

## *L'environnement estuarien de la Casamance*

Jean PAGÈS (1), Jean-Pierre DEBENAY (2),  
Jean-Yves LEBRUSQ †

### RÉSUMÉ

*Nous décrivons le cadre général du bassin et l'hydro-climat du fleuve :*

— *le climat est soudanien, tropical sec ; le déficit hydrique s'est amplifié depuis 1968 ;*

— *le relief est faible ; les marécages d'aval, en contact avec l'eau de mer, sont souvent occupés par la mangrove.*

*Les sols y sont fréquemment sulfatés acides et sur-salés ;*

— *le cours du fleuve, peu profond, est parcouru par des courants de marée. Le débit propre d'eau douce est négligeable. Le fleuve se comporte en estuaire inverse, et montre une hyper-salinité qui s'amplifie (172 ‰ en juin 1986) ;*

— *le phytoplancton, par sa biomasse, confirme le caractère confiné et naturellement eutrophe de la portion amont, sursalée.*

MOTS-CLÉS : Hyper-halin — Marécage — Hydrobioclimat — Estuaire — Afrique de l'Ouest.

### ABSTRACT

#### HYDROLOGICAL ENVIRONMENT OF THE CASAMANCE ESTUARY

*The general setting of the catchment of the Casamance river is described :*

— *the "sudanese" climate has a single, hot, rainy season and a cool, dry season with high evaporation,*

— *the flat, and often muddy, banks are covered with mangrove in the down-stream part. The present drought has converted actively sulphatereducing soils into highly acidic, saline soils. Underground water is also salt-tainted,*

*We further describe the main characteristics of the river itself :*

— *the overall slope of the river is practically nil ; only tide currents are measurable, up to 240 km from the sea,*

— *from the present salinity pattern, the Casamance river is an inverse estuary, with an increasingly hyper-haline character (salinity peak of 172 ‰ in June 86),*

— *phytoplankton biomass and production testify the confined, and naturally eutrophic, state of the river, especially in its upper reaches.*

KEY WORDS : Hyper-haline — Mud flats — Hydrology — Estuary — West Africa — Environment.

(1) Océanographe ORSTOM en poste au CRODT, BP 2241, Dakar (Sénégal).

(2) Département de Géologie. Faculté des Sciences de Dakar.

## INTRODUCTION

« La sécheresse au Sahel » est malheureusement devenu un poncif, largement décrit depuis près de 20 ans.

La phrase « la sécheresse sévit au Sahel depuis 1968 » renferme plusieurs approximations. Le terme « sécheresse » implique une anomalie, notion qui s'applique spécialement mal à la pluviométrie (RIEHL, 1976). Une anomalie qui dure 15 ans tourne à la norme; il semble qu'il s'agisse d'une phase climatique (d'un équilibre?) bien distincte (HUBERT et CARBONNEL, 1986). Le terme « Sahel », maintenant courant, suppose une homogénéité qui n'est pas certaine (BELTRANDO *et al.*, 1986). Enfin, le déficit pluviométrique spectaculaire de 1968 s'inscrivait dans une tendance amorcée vers 1960 (HUBERT et CARBONNEL, 1986; OLIVRY, 1982; GIRAUD et GRÉGOIRE, 1976).

Les mass media ont mis l'accent sur les effets, par endroits assez effroyables, au niveau de l'agriculture et de l'élevage. Il est moins connu que les fleuves ont également subi du déficit hydrique prolongé; pourtant, même le Niger eut un débit nul en 1985. *A fortiori*, de petits fleuves, au bassin versant restreint, ont été durement touchés. Sur la Casamance les premiers symptômes ont été perçus par les pêcheurs de crevettes. Une étude fut alors amorcée sur ce point précis (LE RESTE, 1980), et amena la découverte d'une sursalure déjà remarquable. Les travaux présentés ici, largement postérieurs aux premiers symptômes, décrivent donc une situation déjà assez bien installée.

### 1. CLIMAT

Dans ce qui suit, nous avons largement utilisé les données météorologiques compilées et publiées par l'ASECNA et par le réseau AGRHYMET.

Située vers 13° N (fig. 1), la région de la Casamance a un climat subguinéen, avec une seule saison des pluies (LEROUX, 1983). Le déficit hydrique est important, et range la région parmi les zones sub-arides.

#### 1.1. Précipitations

L'intensité relative de l'anticyclone des Açores, au nord, et de celui de Sainte-Hélène, au sud, condi-

tionne les déplacements de la ZITC (zone inter-tropicale de convergence) : vers le nord en été (boréal), vers le sud en hiver. Ce déplacement, et surtout la remontée au nord, est variable selon les années (fig. 2) (CITEAU *et al.*, 1986).

La pluie est liée à deux phénomènes complémentaires. Le premier, et le mieux connu, est la migration vers le nord de la ZITC amenant des masses d'air équatorial et austral, humides. Le second est le « West African Equatorial Jet » dont on peut dire qu'il permet le transport vers le Sénégal de l'humidité parvenue dans le Golfe de Guinée. Les facteurs qui gouvernent ces deux phénomènes semblent encore mal connus.

Depuis près de 20 ans, la sécheresse se manifeste par une réduction à la fois de la hauteur et de la durée des pluies. Vers 1860-1880 semble avoir existé un maximum humide (OLIVRY et CHASTANET, 1986) (1). Plusieurs sécheresses relativement brèves apparaissent ensuite d'après les données chiffrées (OLIVRY, 1982). Il semble (fig. 3) que la sécheresse actuelle aie commencé vers 1970. Nous rappellerons que, bien que les isohyètes soient à peu près méridiennes, la pointe sud-ouest de la région est la plus arrosée (1 200 mm par an actuellement) tandis que le sud-est est plus sec (1 000 mm).

La saison des pluies « moyenne » avant 1970 était centrée sur le mois d'août, et durait près de 6 mois (fig. 4 A). Actuellement, cette durée est réduite à trois mois environ; en outre, la distribution des pluies semble être souvent anormale, avec une relaxation en milieu de saison.

#### 1.2. Évaporation

L'évaporation mesurée (2) est de l'ordre de 1 400 mm par an, avec une augmentation vers l'intérieur (900 mm à l'ouest, 1 600 mm à l'est). Au cours de l'année, les valeurs les plus fortes sont atteintes vers février (jusqu'à 10 mm par jour) (fig. 4 A) (MARIUS, 1985; Anon., 1961). Les données disponibles (ASECNA) ne font pas apparaître de différence nette de hauteur évaporée entre la phase « humide » antérieure à 1968 et la phase sèche actuelle.

