

ANALYSE COMPARATIVE DES REPONSES SPECTRALES DANS LE DOMAINE OPTIQUE DES CIBLES D'UN MARAIS TROPICAL A DIVERSES RESOLUTIONS SPATIALES ET SPECTRALES

L Loubersac*, M Viollier** & C Lemasson***

*IFREMER, Brest

**CNRS, Roscoff

***ENSAIA, Nancy, France

Spectral signatures of the same tropical salt marsh targets, acquired on the ground (Sept. 20th 86) and from altitude (helicopter survey Sept. 17th 86) with three looking angles are compared to the SPOT HRV data of Sept. 18th 86 and correlated to some physical properties of the barren salt flats. Those observations give coherent results but, on dense vegetation the satellite response appears under estimated when, on barren flats, it appears over estimated. An atmospheric environmental effect explanation is proposed. Significant correlations between vegetation and brightness indexes and humidity and organic matter contents of soils are found.

Keywords : tropical salt marsh, SPOT HRV, high spectral resolution, environment effect, side-looking angle.

I. INTRODUCTION

Le présent article cherche à répondre, sur la base d'une approche radiométrique aux questions suivantes :

(a) Comment interpréter les images de type SPOT interceptant un marais tropical et déterminer des critères objectifs de classification ?

(b) Qu'apportent les trois bandes XS1, XS2 et XS3 du satellite en comparaison avec des spectres de haute résolution obtenus sur les mêmes cibles caractéristiques du marais ?

(c) Quelles relations établir entre des mesures spectrales du sol et des mesures obtenues à diverses altitudes ? En particulier, existe-t-il un effet atmosphérique d'environnement ?

(d) Quelle peut-être l'influence de la direction de visée ?

(e) Quelles relations établir entre les réponses spectrales et certains paramètres physico-chimiques des sols nus du marais ?

On analyse ci-après les réponses à ces questions sur la base de campagnes de terrain réalisées dans le cadre du projet ALIAS (PEPS) en Nouvelle Calédonie. Plus particulièrement on s'appuie sur les données obtenues lors de la campagne de Septembre 1986, financée par l'ATP "Télé-détection spatiale" et qui a permis de mener l'étude à deux niveaux de résolution spectrale, celle de SPOT et celle du spectroradiomètre HRS (voir plus loin) et à trois niveaux de résolution spatiale, celle offerte par les mesures au sol, celles obtenues par mesures hélicoptérées (0-1 100 m) celle offerte par le satellite lui même.

2. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

Le site retenu a été celui du marais de Mara ou de Teremba situé sur la côte Ouest de l'île de Nouvelle Calédonie (fig. 1) déjà étudiée au niveau sédimentologique par BALTZER (Réf. 1) de ses potentialités aquacoles par AUTRAND (réf. N°2) et siège d'études dès 1983 par voie de simulation SPOT (Réf. N°3) et de spectroradiométrie de terrain en 1985.



Fig 1 : Localisation du site étudié

Les éléments constitutifs du "paysage" sont (Réf. 4) pour les objets naturels du domaine continental jusqu'à l'océan : la végétation terrestre, le sol sec du marais maritime plus ou moins recouvert d'une croûte saline et d'un voile algair, ce même sol humidifié par la marée, le sol humide du marais recouvert d'une végétation dispersée (salicornes), une mangrove constituée principalement des espèces *avicennia*, *Bruquiera*, *Rhizophora*, le lagon, la barrière de corail, l'océan. Les objets du paysage créés par l'homme (au niveau du marais et de son voisinage immédiat) sont des infrastructures aquacoles : bassins d'élevage, routes, bâtiments etc...

3. CARACTERISTIQUES DES RADIOMETRES ET PRINCIPES GÉNÉRAUX DES ACQUISITIONS

3.1 La radiométrie

Les radiomètres utilisés ont été le radiomètre de simulation SPOT (Réf. 5) fabriqué par CIMEL qui mesure les réflectances dans les trois bandes de SPOT désignées XS ; le radiomètre HRS (Haute Résolution Spectrale) conçu par le CNES (Réf. 6) qui mesure les réflectances entre 470 et 920 nm avec une résolution d'1 nanomètre ; le HRV2 de SPOT dont la Réf. 7 fournit les caractéristiques. A noter, pour les deux premiers radiomètres que l'étalonnage du rapport de réflectance est fixé à partir d'une mesure sur une cible de réflectance connue à l'exemple d'autres études (Réf. 8) et que dans le cas de l'expérience hélicoptère, à cause de l'effet d'ombre des pales sur le capteur du flux solaire, celui-ci ne pouvant pas être mesuré en vol, une mesure effectuée au sol avec un décalage d'au plus 30 minutes servait alors de référence.

