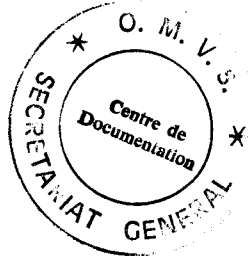


08916

# L'INVASION MARINE DANS LA BASSE

## VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

J.Y. GAC<sup>(1)</sup>, A. KANE<sup>(2)</sup>, J.L. SAOS<sup>(1)</sup>, M. CARN<sup>(1)</sup> et J.E. VILLENEUVE<sup>(1)</sup>



- 
- (1) : ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération), Centre de Hann, BP. 1386, Dakar (Sénégal).
- (2) : Laboratoire de Géographie Physique de l'Université de Nancy II, 23 bd. ALBERT 1er, B.P. 33-97, Nancy Cedex (France).

## INTRODUCTION

Le "bief maritime" du fleuve Sénégal s'étend sur près de 450 km. Chaque année et selon un rythme saisonnier immuable, le mouvement des masses d'eau dans cette partie du fleuve, située en contrebas de l'Océan Atlantique, est la résultante de deux forces : le débit fluvial et la poussée des marées à cycles diurne et mensuel.

Cette étude se propose, à la suite des conditions particulières introduites par la persistance de la sécheresse depuis 1968 de reprendre, sur la base de nouvelles observations, le modèle de propagation de la langue salée établi par ROCHETTE (1964, 1974). Les mesures de salinité réalisées au cours des trois dernières années ont en effet montré que le modèle proposé aboutissait à une très importante sous-estimation de la durée et de l'ampleur de l'intrusion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal.

Après un bref rappel des études antérieures, les causes et les mécanismes de la remontée saline sont précisés. Puis les anciennes abaques sont utilisés pour évaluer le rythme annuel de progression spatio-temporelle de la salinité depuis le début des observations en 1903 jusqu'à l'édification du barrage de Rheune en novembre 1983. La réalité est ensuite abordée avec l'appui des mesures récentes (de 1979 à 1983) et une nouvelle formulation proposée pour fixer, à tout instant de la période des basses-eaux du fleuve Sénégal, la position amont du front salé dans sa vallée.

## I. ANALYSES DES DONNÉES ANTÉRIEURES

### A - TEMOIGNAGES ANCIENS

De nombreux auteurs (HENRY, 1918 ; TROCHAIN, 1940 ; PAPY, 1951 ; DUBOIS, 1955) ont fait l'historique de cette remontée saline en s'appuyant essentiellement sur les témoignages des voyageurs européens. Il ressort de ces récits que l'intrusion des eaux marines était peu importante avant 1900 :

- en 1749, ADANSON écrit : "les eaux sont salées jusqu'à 30 lieues (soit environ 120 km) de l'embouchure" ;
- en 1779, LAUZUN note : "à St Louis..., l'eau de la rivière est mauvaise et salée pendant 10 mois de l'année et on est obligé de remonter à 15 ou 16 lieues pour en trouver de supportable."

Les témoignages sont plus précis à partir des années 1800 :

- en 1819, le gouverneur SCHMALTZ mentionne que "l'eau est toujours douce" à la hauteur du village de Dagana situé alors à 164 km de l'embouchure ;
- de 1820 à 1830, il n'y a pas, selon les indications de LECARD "de remontée d'eau salée au-delà de la ville de Richard-Toll" ;
- en 1833, PERROTTET signale "qu'autour du campement de Serre (le Sier actuel dans la partie sud du lac de Guiers), les éléphants viennent boire de l'eau" ;
- en 1863, selon AZAN : "les eaux de la Taoué (marigot qui assure la liaison entre le lac de Guiers et le fleuve Sénégal) sont généralement douces toute l'année ; elles ne deviennent saumâtres que pendant les années exceptionnelles où le fleuve se trouve plus haut que Richard-Toll" ;
- en 1866, LECARD affirme : "pendant plus de la moitié de l'année, le fleuve est salé par le reflux des eaux de mer depuis St Louis jusqu'au marigot des Maringouins ; la même influence se fait sentir progressivement jusqu'à Richard-Toll et même jusqu'à l'île de Todd (quelques km en amont de cette ville) ;
- de 1865 à 1872, BORNIUS écrit qu'"à Merinaghen, dans la partie méridionale du lac de Guiers, l'eau est douce toute l'année, sauf de mars à juin."

