épais, riches, perméables, non encroûtés	Plus sableux, épais, pauvres, kaoliniques, désaturés, encroûtés
Population et activités agricoles	16 hab/km <sup>2</sup> , rurale, agriculture et élevage récents et fixés, brûlis rares	16 hab/km <sup>2</sup> , rurale, agriculture et élevage anciens et itinérants, brûlis annuels
Dégradations physiques	Structure fragmentaire qui s'effondre mais se reconstitue Risques d'érosion hydrique linéaire	Déstructuration de surface, Encroûtement, compactage, Forts taux de ruissellement et d'érosion hydrique laminaire, érosion éolienne
Dégradations chimiques	Risques de salinisation élevés	Appauvrissement superficiel

végétation. L'encroûtement va favoriser un ruissellement qui va retirer au sol 30 % et plus de l'eau qui pourrait s'y infiltrer. Sous de faibles pluviosités, ce manque d'eau ne va pas permettre, les années "normales", de mener les cultures à terme. Les rendements, faibles naturellement, diminuent encore faute de matière organique et d'éléments fertilisants dans l'horizon supérieur. L'encroûtement va empêcher la germination des graines par asphyxie, manque d'eau et résistance à la levée. L'accroissement de la population de la zone sahélo-soudanienne est un phénomène rapide et constant. Dans l'Oudalan, au Nord du Burkina Faso, la population s'est accrue de 64 % entre 1955 et 1974. A cet accroissement a correspondu un accroissement de 75 % des surfaces cultivées gagnées sur les terres en jachère et sur les sols dunaires fragiles [64]. Pour faire face aux besoins de la forte pression démographique, on développe les techniques extensives d'exploitation car les rendements évoluent peu [65]. Pour Piéri [37], la zone sahélo-soudanienne a déjà largement dépassé sa capacité d'accueil basée sur les systèmes d'agriculture et d'élevage traditionnels. Dans le Sahel, les éleveurs, faute de pâturages naturels suffisants (selon

Grouzis [21], la charge de bétail y excéderait déjà de plus de 30 % la capacité de charge calculée sur la base de la production herbacée moyenne), émondent et étêtent les ligneux pour mettre le feuillage à la disposition du bétail. La strate arborée et arbustive, déjà réduite, va particulièrement souffrir de ces pratiques exercées principalement durant les années à déficit climatique accentué. Le phénomène de désertification fondé sur une très faible productivité biologique des zones arides ou semi-arides affectées par les processus de dégradation physique et chimique de la surface du sol, est alors en cours et va gagner inexorablement sur les zones soudanaises plus méridionales. Piéri [37] résume ces processus en zone de savane sahélo-soudanaise de la manière suivante : "l'analyse basée exclusivement sur des observations en champs paysans, souligne l'importance première de la dégradation des propriétés physiques de sols cultivés... Perte en matière organique, pulvérulence, battance, ruissellement et érosion de l'horizon de surface sont en effet les manifestations les plus fréquentes de la dégradation". Pour Brabant [66], le Sahel est l'une des régions africaines qui présentent le pourcentage le plus élevé de terres présentant un état de dégradation fort à extrême, et le surpâturage serait la cause de dégradation dominante en Afrique. Les relations sol-végétation-population des écosystèmes sahélo-soudanais sont en déséquilibre et la région entière est en crise. La première leçon est que même si la cause première de cette crise est climatique, c'est la pression démographique et son corollaire, l'extensification des activités et agricoles et pastorales et des terres de cultures et de parcours, qui en sont la cause profonde. La seconde leçon est que, dans cette zone, il s'agit bien d'un état actuel de dégradation avancée à réparer et non de risques potentiels à prévenir. Cela signifie que le temps est compté et que l'on ne peut se tromper. Enfin, la troisième leçon est que, s'il existe des solutions d'intervention et de réhabilitation, ces solutions sont compliquées par la gravité de la situation et le fait qu'elles mettent en jeu des processus complexes liant le sol, l'eau, la plante et l'homme et qu'elles doivent respecter et composer avec les traditions des pasteurs [67] et des paysans.

