

# Effets des sels sur la réflectance et télédétection des sols salés

Bernard MOUGENOT

Antenne de télédétection Orstom, Centre Agrymet, BP11416, Niamey, Niger

## RÉSUMÉ

*La présence de sels dans les sols et les nappes modifie les états de surface. La télédétection facilite leur identification et améliore la cartographie des sols salés. On distingue des effets directs sur la réflectance avec la présence de sels en surface (croûtes ou efflorescences salines), et des effets indirects sur la structure (pseudosables), la végétation (stress salin, végétation spécifique) ou l'absence de végétation dans les cas extrêmes. Les caractéristiques spectrales des sels du visible au moyen infrarouge (0,4 à 2,5  $\mu\text{m}$ ), étudiées en spectrophotométrie au laboratoire, correspondent à des bandes d'absorption groupées dans le moyen infrarouge sous l'effet de l'eau libre ou intégrée dans le réseau cristallin (1,45 et 1,9  $\mu\text{m}$ ), des ions hydroxydes ( $\text{OH}^-$ , bandes à 1,4 et 2,2  $\mu\text{m}$ ) et de leurs liaisons avec  $\text{Al}^{3+}$ , et des ions carbonates et borates. Les ions chlorures et sulfates ne présentent pas de bandes d'absorption dans ce domaine. Parmi les anions, seul le fer provoque des absorptions dans le visible et le proche infrarouge. Sur sol nu, les effets principaux des sels précipités en surface sont : (1) une augmentation de la réflectance moyenne, (2) une diminution dans le début du visible jusqu'à 0,5  $\mu\text{m}$  environ, de l'absorption due au fer présent à la surface du sol, (3) une diminution relative de la réflectance dans le moyen infrarouge due principalement aux bandes des ions hydroxydes et de l'eau. Cet effet semble se prolonger jusqu'au proche infrarouge dans le cas de sels plus ou moins hygroscopiques. Les mesures radiométriques de terrain et les données satellitaires confirment ces résultats. Les effets des sels se combinent à ceux des autres composants du sol et de sa rugosité. Les sels ne sont pas détectés en quantité plus faible que 10 à 15 % environ selon les sels. Les rapports de canaux les plus utilisés combinent soit le proche infrarouge et le visible (rapport 4/1 TM, ou 3/1, 3-2 Spot), soit les bandes dans l'infrarouge (7/4 ou 7/5 TM). Les conséquences des sels sur la végétation correspondent à une diminution de taille et de densité, en relation avec l'accroissement de la salinité des sols et des nappes. La présence de végétation halophyte permet de préciser les niveaux de salinité. Les confusions qui apparaissent entre les effets du stress salin et du stress hydrique sont levées par des suivis saisonniers. Les contrôles sur le terrain demeurent nécessaires.*

**MOTS CLÉS :** Télédétection — Réflectance — Spectres — Sels — Sols salés — États de surface — Indices radiométriques.

## ABSTRACT

### EFFECT OF SALTS ON REFLECTANCE AND REMOTE SENSING OF SALT AFFECTED SOILS

*Possibilities of identification of salt affected soils by remote sensing depend on modifications of bare soil surface or vegetation by salts. Spectral properties of salts in visible and middle infrared spectrum (0.4 - 2.5  $\mu\text{m}$ ) are described (figure 1, table 1). The main absorption bands are observed on middle and near infrared spectrum. Halide and sulfate anions cannot induce absorption bands. Overtones or combinations tones appear for  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Al-OH}$ , carbonate and borate groups (figure 1). Only ferric iron presents absorption bands in visible and near infrared spectrum. The effects of salts are : (1) increasing of reflectance with quantity of salt on the surface and wavelength up, (2) relative higher reflectance in blue band by masking ferric oxydes, (3) fall-off in middle and sometimes near infrared bands*

(fig. 2 and 3) due to water in crystal lattice (1.45 and 1.9  $\mu\text{m}$ ) and hydroxyl group (1.4 and 2.2  $\mu\text{m}$ ). Moisture or absorbed water in fresh samples, ferric oxydes and clays inclusions can induce corresponding features. Reflectance decreases with increasing of moisture and salts. Effects are opposite in visible spectrum (table 2). Salts are not easily identified under 10 or 15 %. To detect salt effects, satellite ratios combined visible and near infrared bands (4/1 TM, 3/1 or 3-2 Spot), or infrared bands (7/4 or 7/5 TM for sulfates and water effects). Salts induce less plant cover correlated with the salinity levels of soil and groundwater. More precise informations on salinity can be derive from salt tolerant vegetation combined with coverage rate (fig. 4). Misinterpretations with saline stress are due to water stress. Choice of dates is important to evidence salinity. Ground validations remain necessary to establish relationships between surface features, salts and reflectance.

KEYWORDS : Remote sensing — Reflectance — Spectra — Salts — Salt affected soils — Surface features radiometric index.

## INTRODUCTION

Les sels issus des sols et des nappes peuvent modifier temporairement ou en permanence les états de surface. Ces changements affectent la végétation et la surface du sol nu. La dynamique spatiale et temporelle des sols salés, particulièrement en zone semi-aride ou aride, nécessite un suivi au sol facilité par la télédétection aérienne et satellitaire (MANCHANDA, 1984 ; SHI YUANCHUN et XIE JIN GRONG, 1988 ; MOUGENOT *et al.*, 1993). La fugacité de certains processus comme la précipitation de sels en surface rendra parfois difficile l'identification directe et à tout moment des domaines salés. À l'inverse, des surfaces salées continues, épaisses, stables et homogènes, plutôt d'origine géologique, servent de site de calibration aux satellites (CONEL *et al.*, 1988).

La télédétection doit devenir un outil de quantification en relation avec les différents constituants des états de surface et leur organisation. Les satellites opérationnels actuels possèdent des bandes spectrales d'environ 100 nm. Elles sont beaucoup plus larges que les bandes d'absorption observées sur les spectres des différents constituants au laboratoire. On tente cependant de donner un sens physique aux données satellitaires et d'apprécier les limites de cet outil pour identifier et quantifier les constituants en mélange d'un état de surface.