B - LES OBSERVATIONS AU COURS DU XXème SIECLE

Il semble que la situation se soit modifiée à partir de 1900. Depuis cette époque, l'eau salée atteint chaque année la ville de Dagana et peut parvenir au-delà de Podor (km 292), lors des années de faibles écoulements. Ce fait a été souligné par HENRY (1918) après les séquences sèches de 1913-1914 et 1915. TROCHAIN (1940), MONTEILLET *et al.* (1981) ont avancé l'hypothèse que la présence de faunes marines fossiles à des distances importantes du rivage actuel pourrait aussi bien découler d'un affaiblissement de la crue fluviale (qui en corrolaire engendre une intrusion marine importante) que de la remontée du niveau marin à la suite d'épisodes transgressifs. Dans l'ensemble, les conclusions des travaux récents menés sur l'estuaire s'accordent pour attribuer les importants changements morphologiques actuels aux aménagements de plus en plus élaborés pour la mise en valeur de la basse vallée du Sénégal.

Tous les facteurs ayant conduit au dessèchement de la région ont eu une influence plus ou moins importante sur la progression "continentale" de la salinité : diminution des précipitations sur l'ensemble du bassin versant, réduction des débits et des courants fluviaux, divagation de l'embouchure, abaissement de la hauteur d'eau et de la durée de la crue, arasion des seuils rocheux, etc. L'impact considérable de cette intrusion marine dans une région en plein essor économique a suscité de nombreuses études pour en cerner les causes, en préciser les mécanismes à l'échelle saisonnière et en mesurer les effets sur l'environnement alluvial. On peut citer :

- les travaux de ROCHETTE (1964, 1974) résumés dans un ouvrage très complet et dont les tentatives de modélisation de la remontée saline s'appuient sur des mesures précises de la salinité de 1962 à 1963 ;
- les observations épisodiques de la SOGREAH en 1971 et en 1972 ;
- les mesures de salinité réalisées par le PNUD de 1972 à 1973 ;
- les réalisations de l'OMVS (Organisation de la Mise en Valeur du fleuve Sénégal) qui synthétisent, pour l'essentiel, dans son document sur "les éléments de préfactibilité du barrage de Diama" en 1978, les données de base connues ;
- à l'heure actuelle, des mesures ponctuelles de salinité sont effectuées régulièrement en différents sites par l'OMVS, la SAED (Société d'Aménagement du Delta), le Service Hydrologique de St Louis, la C.S.S. (Compagnie Sucrière Sénégalaise) à la hauteur du lac de Guiers, et surtout par l'ORSTOM qui dispose d'un réseau de 56 stations de mesures hebdomadaires entre l'embouchure et la ville de Podor.

La difficulté pour étudier le phénomène de la remontée saline réside dans la complexité des variations constantes et imprévisibles des conditions du milieu. Les données acquises il y a plus de vingt ans ne traduisent plus la réalité, et la formulation du modèle proposé nécessite d'être revue pour une meilleure connaissance de cette intrusion d'eaux océaniques devenue un évènement saisonnier majeur pour les populations riveraines de la basse vallée du Sénégal.

## II. CAUSES ET MÉCANISMES DE LA REMONTÉE DES EAUX OCÉANIQUES DANS LA VALLÉE DU SÉNÉGAL

### A - LES CAUSES DE LA REMONTEE DES EAUX SALINES

Quatre causes principales peuvent être évoquées.

#### 1. La morphologie du lit mineur

Le fleuve Sénégal débouche sur les côtes tropicales basses de l'Afrique de l'Ouest et il présente la particularité d'avoir un lit mineur qui se situe très nettement en contrebas de l'Océan (fig. 1) sur près de 400 km. Malgré la faible importance des marées, cette particularité se traduit chaque année par la remontée d'eau salée vers l'amont du fleuve.

#### 2. Le régime du fleuve

Les périodes de basses-eaux du Sénégal deviennent sous l'effet de la sécheresse de plus en plus longues et les étiages de plus en plus sévères. Le tarissement est précoce et les eaux douces ne se maintiennent que pendant un laps de temps très court à l'embouchure du fleuve (ces dernières années, la persistance d'eau douce à St Louis n'a jamais excédé trois mois).

