

Etats de surface des sols non cultivés dans la cuvette de Nianga : description, radiométrie de terrain et imagerie Spot

□ □ □

L. Mane*, P. Boivin** et L. Séguis***

* Géographe, ORSTOM, BP 1386 Dakar

** Pédologue, ORSTOM, BP 1386 Dakar

*** Hydrologue, ORSTOM, BP 1386 Dakar

Les résultats présentés ici font partie d'une étude engagée parallèlement à l'étude des sols de la région, sur un échantillonnage commun, avec comme objectif général de définir les potentialités de l'imagerie SPOT pour l'aide à la cartographie des sols. Le premier facteur déterminant la réflectance est l'état de surface du sol. Les états de surface du sol "intègrent : i) la couverture végétale éventuelle, ii) la taille des divers éléments grossiers (graviers, cailloux, pierres et blocs) et des éléments plus fins (sables et limons), leur distribution, iii) la rugosité de la surface, iv) la couleur, v) les variables d'état telles que les teneurs en calcaire, gypse, sel, matière organique, fer et humidité" (Girard *et al*, 1990). Les travaux de différents spécialistes de l'environnement ont montré que les états de surface jouent un grand rôle dans le fonctionnement des unités biophysiques. Dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, les états de surface s'organisent en fonction des unités géomorphologiques (cuvettes de décantation, levées...). Sur les photographies aériennes, ces unités sont repérables. Vu les multiples avantages de la télédétection aérospatiale dans les applications cartographiques, d'inventaires et de suivi de ressources naturelles, nous nous proposons dans cette étude :

- d'évaluer la capacité de l'imagerie satellitaire SPOT à discriminer les unités géomorphologiques du secteur de Podor-Nianga ;
- d'analyser les variations des réponses spectrales intra et inter-unités, avec en particulier, l'impact d'un épisode de vent de sable ;
- de voir dans quelle mesure les résultats de la radiométrie de terrain permettent d'améliorer l'interprétation d'une scène SPOT ;
- de mettre en évidence quelques relations entre les constituants des sols et leurs caractéristiques spectrales.

ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude se situe dans la cuvette de Nianga au sud de Podor (16°38 de latitude nord et 14°58 de longitude ouest), en moyenne vallée du fleuve Sénégal (voir carte générale). Le climat de cette région est de type semi-aride avec des précipitations annuelles dépassant rarement 350 mm. Le bilan hydrique est largement déficitaire à cause de la faiblesse des précipitations et d'une évapotranspiration potentielle (ETP) importante du fait des fortes températures. La moyenne des maxima à Podor est supérieure à 40° C et la moyenne des minima excède toujours 25°C.

La géomorphologie et la pédologie de cette région sont assez bien connues suite aux travaux réalisés dans cette région (Michel, 1973 ; Sall, 1983). Nous emprunterons une large partie de la description géomorphologique à ces auteurs.

D'après Michel (1973), c'est pendant le quaternaire ancien que le fleuve Sénégal a creusé sa vallée. Mais, c'est surtout au cours du quaternaire récent que les différentes unités se sont individualisées. Les unités géomorphologiques les plus caractéristiques sont :

- les hautes levées : ce sont des bourrelets de berges édifiés par le fleuve et composés essentiellement de limons et de sables.
- les petites levées : situées en contrebas des hautes levées, elles sont saisonnièrement soumises à l'inondation et portent des sols hydromorphes à pseudo-gley.
- les levées sub-actuelles : ces unités se localisent généralement dans les parties convexo-concaves des méandres et leurs sols sont composés de sables fins et de limons.
- les deltas de rupture : ils jouxtent les hautes levées et sont composés du même matériau que ces dernières.
- les cuvettes de décantation : très étendues dans la vallée, elles occupent les parties basses du paysage. Sièges de décantation des sédiments apportés par la crue, leurs sols sont des vertisols topomorphes.
- en bordure de la vallée alluviale se localisent d'immenses formations dunaires aux sols bruns subarides. Ces dunes sont séparées par des dépressions portant des sols de "colluvions bruns, mal drainés ou mêmes hydromorphes" (Michel, 1973).

Les états de surface de ces unités physiques seront analysées du point de vue de la radiométrie.

MÉTHODES ET PRINCIPES

Sur des photographies aériennes au 1/50 000 de la mission OMVS. 1980, les unités géomorphologiques de la moyenne vallée ont été délimitées. Le document issu de cette segmentation du milieu en unités est confronté à des documents annexes : cartes géomorphologiques et pédologiques de la vallée (FAO-SEDAGRI, 1969) ; spatio-cartes des états de surface réalisées par traitement numérique des images SPOT (Séguis *et al.*, 1991 ; Mané, 1992).

Deux protocoles d'échantillonnage ont été mis en place :

- échantillonnage par transects pour évaluer la capacité de la radiométrie de terrain à différencier les unités morphopédologiques ;
- échantillonnage par maille afin d'analyser les variations des réponses spectrales dans les cuvettes.

Echantillonnage par transects

Des transects allant de quatre cent mètres à deux kilomètres ont été réalisés à travers des unités géomorphologiques identifiées et localisées au GPS (Global Positioning System). Le long de chaque séquence et avec un pas de 20 m¹, des mesures radiométriques suivies de l'inventaire des composantes de la surface du sol ont été effectuées.

Echantillonnage par maille à Pont-Gari et à Nianga

Au lieu-dit Pont-Gari, sur un site de référence long de 2.400 m et large de 1.200 m, soit 288 ha, un échantillonnage systématique de 100 points a été mené selon un maillage stratifié. Cette parcelle de référence se localise dans une cuvette représentative de la moyenne vallée. A une échelle plus large, dans la cuvette de Nianga, 94 sites répartis selon un maillage stratifié ont, en outre, été échantillonnés. De cette façon, on dispose d'un échantillonnage détaillé d'une cuvette de décantation (Pont-Gari), et d'un échantillonnage plus général de l'ensemble des cuvettes de décantation de la région.

Inventaire et description des composantes physiques et biologiques de la surface des sols

Chacun des 194 points couvre une surface de 1 m². La méthode de caractérisation des états de surface qui a été utilisée s'inspire largement de celle appliquée en Tunisie par Mtimet *et al.*, (1988), Escadafal (1989), Casenave *et al* (1989).

L'appareil d'échantillonnage est un cadre métallique maillé d'un mètre de côté. La distance entre les noeuds de la maille est 10 cm soit 100 noeuds par m². Ce

1 Dans le secteur étudié, un pas d'échantillonnage de 20 m permet de prendre en compte l'essentiel des états de surface des sols

cadre est positionné et ajusté (pieds coulissants) au dessus de la surface à échantillonner de manière à ce que la partie supérieure du cadre soit bien horizontale, indépendamment de la pente.

Des aiguilles de même hauteur (100 cm) sont descendues verticalement sous chaque noeud. Les composantes physiques ou biologiques, sur lesquelles se positionnent les aiguilles au contact du sol, sont notées sur la fiche de terrain. Ainsi pour chaque surface échantillonnée, on obtient la fréquence des corps naturels localisés. Ces corps naturels peuvent être, par exemple, des croûtes de battance, la litière, la micro-faune, de la matière végétale sèche, des plages de sables *etc*

Sont notées également les hauteurs des aiguilles qui dépassent la surface de référence assimilée à la partie supérieure de la maille. Les différences entre les hauteurs des aiguilles permettent de reconstituer le micro-relief ou de calculer l'indice de rugosité.

L'inventaire et la description des états de surface élémentaires (Casenave *et al.*, 1990 ; Escadafal, 1989) sont précédés de mesures de réflectance sur la même surface.

Radiométrie de terrain

Un radiomètre Cimel CE 310 (Guyot *et al.*, 1984 ; Mougenot, 1988), portant les mêmes canaux (vert, rouge et proche infrarouge) que Spot a été utilisé. Ce radiomètre a un angle d'ouverture de 12° et le champ de mesure au sol est un cercle dont la surface est fonction de la hauteur à laquelle les mesures sont faites. Afin de minimiser les effets d'ombre, toutes les mesures de réflectance sont effectuées deux heures avant ou après 12 heures TU.

Pour chaque surface du sol ciblée, une série de dix lectures rapides de réflectance est faite. Les moyennes des valeurs radiométriques de la série dans chaque canal sont considérées comme la signature spectrale de la surface du sol visée. Ainsi pour chaque surface échantillonnée, des données radiométriques et celles relatives aux caractéristiques physiques et biologiques de la surface du sol ont été collectées.