L'évaporation réelle est classiquement difficile à estimer, surtout sur une nappe d'eau libre. Nous admettrons qu'elle représente 70 % de l'évaporation mesurée (RIOU, 1975; GAC et GOGELS, 1982; MARIUS, 1985).

(1) Les hauteurs de pluies ne peuvent être exactement quantifiées par la méthode employée. On rappellera que R. CAILLÉ (1830) décrit des forêts touffues au-delà de Podor et Matam, là où tombent actuellement quelques 200 mm de pluie.

(2) Bac « Colorado classe A » (ASECNA).

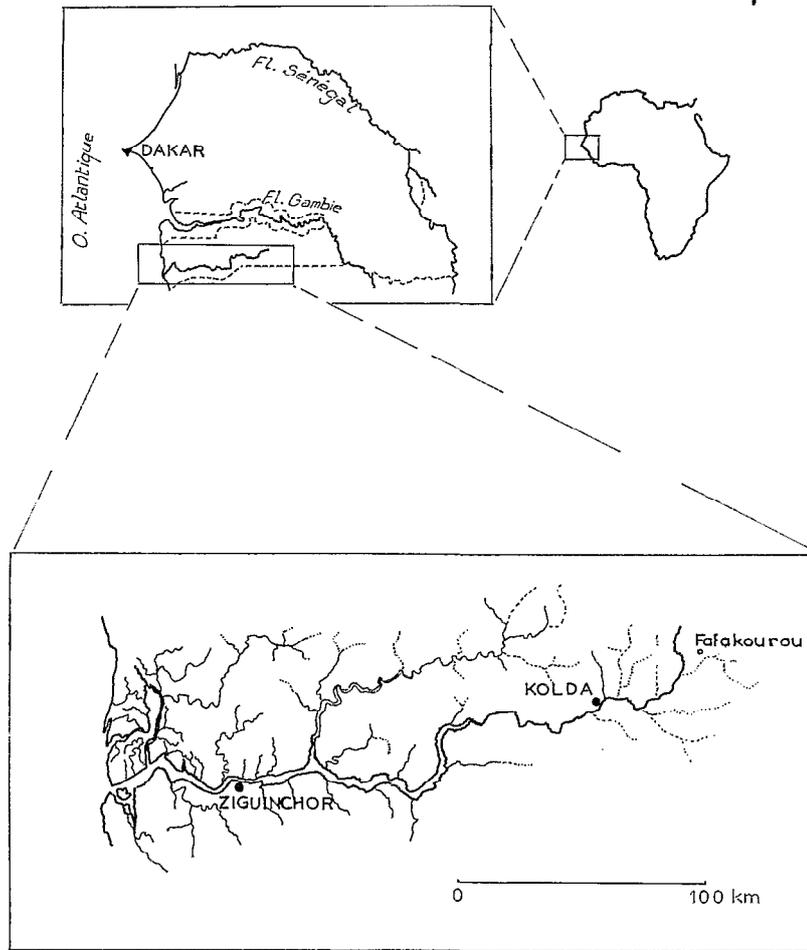


FIG. 1. — Carte générale du réseau de la Casamance. *General map of the hydrographic system of the Casamance river*

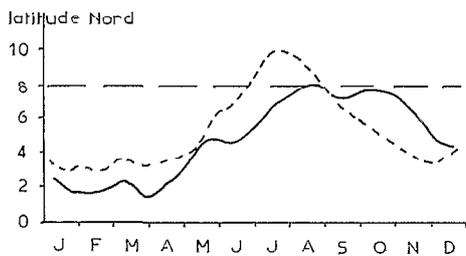


FIG. 2. — Déplacement annuel en latitude de la ZITC (repérée au-dessus de l'Atlantique) : année 1975, sèche (trait continu) et année 1980, pluvieuse (tirets). D'après CITEAU *et al.*, 1986. *Yearly variation in latitude of the inter-tropical convergence zone (ITCZ) observed at 28 °W above the Atlantic: 1975 (heavy line) was dry, 1980 (dashed line) was humid.*  
From CITEAU *et al.*, 1986

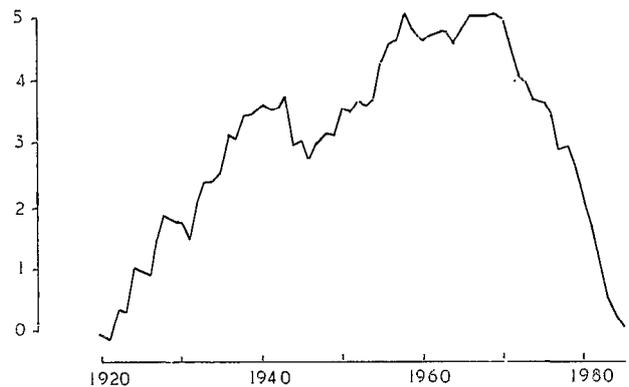


FIG. 3. — Pluie à Ziguinchor : cumul des anomalies à la moyenne 1920-1984. *Cumulated rainfall anomaly at Ziguinchor*

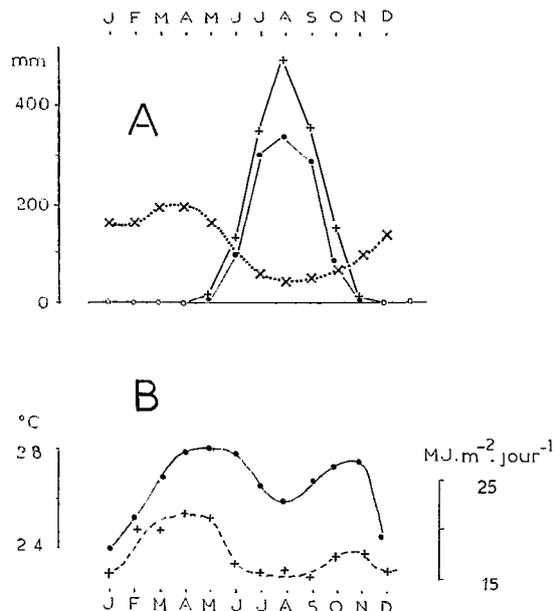


FIG. 4. — Météorologie à Ziguinchor : A : Précipitations mensuelles en période humide (1940-1960) (+) et en période sèche (1975-1985) (•), et évaporation mensuelle (1954-1959) (x...x). B : Température moyenne mesurée (1954-1959) (•—•) et rayonnement global au sol (actinométrie ASECNA) (+...+). Meteorology at Ziguinchor: A: Average monthly rainfall during a wet period (1940-1960) (+) and a dry period (1975-1985) (•), and average monthly evaporation (1954-1959) (x...x). B: Average air temperature (1954-1959) (•—•) and measured global irradiance at ground level (+...+)

### 2.3. Insolation

Le trajet apparent du soleil entraîne un « ensellement » de la courbe annuelle du rayonnement global (au-dessus des nuages) durant l'été (KIRK, 1983). L'énergie incidente au sol (données ASECNA) est pratiquement ramenée à son niveau de décembre — environ 15 MJ.m<sup>-2</sup> par jour — pendant la saison des pluies, du fait de la forte nébulosité (fig. 4 B).

