

# Identification par télédétection des sols dégradés d'un domaine sahélien au Niger

B. MOUGENOT, D. CAILLEAU

*Orstom - Mission au Niger BP 11416, Niamey, Niger.*  
*Tél: (227) 73 30 95 Fax: (227) 73 34 58 / 75 28 04*  
*email: mougenot@niamey.orstom.ne*

## Résumé

En domaine aride et semi-aride les sols nus occupent la plupart du temps une surface plus importante que la couverture végétale. La couleur des sols nus est une expression synthétique de la composition et de la structure de la surface du sol. Les paramètres qui définissent la couleur sont bien caractérisés dans les bandes spectrales du visible que possèdent les satellites d'observation de la Terre. Des indices de couleur proposés dans la littérature sont testés pour sur un site sahélien sableux dans la région de Niamey au Niger. Le site d'une surface de 20 km<sup>2</sup> est étudié dans le cadre des programmes HAPEX-Sahel et SALT (Savanes à Long Terme). La région, à vocation agro-sylvo-pastoral, est soumise à un climat à longue saison sèche. Les sols sableux à sesquioxydes prédominent. Les états de surface traduisent l'intensité de la dégradation en relation avec l'érosion hydrique et éolienne. Le couvert végétal diminue et les encroûtements tendent à accentuer le ruissellement. Les organisations morpho-pédologiques des plateaux vers les bas-fonds dessinent un motif bien perçu par télédétection. La distinction des unités se fera selon des critères de couleur et d'association à d'autres états de surface suivant la position topographique dans le paysage. Les premiers résultats montrent la stabilité des indices de couleur dans le visible au cours de la saison sèche. Les aérosols atmosphériques perturbent le signal mais de façon moins importante que la végétation verte en fin de saison des pluies, ou peu active en début de saison sèche. La discrimination de la couleur des sols nus selon la teinte est très bonne mais l'utilisation du proche infrarouge pour simuler les indices Landsat TM ne donne pas satisfaction. Les résultats permettent de séparer les grands types de sols et de détecter l'intensité de la dégradation pour un sol donné. Les variations de la saturation de la couleur sont plus difficiles à mettre en évidence, du fait de l'hétérogénéité des unités au sol et de la végétation peu couvrante. Des mesures radiométriques sur le terrain sont en cours.

## **Abstract**

Bare soils surfaces are predominant in arid and semi-arid environments. A Sahelian site is studied in west Niger. The decreasing of vegetation due to cultivation and Sahelian climate induce soil erosion. Color indices combining visible and near infrared bands are computed from SPOT satellite reflectance to discriminate soils and degradation levels in relation with surface characteristics. Particularly in dry season, effects of atmospheric aerosols are corrected to obtain soil reflectances. The main soil types and erosion levels are detected with Spot data during the dry season. Good results are obtained after two or three months following the rainy season due to no residual green and sparse dry vegetation. The combination of near infrared band to simulate Landsat TM indices do not give expected results. Ground radiometric measurements will allow to explain spatial variability.

## **1. Introduction**

La surveillance des sols par télédétection est particulièrement adaptée aux domaines arides et semi-arides. La végétation ne représente le plus souvent que 10 à 30 % de la surface du sol avec une activité chlorophyllienne saisonnière. La surface du sol apparaît comme directement détectable ou influençant de façon très importante le signal végétation. De nombreuses études s'attachent à éliminer l'effet du sol dans les indices de végétation (HUETE, 1988; ESCADAFAL et HUETE, 1991, CHEHBOUNI, 1992). La couleur de la surface est la résultante des composantes de la surface du sol à un moment donné. Le fait de pouvoir corrélérer les caractéristiques colorimétriques sous leurs différentes expressions et la réflectance dans le domaine du visible, permet d'appliquer ces résultats à une détection quantitative de ces composantes (MADEIRA, 1992; ESCADAFAL, 1993). Même sur des sols peu différenciés, la sensibilité des indices de couleur permet d'appréhender des variations très fines (POUGET, 1988). Les processus d'érosion hydriques et éoliens modifient la couleur de la surface. Leurs effets sur le milieu peuvent être détectés et suivis quantitativement et spatialement à un stade souvent difficilement perceptible par d'autres moyens.