Traitement des données

Les variables radiométriques

Concernant la radiométrie de terrain, huit variables ont été retenues :

- la réflectance dans les trois canaux de Cimel XS1(0.50 - 0.59 μm) ; XS2 (0. 61 - 0. 68 μm), XS3 (0. 79 - 0. 89 μm).
- les néocanaux ou indices dont l'utilisation apporte en général plus d'informations que les canaux bruts : indice de végétation (IV) = XS3-XS2/XS3+XS2 ; indice de couleur (IC) = XS2-XS1/XS2+XS1 ; index ratio (IRAT) = XS3/XS2 ;

$$\text{indice de brillance : IB} = \sqrt{\frac{(XS1)^2 + (XS2)^2 + (XS3)^2}{3}}$$

$$\text{et indice de rougeur : IR} = \frac{XS 2^2}{XS 1^2} \text{ (Madeira, 1991).}$$

Les variables de description de la surface du sol²

Dix paramètres caractérisent la surface des sols nus des cuvettes du secteur de Nianga :

- coprumites (CO) : pédogrégation d'origine animale
- nécrophyton (NP) : accumulation d'herbes mortes non décomposées
- nécrumites (NC) : litières en cours de décomposition
- macroépilites (MA) : accumulation relative des gravillons et graviers
- microépilites (MI) : accumulation absolue et décantation des limons
- mésoépilites (ME) : transit et déflation des sables
- dermilite démantelée (DE) : fractionnement de la croûte superficielle
- néodermilite (ND) : battance et réorganisation superficielle liée à la pluie
- dermilite (DL) : encroûtement superficiel et dessiccation
- aérophyse (AE) : fentes de retrait

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Identification des unités géomorphologiques par la radiométrie de terrain

Des transects radiométriques à travers les différentes unités représentatives de la vallée du Sénégal ont montré une variation de la réflectance en fonction des unités traversées.

Dunes et hautes levées

Du point de vue morphopédologique, ces deux unités diffèrent profondément (Michel, 1973 ; Sall, 1983). Des analyses faites sur ces unités ont montré que les hautes levées sont essentiellement composées de sable et de limon ; tandis que les dunes sont formées de sols bruns sub-arides modaux ou de sols bruns rouges sub-arides (Maignien, 1965).

2 Le vocabulaire typologique des variables des caractéristiques de la surface du sol est emprunté à Diagne et Richard, 1992.

A partir d'une série de mesures radiométriques sur ces deux unités, nous avons appliqué le test-T de Student-Fisher (Dagnélie, 1970, Gouet, 1986) aux valeurs moyennes trouvées pour chaque formation, afin de discuter l'hypothèse d'inégalité de ces moyennes.

Les résultats du test-T ont mis en évidence le caractère très discriminant de certaines variables radiométriques. En effet, sur les huit variables retenues pour l'analyse, seul le proche infrarouge (XS3) ne permet pas de différencier les dunes des hautes levées. Par contre couplé avec le vert (XS1), le proche infrarouge sépare bien les dunes des hautes levées. C'est ce que montre le diagramme bidimensionnel XS1/XS3 (Figure 1).

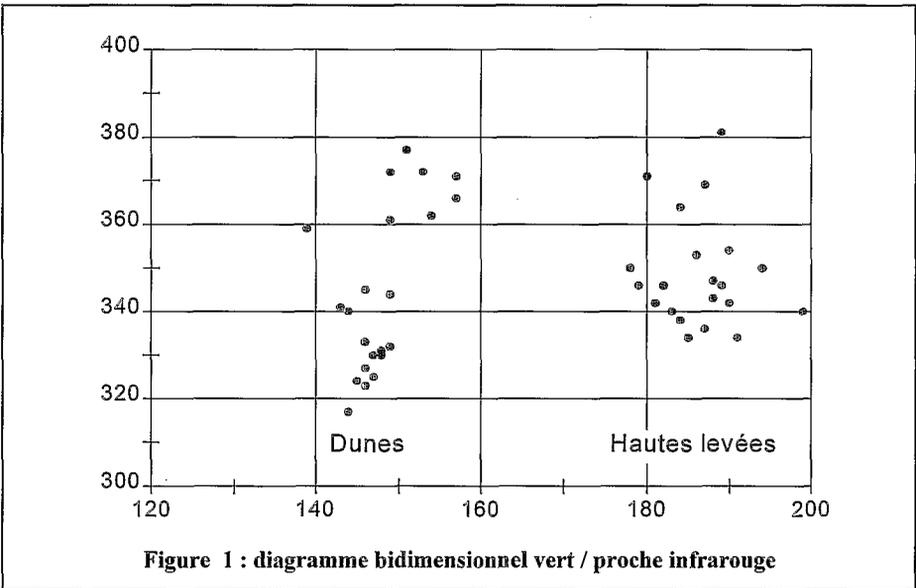


Figure 1 : diagramme bidimensionnel vert / proche infrarouge

Variables	Discrimination			
IR	+	+	+	+
XS1	+	+	+	+
IC	+	+	+	
XS2	+	+		
IB	+			
IV	+			
IRAT	+			
XS3	-			

- ++++ Très discriminant
- +++ Discriminant
- ++ Peu discriminant
- + Très peu discriminant
- Pas discriminant

Tableau 1 : pouvoir de discrimination des variables radiométriques pour les unités dunes et hautes levées

Les figures 2 et 3 signalent que la discrimination entre dunes et hautes levées par la voie de la radiométrie sera plus aisée dans le néocanal indice de rougeur (IR) et le vert (XS1). L'intégration d'autres paramètres, tels que le rouge (XS2), les indices de couleur (IC), le ratio rouge/infrarouge (IRAT) permet d'affiner la séparation entre les dunes et les levées (tableau 1).