Les indices d'aridité tenant compte de l'insolation (BUDYKO, in REITAN et GREEN, 1968) rangent la région parmi les zones sub-désertiques. Ce n'est qu'à ce niveau que se vérifie la thèse de MARIUS (1985), selon laquelle un raccourcissement de l'hivernage accroît l'évaporation.

### 1.4. Température de l'air

La variation annuelle est faible pour les températures moyennes qui passent de 23 °C en janvier à 30,5 °C en mai. Une légère augmentation (à la fois sur les maximums et sur l'amplitude) se manifeste vers l'est.

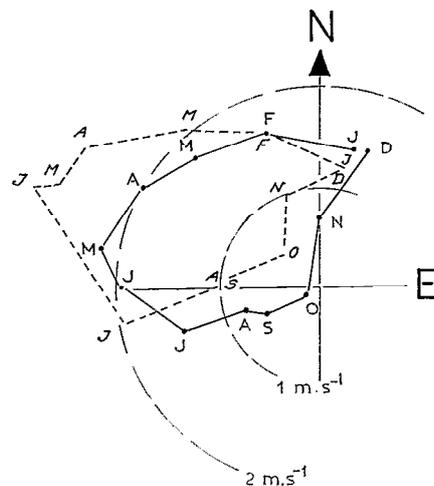


FIG. 5. — Vent à Ziguinchor : vitesse et direction moyennes (1967-1975) (trait continu), et année 1968, sèche (pointillés). Wind at Ziguinchor: speed and direction on average (1967-1975) (full line) and for the dry year 1968 (dashed line)

On voit que la température de l'air suit bien la variation annuelle de l'énergie lumineuse incidente (fig. 4 B).

### 1.5. Vent

Durant toute l'année, les vents de secteur ouest sont dominants (fig. 5) mais relativement faibles (1,4 m.s<sup>-1</sup> en moyenne). En saison des pluies, des tornades s'accompagnent souvent de vent d'est.

## 2. LES RIVES DU FLEUVE : GÉOLOGIE, HYDROLOGIE, PÉDOLOGIE

L'ensemble de la région a un relief peu prononcé. Dans le bassin de la Casamance (fig. 1), les zones les plus élevées (70 m) se trouvent au sud-est et à l'est, à quelque 400 km de la mer. Les phénomènes liés à la salure des terres sont généraux, bien que plus ou moins prononcés, tout le long de la côte de la Sénégambie. Les inter-actions entre les eaux libres et les sols (et leur nappe phréatique) sont importantes.

### 2.1. Géologie

Le golfe de Casamance, largement échancré, mais peu profond, a été progressivement remblayé depuis l'ogolien (— 20 000 ans) (KALCK, 1978; MARIUS, 1985; DIOP et SALL, 1986). Une succession de cordons littoraux et de vasières se met en place durant la période humide qu'accompagne la transgression

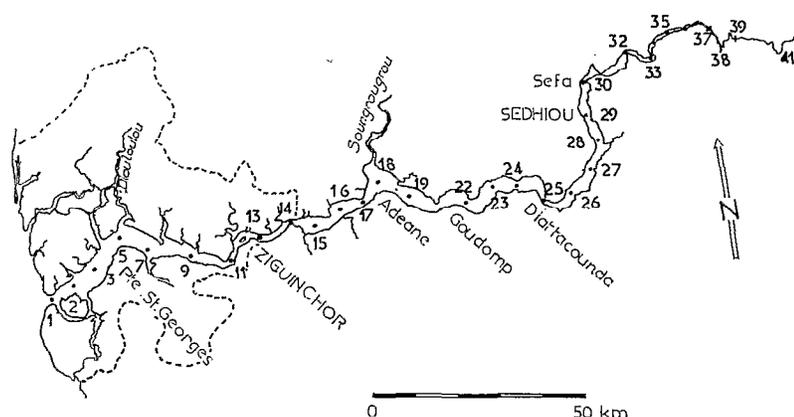


FIG. 6. — Zone de l'étude hydrologique, avec la position des stations. La mangrove en aval de Ziguinchor est indiquée (limite en pointillés). Area of the hydrology study, with location of the stations. The mangrove west of Ziguinchor is delimited by the dashed line

flandrienne. Ces zones marécageuses ont été colonisées par la mangrove; elles sont parcourues de nombreux canaux fortement anastomosés et parcourus par la marée, les « bolons ».

Actuellement, les parties hautes du « Continental Terminal » sont altérées, formant localement des cuirasses latéritiques à forte teneur en fer. Sur les coupes réalisées par les divers ruisseaux du bief inférieur, on distingue, entre les plateaux et les marigots :

- les sols beiges des pentes,
- les sols gris des terrasses,
- les sols hydromorphes de vallées.

## 2.2. Pédologie

A notre connaissance, la plupart des études ont porté sur la portion au niveau de Ziguinchor (fig. 6) et en aval, surtout dans la zone de mangrove (MARIUS, 1985; BOIVIN et LEBRUSQ, 1984; LOYER, 1982; BOIVIN *et al.*, 1986).

La morphologie et la topographie (fig. 7) sont en relation avec la marée. On distinguera ainsi (MARIUS, 1985) :

- l'étage supra-tidal, avec des tannes (1) herbacés ou des tannes vifs,
- l'étage intertidal, avec la mangrove (*Rhizophora* et *Avicennia*) et les tannes inondés,
- l'étage infratidal, à vase nue.

Dans tous ces sols, la matière organique est abondante (de 1 % à plus de 2 % de carbone). Le rapport C/N est de 10 (dans les tannes) à 30 (sous la man-

grove), indiquant dans les tannes une perte de  $\text{CO}_2$  qui est confirmée par les analyses isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ).

L'eau de mer qui imprègne ce milieu apporte, entre autres, des sulfates et du chlorure de sodium.

### 2.2.1. LE CYCLE DU SOUFRE

Selon que les sols seront submergés (et anoxiques) ou émergés (et aérés), les processus biochimiques seront différents.

