

ÉVALUATION DES ETATS DE SURFACE A PARTIR D'IMAGES SPOT

Le cas des sols dénudés de la région de Maroua

par Christine TRIBOULET, télédétection, ORSTOM



Sol Hardé en début de saison des pluies.

RÉSUMÉ

Cette étude a pour but de mesurer la superficie des surfaces dénudées de la région de Maroua (Nord-Cameroun) pour estimer la part occupée par les terres Hardé. A cette fin, on utilise trois images Spot XS, de janvier 87, octobre 88 et novembre 88.

Toutes les surfaces dénudées ont des caractéristiques communes qui sont reflétées par la signature radiométrique. L'une de ces surfaces est choisie comme référence pour identifier les valeurs radiométriques des pixels qui la composent. On procède ensuite à une partition de l'ensemble des pixels qui constituent chaque image en séparant ceux qui ont une signature identique, ou voisine, de ceux de la zone de référence. Par traitement, les pixels ainsi mis de côté sont dénombrés et, leur surface unitaire étant connue, la superficie totale dénudée de la région en est déduite. On peut alors procéder à des comparaisons de superficies par date. Par ailleurs, on peut représenter sur une carte tous les pixels correspondant aux surfaces dénudées.

Il faut tenir compte des variations de superficie issues de changements temporaires ou de certaines confusions possibles. C'est ainsi que, bien évidemment, la superficie des surfaces dénudées est bien plus importante en fin de saison

sèche qu'en fin de saison des pluies, surtout lorsque celle-ci a été favorable à la recolonisation partielle des sols Hardé par la végétation herbacée. Le rapport de superficie entre les sols dénudés et la superficie totale est de 13 % en janvier 87, de 3,5 % en octobre 88 et de 5,4 % en novembre 1988.

Par ailleurs, différents types de sols peuvent avoir des états de surface dénudés et une signature radiométrique identique à celle des sols Hardé, à condition qu'ils aient été compactés en surface (pistes de troupeaux,...) et qu'ils soient de couleur claire très réfléchissante. Mais si les images Spot ne permettent pas actuellement de cartographier toutes les surfaces Hardé et uniquement celles-ci, elles permettent d'en faire une bonne estimation, en particulier lorsque vient de finir la saison des pluies.

Sur la région couverte par l'image Spot, d'une superficie de 330 000 ha, le pourcentage de sols Hardé a été estimé à 5,5 %, ce qui correspond à 18 000 ha.

Dans l'avenir, il serait possible de faire un suivi pluriannuel des surfaces de sols Hardé en effectuant une étude sur leur localisation, leur évolution et leur dynamique spatiale par rapport aux activités humaines (villes et villages, pistes à bétail, mises en culture) et aux groupes pédologiques.

ABSTRACT

The objective of this study was to measure the surface area of bare soils in the Maroua region (Northern Cameroon) in order to estimate the land portion occupied by Hardé soils. Three Spot XS-band imagery of January 1987, October 1988 and November 1988, were used.

All the bare areas have common characteristics which are reflected by radiometric signs. One of these areas is taken as a reference point for the identification of the radiometric value of the pixels of which it is composed. One then proceeds with the distribution of all the pixels which make up each image by separating identical or near identical pixels from those of the reference point zone. By classification, the pixels thus selected are counted, and because their unit surface area is known, the total surface area of the bare soils of the region is determined. One can then proceed to compare bare areas by date. On the other hand, all the pixels corresponding to areas without vegetation can be represented on a map.

Surface area variation due to temporal changes or to certain possible error must be taken note of. This is why the area not covered by vegetation is greater at the end of the dry season than at the end of the rainy season, especially if the

area in question had earlier been favoured by a partial recolonization of the Hardé soils by herbaceous vegetation. The land area relationship between bare soils and the total surface area was 13% in January 1987, 3.5% in October 1988 and 5.4% in November 1988.

On the other hand, different types of soil could possess a bare condition and have an identical radiometric sign to that of Hardé soils if only such soils had been compacted on the surface (animal passage,...) and are of a clear, very reflectant colour. But even if spot images do not actually permit a complete cartography of Hardé, the images allow us to have a good estimation, especially immediately after the rainy season.

On the region covered by Spot images (surface area of 330,000 ha) the percentage of Hardé soils had been estimated at 18,000 ha.

In the future, it would be possible to have a multiannual follow up of the surface of Hardé soils through a study of their location, evolution and spatial dynamic activities with respect to human activities (townships and villages, cattle passages, recultivation) and with respect to soil types.

Cette étude a pour objectif, en premier lieu, d'extraire de l'image, par des mesures radiométriques, les sols qui correspondent à des états de surface dénudés pour cartographier et essayer d'estimer les pourcentages des terres Hardé.

Ensuite, elle évalue les superficies couvertes par ces sols dénudés pour suivre leur évolution dans le temps.

Trois images ont été exploitées, qui correspondent aux dates suivantes : 15 janvier 1987, 11 octobre 1988, 11 novembre 1988.

Sur le terrain et sur l'image, la surface dénudée, dite « hardé de Balaza », qui se trouve en bordure de la piste reliant Balaza-Lamido (route Maroua-Bogo) au dôme de Djoulgouf, est utilisée comme référence. C'est une très grande surface dénudée (3 km de long sur 800 m de large environ), facilement repérable sur l'image satellite (tirage photo ou visualisation sur écran). Elle est indiquée par deux flèches sur la composition colorée n° 1, p. 34.

La démarche suit trois étapes :

- Identifier les valeurs radiométriques des surfaces dénudées.
- Isoler ces surfaces sur les trois images.
- Mesurer l'extension de ces surfaces pour les comparer entre elles.

IDENTIFICATION DES VALEURS RADIOMÉTRIQUES

Chaque « objet » (constituant du paysage), présent à la surface du sol, réfléchit une certaine quantité de l'énergie lumineuse qu'il reçoit. Le satellite émet une quantité donnée d'énergie et enregistre le pourcentage qui lui revient. Cette énergie lumineuse est convertie en énergie électrique, elle-même codée et stockée plus tard sur des bandes magnétiques. C'est cette énergie électrique codée, composée de trois chiffres, que l'on appelle signature radiométrique. Une signature correspond à un objet donné, dans un état donné et à un moment donné.

Les trois chiffres qui composent la signature sont compris entre 0 et 255. Ce sont les réponses des objets dans les longueurs d'onde des trois canaux Spot:

- Canal XS1 0,5 à 0,59 nm longueur d'onde du vert.
- Canal XS2 0,61 à 0,68 nm longueur d'onde du rouge.
- Canal XS3 0,79 à 0,89 nm longueur d'onde du proche infrarouge.

Il existe plusieurs types de sols qui présentent des états de surface dénudés : les planosols, les vertisols dégradés et les sols qui ne sont compactés qu'en surface (pistes d'atterrissage non goudronnées, grands passages de troupeaux, terrains de football, etc.).

Malgré leurs différences pédologiques et les processus qui ont donné cet état de surface, celui-ci présente certaines caractéristiques communes aux trois catégories énumérées ci-dessus :

- surfaces très réfléchissantes ;
- surfaces dures, nues, très planes, sans fentes de retrait ;
- et, en général, surfaces de couleur claire (à l'état sec).

La signature radiométrique des surfaces dénudées reflète ces caractéristiques et ne prend pas en compte les données concernant les couches non superficielles du sol.

On peut se reporter, pour comparaison, aux courbes correspondant aux signatures d'un état de surface dénudé et d'une surface couverte par de la végétation active (cf. tableau I et fig. 1, p. 32).