3.2. Principes généraux des mesures

- Transect "sol"

Une radiale traverse le marais des plus hauts niveaux (sol nu dépourvu de végétation) jusqu'à la mangrove ; en 8 stations des mesures spectroradiométriques ont été réalisées ainsi que des prélèvements en vue d'analyse. Des acquisitions complémentaires sans prélèvements ont été réalisées sur les plantes de la mangrove et sur l'eau des bassins. Ces mesures ont été effectuées le 20 Septembre 1986. Les deux radiomètres CIMEL et HRS ont été utilisés.

- Point fixe hélicoptère.

Une série de points fixes, à des altitudes de 95 et 1140 mètres en fonction du champ des radiomètres CIMEL et HRS de sorte à ce que les surfaces visées soient de 400 m², a été réalisée le 17 Septembre 86.

D'autre part, ce même jour, une radiale de 8 km correspondant au plan de visé SPOT a été parcourue à la vitesse de 60 km/h de sorte à mesurer tous les 100 m les luminances dans les trois canaux de SPOT (radiomètre CIMEL) à trois reprises en fixant l'angle de visée à 27° à l'avant et à l'arrière puis à la verticale. Les 3 parcours ont été réalisés entre 10h04 et 10h35 soit à une heure voisine de celle des prises de vues SPOT.

- Données SPOT

Une scène en mode XS interceptant le marais de

Mara a été acquise dans de bonnes conditions le 18 Septembre 1986 par l'instrument HRV2 à 11h08 locale avec un angle de visée de 8,2° vers l'Ouest.

4. CONVERSION RADIOMETRIQUE DES DONNEES SPOT

D'après BEGNI (Réf. 9) et DINGUIRARD (Réf. 10) les comptes numériques N_i (l'indice i désigne le canal 1, 2 ou 3) peuvent être convertis en luminance en les multipliant par une constante d'étalement A_i :

$$L_i = A_i N_i \quad (1)$$

puis en réflectance suivant la formule :

$$R_i = \frac{L_i}{f E_i \sin h} \quad (2)$$

où E_i est la valeur moyenne de l'éclairement solaire incident, f est un terme de correction des valeurs des variations de la distance terre-soleil (f varie de 1,033 à 0,977 de l'hiver à l'été); et h est l'angle caractérisant la hauteur du soleil. Pour les canaux XS1, XS2 et XS3 de HRV2 de SPOT les valeurs de A_i sont respectivement égales à 1,056, 1,011 et 1,02 $W.m^{-2} \mu m^{-1}$ et celles de E_i à 1840, 1570 et 1040 $W.m^{-2} \mu m^{-1}$.

La réflectance R_i^T mesurée au niveau du satellite est une réflectance "totale" qui inclue les contributions de l'atmosphère, de la surface visée et de son environnement sur plusieurs kilomètres (Réf. 11). Lorsque la cible et son environnement forment un ensemble homogène de réflectance R_i^{SOL} TANRE et al. (Réf. 11) montrent que l'on peut approcher la relation entre R_i^T et R_i^{SOL} à l'aide d'une simple formule :

$$R_i^T = \frac{T_i R_i^{SOL}}{1 - s_i R_i^{SOL}} + R_i^{ATH} \quad (3)$$

où T_i est un terme de transmission qui tient compte de la double traversée de l'atmosphère, R_i^{ATH} est la réflectance atmosphérique (due à la diffusion par les molécules et les aérosols), et s_i l'abédo sphérique de l'atmosphère (de l'ordre de 0,15 aux longueurs d'onde de HRV). Lorsque la surface visée et son environnement ne sont pas homogènes, l'équation (3) reste valable à condition de remplacer $1 - s_i R_i^{SOL}$ par $1 - s_i \langle R_i^{SOL} \rangle$ où $\langle R_i^{SOL} \rangle$ est la réflectance moyenne de l'environnement (Réf. 11), et de considérer que R_i^{SOL} peut inclure pour une part non négligeable la réflectance de l'environnement.