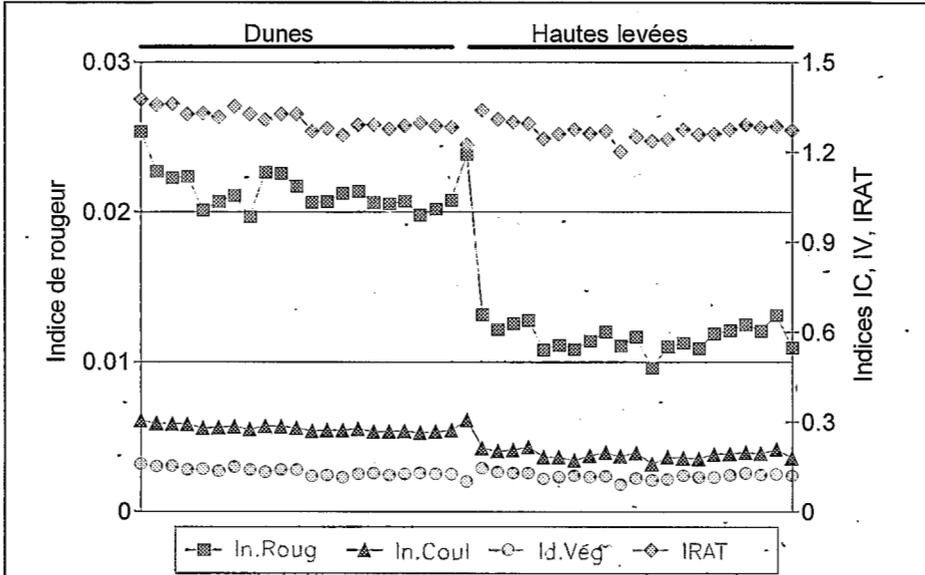


Figure 2 : variation des indices entre dunes et hautes levées

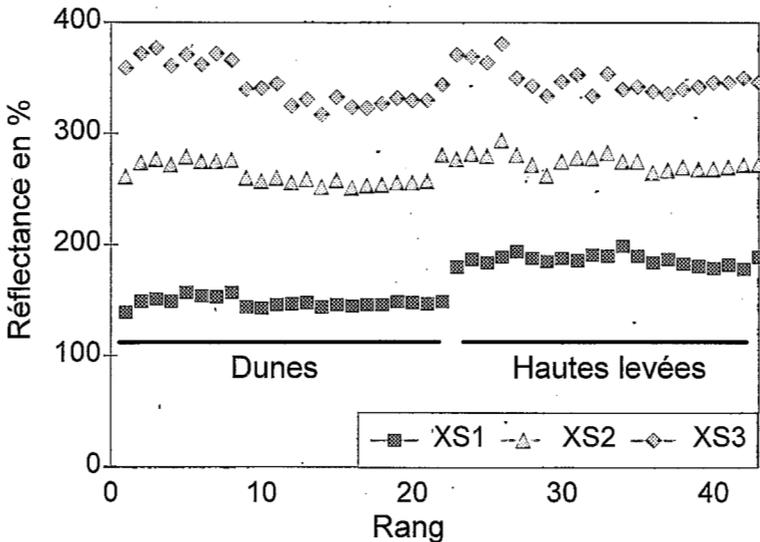
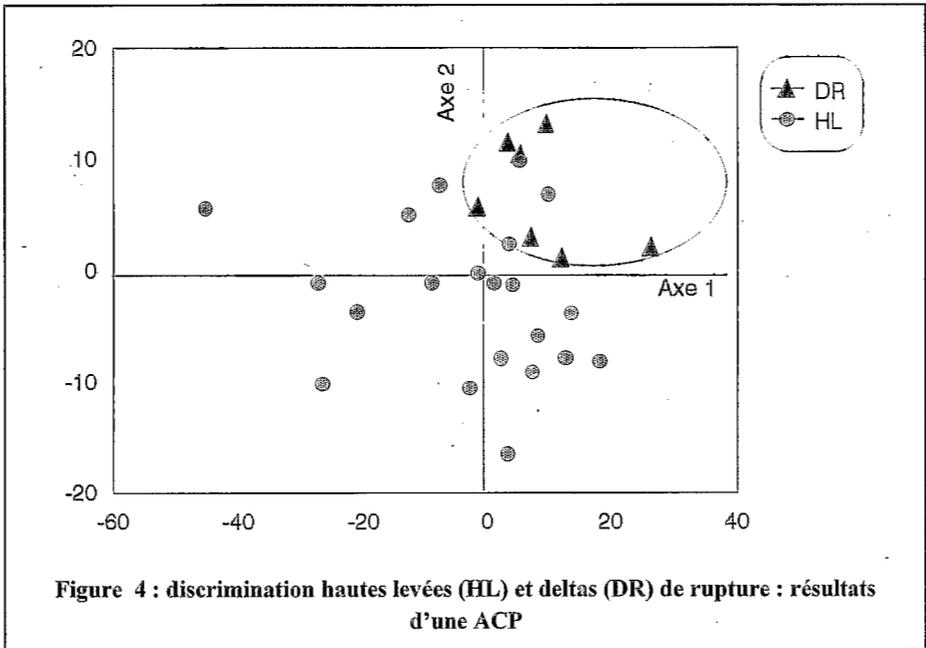


Figure 3 : variations de la réflectance sur les dunes et les hautes levées.

De récents travaux ont mis en évidence de fortes corrélations entre l'indice de rougeur et la teneur en hématite des horizons de surface (Pouget, 1991, Escadafal, 1989, Madeira, 1991). Par rapport aux hautes levées, on remarque une baisse de la réflectance dans le visible (XS1, XS2) sur les dunes (Figure 2). Cette baisse est une conséquence de l'absorption du fer dans le bleu et le vert (Escadafal, 1989, Madeira, 1991). C'est donc la forte présence des éléments ferriques dans les horizons de surfaces dunaires qui serait à l'origine du caractère très discriminant de l'indice de rougeur (Figure 3).

Hautes levées et deltas de rupture



Composés de matériaux identiques (FAO-SEDAGRI, 1969), les hautes levées et les deltas de rupture ont généralement des surfaces peu différentes (surface de type ruissellement, couleur dans la gamme des 7.5 YR). C'est d'ailleurs ce qui pose le problème de leur différenciation par la photo-analyse. Du point de vue radiométrique, ces unités ont des comportements peu différents. En usant du principe de comparaison de moyennes, le test-T de Student-Fisher est non significatif pour trois variables (XS2, IB, IC). Il est évident qu'en se basant uniquement sur les trois paramètres, il serait difficile de distinguer les hautes levées et les deltas. Toutefois, on note une légère différence de signature spectrale entre delta de rupture et hautes levées : en choisissant XS1, XS3, IV, et IRAT comme variables d'analyse, on pourrait limiter les confusions entre hautes levées et delta de rupture comme le montre la Figure 4. En définitive, les formes géométriques de ces unités permettent de les distinguer. Par ail-

leurs, notons que leur confusion n'est guère gênante puisque d'un point de vue de mise en valeur, ces unités semblent équivalentes.

Les cuvettes de décantation

Grâce à leur comportement spectral spécifique, les cuvettes se singularisent nettement. Dans la vallée alluviale, la surface des cuvettes est généralement de couleur terne (gamme des 10 YR. au code Munsell). Cette couleur, héritée de la matière organique de surface, abaisse la réflectance dans toutes les bandes du visible au proche infrarouge. Dans les cuvettes labourées, la faiblesse de la réflectance est surtout accentuée par la rugosité, secondairement par la couleur.

Les petites levées

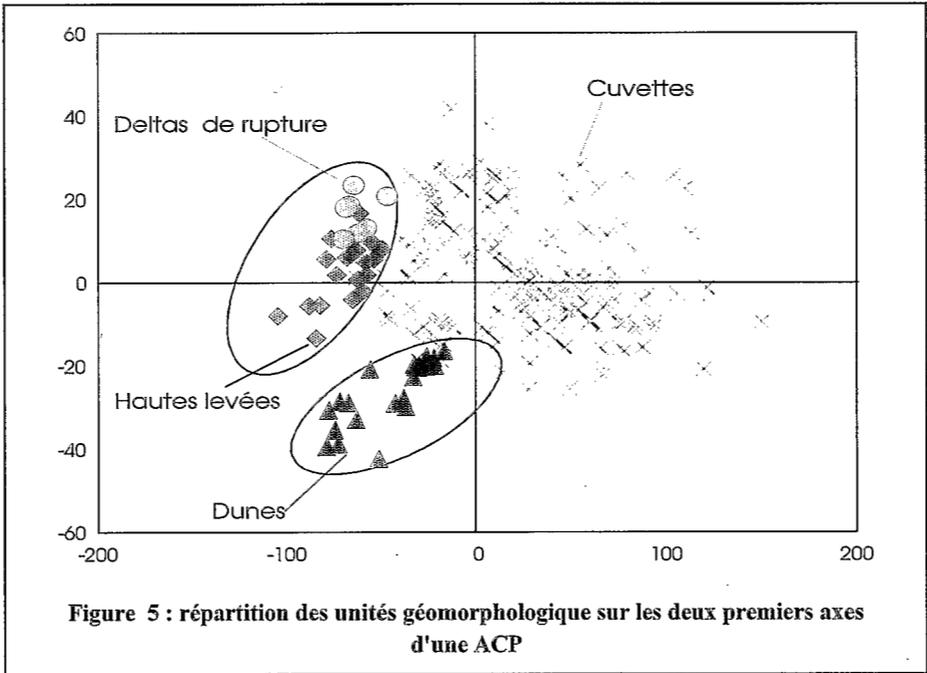
Elles portent des "terres généralement plus argileuses que celles des hautes levées et des deltas adventifs, mais moins que celles des cuvettes inondées régulièrement où les eaux stagnent longtemps" (FAO-SEDAGRI, 1969).

Une discrimination nette des petites levées par rapport aux cuvettes de décantation pose problème. Ces difficultés sont dues au fait qu'en surface, les petites levées tendent à mal drainer les eaux, occasionnant ainsi des phénomènes d'hydromorphie. Toutefois, nous noterons aussi que selon Boivin *et al* (dans cet ouvrage), les sols d'une bonne partie des unités cartographiées comme "petites levées" sont identiques aux sols des cuvettes de décantation. Il semble qu'il y ait une certaine confusion introduite ici par la carte FAO-SEDAGRI. Il est plutôt rassurant, dans ces conditions, que les réponses spectrales de ces unités soient identiques.

Au-delà de ces résultats préliminaires parfois triviaux, c'est surtout la capacité de la radiométrie de terrain à discriminer l'essentiel des unités biophysiques de la vallée du Sénégal qui est évaluée. L'analyse des mesures radiométriques sur les unités physiques de la vallée alluviale, montre que cette discrimination est possible.

Comportement spectral des unités géomorphologiques

Avec les huit variables radiométriques définies plus haut, une analyse en composante principale sur l'ensemble des données radiométriques collectées sur les principales unités physiques de la moyenne vallée (basses cuvettes, cuvettes, delta de rupture, hautes levées et dunes) a été faite. Les résultats de l'ACP montrent qu'à part les confusions entre hautes levées et deltas de rupture, l'essentiel des unités géomorphologiques de la vallée peuvent être discriminées à partir de leurs caractéristiques spectrales (Figure 5). De plus, il faut noter que dans les cuvettes, on rencontre des levées de faible extension et des zones d'accumulation de sables éoliens. Ce sont ces points qui, bien que notés comme étant des sites de cuvettes, s'associent aux dunes et levées dans la figure 5.



