

**BATHYMETRIE PAR IMAGERIE SPOT SUR LA CASAMANCE (SENEGAL).
RESULTATS PRELIMINAIRES**

J Pagès, J Cîteau & H Demarcq

Chercheurs ORSTOM au Centre de Recherches Océanographiques
de Dakar-Thiaroye, BP.2241 Dakar, Sénégal.

ORSTOM Fonds Documentaire

N° 34 304, ex 1

Cote B

ABSTRACT

Casamance river is a sursaline inverse estuary. A precise knowledge of bathymetry of its numerous marshy areas would allow to predict with a model, its salinity which governs economic activities as fishing and rice-growing.

Four campaigns for ground truth measurements have been done with determination of the usual hydrobiological parameters. The use of a hand-borne radiometer with spectral windows identical to the three Spot channels, used over various type of shallow waters showed that the channel 3/channel 1 ratio correlates highly with chlorophyll content ($C3/C1 = K.Ln(Chl.)$) and, on other hand with depth in the 0.8-0.02 meters range ($C3/C1 = -K.Ln(z)$).

Using a Spot imagery for october 86 (end of rainy season), we classified 4 water's category: "deep water" (>0.6m), shallow water, partly emerged sludge and land. Similarly to ground measurements results, we defined with the Spot channel 3/channel 1 ratio a semi-quantitative scale of depths. On test areas bathymetry was determined by relative value.

This preliminary results need to be refined, and the depth scale to be improved and extended to larger areas; this will allow to take in account the shallow waters areas in the salinity budget of Casamance river.

Mots-Clés: Estuaire, sursalure, bathymétrie, Spot

1. INTRODUCTION

La Casamance est un petit fleuve tropical, dont la sursalure qui dure depuis plusieurs années a de graves conséquences pour l'économie de la région en termes de ressources halieutiques et de riziculture.

Parmi les études menées sur ce milieu hyper-halin, un premier essai de simulation numérique de la salinité saisonnière (Ref.1) a montré l'importance de la bathymétrie des zones peu profondes et des marécages où l'évaporation a un effet très prononcé sur la salinité. Ces zones sont peu accessibles par les moyens habituels et, se situent de ce fait dans un "no man's land" scientifique. Un recours à la télédé-

tection semblait une solution d'autant plus attrayante que la résolution de Spot à priori est adaptée à l'étude envisagée.

Nos données de terrain portent sur l'hydrobioclimat et la bathymétrie d'une part, et sur des relevés radiométriques d'autre part. Nous les avons comparées entre elles, et avons défini ensuite le traitement le plus approprié à appliquer aux données satellitaires. Les résultats préliminaires sont ici présentés.

2. RAPPELS : CADRE DE L'ETUDE

L'hydrobioclimat du fleuve, et le climat de la région, ont été décrits en détail ailleurs (Réfs. 2,3,1). Nous rappellerons ici quelques points pertinents.

2.1. Climat et Géographie

Située par 13°N, la région de la Casamance (fig.1) à l'extrême sud du territoire du Sénégal, a un climat sub-soudanien. Une seule saison des pluies, de juin à octobre, correspond à la remontée saisonnière de la ZITC (Zone Intertropicale de Convergence). La température est maximale (31°C) au mois de mai. La saison sèche est plus fraîche (24°C), sous l'influence dominante de l'anticyclone des Açores.

Le bilan hydrique est actuellement négatif. Les pluies, de 1400mm en moyenne avant 1968, sont de 1050mm par an environ depuis cette date; elles sont ainsi nettement inférieures à l'évaporation moyenne (1600mm).

Le relief est peu prononcé (point culminant à 70m, distant de 330km de la mer). Le coefficient de ruissellement est donc faible (5 à 7% en année moyenne). Les derniers 250km du cours du fleuve ont une pente nulle; le lit est donc encombré de bancs de sable et de vase; de nombreux méandres et cheneaux anastomosés s'étendent sur les derniers 80km, et sont bordés de mangrove.

