

## CARACTERISTIQUES SPECTRALES DE SURFACES SALEES A CHLORURES ET SULFATES (SENEGAL)

---

MOUGENOT B. <sup>1</sup>

### RESUME

*La présence de sels à la surface des sols est utilisée comme marqueurs de caractéristiques hydro-pédologiques spatiales et temporelles de sols nus de bas-fond, en basse Casamance au sud du Sénégal. Ces sels solubles, d'origine marine précipitent à la surface des sols à partir de nappes peu profondes pendant la longue saison sèche. Ils sont représentés par des chlorures dominants et des sulfates, plus ou moins hydratés ou hydroxylés. L'acquisition de données satellitaires Spot et de nombreuses études par ailleurs, ont montré l'intérêt d'étudier les propriétés spectrales de la surface des sols.*

*Rarement purs, les sels constituent des éléments à évolution saisonnière ou même journalière, qui se combinent aux constituants minéraux et à la matière organique. Ils peuvent influencer la couleur liés à l'ion ferrique, l'humidité par leur hygroscopicité et la micro-rugosité en modifiant la structure des horizons de surface.*

*Les caractéristiques spectrales de quelques états de surface élémentaires sont étudiées en laboratoire avec un spectrophotomètre. On identifie les constituants par diffractométrie X et par analyses. Les spectres sont comparés à des références pour les sels les plus connus. Des corrélations sont tentées avec les principaux constituants, les données radiométriques satellitaires.*

*Le problème de l'échantillonnage est discuté à partir des mesures spectrales de micro-horizons remaniés ou non et à différentes humidités.*

### 1. INTRODUCTION

La télédétection spatiale peut représenter un moyen de caractérisation et de suivi des sols salés ou voie de salinisation (MANCHANDA, 1984; RICHARDSON et al., 1976). La halite (chlorure de sodium) et le gypse sont les sels dominants à la surface des sols. Ils correspondent à une réflectance dans le visible et le proche infra-rouge le plus souvent maximale par rapport à l'environnement (BERENGER, 1985; LEMASSON, 1988). Le gypse, comme les autres sulfates, possède en plus des bandes d'absorption dans le moyen infra-rouge (EPEMA, 1986). La détection,

---

<sup>1</sup>Unité de télédétection, LIA, ORSTOM Centre de Bondy.

parfois impossible (BARRIOS, 1988), se fait aussi de façon indirecte à partir du paysage et de marqueurs comme la végétation ou l'humidité (BIRD et al. 1982; MOUGENOT, 1989a).

L'infra-rouge thermique et les micro-ondes représentent des moyens d'investigations supplémentaires encore peu utilisés. Le premier, distingue les surfaces salées parce qu'elles sont plus froides que l'environnement, les sels relâchant en début de journée l'eau adsorbée au cours de la nuit (canal 6 de TM: MENENTI, 1986). Les micro-ondes sont efficaces pour les eaux salées (CALVIN et al. 1987; KLEMAS et al. 1987). Il serait intéressant d'étudier leur intérêt pour les sols et les nappes salés. Ces domaines spectraux ne seront pas abordés ici.

Quelques résultats sont présentés, sur la caractérisation spectrale en laboratoire du visible au moyen infra-rouge, d'états de surface en domaine salé chloruré et sulfaté (basse Casamance, sud Sénégal). On étudiera les caractéristiques spectrales d'échantillons de surface remaniés et non remaniés avant leur analyse physico-chimique. L'intérêt est ensuite de simuler le signal satellitaire. Cette opération nécessite un changement d'échelle spectral et spatial, soit d'une définition spectrale de 5 nm sur une cible de 2 cm<sup>2</sup> en laboratoire, à plus de 100 nm sur 400 à 900 m<sup>2</sup> pour les satellites Landsat TM et SPOT. Le but est d'essayer de déterminer les bandes spectrales et leurs combinaisons (indices) les plus adaptées pour mettre en évidence les surfaces salées.

## 2. LE MILIEU ETUDIE

La région étudiée se situe en basse Casamance au sud du Sénégal. Le milieu est d'origine fluvio-marine, ouvert sur la mer et soumis à un climat tropical à longue saison sèche. Les déficits pluviométriques cumulés depuis 1968 ont entraîné une sursalure quasi permanente des eaux libres, des nappes sub-affleurantes puis des sols, et une extension de l'acidification consécutive à la baisse des nappes (oxydation de la pyrite néoformée sous mangrove à Rhizophora). Les principales conséquences sont un dépérissement de la végétation naturelle de mangrove, l'abandon de rizières et l'extension de surfaces dénudées hypersalées et souvent acides appelées "tannes" (sols sulfatés acides; MARIUS, 1985).

Il existe de bonnes relations entre les états de surface et les sols et les nappes. Le traitement de données SPOT acquises sur le milieu étudié ont cependant montré les difficultés de caractériser le comportement spectral des divers états de surface salés à un instant donné. Les dynamiques sont journalières et mensuelles sous l'effet des marées, et saisonnières avec les pluies, les fluctuations des nappes et les remaniements éoliens (MOUGENOT, 1989a).

## 3. METHODES

Sur le terrain, les opérations sont réalisées en saison sèche (mars 1990) à marée basse, sur une vingtaine de sites considérés comme représentatifs sans être exhaustifs (sites de validation d'images SPOT). Des échantillons de surface sont prélevés à la fois en sacs pour analyses, et dans des boîtes plastiques (35x25x6 mm<sup>3</sup>), non perturbés et conservés au frais. Des descriptions,

photographies verticales, mesures de pH et Eh in situ et de réflectance terrain (Cimel) caractérisent chaque site.

En laboratoire, on réalise des spectres en réflectance diffuse de 380 à 2500 nm, avec un spectrophotomètre de type "CARY 2300" (laboratoire de Minéralogie et Cristallographie de Paris 6). Des minéraux purs ou en association sont d'abord passés non perturbés dans un état proche du terrain, puis séchés à 40°C et broyés à 2 mm. Les opérations sont répétées sur les échantillons de surface avec un suivi du comportement spectral au cours du dessèchement des surfaces prélevées humides.

Dans le visible et le proche infra-rouge, la forme des spectres n'est influencée que par les deux à trois premiers millimètres où on détermine les différentes phases: humidité, matière organique, granulométrie et minéralogie, sels solubles et fer total (analyses en cours). L'identification des minéraux solubles ou instables en mélange ou associés aux éléments minéraux et organiques, est réalisée par diffractométrie X sans prétraitement autre qu'un tri manuel.

Les bandes spectrales des satellites SPOT et Landsat TM sont simulées et confrontées aux constituants. Nous ne validerons les résultats qu'à partir des seules données SPOT de saison sèche acquises en mai 1987 et se rapprochant le mieux des conditions de prélèvements. Ces données simulées ou réelles, pour être comparables, sont transformées en réflectance satellitaire (pour cent, hors atmosphère).

On utilisera les procédures suivantes:

- simulation des bandes spectrales des satellites à partir des spectres en réflectance suivant une référence halon, par convolution avec les réponses des filtres de chaque canal; et pour les comparaisons satellitaires, corrigées du passage dans l'atmosphère et de l'environnement avec le logiciel "5S" (TANRE et al., 1986).
- transformation des comptes numériques SPOT en luminance vraie (division par le coefficient d'étalonnage et le gain), puis en réflectance par rapport à l'éclairement solaire hors atmosphère (Manuel de Référence SPOT Vol 1 et 2; EPEMA, 1990; BILDGEN et al., même actes).