L'effet du constituant « sel » sur la réflectance sera présenté dans les longueurs d'onde du visible au moyen infrarouge (400-2 500 nm). Les absorptions dues aux sels sous forme de chlorures, sulfates, borates et carbonates, s'ajoutent à celles des autres constituants comme le fer, l'eau, la matière organique ou les argiles. La réalisation de courbes spectrales de sels au laboratoire permet de comprendre et de prévoir la réflectance terrain et satellitaire de la surface des sols salés et de proposer des indices radiométriques spécifiques.

Les exemples sont issus de la bibliographie et de mesures sur des états de surface salés de basse Casamance

au Sénégal (spectres réalisés au laboratoire de Minéralogie et Cristallographie de Paris-VI).

## LES ÉTATS DE SURFACE DES SOLS SALÉS

### États de surface des sols nus salés

Il faut que les sels précipitent en surface pour être détectés dans le domaine spectral étudié. C'est le cas des sols à horizon salin ou gypseux décrits par de nombreux auteurs (SERVANT, 1974 ; LOWENSTEIN et HARDIE, 1985 ; EPEMA, 1986 a ; SZABOLCS, 1988). Les descriptions et les analyses doivent tenir compte de la microrépartition verticale des cristaux de sels (CHEVERRY *et al.*, 1972 ; HANNA et STOOPS, 1976). L'identification des sels sur le terrain n'est pas évidente quand les cristaux sont très fins et transparents.

Les principaux états de surface observés sont :

- les croûtes salines ou encroûtements ;
- les efflorescences salines ;
- les microhorizons à structure microagrégée et à sels en aiguilles (pseudosables, « moquette »). Ces formations remaniées par les vents constituent des dépôts éoliens sous forme de voiles ou de dunettes (nebkas) ;
- croûtes algaires salines ;
- croûtes structurales, de décantation, à structure polygonale avec ou sans sels apparents.

Il existe de nombreux intermédiaires entre ces états de surface, par exemple les croûtes salines se structurant en polygones puis en microagrégats. Des observations sur des sols salés à chlorures et sulfates dans le pseudodelta du fleuve Sénégal (MOUGENOT, 1983) et en Tunisie (EPEMA, 1990) montrent l'influence du niveau et de la qualité des nappes, des pluies, de la rosée et du degré d'hygroscopicité des sels. Les pratiques culturales modifient également les cycles journaliers ou saisonniers des sels.

Les associations de ces états de surface dépendent de la microtopographie (surfaces à pseudosables sur les parties hautes, croûtes salines sur les parties basses). Le plus sou-

vent, les unités de surface avec une végétation souvent spécifique et éparse sont de dimensions hectométriques à kilométriques, adaptées à la résolution spatiale des capteurs des satellites haute définition actuels.

### Végétation

Les effets des sels sur la végétation correspondent à une diminution de taille et du recouvrement au sol des différentes strates selon leur résistance à la salinité, avec à l'extrême le sol toujours nu. La végétation spécifique des domaines salés peut être un bon indicateur en association aux sols nus salés (EVERITT *et al.*, 1977 ; SHARMA and BHARGAVA, 1988 ; MOUGENOT, 1989). Les bandes spectrales du moyen infrarouge, sensibles à l'eau des plantes, complètent celles du proche infrarouge et du rouge, sensibles à l'activité chlorophyllienne et au taux de recouvrement par la végétation (HARDISKY *et al.*, 1983).

### États de surface et détection des sols salés

Le domaine de longueur d'onde exploré ne donne des informations que sur la surface sans pénétrer dans le sol. La validation des relations entre les états de surface (sol nu et végétation) et les sols et nappes (paramètres exogènes ou non perçus) demeure indispensable. Il existe en général une bonne corrélation entre la géomorphologie et la répartition des sols salés. C'est une aide précieuse pour réaliser l'extension spatiale des résultats, quand les données de télédétection ne sont pas suffisantes pour cartographier les surfaces salées (MANCHANDA et KHANNA, 1981 ; ROETERS, 1988).

Les sols salés présentent une forte variabilité spatiale et temporelle de la quantité et de la répartition des sels (BOUVIN, 1990). La résolution au sol des données de télédétection spatiale entraîne un changement de niveau de caractérisation qui peut masquer avantageusement la variabilité à faible distance (MOUGENOT, 1991 b).

La cartographie des sols très salés par télédétection ne pose pas de difficultés. En revanche les sols à horizon sodique, les sols peu salés ou en voie de salinisation sans manifestations spécifiques de surface, sont mal identifiés et les surfaces sous-estimées (SINGH *et al.*, 1983 ; VENKATARATNAM, 1983 ; JAIN *et al.*, 1988 ; LOUBERSAC *et al.*, 1988).

## CARACTÉRISTIQUES SPECTRALES DES SELS ET DES SURFACES SALÉES

### Bandes d'absorption des sels

Les bandes d'absorption fondamentales des groupements anioniques au-delà de 1 200 nm sont provoquées par des combinaisons et harmoniques de phénomènes vibratoires (extension et torsion) situées au-delà de 2 500 nm. Les cations ne réagissent pas directement, sauf le fer. Les transferts de charges du fer ferrique débordent des bandes U.V. vers le visible en dessous de 600 nm (HUNT *et al.*, 1971 b). Sur l'ensemble de l'intervalle 400-2 500 nm s'ajoutent les effets plus limités de transfert d'énergie thermique et de l'influence du champ cristallin jusqu'au proche infrarouge (PIR) (MULDERS, 1987 ; GOETZ, 1990).