### **Le milieu semi-aride du Nordeste brésilien**

La situation du Nordeste semi-aride brésilien est toute autre. Elle est bien moins grave. Même si certaines voix écologiques de la communauté scientifique brésilienne avancent les termes de désertification [68], des pourcentages de milliers de kilomètres carrés de zones dégradées et font une approximation abusive entre Sahara et Ceará, les exemples fournis dans ce travail démontrent la qualité des horizons de surface des principaux sols, l'absence d'encroûtement, la faiblesse des remaniements mécaniques de surface et le transport des matériaux, en particulier par le vent, les taux de ruissellement et d'érosion réduits, la remarquable régénération de la végétation naturelle, faits qui écartent définitivement les critères de désertification quels qu'ils soient. Il existe certes des risques de dégradations environnementales fondées sur la variabilité des pluies, sur l'aridité climatique et édaphique des sols peu épais, sur l'intensification des activités humaines (extractivisme, agriculture et élevage) et en particulier les dégradations dues à l'irrigation (utilisation d'eaux chargées, compactage sous pivot central, absence de drains, excès d'eau) et à des pratiques culturelles erronées (travail et semis dans le sens de la pente). Mais les bonnes propriétés physiques et la fertilité chimique des sols, le potentiel de régénération de la végétation naturelle, l'espace agricole fermé, la faible pression démographique rurale, ne mettent pas l'écosystème *caatinga* en péril.

## Conclusion : les solutions de réhabilitation possibles

A la lumière des enseignements précédents tirés de l'étude comparée des facteurs de l'écologie et des dégradations des deux zones d'études semi-arides, voici quelques suggestions de réhabilitation des terres de chacune des zones.

### La zone semi-aride du Nordeste brésilien

Dans la région semi-aride du Nordeste, il convient de conserver les bonnes propriétés physiques naturelles de surface des sols en veillant à une gestion correcte de leur bilan organique. Toutes les mesures et pratiques culturales qui tendent à réduire le ruissellement et l'érosion et l'exportation de matière organique sous forme soluble et solide est à privilégier. Parmi ces pratiques, qui ont été testées au champ [69], il convient de signaler la conduite du travail du sol et du semis selon les courbes de niveau et non dans le sens de la plus grande pente comme cela se fait préférentiellement dans le Sertão et la pratique des cordons herbeux isohypses qui réduisent dans de grandes proportions les pertes en terre et permettent une infiltration maximale. Des corrélations négatives hautement significatives ont été obtenues aux confins de la zone semi-aride entre les pertes en terre et les taux de matière organique [50]. Les régressions obtenues qui obéissent à des équations du type fonction de puissance ou exponentielle mettent en évidence des seuils critiques d'érosion aux environs de 1,5 % de matière organique. Il convient donc de maintenir l'horizon de surface du sol au dessus de ce seuil. Le défrichement à l'aide d'engins à lame qui retirent les premiers centimètres du sol, pratique courante, est à bannir.

Il convient également de favoriser au maximum l'infiltration par des pratiques du type des billons isohypses cloisonnés qui donnent d'excellents résultats. La mécanisation du travail du sol doit être la plus légère possible et le labour effectué sur sol peu humide.

L'irrigation doit être pratiquée avec prudence en surveillant les quantités d'eau appliquée, la qualité de cette eau, l'efficacité des drains et la mécanisation des travaux. La technique douce du goutte à goutte est conseillée.

La pratique de réhabilitation la plus efficace des sols dégradés du Nordeste sec est la mise en jachère. En quelques années, la régénération de la végétation naturelle ligneuse, la *caatinga* arbustive à base de légumineuses, peut passer à une véritable forêt à strate arborée à espèces nobles [70] capable de reconstituer un horizon humifère. Sur sol brun, à Sumé, une phytomasse de 50 t.ha<sup>-1</sup> a été reconstituée en 5 ans sur une jachère de cultures de tomates [17]. L'introduction de l'Algaroba (*Prosopis juliflora*), légumineuse arborée pâturée associée ou non à une graminée elle aussi pâturée (*Eriochloa polystachya*) permet la récupération des sols salinisés [11, 71].