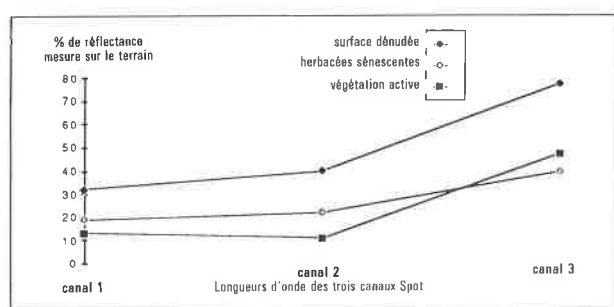
Cette signature, enregistrée par le satellite et codée sur les bandes magnétiques, peut également être enregistrée au sol, à l'aide d'un radiomètre de terrain de type Cimel (radiomètre portable, étalonné sur les longueurs d'onde de Spot, cf. photo, p. 36).

TABLEAU I

Mesures des pourcentages de réflectance dans les longueurs d'onde des trois canaux Spot
Mesures sur le terrain

	Canal 1	Canal 2	Canal 3
Surface dénudée	32	40	78
Herbacées sénescentes	18,9	22	40
Végétation active	13,21	10,7	47,8

FIGURE 1
Signatures spectrales des différents composants d'un paysage où dominent les sols Hardé

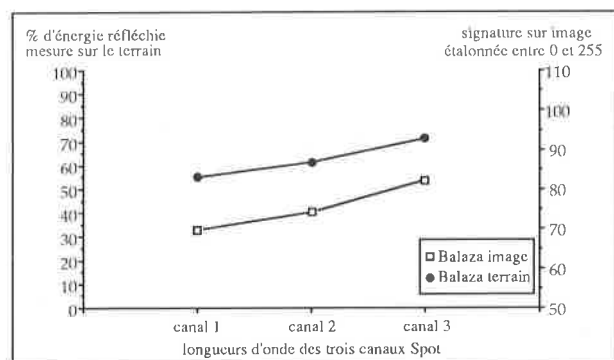


Ci-dessous, pour comparaison, les signatures du sol Hardé de Balaza selon le satellite (mesure sur image) et selon le radiomètre de terrain.

TABLEAU II

Comparaison de la réponse spectrale du sol Hardé de Balaza sur le terrain et sur l'image

Canaux	XS1	XS2	XS3
Balaza image	83	87	92,75
Balaza terrain	32,4	40,2	53,5



Le décalage entre les deux signatures résulte de différences techniques. Il est dû à la taille du champ de vision du capteur, beaucoup plus réduit dans le cas du Cimel, et donc de la quantité d'objets constituant le paysage, pris en compte lors de l'enregistrement de la signature. La date de mesure doit également jouer.

ISOLEMENT SUR IMAGES DES SURFACES DÉNUDÉES

Ayant repéré les valeurs numériques qui composent la signature du sol Hardé de Balaza-Lamido sur les bandes magnétiques, on procède, avec un programme de l'ordinateur de traitement d'images, à une partition de l'ensemble des points codés qui constituent l'image : les pixels (pixel = contraction de « picture element », c'est-à-dire élément d'image élémentaire).

Une image entière compte environ 3 000 lignes et 3 000 colonnes (selon l'angle de prise de vue) et donc 10 millions de pixels.

Nous travaillons sur trois images, pour éviter les phénomènes momentanés, et leur comparaison n'est possible que si elles ont rigoureusement les mêmes limites et le même nombre de pixels.

Après les corrections géométriques nécessaires à ces comparaisons, et avec la perte d'informations que cela suppose (redécoupage des bords), nos images comptent maintenant 2 973 lignes et 2 776 colonnes, soit 8253048 pixels ou 330 122 hectares

En même temps que la partition citée ci-dessus, on effectue une modification des valeurs de ces pixels pour changer leur aspect sur la visualisation écran.

On souhaite obtenir une image binaire (bicolore), noire et blanche (ou blanche + 1 couleur), qui corresponde aux classes : sols plus ou moins couverts par de la végétation, sols dénudés. Pour cela, on attribue aux pixels ayant une signature de type sols nus (73 à 255), la valeur 255 : c'est à dire blanc ; à tous les autres, la valeur 0 qui les fait apparaître en noir.

FIGURE 2
Comparaison des courbes de signature du sol Hardé de Balaza sur le terrain et sur l'image

**MESURE DE L'EXTENSION
DES SURFACES DÉNUDÉES**

Le programme de traitement permet d'obtenir un histogramme des fréquences des valeurs, sur lequel est indiqué le nombre total de pixels attribués à chacune des deux couleurs.

La surface d'un pixel de Spot étant de 20 mètres sur 20 (en mode multispectral), soit 400 m², on peut en déduire la superficie totale des états de surface ayant une signature de type sols nus.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

■ **Calcul des superficies**

Les superficies dénudées ou non, aux trois différentes dates, sont présentées dans le tableau III.

TABLEAU III

**Superficies des états de surface
ayant une signature de sols nus**

XS2	Janvier 1987	Octobre 1988	Novembre 1988
Nombre total de pixels	8 253 048	8 253 048	8 253 048
Superficie totale image (ha)	330 122	330 122	330 122
Nombre de pixels blancs	1 074 749	285 398	448 205
Superficie dénudée (ha)	42 990	14 416	17 928
Nombre de pixels noirs	7 178 299	7 967 650	7 804 843
(dont nuages)	0	9 077	0
Superficie non dénudée (ha)	287 132	318 706	312 193
Rapport de superficie sols dénudés/ superficie totale	13 %	3,46 %	5,43 %

Ces superficies sont cependant à réviser légèrement à la baisse, principalement en janvier et novembre, pour prendre en compte la marge d'erreur due aux rivières asséchées (mayos) dont les lits ont une signature spectrale identique à celle des sols Hardé. Sols Hardé et fonds de mayos ont, en effet, certaines caractéristiques d'état de surface en commun : leur couleur claire et réfléchissante, leur absence (totale pour les mayos et quasi totale pour les sols Hardé) de

végétation, l'absence de fentes de retrait qui pourraient engendrer des ombres, etc. Ce sont ces caractéristiques communes, en saison sèche, qui sont cause de la confusion.

La distinction serait toutefois possible, en saison des pluies, lorsque tous les mayos sont en eau : l'eau absorbe l'énergie lumineuse et les mayos ressortent alors dans les valeurs basses.

Nous ne disposons pas ici d'image enregistrée en cours de saison des pluies, susceptible de nous permettre de lever cette ambiguïté des signatures.

Mais puisque la surface des mayos ne varie pas, ou très peu, d'une année sur l'autre, ou d'un bout à l'autre de la saison sèche, cette confusion ne nous empêche pas de mesurer l'évolution, aux différentes saisons, des superficies dénudées ; les rapports seront comparables entre eux.

Les différences entre les rapports de superficie (sols dénudés/non dénudés) sur les images étudiées ont plusieurs origines:

- **Les changements saisonniers** : au fur et à mesure que progresse la saison sèche, les surfaces dénudées augmentent, ce qui est dû à la sénescence, puis à la disparition de la strate herbacée. Celle-ci est en particulier favorisée par le pâturage.

- **Des changements annuels** : la forte saison des pluies de 1988 (832 mm) explique la diminution des surfaces dénudées par rapport à l'année précédente, plus sèche (597 mm en 1987).

C'est ainsi qu'ont été observées, en 1988 et 1989, des remises en cultures de surfaces abandonnées au cours des années précédentes.

Pour un suivi exact des surfaces dénudées, il faudrait, chaque année :

- une image de fin de saison des pluies (si possible toujours à la même date) ;

- une image, enregistrée en cours de la même saison des pluies, pour « sortir » les superficies en eau et rectifier les résultats obtenus.