## **2. Objectifs**

Sur un site sahélien au Niger, dans le cadre des programmes HAPEX-Sahel et SALT (Savanes A Long Terme, IGPB), l'étude des sols par télédétection s'est progressivement avérée indispensable pour la connaissance préalable du milieu. Sous

l'effet du climat et de la pression anthropique, l'érosion hydrique et éolienne entame de façon alarmante les surfaces pastorales et cultivées.

Nous proposons dans cette étude de tester des indices caractérisant la couleur du sol pour mettre en évidence les processus d'érosion en relation avec la nature des sols et leur position dans le paysage. On vérifiera la stabilité de ces indices dans le temps avec les images satellitaires disponibles et sélectionnées en dehors de la pleine saison des pluies. L'objectif est d'avoir le minimum d'interférences dues à la végétation active et à l'humidité.

### **3. Matériels et méthodes**

#### **3.1. Zone d'étude**

Le site d'étude occupe un espace de 20 x 20 km<sup>2</sup> centré sur 13° 30' N - 2° 40' E en plein domaine sahélien. La pluviométrie moyenne annuelle oscille actuellement autour de 450 à 500 mm. La caractéristique du climat correspond à une forte hétérogénéité spatiale et temporelle des précipitations. Celles-ci tombent de juin à septembre le plus souvent sous formes de fortes averses. Les cycles d'érosion hydrique et éolienne modèlent les surfaces actuelles.

Le motif du paysage correspond à une succession : plateaux et buttes témoins cuirassés (continental terminal), dunes rouges anciennes (ogoliennes) à pente forte et très ravinées appuyées aux plateaux, glacis d'érosion à pente faible sur sables plus récents et moins rouges, bas-fonds ensablés très clairs parfois précédés d'un talus raviné.

Les états de surfaces élémentaires associent les réorganisations superficielles des sols nus (croûtes structurales, d'érosion et de ruissellement) et une végétation arbustive et herbacée souvent sur micro-buttes. La texture des horizons de surface est sableuse avec des quantités d'argiles et limons fins qui dépassent rarement 5 à 7 % en surface. Les sols de type ferrugineux tropicaux peu ou non lessivés occupent l'ensemble du paysage. Ils passent à des sols plus hydromorphes dans les bas-fonds. Sur les plateaux, les sols sont sablo-argileux, peu épais et caillouteux sur la cuirasse. Des cordons dunaires anciens peu nombreux s'alignent dans le sens est-ouest.

Les jachères occupent moins de 40 % de la surface hors plateau, mais l'intensification de la culture accentue la dénudation des sols et l'érosion en nappes et en ravines.

### 3.2. Données disponibles et méthodes

Parmi les données satellitaires SPOT XS disponibles, les scènes suivantes ont été sélectionnées:

- 16/02/91 : milieu de saison sèche,
- 18/06/92 : fin de saison sèche/ début de saison des pluies,
- 05/10/92 : fin de saison des pluies,
- 03/03/93 : milieu de saison sèche,
- 18/12/93 : début de saison sèche.

Les comptes numériques SPOT sont transformés en « réflectance au sol » après correction des effets de l'atmosphère avec le logiciel SPALTO (RAHMAN et DEDIEU, 1994). On estime les données atmosphériques, faute de mesures simultanées aux acquisitions satellitaires (modèles de circulation générale pour la vapeur d'eau, visibilité horizontale pour l'épaisseur optique en aérosol à 550 nm).

