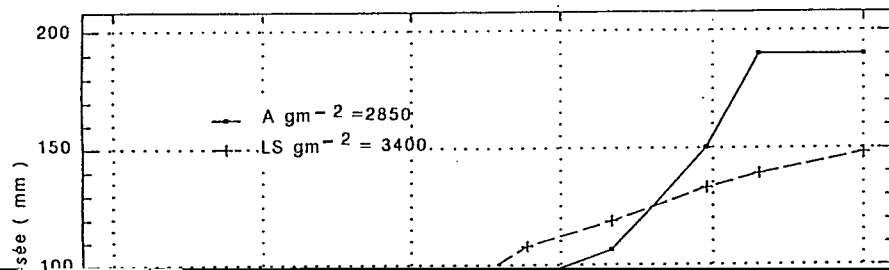


Figure 11 - Evolution du front de cession d'eau



ÉTUDE PAR TÉLÉDÉTECTION DES ÉTATS DE SURFACE EN RELATION AVEC LES NAPPES, EXEMPLES DES SOLS SALÉS ET ACIDIFIÉS DE BASSE CASAMANCE (SÉNÉGAL)

B. MOUGENOT

ORSTOM, Institut Français de Recherche Scientifique
pour le Développement en Coopération,
70-74 route d'Aulnay 93143 Bondy Cedex France

RÉSUMÉ :

Nous avons observé des relations entre les états de surface et les nappes superficielles des sols salés et acidifiés du domaine fluvio-marin de basse Casamance au Sénégal. L'intensification de la sursalure d'origine marine et de l'acidification des sols de mangroves, suite à la baisse des nappes, est liée aux déficits pluviométriques cumulés depuis vingt ans. Les principaux facteurs influençant la radiométrie dans le visible et le proche infra-rouge (couleur, humidité, rugosité et végétation) sont aussi des marqueurs le plus souvent indirects de la salinité, de l'acidité et du battement des nappes. L'imagerie satellitaire SPOT est utilisée pour dresser une carte des états de surface en saison sèche et en saison des pluies. La dynamique

1 - PRÉSENTATION

En basse Casamance au sud du Sénégal, une nappe salée d'origine marine est présente dans toutes les parties basses régulièrement ou rarement inondées par les marées, le long du fleuve Casamance et de ses affluents. La végétation de mangrove est représentée par des palétuviers de type *Rhizophora* le long des rives, d'*Avicennia* en retrait, puis éventuellement d'une strate herbacée à halophytes plus ou moins strictes. Les terrasses ne sont pas ou peu salées, sauf parfois les plus basses. Une bande étroite de palmiers délimite un plateau peu élevé (20 à 40m d'altitude), finement découpé. Les sols de mangroves, riches en sulfures formés en anaérobiose autour des racines de *Rhizophora*, peuvent s'acidifier de façon irréver-

La carte des états de surface constitue l'objectif final du traitement numérique des données satellitaires. Les cartes dérivées, appliquées à des caractéristiques des sols et des nappes (salinité et acidité en particulier), sont établies à partir de données exogènes, non directement perçues en général par le satellite. Nous présenterons ici les relations existant entre les états de surface et les paramètres salinité et acidité sur une séquence type, et comment on peut différencier ces états de surface grâce aux données satellitaires multidates.

Les opérations se déroulent à trois niveaux :

1 - Les données de terrain :

Quatorze séquences-tests (de 200 à 400 mètres de longueur), représentatives de l'organisation des états de surface et des processus hydro-pédologiques, ont été choisies d'après le terrain et les données existantes (photos aériennes récentes, cartes pédologiques). Dans la période de passage du satellite, on décrit les états de surface sur des fiches adaptées au milieu avec prises de photographies verticales. Le suivi des nappes et des sols est réalisé à partir de mesures piézométriques et de caractérisations physico-chimiques (principalement pH et Eh mesurés *in situ*, conductivité électrique et bilan ionique au laboratoire).

2 - Les données satellitaires :

Des images du satellite SPOT ont été programmées avec succès en fin de saison des pluies (12/10/86), au maximum du niveau des nappes et du développement de la végétation ; et en saison sèche (08 /05/87), au maximum de baisse des nappes, de concentration des sels dans les eaux et les sols, et du dessèchement de la végétation. Les données sont acquises en multispectral (XS), soit dans le vert, le rouge et le proche infrarouge (0,50-0,59µm ; 0,61-0,69µm et 0,79-0,89µm, résolution spatiale de 20 mètres).