## 4. LES ETATS DE SURFACE

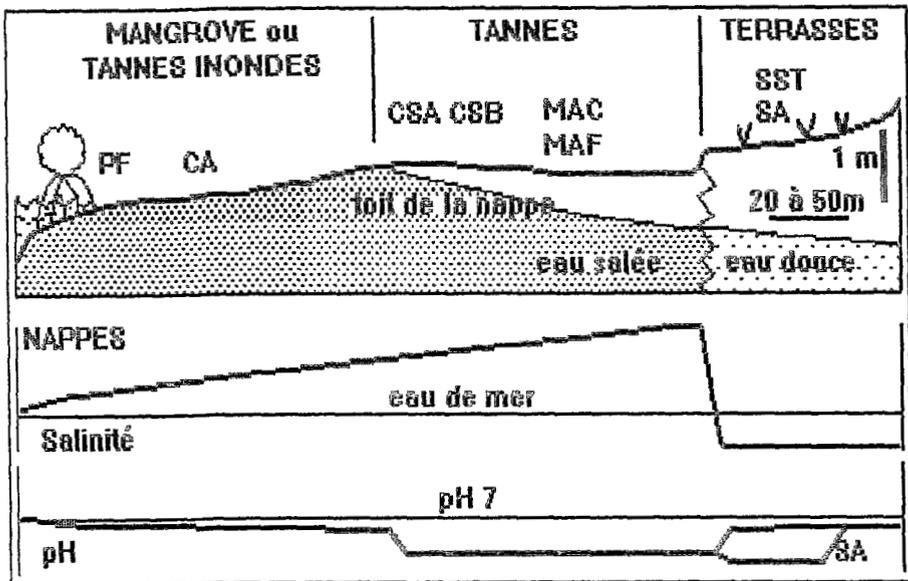


Figure 1 Transect mangrove-tanne-terrasse de zone dégradée en basse Casamance (marée basse et saison sèche), principaux états de surface associés, profils moyens de la salinité et du pH de la nappe.

Les états de surface s'organisent suivant des séquences de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres des marigots et la mangrove (ou tannes inondés si les palétuviers ont récemment disparu), vers les tannes puis les terrasses (Fig. 1). Ils sont liés à la présence d'une nappe sub-affleurante fluctuant avec les marées, salée à hypersalée et acide vers les tannes (tannes vifs, 3 à 5 fois la salinité de l'eau de mer) et non salée, acide à hyperacide sous les terrasses (MOUGENOT, 1989b).

Les états de surface dans le paysage, correspondent ainsi à des marqueurs de processus hydro-pédologiques:

- sous palétuviers: accumulation de matière organique et concentration de halite dans les nappes affleurantes.
- sur les tannes vifs: croûte salines en surface sous l'effet de l'évaporation (halite et gypse dominants), micro-agrégation (pseudo-sables); oxydation de la pyrite et du fer ferreux des nappes, en jarosite et oxy-hydroxydes de fer.
- sur les terrasses: cycles d'oxydo-réduction du fer (stagnation d'eau de pluie), précipitation locale de sulfates mixtes d'aluminium, de fer et de magnésium (horizon pyriteux en profondeur en cours d'oxydation, pH 1 à 3, LEBRUSQ et al., 1987).

Je ne m'intéresserai qu'aux sols nus ou très peu couverts en saison sèche, largement dominants sur les deux tiers de la zone étudiée (végétation de palétuviers, d'halophytes ou de graminées inférieures à 10%).

Une séquence "type" en milieu dégradé (Fig. 1) présente les principaux états de surfaces suivants, décrits de façon simplifiée:

- **pellicules fluides** (PF; 0,2 à 1 cm d'épaisseur en moyenne) argileuses et organiques, depuis les rives vers les tannes inondés;
- **voiles algaires**, puis après dessiccation, **croûtes algaires et salines** (CA; 0,5 à 2 cm) s'individualisant en retrait;
- **croûtes salines** peu nettes (CSA, <0,5 cm) ou bien individualisées (CSB, 0,2 à 1 cm), associées aux éléments du sol, sur les tannes vifs souvent à sables fins dominants;
- **micro-agrégats** (MAC, clair; MAF, foncé, plus organique; 1 à 5 cm), horizons à pseudo-sables de 0,1 à 2 mm de diamètre favorisés par une texture fine et issus de l'évolution de l'horizon sous les croûtes salines.
- **croûtes structurales** à un micro-horizon (SST, 0,1 à 0,2 cm), plus ou moins altérées, sur les terrasses en l'absence de végétation, avec localement des **croûtes à sulfates mixtes** (SA, amas et placages discontinus en taches décimétriques). Malgré une faible extension actuelle, elles témoignent d'une hyperacidité importante à identifier.

D'autres types de croûtes se développent pendant et après la saison des pluies, sur les parties basses dessalées des tannes, les terrasses, et sur les rizières: **croûtes de décantation, desquamation, érosion** (CASNAVE et VALENTIN, 1989).

Les croûtes algaires se développent aux grandes marées et en saison des pluies. Les croûtes salines disparaissent avec les pluies mais peuvent se reconstituer après quelques jours secs, au lieu souvent de plusieurs semaines pour les surfaces à micro-agrégats. Les sulfates mixtes précipitent rapidement avec la baisse des nappes mais subissent la déflation éolienne.

Etats de surface	Humidité %	Matière organique %	Sels %	Texture	Densité Apparente	Couleur Munsell
PF	45	7.5	6	AL	0.4	10YR2/2
CA	32	8.0	9	AL	0.6	10YR4/3
CSA	23	4.0	13	LS	1.0	10YR5/3
CSB	18	0.8	57	SL	1.2	10YR7/3
MAC	6	3.0	21	AL	0.8	10YR6/3
MAF	7	8.8	20	LA	0.7	10YR4/2
SST	4	2.9	<1	LAS	1.3	10YR6/2

TABLEAU 1: Caractéristiques physico-chimiques de quelques états de surface. Résultats moyens sur 2 à 3 échantillons en pour cent volumique

Le tableau 1 présente quelques caractéristiques physico-chimiques de sept états de surface fréquemment rencontrés. Des analyses complémentaires sont en cours, en particulier sur les formes et la localisation du fer (fer total <1% à 10%, des tannes vers la mangrove). Les bandes d'absorption observées dans le visible ne seront pas toujours indicatrices de sa teneur totale. Le fer se localise dans le matériau (quartz encore ferruginisés, concrétions et pyrite néoformée) et dans les minéraux d'oxydation (hydroxydes, sulfates) individualisés ou en taches diffuses, où il semble participer le plus à l'augmentation relative de la pureté pour de faibles teneurs.

## 5. CHLORURES ET SULFATES OBSERVES EN SURFACE:

Cette appellation correspond à des minéraux de solubilité faible comme le gypse à très élevée comme la halite, rencontrés dans ce milieu chloruré et sulfaté. La halite est le seul chlorure identifié (d'autres chlorures plus hygroscopiques semblent exister). Les sulfates, beaucoup moins abondants, sont aussi les plus variés, hydroxylés ou hydratés, associés à tous les cations disponibles, métaux compris (Tableau 2).

La halite pure est blanche. Elle précipite sans cristaux visibles au dessus du micro-horizon de surface en croûte continue ou le plus souvent en le cimentant. On la rencontre également en surface en amas à cristaux cubiques (< 1 à 5 mm). En fines aiguilles de 1 à 2 millimètres, elle entraîne le foisonnement des horizons micro-agrégés.

CHLORURE:		
	<i>HALITE:</i>	NaCl
<i>SULFATES:</i>		
Hydroxylés		
<i>Fe</i>	JAROSITE	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
	NATROJAROSITE	$NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
<i>Al</i>	ALUNITE	$K(Na)Al_3(SO_4)_2(OH)_6$
	NATROALUNITE	$NaAl_3(SO_4)_2(OH)_6$
-----		
Hydratés/hydroxylés:		
<i>Ca</i>	<i>GYPSE</i>	$Ca(SO_4)2H_2O$
<i>Mg</i>	HEXAHYDRITE	$Mg(SO_4)6H_2O$
	BLOEDITE	$Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$
<i>Fe</i>	COPIAPITE	$FeFe_4(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 9H_2O$
<i>Al</i>	TAMARUGITE	$NaAl(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$
	HALOTRICHITE	$FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$
	PICKERINGITE	$MgAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$

TABLEAU 2: Chlorure et sulfates observés en surface sur les échantillons étudiés. Les plus fréquents sont en gras et italique, les secondaires en gras, les autres sont plus rares (< 5%, natrojarosite...) ou localisés (copiapite). D'autres sulfates ont été identifiés par ailleurs (rozénite, coquimbite) (LEBRUSQ et al., 1987).

Parmi les sulfates, le gypse et l'hexahydrate en faible proportion dans les micro-horizons de surface (< 10%), sont surtout visibles sous forme de fines aiguilles millimétriques dans les horizons microagrégés. Les sulfates mixtes précipitent le plus souvent sous forme d'amas concrétionnés ou pulvérulents millimétriques à centimétriques, blanc à brun clair ou jaune. Sur les basses terrasses, la tamarugite domine sans chlorures associés, mais très rarement en phase pure; sur la mangrove et les tannes, c'est la halite puis très loin le gypse et l'hexahydrate. Les sels sont associés aux autres éléments du sol en proportions variables: quartz, kaolinite et argiles 2/1 plus rares, oxy-hydroxydes de fer, matière organique et eau. Ces différents constituants seront à l'origine des caractéristiques spectrales des états de surfaces.