Si l'on considère constant $1 - s_i \langle R_i^{SOL} \rangle$ pour la partie de sol étudiée (voir tableau 1), la réflectance R_i^{SOL} peut se déduire de la réflectance satellite R_i^T , à partir de l'équation (3)

$$R_i^{SOL} = (R_i^T - R_i^{ATH}) \frac{1 - s_i \langle R_i^{SOL} \rangle}{T_i} \quad (4)$$

Dans cette expression T_i peut être calculée à l'aide du logiciel 5S (Réf.12) et R_i^{ATH} est déduite de la valeur la plus faible observée sur l'image (l'océan). Compte-tenu des valeurs de s_i , T_i et de R_i^{ATH} (tableau 1), les réflectances R_i^T et R_i^{SOL} calculées suivant cette méthode sont compa-

rées aux réflectances R_{SITE} mesurées au sol sur plusieurs sites caractéristiques. Les différences entre R_{SITE} et R_{SOL} , sont de l'ordre de 0,02, sauf pour les valeurs élevées de réflectance de XS3, ce qui sera discuté plus loin.

	XS1	XS2	XS3
$1 - S_i < R_{i SOL} >$	0,982	0,986	0,965
T_i	0,87	0,91	0,92
$R_{i ATM}$	0,0385	0,0191	0,0063

Tableau 1 : Paramètres atmosphériques de la scène du 18/09/1986.

5. RESULTATS

5.1 Intercomparaison des données CIMEL et HRS

La comparaison est faite entre des mesures réalisées sur le terrain (CIMEL) le 20 Septembre (surface observée de 40 cm de large) et les mesures haute résolution réalisées le 17 Septembre lors du survol héliporté (surface observée de 400 m). Des spectres haute résolution obtenus sur le marais et sur l'eau des bassins sont présentés respectivement figures 2 et 3.

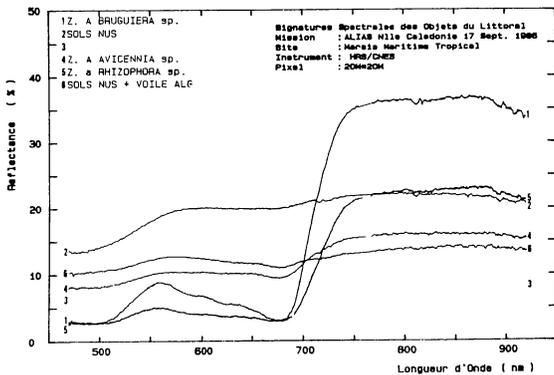


Figure 2 : Spectres HRS obtenus sur les diverses cibles du marais.

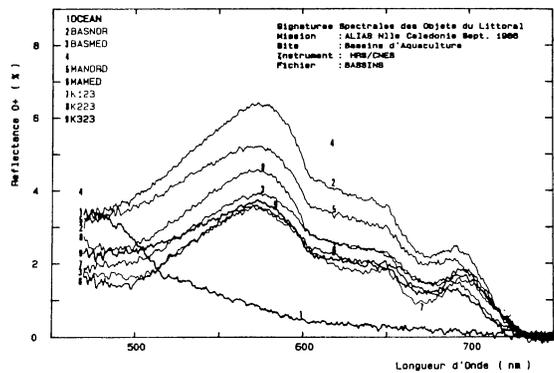


Fig. 3 : Spectres HRS obtenus sur les divers domaines aquatiques

Sur les sols nus un minimum relatif de réflectance est observé vers 670 nm. Position qui correspond à la bande d'absorption de la chlorophylle.

Ce minimum indiscernable par SPOT puisque sa largeur de bande n'est que de 20 nm devrait être lié à l'abondance de microflore benthique ou de plancton. En dehors de ce phénomène les signatures sont relativement monotones et la configuration spectrale de SPOT à trois canaux laisse finalement échapper peu d'information en ce qui concerne les grands éléments constitutifs du marais étudié (cf. Réf. 13).

En ce qui concerne les cibles végétales, on notera pour Bruguiera, par rapport aux autres espèces, en particulier à la différence de Rhizophora, un pic de réflectance assez net vers 560 nm.