2.2 Hydroclimat

Les deux facteurs essentiels gouvernant l'hydroclimat de cet estuaire sont d'une part, le bilan hydrique négatif, d'autre part la pente nulle, permettant la remontée de la mer.

La conséquence principale pour la

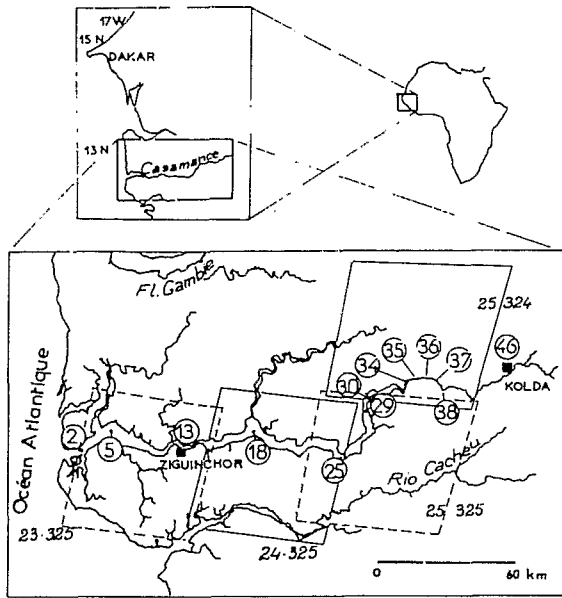


Figure 1: Situation générale de l'étude. Les stations mentionnées sont indiquées, ainsi que la couverture par les scènes Spot.

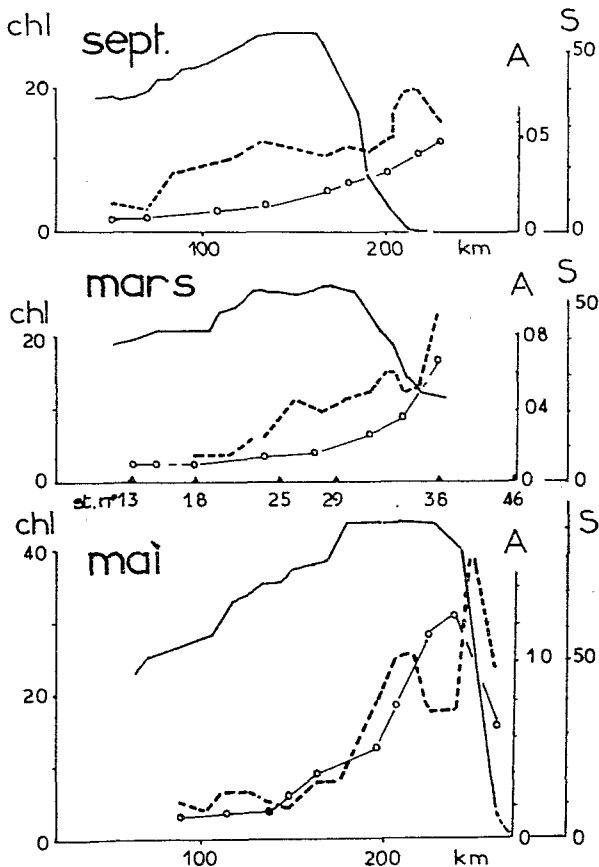


Figure 2: Profils longitudinaux de la salinité (S en ‰), de la chlorophylle (chl, ---, en $\mu\text{g/l}$) et de la matière organique dissoute, mesurée par l'absorption à 254 nm (A, o-o, en cm^{-1}).

biologie et la géochimie, en est l'hypersalinité de cet "estuaire inverse" (Ref.4). Un "bouchon salin" ("salinity plug", Ref.5) est toujours présent dans la partie médiane du fleuve (entre les stations 18 et 25), même après les pluies (fig.2). En amont, une salinité de 170‰ a été observée en juin 1986 (station 37).

L'hypersalinité, et le confinement dont elle témoigne, se traduit en ce qui nous concerne ici, par une forte augmentation de la concentration en phytoplancton (fig.2); ceci est classique dans les milieux "paraliques" (Ref.6).