## 6. CARACTERISTIQUES SPECTRALES DES ETATS DE SURFACE

L'analyse des spectres, est réalisée d'après les travaux de HUNT et al. (1970 à 1972), avec en particulier deux articles consacrés aux minéraux observés (1971b, 1972), et une synthèse (1977). MULDER et al., (1986) résumant les principales bandes d'absorption pour les sols: phénomènes de transition et effets du champ cristallin pour le fer en dessous de  $1 \mu$  et vibratoires (d'abord en harmoniques) au delà, avec en particulier ici, les groupements O-H (hydroxyle), Al-OH et l'eau incluse dans le réseau cristallin ou adsorbée. Le premier paragraphe décrit des spectres de minéraux purs ou en association, isolés de leur milieu. Les deux suivants concernent des échantillons représentatifs de surfaces naturelles couvrant au moins quatre pixels SPOT (Tab. 1).

### 6.1 HALITE ET SULFATES:

La figure 2 présente les spectres de la halite et du gypse purs (échantillons laboratoire, blancs: HAL et GYP) et d'échantillons prélevés sur le terrain avec les minéraux dominants suivants (séchés à  $40^{\circ}\text{C}$  et broyés à 2 mm, proportions des constituants indicatrices, à partir des diffractogrammes X et des analyses quantitatives en cours):

- halite (Hal): croûte saline brun très clair; NaCl > 70% + quartz (25%), gypse, hexahydrate, hydroxydes de fer.
- gypse et jarosite (GJa): croûte jaune clair; gypse et jarosite, environ 30% et 20% + quartz (40%), halite (10%), kaolinite, hydroxydes de fer
- tamarugite (Tam): concrétions brun très clair; > 50% + quartz (40%), gypse, natroalunite.
- copiapite (Cop): jaune orange vif; > 80% + quartz, gypse (vallée de Bignona).

La halite pure, très réfléchante (50% de la référence halon), ne présente pas de bandes d'absorption caractéristiques mis à part celles dues à l'eau à  $1,4 \mu$  et  $1,95 \mu$  (harmoniques de phénomènes vibratoires). Un passage à  $120^{\circ}\text{C}$  ne les fait pas totalement disparaître, en particulier autour de  $1,9 \mu$ . Ceci indique une eau fortement adsorbée ou en inclusions (HUNT, 1972). Les événements autour de  $2,2 \mu$  semblent liés à un bruit. Une croûte saline (Hal) simplement salie de poussières et de quelques micro-agrégats du sol est marquée par les bandes d'absorption du fer ferrique de la goethite (transitions  $<0,55; 0,64; 0,9 \mu$ ). Cette remarque est également vraie pour le gypse et le quartz qui réagissent comme un fond transparent sauf pour l'eau (DAVIS et al., 1982).

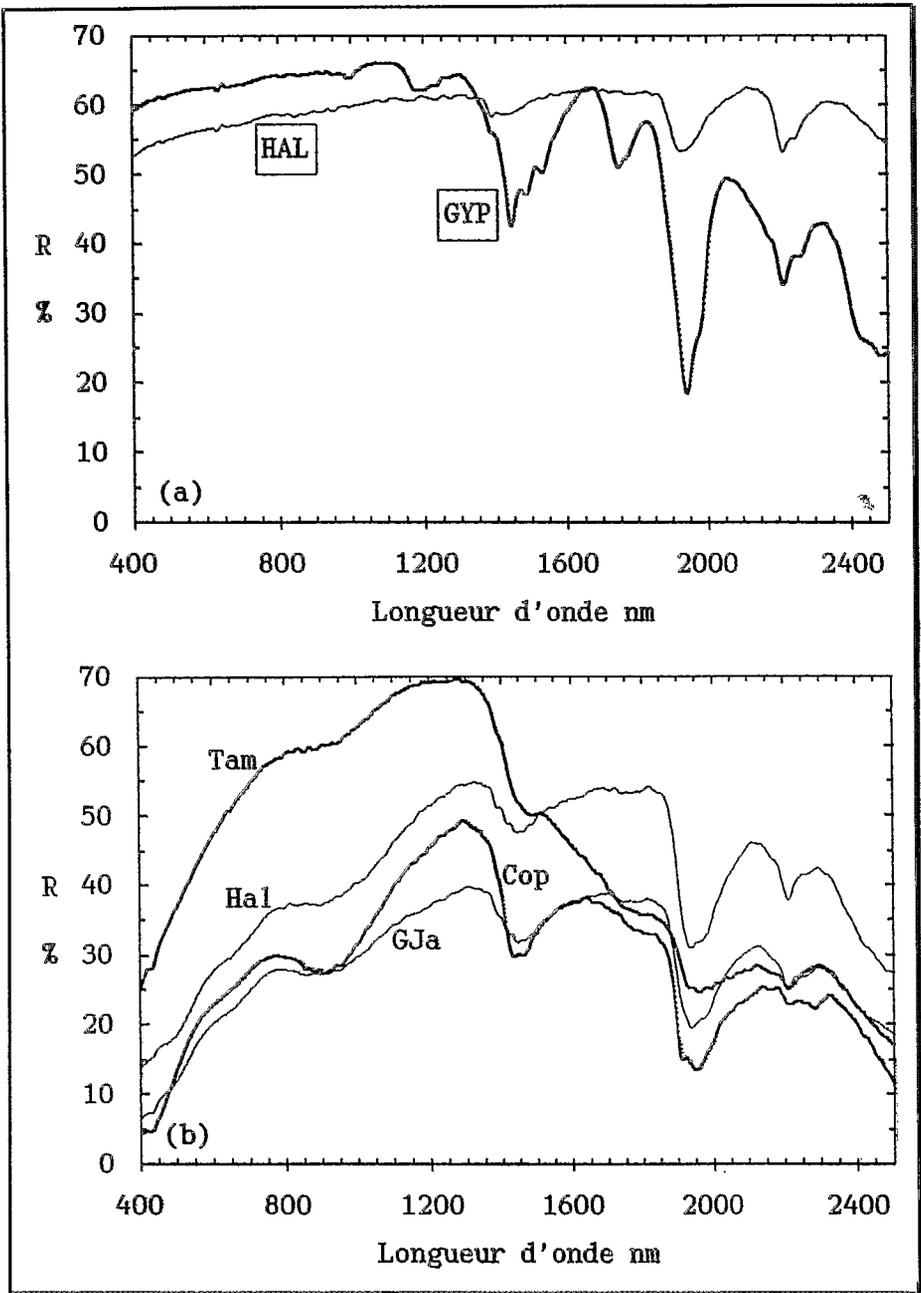


Figure 2 (a) Spectres en réflectance diffuse de halite et gypse purs (HAL et GYP); (b) Spectres de minéraux prélevés à la surface de sols salés à halite et à sulfates mixtes en basse Casamance (Hal: halite+Fe - Tam: tamarugite+natroalunite - GJa: gypse+jarosite - Cop: copiapite).

Les bandes d'absorption de l'eau liée du gypse sont fines, intenses et décalées par rapport à l'eau libre. En mélange, elles diminuent, s'élargissent et disparaissent pour les moins importantes (LINDBERG et SMITH, 1973). C'est le cas pour l'échantillon de gypse/jarosite où les événements liés au fer ferrique dominent. Les bandes des groupements O-H de la jarosite à 1,45 et 2,2  $\mu$ , sont confondues avec celle de kaolinite mélangée aux minéraux. La largeur des bandes de l'eau à 1,45 et 1,9  $\mu$  est attribuée à l'humidité résiduelle. La réflectance reste peu élevée contrairement à celle des croûtes gypseuses (gypse > 60%) (ESCADAFAL, 1989).