3 - Les traitements :

Les séquences-tests sont repérées sur des compositions colorées. On détermine ensuite les réponses radiométriques dans les trois canaux SPOT et aux deux dates, des différents états de surface observés sur le terrain. Les scènes sont acquises dans les mêmes conditions de visée (angle de 6° depuis l'ouest) ; elles se superposent ainsi par simple translation. La plupart des confusions radiométriques sont levées grâce à la complémentarité des deux périodes. La validation se fait sur le terrain et par comparaison aux données aériennes et

3 - RESULTATS :

CONSTITUANTS ET FACTEURS D'EVOLUTION DES ETATS DE SURFACE :

Les états de surface qui nous intéressent, se développent sur les trois principales unités géomorphologiques du paysage, parallèlement au lit mineur des marigots vers le plateau (figure 1) :

- 1 **bas-fonds**, régulièrement inondés (mangrove active ou récemment disparue : tannes inondés)
- 2 **tannes**, rarement inondés (ou tannes exondés : tannes vifs et herbus)
- 3 **terrasses**

Les caractères permanents et évolutifs, décrivant les états de surface à l'échelle saisonnière, influencent également les paramètres qui agissent sur la radiométrie (couleur, humidité, rugosité et végétation) :

caractères permanents :

texture,.....	
teneur en matière organique et en fer.....	couleur
densité de végétation arbustive et arborée	végétation, rugosité
<i>caractères évolutifs</i>	
état du fer, sels, dépôts éolienscouleur
teneur en eau et eaux libreshumidité
structure (pellicule de battance, croûte saline, micro-agrégats...)	rugosité
activité chlorophyllienne et extension de la strate herbacée	végétation

Le fer oxydé colore la surface en brun, d'autant plus foncé que les horizons supérieurs des sols sont argileux et organiques.

Les sels sont principalement représentés par :

- les chlorures, avec le chlorure de sodium largement majoritaire, sous forme de fines

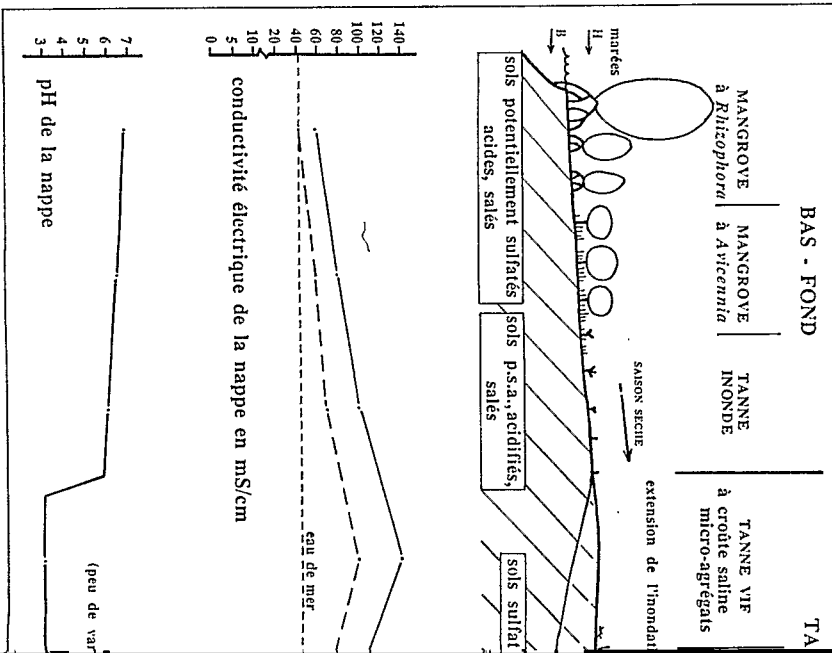
Les cycles humectation/dessiccation par les marées ou les pluies et la forte évaporation (jusqu'à 1cm/jour en saison sèche), conditionnent l'évolution des états de surface à trois échelles de temps :

- cycles bi-quotidiens, mensuels et annuels des marées (affectant les bas-fonds et parfois les tannes vifs)
- cycles saisonniers (saison des pluies et saison sèche)
- cycles pluriannuels

LES RELATIONS ENTRE LES ÉTATS DE SURFACE ET LES NAPPES :

La figure 1 présente une séquence type complète, indiquant les variations saisonnières, du niveau piézométrique, de la conductivité électrique et du pH in situ de la nappe, en relation avec les états de surface dans le paysage.

De la mangrove vers les tannes vifs, les nappes suivent les fluctuations amorties de la marée (0 à -30cm). Leur conductivité électrique, toujours supérieure à celle de l'eau de mer, croît progressivement et s'annule vers les terrasses. Le pH proche de la neutralité dans les



- Les terrasses :

Les nappes salées ne contaminent que très peu, et avec un contact net sur quelques mètres à quelques dizaines de mètres, les nappes de terrasses et de têtes de vallées, encore suffisamment alimentées par celles du plateau. La strate herbacée dense temporaire (graminées, cypéracées en zones inondées et rizières) est associée à la palmeraie. La présence de sols nus et de sulfates mixtes en surface (LEBRUSQ et al., 1986), est le signe d'une nappe hyperacide (pH 2 à 3), susceptible de contaminer les eaux de surface.

