

Modélisation de la signature spectrale d'eau continentale par prise en compte de l'épaisseur de la tranche d'eau, de la nature du fond et de la concentration de matières en suspension : exemple du fleuve Sénégal

LUC SÉGUI

Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), B.P. 1386, Dakar, Sénégal;
téléphone : +221 32-34-76; télécopieur : +221 32-43-07; télex : 51468 SG

Résumé

Comme le Niger, autre grand fleuve d'Afrique de l'Ouest, le fleuve Sénégal présente un lit majeur de grande extension dans sa partie médiane. À la crue, des défluent alimentent des successions de cuvettes qui sont ensuite cultivées lors du retrait des eaux. Dans le cadre global d'étude de ces dépressions, l'objectif de ce travail était la caractérisation spectrale des eaux de crues. Notre démarche s'est appuyée sur des données radiométriques de terrain pour définir un modèle dont les paramètres ont été ensuite étalonnés en laboratoire. Sur des transects, dans deux mares de turbidité contrastée, nous avons mesuré la profondeur et les réflectances dans les bandes spectrales de HRV de SPOT. Pour chaque profil, la concentration de matières en suspension était déterminée. Les couples de points profondeur-réflectance s'organisent en courbe exponentielle dont la paramétrisation (ordonnée à l'origine, coefficient de forme et asymptote) se déduit de la réflectance du fond et de l'importance des matières en suspension. Pour couvrir une plus grande gamme de turbidité qu'en milieu naturel, nous avons établi un dispositif expérimental en laboratoire. Les résultats des mesures sont en accord avec le modèle retenu. En conclusion, pour les turbidités rencontrées, la radiométrie est trop vite limitée par la teinte des matières en suspension pour être utilisée comme outil bathymétrique. Par contre, moyennant un étalonnage, l'utilisation du radiomètre comme turbidimètre est possible.



1. Introduction

Comme le Niger, le fleuve Sénégal présente, dans son cours médian, un lit majeur de grande extension. La faiblesse immémoriale des précipitations (moins de 250 mm annuellement) dans cette zone entre la Mauritanie et le Sénégal a toujours limité les cultures pluviales et favorisé les cultures traditionnelles de décrue. Les cultures potagères occupaient les berges du lit mineur tandis que la culture du sorgho s'effectuait dans les cuvettes de décantation du lit majeur. La mise en valeur de la vallée a débuté par la construction de périmètres rizicoles fonctionnant par submersion contrôlée à la crue. Devant l'accentuation de la sécheresse depuis une vingtaine d'années, le fleuve a été régularisé par la construction d'un barrage réservoir au Mali, à l'amont, et d'un barrage anti-sel, à l'embouchure. L'eau prélevée par pompage alimente de grands périmètres irrigués (jusqu'à 1 000 ha) situés dans l'ancienne plaine d'inondation où de nombreuses dépressions restent encore cultivées en sorgho de décrue. Dans le cadre d'un développement durable de l'agriculture irriguée dans cette région, notre programme d'étude vise notamment à évaluer les contraintes physiques d'aménagement du milieu. Ceci passe par la connaissance des dépressions inondées annuellement malgré la régularisation du fleuve. Il est nécessaire de localiser et de délimiter les mares, et de connaître leur bathymétrie pour toute modélisation de leur fonctionnement hydrologique. Les premiers travaux ont justifié l'usage de la télédétection spatiale comme outil pratique et précis de cartographie des mares, même de faible extension (SÉGUIIS et DUBÉE, 1992). La classification d'une première image suggérait la possibilité de relier la luminance à la bathymétrie (SÉGUIIS *et al.*, 1991). Pour confirmer cette hypothèse, une étude radiométrique de terrain a été entreprise pendant les crues de 1991 et 1992. Elle s'est poursuivie en laboratoire afin de valider et préciser la modélisation ébauchée sur le terrain. Cet article présente les principaux résultats de ces travaux.

2. Travaux de terrain

2.1. Site d'étude et protocole de terrain

La zone étudiée forme une cuvette située sur la rive gauche du lit majeur du Doué (bras du Sénégal), dans la partie la plus septentrionale du cours du fleuve, à proximité de la ville de Podor (fig. 1). Endiguée dans les années 70, la cuvette d'une superficie d'environ 200 km² a été partiellement aménagée en casiers rizicoles (1 000 ha) alimentés par pompage dans le Doué. Deux pertuis permettent l'accès de l'eau du fleuve aux dépressions naturelles cultivées à la décrue. Certains de ces points bas servent aussi de réceptacles aux eaux de drainage du périmètre. Ces eaux, de par leur séjour dans les rizières, ont une charge solide plus faible que les eaux de crues. À leur niveau maximal de remplissage, les mares ont moins de 1,5 m de profondeur. L'étude a porté sur deux mares, l'une alimentée principalement par les collatures du périmètre (la mare de Pont Gari), l'autre par un effluent du Sénégal, le N'Galénka (la mare de Figo).

Des transects ont été effectués de la terre ferme au centre des mares. Le radiomètre utilisé était un réflectancemètre de marque CIMEL CE 310 (GUYOT *et al.*, 1984). L'appareil est constitué de deux têtes, une tête d'éclairage destinée à viser le ciel et une tête de luminance destinée à viser le sol. Les têtes sont fixées sur une potence à environ 2,80 m du sol. L'angle d'ouverture étant de 12°, la surface visée est d'un quart de mètre

carré. Les canaux de mesures sont ceux de SPOT (0,50-0,59 μm [R1], 0,61-0,68 μm [R2], 0,79-0,89 μm [R3]).

Les mesures sur les plans d'eau sont faites lorsque le soleil est autour du zénith et les journées sans vent, afin d'éviter en partie la réflexion spéculaire. À chaque point de mesure, nous visions en avant de notre avancée dans la mare afin d'empêcher la remise en suspension de la vase à notre passage. La concentration de matières en suspension a été déterminée, pour chaque profil, par un prélèvement d'eau.

Nous avons également effectué des mesures sur la frange de sol humide bordant les mares. Nous présentons en premier lieu ces résultats.