Une conséquence de la pente nulle du fleuve est une propagation aisée de la marée, qui provoque de forts courants ($>1\text{m/s}$) dans la portion aval, jusqu'à la station 18 (Refs. 7,8). Ces courants remettent en suspension des sédiments plus ou moins fins, qui pourront influencer sur la réponse radiométrique.

3. MATERIEL ET METHODES

3.1. Hydroclimat

La chlorophylle, recueillie sur des filtres Whatman GF/C, est dosée par fluorimétrie sur les extraits méthanoliques. Les chiffres donnés ici concernent la "chlorophylle totale".

Les autres caractéristiques du milieu non utilisées ici, sont mesurées par les méthodes classiques compatibles avec les conditions de travail.

3.2. Radiométrie de terrain :

Les vérités-terrain ont été obtenues à l'aide d'un "radiomètre de simulation "Spot" (aimablement été prêté par la section Pédologie de l'ORSTOM). Cet appareil (Cimel 310) est pourvu de trois capteurs dans les bandes 500-590nm (C1), 610-680nm (C2) et 790-890nm (C3). Les mesures sont données en réflectance %, et seront notées Ci (pour les distinguer des données satellitaires que nous noterons par Hi).

Les capteurs (au nadir), étaient en général à 1.0-1.5m au dessus de la cible. Les mesures furent effectuées, soit à partir d'une embarcation, soit, sur les zones peu profondes à pied - dans des conditions parfois difficiles.

3.3. Imagerie Spot

Nous avons utilisé quatre scènes Spot acquises les 12 et 18 octobre 1986 (donc en fin de saison des pluies); les données numériques ont été traitées sur Utis, l'unité de traitement d'images satellitaires (ORSTOM/ISRA) basée au CRODT.

L'originalité du traitement effectué tient à ce qu'aucun des logiciels de classification d'usage n'a été utilisé a priori (Ref.9), et c'est davantage l'analyse des résultats de terrain qui a déterminé l'élaboration d'une procédure d'exploitation des données satellitaires:

En fait, comme il n'existe point de capteur (passif) caractéristique d'une profondeur d'eau, c'est indirectement par la réflectance des différentes substances présentes dans l'eau que nous avons été conduits à relier la profondeur à une relation de la forme $(a.H3/H1 - b)$, H_i désignant les comptes numériques des canaux Spot, a et b étant des coefficients d'ajustement.

4. VERITE-TERRAIN : RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. "Couleur de l'eau"

Deux campagnes "lourdes" (novembre 1986 et mars 1987) et une campagne allégée (octobre 1986) ont couvert la plus grande partie du fleuve, et ont fourni une large gamme de situations hydrologiques: ainsi, la chlorophylle totale ("chl") varie de 2 à 110 µg/l. Nous n'avons pris en compte ici que cette seule variable; la couleur propre de l'eau (filtrée) et l'atténuation verticale in situ n'ont pu encore être considérés.

Les résultats des mesures dans les canaux C1, C2 et C3 du radiomètre, pris isolément, ne présentent aucune variation significative. Seuls les rapports de canaux C3/C1 et C3/C2 montrent une corrélation significative avec la teneur en chlorophylle (fig.3 et annexe):

$$C3/C1 = 0.20 + 0.070 \ln(\text{chl}) ; r=0.65, n=36$$

$$C3/C2 = 0.27 + 0.068 \ln(\text{chl}) ; r=0.56, n=36$$

Les mesures qui ont servi à établir ces corrélations ont été effectuées dans le chenal central.

Si l'on se rapporte aux courbes d'absorption et de diffusion spectrale établies pour l'eau de mer (Réf. 10), on conçoit que les contributions au signal radiométrique vont être principalement dues à la turbidité dans le canal C1 et partiellement à la chlorophylle dans le canal C2.

On constate donc d'une part que la turbidité minérale des stations de l'aval, qui ont été aussi incluses dans le calcul, n'a qu'un effet assez faible.