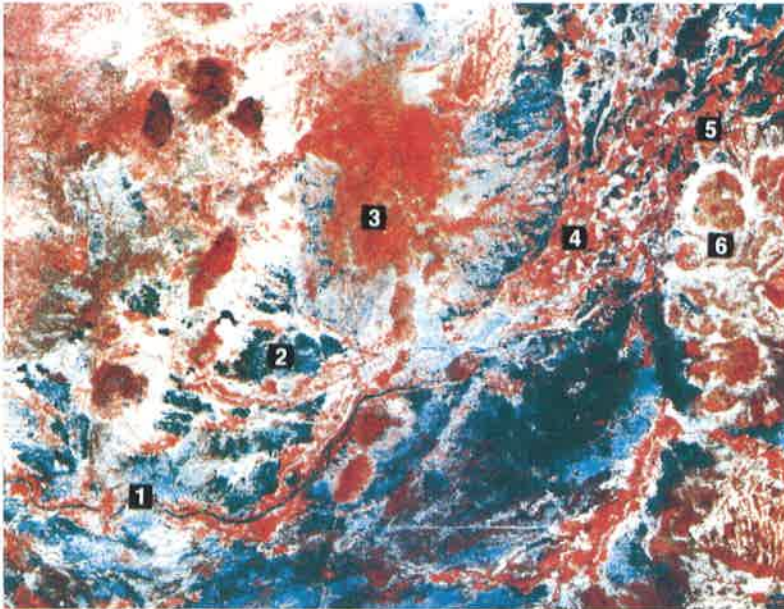
L'acquisition annuelle permettrait de poursuivre cette étude sur l'évolution des superficies dénudées dans le temps par une étude sur leur localisation, leur évolution et leur dynamique spatiale. Par « dynamique spatiale », nous entendons l'extension ou la réduction de ces surfaces, en relation avec la localisation des villes, les formes édaphiques, la proximité des terrains cultivés ainsi que les zones pastorales et les aires de passage du bétail.



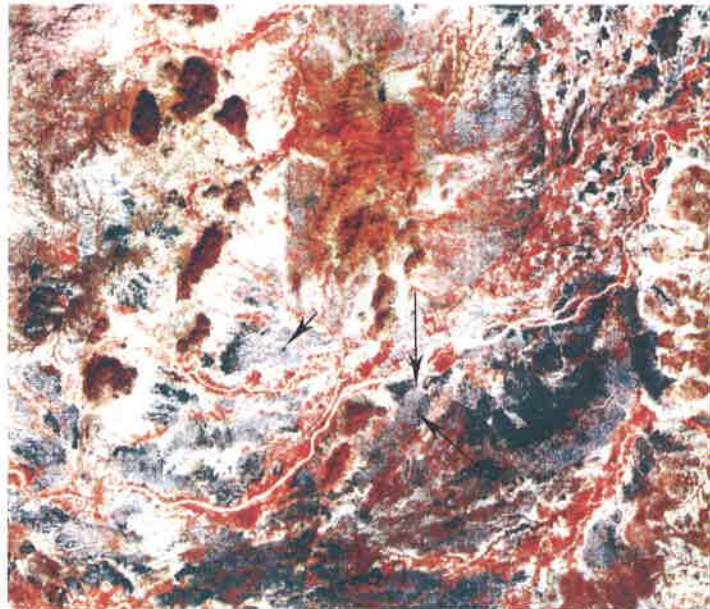
Composition colorée n° 1
Région de Maroua, janvier 1987. Les flèches indiquent les sols Hardé de Balaza.



Photo aérienne du petit rectangle entouré en noir sur la composition colorée n° 1. Sur celle-ci les forêts et boisements urbains apparaissent en rouge, les toits de tôle des quartiers sans arbres en bleu, la colline en brun et les zones dénudées en blanc, y compris le lit sableux des rivières asséchées.



Composition colorée n° 2
Région de Maroua, octobre 1988 : la partie d'image couvre environ 40 × 60 km. Nous sommes en début de saison sèche. En bleu, les zones qui absorbent l'énergie lumineuse. Il s'agit des rivières qui sont encore en eau, comme le Mayo Tsanaga (1) et des parties qui viennent d'être brûlées avant repiquage du sorgho « muskwari » (2). Les zones couvertes de végétation encore verte apparaissent en rouge : il s'agit, en particulier, des collines couvertes de boswellia (3), des piémonts occupés par le parc à faidherbia (4) et des vallées où l'on trouve des vergers et des jardins maraîchers (5). Les zones dénudées qui réfléchissent la lumière sont en blanc (6).



Composition colorée n° 3
Région de Maroua, novembre 1988 : si on compare cette image à celle d'octobre 1988, on constate une atténuation du rouge qui correspond au dessèchement de la végétation, sauf le long des vallées (vergers, champs d'oignons irrigués, parcs à faidherbia). Les grosses taches bleues se sont piquetées de rouge et sont ainsi devenues violettes, le sorgho « muskwari » s'est en effet développé. Sur vertisol (karal); il apparaît en mauve foncé (flèches longues); sur sols Hardé (karal-hardé), en mauve clair (flèche courte).

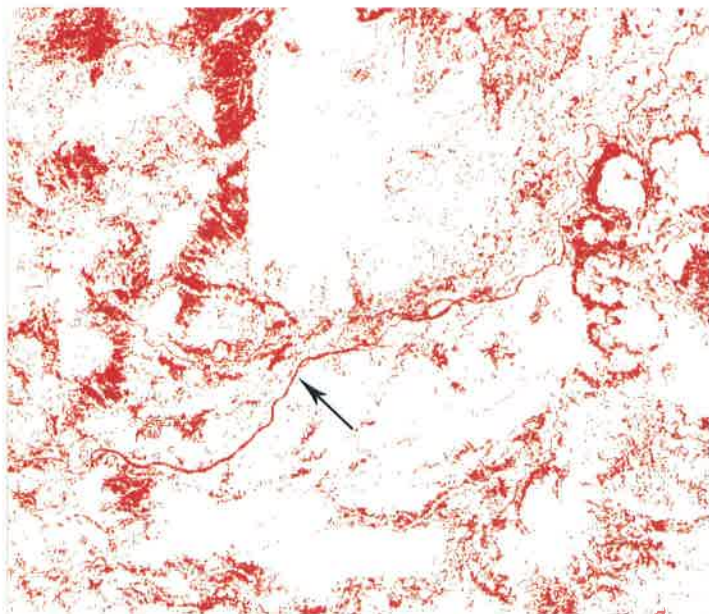


Image bicolore n° 1

Région de Maroua, janvier 1987 : représentation obtenue à partir de la composition colorée n° 1, en imprimant en rouge les pixels qui correspondent aux surfaces dénudées, les autres étant laissées en blanc. On reconnaît le tracé du mayo Tsanaga (flèche), dont le lit sableux et desséché a une signature comparable à celle des sols Hardé.



Image bicolore n° 2

Région de Maroua, octobre 1988 : représentation obtenue à partir de la composition colorée n° 2, en imprimant en noir les pixels correspondant aux surfaces dénudées. En cette fin de saison des pluies, on peut considérer qu'il ne s'agit que des sols Hardé. Mais une partie d'entre eux qui sont couverts d'une fine végétation ne sont pas pris en compte. En faisant un comptage automatique de ces pixels, on obtient une valeur minorée de la surface occupée par les sols Hardé. Par rapport à l'image bicolore n° 1, les lits des rivières ont disparu. Le sol Hardé en « forme de trèfle », visible en haut à droite, entoure le dôme de Balaza.

