

Courchevel - 15.18 janvier 1991

**ETUDE DE LA VARIABILITE SPATIALE DU COMPORTEMENT  
HYDRODYNAMIQUE DES SOLS AU NIGER A PARTIR D'IMAGES  
SATELLITAIRES.**

D.Courault<sup>1</sup>, J-M. D'Herbes<sup>2</sup>, C. Valentin<sup>3</sup>, D. Rémy<sup>4</sup>

<sup>1</sup> INRA, Bioclimatologie, Montfavet, <sup>2</sup> ORSTOM Niamey, <sup>3</sup> Pédologie ORSTOM  
Bondy, <sup>4</sup> LIA ORSTOM Bondy

**ABSTRACT**

This study takes place in HAPEX-SAHEL programm whose purpose is to analyse the exchanges of water and energy on an area of 100/100 km in Niger. Before to measure the different flux between soil and atmosphere, it's necessary to study spatial variability of Landscapes. It's precisely what we want to study in using Remote Sensing. Different documents have been used : topographic and pedologic maps, NOAA, MSS and SPOT images. Their combinaison have been made by a GIS. The methodology is to stratify space in three levels. Field observations, radiometric measurements have been made, in using a special typology to characterize surface states.in relation with infiltration and runoff coefficients. Three classifications levels are proposed :

- Five large physiographic domains resulting from NOAA and pedologic map analyses,
- Geomorphologic features and the watershed delimitation from topographic maps and MSS images studies,
- Surface states obtained from SPOT classifications.

This methodology allows to integrate spatial variability of surface organisations at each perception level.

**Key words :**

Surface state, Sahel, infiltration, runoff, spectral behavior  
GIS.

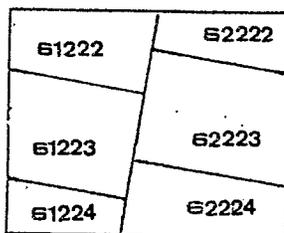
**1. INTRODUCTION**

Lorsque l'on s'intéresse aux bilans hydriques et énergétiques, l'accent est mis principalement sur l'étude des transferts à l'interface sol-atmosphère. Ces échanges peuvent être analysés à différentes échelles et suivant le niveau de perception, certains paramètres apparaissent plus importants que d'autres pour la modélisation.

C'est dans le cadre de ces études climatiques que se situe le programme HAPEX - SAHEL qui a pour but de modéliser ces transferts sur une maille de 100 /100 km au Niger, renouvelant ainsi l'expérience semblable HAPEX MOBILY qui s'était déroulée dans le sud-ouest de la France.

Le milieu choisi est ici plus aride à saison contrastée, une seule saison des pluies de mai à septembre avec une moyenne de 500 mm d'eau par an.

La zone d'étude se situe entre les longitudes 2° et 3° Est et les latitudes 13° et 14° Nord, Niamey se trouve sur la bordure Ouest (Fig.1).



L'ensemble peut paraître au premier abord assez homogène, le relief est en effet peu marqué, quelques plateaux cuirassés et buttes témoins sur le Continental terminal et des vallées cultivées en mil.

En fait l'hétérogénéité des types de paysages est importante, et il semble indispensable d'analyser cette hétérogénéité pour choisir des sites représentatifs pour implanter des mesures de flux.

Afin d'appréhender cette variabilité des milieux, la télédétection semble l'outil le mieux adapté.

Jusqu'à présent la variabilité spatiale des organisations de surface était peu prise en compte dans les modèles hydrologiques. Or différents auteurs (Refs.1 et 2) ont montré le rôle primordial que jouent les états de surface dans les phénomènes d'infiltration et de ruissellement.

Au Sahel, la circulation de l'eau est fortement conditionnée par le type de croûte formée en surface. CASENAVE et VALENTIN (Ref.3), à partir d'expériences menées sous simulations de pluies sur un grand nombre de sites en zones arides, ont associé des coefficients d'infiltration et de ruissellement aux principaux états de surface.

De nombreux travaux en télédétection montrent que les caractéristiques physiques des états de surface peuvent être suivies par des mesures spectrales (Ref.4).

Nous nous proposons donc :

- dans un premier temps d'utiliser la typologie de VALENTIN pour caractériser les états de surface au Niger par leur comportement hydrodynamique et déterminer si l'on peut distinguer les différents types de croûtes par des mesures spectrales.

- puis dans un second temps, de proposer une méthodologie utilisant les images satellitaires pour appréhender la variabilité spatiale des états de surface, afin de fournir des éléments pour la modélisation hydrodynamique du degré carré.