#### a) Sols submergés

La matière organique, particulièrement abondante sous *Rhizophora*, renforce les conditions anoxiques; elle est oxydée par les bactéries sulfato-réductrices. Les sulfures ainsi produits se combinent avec le fer des sédiments pour former la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) et du soufre libre ( $\text{S}^0$ ). Les sols sont alors « potentiellement sulfatés acides ».

#### b) Sols émergés

Quelle que soit la cause (naturelle ou anthropique) de la dessiccation du sol, la présence d'oxygène entraîne l'oxydation des sulfures ( $\text{FeS}$ ,  $\text{FeS}_2$ ) et du soufre par les *Thiobacillus* (*T. thiooxydans* et *T. ferrooxydans*), avec formation de jarosite ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$ ). Le pH chute au-dessous de 3, et peut atteindre 1,5. Cette transformation en « sol sulfaté acide » est difficilement réversible.

La baisse du pH entraîne la libération d'aluminium à partir des argiles (kaolinites plus que smectites); l' $\text{Al}$ , soluble et échangeable, peut repasser dans les

(1) « tanne » est un terme vernaculaire désignant une zone nue sursalée. Le mot correspond aux « bare areas » des anglo-saxons. Le faciès semble toujours lié à la mangrove, souvent pour des pluies inférieures à 200 mm (MARIUS, 1985).

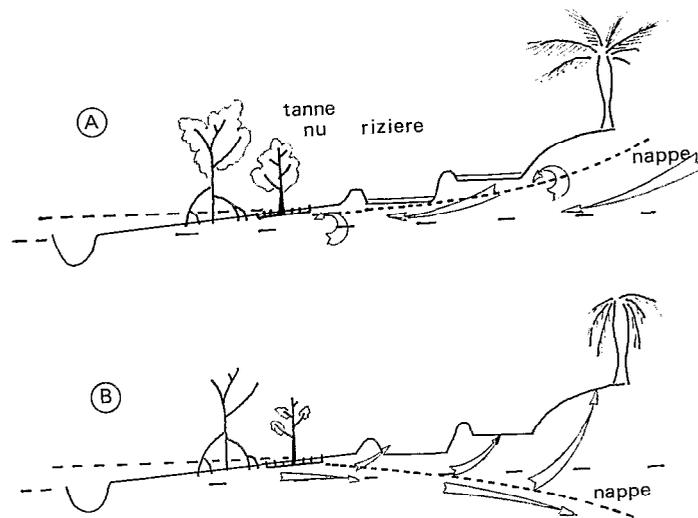


FIG. 7. — Schéma simplifié des mouvements du sel dans les berges des holons. A : en période humide, la nappe est plus élevée que le holon, les pluies préviennent une accumulation de sel. B : en période sèche, la nappe est plus basse que le holon, le sel contamine les berges et la nappe. *Simplified diagram of salt mobility in the banks of the rivers : A : in a wet period, groundwater lies higher than the river, accumulation of salt is hindered also by the rains. B : in a prolonged dry spell, groundwater level has sunk ; salt is accumulated in the banks and in the groundwater*

eaux libres (jusqu'à 100 méq.l<sup>-1</sup>, soit 900 mg.l<sup>-1</sup> de Al) et abaisser leur pH jusqu'à 3,1 (LEBRUSQ, données non publiées).

### 2.2.2. LES ÉCHANGES DE SEL

Nous verrons plus loin que la salinité des eaux libres a fortement augmenté depuis 1972. Cette augmentation se reflète dans les sols et les nappes mais les variations relatives restent analogues.

#### a) Dans la nappe phréatique

L'eau salée du marigot migre latéralement sous la mangrove, puis vers le haut dans le tanne, sous l'effet de l'évaporation. Cette évaporation, confirmée par les analyses isotopiques ( $\delta^{18}\text{O}$ ), aboutit à une forte sursalure de la nappe dans le tanne. En outre, le niveau de la nappe baisse fortement en saison sèche ; la pluie dilue simplement la nappe et renvoie une partie des sels dans le marigot.

#### b) Dans le sol

La salinité du sol est bien corrélée à celle de la nappe, mais la sursalure est encore plus prononcée, aboutissant à des dépôts solides (« moquette ») en surface, selon la séquence évaporatoire classique : montmorillonite ou talc ( $\text{Si}_4\text{Mg}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ), calcite ( $\text{CaCO}_3, n\text{H}_2\text{O}$ ), gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ), halite ( $\text{NaCl}$ ), et « bitterns »  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et  $\text{KCl}$  (FRITZ, 1975 ; EUGSTER *et al.*, 1980). Dans des conditions favorisant les

remontées par capillarité, la décomposition sous pH acide des minéraux silicatés aboutit à des cristallisations superficielles d'alun ou de tamarugite. Toutes ces accumulations ne sont plus lessivées par les pluies actuelles, mais simplement renvoyées provisoirement en profondeur.

## 3. HYDROGRAPHIE, BATHYMÉTRIE, RÉGIME HYDROLOGIQUE DU FLEUVE

### 3.1. Réseau hydrographique (fig. 1)

Le bassin versant de la Casamance couvre 14 000 km<sup>2</sup>.

La Casamance proprement dite prend sa source aux environs de Fafakourou. Plusieurs affluents, souvent asséchés en saison sèche, rejoignent la Casamance avant Kolda. La pente est déjà assez faible (0,5 m par km) ; elle devient nulle en aval de Diana Malari, à 228 km de la mer (st. 37, « PK 228 »).

Le Soungrougrou, qui draine à lui seul 4 700 km<sup>2</sup>, n'apporte pratiquement pas d'eau douce et reste sur-salé depuis plusieurs années (MARIUS, 1985). Le bolon de Diouloulou n'a pas de débit propre.

Le fleuve a une largeur de 1 à 10 km en aval de Sefa (fig. 6) ; il se rétrécit encore en amont de la st. 34 (20 à 100 m). En saison sèche, seules des mares isolées subsistent en amont de la st. 41.

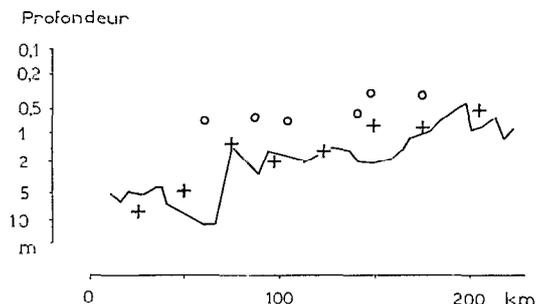


FIG. 8. — Profondeur moyenne de la Casamance d'après nos relevés (trait continu), d'après les surfaces et volumes en eau (BRUNET-MORET, 1970) (o), d'après la vitesse de l'onde de marée (BRUNET-MORET, 1970 ; voir aussi fig. 9) (+). Average depth along the course of the Casamance river from our soundings (continuous line), from the surfaces and volumes given by BRUNET-MORET (1970) (o), from tide wave travel speed in the BRUNET-MORET data (see fig. 9) (+)

### 3.2. Bathymétrie

Nos relevés bathymétriques sur le cours principal (LE RESTE, données non publiées; DEBENAY, 1984; MILLET, données non publiées) ont complété en amont de Ziguinchor les cartes marines de l'aval (carte n° 6137).