Même en mélange, les sulfates mixtes possèdent des caractéristiques propres que l'on a rapprochées des minéraux dominants dans l'attente de résultats sur des phases pures. Les spectres des sulfates hydratés de fer (exemple de la copiapite) et surtout d'aluminium (tamarugite, structure d'après ROBINSON et FANG, 1969), d'abord convexes jusqu'à 1,4  $\mu$ , présentent ensuite un affaissement général de la réflectance. La pente devient négative, avec deux principaux épaulements vers 1,475 et 1,8  $\mu$  et des bandes d'eau peu liée à 1,9 et liée à 1,95  $\mu$ . D'après HUNT, les liaisons S-O des ions sulfates ne peuvent produire d'événements, même en harmoniques, détectables aux longueurs d'onde considérées. Les groupements Al-O-H des octaèdres  $Al(H_2O)_6$  (et moins fortement pour Fe), semblent à l'origine de cet allure caractéristique qui rappelle celle du diaspore (HUNT, 1970). En dessous de 1  $\mu$ , le spectre indique la présence de minéraux ferrugineux non détectés en diffractométrie X sur les échantillons bruts.

L'homogénéisation des échantillons à 2 mm et le séchage n'affectent la plupart du temps que l'intensité des bandes d'absorption. Des sulfates font exception en fonction de l'ordre de précipitation des sels. Cela n'aura pas d'incidence ici au niveau satellitaire.

La halite associée à des éléments plus stables du sol peut occuper des surfaces homogènes de la taille de plusieurs pixels SPOT. La réponse des états de surface à sulfates mixtes nécessitera d'être modélisée en prenant en compte l'environnement à l'intérieur d'un pixel (sol nu et végétation) (paragraphe 7).

## 6.2 ETATS DE SURFACE NON REMANIES

Sur la figure 3a, deux grands groupes de courbes se différencient, avec les surfaces saturées en eau à réflectance faible et décroissante dès 1,3  $\mu$ , et les surfaces sèches ou apparemment peu humides, à réflectance plus élevée et décroissante à partir de la deuxième bande eau à 1,9  $\mu$ .

Il est possible de distinguer 5 familles de surfaces suivant la forme de leur spectre. Elles reprennent les 3 types de CONDIT (1972) en tenant compte de l'importance relative de la matière organique verte ou plus évoluée, de l'humidité, du fer (COURAULT et al., 1988) et des sels:

1 - **Concave (PF)**: Surface dominée par l'eau (>40%) et la matière organique (>7%), réflectance très faible.

2 - **Concavo-convexe** à bande chlorophyllienne (CA, CSA): Surface organique ou moyennement organique, proche de la saturation en eau. Il apparaît des bandes nettes d'absorption en dessous de 0,5  $\mu$  et à 0,9  $\mu$ , caractéristiques de la goéthite. C'est le signe d'une oxydation très superficielle. La fine bande à 0,675  $\mu$  doit correspondre à la chlorophylle des voiles algaires, comme on peut le noter dans les travaux de LOUBERSAC

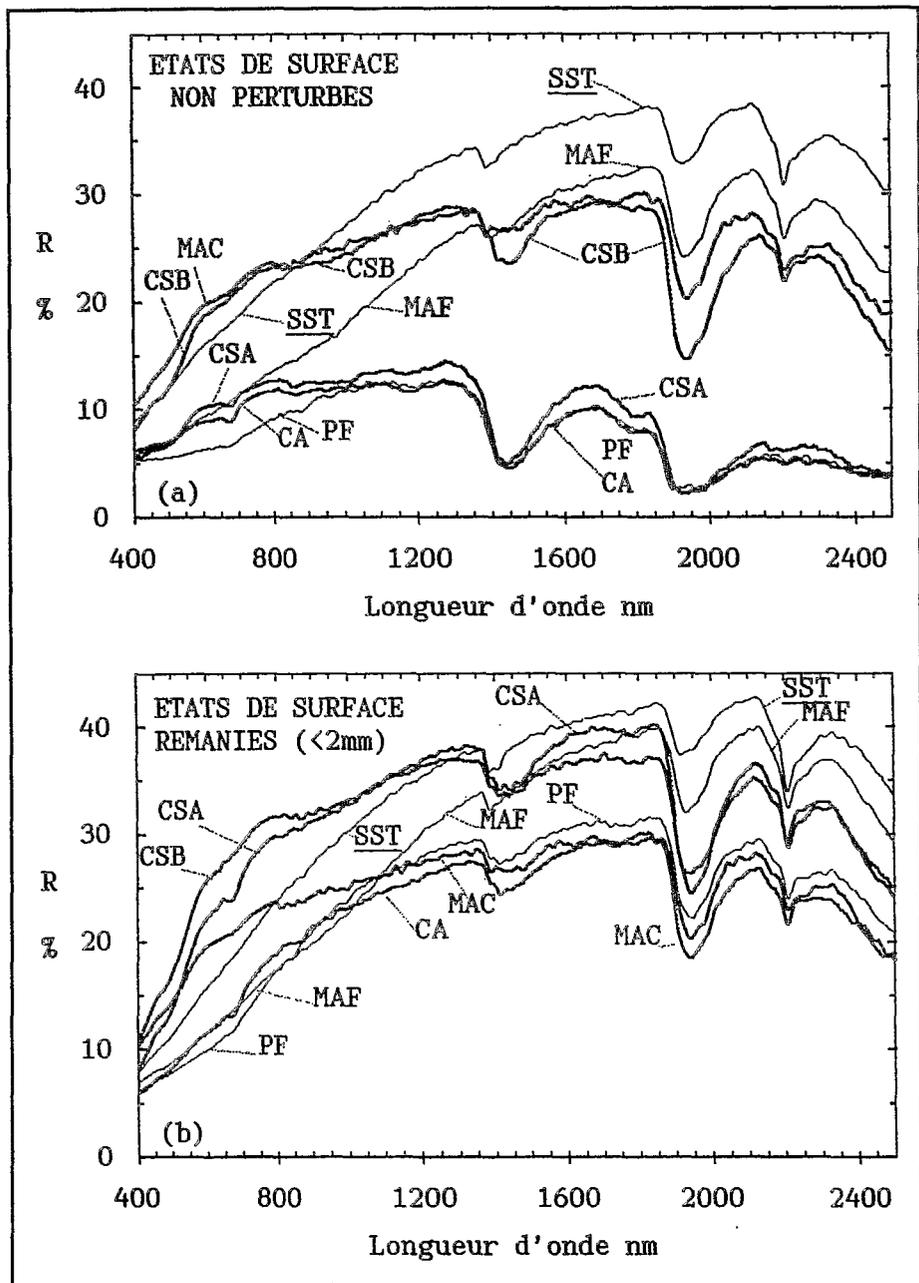


Figure 3 (a) Spectres en réflectance diffuse de sept états de surface de basse Casamance en milieu salé et non salé (SST), non remaniés; (b) idem, séchés à 40°C et broyés à 2 mm.

et al. (1988), mais sans masquer l'allure générale comme les lichens sur les roches (CERVELLE et al., 1988).

3 - **Faiblement concave et convexe dans l'I.R. (MAF)**: Surface moyennement organique et peu humide ou sèche, peu marquée par le fer, et une bande eau surtout visible à 1,9  $\mu$ . La réflectance est basse dans le visible sous l'effet de la matière organique.

4 - **Concavo-convexe (CSB, MAC)**: Surface moyennement organique à peu organique, sèche à fraîche, la plus colorée. L'intensité de la concavité dans le visible due au  $\text{Fe}^{3+}$  est variable. Les spectres dans l'infra-rouge proche et moyen jusqu'à 1,8  $\mu$  ou 2,1  $\mu$  ont l'allure d'un plateau croissant à faible pente du aussi à une réflectance élevée dans le visible (vert et rouge), et décroissent ensuite.

5 - **Faiblement convexe (SST)** (à convexe, cf. Tam): Surface peu organique et sèche. Le spectre croissant et monotone, reflète une surface constituée de quartz et de matière organique, lavée de son fer oxydé (sols de rizières en saison sèche ).

On remarquera qu'il n'y a pas d'événements nets attribués aux minéraux décrits précédemment, même pour le gypse qui est de toute façon peu présent strictement en surface. Quelle que soit la texture, les argiles marquent peu avec surtout la kaolinite autour de 1,4  $\mu$  et 2,2  $\mu$ . Les argiles 2/1 (montmorillonite et interstratifiées) non pas été identifiées sur les échantillons bruts, malgré la bande intense et large à 1,9  $\mu$  (Mac CORD et al., 1982) même sur échantillons secs.

Les bandes peu intenses du fer ferrique confirment les faibles variations de teinte et de pureté (10YR dominant à 7.5YR, et pureté de 1 à 4), alors que la clarté couvre presque toute la gamme du code Munsell.