Les indices de couleur testés sont issus de travaux utilisant les données du satellite Landsat TM qui possède 4 bandes dans le visible. Ils sont adaptés ici aux bandes spectrales du satellite SPOT (pas de bandes dans le bleu) :

- Indice de Rougeur (RI) ou Indice ferrique,  $XS2-XS1/XS2+XS1$  (ESCADAFAL et HUETE, 1991; MADEIRA, 1992).
- Indice de Rougeur (RIh, teneur hématite),  $XS2^2/XS1^3$ , (MADEIRA, 1992),
- Indice de coloration (ICv),  $XS2-XS1/2$  et,
- Indice de forme (ICFn),  $2*XS3-XS2-XS1/XS2-XS1$ , (ESCADAFAL *et al.*, 1994).

Les indices de coloration et de rougeur expriment la saturation alors que l'indice de forme est plutôt corrélé avec la teinte.

Sur le terrain, le long de 3 transects recoupant les principales organisations du paysage, nous avons échantillonné spécifiquement les surfaces nues de taille équivalente à au moins 2 ou 3 pixels du satellite SPOT XS (20 m). Les couleurs dominantes sont mesurées à l'aide de la charte Munsell. La végétation couvrait au moment des contrôles sur le terrain (avril 1994) moins de 10 % de la surface. Le tableau 1 regroupe les résultats des principaux sites pour l'acquisition SPOT du 16 février 1991.

Les indices de couleur sont appliqués à l'ensemble de la zone aux dates les plus discriminantes. La correction géométrique et géographique des données satellitaires permet une excellente superposition multidates et l'étude de l'évolution de la surface des sols nus. Une carte morphopédologique sert de document de référence (BERGOEING *et al.*, à paraître).

**Tableau 1.** Couleur Munsell dominante des sites étudiés, réflectance SPOT (16 février 1991) et indices de couleur correspondants.

n°	Couleur Munsell	XS1	XS2	XS3	NDVI	RI	RIh	ICv	ICFn
1	10YR7/2 /3	24,4	35,4	43,8	0,11	0,18	0,087	0,31	2,53
2	10YR7/4	23,5	35,2	44,2	0,11	0,20	0,095	0,33	2,56
3	10YR7/4 /3	24,5	35,4	44,6	0,12	0,18	0,085	0,31	2,69
4	7.5YR7/8 /6	20,6	32,9	42,4	0,13	0,23	0,124	0,38	2,52
5	7.5YR7/6	21,1	32,5	42,0	0,13	0,21	0,112	0,35	2,67
6	7.5YR5/6 /8	21,6	34,6	44,4	0,12	0,23	0,119	0,38	2,51
7	5YR6/4 /6	19,5	33,3	41,6	0,11	0,26	0,150	0,41	2,20
8	7.5YR6/6 5/6	21,7	33,5	42,4	0,12	0,21	0,109	0,35	2,53
9	7.5YR7/4 /6	22,1	33,5	41,4	0,11	0,20	0,103	0,34	2,41
10	10YR,7.5YR7/2 6/2	23,0	33,9	42,5	0,11	0,19	0,094	0,32	2,59
11	7.5, 5YR7/6	20,2	33,4	41,1	0,10	0,25	0,136	0,40	2,16

## 4. Résultats

### 4.1. Evolution temporelle des indices de couleur

Malgré la correction atmosphérique, les réflectances évoluent dans le temps pour ces surfaces en principe peu variantes en quelques années. Cependant, en dehors de la date de fin de saison des pluies, la dynamique est presque identique et une légère translation suffit à réaliser des comparaisons absolues (Fig. 1). En absence de mesures directes des paramètres atmosphériques, il est difficile de s'assurer de la qualité de ces corrections. C'est particulièrement vrai pour la scène de mars 1993 affectée par une quantité de poussières atmosphériques très importante. L'absorption croît dans le visible vers les longueurs d'ondes les plus courtes également les plus sensibles aux absorptions par le fer.