D'autre part, la pente des corrélations établies indiquent l'existence d'une relation linéaire entre la concentration en chlorophylle et les autres composants contribuant à la réflectance totale issue de l'eau. La figure 2 nous a déjà suggéré l'existence dans une grande partie de la Casamance de telles relations entre des paramètres aussi différents que salinité, chlorophylle et matière organique dissoute.

4.2. Bathymétrie

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.

Il est donc clair que dans le cas de très petites profondeurs, pour des eaux relativement homogènes et peu turbides, quelque soit la fenêtre spectrale utilisée, c'est en fait une mesure indirecte de la profondeur d'eau qui est réalisée.

Dans le cas des mesures rapportées à présent et qui ont été effectuées sur la rive, le canal C3 apparaît le plus sensible à la profondeur d'eau, et dans une moindre mesure, les canaux C1 et C2. Les rapports C3/C1 et C3/C2 donnent une corrélation hautement significative avec la profondeur (z en m). Toutes observations confondues, les meilleures relations sont de la forme :

$$C3/C1 = 0.10 - 0.370 \ln(z) \quad r=0.91 ; n=53$$

$$\ln(C3/C2) = -1.11 - 0.359 \ln(z) \quad r=0.79 ; n=53$$

Nous avons distingué plusieurs groupes de stations, dont le fond présentait un caractère particulier (fig.4). Comme prévisible,

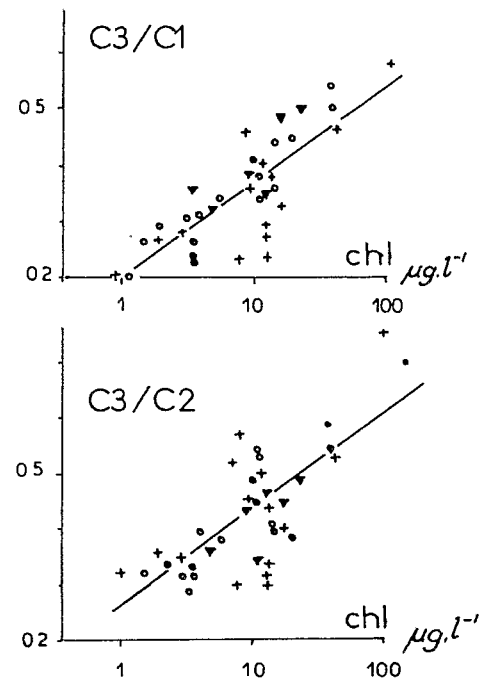


Figure 3: Relation entre les rapports de canaux, en vérité terrain, et la chlorophylle.

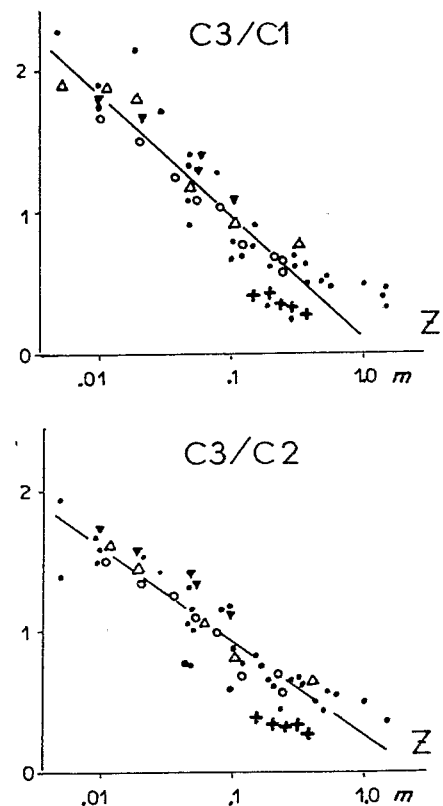


Figure 4: Vérité-terrain: Effet de la profondeur Z sur les rapports de canaux.

la nature -la couleur- du fond a un effet net (Réf.9); un fond clair diminue la valeur du rapport de canaux, tandis que la pente de la relation reste appréciablement constante. L'incertitude sur la profondeur absolue serait ainsi d'un facteur 2 environ. Une extrapolation à la profondeur nulle semble possible, et devra être testée.