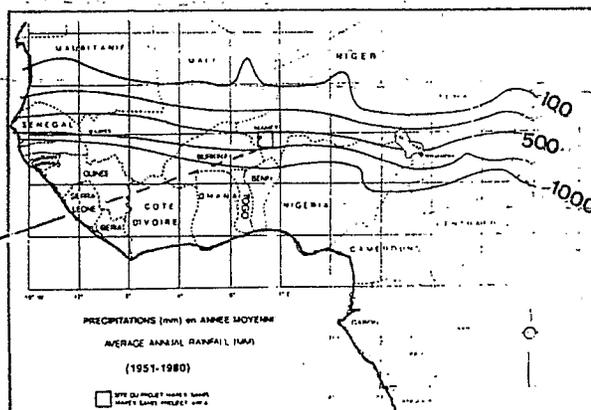


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et situation des scènes SPOT sur le degré carré.

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 34.874 ex 1

Cpte : B 24 OCT. 1991

P 66

## 2. METHODOLOGIE

Nous rappelons brièvement la typologie employée pour caractériser les états de surface (ES) définis par CASENAVE et VALENTIN, en précisant la typologie utilisée.

Les observations ont été faites sur des surfaces de 1m<sup>2</sup> minimum. Chaque ES est caractérisé de trois façons différentes :

1) par une description morpho-génétique qui considère à la fois : le couvert végétal, la texture du sol, la micro-rugosité, le nombre de micro-horizons, la couleur Munsell.

2) par des paramètres de fonctionnement hydrodynamique tels que le coefficient d'infiltration, l'intensité limite de ruissellement, la lame ruisselée..

3) par des mesures spectrales au spectrophotomètre sur des échantillons de sols prélevés en surface le long d'une toposéquence, et des mesures radiométriques prises avec un cimel sur le terrain.

Les principaux types de croûtes rencontrées sur le degré carré sont ainsi identifiées suivant la clé de détermination définie par CASENAVE et VALENTIN (tab.1).

ESE	CARACTERISTIQUES GENERALES	Ki	II	Pi
ERO	surface non cultivée d'érosion CG<40% TV<20%	10-20	0-2	2-6
DES	surface non cultivées de dessiccation, CG<40%, Tv<20%, croûte peu développée, souvent sur sol sableux avec une couverture végétale >50%	60-75	10-20	20-30
DEC	surface non cultivée de décanation, CG<40%, TV<20%, repose sur une surface organisée.	20-35	0-2	4-10
ST3	surface non cultivée croûte structurale à trois micro-horizons, CG<40%, TV<20%	15-25	0-5	3-7
CI	croûte cultivée, porosité vésiculaire <5% (ST1)	60-75	15-25	25-30

Tableau 1. Caractéristiques de quelques états de surface les plus fréquents sur le degré carré de Niamey.(ESE : état de surface élémentaire, CG : charge grossière, TV : turricules et vers, Ki : coefficient d'infiltration %, II : intensité limite de ruissellement mm/h, Pi : pluie d'imbibition mm)

En ce qui concerne les réponses spectrales, 17 échantillons ont été prélevés le long d'une toposéquence représentative sur les premiers centimètres de surface pour des mesures de réflexion diffuse au spectrophotomètre de 380 à 2500 nm afin d'acquérir des informations accessibles sur la couleur et les constituants majeurs de ces sols (fig.2).

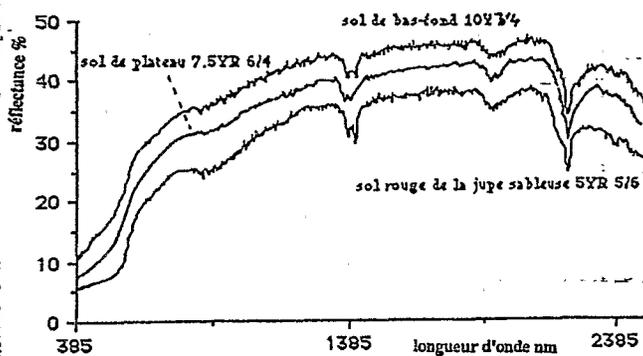


Figure 2. Principales courbes spectrales obtenues au spectrophotomètre sur les 17 échantillons de sols mesurés.

L'analyse des courbes révèle peu de variation en ce qui concerne la forme. Celles-ci sont concaves dans le visible, convexes dans l'infra-rouge. Cependant suivant la teneur en hydroxydes de fer, les bandes d'absorption du fer sont plus ou moins bien marquées à 550 nm et 870 nm. Elles sont un bon indicateur de la couleur rouge des sols.