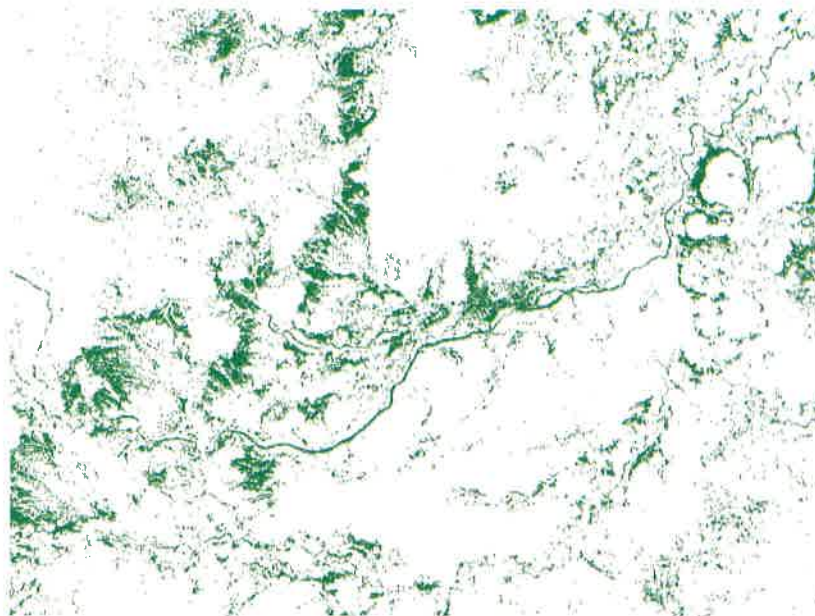


Image bicolore n° 3

Région de Maroua, novembre 1988 : représentation obtenue à partir de la composition colorée n° 3, en imprimant en vert les pixels correspondant aux surfaces dénudées. Par rapport à l'image bicolore n° 2, le nombre de ceux-ci est passé de 285 000 à 450 000 (sur l'ensemble de l'image Spot, dont on ne représente ici que les 2/3). D'une part, les rivières se sont asséchées et ressortent parmi les zones nues. D'autre part, le bétail et le feu ont éliminé la maigre végétation des terres Hardé qui en étaient encore recouvertes. C'est à cette époque qu'il est le plus réaliste d'estimer les surfaces. Ici, elles représentent 18 000 ha, soit 5,5 % de la superficie couverte par toute l'image.

■ Résultats graphiques

Nous avons présenté pp. 34 et 35 trois compositions colorées et trois images bicolores:

- **La composition colorée n° 1** est une composition standard, c'est-à-dire que le canal 1 est en bleu, le canal 2 est en vert et le canal 3 est en rouge.

- **Les images bicolores** représentent les zones sans végétation aux trois dates dont nous disposons.

On notera la « rétraction » des superficies dénudées entre les mois de janvier et octobre, due à l'arrivée de la saison des pluies et aussi à l'abondance des précipitations cette année-là.

Octobre est le mois où les superficies sans végétation sont les moins importantes. A cela trois raisons :

- la saison des pluies, qui a relancé la croissance de la végétation herbacée ;
- les cultures de saison des pluies, qui commencent à être suffisamment couvrantes pour influencer la réponse des sols cultivés ;
- enfin, le défrichage et le brûlis, à cette époque, des dernières parcelles à être mises en culture (celles

destinées au repiquage du muskwari) car leur surface noire est alors très absorbante.

L'utilisation des images Spot ne permet pas de cartographier exactement les terres Hardé (toutes les terres Hardé et seulement les terres Hardé). Elles peuvent cependant être utilisées pour cartographier et mesurer la superficie des sols dépourvus de végétation, ce qui peut constituer une estimation de la superficie des terres Hardé.

Sur la région couverte par l'image Spot, la superficie des sols dénudés varie de 14 500 ha (octobre 1988) à 43 000 ha (janvier 1987). Celle des terres Hardé est comprise dans cette fourchette. A notre avis, une bonne estimation est cependant donnée par la superficie mesurée en octobre 1988, période à laquelle le très léger tapis de graminées qui recouvre les terres Hardé a, en général, disparu. Leur superficie serait alors de 18 000 ha, ce qui représente 5,5 % de la superficie couverte par l'image. ■

N.B. Le trait horizontal qui apparaît sur les documents du mois d'octobre est un défaut d'enregistrement du satellite.

Christine TRIBOULET
ORSTOM, 70-74, route d'Aulnay
93143 Bondy (France)

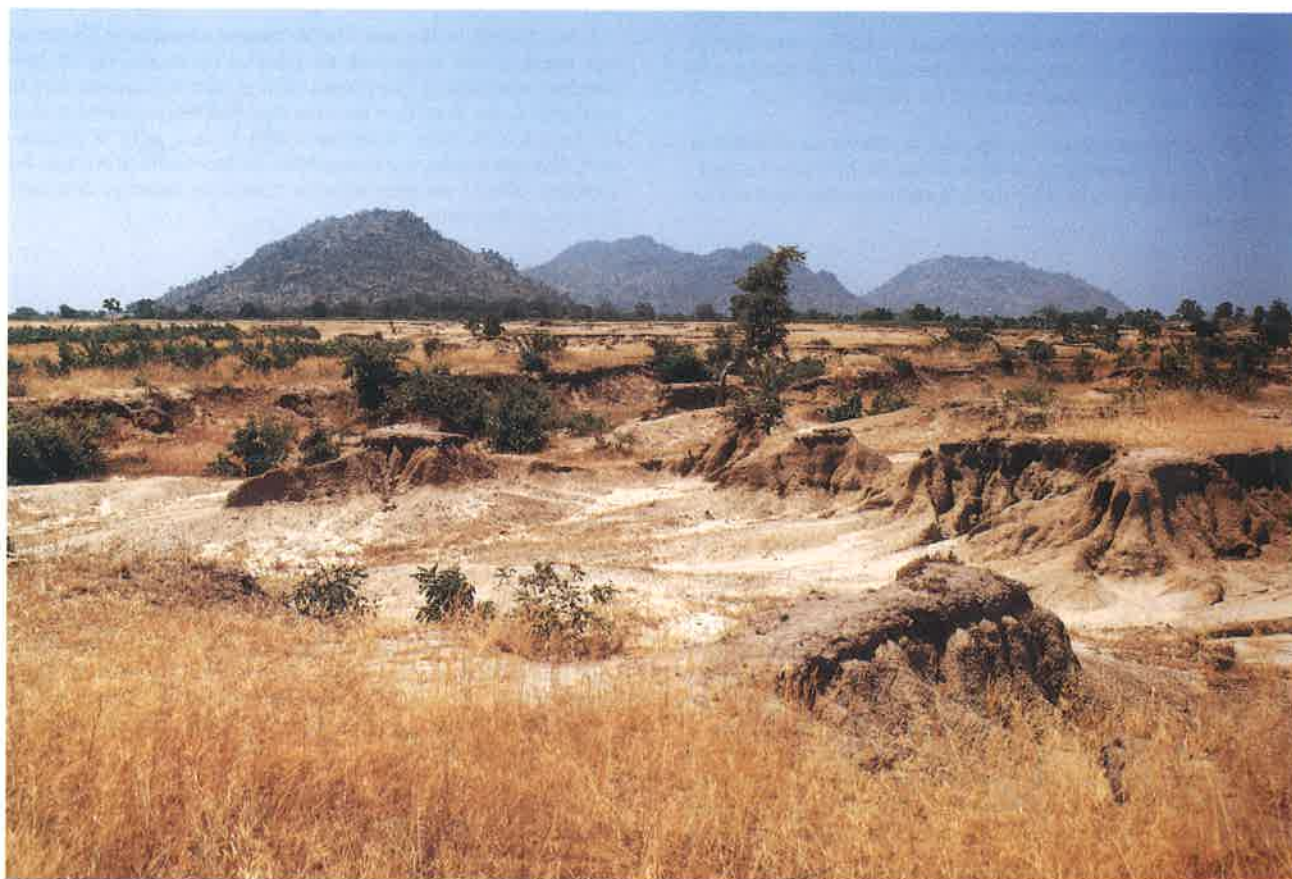


Enregistrement de la signature radiométrique d'un sol dénudé (à gauche) ou en culture irriguée (à droite) à l'aide d'un radiomètre Cimel, manipulé à 6 m du sol.