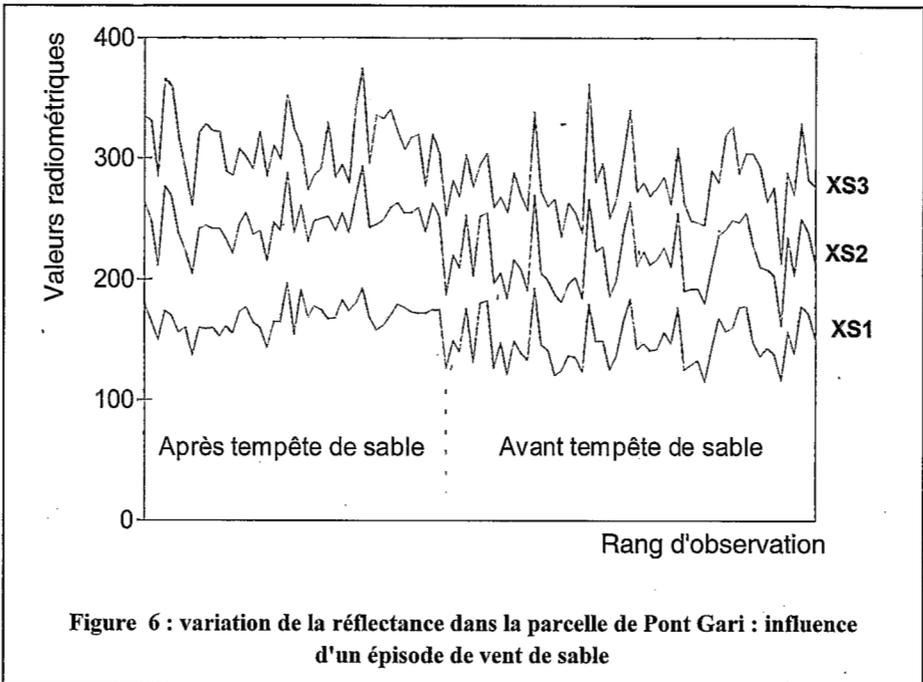
Variabilité de la réflectance à l'intérieur d'une unité géomorphologique : les cuvettes de décantation

Variabilité de la réflectance à Pont-Gari (288 ha)

Une tempête de sable s'est abattue sur le secteur étudié durant la campagne de mesures radiométriques : des dépôts de sables éoliens étaient visibles sur la surface de la parcelle de Pont-Gari. La figure 6 montre la variation de la réflectance du visible à l'infrarouge dans la cuvette de Pont-Gari. L'allure générale des courbes de variation, signale un léger ressaut sur la moitié gauche. Ce décalage correspond aux mesures effectuées sur la parcelle après la tempête de sable. Pour évaluer l'influence des apports éoliens sur les mesures radiométriques, une comparaison entre les mesures post-tempête et celles effectuées avant la tempête de sable a été faite.

Sur les huit variables radiométriques retenues, le test-T de Student-Fisher est non significatif ; confirmant ainsi l'appartenance de ces deux types d'échantillons à la même population-mère c'est-à-dire les cuvettes de décantation. Ce résultat minimise ainsi l'impact sur les mesures radiométriques du saupoudrage éolien remarqué en surface. Ce dernier affecte pourtant fortement l'aspect de l'état de surface : il semble que cette modification ne puisse pas être responsable de confusions entre unités géomorphologiques.

Les caractéristiques statistiques des mesures radiométriques obtenues dans la cuvette de Pont-Gari sont reportées dans le tableau 2.



Variabilité de la réflectance dans la cuvette de Nianga

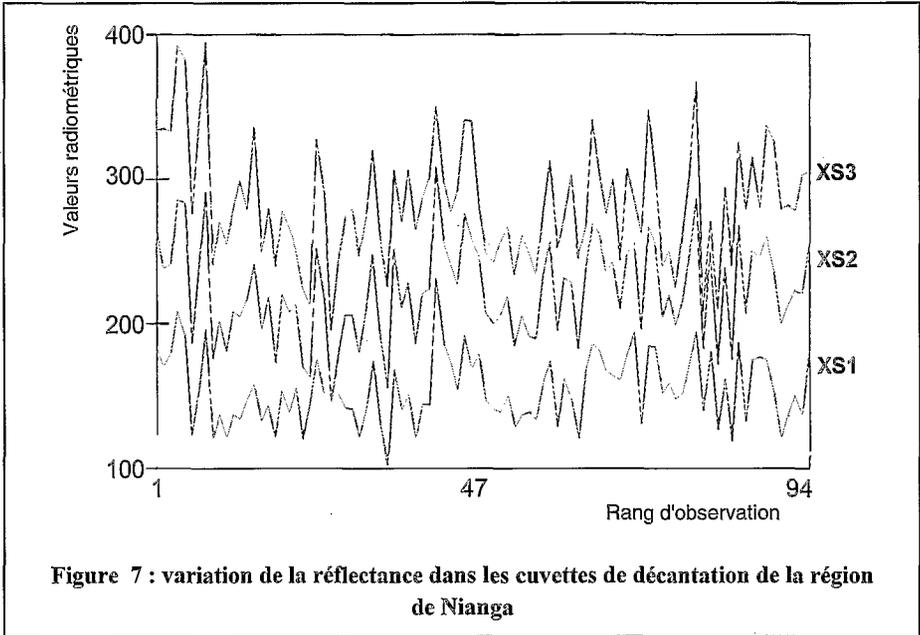
Sites	Variables	Min	Max	Moy	E-type
PG	XS1	115	197	156.7	19.50
	XS2	161	294	230.1	27.33
	XS3	213	375	293.9	31.34
	IB	168	297	233.9	25.38
	IR	0.01	0.02	0.014	0.004
	IC	0.15	0.23	0.19	0.018
	IV	0.07	0.17	0.12	0.025
	IRAT	1.15	1.42	1.28	0.064

Tableau 2 : caractéristiques de la radiométrie, cuvette de Pont-Gari

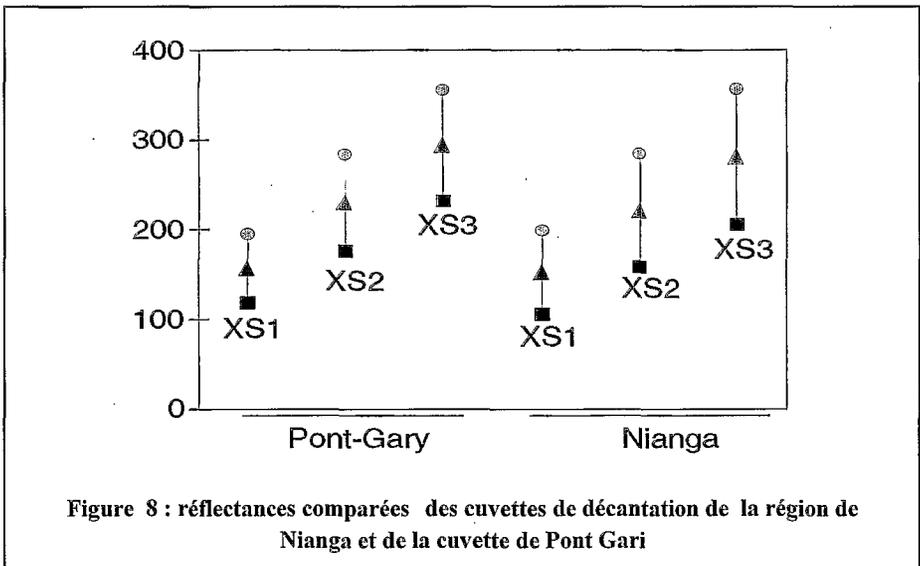
Sites	Variables	Min	Max	Moy	E-type
Nianga	XS1	97	231	154.2	24.6
	XS2	145	308	222.5	33.05
	XS3	195	395	283.8	40.84
	IB	151	305	226.6	32.02
	IR	0.007	0.02	0.014	0.003
	IC	0.055	0.25	0.18	0.027
	IV	0.04	0.19	0.12	0.034
	IRAT	1.09	1.48	1.28	0.088

Tableau 3 : Caractéristiques de la radiométrie, cuvettes de décantation de la région de Nianga

Comparativement à Pont-Gari, la variation de la réflectance dans la cuvette de Nianga est assez élevée (Figures 6 et 7). Cette forte variation est due à la superficie étudiée (10 000 ha). A cette échelle, les états de surface sont plus variés (champs labourés, rizières, zones de piégeage de sédiments...).