Nous avons distingué trois ensembles suivant ces variations de couleur et suivant l'intensité du signal spectral. Ces trois ensembles correspondent aux trois principaux domaines morphologiques du degré carré :

- les plateaux cuirassés à tendance marron clair 7.5YR 5/4 à 10YR 6/4.

- les plaquages sableux rouges à la base des plateaux (jupe sableuse) 2.5YR 5/6 à 5YR 5/8

- les bas-fonds blancs 7.5YR 7/4 à 10YR 7/4.

Pour compléter ces informations et afin d'appréhender la rugosité, des mesures radiométriques ont été effectuées sur le terrain, avec un cimel à 2 m de la surface.

On constate que lorsque l'on se situe sur un même ensemble géomorphologique, il est possible de différencier les principales croûtes de surface par la radiométrie. Les écarts-types des valeurs de réflectance sont faibles pour chaque état de surface. C'est le cas par exemple des croûtes de décanation qui se situent le plus souvent sur les plateaux et qui témoignent d'une forte évaporation (fig.3).

Par contre, en ce qui concerne les autres types de croûtes, elles ne sont pas localisées à un seul type de milieu et l'on peut les trouver dominantes sur les trois domaines morphologiques, c'est le cas des croûtes d'érosion. Les réponses radiométriques peuvent varier fortement, ceci s'expliquant essentiellement par des variations de couleur (fig.3).

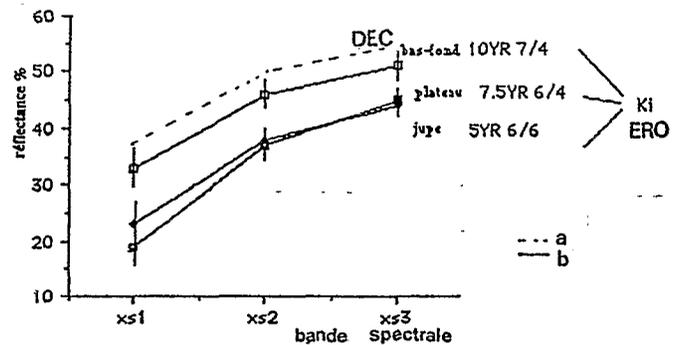


Figure 3. Réponses spectrales de deux types de croûtes de surface : a: croûte de décanation, b: croûte d'érosion. (Ki, coefficient d'infiltration, xs1 500-590 nm, xs2 600-780nm, xs3 700-890 nm).

A la suite de ces observations et pour appréhender l'organisation spatiale des ES, à partir d'images satellitaires, nous avons été amené à proposer une méthodologie qui classe les états de surface suivant leur appartenance à ces domaines morphologiques.

Par ailleurs, à l'échelle du degré carré, il existe un gradient de végétation important du nord au sud dont il faudra tenir compte ultérieurement dans les modèles d'intégration.

Nous avons choisi d'adopter une démarche en stratifiant l'espace à différents niveaux :

- en unités physiographiques
- en unités géomorphologiques: plateau, versant et bas-fond.
- en unités fonctionnelles à l'échelle du bassin versant.

Différentes étapes de classifications sont ainsi proposées où l'on accède à des informations concernant le fonctionnement hydrodynamique à des échelles variables.

En ce qui concerne le traitement d'images en télédétection, ceci revient à faire des classifications emboîtées pour analyser la variabilité spatiale des différentes unités.

L'originalité de l'approche repose sur le fait d'utiliser des documents de natures différentes, aussi bien des cartes que des images combinées entre elles grâce à l'utilisation d'un système d'information géographique (SAVANE).

Toutes les informations disponibles sur le degré carré sont utilisées : cartes topographiques à différentes échelles (1/200000 et 1/50000), carte pédologique (1/500000), images NOAA, MSS et SPOT à des saisons différentes.

### 3.RESULTATS - DISCUSSION

#### 3.1. Stratification de 1<sup>er</sup> Ordre

Le premier niveau de stratification divise le degré carré en cinq grands domaines. Ceux-ci résultent de la combinaison de la carte pédologique au 500000<sup>ème</sup> (analyse de la densité de certaines unités caractéristiques) et de l'indice de végétation calculé à partir d'une image de synthèse NOAA d'octobre 1988 (fin de saison des pluies), seuillée suivant des critères visuels.

On définit des unités homogènes à une certaine échelle de perception ( $\geq 500000$ ) et qui présentent globalement le même fonctionnement hydrodynamique (fig4. et tab.2).