Un chenal, parfois dédoublé, reste présent de la mer jusqu'à Sefa, à près de 200 km de la mer; les hauts-fonds sont fréquents. La profondeur moyenne de la section en eau, calculée d'après nos relevés (fig. 8), est de 5 m en aval, et de 0,5 m en amont, vers Diana Malari (st. 37).

Les berges sont très découpées, mais tout calcul de morphométrie est rendu assez illusoire, en aval par les innombrables bolons, en amont par les zones inondées fréquentes.

### 3.3. Marée

L'onde de marée semi-diurne se propage, amortie et retardée (fig. 9), jusqu'au PK 228 (Diana Malari) selon BRUNET-MORET. La marée annuelle, d'amplitude variable, a son maximum vers juillet (BRUNET-MORET, 1970; REBERT, 1983; MARIUS, 1985).

Les courants de marée sont prépondérants en toute saison; le débit propre du fleuve reste négligeable (BRUNET-MORET, 1970). Les vitesses maximales s'observent, comme prévisibles, au jusant, dans le chenal, et en surface. Ces vitesses diminuent vers

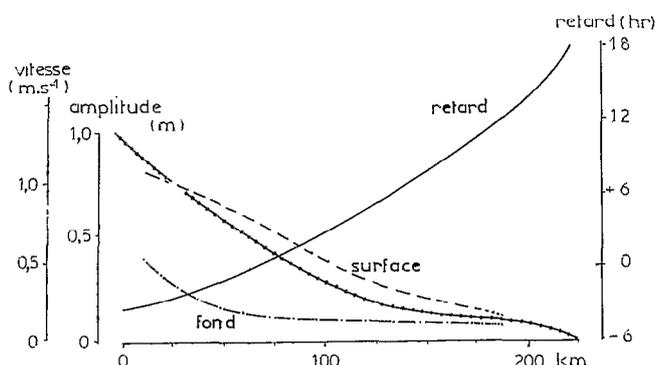


FIG. 9. — Diminution de l'amplitude (-----) et retard (—) de l'onde de marée (d'après BRUNET-MORET, 1970), et amortissement des courants de marée en surface (---) et au fond (-.-.-) (d'après LE RESTE, 1987). Delay and dampened amplitude (-----) of semi-diurnal tide along the river (from BRUNET-MORET, 1970), and decrease of tide currents, surface (---) and bottom (-.-.-) (from LE RESTE, 1987)

l'amont (fig. 9) : en reprenant les données disponibles (LE RESTE 1987; MILLET *et al.*, 1986), nous pouvons décrire la vitesse maximale (en  $m.s^{-1}$ ) en fonction de la distance à l'embouchure, D (en km), par l'équation :  $V = 1,50. \exp(-0,011.D)$  ( $r = 0,994$ ,  $n = 9$ ).

L'amortissement de l'amplitude de la marée semi-diurne peut être décrit par une équation analogue :  $A = 1,06. \exp(-0,014.D)$ .

Il faut relever que l'effet du vent (souvent de secteur ouest (cf. § 1.6)) n'a pas été pris en compte par les différents auteurs. Il est pourtant probable que cet effet n'est pas négligeable; son calcul reste cependant fort ardu par faibles profondeurs.

### 3.4. Sédimentologie

La granulométrie — et la composition — des sédiments reflète bien la répartition spatiale des courants (DRAKE, 1976; KOMAR, 1976). Des sables fins, bien triés, sont présents dans la portion extrême aval (MARIUS, 1985; SAOS *et al.*, 1987). Des sédiments moins triés apparaissent entre les stations 6 et 11. Les fractions fines deviennent ensuite de plus en plus abondantes vers l'amont; des zones d'accumulation de matière organique se trouvent dans les zones de moindre courant (PAGÈS, données non publiées).

(\*) En reprenant les relevés de volumes et surfaces en eau de BRUNET-MORET (1970), nous obtenons des profondeurs moyennes plus faibles (fig. 8). La vitesse de propagation de l'onde de marée ( $v = \sqrt{g.h}$ ), d'après BRUNET-MORET (*ibid.*), indiquerait des valeurs intermédiaires.

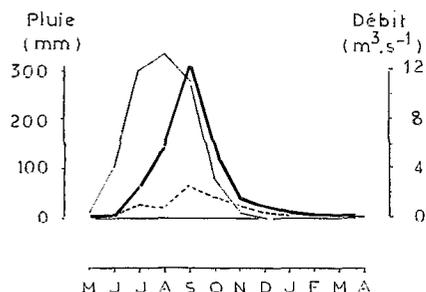


FIG. 10. — Calendrier de la crue moyenne (1968-1983), à module de  $2.7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (en trait plein), et de la crue faible de 1977, à module de  $0.5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (pointillés). Le calendrier des précipitations mensuelles moyennes est rappelé (trait fin). *Average (1968-83) monthly runoff (annual mean:  $2.7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) (heavy line), and runoff in the dry year 1977 (annual mean:  $0.5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) (dashed line). Monthly average rainfall is also given for comparison (thin line)*

### 3.5. Crue

Nous employons ce terme dans son sens habituel, et non pour désigner la marée de vive eau, comme cela se fait souvent chez les pêcheurs de Casamance.

La crue du fleuve, mesurée à Kolda, est décalée d'environ un mois par rapport aux pluies. En année humide (1962, 1967, 1969, 1975), le module annuel est de  $6,4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , le débit de pointe (moyenne mensuelle) de  $32 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . En année sèche (moyenne 1968-83), le coefficient de ruissellement atteint des valeurs très basses (1,2 %); le module annuel passe à  $1,7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , et le débit maximum à  $6,8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ .

## 4. SALINITÉ DU FLEUVE

Même si GUELORGET et PERTHUISOT (1983) font remarquer fort justement que la salinité n'est qu'une conséquence parmi d'autres du confinement, elle reste néanmoins un bon résumé des propriétés du milieu. Nous donnerons ici une description succincte des variations de la salinité, décrites ailleurs plus en détail (PAGÈS et DEBENAY, 1987).