La forme semi-logarithmique des relations est inverse de celle attendue d'après la littérature (Réf.9); nous n'avons pas pour l'instant d'explication satisfaisante pour ce désaccord entre la théorie et nos résultats expérimentaux.

5. EXPLOITATION DES SCENES SPOT: RESULTATS ET DISCUSSION

5.1. "Couleur de l'eau"

En ne considérant que les mesures faites en eau profonde, nous voyons que le canal H3 marque une forte variation, passant de 29-35 en amont à 12-15 en aval. Les canaux H1 et H2 ne montrent pas de variation nette. Le rapport H3/H1 passe de 0.6 à 0.3 d'amont en aval, ce qui est en bon accord avec les mesures de terrain.

La corrélation obtenue entre H3/H1 et la concentration en chlorophylle (fig.5) s'écrit:

$$H3/H1 = -0.14 + 0.28 \ln(\text{Chl}) \quad (r=0.95; n=9)$$

Il est à noter que ce rapport de canaux nous a permis de nous affranchir de variations de la réponse radiométrique entre scènes adjacentes (un fréquent découpage en bandes verticales est en effet apparu sur les données brutes; par ailleurs, les scènes des 12 et 18 octobre 86, recouvrant la même zone présentent de fortes différences dans tous les canaux).

5.2. Bathymétrie et Hypsométrie

Nous avons exploité le rapport H3/H1, qui semblait le plus prometteur d'après nos résultats de terrain. Nous avons tenté de distinguer trois grands thèmes (fig.6): l'eau profonde (0.6 à 0.8m), les hauts fonds (0 à 0.6m) et le "poto-poto" (ce terme d'usage courant en Afrique de l'ouest, désigne la boue "terrestre" liée à la pluie - Koumassi pototo pototo est l'appellation non officielle d'un quartier marécageux d'Abidjan - Nous désignons ainsi, tous terrains semi-marécageux ou à demi-émergés, souvent solides et d'accès ...malaisé).

5.2.1. Cartographie Une échelle arbitraire de couleurs a été définie, d'après les résultats et les observations de terrain, afin de faire ressortir les zones d'eau profonde, de hauts fonds et de "poto-poto". La distinction est parfois malaisée pour les eaux très colorées. Dans l'ensemble cependant, les quelques zones cartographiées à petite échelle (1/25000) et contrôlées sur le terrain montrent un excellent accord entre la "carte" et la réalité (fig.7).

5.2.2. Hypsométrie

Nous admettons ici sous réserve de confirmation que la valeur 1.1 du rapport H3/H1 définit la marge humide, qui peut à la fois drainer la pluie et inversement participer à l'évaporation de l'eau du

chenal. Par rapport à la surface de cette zone humide, nous avons déterminé (pour une région limitée de l'amont) les surfaces de profondeur croissantes, par le rapport H3/H1. Ce dernier diminue de l'amont vers l'aval en raison d'un gradient croissant de turbidité. L'eau "profonde" ne représente que 15 à 25% de la zone humide, les autres classes 75 à 80% (tableau 1).

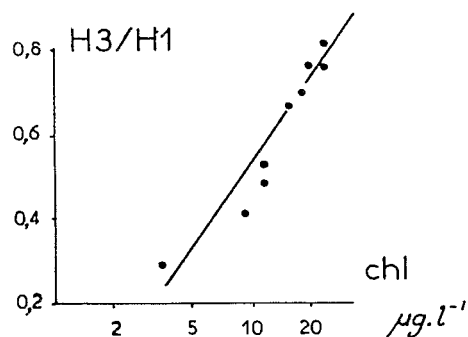


Figure 5: Données Spot: Relation entre le rapport de canaux H3/H1 et la chlorophylle.