L'humidité résiduelle tend à augmenter la rougeur alors que la végétation active la fait décroître. Ces effets sont accentués quand les indices tiennent compte du proche infrarouge comme c'est le cas avec les bandes du satellite SPOT (Fig. 2). L'utilisation de cette bande en dehors de conditions sèches ou avec une végétation active peu couvrante, donne des résultats difficilement interprétables sans contrôle de terrain simultanés.

Les indices pour les différents sites au cours des saisons sèches ne varient relativement que très peu. Seul un des sites (n°4) évolue de façon importante avec des indices de couleur qui décroissent au cours de la saison 1992/93, ce qui laisse supposer une reprise temporaire de la végétation malgré un NDVI peu élevé. Le suivi de l'évolution de la couleur de ces surfaces est envisageable.

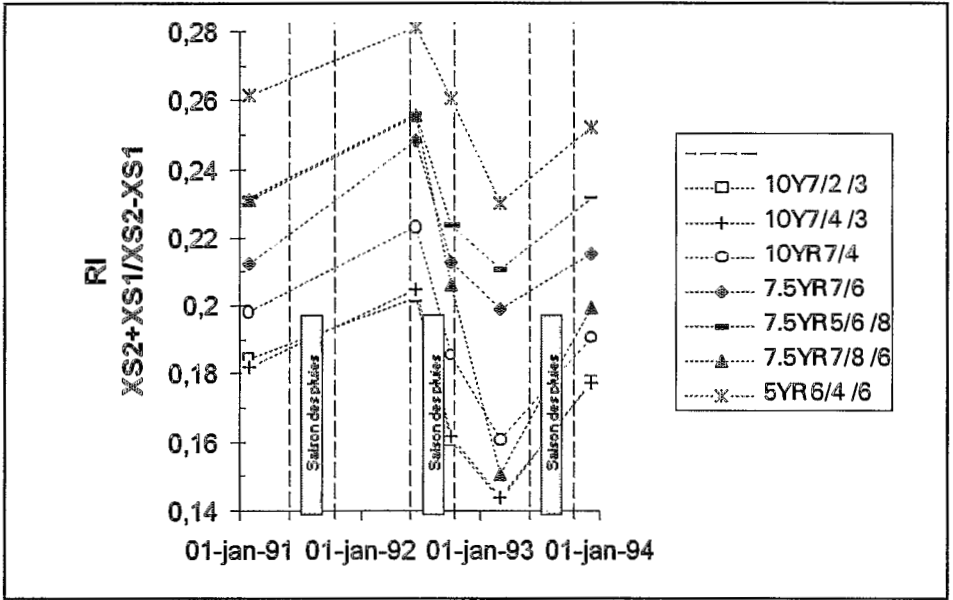


Figure 1. Evolution temporelle de l'Indice de Rougeur (*Redness Index*) SPOT d'états de surface caractérisés par leur couleur - sols sableux d'un site sahélien à l'ouest du Niger.