Le profil longitudinal sur le cours principal présente, depuis plusieurs années, un seuil sursalé (fig. 11), témoin de la nature d'« estuaire inverse » (PRITCHARD, 1967) du fleuve. La position et la salinité de ce seuil varient dans l'année :

— en novembre, une salinité de 60 ‰ s'observe au PK 150 (Diattakounda)

— en fin de saison sèche, des salinités de 120 ‰ (en 1984 et 1985) ont été mesurées à Diana Malari (st. 37).

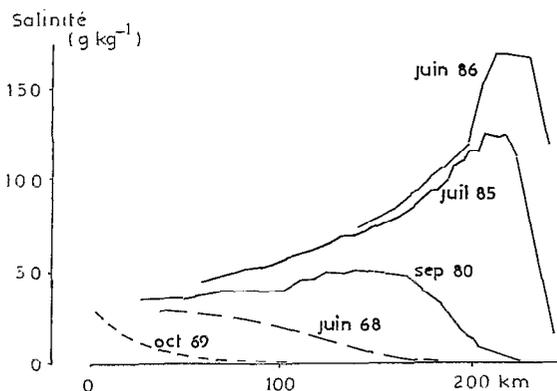


FIG. 11. — Profils longitudinaux de salinité à différentes dates, avec présence d'un seuil sursalé progressant vers l'amont (voir aussi fig. 14). *Salinity profiles along the river at various times, with a hypersaline peak traveling upriver (see also fig. 14)*

De part et d'autre du maximum de salinité, la variation spatiale est *approximativement* linéaire.

La salinité maximale relevée en 1986 était de 170 ‰ (st. 38, début juin). Cette augmentation par rapport aux années antérieures, malgré des pluies relativement abondantes (mais tardives) en 1985, indiquerait que le système n'est pas encore stabilisé mais au contraire en évolution. La salinité ne varie pas significativement sur la profondeur; l'estuaire semble être partout homogène (« well mixed »), sans « coin salin ».

## 5. PHYSICO-CHIMIE DES EAUX

### 5.1. Température

La température moyenne varie entre 22 °C, en janvier-février, et 28 °C de mai à septembre (fig. 12).

Les températures de surface, mesurées dans le chenal central, varient au cours de la journée, sous l'effet de l'insolation, de 3 à 5 °C. Une différence de 2 à 3 °C s'observe en outre, en milieu de journée, entre le chenal et les eaux peu profondes (5 à 20 cm) proches des rives. Le maximum mesuré jusqu'ici est de 38,7 °C, mais des températures plus élevées semblent possibles malgré l'évaporation (WILLIAMS, 1985). Ces micro-climats jouent probablement un rôle dans la survie des alevins.

### 5.2. Turbidité et couleur de l'eau

La turbidité présente un minimum relatif dans la partie médiane du cours avec des profondeurs de visibilité du disque de Secchi (S.D.) de 1,5 m. Vers

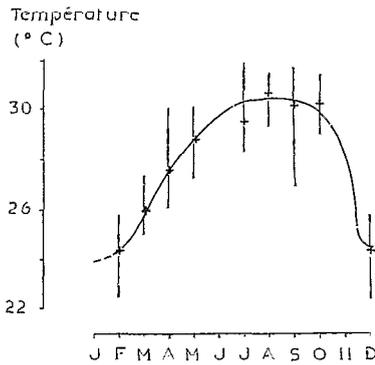


FIG. 12. — Variation annuelle de la température de l'eau. Les chiffres sont les moyennes des températures de fond mesurées lors d'une campagne, toutes stations confondues. Les barres verticales indiquent la dispersion. Annual variation of water temperature. Each monthly figure is an average of the bottom temperatures measured at all stations during the corresponding field trip

l'amont, la turbidité organique augmente fortement (S.D. de 0.5 à 0.15 m), avec des eaux jaunes, puis brunes. La coloration rouille observée en début juin 1986 (PAGÈS, données non publiées) provenait d'une prolifération de phytoplancton (*Dunaliella salina*) contenant du carotène (BEN AMOTZ et AVRON, 1983). Vers l'aval, la turbidité minérale (sable en suspension) est prédominante; des valeurs de SD de 1,0 à 0,6 m sont mesurées sur des eaux de couleur beige.

### 5.3. pH et oxygène dissous

Le pH varie surtout dans les eaux de surface riches en phytoplancton. La plupart des valeurs oscillent entre 7,25 et 7,75. Des valeurs extrêmes de 8,3 ont été observées, en fin de journée, au niveau du maximum de chlorophylle en extrême amont.

L'oxygène dissous est généralement proche de la saturation. Les eaux riches en chlorophylle sont souvent sur-saturées en fin de journée. Des sous-saturations nettes (40 %) ont été observées au niveau du fond aux stations d'extrême amont, à sédiment organique.

### 5.4. Sels nutritifs

Les concentrations de nutriments minéraux dissous sont assez fortes (5 à 20  $\mu\text{M}$  de N, 1 à 5  $\mu\text{M}$  de P), et tendent à augmenter vers l'amont. Nous n'avons pas discerné d'évolution annuelle.

La matière organique dissoute (MOD), abondante

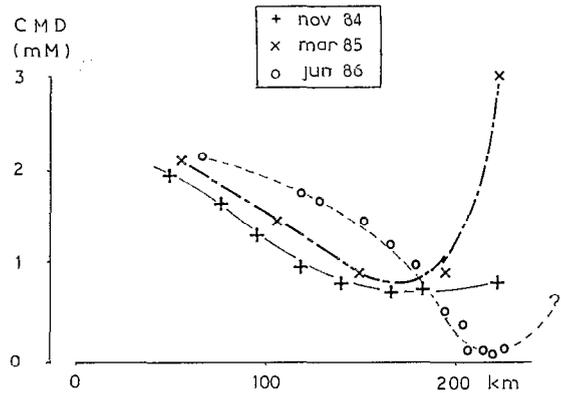


FIG. 13. — Variation géographique de la concentration en carbone minéral dissous, à des époques différentes : précipitation dans le cours médian, apport plus ou moins net par l'amont. Spatial variation of dissolved inorganic carbon at different seasons: precipitation appears probable halfway up the river, while DIC is supplied from upstream

en amont, semble constituer un réservoir important de nutriments (jusqu'à 40  $\mu\text{M}$  de N).

Nous avons relevé une variation spatiale du carbone minéral dissous (CMD) (fig. 13), qui pourrait indiquer une forte minéralisation en amont.