La partie supérieure des nappes et des horizons de surface salés subit un dessalement saisonnier (20 à 50% environ) au moment des pluies de juillet à septembre. Le développement d'une strate herbacée temporaire peut marquer cette évolution. La salinité augmente ensuite brutalement puis croît lentement pendant la saison sèche jusqu'en juin. Le pH par contre, varie peu.

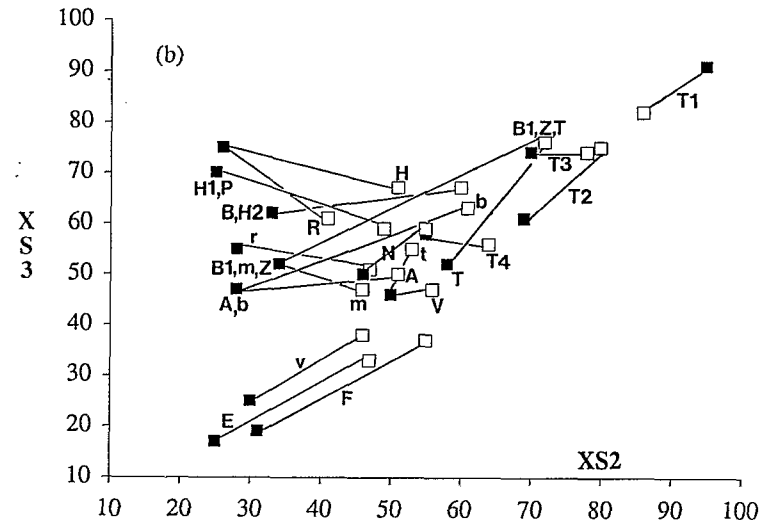
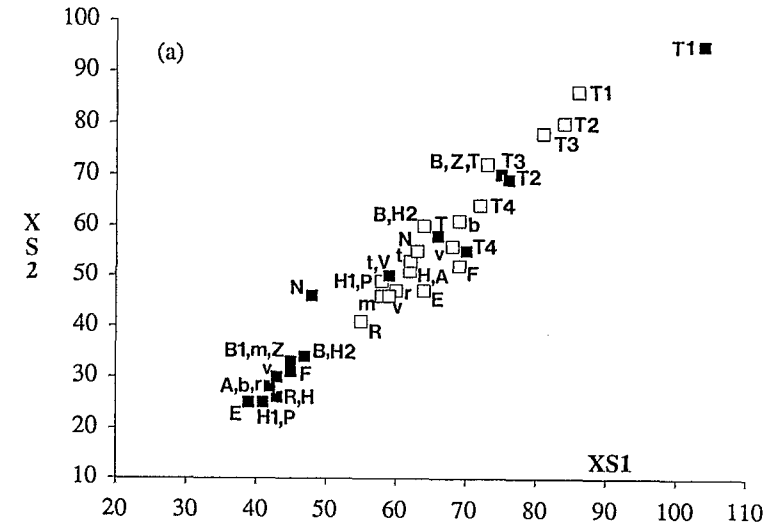
DYNAMIQUE SAISONNIERE ET RÉPONSES RADIOMÉTRIQUES DES ÉTATS DE SURFACE :

Les figures 2a et 2b, représentent l'évolution saisonnière des luminances moyennes des principaux thèmes "états de surface" des séquences-tests, sur les diagrammes croisés

PRINCIPAUX ÉTATS DE SURFACE ET SITUATION DANS LE PAYSAGE (SAISON SECHE)

R =	<i>Rhizophora racemosa</i> ou <i>mangrove</i> , denses ;.....	- bas-fond (mangrove)
r =	<i>Rhizophora mangrove</i> , peu denses ;	- bas-fond (mangrove)
m =	<i>Rhizophora m.</i> et <i>Avicennia africana</i> , denses à peu denses ;.....	- bas-fond (mangrove)
A =	<i>Avicennia africana</i> , denses à peu denses ;.....	- partie haute de bas-fond (mangrove)
v =	surfaces nues, très foncées, (10YR3/2) ;.....	- bas-fond (tanne inondé)
V =	surfaces nues claires, (10YR4/3) ;.....	partie haute de bas-fond (tanne inondé)
N =	halophytes et cypéracées, denses à peu denses ;.....	- tannes herbus
t =	surfaces micro-agrégées, foncées (10YR 5/3) ;	- tannes vifs
T =	surfaces à croûte saline ou à micro-agrégats peu développés, claires à très claires, (10YR5/3 à 10YR 7/4) ;.....	tannes vifs
b =	halophytes, graminées ou cypéracées denses à peu denses ;.....	- basses terrasses
B =	graminées denses, rizières ;.....	- basses et hautes terrasses
Z =	rizières ;	- basses et hautes terrasses
H =	graminées denses, rizières et strate arborée peu dense ;.....	- hautes terrasses
P =	palmeraie, forêt, jachères ;.....	- plateau
E =	eau libre profonde	
F =	haut-fond	

Tableau 2 - Légende des figures 2a et 2b



Figures 2 a et 2 b - Evolution saisonnière des luminances moyennes des principaux états de surface sur les histogrammes bidimensionnels des canaux XS1/XS2 (a) et XS2/XS3 (b).