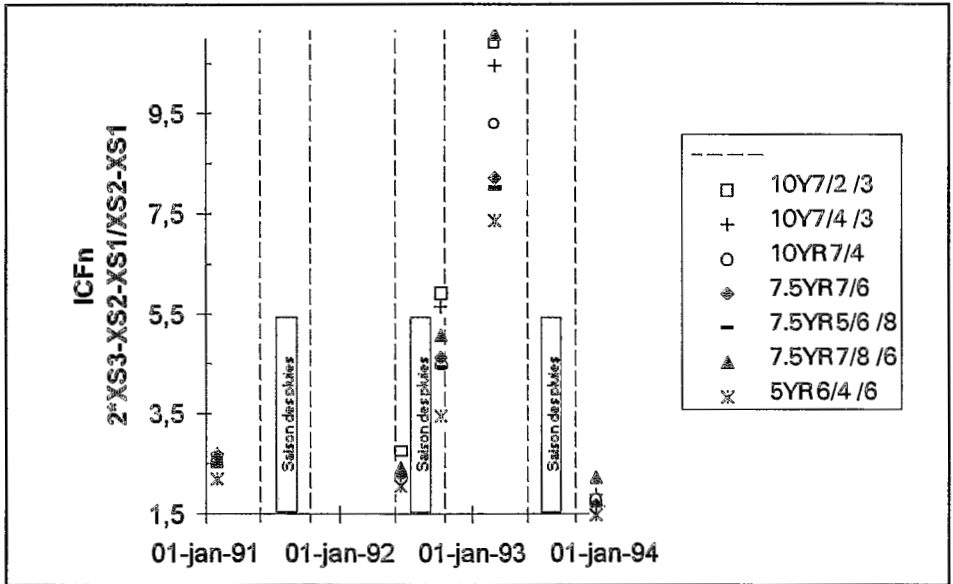


Figure 2. Evolution temporelle de l'Indice de Forme (visible et PIR) d'états de surface caractérisés par leur couleur - sols nus sableux d'un site sahélien à l'ouest du Niger.

#### 4.2. Apports des indices de coloration et de forme

La date du 16 février a été retenue comme référence car c'est la moins perturbée par les effets atmosphériques. Nous proposons de comparer l'apport respectif des indices étudiés pour différencier les états de surface par leur couleur.

Les indices de rougeur et de coloration sont linéairement corrélés. Cette corrélation est parfaite entre les indices de rougeur RI et de coloration ICv, par construction très proches. On observe une légère décorrélation entre les autres indices (RI, RIh, ICv) combinés deux à deux. Les valeurs des indices croissent vers la teinte la plus rouge. Il s'avère difficile avec les données disponibles de dégager une tendance au sein de chacune des teintes en relation avec l'intensité et la saturation, même si celle-ci croît avec les indices au moins à partir de 7.5YR.

La dispersion des valeurs entre Indice de forme (ICFn) et Indice de coloration (ICv) sépare bien les différentes teintes avec un saut important pour la teinte 5YR (Fig. 3). Les variations observées expriment aussi les effets de la végétation (peu active à cette époque) et des pailles dont le recouvrement exact, bien que faible, est difficile à estimer. La macrorugosité (répartition et densité des micro-buttes, plages sableuses et croûtes d'érosion) diffère selon les sites.