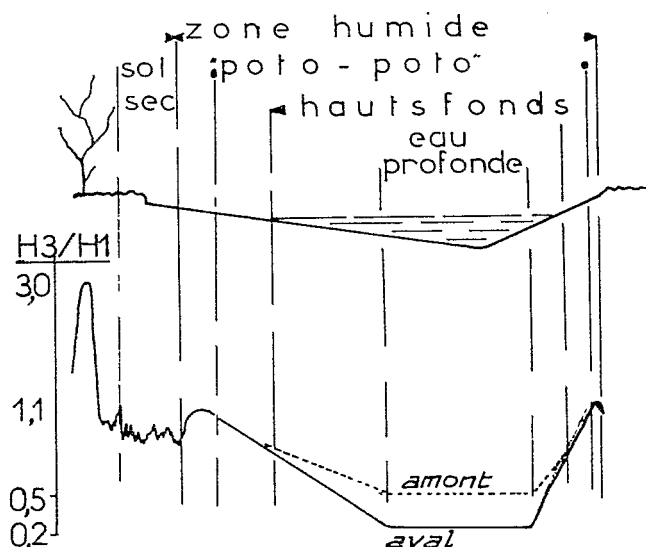


Figure 6: Coupe schématique du lit majeur du fleuve: en haut, indication des zones distinguées en "classes"; en bas, évolution moyenne du rapport de canaux H3/H1 (qui augmente, en eau profonde vers l'amont).

Figure 7: Répartition des classes de profondeur, d'après le rapport H3/H1 (ajusté) au niveau de la station 30.

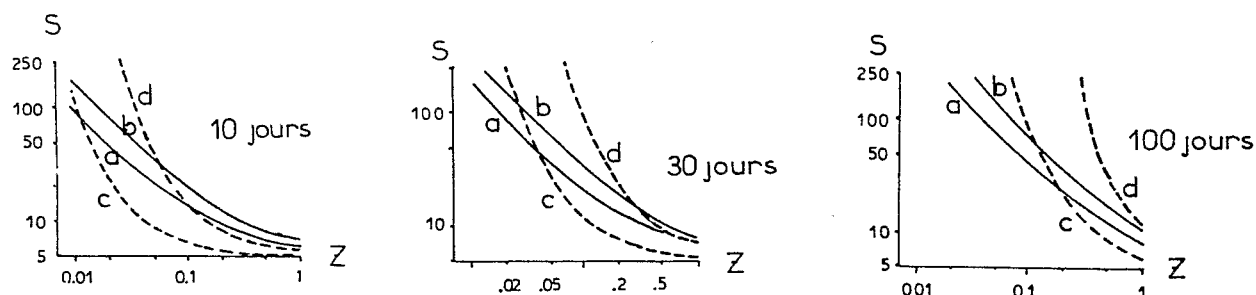
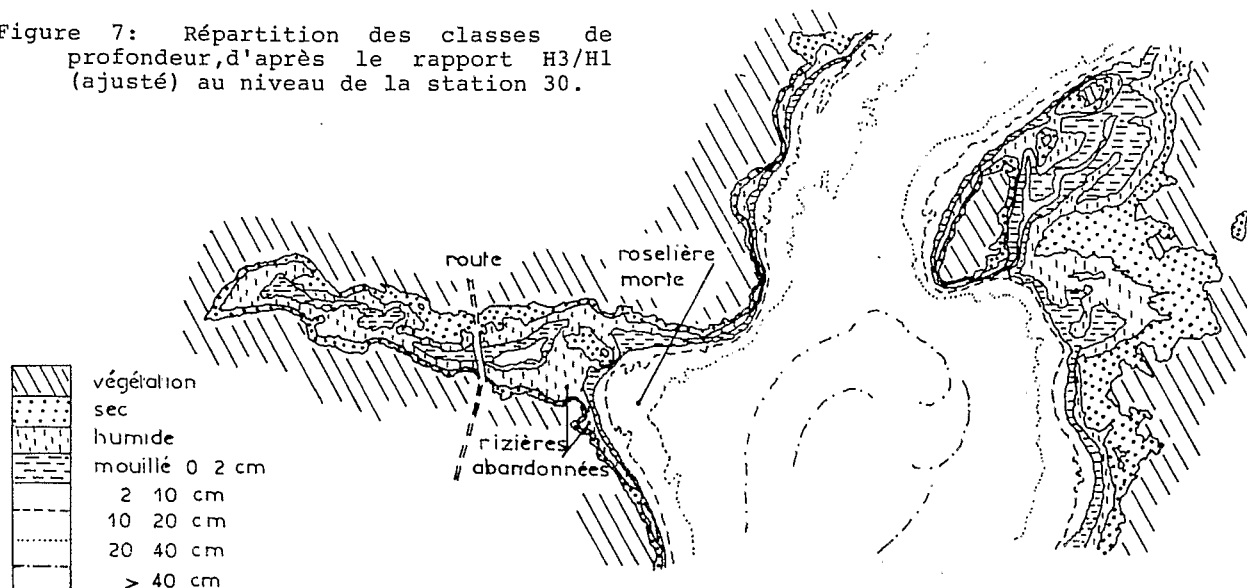