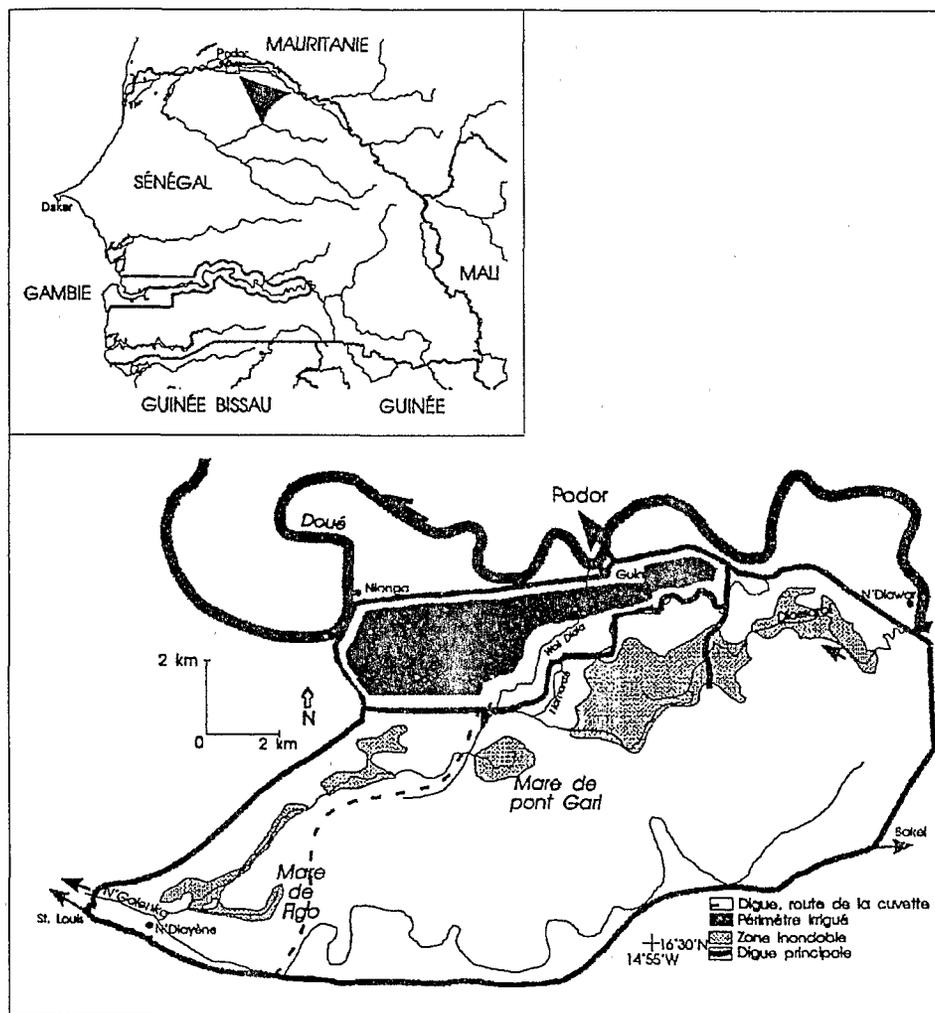


Figure 1. La cuvette de Nianga

2.2. Caractérisation de la transition sol sec – eau franche

Les sols des dépressions sont des vertisols modaux, sols très argileux à caractères vertiques accentués. Lors de leur dessiccation, des fentes de retrait de plus en plus larges et profondes se développent. On note un passage progressif entre les sols saturés en eau, à rugosité nulle et à brillance faible de bordure de mare, aux sols secs fortement rugueux et plus clairs. Sur la figure 2, on regroupe des réflectances mesurées dans cette zone de transition. De manière classique, l'absorption augmente avec la teneur en eau. Mais, les réflectances ne permettent pas de bien distinguer les sols humides saturés en eau, des sols déjà recouverts par une mince tranche d'eau. La distinction est possible sur le graphique des rapports de réflectance (fig. 3). R_3/R_2 n'est supérieur à R_2/R_1 que dans la frange de sol humide. Ce résultat établi à la mare de Pont Gari a été retrouvé à la mare de Figo.

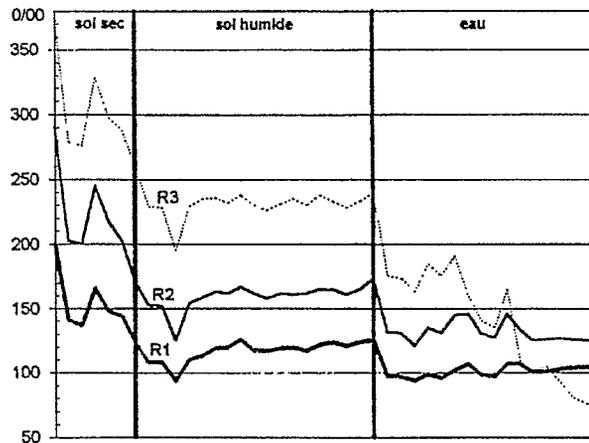


Figure 2. Réflectances des bordures de mare

2.3. Réflectance et bathymétrie

Dans de nombreuses études de télédétection (LEMOALLE, 1978; PUECH, 1992), la courbe bathymétrique est tracée indirectement à partir de couples de coordonnées : surface en eau, planimétrée sur l'image satellitaire, et altitude du plan d'eau. Du fait des difficultés de programmation d'images et de son coût, la courbe est souvent définie sur un très petit nombre de points.

Plus finement, l'étude des variations spatiales de réflectance du plan d'eau doit renseigner sur la profondeur d'eau. En effet, le signal radiométrique résulte d'une intégration depuis la surface jusqu'à une certaine profondeur d'eau déterminée par la seule limite de pénétration de la lumière. Dans les zones peu profondes et peu turbides, la profondeur de pénétration excède la profondeur du fond. Le signal radiométrique détient donc des informations sur la colonne d'eau traversée (épaisseur et composition) et sur la nature du fond.