TABLEAU I. — Origine des principales bandes d'absorption observées dans les sels  
*Origin of the main absorption bands observed in salts*

Ions	Principales bandes d'absorption	Principaux types de sels (1)
Fe <sup>+++</sup>	- en dessous de 600 nm (transfert de charge) et autour de 870 nm (champ cristallin)	sulfates et minéraux en inclusions
H <sub>2</sub> O	- bandes à 1 450 et 1 900 nm (eau adsorbée ou de constitution)	sulfates hydratés, chlorures hygroscopiques et halite
OH <sup>-</sup>	- bandes à 1 400 et 2 200 nm	sulfates hydroxylés
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	- très faibles absorptions harmoniques (bande initiale à 9 090 nm)	sulfates
CO <sub>3</sub> <sup>--</sup> BO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	- séries de bandes à partir de 1 600 nm	carbonates, borates
Cl <sup>-</sup>	- pas d'absorption	chlorures
Fe, Al-OH	- pas de bandes avec le fer, bandes dans le moyen infrarouge avec l'aluminium (1 775 nm)	sulfates hydroxylés et hydratés (H-O-H)

(1) Exemples de sels étudiés : chlorures : halite (NaCl), chlorures hygroscopiques (CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, tachydrite : CaMg<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub>.12H<sub>2</sub>O) ; sulfates : simples (thénardite : Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, hydroxylés (jarosite : KFe<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>, alunite : KAl<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>, hydratés (gypse : CaCO<sub>3</sub>.2H<sub>2</sub>O), tamarugite : NaAl(SO<sub>4</sub>).26H<sub>2</sub>O), hydroxylés et hydratés ; carbonates : calcite (CaCO<sub>3</sub>), (pas de mesures sur Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ; borates : borax (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>.10H<sub>2</sub>O).

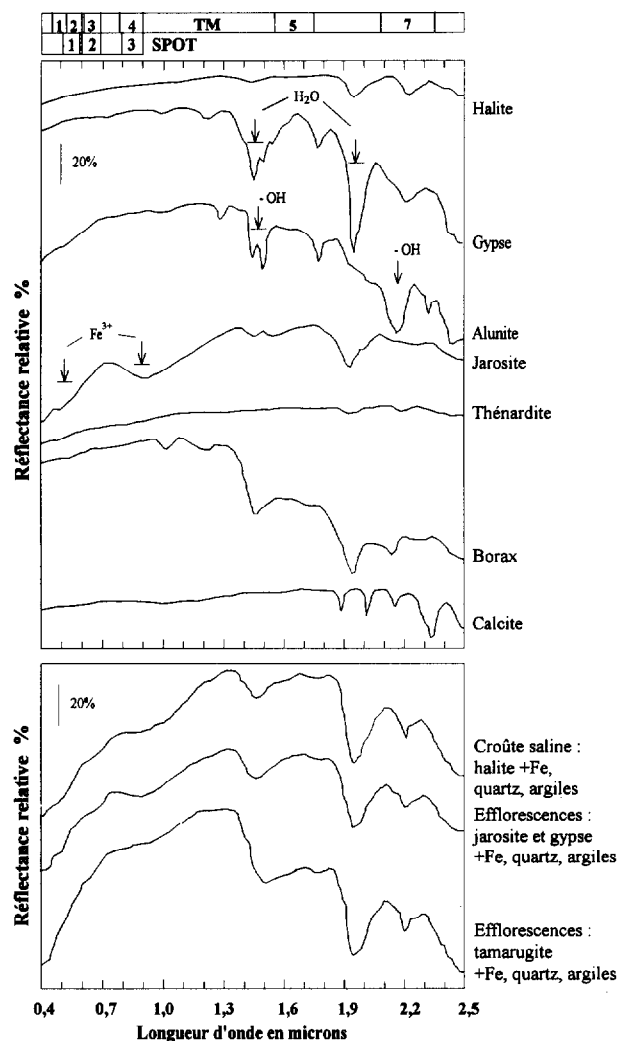


FIG. 1. — Spectres au laboratoire entre 0,4 et 2,5  $\mu\text{m}$  de sels purs : halite, gypse, alunite, jarosite, thénardite, borax et calcite ; et d'échantillons de surface (basse Casamance, Sénégal) : croûte à habile (50 % NaCl), à jarosite et gypse, efflorescences de tamarugite (80 %), mélangés avec du quartz (dominant), des oxydes de fer et des argiles (MOUGENOT *et al.*, 1993). La représentation exprime la variation relative de la réflectance indépendamment pour chaque spectre.

*Spectra in laboratory (0.4 to 2.5  $\mu\text{m}$ ) of pure salts: halite, gypsum, alunite, jarosite, thenardite, borax and calcite; and of saline soil surfaces: halite crust (50 % NaCl), jarosite and gypsum, tamarugite (80 %) efflorescences, mixed with quartz dominant, ferric oxides and clays, observed in Senegal (MOUGENOT *et al.*, 1993).*

Nous avons rassemblé dans le tableau I, les principales bandes d'absorption des anions présents dans les sels. Les caractéristiques spectrales de sels du visible au moyen infrarouge étudiées au spectrophotomètre (fig. 1) corres-

pondent à des bandes d'absorption groupées essentiellement dans le moyen infrarouge sous l'effet :

- de l'eau libre ou intégrée dans le réseau cristallin ;
- des ions hydroxyles (OH) et de leurs liaisons avec les ions  $\text{Al}^{3+}$  ;
- des ions carbonates (HUNT et SALISBURY, 1971) et borates.

Les ions chlorures et sulfates sont transparents dans ce domaine (HUNT *et al.*, 1971 c, 1972).

### Effets des sels et de l'humidité sur le spectre d'un échantillon de sol

Les cristaux de halite sont transparents sur l'ensemble du spectre et jusqu'à 1 200 nm pour le gypse (fig. 1). La réflectance a été mesurée au spectrophotomètre en laboratoire sur des échantillons de sable (sol dunaire de basse Casamance, mélangés à des sels purs). Le rayonnement réfléchi et diffusé par un assemblage de grains de 50 à 200  $\mu\text{m}$  atteint 60 à 70 % de la lumière incidente dans le visible et le proche infrarouge. En dessous d'une longueur d'onde de 2 000 nm, l'accroissement de la réflectance n'est pas proportionnel à la quantité de sels en mélange avec les sables fins. Cet accroissement est plus marqué dans le visible jusqu'à 575 nm environ (fig. 2). L'effet diluant sur les bandes d'absorption du fer dans les bandes bleu et verte est atténué par la dispersion des grains de sels entre les sables. Dans ces conditions l'effet de la halite se fait seulement sentir à partir d'un taux pondéral de 10 à 15 % environ.