HYDRODYNAMIQUE D'UN SOL HARDÉ DU NORD-CAMEROUN

Caractéristiques et comportement

par Lamine SEINY-BOUKAR, pédologue, IRA
et Roger PONTANIER, pédologue, ORSTOM



Les forts ruissellements constatés sur Hardé entraînent la formation de griffes d'érosion et causent des inondations en aval des bassins, même de taille modeste.

RÉSUMÉ

Les sols Hardé sont dérivés de vertisols aux caractéristiques très homogènes sur l'ensemble du profil (40 % d'argile smectitiques, pH neutre, 0,8 % de matière organique, CEC de 35 meq/100 g). Ils se distinguent de ceux-ci par la dégradation de l'horizon superficiel sur une profondeur de 10 à 20 cm ; cette dégradation se manifeste par une structure massive et l'absence de pores et d'activité biologique. En surface, la pellicule de battance est renforcée par une couche d'algues de couleur sombre. Dans cet horizon dégradé, les fentes ont disparu, la teneur en argile est proche de 10 %, la matière organique en relation avec la disparition de la végétation tombe à 0,5 % et la capacité de stockage de l'eau, disponible pour la végétation, à 7 mm pour 10 cm de sol (contre 20 mm pour le vertisol). L'érosion dégage parfois 1 m de sol jusqu'à atteindre l'horizon calcique à nodules calcaires.

La technique de simulation de pluie a permis de déterminer en mode synchrone les quantités d'eau infiltrées et le coefficient d'efficacité de la pluie dans la recharge des réserves en eau du sol.

Par ailleurs, des suivis pluriannuels en mode diachrone permettent de mesurer en conditions naturelles les lames d'eau ruisselées, la quantité d'eau infiltrée, ainsi que la redistribution spatiale et temporelle de l'eau du sol par la méthode des profils hydriques (sonde à neutrons).

On voit ainsi que les sols Hardé perdent jusqu'à 50 % d'eau par ruissellement sur une année ; de ce fait, en année déficitaire, ce ne sont que 250 mm d'eau qui s'infiltrent. Pour des pluies très violentes, l'infiltration baisse jusqu'en dessous de 30 %.

L'humectation des sols Hardé dépasse rarement 25 cm et leur stock d'eau augmente en général de moins de 25 mm pendant une saison des pluies (soit quatre fois moins que le vertisol). C'est ainsi que les sols Hardé offrent rarement plus de deux à trois mois de disponibilité en eau pour la végétation, chaque année, sur l'ensemble de leur profil alors que les vertisols offrent en permanence quelques réserves disponibles en profondeur.

ABSTRACT

Hardé soils are derivatives of vertisols, of very homogeneous characteristics through the entire profile (40 % smectitic clay, neutral pH, 0,8 % organic matter, CEC of 35 meq/100g). The difference between the two is the superficial degradation of the horizon of the Hardé soil to a depth of 10 to 20 cm usually seen as a massive structure with neither pores nor any biological activity. On the surface, a film of compact material is reinforced by a dark colour layer of algi. All cracks have disappeared from this degraded horizon and clay content is close to 10 %. The organic material content is reduced to 0.5 % while the available water retention capacity for the vegetation drops to 7 mm/10 cm of soil (as opposed to 20 mm to 10 cm for vertisols). Sometimes erosion takes away up to 1 m of the soil to reach the calcic nodulous horizon.

The rainfall simulation technique was used to determine, in a synchronous mood, the amount of infiltrated water and the rainfall efficiency coefficient in the recharge of soil water reserves.

On the other hand, a diachronous pluriannual follow up under natural conditions makes it possible to measure water runoff, infiltration, and the spatial and temporal soil water redistribution using the water profile method (gamma neutron probe).

The results of this study showed that Hardé soils could lose up to 50 % of their water annually through runoff. As a result of this, only 250 mm of water infiltrate during a year of insufficient rainfall. During violent rainfalls, infiltration could even drop below 30 %.

The depth of moistened Hardé soils scarcely goes beyond 25 cm and the water stock increase of these soils is generally less than 25 mm through out the rainy season. This is 4 times less than the case of vertisols. This explains why Hardé soils rarely have more than 2 to 3 months of available water in their profile for the vegetation each year while vertisols permanently have some water reserves available in the deeper layers of the soil.

Nous présentons ici les résultats d'une recherche entreprise dans le Nord-Cameroun, concernant la caractérisation des propriétés physico-hydrauliques et du régime hydrique d'un sol Hardé assez répandu dans le Nord-Cameroun. Celui-ci, représentatif du faciès extrême de dégradation des vertisols à pédoclimat sec (Unité cartographique n° 29, BRABANT et GAVAUD, 1985, et Série Boboyo, MARTIN, 1963), qui couvrent une superficie de 170 000 ha dans la province de l'Extrême-Nord, a été étudié dans la zone test de Mouda où il a déjà fait l'objet d'études pluridisciplinaires (PONTANIER *et al.*, 1985 ; CCE, 1988 ; THEBE, 1987 ; SEGHIERI, 1990 ; SEINY-BOUKAR, 1990). Le sol de ces milieux Hardé, caractérisés par une végétation principalement herbacée très clairsemée, uniquement présente en saison des pluies, et un peuplement ligneux extrêmement faible et dispersé, se singularise par un dysfonctionnement hydrique très prononcé. Il en résulte une forte perte des eaux de surface par ruissellement, une faible pénétration de l'eau à l'intérieur du profil et une forte reprise par l'évaporation de l'eau infiltrée ; on doit noter, par ailleurs, une très forte sensibilité à l'érosion hydrique de ce type de sol. Nous n'aborderons pas ici les causes et raisons principalement d'origine anthropique, qui ont conduit à une telle dégradation de ces savanes sur vertisol en bon état car elles ont été présentées par ailleurs (SEGHIERI, 1990 ; DONFACK, *in* : CCE 1988). Notre propos consiste donc ici à présenter brièvement les traits les plus originaux de ce type de sol, que les paysans, dans un avenir proche, devront réhabiliter en raison d'une pression sur les terres sans cesse croissante (MASSE, *et al.*, 1990). Les résultats mis en avant ici ont été collectés entre 1985 et 1987. Nous tenterons, chaque fois que possible, de les comparer à ceux du faciès non dégradé de la série des vertisols.

LES CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DU SOL HARDE

La figure 1, p. 41, montre les caractéristiques physico-hydrauliques principales du sol Hardé de Mouda. Ce sol est hérité des vertisols à pédoclimat sec, dont les caractéristiques analytiques présentent une grande homogénéité sur l'ensemble du profil en ce qui concerne la texture (40/45 % d'argiles smectitiques), le pH voisin de la neutralité, la matière organique (0,8 à 1 %) et la CEC proche de 35 meq/100 g. En saison sèche, ce sol est caractérisé par de larges fentes en surface. Le sol Hardé se distingue de ce dernier par la dégradation et la troncature de l'épipédon ; la profondeur atteinte par la dégradation est le plus souvent comprise entre 10 et 20 cm et se manifeste par une structure massive, l'absence de pores et d'activité biologique. En surface, la pellicule de battance est presque généralisée, souvent renforcée par une couche d'algues (cf. photo, p. 42). Dans cet horizon dégradé, où les fentes ont disparu, la teneur en argile n'est plus que de 10 à 15 %, la matière organique en relation avec la disparition de la végétation devient moins abondante (0,4-0,5 %). Toujours dans cet horizon superficiel, la capacité de stockage de l'eau disponible pour la végétation (point de flétrissement à -1,6 Mpa) devient faible : 7 mm pour 10

cm de sol contre 15 à 20 mm pour le faciès non dégradé. Les indices de l'érosion en nappe sont apparents, la troncature du sol peut atteindre, et mettre à nu, l'horizon calcique à nodules calcaires qui se trouve souvent au-delà d'un mètre dans le faciès en bon état.

COMPORTEMENT HYDRIQUE DU SOL HARDE

Deux approches méthodologiques complémentaires ont été utilisées pour déterminer les caractéristiques principales du comportement hydrique du sol Hardé.