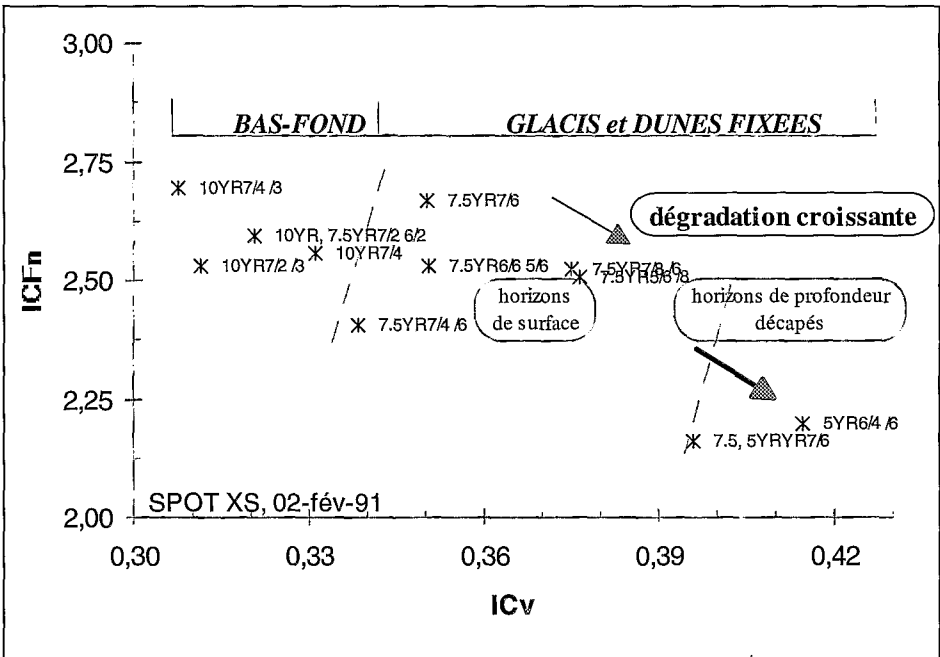
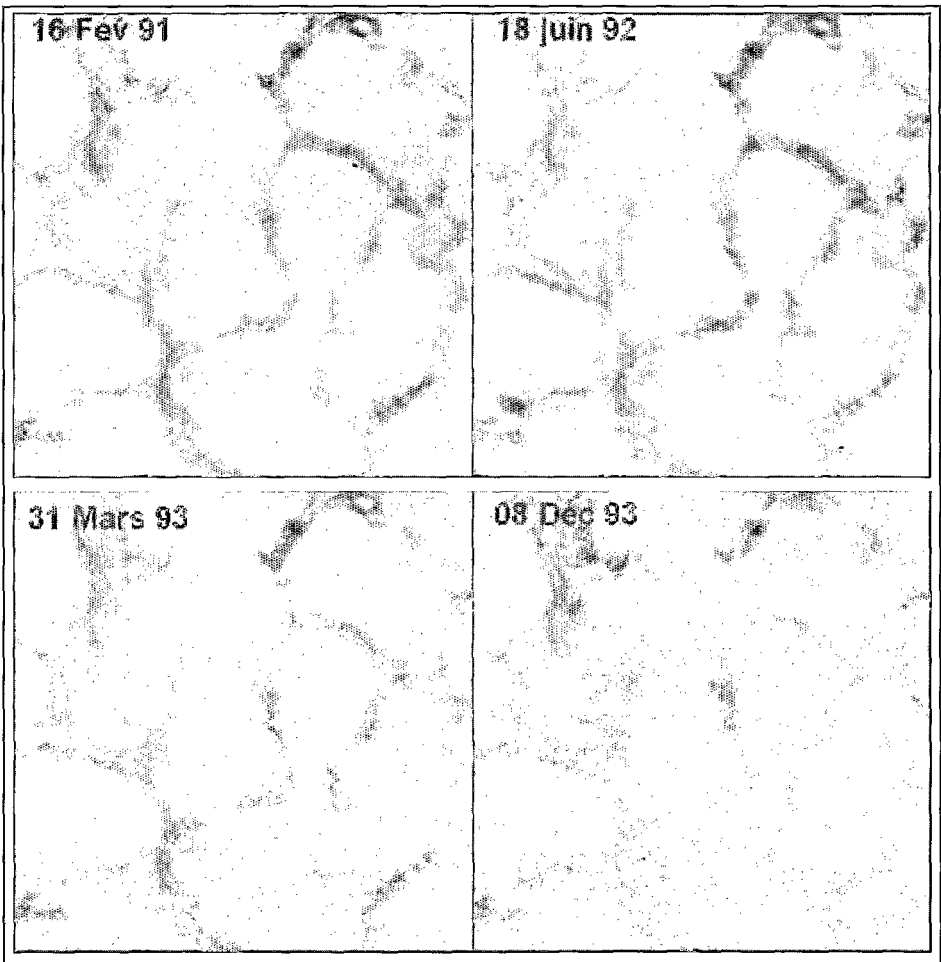


Figure 3. Indice de Coloration et Indice de Forme SPOT d'états de surfaces de sols nus sableux en relation avec leur répartition dans le paysage et l'intensité de la dégradation.