Une expérience similaire a été réalisée avec des sels extraits d'une croûte saline d'un sol salé de basse Casamance, où dominant la halite et le gypse (80 et 15 % environ). La réflectance croît de façon semblable dans le visible et le proche infrarouge. Les bandes de l'eau entraînent cependant un affaissement de l'ensemble du spectre au-delà de 1 350 nm. Cet effet augmente avec des sels fortement hydratés ou hydroxylés comme la tamarugite ou la jarosite. Ces échantillons, séchés à 60°C pour éviter toute transformation des sels, ont un comportement hygroscopique en quelques heures à quelques jours même pour la halite. Ces absorptions entraînent un affaissement du spectre qui peut être observé jusque dans le proche infrarouge (EVERITT *et al.*, 1988 ; MOUGENOT, 1991 a).

Au cours de la dessiccation des surfaces salées, les premiers sels peu solubles commencent à précipiter quand la solution du sol arrive à saturation, et les derniers avant le dessèchement total apparent. La dessiccation d'un échantillon humide présente un comportement spectral similaire à celui d'un échantillon où les sels cristallisent en surface.

Dans le visible, les effets des sels et de la dessiccation s'additionnent pour accroître la réflectance (tabl. II). La couleur exprime le comportement spectral d'une surface

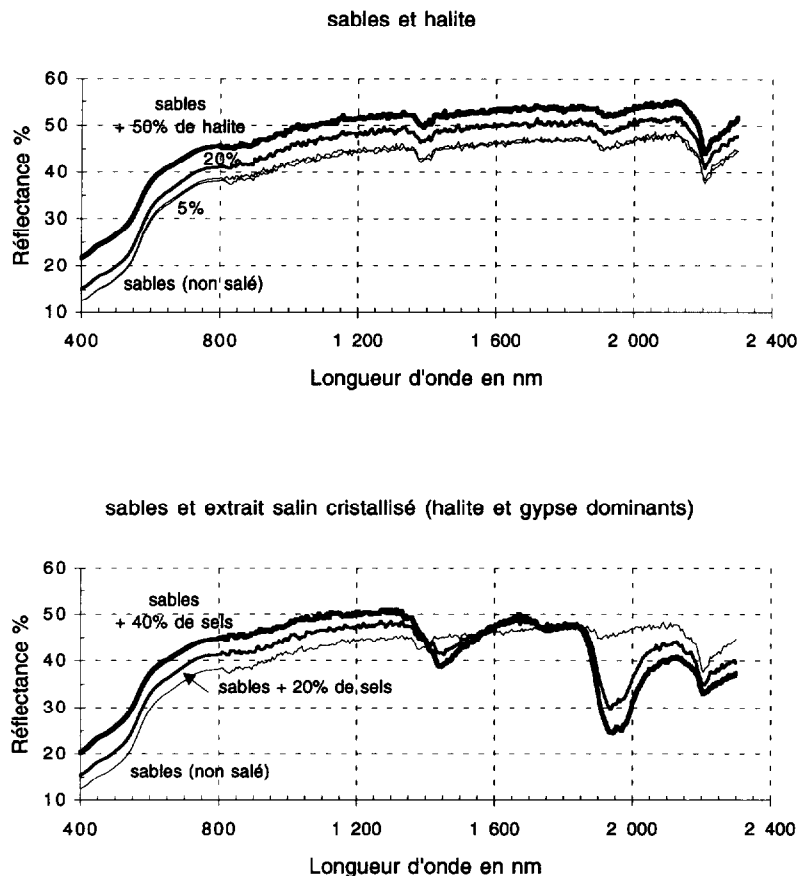


FIG. 2. — Spectres entre 0,4 et 2,5  $\mu\text{m}$  d'un sol sableux brun rouge clair, séché à 60 °C et après mélange avec des sels. En haut, avec de la halite (NaCl), en bas, avec un extrait salin cristallisé à halite et gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) dominants. *Effects of salt addition on the spectrum of a sandy soil (0.4 et 2.5  $\mu\text{m}$ ): halite, and saline soil extract with halite and gypsum.*

dans le visible (ESCADAFAL *et al.*, 1988). On utilisera, par similitude avec la notation utilisée dans le code de couleur Munsell, la représentation en coordonnées de Helmholtz sur le diagramme de chromaticité C.I.E., soit : longueur d'onde dominante (teinte), pureté d'excitation (pureté ou saturation) et luminance (clarté). Sous l'effet de la dessiccation et de l'augmentation de la quantité de sel, la teinte devient moins rouge et la clarté augmente. La pureté tend à croître faiblement pour le sol étudié, plus nettement en présence de sels (purs ou issus d'extraits salins de surface).

Ces effets peuvent donc se compenser si une surface avec des sels cristallisés reste humide, alimentée par exemple par une nappe peu profonde.

Dans l'infrarouge proche et moyen (PIR et MIR), les effets sont opposés. Cependant, la présence de sels hydratés ou hygroscopiques, ou d'eau libre résiduelle (2 à 3 %), maintient un effet des bandes de l'eau avec un affaissement généralisé du spectre du PIR vers le MIR. Les bandes des

ions hydroxyles et des liaisons Al-OH ont des effets similaires et donnent aussi des spectres très déprimés (sulfates acides à tamarugite de la figure 1).

TABLEAU II  
Effets de l'humidité et des sels sur les composantes de la couleur d'un sol sableux brun rouge clair  
*Effects of moisture and salts on the colour components of a light red brown sandy soil (- : decrease, + : increase)*

Système C.I.E. (coordonnées de Helmholtz)	COULEUR	quand l'humidité diminue	quand les sels augmentent
Longueur d'onde dominante ( $\lambda_d$ )	teinte*	↘	↘
Pureté d'excitation (Pe%)	saturation :	peu de variations	↘
Luminance (Y%)	clarté :	↗	↗

\* (↗) : la valeur croît, (↘) : décroît

L'humidité vient compliquer l'interprétation des effets des sels sur la réflectance (EPEMA, 1990). Il ne sera pas possible de séparer les effets de l'eau du sol et de l'eau des sels, en particulier avec des bandes spectrales satellitaires larges.