Les données radiométriques de simulation SPOT,, moyennées d'une quinzaine de mesures pour une cible donnée sont comparées après calcul d'un indice de végétation normalisé (tableau 2) aux données correspondantes du HRS, résultant d'une intégration numérique sur les trois bandes spectrales concernées. On constate pour les 3 bandes spectrales que les mesures HRS sont légèrement plus élevées que les mesures au sol, mais de manière apparemment aléatoire. La différence la plus marquante concerne l'indice de végétation des peuplements (avicennia et salicorne) : la mesure en altitude leur donne une valeur très inférieure à celle obtenue au sol. Deux explications sont possibles. L'une serait un biais dans l'échantillonnage des mesures au sol : dans le cas d'une végétation éparse, l'expérimentateur aurait tendance à favoriser l'élément végétal. L'autre explication serait l'effet atmosphérique en particulier l'effet d'environnement, qui a tendance à "lisser" les signatures spectrales, et que l'on retrouvera de façon plus évidente sur les mesures satellitaires.

	TERRAIN/CIMEL	HELICO/HRS
Rhizophora	0,78	0,74
Avicennia	0,60	0,23
Salicorne	0,38	0,10
Sol nu humide	0,09	0,09
Sol nu sec	0,05	0,05

Tableau 2 : Comparaison des valeurs de l'indice de végétation normalisé mesurées d'une part sur le terrain à l'aide du CIMEL, d'autre part par hélicoptère à l'aide du HRS.

5.2 Comparaison des données SPOT et terrain

Pour dix cibles facilement identifiables et localisables dans l'image, les mesures satellitaires ont été extraites sous la forme d'une moyenne de 3 x 3 pixels et de son écart-type. Ces données converties en réflectances brutes (équation 1) et en réflectances corrigées (équation 4) sont comparées aux données de terrain. Le tableau 3 résume ces comparaisons pour le calcul de l'indice de végétation. Les corrections radiométriques et atmosphériques apparaissent efficaces pour les deux premiers canaux : la différence $R_{SOL} - R_{SITE}$ est faible, en moyenne 0,8 %. L'amplitude respective des réflectances des bassins d'aquaculture est notamment bien retrouvée sur les données satelli-

tes.

	IV calculé à partir de R^T	IV calculé à partir de R^{sol}	IV calculé à partir de R^{SITE}
Bruguiera	0,64	0,79	0,77
Rhizophora	0,49	0,70	0,78
Avicennia	0,29	0,46	0,60
Salicorne	0,24	0,39	0,38
Sol nu humide	0,17	0,22	0,09
Sol nu sec	0,17	0,20	0,05

Tableau 3 : Comparaison des valeurs de l'indice de végétation normalisé obtenues à partir des réflectances satellitaires brutes (R^T), corrigées des effets atmosphériques (R^{sol}) et mesurées in situ (R^{SITE}).

En ce qui concerne le canal XS3, la réflectance des végétaux est très largement sous-estimée, tandis que celle des sols est plutôt surestimée. Une telle tendance correspond à celle observée en environnement littoral tempéré (Réf. 14). L'explication la plus probable est l'effet atmosphérique d'environnement (Réf. 11). A cause de la diffusion atmosphérique, le satellite observe non seulement le pixel visé, mais son environnement sur plusieurs kilomètres, pour une contribution variable qui peut atteindre 10 %. Dans le cas du milieu littoral, l'eau et les sols humides, de réflectance nulle ou très faible, contribuent à affaiblir la réflectance normalement élevée de la végétation. L'environnement végétal de certains sols nus contribue au contraire à l'augmentation de la réflectance apparente. Cet effet n'apparaît pas de manière aussi évidente dans les deux premiers canaux, car les écarts entre réflectance des différentes cibles y sont beaucoup moins étendus.

5.3. Influence de la direction de visée

Le terme "réflectance" des objets naturels est souvent impropre. C'est une simplification du terme "réflectance bidirectionnelle". Certaines mesures (Réf. 15 et 16), démontrent en effet une dépendance par rapport à l'angle d'observation et à l'angle d'incidence du flux solaire direct. Nous avons cherché l'amplitude de cette dépendance en ce qui concerne d'une part les conditions de prise de SPOT et d'autre part, l'environnement littoral étudié.