La comparaison des données radiométriques de Nianga et de Pont-Gari par le test-T de Student fait ressortir des différences sur trois variables (XS2, XS3 et IB). Toutefois, les données obtenues à l'échelle de la cuvette de Nianga incluent des zones cultivées. Si ces valeurs sont écartées, les moyennes radiométriques de la cuvette de Pont Gari ne sont plus significativement différentes de celles obtenues sur Nianga : la cuvette de décantation de Pont-Gari est bien représentative, au plan radiométrique, des cuvettes de la région (Figure 8).



Relations états de surface du sol/réponses spectrales : cas de la cuvette de Pont-Gari

Pour analyser les interactions entre états de surface et réflectance, la parcelle de Pont-Gari, représentative de la moyenne vallée du point de vue états de surface du sol, est retenue.

C'est l'analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM) qui est utilisée à cet effet. L'AFCM permet de synthétiser l'information, contenue dans un tableau et de visualiser les relations entre plusieurs variables (Groupe Chadule, 1986).

Contrairement à l'analyse factorielle des correspondances simples, l'utilisation de l'AFCM exige la transformation des variables en classes. Par exemple la variable XS1 est segmentée en 3 modalités (x1a, x1b, x1c) représentant respectivement les faibles, les moyennes et fortes valeurs de réflectance dans le canal vert de Cimel et (ma1, ma2, ma3) représentent respectivement les faibles, les moyennes et fortes présence des macroépilites. Ce type de codage (Tableau 4) permet à l'AFCM de mettre en évidence des relations mais aussi des gradients inter-variables.

Variables	Modalités		
	Faible	Moyen	Fort
XS1	x1a	x1b	x1c
XS2	x2a	x2b	x2c
XS3	x3a	x3b	x3c
MA	ma1	ma2	ma3

Tableau 4 : type de tableau soumis à l'AFCM : réflectance dans les trois canaux de Cimel et les composantes de la surface du sol

L'analyse factorielle des correspondances sur les variables caractéristique de la surface du sol et celles de la réflectance (Figure 9) révèle la faiblesse de l'inertie sur les axes factorielles. Cette faiblesse rend compte de la dispersion de l'information sur plusieurs axes factoriels. Néanmoins, seul le plan principal (axe 1 et axe 2) est retenu ici pour analyser les relations entre composantes de surface du sol et réflectance.

La projection des variables sur les axes 1/2 montre des oppositions entre caractères et groupes de caractères :

- pour l'axe 1 : opposition entre les variables relatives aux encroûtements superficiels (dl3) et la faiblesse des réflectances (X1a, X2a, X3a) ;

- pour l'axe 2 : opposition entre les fortes accumulations d'herbes non décomposées (np3), litière en cours de décomposition (nc3) et transit/déflation de sables (me)

Le contraste entre le fort taux d'encroûtement du sol (dl3) et la faiblesse de la réflectance dans toutes les bandes spectrales (Figure 9) traduit une certaine organisation spatiale des caractéristiques des sols.

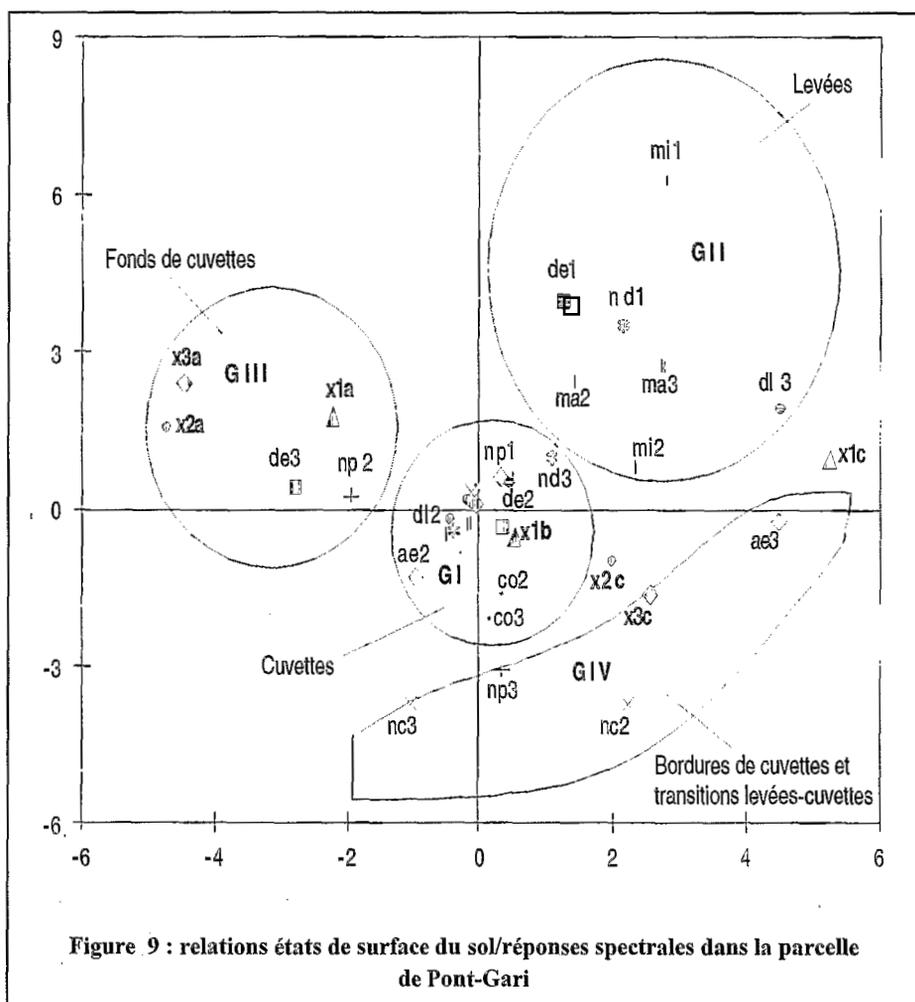


Figure 9 : relations états de surface du sol/réponses spectrales dans la parcelle de Pont-Gari

En effet, dans le secteur étudié, les pellicules de battance se rencontrent généralement sur les sols sablo-limoneux des levées et des deltas de rupture. Sur ces derniers la réflectance est très forte, alors que les basses réflectances sont notées sur les secteurs à dynamique accumulative (sédiments et matières organiques) en l'occurrence les cuvettes de décantation.

Au delà de ces oppositions de caractères, le contraste le plus significatif est réalisé par des groupes de variables. Ces associations de variables mettent en évidence quatre types d'organisations de surface :

- le premier type (GI) se caractérise par la présence moyenne de presque toutes les composantes de la surface des sols. De même, les réponses spectrales y sont moyennes dans le visible (X1b, X2b). Ce groupe qui rassemble l'essentiel des relevés effectués à Pont-Gari est caractéristique des cuvettes de décantation.
- le deuxième type (GII) représente les levées et les deltas de rupture délimitants les petits marigots que l'on rencontre dans la parcelle de Pont-Gari. Sur ces unités, le ruissellement est le principal facteur de la dynamique superficielle. Cela est attesté par la présence d'une pellicule de battance bien en place (dl3), des gravillons épars³ (ma2, ma3) associés à un faible taux de matière organique de surface (mi1).
- le troisième type (GIII) rassemble les relevés de fonds de cuvettes ou de talwegs. En surface le sol est très perturbé avec de larges fentes de retrait. Ce fractionnement en surface a pour conséquence de "piéger la lumière dans les interstices" (Courault et Girard, 1988), occasionnant ainsi une baisse généralisée de la réflectance.
- le quatrième type (GIV) rassemble les situations de bordures de cuvettes ou de zone de transition levées-cuvettes. Dans ce groupe, on trouve aussi bien les caractéristiques de surface des cuvettes que celles des levées. Mais la particularité de ce groupe est mise en évidence par la forte présence de la matière végétale non décomposée (np3) et par la litière en cours de décomposition (nc3). Les composantes np3 et nc3 traduisent une dynamique d'accumulation de la matière organique.

En définitive, on peut retenir que la disposition des variables caractérisant la surface des sols dans la moyenne vallée montre une organisation suivant la dynamique des différentes facettes morphologiques de chaque unité. La variation des réponses spectrales épouse aussi cette organisation (réflectance faible dans les fonds de cuvettes, moyenne dans les cuvettes proprement dites et assez forte à forte sur les zones de transition et sur les hautes levées / deltas de rupture).

Corrélations entre données radiométriques de terrain et données SPOT

Une simple comparaison canal par canal⁴ entre les données Cimel collectées sur des unités géomorphologiques de la moyenne vallée et les réflectances

3 "... leur présence et leur fréquence, seraient un des signes les plus tangibles du ruissellement diffus..." (Rougerie in Richard, 1989).