Le fer ferreux ne peut être présent qu'in situ, sous forme libre et de pyrite dans le type 1, avec des bandes proches du fer ferrique (<0,5  $\mu$  et 1  $\mu$ ). Il n'est pas détecté, oxydé ou masqué par les autres constituants en particulier organiques.

Les états de surface les plus salés, à halite, concernent les types 3 et surtout 4 avec un aplatissement caractéristique dans l'infra-rouge et une réflectance moyenne élevée; puis les types 2 et 1 où la halite n'est pas ou peu cristallisée. La matière organique, l'eau et le fer ferrique, contribuent le plus à la forme des spectres.

La répétitivité est excellente sur trois échantillons pris dans un mètre carré d'apparence homogène, soit 10% dans l'infra-rouge et 2% dans le visible. Une dispersion plus importante s'explique la plupart du temps par des variations d'intensité de la réflectance sans affecter les bandes d'absorption.

A l'inverse d'une analyse physico-chimique globale, le spectrophotomètre comme l'observation fine, détectent les micro-différenciations telles que la concentration d'un sel ou de quartz en surface. L'étude de l'influence des constituants doit se faire sur les deux à trois premiers millimètres quelque soit l'organisation en micro-horizons. La contribution des différentes phases minérales et organiques ne pourra être précisée que sur des fractions séparées.

### 6.3 ETATS DE SURFACE REMANIES

L'étude d'échantillons séchés et broyés, permet d'éliminer l'influence de l'eau libre ou peu liée et celle de la taille des agrégats (micro-rugosité)(Fig. 3b). Le séchage limité à 40°C évite l'évolution des sels.

La diminution de taille des agrégats irréguliers entraîne une augmentation de la réflectance en dessous de 2 millimètres et de façon marquée entre 400 et 20  $\mu$ d'après ORLOV (1981) et STONER et al., (1980). Le contraste des bandes d'absorption par contre, diminue (HUNT, 1970). CIPRA et al. (1970) indiquent que la réflectance décroît quand les croûtes sont détruites, à l'inverse de ce qui est observé ici avec les croûtes salines.

La réflectance augmente de façon croissante du visible vers le début de l'infrarouge, mais de manière plus limitée (<10%) pour les états de surface salés à halite initialement secs. L'homogénéisation des croûtes salines entraîne un accroissement de la réflectance de quelques pour cent dans le début du visible à 30% dans l'infrarouge. La forme générale des spectres des surfaces salées à halite à réflectance élevée et en plateau croissant dans l'infrarouge, est conservée ou acquise par les échantillons humides à l'état naturel. La réflectance de la surface non salée (SST) diminue légèrement dans le visible et augmente dans l'infrarouge (effet de rugosité et de perte d'humidité).

Les bandes eau diminuent légèrement en intensité mais peu en largeur (autour de 1,4  $\mu$  et surtout de 1,91 à 1,94  $\mu$ ), même après un essai de dessiccation à 105°C (humidité de 1 à 3%). L'eau résiduelle concerne soit celle du gypse (1,45  $\mu$ ), soit l'eau encore adsorbée ou en inclusions dans la halite vers 1,4  $\mu$ . Ce phénomène est moins marqué pour les états de surface à structure micro-agrégée, déjà fragmentés et plus secs in situ.

La comparaison des dérivées secondes des spectres montre la conservation des bandes d'absorption avec des intensités identiques ou variables, en particulier selon la localisation et les formes du fer (goethite plus ou moins bien cristallisée, à la surface, sur la face interne ou uniforme dans les croûtes).

Le fléchissement de la réflectance des croûtes salines dû à l'augmentation de la micro-rugosité, est compensée même sur échantillons déjà secs, par les caractéristiques des agrégats: taille entre 2 et 20  $\mu$  et couleur blanche de la halite fraîche. Celle-ci, comme le quartz, agit comme un fond augmentant la réflectance sans modifier l'influence des autres éléments.

Le maintien des bandes d'absorption de l'eau, d'un léger affaissement du spectre dans l'infrarouge apparemment lié, et l'accroissement de la réflectance après homogénéisation sont des caractéristiques des états de surface à croûte saline et de façon moins intense à structure micro-agrégée, peu à moyennement organiques (MO < 4% environ).

## 7. SIMULATIONS DES BANDES SPECTRALES DES SATELLITES SPOT ET LANDSAT TM

les canaux SPOT et Landsat TM (Tableau 3) sont simulés à partir des spectres sur échantillons non remaniés (canaux XP et TMS).

Landsat TM	1	2	3	4	5	6	7
	0,45	0,52	0,63	0,76	1,55	10,4	2,08
	0,52	0,60	0,69	0,90	1,75	12,5	2,35
SPOT	1	2	3	Panchro			
	0,50	0,61	0,79	0,51			
	0,59	0,68	0,89	0,73			

Tableau 3: Bandes spectrales ( $\mu$ ) des satellites Landsat TM et SPOT.

Suivant les conclusions de l'étude des spectres et en fonction des principaux constituants, nous présenterons l'intérêt d'indices, combinant les canaux du visible et du proche infra-rouge (validation avec des données SPOT, parag. 8), puis de l'infra-rouge moyen. On relèvera des tendances vu le petit nombre d'échantillons complètement analysés.

Un état de surface à sulfates mixtes d'aluminium (à tamarugite dominante) est simulé, couvrant 100, 50 et 20% (SA100...) d'un état de surface de rizière (type structural SST).

### 7.1. VISIBLE ET PROCHE INFRA-ROUGE (SPOT ET LANDSAT TM)

Le rapport canal 2/canal 1 (canaux SPOT ou TM avec bande bleu), se confirme comme non adapté à la détection directe des états de surface salés. Il distingue les grands domaines oxydés ou réduits et les variations concernant la pureté de la couleur des tannes, qui croît avec les taux en argile et en fer ferrique. Il s'affranchit alors partiellement des teneurs en eau et matière organique.

La figure 4 présente l'histogramme bidimensionnel de l'Indice de Brillance  $IB=(XP1^2+XP2^2+XP3^2/3)^{1/2}$  et du rapport XP3-XP2 (SPOT simulé). L'indice de brillance croît avec la clarté et la quantité de sels (en cristaux), et en sens inverse de l'humidité et de la matière organique. Au dessus de 4% (volumique) environ de matière organique (au lieu de 2%, pondéral d'après STONER et al., 1980), ou de 20% d'humidité, ces deux constituants jouent un rôle prépondérant et convergent par rapport aux autres éléments. On observe ainsi des confusion entre des états de surface foncés humides (PF/CA) et secs (MAF), peu salés à très salés. La matière organique masque les effets de l'humidité et des sels éventuels. Cette proximité des réponses entraînera effectivement des difficultés de classification sur les images SPOT. La relation est également non bijective entre des états de surface clairs à croûte saline (CSB) et ceux de sols de rizières (SST), clairs mais non salés.

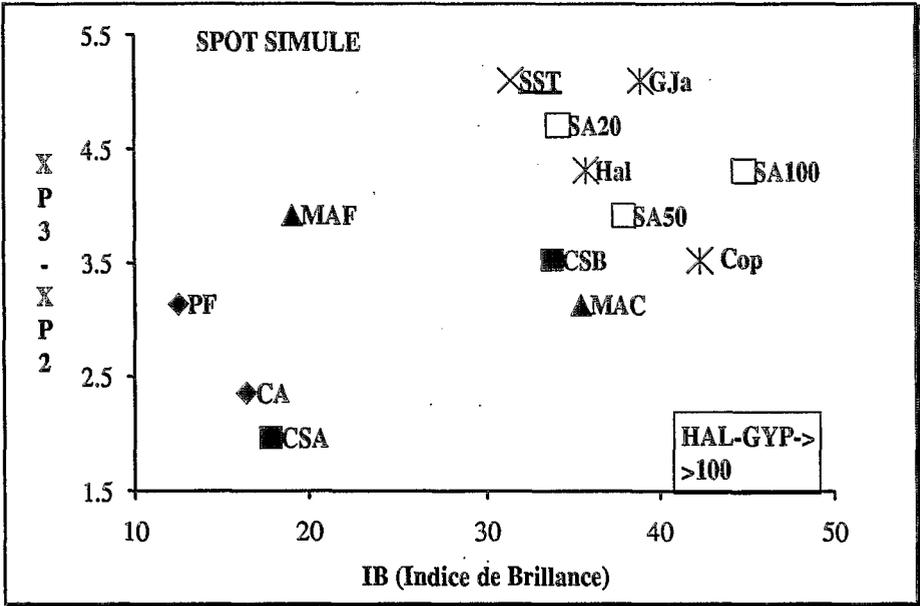


Figure 4 Histogramme bidimensionnel de l'Indice de Brillance et de la différence canal 3 - canal 2 ; canaux SPOT simulés à partir de spectres d'états de surface non remaniés ( ♦ ■ ▲ ), de minéraux isolés ( X ) et d'états de surface simulés à sulfates mixtes d'aluminium ( □ ) couvrant 100, 50 et 20% d'un sol de rizière ( □ SST ).