#### 3. La puissance de la houle à l'embouchure

La côte sénégalaise au large de l'embouchure du Sénégal est soumise à l'une des plus fortes agitations du monde. La puissance de la houle y serait de l'ordre de  $110.10^7$  ergs (COLEMAN et WRIGHT, 1975), c'est-à-dire 550 fois plus importante qu'au niveau du Mississippi, 50 et 5 fois plus forte qu'aux embouchures respectives du Niger et du Nil.

#### 4. La pente du talus continental

Elle est exceptionnellement forte au large du littoral. Elle peut entraîner des phénomènes de mini raz-de-marée et provoquer une pénétration plus importante d'eau salée dans la vallée du fleuve, surtout en période d'étiage.

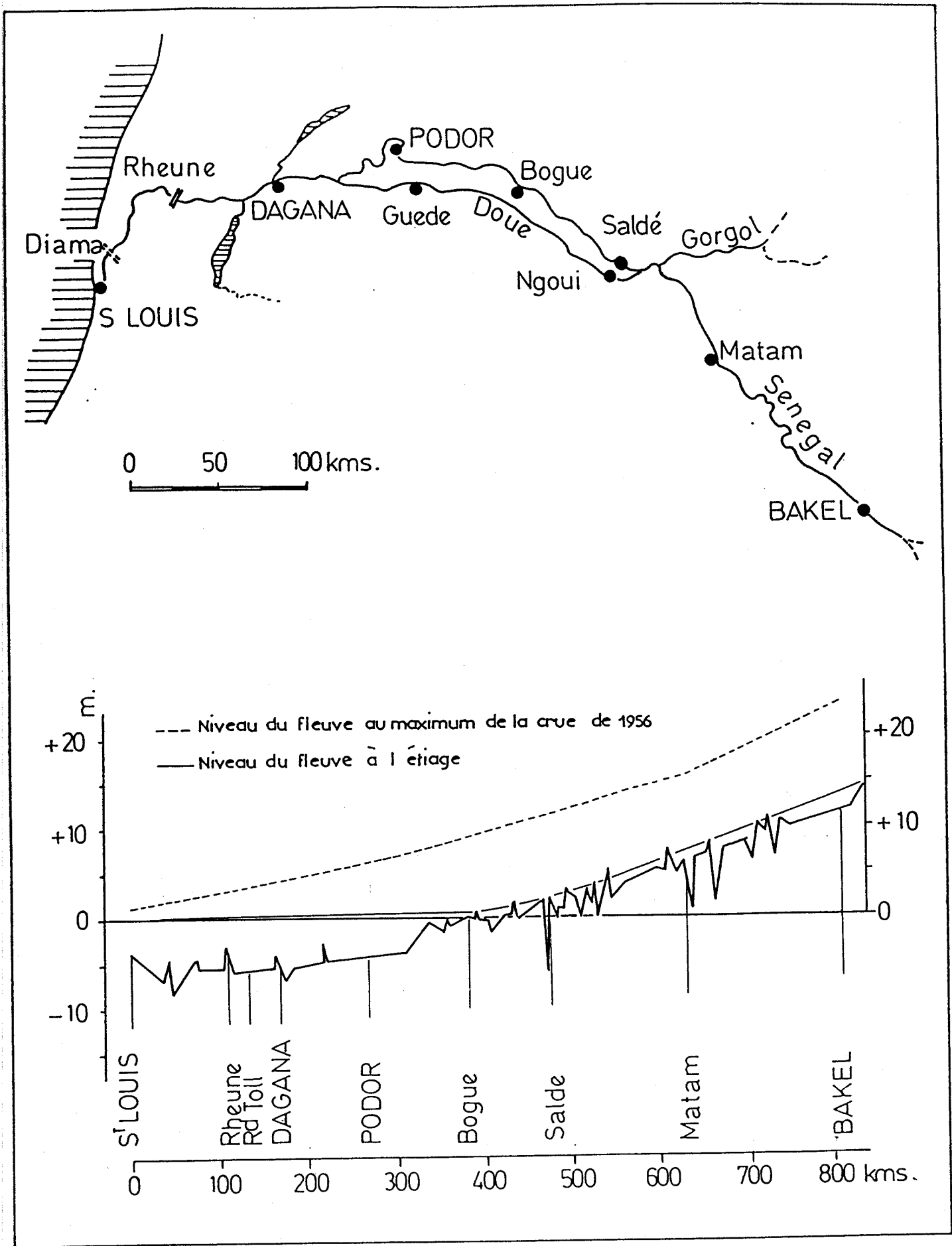


Fig. 1 : La basse vallée du Sénégal et profil longitudinal du lit mineur.