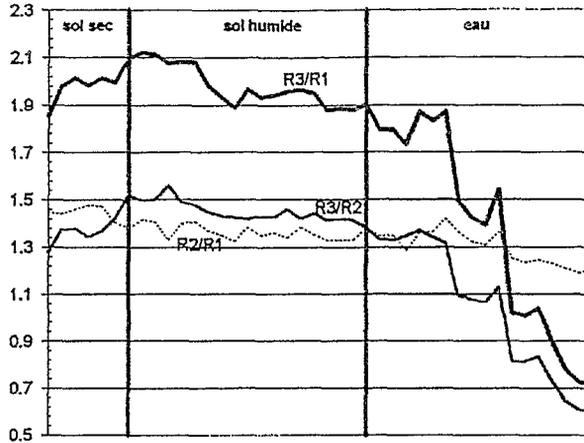


Figure 3. Rapports de réflectances des bordures de mare

Les interactions entre réflectance R et profondeur z , pour un canal λ , sont décrites par l'équation suivante :

$$R_{\lambda} = R_n + K_{\lambda} \exp(-g C_{\lambda} z) \quad (1)$$

(SPITZER and DIRKS, 1986; LE GOUIC, 1987)

avec

R_n réflectance de l'eau profonde;

K_{λ} réflectance du sol humide saturé R_0 moins la réflectance du fond;

g facteur géométrique déterminant la longueur du trajet dans l'eau;

C_{λ} coefficient d'atténuation de l'eau pour le canal λ [m^{-1}].

Le soleil étant au zénith et le radiomètre à la verticale, la longueur du trajet dans l'eau de la lumière est de $2z$ ($g = 2$).

Cette équation a été vérifiée et utilisée de manière opérationnelle en milieu marin à partir des comptes numériques HRV de SPOT (LOUBERSAC *et al.*, 1991) ou MSS de Landsat (IBRAHIM and CRACKNELL, 1990). En radiométrie de terrain, dans l'estuaire de la Casamance, PAGÈS *et al.* (1988) ont obtenu de meilleurs ajustements en reliant R et $\text{Log}(z)$.

La figure 4 présente les couples de points (R, z) obtenus sur deux transects aux mares de Pont Gari et de Figo pour les trois canaux HRV de SPOT. À la mare de Pont Gari, on vérifie que l'atténuation de la réflectance va de pair avec la profondeur et que la limite de pénétration de la lumière diminue lorsque la longueur d'onde augmente. À la mare de Figo, l'eau davantage chargée a une réflectance (R_n) plus importante que le sol humide ($z = 0$). Il y a donc aussi atténuation de la lumière réfléchi par le fond lorsque la profondeur augmente.

Bien que la dispersion soit parfois importante, les points mesurés s'ajustent bien sur la formule théorique. Les paramètres calculés par optimisation (méthode de Rosenbrock) (SERVAT and DEZETTER, 1988) sont regroupés sur le tableau 1. Si les paramètres ont un sens physique :

-lorsque la lame d'eau est nulle, la somme $(R_n + K_{\lambda})$ doit être égale à la réflectance du sol nu humide au voisinage de l'eau;

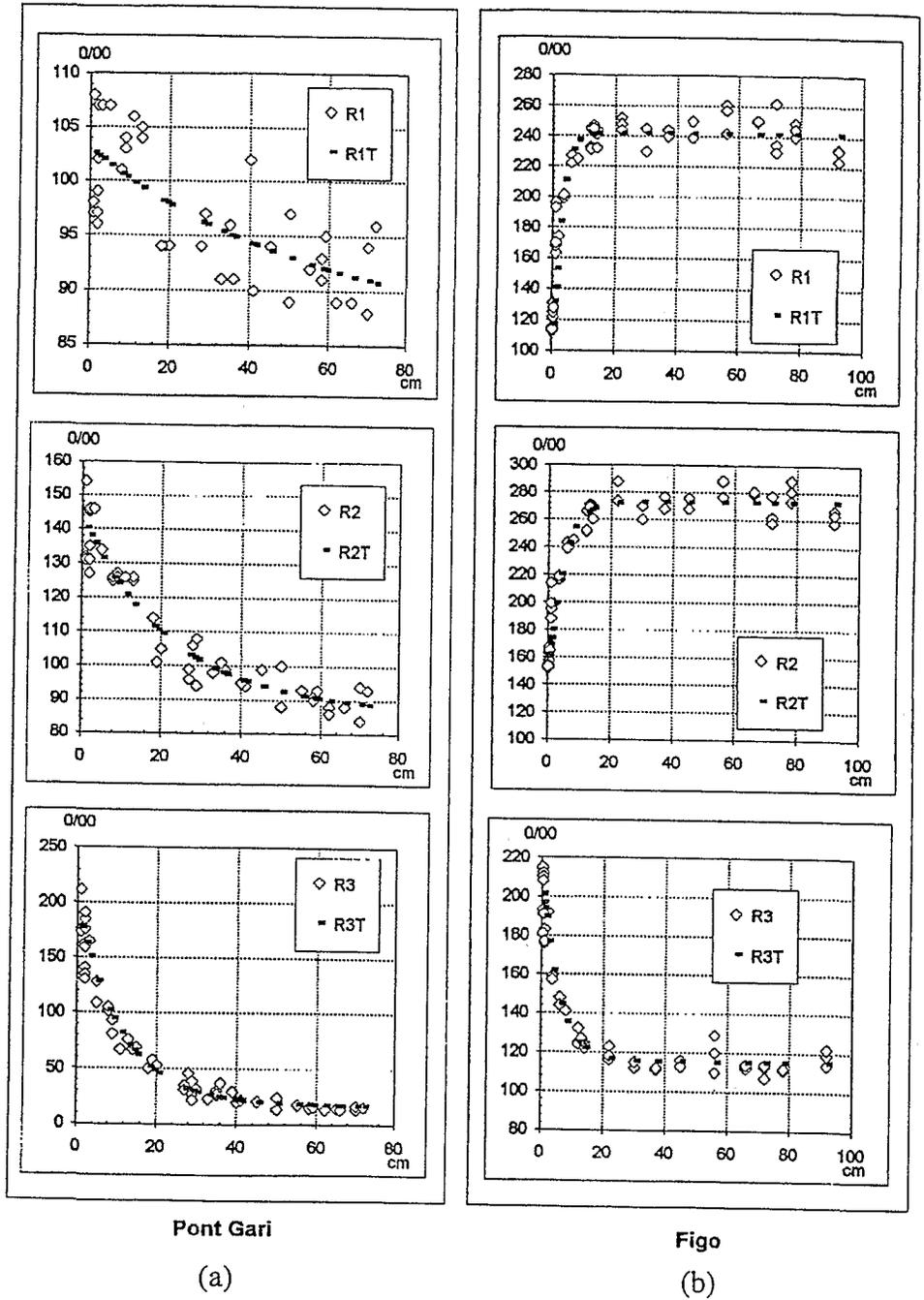


Figure 4. Effets de la profondeur sur la réflectance : a) mare du Pont Gari; b) mare de Figo