4 Le canal 1 de SPOT n'a pu être utilisé à cause d'un effet de barrette

moyennes Spot concernant ces mêmes unités (dunes, hautes levées, cuvettes, fonds de cuvettes) montre une bonne relation d'ensemble (Figure 10). L'imagerie Spot pourrait donc théoriquement permettre de discriminer les unités physiques de la même façon que la radiométrie de terrain.

Caractérisation des états de surface du secteur de Nianga-Podor par télédétection

Données

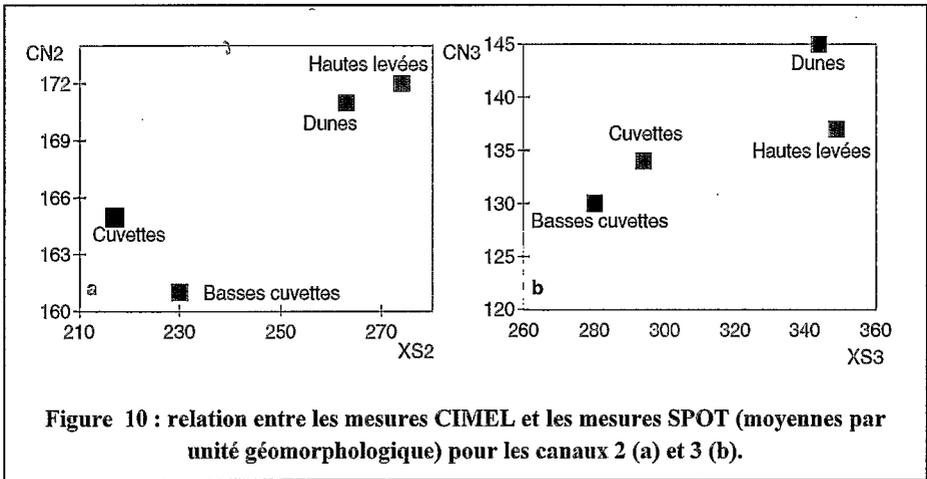


Figure 10 : relation entre les mesures CIMEL et les mesures SPOT (moyennes par unité géomorphologique) pour les canaux 2 (a) et 3 (b).

Une scène multispectrale Spot (KJ-24/317) du 25 septembre 1990 est utilisée pour analyser les comportements spectraux des états de surface des unités biophysiques de la moyenne vallée.

Sur cette scène, une fenêtre de 1247*1280 pixels est extraite, soit une bande de 638 km², entre le sud de la Mauritanie et le nord du Sénégal. Cette bande est centrée sur la cuvette de Nianga au sud de Podor.

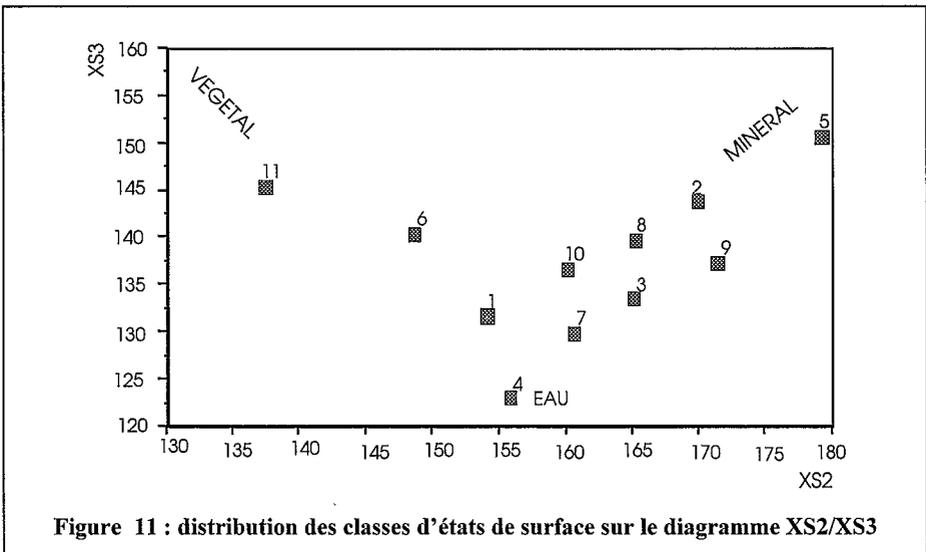
Classifications radiométriques

Les traitements numériques de l'image utilisée sont réalisés à l'aide du logiciel PLANETES (Rakoto, Andrianasolo et Mering, 1988). En traitement d'image, les classifications radiométriques consistent à regrouper en un nombre déterminé de classes tous les pixels ayant des comportements radiométriques semblables. Les classes ainsi définies sont associées à des thèmes. Pour notre étude, les thèmes représentent des états de surface homogènes.

Il y a deux types de classification en traitement d'image : les classifications dirigées et les classifications non dirigées. Il est fréquent que les résultats d'une classification dirigée soient biaisés du fait de la non représentativité des parcelles d'entraînement. Pour cette raison, nous avons préféré la classifica-

tion non dirigée pour cette étude. La classification non dirigée consiste à regrouper automatiquement tous les pixels radiométriques voisins en fonction de la distance euclidienne. Chaque classe est représentée par son centre. Avec cet algorithme, le rôle de l'utilisateur se limite à la fixation du nombre de classes et du nombre maximum d'itérations. Et contrairement à la classification dirigée, le contenu thématique d'une classification non dirigée n'est décodé qu'a *posteriori*. Après lancement de cette classification, "l'algorithme s'arrête soit lorsque deux itérations successives conduisent à la même partition, soit lorsqu'un critère convenablement choisi (par exemple, la mesure de la covariance interclasse) cesse de décroître de façon sensible, soit encore parce qu'un nombre maximal d'itérations a été fixé *a priori*" (Lebart *et al*, 1977).

Les résultats de la classification non dirigée discriminent bien par le biais des états de surface du sol les principales unités biophysiques de la moyenne vallée (voir planche en couleurs). Le diagramme bidimensionnel XS2/XS3 montre la répartition spatiale des thèmes distingués (figure 11). C'est donc ce graphique qui nous servira pour la caractérisation radiométrique des thèmes identifiés sur l'image Spot de septembre 1990.



Dans le secteur étudié, du point de vue réflectance des états de surface, on remarque une opposition en "V" entre sol nu et végétation (figure 11). Par ailleurs, le comportement radiométrique des thèmes suit "deux droites" sub-parallèles (Figure 11). La première droite regroupe des états de surface qui calquent en fait des unités pédo-géomorphologiques⁵.

5 Pour leur définition, voir le paragraphe "zone d'étude"

- thème 1 (figure) : il intègre deux types de végétation (arbustive et herbacée non graminifère) et se localise sur les basses levées.
- thème 8 : ce thème regroupe les petites levées généralement hydromorphes, les transitions levées-cuvettes et les sillons interdunaires.
- thème 2 : les dunes ;
- thème 5 : les sommets de dunes.

Sur cette droite, aux thèmes ci-dessus, s'ajoute le thème 10 (végétation de bordure de cuvette et de mares). En fait, par sa position sur le graphique, la classe 10 est le point d'intersection de deux droites ("droite végétale" et "droite minérale"). Les valeurs radiométriques enregistrées dans cette classe résultent de deux réponses spectrales (sol + végétation).

Cette "droite minérale" montre que, dans la vallée du Sénégal, la réflectance est fonction de trois facteurs : la morphologie, le degré d'humidité et la composition granulométrique de surface. En effet, dans la vallée du fleuve Sénégal, la monotonie du relief est atténuée par les classes 8, 2, et 5. Ces unités de paysage généralement émergées ont une texture essentiellement sableuse d'où leur réflectance assez forte.

Les classes 7, 3 et 9 (figure 11) de la deuxième "droite" représentent respectivement les parties humides des cuvettes, les transitions entre les levées, les petites levées et les hautes levées. Dans le paysage de la vallée, ils occupent des positions plus basses. Cette situation fait que certaines de ces unités sont périodiquement inondées, d'où leur tendance à l'hydromorphie. Spectralement, du fait de leurs caractéristiques (association sol/eau), ces états de surface s'ordonnent le long d'une droite entre les milieux exondés (8, 2, 5) aux valeurs de réflectance fortes et les surfaces immergées aux signatures spectrales basses (thème 4).