Une "indicatrice de réflexion" d'une cible de dimension réduite (quelques centimètres) est relativement simple à réaliser à partir du sol car l'on peut s'assurer que le même objet est visé malgré les changements de position du radiomètre. Plus difficile est de simuler les conditions de prise de vue SPOT, en particulier de traiter les cibles de 20 mètres de côté. L'une des solutions est de répéter à moyenne altitude un même transect en orientant la direction de visée du radiomètre suivant différents angles par rapport à la verticale ainsi qu'indiqué à paragraphe 3.2.

L'expérience n'a cependant pas été pleinement réussie. Les conditions de navigation n'ont pas permis de repositionner rigoureusement les différents passages. Les trois séries de mesure ne sont donc pas parfaitement superposables. Avec l'eau, seul un site de caractère végétal en début de radiale a pu être reconnu avec suffisamment de sécurité. L'analyse des résultats (tableau 4) est

donc succincte, mais suffit à mettre en évidence une augmentation des réflectances lorsque l'on se rapproche de la direction de rétrodiffusion, de 0,15 à 0,185 pour XS3 sur la végétation. La gamme de variation sur le calcul de l'indice de végétation est de 0,36 à 0,43 soit une amplitude inférieure à celle qui sera induite (voir ci-dessus) par l'effet atmosphérique d'environnement.

Angle de diffusion	110°	137°	161°
XS1 (x 100)	4	6,1	6,2
XS2 (x 100)	6	8,5	8,5
XS3 (x 100)	15	18	18,5
IV (XS3 - XS2) (XS3 + XS2)	0,43	0,36	0,38
Angle de visée	27° vers l'Est	0°	27° vers l'Ouest

Tableau 4 : Influence de l'angle de visée sur la mesure des réflectances et de l'indice de végétation. Cas d'une cible végétale. Simulation d'une prise de vue SPOT pour une élévation solaire de 46°.

5.4 Intercomparaison entre la radiométrie de terrain et des mesures physicochimiques sur les sols nus

Il a déjà été démontré dans l'étude des sols nus en climat tempéré que suivant la diversité offerte par un milieu la réflectance d'une part de l'espace est affecté par des caractères inhérents aux sols (Réf. 17). Dans cette optique, de sorte à caractériser les sols nus du marais tropical étudié, des mesures radiométriques (CIMFL) simultanées à des prélèvements ont été effectuées (cf. paragraphe 3.2). Les paramètres mesurés en laboratoire sur les échantillons de sols ont été la teneur en eau, en carbone minéral, en matière organique, en chlorures, en fer, en chlorophylle. Pour les méthodes d'échantillonnage in situ et en laboratoire, on se reportera à la Réf. 18. Différentes analyses régressives ont été réalisées (linéaires, exponentielles, multiplicatives, réciproques...) entre les mesures spectrales obtenues par canal ou combinées sous forme d'indices et les paramètres cités plus haut.

Parmi les résultats significatifs obtenus on notera que deux paramètres, teneur en eau et matière organique, exprimée sous forme de l'azote organique, s'avèrent les plus influents vis à vis de la spectroradiométrie des sols étudiés. Des corrélations significatives (régressions linéaires) sont obtenues (Réf. 18) :

- D'une part, il y a augmentation de l'indice de végétation ($r^2 = 0,72$) et diminution de l'indice de brillance des sols ($r^2 = 0,84$) avec le taux d'humidité.

- D'autre part, il y a augmentation de l'indice de végétation ($r^2 = 0,89$) avec la teneur en matière organique et diminution de l'indice de brillance ($r^2 = 0,9$).

Pour les autres paramètres certaines tendances ont été identifiées mais n'ont pas de significations statistiques suffisantes pour pouvoir en

développer une application. Il va de soi, que se pose le problème théorique de l'épaisseur du sol à considérer lors du prélèvement in situ et de la mesure spectrale, problème non développé ici.

6. CONCLUSION

Des mesures radiométriques effectuées sur les composantes d'un littoral tropical, au sol, à moyenne altitude et de satellite sont comparées. L'ensemble des observations est cohérent sauf sur un point, la réflectance de la végétation dense est nettement sous-estimée lorsqu'elle est mesurée de satellite. L'explication la plus probable est l'effet atmosphérique d'environnement décrit par TANRE et al. (1986), (Réf. 11).(1986). Cet effet dépend de la répartition géographique des composantes du paysage sur plusieurs kilomètres. Sur le milieu littoral, où la composante principale est l'eau dont la réflectance proche infrarouge est nulle, l'ordre de grandeur de cette perturbation devrait être peu variable. Pour un site donné en cas d'atmosphère claire a la perturbation elle même devrait être constante à travers le temps. A l'exception de ce point qui demande quelques précautions, les résultats présentés conduisent à accorder une bonne confiance dans l'utilisation des valeurs des réflectances et des indices qui s'en déduisent et permettre ainsi de proposer à des fins d'application des modèles statistiques fiables reliant les valeurs spectrales mesurées à des grandeurs physiques caractéristiques des cibles telles la teneur en eau ou la teneur en matière organique des sols nus des tannes.