### Réflectance des états de surface

Les mesures spectrométriques sur échantillons non remaniés et la radiométrie de terrain sur les états de surface salés confirment les observations du laboratoire sur la réflectance en présence de sels (POUGET *et al.*, 1988 ; EPEMA, 1992 ; MOUGENOT *et al.*, 1993) :

- (1) il y a augmentation de la réflectance moyenne ;
- (2) diminution de l'absorption due aux bandes du fer ferrique dans le début du visible ;
- (3) diminution relative de la réflectance dans l'infrarouge due principalement aux bandes de l'eau ou des ions hydroxyles (sulfates et chlorures).

Des sels minoritaires peuvent avoir une influence prépondérante sur la réflectance d'une croûte où domine la halite. La matière organique, en dessous de 5 à 6 % environ, modifie l'intensité de la réflectance sans altérer le comportement spectral moyen. L'influence de la microrugosité est similaire (états de surface à pseudosables).

La diminution de la réflectance du proche vers le moyen infrarouge apporte une confirmation de la présence de sels.

La quantification et l'identification des types de sels par des mesures de réflectance demeure difficilement généralisable sans une étude de leur comportement au sol. Pour une même surface, dans des conditions d'humidité constante, on peut déterminer la présence ou l'absence de sels avec l'augmentation de la réflectance et caractériser d'un point de vue semi-quantitatif des sels hydratés, hygroscopiques ou hydroxylés en relation avec l'intensité des bandes d'absorption dans l'infrarouge.

### TÉLÉDÉTECTION DES SOLS SALÉS

Dans les bandes spectrales du visible et du proche infrarouge, la précipitation des sels à la surface des sols correspond à une réflectance moyenne et à un indice de brillance élevés pour les surfaces encroûtées (BERENGER, 1985 ; RAO *et al.*, 1991). Les compositions colorées prennent fréquemment une nuance bleutée caractéristique d'une diminution relative de la réflectance dans le proche infrarouge par rapport au rouge. Ceci a été interprété précédemment comme une conséquence des absorptions dans les bandes de l'eau et des ions hydroxyles du moyen infrarouge (PEYRONNEL, 1977 ; RIDD *et al.*, 1982 ; EVERITT *et al.*, 1988 ; POUGET *et al.*, 1988 ; ROETERS, 1988 ; MOUGENOT *et al.*, 1990 ; SAHA *et al.*, 1990).

Cet effet est très net pour les états de surface à pseudosables de la figure 3 (réflectances d'états de surface de basse Casamance mesurées par le satellite Spot), du fait de la présence de gypse et d'une faible humidité hygroscopique. Dans le cas de la croûte saline sèche (halite), ce comportement est moins bien marqué, mais la réflectance dans les trois bandes est très élevée. Les états de surface non salés peuvent avoir un comportement proche, si une humidité résiduelle subsiste (croûte non salée sur rizière). Les variations du niveau moyen de réflectance sont dues ici, en dehors des sels, à l'humidité, à la matière organique, aux argiles et à la microrugosité.

Les rapports et combinaisons de canaux tentent de traduire les trois principaux effets des sels sur la réflectance :

(1) dans le visible et le proche infrarouge, l'effet de dilution par les sels des autres composants du sol et en particulier du fer est estimé avec les rapports 4/1 (proche infrarouge sur bleu TM) (EPEMA, 1986 b, 1990), ou avec l'évolution des indices de couleur ou de rougeur combinant les canaux du début du visible 2-1/2+1, 2<sup>2</sup>/1<sup>3</sup> TM ou Spot (MADEIRA, 1993) ;

(2) dans l'infrarouge, les ions hydroxyles et l'eau plus ou moins liée des sels entraînent une diminution relativement plus forte de la réflectance dans le canal 7 de Landsat TM. Les rapports 5/7, 4/7, à dynamique un peu plus forte, varient peu en présence de halite pure, et augmentent de façon non linéaire avec les sulfates. La valeur du rapport 5/7 TM tend vers 1 pour les surfaces non salées. Les rapports 7/4 et 7-4/7+4 ont été utilisés pour détecter des surfaces gypseuses en Tunisie (EPEMA, 1986 b, 1992), 5/7 (AMOS et GREENBAUM, 1987) ou 5/4 TM pour les sulfates acides (MOUGENOT *et al.*, 1990), 5 ou 7/(Σ des autres bandes) pour les carbonates (MULDERS et EPEMA, 1986). Le rapport 5/4 TM corrélé positivement à la teneur en sels présente une dynamique plus faible que le rapport 4/1 TM ;

(3) l'effet d'affaissement du spectre, sensible souvent jusqu'au proche infrarouge, est estimé avec le rapport 3/1 ou la différence 3-2 Spot (diminution en présence de halite au-dessus de 10 à 15 % et dès 2 à 5 % de sulfates hydratés, MOUGENOT *et al.*, 1990).

L'utilisation combinée des différents rapports améliore les résultats. Des confusions sont possibles entre des surfaces sableuses sèches et des croûtes salines très sèches en milieu de journée ou pour lesquelles le lien capillaire avec la nappe est rompu.

La précipitation d'oxyhydroxydes de fer en même temps que les sels, la structuration en microagrégats et les apports éoliens masquent les sels et perturbent leur détection en particulier dans le visible. Les données du satellite Spot ne permettent pas d'accéder au moyen infrarouge, ce qui limite sur une seule acquisition leur intérêt pour la détection des sels.