Tableau 1. Paramètres d'ajustement de l'équation reliant la réflectance à la profondeur

Canal	Pont Gari			Figo		
	Rf	K	C	Rf	K	C
1	86,5	16,4	0,94	242,0	-135,9	21,2
2	86,6	56,4	2,26	273,2	-116,5	11,3
3	17,4	175,2	4,53	115,4	89,5	9,3

- la profondeur de disparition du disque de Secchi doit être du même ordre que l'inverse du coefficient d'atténuation C_λ pour les canaux dans le visible (1 et 2).

D'après la figure 2, les réflectances du sol humide saturé sont respectivement de 0,120, 0,160 et 0,235 à Pont Gari pour les canaux 1, 2 et 3. Les sommes ($R_n + K_\lambda$) correspondantes sont légèrement plus faibles (0,103, 0,143 et 0,193). Ceci peut provenir de la difficulté d'observer une surface homogène de 60 cm de diamètre où la tranche d'eau est inférieure au centimètre.

La deuxième hypothèse a été vérifiée. Le disque de Secchi à Pont Gari disparaissait pour une profondeur de 0,30 à 0,40 m, soit un coefficient d'atténuation de 3 m^{-1} environ, comparable aux valeurs obtenues par optimisation dans le visible.

Les rapports de canaux permettent de s'affranchir des réflexions parasites. Sur la figure 5, nous avons reporté les rapports de réflectance en fonction de la profondeur pour les mêmes profils qu'à la figure 4. La dispersion est notablement réduite. Le rapport R2/R1 est le plus sensible à la profondeur à la mare de Pont Gari. Au contraire, des artefacts indéterminés sur le terrain ont altéré ce rapport à la mare de Figo. L'équation (1) s'ajuste sur les nuages de points; toutefois, les paramètres optimisés (tab. 2) n'ont plus de signification physique.

Il ressort de ces graphiques que :

- dans le cas d'une turbidité faible, le signal radiométrique renseigne sur la bathymétrie jusqu'à une profondeur maximale de 1 m;

- la signature spectrale de ces eaux est très dépendante de la concentration en éléments en suspension à travers le coefficient d'atténuation (C_λ) et la réflectance de l'eau profonde (R_n).

Sur la figure 6, on montre les relations réflectance de l'eau profonde – concentration. Dans la gamme d'échantillonnage, les relations sont linéaires et égales à :

$$R1 = 0,56 C + 92,23 \quad r^2 = 0,92$$

$$R2 = 0,70 C + 78,07 \quad r^2 = 0,96$$

$$R3 = 0,46 C - 10,55 \quad r^2 = 0,95$$

pour C en mg/l.

Tableau 2. Paramètres d'ajustement des courbes rapport de réflectances – profondeur

Canal	Pont Gari			Figo		
	Rf	K	C	Rf	K	C
R3/R1	0,194	1,785	5,0	0,460	1,405	15,5
R3/R2	0,191	1,223	4,3	0,420	0,936	14,0
R2/R1	0,951	0,417	1,9	1,111	0,356	76,2