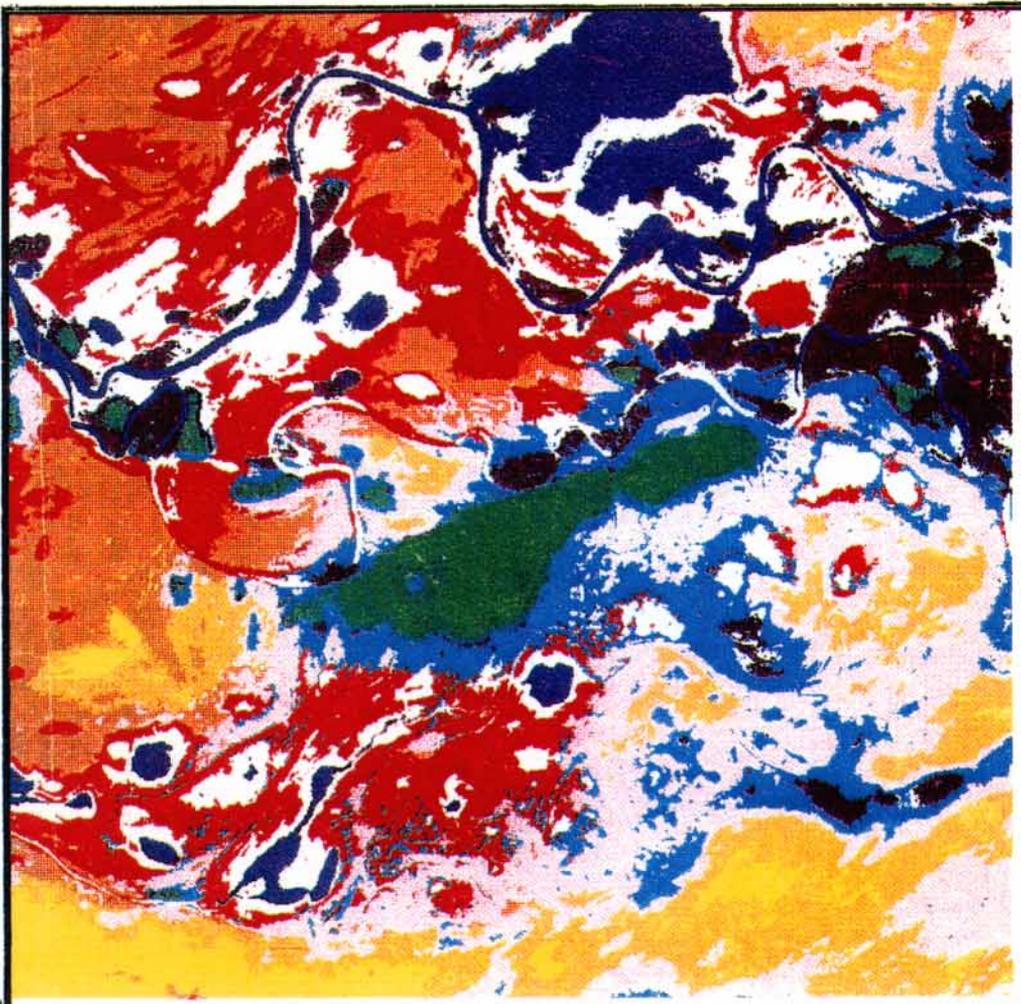
Par endroits, les eaux du fleuve Sénégal et de la rivière du Doué répondent spectralement de la même façon que les sols humides. D'après Séguis *et al* (1991), l'accroissement de la réflectance serait dû à la turbidité.

Sur ces unités s'est développée une végétation clairsemée et souvent ponctuelle.

Comportement radiométrique dans les périmètres rizicoles et les périmètres villageois

L'analyse des réponses spectrales de la végétation fait apparaître des différences au niveau du comportement radiométrique (Figure 12). Ces différences seraient soit liées à un décalage des stades phénologiques dans le cycle végétatif, soit la conséquence du bilan hydrique (satisfaisant ou déficitaire) dans les formations végétales distinguées du secteur de Nianga :

- les végétations de bordures de cuvette et de mares (thème 10) : elles occupent les périphéries des surfaces engorgées. Dans ces unités la végé-



-  1 - Végétation arbustive et herbacée non graminiforme
-  2 - Dunes et épandages de sables éoliens
-  3 - Cuvette de décantation
-  4 - Eau
-  5 - Sommets de dune
-  6 - Périmètres villageois et bordures de périmètres rizicoles
-  7 - Parties humides des cuvettes
-  8 - Transitions levées-cuvettes et sillons interdunaires
-  9 - Hautes levées
-  10 - Végétation de bordures de cuvettes
-  11 - Périmètres rizicoles de Nianga

Planche 1 : Image classée du secteur Nianga-Podor

Echelle : 0 2 km

Figure 12

tation est clairsemée, et cela se traduit par des réponses radiométriques assez élevées dans le visibles (XS2).

- le périmètre rizicole de Nianga (thème 11) : c'est un périmètre rizicole très bien délimité sur l'image. Du fait d'un apport d'eau constant, le bilan hydrique devrait être largement positif. Cela a eu pour conséquence un bon développement du riz et se traduit par des réflectances faibles (absorption de l'énergie pour la photosynthèse) dans le visible et une assez forte réponse radiométrique dans le proche infra-rouge (XS3), signe d'une forte activité chlorophyllienne.
- les périmètres villageois (thème 6) : malgré leur dispersion et leur extension très limitée, ils sont bien identifiés sur l'image Spot. Par rapport au périmètre de Nianga (11), la réflectance est plus accentuée dans le second canal.

Ces différences de comportement entre les deux périmètres pourraient rendre compte de traitements agricoles et/ou de bilans hydriques différents ; et, par conséquent, de développements végétatifs spécifiques.

La comparaison des résultats de l'image classée Spot (voir planche en couleurs), avec la carte morpho-pédologique de la vallée du Sénégal (FAO, 1969) révèle de fortes ressemblances. Les correspondances assez nettes entre les unités de réflectance homogènes et les unités morpho-pédologiques montrent que les états de surface pourraient être en partie des indicateurs de la variabilité spatiale des sols. C'est ce que nous allons vérifier en utilisant les indices de brillance (IB), de rougeur (IR) et de végétation (IV) comme clefs d'interprétation.

Relations entre les constituants et les caractéristiques spectrales des sols.

Pour mieux caractériser la surface des sols de notre zone d'étude, nous avons utilisé des indices de brillance, de rougeur et de végétation. Madeira (1991), a appliqué ces indices à la cartographie pédologique des latosols brésiliens. En effet, à partir des formules des indices (voir § variables radiométriques), on peut créer des néocanaux (IB, IR, IV). Ces derniers permettent de mettre en évidence certains constituants de la surface du sol et de mieux comprendre leur distribution spatiale.

Avec un échantillon de 11 classes, le rapport IB et IR a discriminé nettement deux états de surface (Figure 12). Les sols des sommets dunaires, (5) ont des indices de brillance et de rougeur très forts. Cela est attribuable à leur composition minéralogique dominée par une texture sableuse très riche en hémate.

Par contre les valeurs d'indice les plus basses discriminent la végétation vigoureuse, c'est-à-dire celle qui a une forte activité chlorophyllienne. Cette classe correspond au périmètre rizicole de Nianga (11).

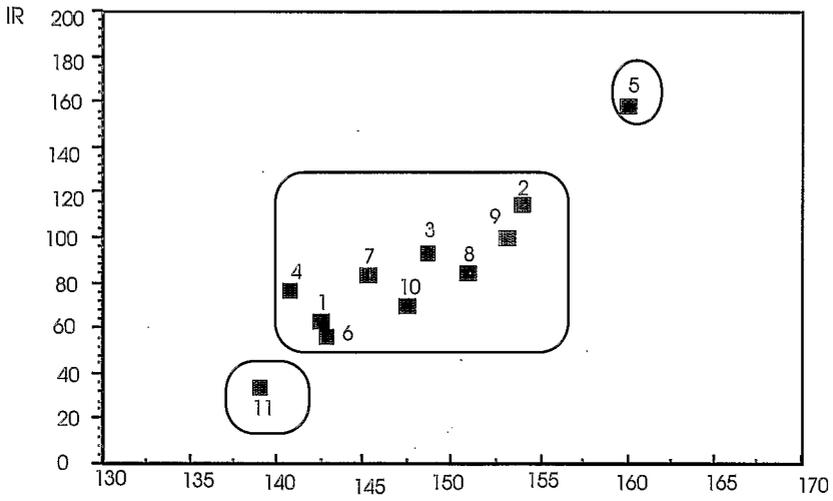


Figure 12 : relation entre indice de brillance (IB) et indice de rougeur (IR)