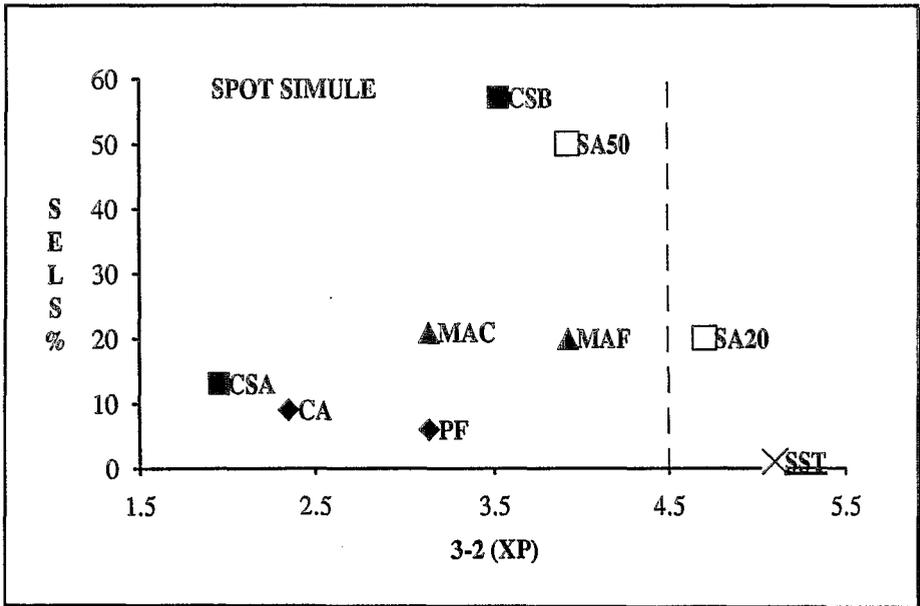


Figure 5 Relations entre les différences canal 3 - canal 2 (canaux SPOT simulés à partir des spectres) et les pourcentages volumiques en sels (halite ou sulfates).

La différence 3-2 (proche infra-rouge - rouge), permet par contre de différencier de façon qualitative les états de surface salés à halite et non salés, conformément à la diminution de l'intensité de la réflectance des spectres dans l'infra-rouge (différence 3-2 < 4,5 pour les échantillons étudiés)(Fig. 5). Cette différence semble indépendante de la matière organique et de l'humidité. A l'intérieur du domaine salé, On utilisera les indices précédents (2/1 et IB).

La halite et le gypse purs ne se différencient pas jusqu'au proche infra-rouge. Les sulfates mixtes en minéraux isolés ou inclus dans des états de surface simulés ne sont pas discriminés de façon fiable.

Il n'y a pas de modification importante des résultats à humidité équivalente après séchage des échantillons à 40°C.

## 7.2 INFRA-ROUGE PROCHE ET MOYEN (LANDSAT TM)

Si le canal 7 de Landsat TM correspond en partie à une bande d'absorption des groupements O-H, leur influence avec celle prépondérante de l'eau (1,4 et 1,9  $\mu$ ), s'étendent au delà et marquent l'ensemble de l'intensité du spectre dans l'infra-rouge.

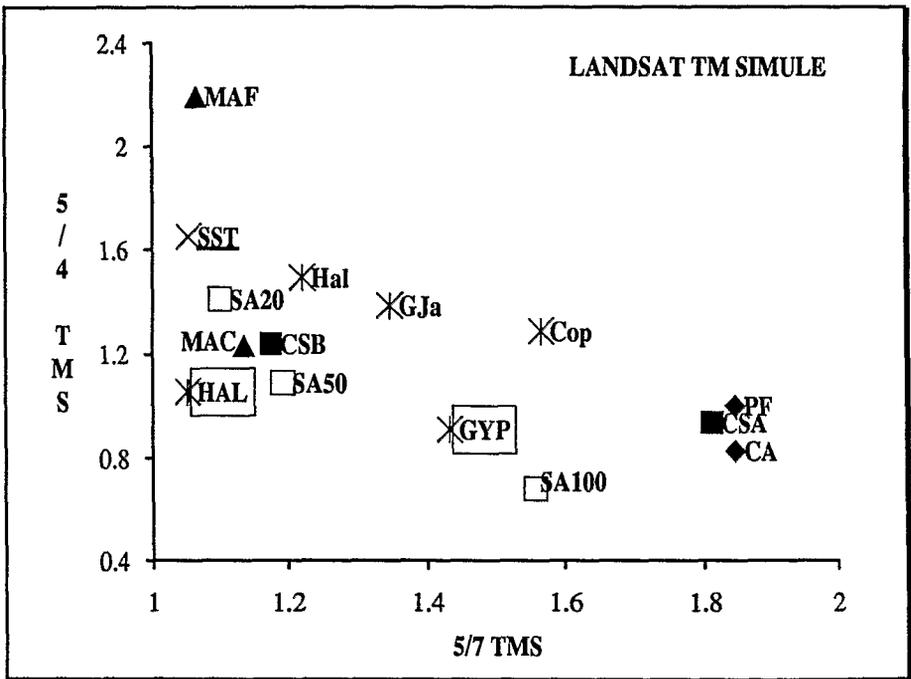


Figure 6 Histogramme bidimensionnel des rapports 5/7 et 5/4; canaux Landsat TM simulés à partir de spectres (voir Fig. 4).

Le rapport canal 5 / canal 7 permet la meilleure distinction entre chlorure (halite) et sulfates purs (valeurs élevées) ou en mélange (valeurs moyennes) (AMOS et GREENBAUM, 1987). Le rapport 5/4 serait performant d'après DAVIS et al. (1982) pour détecter les surfaces salées (influence de l'eau adsorbée). Il l'est moins dans

ce milieu que les combinaisons visible et proche infra-rouge. Par contre il améliore la différenciation entre sulfates, particulièrement pour la tamarugite isolée (sulfate d'aluminium le plus fréquent sur le terrain). Elle correspond à un rapport 5/4 inférieur à 0 et devrait être identifiée sans risques de confusions comme avec les bandes SPOT, jusqu'à environ 50% de recouvrement (SA50) dans cet exemple.

L'humidité liée à la porosité croît avec le rapport 5/7. Cela permet de lever des confusions observées dans le visible entre les sols humides et les sols secs à taux de matière organique élevé. La combinaison des différences 5-4 et 5-7 évitent les confusions entre sulfates mixtes et surfaces humides.

Les canaux du visible restent nécessaires pour caractériser les états de surface selon des critères liés à la teneur en matière organique et en fer.

## 8 CORRELATIONS CANAUX SPOT SIMULES ET SATELLITE

Les valeurs de luminances (satellite) des états de surface salés (chlorure et sulfates) possèdent une forme générale caractéristique, croissante du vert vers le rouge et fortement décroissante du rouge vers le proche infra-rouge (MSS: RIDD et al., 1982; SPOT: POUGET et al., 1988; TM: MULDER et EPEMA, 1986). ROETERS (1982) l'explique comme un effet de l'humidité malgré l'absence de bandes d'absorption de l'eau dans cette partie du spectre. En comparaison aux états de surfaces non salés, les spectres de surfaces salées (à halite) à réflectance élevée justifient ce comportement par une diminution relative de l'intensité de la réflectance dans l'infra-rouge par rapport au visible. La bande d'absorption du fer souvent observée autour de 0,9 m ne fait qu'accentuer le phénomène.

Après transformation en réflectance satellitaire, les données de SPOT et simulées ont une allure similaire, croissante du visible vers l'infra-rouge, et au moins à partir du canal 2 pour les valeurs issues des spectres et inférieures à 15% (Fig. 7).