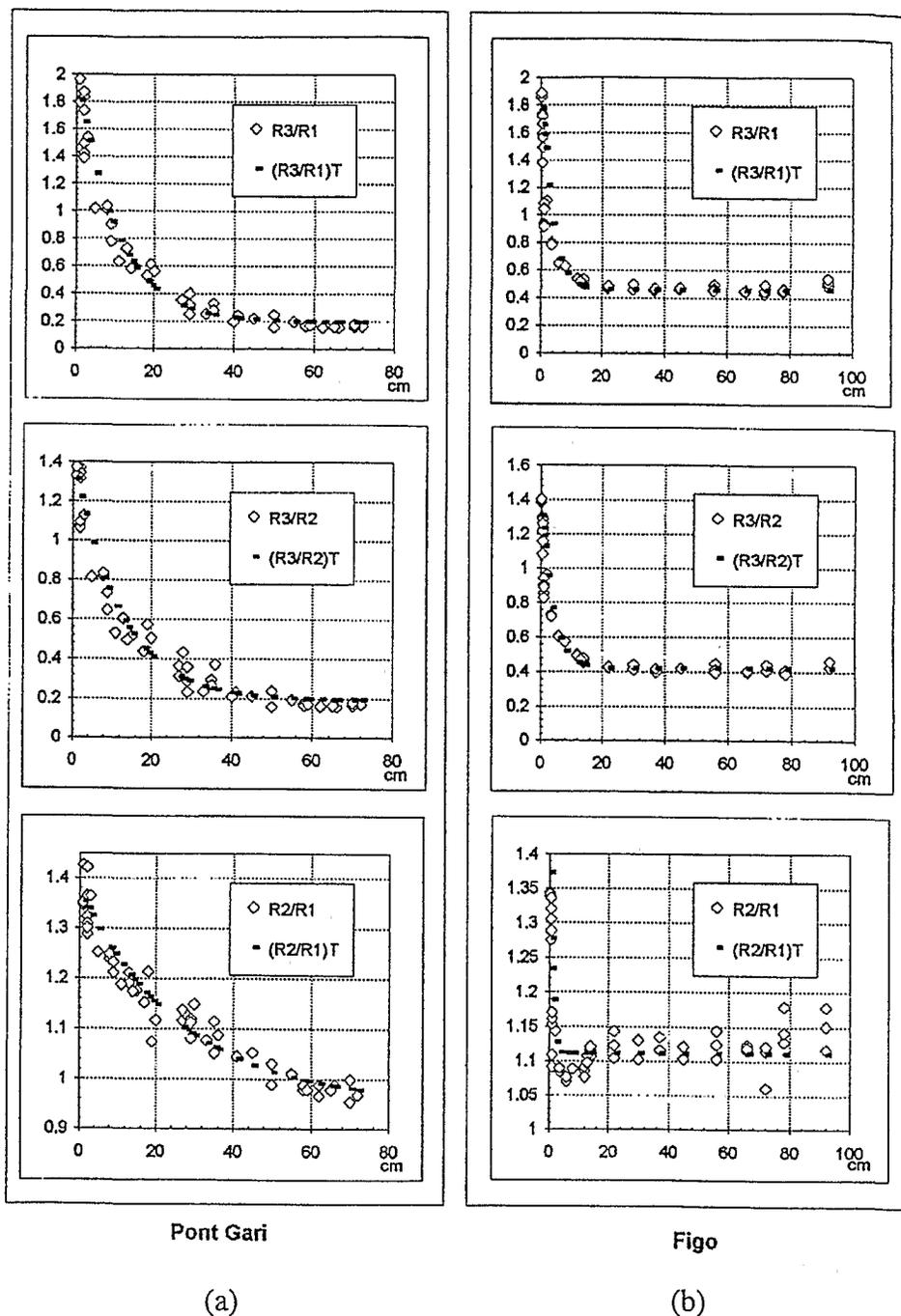


Figure 5. Effets de la profondeur sur les rapports de réflectances : a) mare du Pont Gari; b) mare de Figo

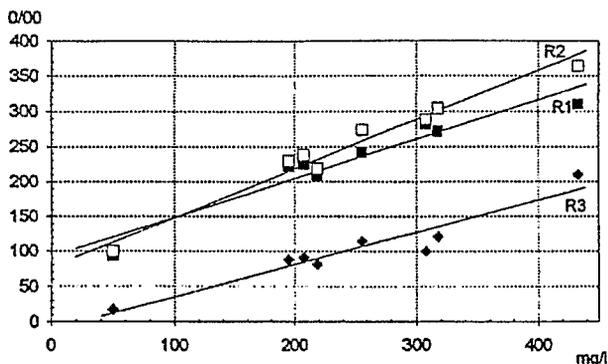


Figure 6. Réflectance de l'eau profonde et concentration

Le coefficient d'atténuation augmente avec la concentration (fig. 7). Cependant, comme il est déterminé dans les premiers centimètres d'eau avant que le signal ne sature, il est très sensible aux erreurs sur la profondeur et ceci d'autant plus que la concentration est importante.

Pour étalonner les paramètres de l'équation 1, les seules données de terrain ne suffisent pas car, au cours de l'hivernage, la concentration de sédiments en suspension évolue peu dans ces mares. L'étude de terrain a été poursuivie par une expérimentation en laboratoire.

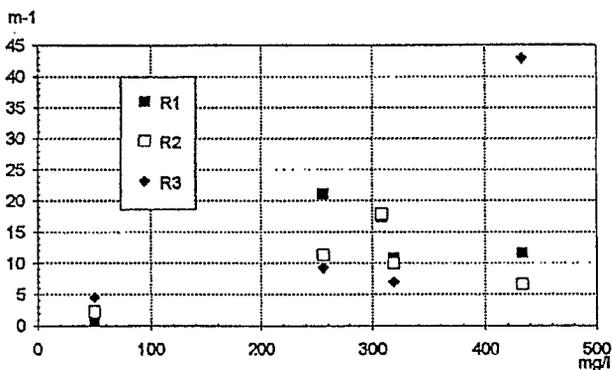


Figure 7. Coefficient d'atténuation et concentration

3. Expérimentation de laboratoire

3.1. Dispositif

Dans un site dégagé, le radiomètre est centré à 1 m au-dessus d'un fût rempli d'eau. Le fût peint avec une peinture noire anti-reflet mesure intérieurement 0,875 m de hauteur et 0,565 m de diamètre (volume de 219 l). Une pompe en circuit fermé assure un brassage rapide de l'eau entre deux orifices situés à la base et au sommet du fût. Après un premier

essai, nous avons remplacé l'eau de ville, où était présent un produit flocculant, par de l'eau déminéralisée. Un disque lesté coulisse dans le fût permettant de faire des mesures pour différentes tranches d'eau.

3.2. Protocoles et résultats

Deux séries de mesures ont été réalisées. Par la première, on visait à déterminer la relation concentration – réflectance en eau profonde sur une large gamme de concentration (30 à 2 500 mg/l) et par la seconde, on visait à calibrer la relation coefficient d'atténuation – concentration pour des valeurs de concentration plausibles dans le fleuve Sénégal (50 à 500 mg/l).

Un échantillon de terre superficielle argilo-limoneuse de la mare de Figo a permis d'obtenir les différentes concentrations. La granulométrie révèle 64,0 % d'argile et 18,1 % de limon fin. Il était important de travailler avec une fraction terreuse provenant d'un fond de cuvette car de nombreux auteurs ont démontré les modifications radiométriques de l'eau en fonction de la granulométrie pour une même concentration (HOLYER, 1978; BHARGAVA and MARIAM, 1991). Dans des flacons, des solutions terreuses ont été préparées de telle sorte que, versées successivement dans le fût, les concentrations s'étalent entre les gammes citées précédemment. On observe une légère diminution de la concentration théorique souhaitée (définie à la préparation du flacon), à la concentration contrôlée dans le fût après versement de la solution terreuse (fig. 8). Malgré le brassage, il y a probablement un début de sédimentation dans le fût des éléments les plus grossiers. Des erreurs de dilution sont également toujours envisageables.