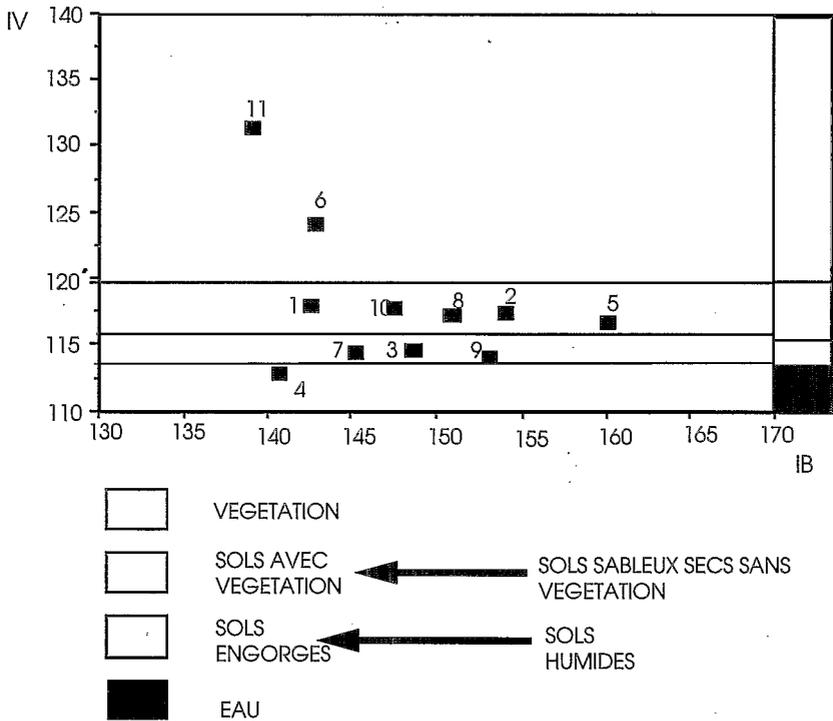


Figure 13 : relation entre indice de brillance (IB) et indice de végétation (IV)

Du fait de l'absence ou de leur pauvreté en éléments ferriques, les états de surface (eau, sols hydromorphes, végétation peu dense) correspondant au nuage de points au centre du graphique, n'ont pu être individualisés. Ces résultats confirment ceux de Madeira (1991).

Toujours avec les 11 échantillons représentant les classes, l'analyse du rapport indice de brillance (IB) et indice de végétation (IV) sépare quatre groupes (Figure 13). Ceux-ci, distribués en bandes parallèles, mettent en évidence des organisations d'états de surface suivant un gradient.

Les bandes extrêmes englobent d'une part les eaux (4), soit des indices très faibles, et d'autre part les périmètres irrigués (11, 6) bien individualisées par l'indice de végétation.

Les bandes au centre du graphique (Figure 13) traduisent l'organisation séquentielle des états de surface :

- des sols sableux secs sans végétation vers les sols secs avec végétation : les premiers sont localisés sur les parties sommitales du pays de la vallée (5, 2) et les seconds occupent les versants dunaires et les parties déprimées (8, 10, 1).
- des sols sablo-limoneux vers les sols vertiques engorgés : ces unités paysagiques sont distribuées selon une dynamique qui fait état du comportement pédo-hydrique des sols. Ce gradient va des sols des hautes levées rarement inondés vers les sols engorgés des mares et des cuvettes (7) en passant par les cuvettes (3) aux sols hydromorphes.

En conclusion, le traitement de la scène Spot de la vallée a donc permis :

- d'identifier les principales unités biophysiques de la moyenne vallée, de voir leur distribution spatiale,
- de localiser les aménagements agricoles ;
- d'estimer les superficies inondées donc susceptibles d'intéresser les cultures de décrues.

CONCLUSION

Les réflectances, qu'elles soient mesurées au sol ou par satellite, permettent de bien discriminer les unités qui intéressent l'aménagement. La radiométrie de terrain permet de préciser les critères de sélection, et permet aussi de montrer que les perturbations intra-saisonnières comme les épisodes de vent de sable n'introduisent à priori pas d'ambiguïté dans l'interprétation des réflectances mesurées au sol.

Un premier niveau d'étude montre, en outre, que des variations au sein des unités biophysique sont perceptibles au niveau des réflectances, principalement en relation avec le modelé. Ce résultat justifie de pousser plus avant les recherches, dans la mesure où les caractéristiques internes des sols sont elles

aussi liées au micro-modelé. La prochaine étape de la recherche en cours sera de préciser jusqu'à quel point l'imagerie SPOT peut aider une cartographie quantitative des caractéristiques internes des sols.

□ □ □

BIBLIOGRAPHIE

- Casenave A, Valentin C, 1989 - Les états de surface de la zone Sahélienne : infiltration et ruissellement. *ORSTOM*. 229 p
- Courault, D. et Girard, M. C., 1988, Analyse des hétérogénéités intraparcels des sols par télédétection. *Science du sol*, vol. 26, n°1, p 1 -p 12
- Dagnélie P, 1970 - Théorie des méthodes statistiques : Applications Agronomiques, Vol. 1 et 2, *Presse Agronomiques de Gembloux*, 378p.
- Diagne A, Richard J F, 1992 - Ethologie du paysage dans la "Moyenne Vallée" du fleuve Sénégal, *Université Cheikh Anta Diop, Dakar.*, 62 p
- Escadafal R, 1989 - Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et par télédétection. Application : exemple de la région de Tatouine (Tunisie). *Coll. Etudes et Thèses, ed. ORSTOM Paris*, 317 p
- FAO-SEDAGRI, 1969, Cartes pédologiques et géomorphologiques de la vallée du Sénégal à 1 : 50 000, *FAO Dakar*, 1 notice (251 p.) et 36 cartes.
- Girard M-C, Isavwa L. A, 1990, L'état de l'art en télédétection sur les zones arides et semi-arides, *UNESCO, revue Nature et Ressources*, Vol. 26, N° 1, p 3-9
- Gouet JP, 1986 Les comparaisons des moyennes et des variances : application à l'agronomie, *STATTICF*, 55 p
- Groupe Chadule, 1986 -, Initiation aux pratiques statistiques en géographie, *Ed. Masson*, 189 p
- Guyot G, Hanocq JF, Buis JP, Saint G, 1983 - Mise au point d'un radiomètre de simulation de Spot. *Colloque INRA "Signatures spectrales d'objet en télédétection"*. Bordeaux, 12-16 sept, Ed. INRA, pp 233-242
- Lebart L, Morineau A, Tabard N, 1977 - Techniques de la description statistique. Méthodes et logiciels pour l'analyse des grands tableaux. *Dumod*. 351 p
- Madeira J, 1991 Etude qualitative des relations constituants minéralogiques : réflectance, diffusion des latosols brésiliens : application à l'utilisation pédologique des données satellitaires TM (Région de Brasilia), *thèse université Paris VI*, 232 p
- Maignien, R., 1965 Notice explicative de la carte pédologique du Sénégal au 1/1000 000, *Ed. ORSTOM Paris*, 63p et carte.
- Mané, L, 1992 - Moyenne vallée du Sénégal : Apport de la télédétection à la cartographie des états de surface, rapport de stage, multig. *ORSTOM Bondy*, 34 p.
- Michel P, 1973 - Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique, mémoire *ORSTOM n° 63*, tomes 1-2-3, 752 p., Ed.
- Mougnot B, 1988 - Note sur l'étalonnage et l'utilisation du radiomètre de simulation Spot Cimel CE 310, *Multig. ORSTOM-Dakar*, 6 p.
- Mtimet A ; Pontanier R ; Asseline J, 1988 - Une méthode de caractérisation, en zone aride et semi-aride, des états des surfaces élémentaires (1m²) soumises à des averses contrôlées. *Direction des Sols, Tunis*, 17p.

□ Pouget M, 1991 - Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides tropicales. *Ed. ORSTOM Paris, 449p.*

□ Rakoto, M., Adrianasolo, A. et Mering, C., 1988, Guide de l'utilisateur de "Planètes", Laboratoire d'Informatique Appliquée, *Multigr. ORSTOM Bondy, 130 p.*

□ Richard JF, 1989 Le paysage, un nouveau langage pour l'étude des milieux tropicaux, *Ed. ORSTOM Paris, 210 p*

□ Sall M M, 1983 - Dynamique et morphogenèse actuelle du Sénégal occidental, *thèse doctorat d'état ULP Strasbourg, 604 p*

□ Séguis L, Chevillote H, Gascuel C, Boivin P, Braudeau E, 1991, Optimisation des aménagements hydro-agricoles dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Contribution de l'imagerie satellitaire, *4eme journées scientifiques du réseau de télédétection de l'UREF, Oct. 1991, Université de Sherbrooke, Québec, 8p.*

□ □ □