- La première a fait appel aux techniques de la simulation de pluie (ASSELIN et VALENTIN, 1978 ; CHEVALIER, 1982 ; PONTANIER, *et al.* 1985 ; TRIVISAN, 1986 ; ESCADAFAL, 1989) et a permis de déterminer, en mode synchrone, les quantités d'eau infiltrées ou le coefficient d'efficacité de la pluie dans la recharge des réserves en eau du sol (KE %).
- La deuxième a consisté à mesurer par des suivis pluriannuels, en mode diachrone et sous conditions naturelles, les lames annuelles ruisselées et la quantité d'eau infiltrée ; de plus, elle a permis de suivre la

redistribution spatiale et temporelle de l'eau du sol par la méthode des profils hydriques mesurés à la sonde Solo 25.

■ Reconstitution des réserves en eau du sol

C'est l'un des aspects essentiels du comportement hydrique du sol ; celui-ci dépend de l'état de surface (CASENAVE et VALENTIN, 1989), du couvert végétal et de l'état d'humectation du sol.

Ainsi, sur de petites parcelles de ruissellement de 1 m² installées sur le sol Hardé, suivies durant deux saisons des pluies (1986 et 1987), a-t-on pu établir, pour 49 événements représentant 90 % environ des hauteurs précipitées au cours des deux années, les corrélations suivantes :

● Avant le 1^{er} août :

$$(1) \quad LR = 0,43 \text{ PU} + 0,25 \text{ IK} - 6,89 \quad (r^2 = 0,88)$$

● Entre le 1^{er} et le 31 août :

$$(2) \quad LR = 0,35 \text{ PU} + 0,24 \text{ IK} - 4,44 \quad (r^2 = 0,86)$$

● Après le 31 août :

$$(3) \quad LR = 0,47 \text{ PU} + 0,17 \text{ IK} - 5,28 \quad (r^2 = 0,92)$$

Avec :

LR = Lamme ruisselée (mm)

PU = Pluie totale précipitée (mm)

IK = Indice d'humectation de Kohler (*in* THEBE, 1987), calculé de la façon suivante :

$$(4) \quad \text{IK}_n = (\text{IK}_{n-1} + \text{P}_{n-1}) e^{-\alpha t}$$

où :

IK_{n-1} = indice d'humectation avant la pluie n

P_{n-1} = hauteur de la pluie précédant la pluie n (mm)

t = temps en jours et fractions de jour séparant la pluie n et la pluie n-1

α = coefficient de calage (α = 0,5 dans notre cas)

Ces résultats obtenus en mode diachrone montrent qu'à l'échelle de l'année, les sols Hardé peuvent perdre de 40 % à 50 % d'eau par ruissellement [équations (1) et (3)] et que, pour certaines années très déficitaires, ce sont seulement 250 à 350 mm qui s'infiltrèrent dans ce sol Hardé.

Les valeurs d'eau infiltrée dans le sol, mesurées en mode synchrone lors des différentes campagnes de simulation de pluie, confirment ces chiffres ; en effet, pour des séquences de pluies de récurrence d'une année sur dix environ, la lame d'eau infiltrée dans le

même sol Hardé ne représente que 30 % de l'eau précipitée (P = 112 mm) dont la moitié avec une intensité supérieure à 70 mm/h (PONTANIER *et al*, 1985 ; THEBE, 1987).

■ L'évolution des réserves hydriques dans le sol et le temps

Au cours des années d'observation, jamais nous n'avons vu un sol Hardé d'origine vertisolique s'humecter au-delà de 25 à 30 cm, ni le stock d'eau totale augmenter de plus 25 mm. Si l'on prend comme référence le vertisol non dégradé, dont le sol Hardé est issu par détérioration, on constate que le premier peut s'humecter jusqu'à 70 cm et qu'il peut surtout accroître, au cours de la saison, son stock d'eau très au-delà de 100 mm, soit quatre fois plus que celui du sol Hardé.

On peut voir, sur la figure 2, les évolutions comparées des profils hydriques du vertisol non dégradé et du sol Hardé et, sur la figure 3, celles des réserves en eau totale.

■ Les disponibilités en eau pour la végétation

Du concept du continuum sol-plante-atmosphère de PHILIP (1966), on retiendra la notion de disponibilité en eau ; celle-ci s'exprime par :

$$(5) \quad R_d = \int_0^z (H_i - H_{pF}) dz$$

où :

H_i = humidité volumique du sol à l'instant i de la tranche de sol dz

H_{pF} = humidité volumique équivalente au point de flétrissement

HILLEL (1974), FLORET et PONTANIER (1982), CHAIEB (1989) font remarquer que si, habituellement, on retient comme valeur limite du point de flétrissement, l'eau qui est à un potentiel de Φ = -1,6 mPa, il existe de nombreuses espèces en zone aride dont le point de flétrissement est beaucoup plus bas ; néanmoins, nous retiendrons ici cette valeur.

C'est ainsi que le sol Hardé, tant pour l'horizon 0-40 cm que pour la tranche de sol 0-80 cm, offre rarement plus de deux à trois mois de disponibilités en eau pour la végétation, alors que le vertisol non dégradé dont il est issu présente, lui, cinq à six mois de disponibilités dans la tranche 0-40 cm et douze mois sur l'ensemble du profil (réserve disponible permanente en profondeur).

CARACTÉRISATION

FIGURE 1
Caractéristiques physico-hydriques du sol Hardé d'origine vertisolique de Mouda

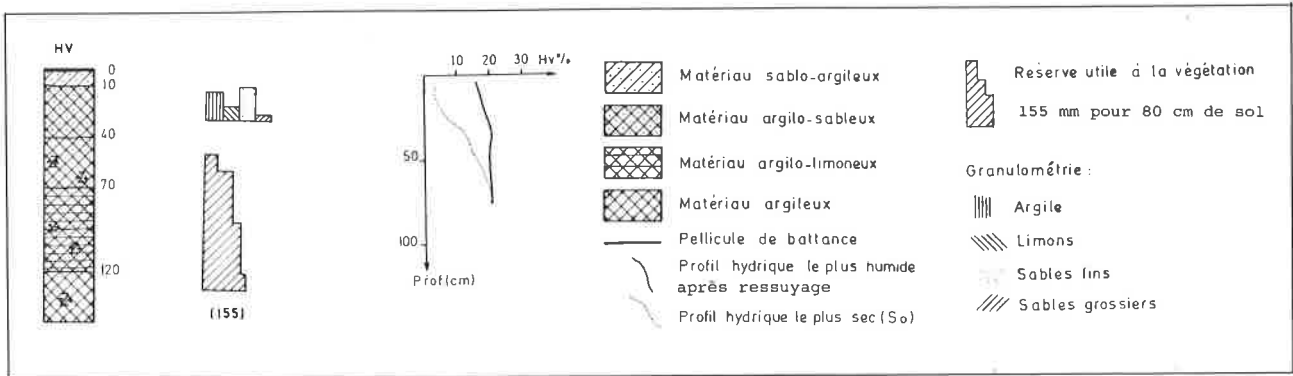


FIGURE 2
Comparaison au cours de l'année 1986 des profils hydriques d'un vertisol et de son faciès de dégradation (Hardé)