REFERENCES

- BALTZER F. 1970. Etude sédimentologique du marais de Mara in "Expédition française" sur les récifs coralliens de la Nouvelle Calédonie édit. Fondation Singer Polignac Vol 4 Paris 1970.
- AUTRAND M. 1982. Etude de faisabilité technico économique pour la réalisation d'une ferme industrielle d'élevage de crevettes de mer en Nouvelle Calédonie. Rapport France-Aquaculture Paris mars 1982 114 p.
- LOUBERSAC L., AUTRAND M. 1984. Study of intertidal zones using simulated SPOT data : inventorying of aquaculture sites in the intertropical zone : XXV COSPAR Graz Austria June 25 - July 7 1984.
- VIOLLIER M, BELSHER T, LOUBERSAC L., 1985. Signatures spectrales des objets du littoral. in Proc of the 3rd international Colloquium on Spectral Signatures of objects on remote sensing. Les Arcs 16-20 déc. 1985 - ESA SP 247 pp. 253-256.
- GUYOT, HANOCQ J.P., BUIS J.P., SAINT G. 1984. "Mise au point d'un radiomètre de simulation SPOT", Proceedings II^e coll. Signatures spectrales d'objets en télédétection, INRA, 223-234.
- VERMANDE P., 1985 "High spectral resolution instruments developed at CNES". Proceedings III^e coll. Signatures spectrales d'objets en télédétection. ESA SP 247, 227-232.
- CNES SPOT-IMAGE 1986. Guide des utilisateurs des données SPOT vol. I et II.
- HOOBS, A.J. and SHENNAN, I., 1986. "Remote sensing of salt marsh reclamation in the Wash, England". Journal of Coastal Research, 2, 181-198.
- BEGNI. Note technique du CNES DU 28/07/86.
- DINGUIRARD 1986. Etalonnage absolu et interbande. SPOT 1, Premiers résultats en vol. Toulouse déc. 1986 pp. 71-78.
- TANRE D., HERMAN M., DESCHAMPS P.Y (1981) "Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance", App. Opt. 20, 3676-3684.
- TANRE D., DEROO C., DAHAUT P., HERMAN M., MARANETTE J.J., PERBOS J., DESCHAMPS P.Y., 1985. "Effets atmosphériques en télédétection, logiciel de simulation du signal satellitaire dans le spectre solaire (5S) ESA SP 247 pp. 315-319.
- LOUBERSAC L., GROTTA A., VIOLLIER M., 1986. Utilisation des images SPOT pour l'aménagement littoral et l'inventaire des sites aquacoles en Nouvelle-Calédonie (projet ALIAS), résultats préliminaires. SPOT 1 premiers résultats en vol Toulouse déc. 1986 pp. 267-273.
- BEN MOUSSA 1987. Contribution de la télédétection satellitaire à la cartographie des végétaux marins. Archipel de Molène (Bretagne France), Thèse Université d'Aix Marseille 122 pp. plus annexe.
- KRIEBEL KT., (1978) "Measured spectral bidirectional reflection properties of four vegetated surface". App. Opt., 17, 253-259.
- GUYOT 1983. Variabilité angulaire et spatiale des données spectrales dans le visible et le proche infra rouge. 2^eème colloque international. Signatures spectrales d'objets en télédétection Bordeaux 12-16/9/83 in "Les Colloque de l'INRA N°23".
- KING C. 1983. Les qualité spectrales des sols nus : analyse des spectres radiométriques acquis sur le terrain dans le Bassin Parisien. II^eème Colloque International Signatures spectrales d'objets en télédétection. Bordeaux pp. 253-264, in "Les Colloques de l'INRA N°23".
- LE MASSON 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. Rapport de D.A.A. IFREMER-FNSAIA, Nancy, Oct. 1987, 44 pp.