### 5.5. Phytoplancton

En toute saison, la répartition spatiale des concentrations de chlorophylle (fig. 14) est assez constante : (a) dans les portions aval et médiane du fleuve, les concentrations sont modérées (2 à 10  $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) et croissent vers l'amont; (b) en amont, un maximum généralement très net de chlorophylle se situe sur le versant aval du pic de salinité. Une telle augmentation parallèle de la chlorophylle et de la salinité (ou du confinement) a été observée dans d'autres milieux sursalés (GUELORGET et PERTHUISOT, 1983; JAVOR, 1983).

Les concentrations les plus faibles s'observent pendant la crue. Au cours de la saison sèche, les valeurs tendent à augmenter sur tout le fleuve. Il semble que les concentrations mesurées entre 1984 et 1986 indiquent une augmentation inter-annuelle, remarquable surtout au niveau du maximum; ce point reste à confirmer.

## 6. CONCLUSION

La description faite ici ne veut que donner les grands traits de l'environnement dans lequel se sont déroulées les études pluri-disciplinaires du « Pro-

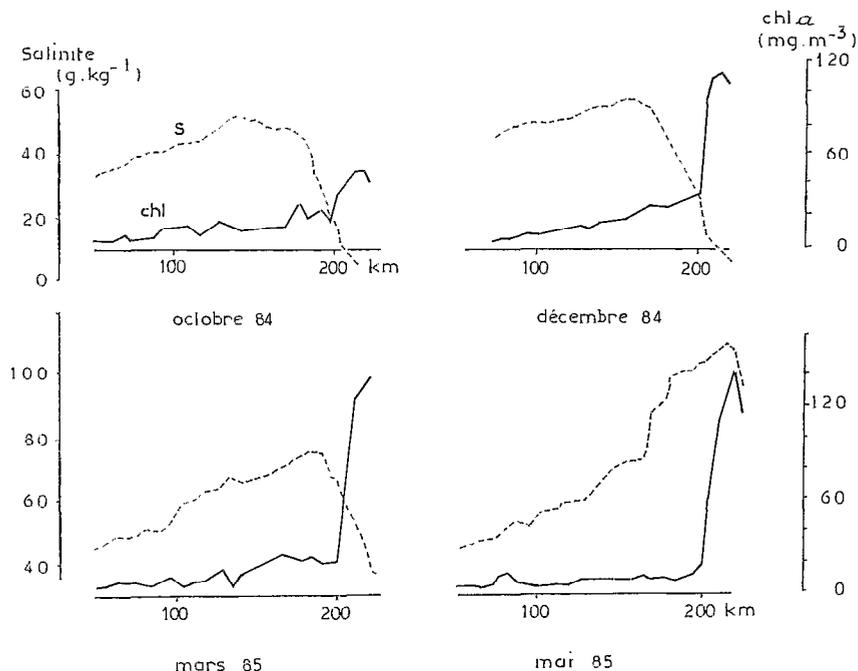


FIG. 14. — Répartition spatiale du phytoplancton (mesuré par la chlorophylle), comparée à celle de la salinité, au cours d'une saison sèche. *Spatial distribution of phytoplankton chlorophyll, compared with that of salinity, during a dry season*

gramme Casamance» entrepris par le CRODT. Ce programme est axé, de façon assez explicite, sur la mise en valeur rationnelle d'un milieu dont la forte sursalure, intéressante du point de vue scientifique, représente une menace directe pour l'économie de la région.

Nous avons tenté ici de fournir quelques bases pour l'interprétation des résultats des études halieutiques. Il reste à déterminer quels sont les facteurs du milieu qu'il serait à la fois nécessaire et suffisant de connaître pour expliquer les phénomènes halieutiques. En effet, la connaissance du milieu et la compréhension des mécanismes contrôlant la production du réseau trophique à tous ses niveaux sont un préalable à tout essai de maîtrise du milieu. La

salinité ne peut bien souvent suffire à expliquer les variations (saisonniers ou inter-annuelles) des stocks. Les recherches doivent être poursuivies, à la fois au niveau de l'« environnement » au sens large et à celui de l'éco-physiologie des espèces exploitées.

A long terme, la question se pose de savoir quelle sera l'évolution du milieu en relation avec la pluviométrie. Il semble que, quelle que soit l'hypothèse retenue, les conditions seront péjorées — au moins à l'échelle de temps humaine —. Il faudra donc définir des options de développement qui tiennent compte de cet avenir sans doute sombre.

*Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 6 juin 1987*

## BIBLIOGRAPHIE

- ANONYME, 1961. — Le climat du Sénégal : Données statistiques. *Serv. Météorol., Min. Trav. publics Sénégal*, 23 p.
- ASECNA (Dakar). — Résumés mensuels des observations au sol.
- BELTRANDO (G.), CHARNE (J.) et DOUGUEDROIT (A.), 1986. — Régionalisation des variations temporelles récentes des précipitations de la zone soudano-sahélienne. In: *Changements globaux en Afrique*. INQUA/ASEQUA, Dakar, 21-28 avril 1986. *Trav. Doc. ORSTOM* (Paris), n° 197 : 25-28.
- BEN AMOTZ (A.) et AVRON (M.), 1983. — On the factors which determine massive  $\beta$  carotene accumulation in the halotolerant alga *Dunaliella bardawil*. *Plant Physiol.*, 73 : 593-597.
- BOIVIN (P.) et LEBRUSQ (J.-Y.), 1984. — Étude pédologique des Kalounayes : vallées de Koubalan et Tapilanc, ORSTOM/DAKAR, 23 p.
- BOIVIN (P.), LOYER (J.-Y.), MOUGENOT (B.) et ZANTE (P.), 1986. — Sécheresse et évolution des sédiments fluvio-marins au Sénégal. In: *Changements globaux en Afrique*. INQUA/ASEQUA, Dakar, 21-28 avril 1986. *Trav. Doc. ORSTOM*, Paris, n° 197 : 43-48.
- BRUNET-MORET (Y.), 1970. — Études hydrologiques en Casamance : rapport définitif ORSTOM, Serv. Hydrol. : 52 pp.
- CAILLE (R.), 1830. — Journal d'un voyage à Tombouctou et à Jenné et dans l'Afrique Central de 1824 à 1828... Imprimerie Royale, Paris.
- CITEAU (J.), CAMMAS (J.-P.), GOURIOU (Y.) et GUILLOT (B.), 1986. — Remarques sur la migration de la zone inter-tropicale de convergence en Atlantique, les températures de surface du Golfe de Guinée, et la pluviométrie en Afrique de l'Ouest sahélienne et au nord-est du Brésil. In: *Changements globaux en Afrique*. INQUA/ASEQUA, Dakar, 21-28 avril 1986. *Trav. Doc. ORSTOM*, Paris, n° 197 : 67-75.
- DEBENAY (J.-P.), 1984. — Distribution écologique de la microfaune benthique dans un milieu hyperhalin : les foraminifères du fleuve. Casamance (Sénégal). *Doc. Sci. Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye*, 95 : 20 p.
- DIOP (E. S.) et SALL (M.), 1986. — Estuaires et mangroves en Afrique de l'Ouest : évolution et changements — du quaternaire récent à l'actuel —. In: *Changements globaux en Afrique*. INQUA/ASEQUA, Dakar, 21-28 avril 1986. *Trav. Doc. ORSTOM*, n° 197 : 109-114.
- DRAKE (D. E.), 1976. — Suspended sediment transport and mud deposition on continental shelves. In: *Marine sediment transport and environmental management*. D.J. Stanley and D. J. P. Swift (eds.), Wiley Intersci. : 127-158.
- EUGSTER (H. P.), HARVIE (C. E.), WEARE (J. H.), 1980. — Mineral equilibria in the six component sea water system, Na.K.Mg.Ca.SO<sub>4</sub>.Cl.H<sub>2</sub>O at 25 °C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44 : 1335-1347.
- FRITZ (B.), 1975. — Étude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Applications à la géochimie des altérations et des eaux continentales. *Mém. Soc. Géol.*, 41 : 152 pp.
- GAC (J.-Y.) et COGELS (F.-X.), 1982. — Le lac de Guiers, bilans hydriques. Évaporation d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne (Sénégal). *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol. n° 12, n° 2 : 21-43.
- GIRAUD (J. M.) et GRÉGOIRE (P.), 1976. — Le climat soudano-sahélien : Année sèche, année pluvieuse. *Météorol.*, sér. 6 : 69-81.
- GUELORGET (O.) et PERTHUISOT (J.-P.), 1983. — Le domaine paraliq. Expressions géologiques, biologiques et économiques du confinement. *Trav. Lab. Géol. (École Normale Supérieure, Paris)*, 16 : 136 pp.
- HUBERT (P.) et CARBONNEL (J. P.), 1986. — Approche statistique de l'étude des séries pluviométriques de longue durée de l'Afrique de l'Ouest. In: *Changements globaux en Afrique*. INQUA/ASEQUA, Dakar, 21-28 avril 1986. *Trav. Doc. ORSTOM* (Paris), n° 197 : 199-202.
- JAVOR (B. J.), 1983. — Planktonic standing crop and nutrients in a saltern ecosystem. *Limnol. Oceanogr.*, 28/1 : 153-159.
- KALCK (Y.), 1978. — Évolution des zones à mangroves du Sénégal au quaternaire récent. Études géologiques et géochimiques. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Strasbourg : 117 p.
- KIRK (J. T. O.), 1983. — Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge Univ. Press, 401 p.
- KOMAR (P. D.), 1976. — The transport of cohesion-less sediments on continental shelves. In: *Marine sediment transport and environmental management*. D.J. Stanley and D. J. P. Swift (eds.), Wiley Intersci. : 107-125.
- LE RESTE (L.), 1980. — The relation of rainfall to the production of the penaeid shrimp *Penaeus duorarum* in the Casamance estuary (Sénégal). In: *Proc. Vth. Internat. Symp. trop. Ecol.*, 16-21 avril 1979, Kuala Lumpur. J. I. Furtado (ed.), Internat. Soc. trop. Ecol. : 1169-1173.
- 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 (Sénégal). *Rev. Hydrobiol. trop.*, 20 (3-4) : 279-289.
- LE ROUX (M.), 1983. — Le climat de l'Afrique Tropicale. Champion, Paris, 372 p.

- LOYER (J.-Y.), 1982. — La mise en valeur des sols des mangroves tropicales en relation avec leurs caractéristiques physico-chimiques. *In*: Atelier d'étude des mangroves et de l'estuaire du Saloum (Sénégal). Rapport final UNESCO/BREDA/EPEEC, Dakar, déc. 1982 : 5 p.
- MARIUS (C.), 1985. — Mangroves du Sénégal et de la Gambie. *Trav. Doc. ORSTOM*, n° 193 : 357 pp.
- MILLET (B.), OLIVRY (J. C.) et LETROQUER (Y.), 1986. — Étude du fonctionnement hydrologique de la Casamance maritime. *In*: L'estuaire de la Casamance : environnement, pêche, socio-économie. Actes Sémin. Ziguinchor 19-24 juin 1986 : sous presse.
- OLIVRY (J. C.), 1982. — Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégal et aux Iles du Cap-Vert. *ORSTOM* (Dakar), déc. 1982 : 46 pp.
- OLIVRY (J.-C.) et CHASTANET (M.), 1986. — Évolution du climat dans le bassin du fleuve Sénégal (Bakel) depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. *In*: Changements globaux, en Afrique INQUA/ASEQUA, Dakar, 21-28 avril 1986, *Trav. Doc. ORSTOM*, 197 : 337-342.
- PAGÈS (J.) et DEBENAY (J.-P.), 1987. — Évolution saisonnière de la salinité de la Casamance : description et essai et modélisation. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 20 (3-4) : 203-217.
- PRITCHARD (D. W.), 1967. — What is an estuary : physical viewpoint. *In*: Estuarine, G. H. Lauff (ed.), Am. Assoc. Adv. Sci. Publ., 83 : 3-5.
- REBERT (J.-P.), 1983. — Hydrologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais. *Doc. Sci. Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye*, 89 : 99 p.
- REITAN (C. H.) et GREEN (C. R.), 1968. — Appraisal of research on weather and climate of desert environments. *In*: Deserts of the world. W. G. McGinnies, B. J. Goldman, P. Paylore (eds.), The Univ. of Arizona Press : 21-92.
- RIEHL (H.), 1976. — L'atmosphère tropicale, une partie de la circulation générale. *Météorol.*, sér. 6 n° 6 : 111-112.
- RIOU (C.), 1975. — La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. *Mém. ORSTOM*, 80, 236 p.
- SAOS (J.-L.), LE BOUTELLER (C.) et DIOP (E. S.), 1987. — Aspects géologiques et géomorphologiques de la Casamance. Étude de la sédimentation actuelle. *Rev. Hydrobiol. trop.* 20 (3-4) : 219-233.
- WILLIAMS (W. D.), 1985. — Biotic adaptations in temporary lentic waters, with special reference to those in semi-arid and arid regions. *Hydrobiologia*, 125 : 85-110.