### La zone semi-aride sahélo-soudanienne ouest africaine

La réhabilitation des terres sahélo-soudanienne et de leur fertilité passe par un arrêt de l'exploitation des espaces ouverts et des milieux fragiles comme les dunes fixées et les "brousses tigrées" et par une intensification des cultures des meilleures terres et en particulier des terres de bas-fonds et cuvettes à sols lourds souvent délaissés. Car, si comme le dit avec raison Piéri [37], "seules la faible intensité culturale et la consommation d'espace permettent aux systèmes de culture traditionnels de se maintenir", la recherche d'autres

systèmes non traditionnels et plus productifs est possible. Le stockage de l'eau dans de petits barrages collinaires type "açudes" et l'introduction de techniques d'irrigation gravitaire simples en aval de ces barrages, à l'exemple de ceux adoptés avec succès par les petits producteurs dans le Nordeste brésilien [26, 72], est une de ces possibilités. La mise en défens des terres et pâturages les plus dégradés et la reprise de la prolongation des jachères deviennent des impératifs. A l'exemple du Nordeste, la clôture et une réglementation des droits sur certaines terres communautaires constituent les premiers stades incontournables à un contrôle de l'espace et des ressources, seuls garants de la conservation de l'écosystème. L'installation et la stabilisation de petites exploitations familiales pratiquant un élevage bovin-ovin intensifié par le recours à des fourrages plantés en décrue ou irrigués plus productifs et une agriculture mixte pluviale et de décrue ou irriguée à partir "d'açudes" communautaires sont des solutions viables possibles. Comme dans le Sertão, la régénération de la végétation ligneuse naturelle et la plantation d'espèces forestières du type *Prosopis* (légumineuses fixatrices d'azote) sont des préalables essentiels à la reconstitution de l'horizon humifère et à des conditions de maintien de la structure empêchant la formation de croûtes. Les croûtes superficielles peuvent être colonisées par une végétation pionnière graminéenne et arbustive après scarification ou piétinement contrôlé du bétail qui auront pour but de briser la croûte et favoriser l'infiltration et la germination. Les bandes boisées des formations de "brousses tigrées" sont à protéger du surpâturage et de la machette des éleveurs. Des pare-feu doivent être réalisés pour protéger les pâturages. L'usage du bois comme unique ressource énergétique domestique doit être abandonné et, comme dans le Nordeste brésilien, substitué le plus possible par le gaz ou le pétrole. Il faut, par des pratiques simples connues et testées [73] réduire le ruissellement et l'érosion.

Comme on le voit, de nombreuses solutions scientifiques et techniques de conservation et de réhabilitation des terres, suggérées par l'examen des écologies et des dégradations de chacune des deux régions, sont viables et fonctionnent. Elles constituent des perspectives nouvelles intéressantes et dynamisantes. Il convient maintenant de les concrétiser, de tester et valider ces techniques en milieu réel. Mais pour cela, il est nécessaire de changer certaines mentalités, de convaincre les décideurs, lesquels ont besoin de l'appui politique... et ce n'est pas le plus facile!

## Références

1. Nimer E. (1979). *Climatologia do Brasil. Recursos Naturais e Meio ambiente*, IBGE, Rio de Janeiro ; 4 (421 p).
2. Le Houérou H.N. (1989). La variabilité de la pluviosité annuelle dans quelques régions arides du monde ; ses conséquences écologiques. In : Bret B., éd. *Les hommes face aux sécheresses. Nordeste brésilien, Sahel africain*. EST-IHEAL/Tastet, Paris : 127-137.
3. Wischmeier W.H. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans Amer Geophys Union Washington* ; 39 : 285-291.
4. Leprun J.C. (1983). Relatório de fim de convênio de manejo e conservação do solo no Nordeste brasileiro (1982-1983). Rapp. multigr. SUDENE-ORSTOM, Recife (290 p).
5. 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, n° 78 (108 p).