B - LES MECANISMES DE L'INTRUSION SALINE

A la fin de la décrue du fleuve, les eaux marines repoussent les eaux douces, l'onde de marée devient perceptible vers l'amont et précède l'arrivée de la salure. L'invasion marine à l'intérieur du bassin sénégalo-mauritanien se décompose en quatre phases (GAC *et al.*, 1983). Leurs durées respectives sont variables et liées aux caractéristiques particulières de chaque crue annuelle et donc aussi à la répartition saisonnière et à l'importance des précipitations sur le bassin versant. La figure 2 illustre les évènements successifs observés de 1978 à 1980 :

Phase 1 : Elle correspond à la saison des hautes-eaux. L'eau est douce sur la totalité du parcours du fleuve depuis la source jusqu'à l'embouchure.

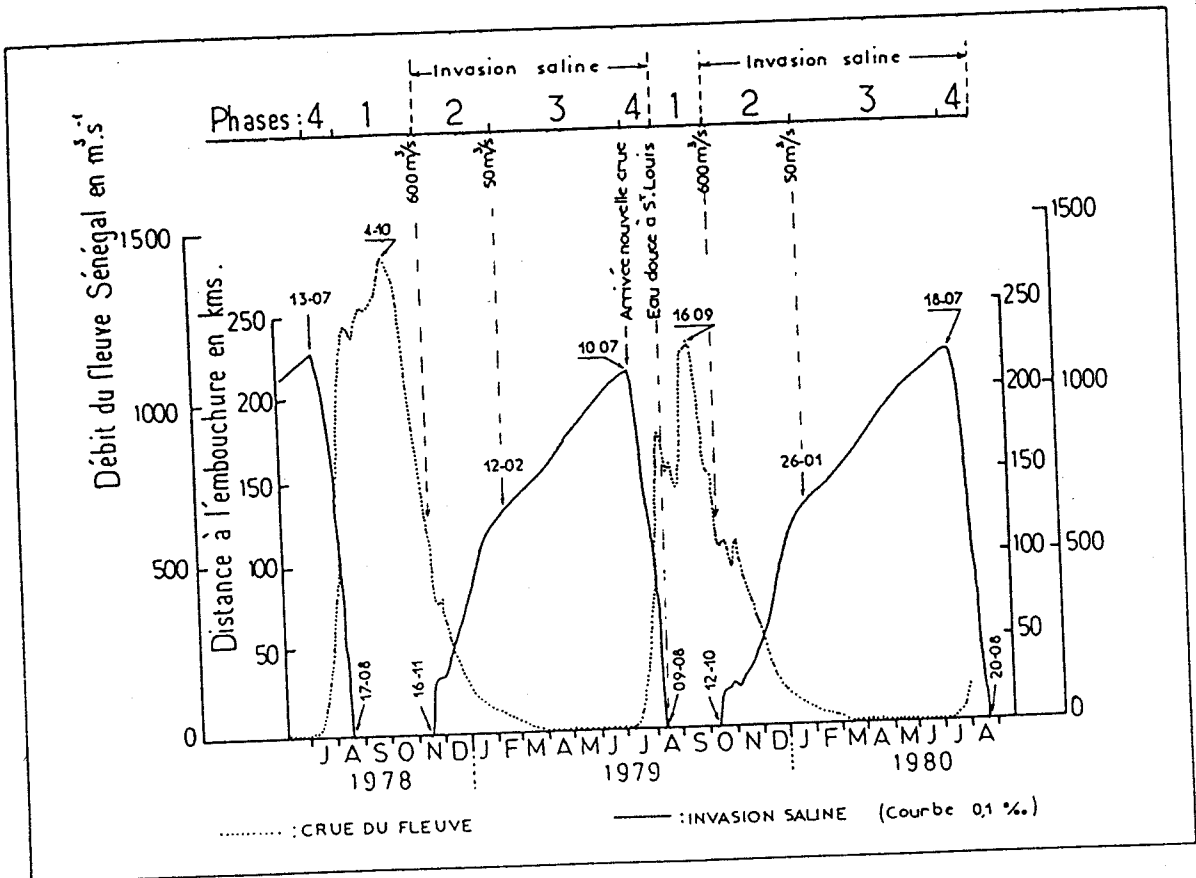


Fig. 2 : Les différentes phases de l'invasion marine annuelle (GAC, 1983).