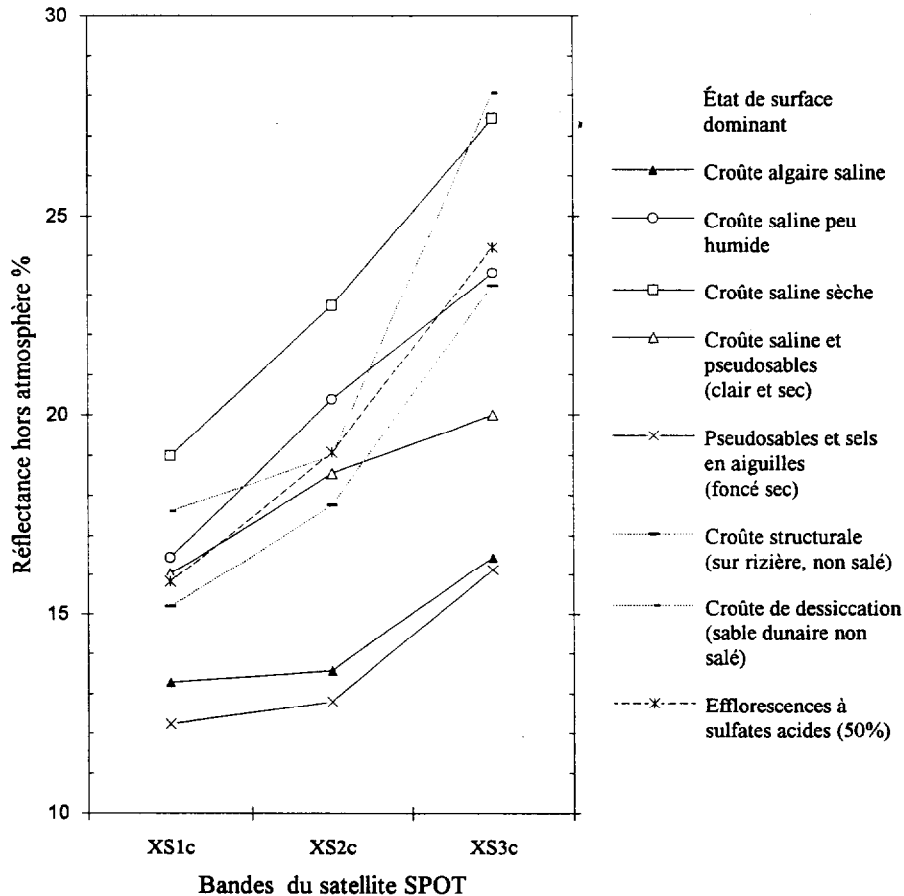


FIG. 3. — Réflectance hors atmosphère de surfaces salées et non salées en basse Casamance au Sénégal (scène Spot 23-325 du 08/05/87).

Spot satellite reflectance of saline and non saline soils surfaces in basse Casamance, south Sénégal (SPOT data, 23-325, 87/05/08).

La végétation permet d'estimer de façon indirecte les effets de la salinité. La figure 4 présente le long d'une toposéquence en milieu de mangrove, la variation de la salinité de la nappe, inversement proportionnelle au recouvrement par la végétation, ce dernier étant corrélé avec le MSAVI (CHEHBOUNI, 1992). Les confusions observées dans la partie centrale de la séquence sont levées avec des indices de couleur dans le visible. Des confusions apparaissent entre les effets du stress salin et du stress hydrique.

Les données satellitaires multitemporelles (exprimées en réflectance sol) permettent de détecter les surfaces salées et non salées en relation avec leur évolution relative dans le temps et d'éliminer les confusions provoquées en particulier par l'humidité (SINGH, 1982 ; VENKATARATNAM, 1983 ; EPEMA, 1986 a ; MOUGENOT *et al.*, 1990).

## CONCLUSION

Les sels jouent le rôle de diluant dans le visible pour les autres constituants. En même temps la réflectance des surfaces salées est sensible aux inclusions aqueuses, minérales ou organiques entraînées par la précipitation des sels. La quantification des sels demeure difficile en l'absence de bandes d'absorption suffisamment spécifiques. Les bandes spectrales satellitaires s'avèrent souvent trop larges. Les mesures spectrométriques sur le terrain éviteraient les modifications des états de surface salés observés après les prélèvements. Les résultats pourront être exploités avec les futures plates-formes satellitaires qui posséderont des résolutions spectrales et spatiales plus fines.

Dans les autres domaines de longueur d'onde, l'infrarouge thermique donne des informations sur les sels et l'humidité, et les micro-ondes de façon plus indirecte (CHATURVEDI *et al.*, 1983 ; SINGH et SRIVASTAV, 1990 ; MOUGENOT *et al.*, 1993).

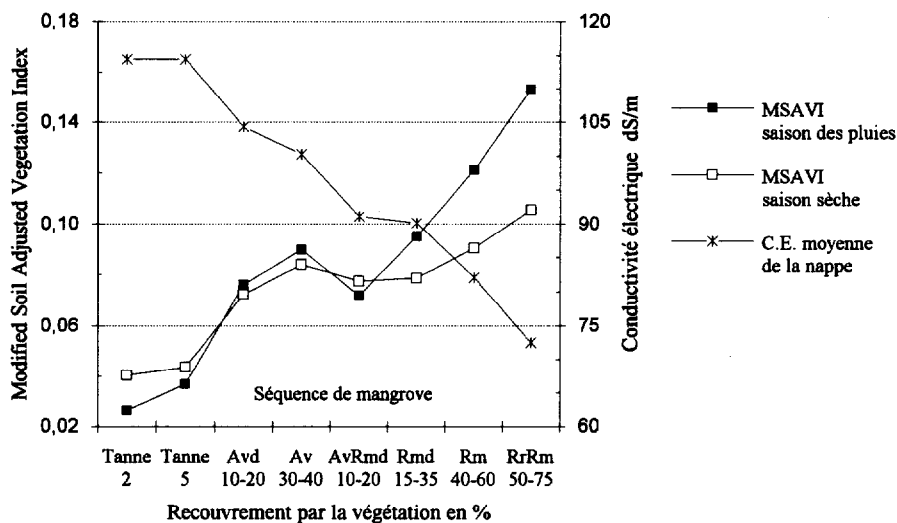


FIG. 4. — Indice de végétation (MSAVI, données Spot, basse Casamance) en fin de saison des pluies et fin de saison sèche pour une séquence de mangrove, et salinité moyenne de la nappe subaffleurante (Tanne : surface et sol hypersalés ; Av, Avd : végétation à *Avicennia africana* en bon état, dégradée ; AvRmd : mélange *Avicennia* et *Rhizophora mangle* dégradés ; Rm, Rmd : *Rhizophora mangle* ; RrRm : mélange *Rhizophora mangle* et *racemosa* au bord du marigot).