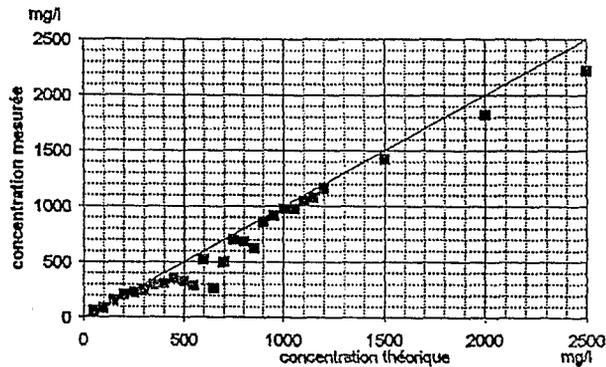


Figure 8. Concentration théorique souhaitée et concentration mesurée dans le fût

3.2.1. Concentration et réflectance de l'eau profonde

Sur les figures 9a, 9b et 9c, on constate que la relation entre concentration et réflectance est biunivoque jusqu'à 2,5 g/l dans le proche infrarouge. Dans le visible, il y a une saturation de la réflectance à partir de 400 mg/l (R1) et 600 mg/l (R2). Pour comparaison, la profondeur de disparition du disque de Secchi détermine la concentration jusqu'à des valeurs inférieures à 400 mg/l (fig. 9d). Ces résultats sont en accord avec des recherches antérieures (CURRAN and NOVO, 1988; RITCHIE and SCHIEBE, 1986; HARRINGTON *et al.*, 1992).

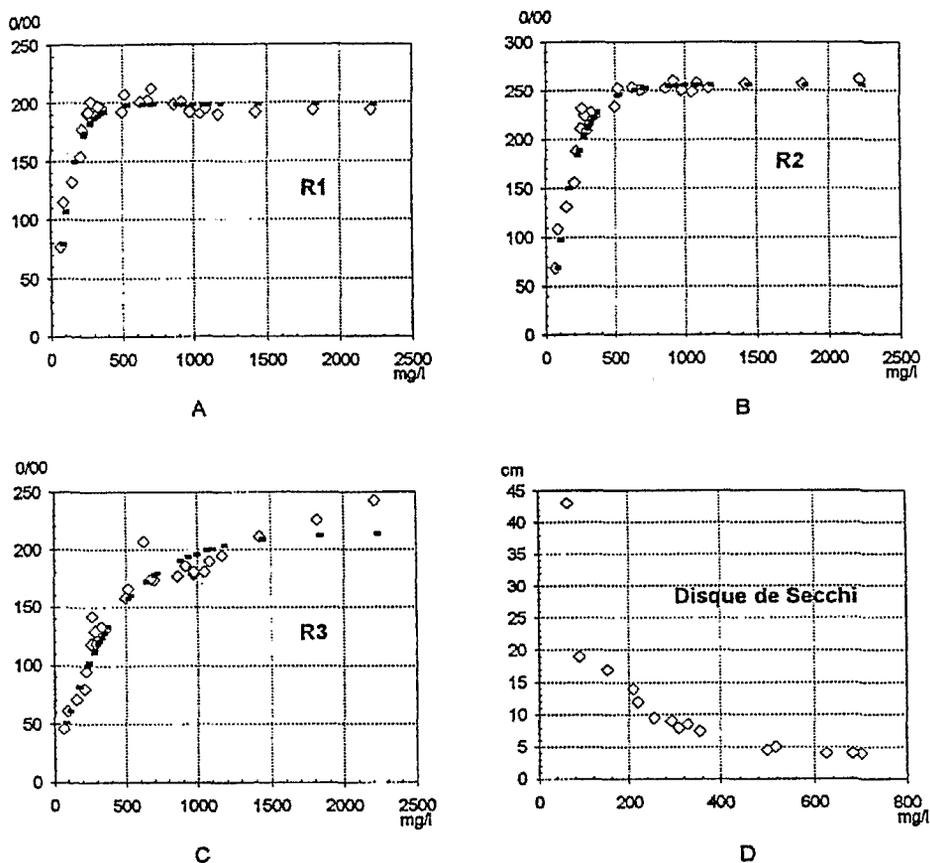


Figure 9. Nuages de points et meilleurs ajustements pour la relation entre la réflectance et la concentration (a, b, c); Effet de la concentration sur la profondeur de disparition du disque de Secchi (d)

Des relations du type :

$$R_{\lambda} = A_{\lambda} - B_{\lambda} \exp(-1/S_{\lambda} \cdot \text{Concentration})$$

ont été ajustées sur les nuages de points. L'ajustement est inadéquat pour les concentrations les plus élevées dans le proche infrarouge (fig. 9c). Un terme proportionnel à la concentration devrait être ajouté au modèle pour des concentrations supérieures à 1 400 mg/l.

Les paramètres d'ajustement sont réunis sur le tableau 3. Il est normal de trouver des valeurs voisines pour A_{λ} et B_{λ} car, sous réserve d'absence de réflexion parasite dans le fût, l'eau sans matière en suspension a des réflectances très faibles. HARRINGTON *et al.* (1992) ont procédé aux mêmes types d'ajustement entre concentration et réflectance exoatmosphérique MSS de Landsat. Nos valeurs de S_{λ} sont très semblables (tab. 4). Par contre, la comparaison entre les relations obtenues sur le terrain et celles au fût (fig. 10) n'est pas très bonne. La principale raison pourrait être une différence de nature entre les éléments en suspension dans les eaux de crue et le sédiment prélevé à la surface de la cuvette et remis en suspension dans le fût.

Tableau 3. Paramètres d'ajustement des relations concentration-réflectance de l'eau profonde

Canal	A	B	S
1	198,4	232,5	97,0
2	255,8	285,7	152,0
3	214,7	191,2	416,0

Tableau 4. Comparaison des valeurs du paramètre S (HARRINGTON *et al.*, 1992) déterminé en laboratoire et sur des images MSS de Landsat

Longueur d'onde (nm)	S (fût)	S (Harrington <i>et al.</i> , 1992)	Longueur d'onde (nm)
500-590	97	91	500-600
615-680	152	130	600-700
790-890	416	267	700-800

3.2.2. Coefficient d'atténuation et concentration

Un disque mobile de diamètre légèrement inférieur à celui du fût permet de simuler différentes épaisseurs de tranche d'eau entre 2 et 90 cm environ pour des concentrations analogues à celles rencontrées sur le fleuve (de 38 à 416 mg/l). Pour chaque concentration, des relations du type de l'équation (1) ont été déterminées. Les coefficients d'atténuation C_λ diminuent avec les longueurs d'onde et augmentent avec la concentration. Pour 100 mg/l, ils s'étalent entre 4 et 6 m^{-1} environ. Pour 400 mg/l, ils sont compris entre 12,5 et 16,0 m^{-1} (fig. 11). Ces valeurs sont légèrement plus faibles que celles trouvées dans la littérature (GALLEGOS *et al.*, 1990). Les coefficients d'atténuation déduits des mesures de terrain sont du même ordre de grandeur, mais leur dispersion autour des valeurs obtenues sur le fût est importante.