Phase 2 : Dans une deuxième phase, dont les différents aspects sont illustrés par la figure 3, l'interface eau douce-eau salée entame son déplacement saisonnier vers l'amont. L'intrusion débute par une oscillation du plan d'eau due à l'onde de marée, et la progression du front salé ne va dépendre, dans sa phase initiale, que de la forme du tarissement du fleuve. Selon les estimations de ROCHETTE (1964, 1974), GAC *et al.* (1983), cette phase débute lorsque le débit du fleuve descend en dessous de  $600 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les quatre exemples de la figure 3 montrent que l'intrusion saline peut être lente (1906-1907), rapide (1977-1978), différée (1979-1980) par une reprise des écoulements, ou même dédoublée (1907-1908) si les pluies tardives sont importantes. Cette phase s'achève lorsque le débit fluvial tombe à  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Phase 3 : Elle se poursuit tant que le débit reste inférieur à  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  ; sa durée est donc liée à celle des étiages, c'est dire que tout va dépendre de l'arrivée de l'onde de crue suivante (CHAUMENEY, 1974 ; ICOLE *et al.*, 1982).

Phase 4 : La dernière phase s'amorce avec le nouveau cycle hydrologique et la nouvelle saison des pluies. Elle correspond au retrait de la salure dans toute la vallée. Le taux maximum de salinité et la pénétration maximale vers l'amont du coin salé sont atteints la veille du passage de la nouvelle onde de crue. Cette phase s'achève lorsque les volumes totaux d'eau douce qui transitent à l'embouchure dépassent  $900.10^6 \text{ m}^3$  (ROCHETTE : 1964, 1974).

En résumé et en première approximation, pour un même estuaire de la zone intertropicale à saison contrastée, plus l'aridité est accentuée, plus le débit du fleuve est faible et plus la pénétration du front salé progresse en direction de l'amont du fleuve. Pour le Sénégal, la remontée saline dépend de deux paramètres essentiels :

- la plus ou moins grande précocité du tarissement de la crue du fleuve : la remontée saline ne se déclenche que lorsque le débit descend en dessous de  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  ;
- la durée de la période d'étiage pendant laquelle le débit devient inférieur à  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### III. PARAMÈTRES HYDROLOGIQUES ET FACTEURS RÉGULANT L'INVASION MARINE

#### A - LES MASSES D'EAUX Océaniques ET LEUR SALINISATION

Le littoral sénégalais est assujéti à l'influence de quatre masses d'eaux dont les effets se font ressentir au cours de deux saisons océaniques : une saison chaude, de juin à octobre, et une saison froide, de novembre à mai.

##### 1. La saison chaude

Elle se caractérise de juin à août par la présence des eaux chaudes tropicales et de septembre à novembre, des eaux chaudes dessalées guinéennes :