6. Gallardo Y. (1989). Sur la prédictibilité des pluies au Nordeste, au Sahel et au NW de l'Inde. In : Bret B., éd. *Les hommes face aux sécheresses. Nordeste brésilien, Sahel africain*. EST-IHEAL/Tastet, Paris : 215-222.
7. Millot G. (1964). *Géologie des argiles*. Masson et Cie, Paris (499 p).
8. Leprun J.C., da Silveira C.O. (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, ORSTOM, Paris : 131-151.
9. Molle F. (1991). Caractéristiques et potentialités des "açudes" du Nordeste brésilien. Thèse Sciences, Université Montpellier II (380 p).
10. UNITED STATE. (1954). Salinity Laboratory Staff. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. USDA, Agriculture Handbook n° 60.
11. Leprun J.C., Duarte M.J. (1983). Aproveitamento das águas e dos solos salinizados no cultivo da algarobeira - *Prosopis Juliflora* (Sw) Dc - no Nordeste semi-árido brasileiro. 1° Congresso brasileiro de forrageiras e pastagens nativas, Olinda, PE (8 p).
12. 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. Rapport. final A.T.P. Piren, Rapp. multigr. ORSTOM, Recife (25 p).
13. Blot A. (1970). Les nappes phréatiques du Sénégal oriental. Données géochimiques sur les eaux. Rapp. ORSTOM, multigr., Dakar (34 p).
14. Blot A. (1980). L'altération climatique des massifs de granite au Sénégal. Trav. et Doc. ORSTOM, Paris, n° 144 (434 p).
15. Leprun J.C. (1979). Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse, transformations, dégradation. Thèse doct., Strasbourg, 1979 et Mém.Sc. Géol. Strasbourg, n° 59 (224 p).
16. F.A.O. (1975) *Formulation of a tropical forest monitoring project*, FAO/UNEP, Rome.
17. Leprun J.C. (1992). Étude de quelques brousses tigrées sahéliennes : structure, dynamique, écologie. In : *L'aridité, une contrainte au développement*. Didactiques, ORSTOM, Paris : 221-244.
18. Hayashi I. (1981). Plant communities and their environments in the caatinga of Northeast Brazil. Latin American studies, 2, Univ. Tsukuba Skura-Muraz Ibarahi, Japon.
19. Duque J.G. (1980). *O Nordeste e as lavouras xerófilas*. 3° ed. Fundação Guimarães Duque, Coleção Mossorense., Ed. Escola sup. Agric., Mossoro (238 p).
20. Lamothe M., Bourlière F. (1978). *Problèmes d'écologie : structure et fonctionnement des écosystèmes terrestres*. Masson, Paris.
21. Claude J., Grouzis M., Milleville P. (1991). *Un espace sahélien : la Mare d'Oursi - Burkina Faso*. ORSTOM, Paris (241 p).
22. Bailly C., Barbier C., Clément J., Goudet J.P., Hamelo O. (1982). Les problèmes de la satisfaction des besoins en bois en Afrique tropicale sèche. Connaissance et incertitudes. *Bois For Trop* ; 197 : 23-43.
23. EMBRAPA/SNLCS. ( 1981). Mapa de solos do Brasil a 1/5 000 000. Rio de Janeiro.
24. Silva S.B.R., Riché G., Tonneau J.P., de Souza Neto N.C., da Silva F.H.B., da Silva A.B., da Silva J.C. de A. (1993). Zoneamento agroecológico do Nordeste : caracterização dos recursos naturais e sócioeconômicos das unidades geoambientais. Petrolina, PE. EMBRAPA-CPATSA/ Recife, EMBRAPA-SNLCS, v. 1.
25. Boulet R., Fauck R., Kaloga B., Leprun J.C., Riquier J., 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.
26. Molle F., Cadier E. (1992). *Manual do pequeno açude. Construir, conservar e aproveitar pequenos açudes no Nordeste brasileiro*. SUDENE-ORSTOM-TAPI, Recife (521 p).