Figure 8: Augmentation de la salinité (en g/l), en fonction de la profondeur Z (en m), sous l'effet de l'évaporation et de l'apport par les sédiments : évolution théorique calculée pour $S_0 = 5$ g/l,
 -pour les sédiments par $S_t = S_0 + Q/Z$ avec :
 (a) $Q = 3,35.t^{0.66}$ soit 70g/l en 100 j, (b) $Q = 1,91.t^{0.66}$ soit 40g/l en 100 j
 -pour l'évaporation par $S_t = S_0 \cdot \exp(E \cdot t/Z)$ avec :
 (c) $E = 0.003$ m/j, (d) $E = 0.010$ m/j

5.2.3. Bathymétrie et Salinité

Les échanges de sel entre le sédiment et l'eau ont pu être évalués en quelques points (Pagès, résultats non publiés). Il est évident que l'absorption et surtout le relargage de sel aura un effet d'autant plus prononcé que la profondeur de l'eau est faible. De même, l'évaporation entraîne une augmentation de salinité plus rapide en eau peu profonde.

Nous avons comparé les effets théoriques du sédiment et de l'évaporation en fonction de la profondeur (fig.8), en prenant des valeurs plausibles pour les différents facteurs. Dans la plupart des cas, l'évaporation est prépondérante; le relargage de sel ne joue de façon sensible qu'en tout début de saison sèche, pour des profondeurs de 10 à 50cm. Cependant, dans tous les cas, le rôle de la bathymétrie est net.

6. CONCLUSION

Les résultats exposés ici sont fragmentaires, car obtenus après une première et rapide analyse. Bien qu'encourageants et prometteurs, ils demandent à être améliorés à la fois par un complément de données de terrain et par une exploitation plus poussée de tous les paramètres.

La bibliographie devra être explorée en détail afin de critiquer et d'affiner la méthodologie peu usuelle que nous avons employée, tant par le but final de l'étude (bathymétrie de zones peu profondes) que par la démarche. Pour celle-ci, l'interaction entre données de terrain, prépondérantes, et données satellitaires nécessite (localement) une conjonction assez exceptionnelle de moyens.

Enfin, le milieu étudié lui-même est assez exceptionnel. La zone amont, bien qu'en liaison ouverte avec la mer, présente en saison sèche des salinités record; la même zone est à peu près déssalée après les

pluies. Ce milieu extrême pourrait être passionnant à bien des égards dans d'autres domaines scientifiques que celui traité ici.

Tableau 1: Bathymétrie d'après les données satellite: surface en % des différentes plages isobathes.

	n°St.	EAU PROFONDE	HAUT FOND	POTO POTO
Amont	39/38	15	34	51
	37/36	27	43	30
	35	21	47	32
	34	25	29	46
Aval	33	23	34	43
	moy.	22	38	40