Les réflectances élevées (>15%) sont comparables en valeurs absolues avec une diminution du contraste inter-bandes plus sensible entre les canaux 2 et 3 et en grande partie due aux effets atmosphériques introduits dans le modèle "5S". Egalement moins contrastées, les réflectances basses simulées demeurent plus faibles que les valeurs réelles surtout dans le visible, malgré un effet de correction plus fort que pour les valeurs élevées.

On observe de bonnes corrélations entre les réponses SPOT et simulées si on exclut le point CSA plus sec au moment de l'acquisition (canal 1:r=0.99; canal 2:r=0.98; canal 3:r=0.96). Les points représentatifs de dynamique potentielle élevée (humidité) ou à états de surface environnants très contrastés (eau, végétation), s'écartent le plus des droites (croûtes salines: CSA; états de surface de tannes inondés: PF, CA, à l'inverse de l'état de surface à micro-agrégats clair très stable: MAC).

La légère diminution de la pente entre les canaux 2 et 3 reste caractéristique des états de surface salés à halite (CSA,CSB,MAC). Les risques de confusions entre états de surface foncés (matière organique) secs et humides se confirment (MAF, PF, PA). L'état de surface à sulfates acides (SA = SA50) d'après les données de SPOT, se rapproche effectivement plus du sol de rizière non salé. Le moyen infra-rouge de LANDSAT TM devrait être plus performant.

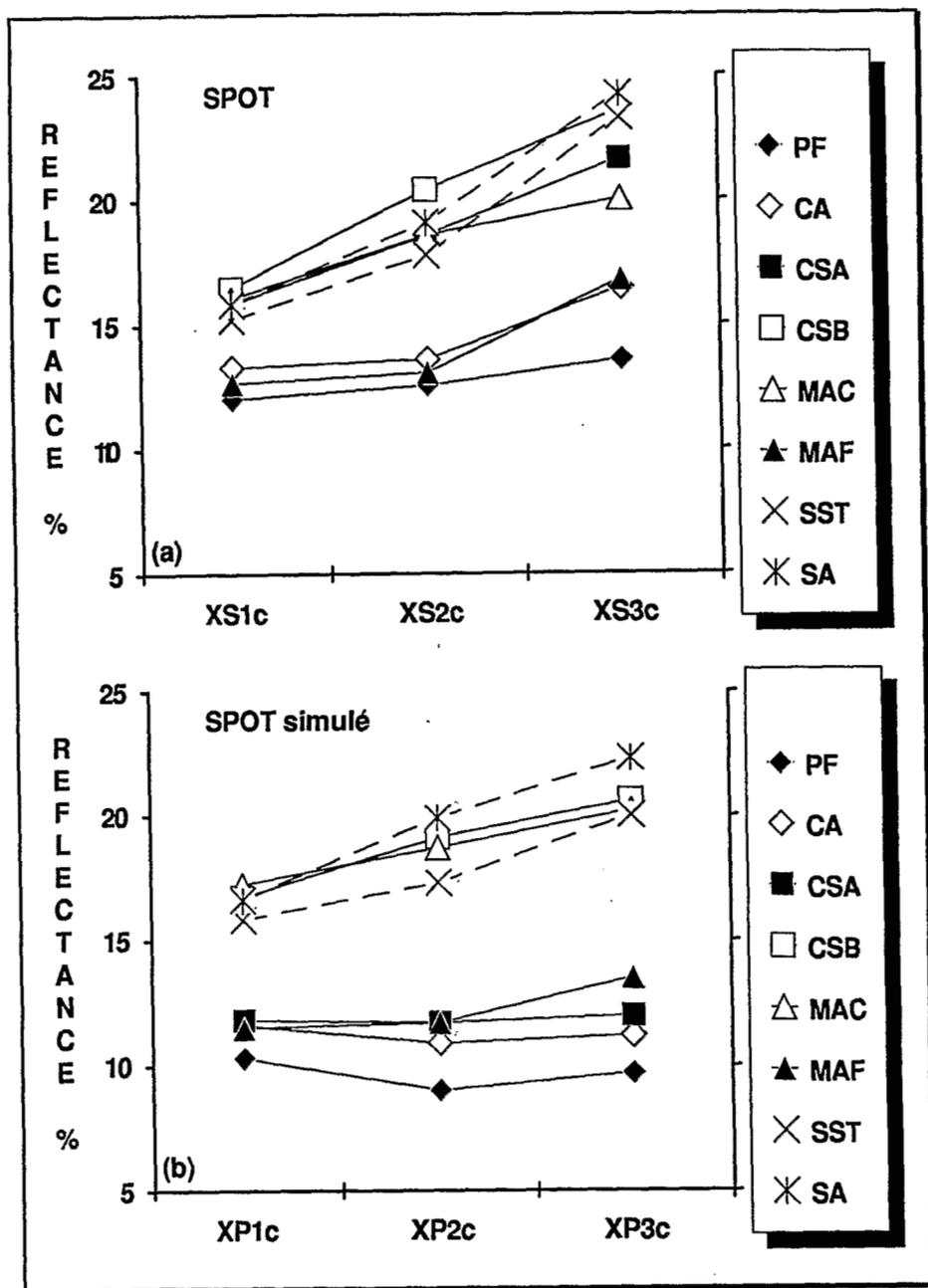


Figure 7 Réponses spectrales en réflectance satellitaire d'états de surface dans les 3 canaux SPOT - (a) données du satellite SPOT (saison sèche); (b) données simulées à partir de spectres et corrigées du passage dans l'atmosphère.

Ces différences relatives peuvent s'expliquer pour les données simulées par:

- un décalage entre les mesures en réflectance diffuse et celles des capteurs du satellite.
- les risques d'anisotropie au niveau des échantillons non remaniés à croûte et une répartition différente par rapport au terrain des facteurs influençant la réflectance (humidité et sels en atmosphère non contrôlée).
- la variabilité spectrale insuffisamment connue à l'échelle du pixel et une non simultanéité des situations (fortes différences potentielles d'humidité, très faibles pour la couleur et la structure).
- une correction atmosphérique approximative, faute de données fiables en particulier sur les brumes sèches.
- des effets de l'environnement partiellement pris en compte par le logiciel "5S", alors que les unités de paysage sont fines et très contrastées (ce dernier aspect pourra également jouer sur la qualité des données de SPOT).

## 9. CONCLUSIONS

Les mesures au spectrophotomètre sur échantillons non perturbés présentent un intérêt pour l'étude de caractéristiques non stables comme les sels, l'humidité ou la micro-rugosité. Cet outil possède l'avantage de s'affranchir des conditions d'accès, de nébulosité et permet de suivre les variations d'humidité liées à la porosité et aux sels et l'influence de leur cristallisation. Un spectroradiomètre de terrain serait complémentaire pour s'affranchir des contraintes d'un laboratoire éloigné, de prendre en compte la variabilité spatiale, et d'introduire plus facilement la réponse de l'eau et de la végétation dans la modélisation du signal (les corrélations avec les réponses d'un radiomètre de simulation de SPOT non présentées ici sont excellentes).

Le rôle des différentes phases après fractionnement est en cours d'étude (sels, phases minérales et organiques). L'écart-type des spectres en fonction des paramètres physico-chimiques reste à préciser.

Les réponses des sulfates et surtout de la halite, liées à la présence d'eau et de fer, devront être étudiées avec des observations microscopiques associées sur des phases pures (provenance extérieure ou après essais de dissolution/cristallisation).

On a vu que la validation avec les données de SPOT donnent d'assez bons résultats, mais ces bandes spectrales ne différencient pas tous les états de surface étudiés. L'infra-rouge moyen (Landsat TM) serait indispensable pour mettre en évidence toutes les zones à sulfates et les surfaces en fonction de la seule humidité. Cette approche permet de préciser pour un objectif les bandes spectrales nécessaires, le satellite à programmer et les dates les plus favorables. Ces résultats sont à vérifier dans d'autres milieux, en particulier avec des nappes moins proches de la surface.