*Spot Vegetation Index (MSAVI) of mangrove units, and corresponding salinity of groundwater : Tanne : hyper saline soils on high level ; Av, Avd : well developed, or degraded Avicennia africana vegetation ; AvRmd : mixed and degraded Avicennia and Rhizophora mangle ; Rm, Rmd : Rhizophora mangle ; RrRm : mixed Rhizophora mangle et racemosa on bank.*

La réflectance n'est pas toujours suffisante pour différencier les états de surface salés, et le suivi de la dynamique temporelle par satellite devient rapidement lourd et coûteux. La prise en compte des organisations spatiales

des états de surface et des sols dans le paysage peut pallier à ces difficultés.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 30 janvier 1995.

## BIBLIOGRAPHIE

- AMOS (B.J.), GREENBAUM (D.), 1987. — « Alteration 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 : 795.
- BERENGER (A.C.), 1985. — *Reconnaissance des terrains salés par télédétection*. ICITV. CNRS, université de Toulouse-III, 41 p.
- BOIVIN (P.), 1990. — *Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse Casamance — Sénégal). Étude de la variabilité spatiale et relations avec les caractéristiques pédologiques*. Thèse doct. de l'université de Paris-VI, 170 p.
- CHATURVEDI (L.), CARVER (K.R.), HARLAN (J.C.), HANCOCK (G.D.), SMALL (F.V.), DALSTEAD (K.J.), 1983. — Multispectral remote sensing of saline seeps. *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 21 (3) : 239-250.
- CHEHBOUNI (A.), 1992. — *Présentation d'un modèle de transfert couplé de masse et de chaleur dans le système de sol-végétation-atmosphère pour les zones arides et semi-arides*. Thèse, université Paul Sabatier, Toulouse, LERTS, 163 p.
- CHEVERRY (C.), FROMAGET (M.), BOCQUIER (G.), 1972. — Quelques aspects micromorphologiques de la pédogenèse des sols de polders conquis sur le lac Tchad. *Cah. Orstom. sér. Pédol.*, vol. 10 (4) : 373-387.
- CONEL (J.E.), VANE (G.), GREEN (R.O.), ALLEY (R.E.), CARERE (V.), GABELL (A.), BRUEGGE (C.J.), 1988. — « Airborne visible/infrared imaging spectrometer (aviris): inflight radiometric calibration and the determination of surface reflectance ». In : *Proceedings of the 4th Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*. 18-22 January, Aussois, France : 293-297.
- EPEMA (G.F.), 1986 a. — « Multitemporal analysis of Thematic mapper data for soil survey in southern Tunisia ». In : *Proceedings of the International Symp., ISPRS, Com. VII*. 25-29 august, Enschede, The Netherlands, ed. A.A. BALKEMA, 26, 7/1 : 245-249.
- EPEMA (G.F.), 1986 b. — Processing thematic mapper data for mapping in Tunisia. *ITC Journal*, 1 : 30-34.