7. REFERENCES

- Pagès J. et Debenay J.P., 1987. Evolution saisonnière de la salinité de la Casamance : Description et essai de modélisation. Rev. Hydrobiol. Trop. (sous presse).
- Pagès J., Touré D. et Citeau J., 1985. Environnement hydroclimatique: in: Plan Directeur Sud: Approche globale du système pêches dans les régions du Siné-Saloum et de la Casamance. Roche International :5-67.
- Pagès J., Debenay J.P. et Lebrusq J.Y., 1987. L'environnement estuarien de Casamance. Rev. Hydrobiol. Trop. (sous presse).
- Pritchard D.W., 1967. What is an estuary: Physical viewpoint .in: Estuaries. G.H. Lauff (ed.), Am. Assoc. Adv. Sci. Publ., 83:3-5.
- Wolanski E., 1986. An evaporation-driven salinity maximum zone in Australian tropical estuaries. Est. coast. Shelf Sci., 22. 415-424.
- Guelorget O. et Perthuisot J.P., 1983. Le domaine paralique: Expressions géologiques, biologiques et économiques du confinement. Trav. Lab. Géol. (Ecole Normale Supérieure, Paris), 16: 13 p.
- Brunet-Moret Y., 1970. Etudes hydrologiques en Casamance: Rapport définitif ORSTOM Serv. Hydrol., 52p.
- Le Reste L., 1987. Influence de la salinité et du courant sur la taille de la crevette (*Penaeus notialis*) dans l'estuaire de la Casamance. Rev. Hydrobiol. Trop. (sous presse).
- Spitzer D. and Dirks R.W.J., 1986. Classification of bottom composition and bathymetry of shallow waters by passive remote sensing. in: Remote sensing for resources development and environmental management (Proc. 7th internatl. Symp., Enschede, 25-29 aug. 1986; ed by M.C.J. Damen, G. Sicco Smit, H.Th. Verstappen) Internatl. Arch. Photogramm. Remote Sensing, 26/7 (2) :775-777.
- Morel A. and Prieur L. 1977. Analysis of variations in ocean color, Limmol. Oceanogr. 22, 709-722.

ANNEXE

ANALYSE STATISTIQUE DES SERIES D'OBSERVATION DE "VERITE-TERRAIN"

A) Couleur de l'eau

La variable expliquée est la teneur en chlorophylle (Chl), les variables explicatives sont les valeurs des 3 canaux du radiomètre (C1, C2 et C3). On dispose de 36 observations. Soit la relation :

$C3/C1 = 0.20 + 0.070 \ln(\text{Chl})$, le coefficient de corrélation est $r = 0.65$ et le pourcentage de variance expliquée $r^2 = 42\%$.

La valeur du test F est de 26, ce qui montre la significativité de la relation (la valeur pour 1 et 35 ddl est 4.12). On notera cependant que l'histogramme des résidus montre une dissymétrie marquée (ci-dessous).

```

-- -.08 *****
-.08 .00 *****
.00 .08 *****
.08 .16 **
.16 .24
.24 -- *

```

Il est possible d'améliorer l'ajustement en appliquant une transformation de la forme : $\ln(C3/C1) = a + b \ln(\text{Chl})$, ce qui revient à : $C3/C1 = k \exp(\text{Chl})^b$

On obtient: $\ln(C3/C1) = -1.48 + 0.191 \ln(\text{Chl})$ avec $r = 0.63$ ($r^2 = 0.40$), $F = 17$ (> 4.12). Cette transformation permet un meilleur ajustement du nuage de points, mis en évidence par le meilleur centrage de l'histogramme des résidus :

```

-- -.4 **
-.4 -.2 ****
-.2 -.0 *****
.0 .2 *****
.2 .4 ***
.4 -- *

```

Cette transformation n'est pas nécessaire pour le rapport $C3/C2$ où la meilleure relation est :

$C3/C2 = 0.27 + 0.068 \ln(\text{Chl})$
avec $r = 0.56$ et $r^2 = 0.31$

B) Bathymétrie

La meilleure corrélation obtenue, sur 52 observations, est définie par la relation: $C3/C1 = 0.10 - 0.370 \ln(Z)$ avec $r = 0.91$ et $r^2 = 0.83$

L'histogramme des résidus est dans ce cas parfaitement centré. Pour cette même raison, le rapport de canaux $C3/C2$ n'est par contre utilisable que par la relation: $\ln(C3/C2) = -1.11 - 0.359 \ln(Z)$ avec $r = 0.79$ et $r^2 = 0.62$