Des états de surface confondus en saison des pluies (■ R, H par exemple), se différencient en saison sèche (□ R ; □ H) et inversement pour d'autres (B1, Z et T). Des confusions subsistent sur certains sites (■, □ H1, P ; B1, Z). Légende : tableau 2.

Scènes SPOT 23-325 :

■ fin de saison des pluies : 12 oct. 1986

□ fin de saison sèche : 08 mai 1987

Le diagramme XS2/XS3 (Figure 2b) est nettement plus riche en différenciations intra et intersaisonniers, malgré un regroupement des thèmes en saison sèche comme dans le graphe précédent (Figure 2a). Les surfaces en permanence sans végétation décelable par les capteurs (recouvrement végétal en dessous de 10 à 15%), sont toujours bien différenciées suivant des droites d'évolution saisonnière dans la direction de la médiane. On note sur les lannes claires à luminance élevée dans les trois canaux, une convergence des réponses en saison sèche, due à l'uniformisation des états de surface par la dessiccation (micro-agrégation augmentant la micro-ruogosité) et les dépôts éoliens (croûtes salines plus foncées). C'est au

CARTOGRAPHIE DES ÉTATS DE SURFACE ET CARTES DÉRIVÉES :

On identifie à l'écran le long des séquences-tests, la réponse radiométrique moyenne des états de surface dans les trois canaux. Les résultats, acquis ainsi de façon supervisée, sont introduits dans une classification utilisant la distance euclidienne pour chacune des deux dates. Ces deux classifications sont superposées par addition des plans. Les nouvelles classes ainsi définies sont réaffectées visuellement aux 16 thèmes "états de surface" décrits dans la légende des figures 2a et 2b. Ils correspondent à un ou plusieurs états de surface

4 - CONCLUSIONS

De bonnes concordances entre les états de surface, les nappes et les sols, permettent de caractériser et de cartographier des paramètres physicochimiques comme la salinité et l'acidité. Le suivi sur le terrain des données de surface et de profondeur reste cependant indispensable. Les classifications à partir des données brutes sont améliorées en traitant deux dates. La contribution des conditions d'acquisition sera à évaluer pour interpréter l'évolution saisonnière réelle du signal et en prévision de suivis ultérieurs.

L'extension à l'ensemble de la région implique l'étude d'autres fenêtres de l'image, avec une augmentation rapide du nombre de thèmes et un risque croissant de confusions. Ceci nécessitera de stratifier au préalable les données, suivant si possible le comportement radiométrique saisonnier de chaque unité de paysage. L'amélioration des résultats implique également de prendre en compte pour ce milieu, des critères structuraux et de distance.

BIBLIOGRAPHIE

- BARRY B., BOIVIN P., BRUNET D., MONTOROI J.P., MOUGENOT B., SAOS J.L., TOUMA J., ZANTE P. (1988). Sécheresse et modification des ressources hydriques en basse Casamance, conséquences pour le milieu naturel et son aménagement. 2eme Journées de l'eau au Sénégal, Eau et Développement, 8-10 déc. 1988, DAKAR, 22p.
- 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). Collection Etudes et Thèses, ORSTOM Ed. Paris, 317p.
- JADHAV A.S (1986). Application of remote sensing in hydromorphomogy for third world development : a resource development study in parts of Haryana. Proceedings of the 7th International symposium, ISPRS, Com.VII. Enschede, 25-29 august 1986. A.A.Balkema, Rotterdam, Boston ed., 26/7/2, 721-724.
- LEBRUSQ J.Y., LOYER J.Y., MOUGENOT B. , CARN M. (1987). Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. Science du sol, 25 (3), 173-184.
- LOYER J.Y., BOIVIN P., LEBRUSQ J.Y. et ZANTE P (1988). Les sols du domaine fluvio-marin de Casamance (Sénégal) : Evolution récente et réévaluation des contraintes majeures pour leur mise en valeur. in Selected Papers of the Dakar Symposium on Acid Sulphate Soils ; Dakar, Senegal, January, 1986. ILRI, H. Dost Ed. Wageningen. 44, 16-23.
- MOUGENOT B. and ZANTE P. (1986). Study of factors acting on reflectance of salt affected