*Je remercie Bernard CERVELLE et ali BEDIDI pour l'utilisation du matériel et des logiciels du laboratoire de Minéralogie et Cristallographie de Paris 6, ainsi que de leurs collaborations et conseils.*

## BIBLIOGRAPHIE

- AMOS B.J.; GREEBAUM D. (1987). Altercation detection using TM imagery: the effects of supergene weathering in an arid climate. ERIM, 21th Int. Sym. on Remote Sensing of Environment, Oct. 26-30, Ann Arbor, Michigan, USA, p. 795.
- BARRIOS J.L.G. (1988). Correspondances entre caractères de salinité du sol et leur expression sur image satellite Spot: exemple dans un bassin endoréique de la réserve de Mapimi (Mexique). DEA de Pédologie, Paris 6, 57 p.
- BERENGER A.C. (1985). Reconnaissance des terrains salés par télédétection. Institut de la Carte Internationale du Tapis Végétal. CNRS/Université Paul Sabatier, Toulouse, 39 p.
- BIRD A.C.; WILLIAMS T.H.; BARNETT M.E. (1982). The imperial college multi-channel electronic image classifier and its applications to the classification of surface types by multi-spectral analysis. ERIM, 16th Int. Sym. on Remote Sensing of Environment, 19-25 Jan., Cairo, Egypt, p. 665-674.
- CALVIN T.S.; BLUME H.J.; KENDALL B.M. (1987). Passive microwawe remote sensing of salinity in coatal zones. ERIM, 21th Int. Sym. on Remote Sensing of Environment, Oct. 26-30, Ann Arbor, Michigan, USA, p. 241-251.
- CASENAVE A.; VALENTIN C. (1989). Les états de surafce de la zone sahélienne: influence sur l'infiltration. Coll. Didactiques, éd. ORSTOM, Paris, France, 229 p.
- CERVELLE B. (1988). Caractérisation des roches par spectrométrie de terrain à haute résolution spectrale visible et infra-rouge proche. Proceedings of the 4th Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, 18-22 january, Aussois, France, p. 319-322.
- CONDIT H.R. (1972). Application of characteristic vector analysis to spectral energy distribution of daylight and the spectral reflectance of american soils. Applied Optics, 11, 1, p. 74-86.
- COURAULT D.; GIRARD M.C.; ESCADAFAL R. (1988). Modélisation de la couleur des sols par télédétection. Proceedings of the 4th Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, 18-22 january, Aussois, France, p. 357-362.

- DAVIS P.A.; GROLIER J.M.; SCHULTEJANN P.A.; ELIASON P.T. (1982). Discrimination of phosphate, gypsum, limestone, halide and quartz-sand deposits in south-central Tunisia by cluster analysis of Landsat multispectral data. ERIM, 16th Int. Sym. on Remote Sensing of Environment, 19-25 Jan., Cairo, Egypt, p. 337-359.
- EPEMA G.F. (1986). Processing thematic mapper data for mapping in Tunisia. ITC Journal, 1, p. 30-34.
- EPEMA G.F. (1990). Determination of planetary reflectance for Landsat-5 Thematic-Mapper tapes processed by Earthnet (Italy). ESA Journal, 14, p. 101-108.
- ESCADAFAL R. (1989) Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et par télédétection. Applications: Exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Paris, Thèse de Doctorat Université Paris 6, 317 p.
- HUNT G.R. (1977). Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. Geophysics, 42, 3, p. 501-513.
- HUNT G.R.; SALISBURY J.W. (1970). Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: I. Silicates. Modern Geology, 1, p. 283-300.
- HUNT G.R.; SALISBURY J.W.; LENHOFF C.J. (1971a). Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides. Modern Geology, 2, p. 195-205.
- HUNT G.R.; SALISBURY J.W.; LENHOFF C.J. (1971b). Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: IV. Sulfides and sulfates. Modern Geology, 3, p. 1-14.
- HUNT G.R.; SALISBURY J.W.; LENHOFF C.J. (1972). Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: V. Halides, phosphates, arsenates, vanadates and borates. Modern Geology, 3, p. 121-132.
- KLEMAS V.; HARDISKY M.A. (1987). Remote sensing of estuaries: an overview. ERIM, 21th Int. Sym. on Remote Sensing of Environment, Oct. 26-30, Ann Arbor, Michigan, USA, p. 183-203.
- LEBRUSQ J.Y.; LOYER J.Y.; MOUGENOT B.; CARN M. (1987). Nouvelles paragenèses a sulfates d'aluminium de fer et de magnésium, et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. Sciences du sol, 3, 25, p. 173-184.
- LEMASSON C. (1987). Etude des relations entre certains paramètres physico-chimiques et les mesures spectrales des sols nus des tannes de nouvelle calédonie aménageables en bassins d'aquaculture. Contribution à la cartographie de présélection des sites aquacoles à partir des images du satellite SPOT. Rapport de DAA. ENSAIA NANCY / IFREMER BREST, 74 p.

- LINDBERG J.D.; SMITH M. (1973). Reflectance spectra of gypsum sand from the white sands national monument and basalt from a nearby lava flow. *American Mineralogist*, 58, p. 1062-1064.
- LOUBERSAC L.; VIOLLIER M.; LEMASSON C. (1988). Analyse comparative des réponses spectrales dans le domaine optique des cibles d'un marais tropical à diverses résolutions spatiales et spectrales. Proceedings of the 4th Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, 18-22 January, Aussois, France, p. 323-327.
- MANCHANDA. M.L.; IYER H.S. (1983). Use of Landsat imagery and aerial photographs for delineation and categorization of salt-affected soils of part of north-west India. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 31, p. 263-271.
- MARIUS C. (1985). Les mangroves du Sénégal. Ecologie, pédologie, géochimie, mise en valeur et aménagement. Coll. Travaux et Documents, éd. ORSTOM, Paris, France, 193, 357 p.
- McCORD T.B.; CLARK R.N.; MELOY A.; SINGER R.B. (1982). An example of the application of a procedure for determining the extend of erosional and depositional features and rock and soil units in the Kharga oasis region, Egypt, using remote sensing. ERIM, 16th Int. Sym. on Remote Sensing of Environment, 19-25 Jan., Cairo, Egypt, p. 909-919.
- MENENTI M.; LORKEERS A.; VISSERS M. (1986). An application of thematic mapper data in Tunisia. *ITC Journal*, 1, p. 35-42.
- MOUGENOT B. ; ZANTE P. ; MONTOROI J.P. (1990). Détection et évolution saisonnière des sols salés et acidifiés du domaine fluvio-marin de basse Casamance au Sénégal par imagerie satellitaire. Télédétection, et Sécheresse, AUPELF/UREF, John Libbey Eurotext. Paris p. 173-179.
- MOUGENOT B. (1989b). Etude par télédétection des états de surface en relation avec les nappes, exemple des sols salés et acidifiés de basse Casamance (Sénégal). *Bulletin du GFHN*, 25, p.78.
- MULDERS M.A.; EPEMA G.F. (1986). The Thematic mapper: a new tool for soil mapping in arid aeras. *ITC Journal*, 1, p. 24-29.
- MULDERS M.A.; SCHURER K.; de JONG A.N.; de HOOP D. (1986). Selection of bands for a newly developed Multispectral Airbone Reference-aided Calibrated Scanner (MARCS). Proceedings of the International Symp., ISPRS, Com. VII, 25-29 august, Enschede, The Netherlands. ed. A.A. BALKEMA, 26,7/1, p. 301-303.
- ORLOV D.S. (1966). Quantitative patterns of light reflection by soils. I Influence of particle (aggregate) size on reflectivity. *Soviet Soil Science*, 13, p. 1495-1498.
- 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, Fra., p. 103-121.

RICHARDSON A.J.; GERBERMANN A.H.; GAUSMANN H.W.; CUELLAR J.A. (1976). Detection of saline soils with Skylab multispectral scanner data. Photogrammetric Engineering and remote sensing, 42, 5, p. 679-684.

RIDD M.K.; MEROLA J.A.; JAYNES R.A. (1982). Computer mapping of shoreline fluctuations by satellite. Great Salt Lake, UTAH, USA. ERIM, 16th Int. Sym. on Remote Sensing of Environment, 19-25 Jan., Cairo, Egypt, p. 553-564.

ROBINSON P.D.; FANG J.H. (1969). Crystal structure and mineral chemistry of double-salt hydrates: I. direct determination of the crystal structure of tamarugite. The American Mineralogist, 54, p. 19-31.

STONER E.R.; BAUMGARDNER M.F. (1980). Physichemical, site, and bidirectional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils. LARS Technical Report, Purdue University, Indiana, USA, 94 p.

TANRE, DEROO C.; DAHAUT P.; HERMAN M.; MOCRETTE J.J.; PERBOS J.; DESCHAMPS P.Y. (1986). Simulation of The Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S). L.O.A. Univ. Sciences et Techniques de Lille.