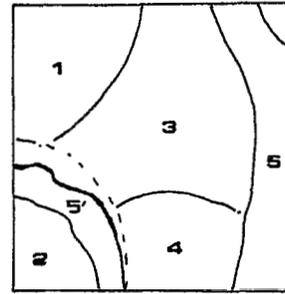


Figure 4. Localisation des 5 grands domaines physiographiques du degré carré.

zone	direction	pourcentage	IV	caractéristiques
zone 1	nord-ouest	17,5%	IV faible	densité de plateau faible
zone 2	sud-ouest	7,8%	IV moyen à élevé	plateau cuirassé unique et massif sur socle précambrien, brousse tigrée ou mouchetée dense
zone 3	centre	41,1%	IV moyen à faible	plateaux moreelés découpés à talus marqués, vallées plus ou moins larges cultivées en mil
zone 4	sud central	13,1%	IV élevé	plateaux cuirassés sans talus marqués, vallées étroites, brousse tigrée et strate herbacée bien développées
zone 5	est	12,6%	IV élevé	Dailol Bosso, vallée quaternaire intensément cultivée en mil, nappe en sub-surface
zone 5'	ouest	7,9%	IV élevé	vallée du Niger, cultivée en mil, rizières sables alluviaux.

Tableau 2. Principales caractéristiques des unités physiographiques définies à partir du zonage de l'image NOAA et de la carte pédologique au 500000. (IV : indice de végétation)

#### 3.2. Stratification du 2<sup>nd</sup> ordre

A l'intérieur même de ces grands ensembles, une stratification du second ordre est effectuée en utilisant parallèlement les informations issues de la numérisation des cartes topographiques (1/200000 et 1/50000) et des traitements des images MSS du 1 février 1990 et SPOT du 24 octobre 1988.

Un indice de couleur des sols (Ref.5) est calculé sur l'image MSS, afin de faire ressortir les formations claires des bas-fonds.

A partir de la carte topographique, un modèle numérique de terrain (MNT) a pu être élaboré et suivant des seuils fixés pour l'altitude, les plateaux cuirassés sont isolés.

La combinaison de ces types d'informations nous donne la répartition spatiale des principaux ensembles géomorphologiques: les plateaux(fig.5), la jupe sableuse, et les bas-fonds.

Chaque unité géomorphologique peut être considérée comme "une unité fonctionnelle", que l'on peut caractériser par différents paramètres propres aux traitements d'images (structuraux, directionnels) et hydrodynamiques.

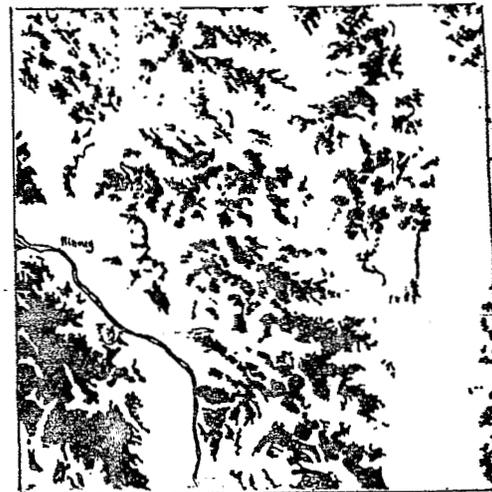


Figure 5. Carte de la répartition spatiale des plateaux cuirassés à brousse tigrée, obtenue à partir du seuillage du MNT et de l'analyse de l'image MSS.

A partir du MNT, des fichiers dérivés peuvent être calculés (par des logiciels ORSTOM : LAMONT ou SAVANE) telles les pentes, les convexités horizontales, verticales, les lignes de crêtes...

On peut ainsi noter que ce sont les formations sableuses rouges en haut de versant qui ont les pentes les plus élevées (3%), ce qui implique un ruissellement important, et la création de ravines d'érosion.

Le réseau hydrographique peut être extrait des cartes topographiques et précisé par l'analyse des images notamment par l'indice de végétation qui souligne les ligneux denses qui marquent les axes d'écoulement.

D'autres informations issues de la numérisation de la carte topographique sont intéressantes à considérer lorsque l'on étudie le bilan hydrique, ce sont par exemple l'emplacement des points d'eau permanents ou temporaires. En effet la densité des mares indique des zones endoreiques souvent localisés sur plateaux dégradés..

De même l'information sur la densité des villages peut être mise en relation avec les surfaces cultivées, la dégradation du milieu et le prélèvement de l'eau des nappes.