27. Hénin S. (1938). Étude physico-chimique de la stabilité structurale des terres. Thèse Doct. Université Paris ; monographie publ. Lab. de Rech. agr. Paris.
28. Asseline J., Valentin C. (1978). Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, sér. hydrol, XV ; 4 : 321-349.
29. Chevallier P. (1982). Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi, Haute Volta). Cah ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX ; 4 : 253-297.
30. Rodier J.A. (1975). *Évaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain*. Travaux et documents ORSTOM, Paris (121 p).
31. Valentin C., Collinet J., Albergel J. (1994). Assessing erosion in West African savannas under global change : overview and research needs. Intern. Congr. Soils, Acapulco, Mexique, à paraître.
32. Casenave A., Valentin C. (1992). A runoff capacity classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *J Hydrology* ; 130 : 231-249.
33. Cadier E. (1991). Hydrologie des petits bassins du Nordeste brésilien semi-aride. Thèse Sciences Université de Montpellier II (396 p).
34. Casenave A., Valentin C. (1989). *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Didactiques ORSTOM (229 p).
35. 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 tigrée" dans le Gourma malien. Rapp. multigr. ORSTOM-DGRST., Dakar (45 p).
36. Barry J.P., Boudet, G., Bourgeot A., Celles J.C., Coulibaly A.M., Leprun J.C., Manière R. (1983). Étude des potentialités pastorales et de leur évolution en milieu sahélien au Mali. Rapp. ACC-GRIZA-LAT, Minist. Recherch. et Indust. Départ. Recherch. et Technol. dans les zones trop. arides (114 p).
37. Piéri C. (1989). Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au Sud du Sahara. Ministère de la Coopération/CIRAD, Paris (444 p).
38. Valentin C. (1981). Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région sub-désertique (Agadez-Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie de l'eau. Thèse 3<sup>e</sup> cycle Univ. Paris VII, Coll. Etudes et Thèses, ORSTOM, Paris, 1985 (259 p).
39. Valentin C. (1986). Surface crusting of arid sandy soils. In : Callebaut F., Gabriels D., De Boot M., eds. *Assessment of soil surface sealing and crusting*. Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Erosion and Soil Conservation : 40-47.
40. Hoogmoed W.B. (1986). Crusting and sealing problems on west African soils. In : Callebaut F., Gabriels D., De Boot M., eds. *Assessment of soil surface sealing and crusting*. Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Erosion and Soil Conservation : 48-55.
41. Collinet J. (1988). Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest. Évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse doctorat, Strasbourg (521 p).
42. Boulet R. (1968). Étude pédologique de la Haute-Volta. région. Centre Nord. Rapp. multigr. ORSTOM, Dakar (351 p).
43. Boulet R., Leprun J.C. (1970). Étude pédologique de la Haute-Volta. Région Est. Rapp. multigr. ORSTOM, Dakar (331 p).
44. Leprun J.C. (1977). Esquisse pédologique à 1/50 000 des alentours de la Mare d'Oursi (Haute-Volta) avec notice explicative et analyse des sols. A.C.C DGRST Lutte contre l'érosion dans l'Oudalan (Haute-Volta). Rapp. multigr. ORSTOM, Paris (53 p).
45. Sicot M. (1977). Évaluation de la production fourragère herbacée en 1976. Rapp. ORSTOM, Ouagadougou (45 p).
46. Valentin C. (1994). Sealing, crusting and hardsetting soils in sahelian agriculture. Intern. Symp. on "Sealing, crusting, harsetting soils : productivity and conservation", 7-11 february 1994, Brisbane, Australie.