4. Conclusion

Au moyen d'un radiomètre portatif, l'effet de l'épaisseur de la tranche d'eau sur la réflectance a été modélisé par une équation semi-logarithmique à trois paramètres :

- la réflectance du sol saturé en bordure de mare;
- la réflectance de l'eau profonde (d'épaisseur supérieure à la limite de pénétration de la lumière);
- le coefficient d'atténuation.

Le premier paramètre est déterminable par un simple examen des rapports de réflectance. On peut penser pouvoir l'acquérir par télédétection. Les deux derniers paramètres sont dépendants de la concentration de sédiments en suspension. Dans la gamme de concentrations mesurées (50 à 400 mg/l), la liaison entre concentration et réflectance de l'eau profonde est linéaire. La liaison concentration – coefficient d'atténuation est moins précise.

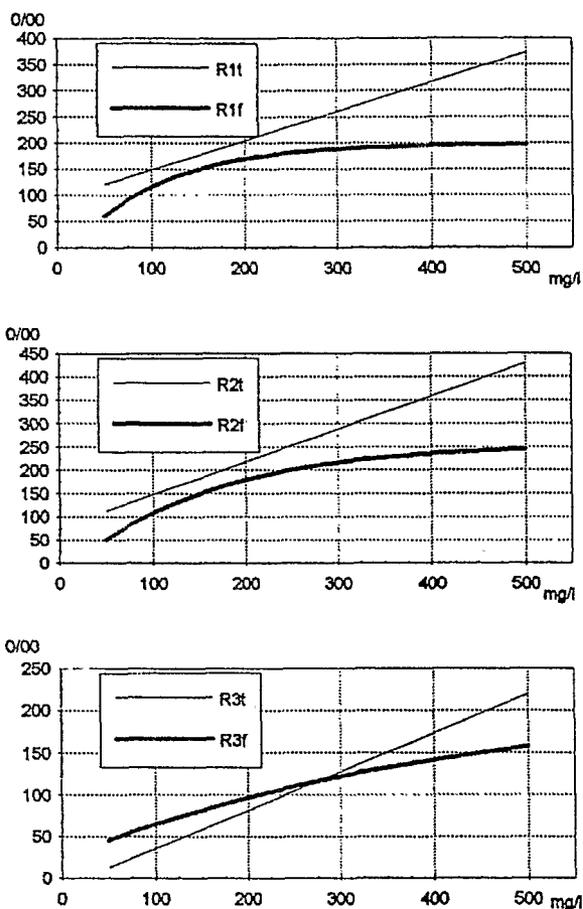


Figure 10. Effet de la concentration sur la réflectance de l'eau profonde (mesures sur le terrain [t] et dans le fût [f])

Pour préciser et étalonner ces relations, des mesures radiométriques ont été menées sur une colonne d'eau à concentration et à épaisseur variables. Sur une série étendue de concentrations (30 à 2 500 mg/l), on constate que la relation entre concentration de sédiments en suspension et réflectance des eaux profondes est semi-logarithmique. Les liaisons entre concentration et coefficient d'atténuation pour les différentes longueurs d'ondes sont linéaires, pour des concentrations variant entre 50 et 500 mg/l. Cependant, cette expérimentation n'a pas donné complète satisfaction car les valeurs des paramètres obtenus sur le terrain sont très dispersées, voire différentes des mesures au fût. Ceci peut provenir d'une différence de nature entre les éléments en suspension dans les eaux de crue et les sédiments remis en suspension dans la colonne d'eau du fût. En l'état actuel, il nous semble hasardeux d'utiliser les relations de l'expérimentation comme étalonnage des mesures de terrain.

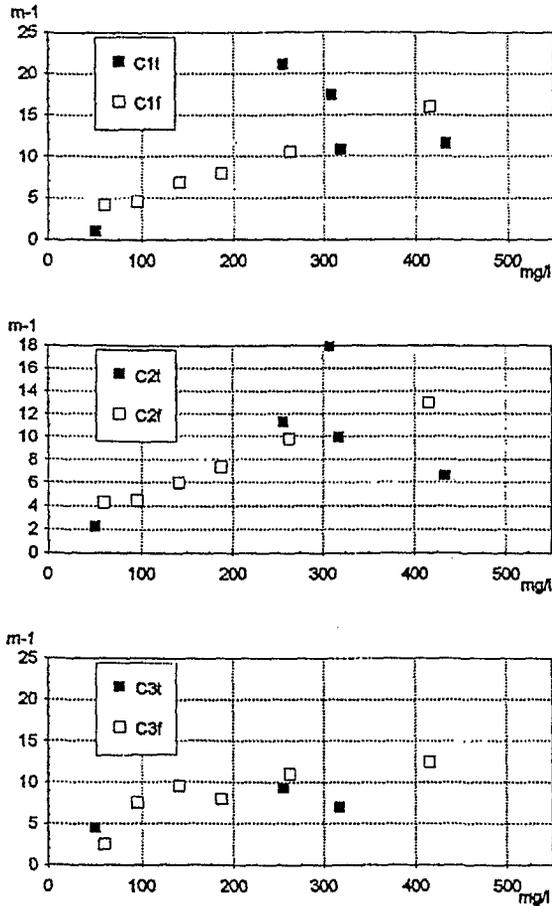


Figure 11. Effet de la concentration sur le coefficient d'atténuation (mesures sur le terrain [t] et dans le fût [f])