### 3.3. Stratification du 3<sup>ème</sup> ordre

Le dernier niveau de stratification concerne les états de surface à l'échelle du bassin versant définis suivant la typologie de CASENANVE et VALENTIN. On accède alors aux paramètres d'infiltration et de ruissellement. Des classifications supervisées sont effectuées à l'aide d'images SPOT d'après les connaissances du terrain. Chaque ensemble géomorphologique est classé indépendamment des autres par l'utilisation de masques obtenus en seuillant le MNT.

Suivant des critères de textures et structures des classes ainsi définies, on détermine des "unités fonctionnelles" à l'échelle du bassin versant.

Une formation classique sur plateau cuirassé peut être prise pour illustration. Il s'agit en effet de la brousse tigrée qui se présente comme une alternance de bandes de sols et de ligneux denses particulièrement typique des milieux sahéliens puisqu'elle résulte de la contraction de la végétation face à des contraintes extérieures notamment la sécheresse (fig.6).

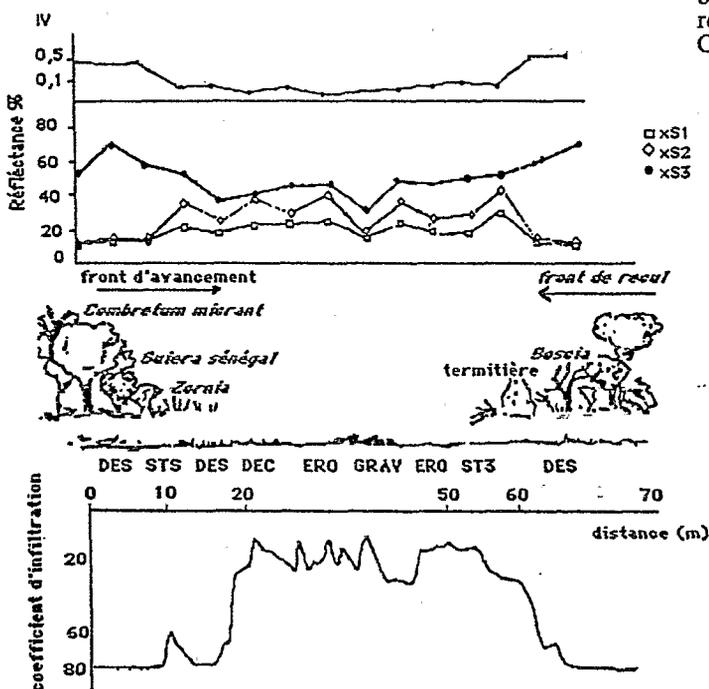


Figure 6. Comportement hydrodynamique et spectral d'une brousse tigrée sur plateau cuirassé.

On peut remarquer que l'indice de végétation est fortement corrélé au coefficient d'infiltration sur ces formations.

## CONCLUSION

Bien souvent les différents modèles élaborés par les bioclimatologistes négligent la variabilité spatiale des organisations de surface.

La méthodologie présentée ici montre l'importance de cette variabilité car à chaque niveau de perception, les paramètres changent.

Par ailleurs, l'intérêt de cette approche repose sur le fait qu'une base de données est ainsi créée, donc que les diverses informations sont spatialisées, et qu'elles peuvent être ainsi extraites ou combinées entre elles ou à différents documents. Il est important de souligner que ces données peuvent être actualisées, ce qui signifie que l'on peut suivre la dynamique dans le temps de ces milieux fragiles.

## REFERENCES

1. COLLINET J, VALENTIN C, 1985, Evaluation of factors influencing water erosion in West-Africa using rainfall simulation. in Challenges in African Hydrology and Water resources. IAHS publ., n°144, pp.451-461.
2. BOIFFIN J, MONNIER G, 1986, Workshop on erosion assessment for EEC. Methods and models. Int. Symp. on Asst. of soil surface sealing crusting. Belgium Ghent.
3. CASENANVE A, VALENTIN C, 1989, Les états de surface de la zone sahélienne. influence sur l'infiltration. coll. Didactiques, éd. ORSTOM, 229p.
4. ESCADAFAL R, GIRARD MC, COURAULT D, 1989. Munsell soil color and soil reflectance in the visible and spectral bands of landsat data (MSS and TM). Remote Sens. Envir., 27, pp37-46.
5. MADEIRA J, BEDIDI A, CERVELLE B, POUGET M, 1990, Relations entre les constituants minéraux d'oxisols brésiliens et leurs signatures spectrales du visible à l'infrarouge moyen (landsat TM). 2<sup>èmes</sup> journées de télédétection, ORSTOM, Bondy, 4-5 Décembre. Ed ORSTOM.