#### 4.3. Intérêt pour le suivi de l'évolution spatiale des surfaces dégradées

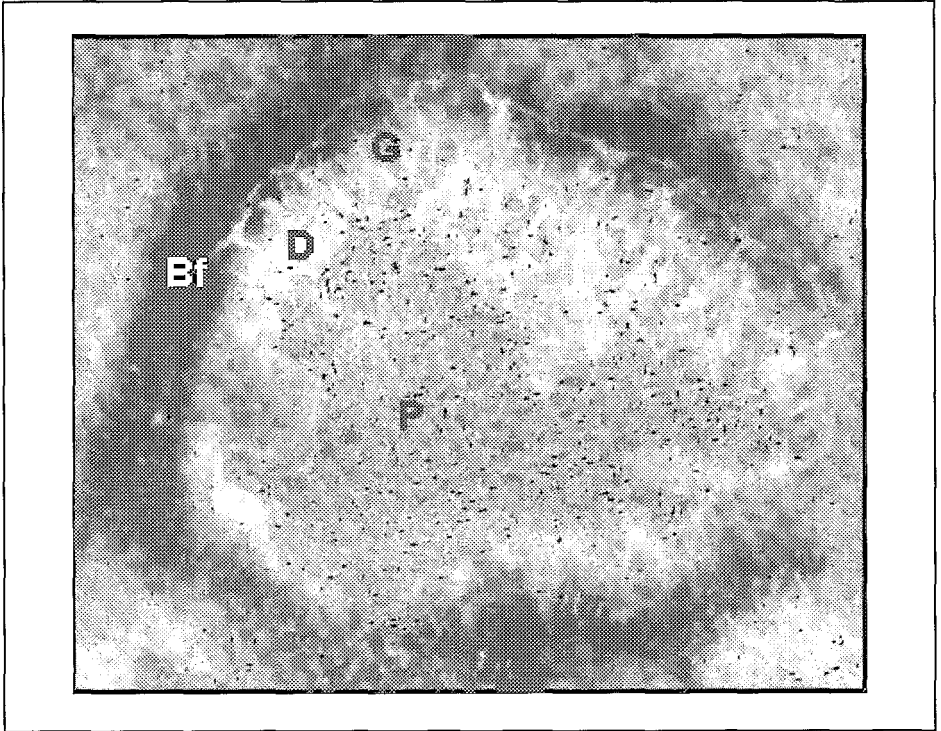
Les différents indices de couleur ont été appliqués aux scènes SPOT couvrant l'ensemble de la zone étudiée. L'indice de forme apparaît très perturbé par les effets de la végétation. Parmi les autres indices, l'indice de rougeur R<sub>lh</sub> discrimine mieux les sols les plus rouges en étant le moins sensible à la végétation sèche ou peu active (Fig. 4). Le début de la saison sèche (décembre) n'est cependant pas favorable à la détection des sols nus tant qu'il reste des résidus de cultures au sol et une strate herbacée encore peu pâturée. On remarque sur ces images le découpage des plateaux en polygones, soulignés le long des thalwegs par des sols plus clairs en surface (sols hydromorphes).



**Figure 4.** Evolution de l'Indice de Rougeur R<sub>lh</sub> SPOT pour 4 dates en saison sèche sur un site sahélien dans l'ouest nigérien (20 x 20 km). Les sols les plus rouges correspondent aux niveaux de gris les plus clairs.



La figure 5 présente un agrandissement d'une partie du site. Le ravinement visible sur l'image atteint ici la zone de bas-fond. Le matériau rouge des dunes fixées qui cernent le plateau atteint le lit mineur de la vallée principale beaucoup plus claire. Ces épandages qui témoignent de l'intensité de la dégradation sur les pentes fortes, masquent le sol sous-jacent.



**Figure 5.** Extrait (7 x 5,5 km<sup>2</sup>) de l'image de la figure 4 le 16 février 1991 (P: plateau à brousse tigrée, D: dune fixée dégradée au pied du plateau, érosion en nappes et ravines avec mise à nu de l'horizon B rouge (5YR), G: glaciais peu étendu en voie de dégradation par le ravinement et les épandages (7.5YR), BF: Bas-fond sableux éclairci (10YR) temporairement hydromorphe, matériau sableux rouge entraîné le long des thalwegs).