Pour les concentrations rencontrées sur le fleuve (50 à 500 mg/l), le signal radiométrique sature pour des profondeurs fréquemment inférieures à 0,75 m. Ce qui limite l'utilisation bathymétrique de la radiométrie. Par contre, la qualité des relations de terrain entre réflectance des eaux profondes et concentration de sédiments en suspension rend possible une évaluation rapide des concentrations sur le terrain. L'appareil à concevoir serait un radiomètre dont une tête viserait l'eau et l'autre une surface de référence de réflectance connue afin de s'affranchir des variations d'éclairement. Sa principale contrainte d'utilisation serait la même nature des éléments en suspension d'un point de mesure à l'autre. Ce critère est satisfait dans le lit majeur du Sénégal où le milieu est homogène et l'hydrodynamique faible. Au-delà, ces relations de terrain réflexion – concentration seront la base d'une cartographie par télédétection des sédiments en suspension.

5. Références

- BHARGAVA, D. S. and MARIAM, D. W. 1991. Effects of suspended particle size and concentration on reflectance measurements. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, n° 5, p. 519-529.
- CURRAN, P. J. and NOVO, E. M. M. 1988. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance : a review. *Journal of Coastal Research*, vol. 4, n° 3, p. 351-368.
- GALLEGOS, C. L., CORRELL, D. and PIERCE, J. W. 1990. Modeling spectral diffuse attenuation, absorption, and scattering coefficients in a turbid estuary. *Limnology and Oceanography*, vol. 35, n° 7, p. 1486-1502.
- GUYOT, G., HANOCQ, J. F., BUIS, J. P. et SAINT, G. 1984. Mise au point d'un radiomètre de simulation de SPOT. Signatures spectrales d'objets en télédétection. Bordeaux, France, septembre 1983, Éditeur INRA, p. 233-242.
- HARRINGTON, J. A., SCHIEBE, F. R. and NIX, J. F. 1992. Remote sensing of lake Chicot, Arkansas : monitoring suspended sediments, turbidity and Secchi depth with Landsat MSS data. *Remote Sensing of Environment*, n° 39, p. 15-27.
- HOLYER, R. J. 1978. Towards universal suspended sediment algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 7, p. 323-338.
- IBRAHIM, M. and CRACKNELL, A. P. 1990. Bathymetry using Landsat MSS data of Penang Island in Malaysia. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 2, n° 4, p. 557-559.
- LE GOUIC, M. 1987. Utilisation de Spot en Hydrographie. SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats. Paris, novembre 1987, Cepadues-Éditions, Toulouse, p. 1063-1068.
- LEMOALLE, J. 1978. Application des images Landsat à la courbe bathymétrique du lac Tchad. *Cahier ORSTOM, série Hydrobiologie*, vol. XII, n° 1, p. 83-87.
- LOUBERSAC, L., BURBAN, P.-Y., LEMAIRE, O., VARET, H. and CHENON, F. 1991. Integrated study of Aitutaki's Lagoon (Cook Islands) using SPOT satellite data and *in situ* measurements : bathymetric modelling. *Geocarto International*, vol. 2, p. 31-37.
- PAGÈS, J., CITEAU, J. et DEMARCK, H. 1988. Bathymétrie par imageries SPOT sur la Casamance (Sénégal), résultats préliminaires. Signatures spectrales d'objets en télédétection. Aussois, France, janvier 1988, ESA, p. 387-392.
- PUECH, C. 1992. Télédétection et milieux sahéliens. Rapport du Laboratoire commun de télédétection CEMAGREF/ENGREF, Montpellier, France, 18 p. (plus figures).
- RITCHIE, J. C. and SCHIEBE, F. R. 1986. Monitoring suspended sediments with remote sensing techniques. *in Hydrologic Applications of Space Technology*, Éditions I.A.H.S., n° 160, p. 233-243.
- SÉGUIS, L. et DUBÉE, G. 1992. Cuvette de Nianga, hivernage 1991, rapport hydrologique. ORSTOM, Dakar, 42 p. (plus annexes).
- SÉGUIS, L., CHEVILLOTTE, H., GASCUEL, C., BOIVIN, P. et BRAUDEAU, E. 1991. Contribution de l'imagerie satellitaire à l'optimisation des aménagements hydro-agricoles dans la moyenne vallée du Sénégal. *in* DUBOIS, J.M., CAVAYAS, F. et LAFRANCE, P. (éd.). Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Actes des Journées scientifiques de Montréal, 1991, Éditions AUPELF et les Presses de l'Université du Québec, p. 129-137.
- SERVAT, E. and DEZETTER, A. 1988. SIMPLE et ROSEN : deux méthodes d'optimisation non linéaire, théorie et pratique. Notice OVNih du laboratoire d'hydrologie, n° 1, ORSTOM, Montpellier, 36 p.

SPITZER, D. and DIRKS, R. W. J. 1986. Classification of bottom composition and bathymetry of shallow waters by passive remote sensing. Remote sensing for resources development and environmental management, Enschede, août 1986, International Photogrammetry and Remote Sensing, 26/7, n° 2, p.775-777.

TÉLÉDÉTECTION

DES RESSOURCES EN EAU

Cinquièmes journées scientifiques
du « Réseau Télédétection » de l'AUPELF-UREF,
Tunis, 21-24 septembre 1993

COMITÉ SCIENTIFIQUE ET DE LECTURE :

- Jean-Marie Dubois (coresponsable de l'édition)
- Mohamed Rached Boussema (coresponsable de l'édition)
- François Boivin (coresponsable de l'édition)
- Pierre Lafrance (coresponsable de l'édition)
- Abdelkader Abdellaoui
- Régis Caloz
- Noureddine Ennabli
- Hugh Gwyn
- Ali Hamza
- Mohamed Chedly Rabia
- Diadié Traoré
- Fernand Verger
- Fouad Zargouni

1995

Presses de l'Université du Québec
2875, boulevard Laurier
Sainte-Foy (Québec) Canada
G1V 2M3

AUPELF • UREF
B.P. 400, succ. Côte-des-Neiges
Montréal (Québec) Canada
H3S 2S7