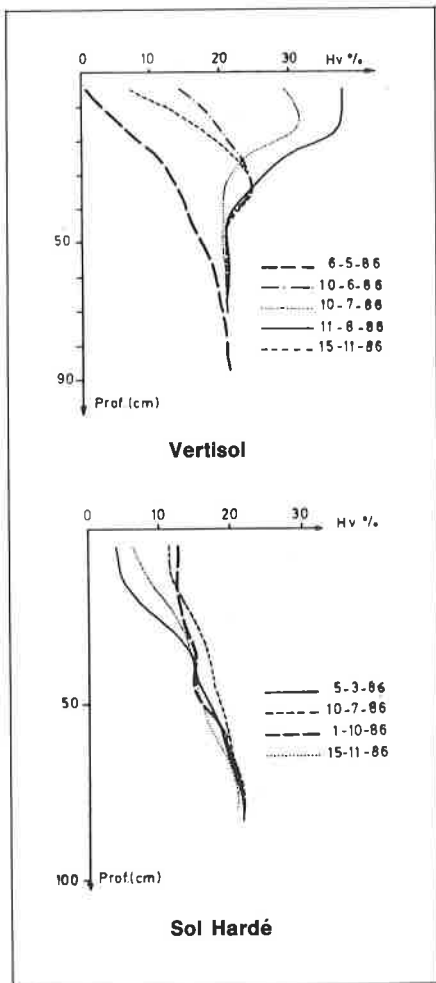
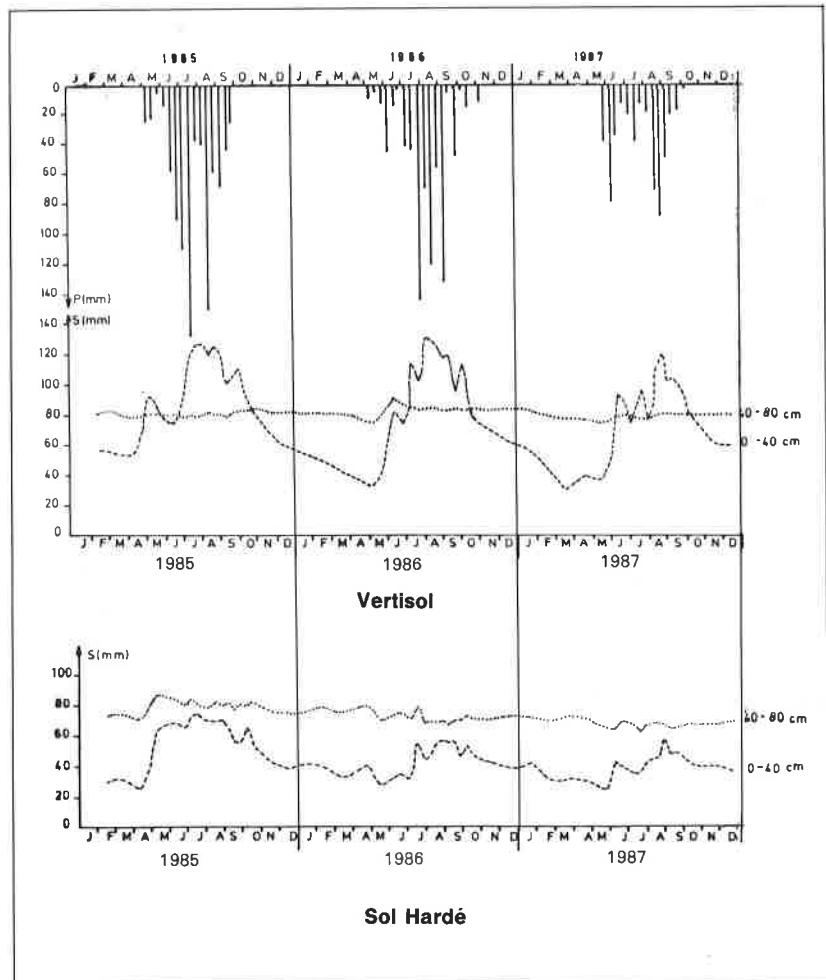


FIGURE 3
Comparaison de l'évolution annuelle des réserves en eau totale (S,mm) d'un vertisol et de son faciès de dégradation (Hardé)



CONCLUSION

Sur le tableau ci-dessous nous avons porté, pour comparaison, les comportements hydriques du sol Hardé et du vertisol en bon état. Le dysfonctionnement hydrique du sol Hardé y est largement mis en évidence. Ainsi, l'infiltration est-elle en moyenne de 50 à 60 % moindre sur le sol Hardé que sur le vertisol non dégradé, ceci étant lié à une déstructuration de l'épipédon en relation avec la baisse de la matière organique (de 0,8 à 0,4 %), la généralisation des pellicules de battance et la disparition des fentes de retrait. La profondeur maximale humectée est le double sur le vertisol modal ; quant au stockage maximal de l'eau, il est de trois à quatre fois plus important sur le vertisol ; ceci est dû à la reconstitution de réserves localisées plus profondément, en relation avec une meilleure structuration et grâce à la présence de fentes.

celle qui intéresse surtout la végétation herbacée, le vertisol présente une durée de disponibilité en eau deux à trois fois plus longue que celle du sol Hardé ; par ailleurs, on doit noter que l'aridité d'origine climatique est profondément modifiée par les formes édaphiques. Ainsi, l'aridité climatique est-elle en terme de durée diminuée de 50 % dans le cas des vertisols non dégradés en raison de leurs propriétés physico-hydriques mais, en revanche, accentuée de 25 % dans le cas des sols Hardé ; la raison en est leur faible aptitude à l'infiltration liée à une dégradation physique, d'origine anthropique, de leur horizon de surface. ■

Lamine SEINY-BOUKAR
Institut de la Recherche Agronomique
BP 33 Maroua (Cameroun)

Roger PONTANIER
ORSTOM, 7, rue Teimour, BP 434 1004 El Menzah
Tunis (Tunisie)

Comparaison des régimes hydriques d'un sol Hardé d'origine vertisologique et du vertisol non dégradé

	Vertisol non dégradé	Sol hardé d'origine vertisologique
Profondeur maximale humectée (cm)	60 à 70	25 à 35
Coefficient d'efficacité de la pluie Ke (%) (sous pluies naturelles)	75 à 85	55 à 65
Accroissement maximal des réserves en eau du sol (0-80 cm) en mm	90 à 120	25 à 35
Disponibilité en eau pour la végétation point flétrissement à $\Phi = -1,6$ mPa (en mois)		
• pour 0-40 cm	5 à 6	2 à 3
• pour 0-80 cm	12	2 à 3

Reprenant les concepts d'aridité climatique et d'aridité édaphique de FLORET et PONTANIER (1982 et 1984), on constate qu'au sens d'AUBREVILLE, il y a sécheresse si la pluviosité mensuelle est inférieure à 30 mm (soit huit mois par an à Maroua) et qu'il y a sécheresse climatique si la pluviosité mensuelle est inférieure à l'Evapo Transpiration Potentielle (ETP) Penman mensuelle (soit neuf mois par an à Maroua). La sécheresse édaphique se manifeste par l'incapacité du sol à restituer son eau aux végétaux ; on a considéré, dans notre cas, qu'une eau retenue par le sol à des potentiels inférieurs à -1,6 mPa ne pouvait plus être facilement accessible à la végétation. Ainsi, constate-t-on que, pour la tranche de sol 0-40 cm,