- EPEMA (G.F.), 1990. — « Effect of moisture content on spectral reflectance in a playa area in southern tunisia ». *Proceedings of the Int. Symp. on Remote Sensing Water Ressources*. IAH, august 20-24, Enschede, The Netherlands : 301-308.
- EPEMA (G.F.), 1992. — *Spectral reflectance in the Tunisian desert*. Thèse, Soil Science and Geology Departement of the Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 150 p.
- ESCADAFAL (R.), GIRARD (M.C.), COURAULT (D.), 1988. — La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie*, 8 (2) : 147-154.
- EVERITT (J.H.), GERBERMANN (A.H.), CUELLAR (J.A.), 1977. — Distinguishing saline from non-saline rangelands with Skylab imagery. *Photogrammetric Engineering and remote Sensing*, 43 (8) : 1041-1047.
- EVERITT (J.H.), ESCOBAR (D.E.), GERBERMANN (A.H.), ALANIZ (M.A.), 1988. — Detecting saline soils with video imagery. *Photogrammetric Engineering and remote Sensing*, 54 (9) : 1283-1287.
- GOETZ (A.F.H.), 1990. — « Spectral remote sensing in geology ». In : *Theory and Application of Optical Remote Sensing*, New York, Asrar, Wiley ed. : 491-526.
- HANNA (F.S.), STOOPS (G.J.), 1976. — Contribution to the micromorphology of some saline soils of the north Nile delta in Egypt. *Pedologie*, 26 (1) : 55-73.
- HARDISKY (M.A.), KLEMAS (V.), DAIBER (F.C.), 1983. — Remote sensing salt marsh biomass and stress detection. *Adv. Space Res.*, 2 (8) : 219- 229.
- HUNT (G.R.), SALISBURY (J.W.), 1971. — Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: II Carbonates. *Modern Geology*, 2 : 23-30.
- 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 : 195-205.
- HUNT (G.R.), SALISBURY (J.W.), LENHOFF (C.J.), 1971 b. — Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: IV Sulfides and sulfates. *Modern Geology*, 3 : 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 : 121-132.
- JAIN (S.C.), SHARMA (K.P.), MANCHANDA (M.L.), SINGH (C.B.), 1988. — « Physiographic soil classification from multi remote sensing data ». In : *Proceedings of the ninth asian conference on remote sensing*. nov. 23-29, Bangkok, Thailand, P : 17 :1-17 : 8.
- 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. » In : *Proceedings of the 4th Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*. 18-22 january, Aussois, France : 323-327.
- LOWENSTEIN (T.K.), HARDIE (L.A.), 1985. — Criteria for recognition of salt-pan evaporites. *Sedimentology*, 32 : 627-644.
- MADEIRA (J.), 1993. — *Étude qualitative des relations constituants minéralogiques-réflectance, diffusion des latosols brésiliens : applications à l'utilisation pédologiques des données satellitaires TM (région de Brasilia)*. Paris, Orstom, coll. Études et Thèses, 236 p.
- MANCHANDA (M.L.), 1984. — Use of remote sensing techniques in the study of distribution of salt-affected soils in north-west India. *J. of Indian Soil Sci.*, 3 : 701-706.
- MANCHANDA (M.L.), KHANNA (S.), 1981. — Soil salinity and landscape relationship in part of Haryana state. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 29 (4) : 493-503.
- MOUGENOT (B.), 1983. — *Évolution des états de surface des sols non cultivés du delta du fleuve Sénégal en relation avec la dynamique saisonnière des sels*. Orstom, 14 p. multigr.
- MOUGENOT (B.), 1989. — Étude par télédétection des états de surface en relation avec les nappes, exemple des états des sols salés et acidifiés de basse Casamance (Sénégal). *Bulletin du GFHN*, 26 : 51-65.
- MOUGENOT (B.), 1991 a. — « Caractéristiques spectrales de surfaces salées à chlorures et sulfates ». In : *2<sup>e</sup> Journées télédétection, caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales*. Paris, Orstom, coll. Colloques et Séminaires : 49-70.
- MOUGENOT (B.), 1991 b. — « Analyse spatiale et spectrale d'une mangrove dégradée au sud du Sénégal ». In : *5<sup>e</sup> Colloque Mesures physiques et Signatures en télédétection*. 14-18 janv., Courchevel, France, ESA SP-319, 2 : 655-657.
- 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*. Paris, Aupelf-Uref, John Libbey Eurotext : 173-179.
- MOUGENOT (B.), EPEMA (G.F.), POUGET (M.), 1993. — Remote sensing of salt-affected soils. *Remote Sensing Reviews*, 7 : 241-259.
- MULDERS (M.), 1987. — *Remote Sensing in Soil Science. Development in soil science*. Amsterdam, Elsevier, The Netherlands, 15, 379 p.
- MULDERS (M.A.), EPEMA (G.F.), 1986. — The Thematic mapper: a new tool for soil mapping in arid areas. *ITC Journal*, 1 : 24-29.
- PEYRONNEL (A.), 1977. — « Exemple d'étude de la salinité des sols sur cliché I.R.C. » In : *1<sup>er</sup> Colloque Pédologie et Télédétection*. Rome, 29 août-9 sept. 1977. AISS, Com. V, Girard M. C., éd., Ina Paris : 99-106.
- POUGET (M.), LE FLOCH (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'Égypte ». In : *Journées télédétection — Images satellite et milieux terrestres en régions arides tropicales*. Paris, Orstom, coll. Colloques et Séminaires : 103-121.
- RAO (B.R.), DWIVEDI (R.S.), VENKATARATNAM (L.), RAVISHANKAR (T.), THAMMAPPA (S.S.), BHARGAWA (G.P.), SINGH (A.N.), 1991. — Mapping the magnitude of sodicity in part of the Indo-Gangetic plains of Uttar Pradesh, Northern India using Landsat-TM data. *Int. J. Remote Sensing*, 12 (3) : 419-425.
- RIDD (M.K.), MEROLA (J.A.), JAYNES (R.A.), 1982. — « Computer mapping of shoreline fluctuations by satellite Great Salt Lake, UTAH, USA. » ERIM, *First Thematic Confe-*

- rence : *Remote Sensing of Arid and Semi-Arid lands*. 19-25 Jan., Cairo, Egypt : 553-564.
- ROETERS (P.B.), 1988. — « The effect of soil moisture on reflectance characteristics of salt crusts ». In : *Proceedings of IGARSS'88 Symposium*. 13-16 sept., Edinburgh, Scotland : 1225-1227.
- SAHA (S.K.), KUDRAT (M.), BHAN (S.K.), 1990. — Digital processing of Landsat TM data for wasteland mapping in parts of Aligarh District (UttarPradesh), India. *Int. J. Remote Sensing*, 11 (3) : 485-492.
- SERVANT (J.), 1974. — Sur le rôle des cristaux de chlorures de sodium dans la genèse d'une structure poudreuse, à la surface de certains sols salés. *Comptes rendus Académie Sc.. Paris*, t. 278, série D : 589-591.
- SHARMA (R.C.), BHARGAVA (G.P.), 1988. — Landsat imagery for mapping saline soils and wet lands in north-west India. *Int. J. Remote Sensing*, 9 (1) : 39-44.
- SHI YUANCHUN (C.), XIE JIN GRONG (R.), 1988. — « Remote sensing for surveying and mapping of salt-affected soils ». In : *Proceedings of the international symposium on solonetz soils. Problems, properties, utilization*. Osijek, Yugoslavia ; June 15-20, 1988, ADAM M. ed., Agricultural Faculty, University of Osijek : 104-110.
- SINGH (A.N.), 1982. — « Digital analysis of multirate landsat data for monitoring soil salinization in north Indians plains ». In : *Transactions of the 12th Int. Congress of Soil Science*. 8-16 february : 134.
- SINGH (R.P.), SRIVASTAV (S.K.), 1990. — Mapping waterlogged and salt-affected soils using microwave radiometers. *Int. J. of Remote Sensing*, 11 (10) : 1879-1887.
- SINGH (A.N.), VENKATARATNAM (L.), SINHA (K.), VENKATACHALAM (P.), RAO K.R. DWIVEDI (R.S.), 1983. — « Utilisation of Landsat data for delineating, mapping and managing of soils resources — The problems and prospects under Indian conditions ». ERIM, *7th Int. Sym. on Remote Sensing of Environment*. May 9-13, Ann Arbor, Michigan, USA : 787-796.
- SZABOLCS (I.), 1988. — « Solonetz soils ». In : *Proceedings of the international symposium on solonetz soils. Problems, properties, utilization*. Osijek, Yugoslavia ; June 15-20, 1988, ADAM (M.) ed., Agricultural Faculty, University of Osijek : 9-25.
- VENKATARATNAM (L.), 1983. — « Monitoring of soil salinity in Indo Gangetic plains of north western India using multirate Landsat data ». ERIM, *7th Int. Sym. on Remote Sensing of Environment*. May 9-13, Ann Arbor, Michigan, USA : 369-377.