Le seuillage d'un indice satellitaire de couleur établi dans le visible, permet de définir des limites qui ici se superposent bien à celles des sols peu dégradés, même si les réorganisations superficielles modifient la structure. Les variations de saturation ou de teinte sont aussi des indicateurs de dégradation au sein des unités précédentes. Les surfaces les plus rouges (5YR) appartiennent en fait aux horizons B mis à nu par l'érosion hydrique après disparition de la strate végétale. Ces ensembles peuvent prendre de l'extension et remplacer l'unité pédologique qui était détectée précédemment.

Le laps de temps entre les dates disponibles et la résolution du satellite SPOT, ne permettent pas de dégager une évolution nette concernant l'érosion des sols en dehors des cônes de déjection à l'extrémité des ravines. Il sera cependant possible dans ce milieu en comparaison à des images références en saison sèche, de suivre l'extension des surfaces dégradées au cours des prochaines années.

## Conclusions

La détection de la couleur de la surface du sol donne de bons résultats avec les données du satellite SPOT, particulièrement en milieu de saison sèche quand les effets de la végétation et de l'humidité sont minimales. C'est une aide précieuse pour la cartographie des sols après une délimitation préalable pour limiter les confusions, des grandes unités du milieu. Cette approche peut constituer le terme minimum de réalisation d'une base de données référence pour les zones où il n'existe pas de documents cartographiques récents et pour suivre ultérieurement la dégradation des sols. Il est possible d'envisager d'améliorer la correction des indices de végétation en saison des pluies à partir de données satellitaires obtenues en saison sèche.

L'apport de la bande bleue reste à préciser pour les sols de la région, même si c'est la bande la plus sensible aux aérosols atmosphériques. Les mesures de réflectances sur le terrain en cours, et l'acquisition en continu de données sur la qualité de l'atmosphère, doivent permettre d'améliorer les résultats.

## Bibliographie

- BERGOEING J.P., MOUGENOT B., CAILLEAU D. (1995). *Etude de la morphologie du site HAPEX-Sahel*, (à paraître).
- CHEHBOUNI A. (1992). *Présentation d'un modèle de transfert couplé de masse et de chaleur dans le système de sol-végétation-atmosphère pour les zones arides et semi-arides*. Thèse. Univ. Paul Sabatier, Toulouse, LERTS, 163 p.
- ESCADAFAL R. (1993). « Remote sensing of soil color : Principles and applications », *Remote Sensing Reviews*, 7, p. 261-279.
- ESCADAFAL R., BELGHIT A., BEN MOUSSA H. (1994). « Indices spectraux pour la télédétection de la dégradation des milieux naturels en Tunisie aride », 6e Symposium Int. « Mesures physiques et signatures spectrales en télédétection », ISPRS - ESA ed., 17-21 janv. 94, Val d'Isère.
- ESCADAFAL R.; HUETE A. (1991). « Etude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection », C.R. Acad. Sci. Paris, 312, II, p. 1385-1391.

- HUETE A.R. (1988). « A soil-adjusted vegetation index », *Remote sensing of environment*, 25, pp. 295-309.
- MADEIRA J. (1993). *Etude qualitative des relations constituants minéralogiques-réflexance, diffusion des latosols brésiliens: applications à l'utilisation pédologiques des données satellitaires TM (région de Brasilia)*. Coll. Etudes et Thèses. Orstom éd., Paris, p. 236.
- POUGET M.; LE FLOC'H E.; KAMAL S.; SALEM B. (1988). « Utilisation des données SPOT pour la cartographie des ressources renouvelables. Application à la région côtière nord-ouest de l'Egypte », Journées télédétection - Images satellite et milieux terrestres en régions arides tropicales. 14-17 nov., Bondy, France, Colloques. et Séminaires, éd. Orstom, Paris, France, p. 103-121.
- RAHMAN H., DEDIEU G. (1994). « A simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum », *Int. J. Remote Sensing*, 15, 1, p. 123-143.