En début de saison des pluies, croûte d'algue dans une petite dépression d'un sol Hardé.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASSELIN (J.) et VALENTIN (C.), 1978. — Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. Vol XX n° 4, 1978, pp. 321-349.
- BRABANT (P.), GAVAUD (M.), 1985. — Les sols et les ressources en terres du Nord-Cameroun. Carte et notice explicative n° 103. MESRES-IRA, Yaoundé. ORSTOM, Paris. Ed. de l'ORSTOM, Paris, 285 p. + 6 cartes couleur h. t.
- CASENAVE, (A.) VALENTIN (C.), 1989. — Etats de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. CEE/ Editions de l'ORSTOM, Paris, 229 p.
- CEE, 1988. — Utilisation et conservation des ressources en sol et en eau (Nord-Cameroun). Rapport final. Contrat TSD.A.216.CAM (DG 12.CEE)- MESRES-ORSTOM-CNRS.
- CHAIEB (M.), 1989. — Influence des réserves hydriques du sol sur le comportement comparé de quelques espèces végétales de la zone aride tunisienne. IRA Médenine Tunisie, ORSTOM, CEPE/CNRS, Montpellier, 292 p.
- CHEVALIER (P.), 1982. — Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi, Haute-Volta). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. XIX n° 4, pp. 253-297.
- ESCADAFAL (R.), 1989. — Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Coll. Etudes et Thèses. Ed. ORSTOM, Paris, 1989, 313 p.
- FLORET (Ch.), PONTANIER (R.), 1982. — L'aridité en Tunisie présaharienne. Travaux et Documents de l'ORSTOM n° 150, Paris, 544 p.
- FLORET (Ch.) et PONTANIER, (R.), 1984. — Aridité climatique, aridité édaphique. Bull.Soc.Bot.Fr., 131, Actual. Bot., 1984 (2/3/4) : 265-275.
- HILLEL (D.), 1974. — L'eau et le sol. Principes et processus physiques. VANDER, 288 p.
- MASSE (D.), DONFACK (P.), OUMAR (H.), SEINY-BOUKAR (L.), TCHEUFFA P., 1990. — Réhabilitation et utilisation des terres marginales du Nord-Cameroun. Rapport de campagne 1989. IRA/CEE, 58 p. + annexe.
- MARTIN (D.), 1963. — Carte pédologique du Nord-Cameroun. Feuille KAELE à 1/100 000. IRCAM-ORSTOM, Paris. 100 p. multigr. + 1 carte couleur h.t.
- PHILIPS (J.R.), 1966. — Plant water relations. Some physical aspects. Ann. Rev. Plant. Physiol. 17 : 245-268.
- PONTANIER (R.), MOUKOURI-KUOH (H.), SAYOL (R.), SEINY-BOUKAR (L.), THEBE (B.), 1985. — Apport de l'infiltromètre à aspersion pour l'évaluation des ressources en sols des zones soudano-sahéliennes du Cameroun. Journées Hydrologiques de Montpellier. Colloques et Séminaires ORSTOM : 165-189.
- SEGHIERI (J.), 1990. — Dynamique saisonnière d'une savane soudano-sahélienne au Nord-Cameroun. Thèse USTL, Univ. Montpellier II, 200 p.
- SEINY-BOUKAR (L.), 1990. — Régime hydrique et dégradation des sols dans le Nord-Cameroun. Thèse doctorat 3ème cycle, Univ. Yaoundé, 226 p. annexe.
- THEBE (B.), 1987. — Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun, bassin versant de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelle. Thèse USTL, Montpellier, 306 p.
- TREVISAN (D.), 1986. — Comportement hydrique et susceptibilité à l'érosion des sols limoneux cultivés. Thèses Université d'Orléans, 244 p.
- VALENTIN (Ch.), 1978. — Problèmes méthodologiques de la simulation de pluies. Application à l'érodibilité des sols. Actes du colloque « Erosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen ». Strasbourg, INRA, pp. 117-122.

HYDROLOGIE D'UN MICROBASSIN VERSANT OÙ DOMINENT LES SOLS HARDÉ

par Bernard THÉBÉ, hydrologue, ORSTOM



Vue générale du bassin versant de Mouda après les feux de saison sèche.

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'un projet européen, l'auteur s'est intéressé à l'hydrodynamique des sols Hardé et a mené une étude hydrologique sur un bassin de 18 km² représentatif de la région de Maroua, près du village de Mouda.

A l'intérieur de celui-ci, a été défini un microbassin de 3 000 m², délimité par une levée de terre. Celui-ci est occupé par des sols Hardé à différentes phases de dégradation. Il est équipé de postes pluviométriques, pluviographiques, d'une station hydrométrique et de tubages pour le suivi neutronique de l'humidité du sol.

On a tout d'abord déterminé les caractéristiques hydrodynamiques propres à chaque type de sol représenté sur le microbassin. Ceci a été fait, d'une part, en saison sèche, à l'aide d'un infiltromètre à aspersion qui reproduit artificiellement des pluies ayant les mêmes caractéristiques que les averses naturelles et, d'autre part, en saison des pluies, où ces mesures ont été vérifiées avec un dispositif de suivi de ruissellement sur parcelles de 1 m². Le tout a permis d'établir un modèle qui donne le ruissellement en fonction de la hauteur de l'averse, de l'état antérieur d'humectation du sol et d'un indice de couvert végétal.

Le modèle permettant le transfert des résultats de la simulation de pluie sur 1 m², au bassin versant, consiste à déterminer la fonction de production du bassin. La lame ruisselée calculée (Lrc) est égale à la somme des Lrci de

chaque unité cartographique, multipliée par leurs surfaces respectives. La fonction de calage permet de passer de la lame ruisselée observée à celle qui est calculée, de façon à tenir compte de l'effet de pente, de l'état de la végétation (plus ou moins sèche), de la répartition des sols par rapport aux rigoles de drainage.

Ayant ainsi quantifié le ruissellement potentiel des différentes zones du bassin, les hydrogrammes globaux de crue de celui-ci ont été observés à l'exutoire.

Il a été remarqué que, sur ce bassin, une averse ayant une pointe unique d'intensité engendre un hydrogramme à deux maxima.

Il a été déduit que la première pointe de crue est provoquée par les eaux de ruissellement d'une unité amont, représentative des sols Hardé, dont les tests au simulateur ont montré la rapidité de réaction à une averse. La deuxième pointe de crue résulte de l'adjonction du ruissellement sur le reste du bassin, dont la capacité d'infiltration est supérieure, en partie à cause de la végétation. Cette hypothèse a été vérifiée par traçage au sel et à la fluorescéine.

Finalement, la fidélité du mini-simulateur de pluie dans la reproduction des averses a été prouvée sur sol à couvert faible de végétation comme les sols Hardé, alors qu'au-delà d'un couvert herbacé de 30 %, celui-ci doit impérativement être pris en compte.

ABSTRACT

The author became interested in the hydrodynamics of Hardé soils while working for a European project. He carried out a hydrologic study on an 18 km² basin near Mouda where the conditions are representative of the Maroua region.

A 3 000 m² microbasin separated from the rest of the basin by an elevation was selected. This microbasin is occupied by Hardé soils which are at various stages of degradation. The installations on this site include a rain gauge, a rainfall graphic equipment, a hygrometric station and a gamma neutron probe.

First, the hydrodynamic characteristics of each soil type on the microbasin were determined. On the one hand, this was done in the dry season using an aspersion-infiltration-metre which simulates rainfall (with the same characteristics as natural rain). On the other hand, measurements were cross-checked in the rainy season using a runoff study design on a plot of 1 m². The results of the complete study made it possible to build a model which determines rainfall runoff as a function of rain drop height, prior soil moisture content, and vegetational cover index.

The model which makes it possible to transfer the results obtained from the 1 m² rainfall simulation plot to the watershed is based on the determination of the production function of the basin. The calculated runoff (CR) is equal to the

sum of the calculated runoff (CRi) of each cartographic unit multiplied by its respective surface area. The setting function enables us to leave from the observed to the calculated runoff such that the effects of the following factors are taken into consideration : slope, state of the vegetation (more or less dry), soils repartitioning with respect to drainage channels, etc.

After quantifying the potential runoff of the different zones, the global flood hydrogrammes of the basin were then observed from the outlet.

It was noted that a rainfall in this basin which has only one point of intensity has a hydrogramme of 2 maxima.

It was deduced that the first flood point is caused by runoff from the upper portion, which represents Hardé soils of which runoff simulation tests have shown the reaction rapidity to a rainfall. The second peak results from the combination of runoff from the rest of the basin with a higher infiltration due to vegetation availability. This hypothesis was verified by using salt straining and fluorescein.

Finally, the efficiency of the mini-rainfall simulator was proved on a soil with scanty vegetation compared to that of the Hardé soils, but if the vegetational cover is up to or more than 30 %, this must be taken into consideration when simulating runoff.