47. Charreau C., Nicou R. (1971). L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest Africaine et ses incidences agronomiques. *Agronomie Tropicale* ; 44 (4) : 255-262.
48. Wischmeier W.H., Smith D.D. (1960). A universal soil loss estimation equation to guide conservation farm planning. Inter Congr Soil Sci 7, Madison ; vol. 1 : 418-425.
49. Leprun J.C. (1982). Comparação dos fatores da erosão hídrica no Nordeste brasileiro seco e na África do oeste seco. Consequências. Ier Symp. brésilien du tropique semi-aride, Olinda, Pernambouc, Ann. (19 p).
50. Leprun J.C. (1988). Matière organique et conservation des sols. Exemples brésiliens. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. ; vol. XXIV, 4 : 333-334.
51. Leprun J.C. (1989). Étude comparée des facteurs et des effets de l'érosion dans le Nordeste du Brésil et en Afrique de l'Ouest. In : Bret B., ed. *Les hommes face aux sécheresses. Nordeste brésilien, Sahel africain*. EST-IHEAL/Tastet, Paris :139-153.
52. Lago J.C. (1981). Erodibilidade de um solo podzólico vermelho-amarelo eutrofico pelos metodos da chuva natural, simulador de chuvas e nomograma no Sertão do Pernambuco. Tese Mestrado Univ. Fed. Rural do Pernambuco (78 p).
53. Piot J., Milogo E. (1981). Étude du ruissellement et de l'érosion. Rapport multigr. DGRST/ACC Lutte contre l'érosion dans l'Oudalan (Haute-Volta) (16 p).
54. Cadier E., Freitas J.B., Leprun J.C. (1983). Bacia experimental de Sumé (PB). Instalação e primeiros resultados. SUDENE, sér. Hidrologia, 16, Recife (87 p).
55. Delwaulle J.C. (1973). Résultats de six ans d'observations sur l'érosion au Niger. *Bois et Forêts des tropiques*, Nogent sur Marne ; 150 : 15-36.
56. HIDROSERVICE (1974). Projeto Sobradinho. Estudo sedimentométrico. Rapp. multigr. REP 26/74, São Paulo (31 p).
57. Orange D. (1990). Hydrologie du Fouta-Djalon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest). Thèse Sciences Université Louis Pasteur, Strasbourg (220 p).
58. de Moura R.B.M., de Oliveira M. (1989). Estimativa das perdas de solo por erosão em um podzólico vermelho-amarelo (alfisol) na região do médio oeste do estado do Rio Grande do Norte. Rapp. ESAM:CNPq, maio de 1989 (112 p).
59. Roose E.J. (1981). Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Étude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matière sous végétation naturelles ou cultivées. Coll. trav. et Doc., ORSTOM, Paris (569 p).
60. Pioger R. (1964). *Ressources en eau du Nord-Est du Brésil : les eaux fluviales*. Recife, SUDENE-FAO (111 p).
61. Damasceno J.H. (1978). Informe de salinidade e drenagem nos perímetros irrigados do Departamento nacional de Obras contra as secas. Anais da Reunião sobre salinidade em áreas irrigadas. Fortaleza, 4 et 5-05-1978. SUDENE : 113-123.
62. DNOCS (1971). Projeto de irrigação do açude São Gonçalo. VI. Levantamento detalhada dos solos. Hidroservice. Rapp. interne DNOCS.
63. da Reboucas A.C. (1973). Le problème de l'eau dans la zone semi-aride du Brésil. Évaluation des ressources, orientation pour la mise en valeur. Thèse Université de Strasbourg (251 p).
64. Milleville P. (1980). Étude d'un système de production agro-pastoral sahélien de Haute-Volta. I. Le système de culture. Ouagadougou, ORSTOM (66 p).
65. Grouzis M., Albergel J. (1989). Du risque climatique à la contrainte écologique : incidence de la sécheresse sur les productions végétales et le milieu au Burkina Faso. In : Eldin M., Milleville P. eds. *Le risque en agriculture*. ORSTOM, Paris, à travers champs : 243-254.
66. Brabant P. (1992). La dégradation des terres. In : Afrique contemporaine. L'environnement en Afrique. *La documentation française* ; 161 : 90-108.
67. Boutrais J. (1992). L'élevage en Afrique tropicale : une activité dégradante. In : Afrique contemporaine. L'environnement en Afrique. *La documentation française* ; 161 : 109-214.



68. de Vasconcelos Sobrinho J. (1982). Processos de desertificação ocorrentes no Nordeste do Brasil : sua gênese e sua contenção. Recife, PE, SUDENE (101 p).
69. Leprun J.C., da Silveira C.O., Sobral Filho R.M. (1986). Efficacité des pratiques culturales antié-rosives testées sous différents climats brésiliens. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXII ; 2 : 223-233.
70. Sà I.B., Fotius G.A., Riché G.R. (1994). Degradação ambiental e reabilitação natural no trópico semi-árido brasileiro. Conf. nac. e semin. latino-amer. da desertificação, Fortaleza, CE, 7 a 11-11-1994 (in press).
71. Yadav J.S.P. (1975). Improvement of saline alkali soils through biological methods. *Indian Forester* : 385-395.
72. Courcier R. (1993). Du goutte à goutte aux systèmes paysans. Le cheminement et les leçons du projet "Petite irrigation-Nordeste" de la Coopération Technique franco-brésilienne. Rapp. SUDENE-MAE français, Salvador, janvier 1993 (50 p).
73. Roose E., Piot J. (1984). Runoff, erosion and soil fertility restoration on the Mossi Plateau (Central Upper-Volta). Proc. Harare Symp., Zimbabwe. IASH ; 144 : 485-498.