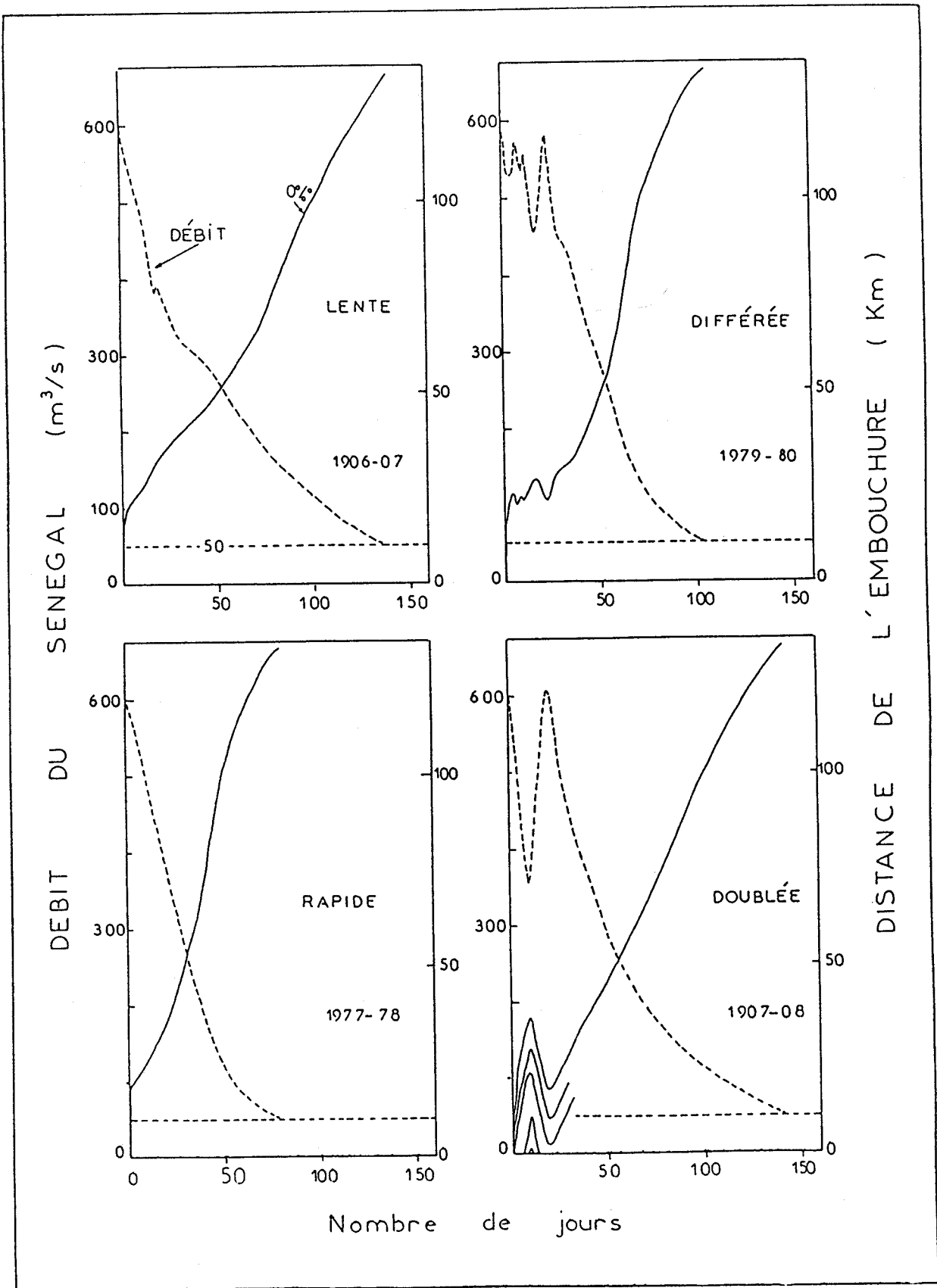


Figure 3 : Différents aspects du tarissement et de l'intrusion marine.

- les eaux chaudes tropicales correspondent au contrecourant équatorial affecté d'un courant de surface orienté N-NE. Elles sont limitées au nord par le courant des Canaries et au sud par le courant du Benguela. Les températures et les taux de salinité sont élevés (de 27 à 28°C et de 36 à 37 ‰).
- Les eaux guinéennes ont des températures comparables mais leur salinité reste inférieure à 35 ‰. Le dessalement s'amorce au niveau de l'équateur sous le double contrôle des précipitations d'hivernage et des flux d'eau douce en provenance des fleuves côtiers. Au large de l'embouchure du Sénégal, des taux de salinité de l'ordre de 32 ‰ ont été relevés par PINSON-MOUILLOT (1980) au moment du développement du panache turbide engendré par la crue du fleuve.

## 2. La saison froide

Pendant cette période de novembre à mai, le courant de surface porte du S-SW. On distingue également :

- les eaux froides dessalées disséminées en petites zones de faible extension géographique. Les températures sont inférieures à 24°C et les taux de salinité, à 35 ‰.
- Les eaux froides salées résultent de la poussée, exercée vers le sud, par les alizés du N-NW sur la tranche superficielle des eaux chaudes tropicales (branche côtière du courant des Canaries) et de la remontée d'eaux froides profonde provoquée par un up-welling côtier. Les températures descendent en dessous de 20°C et les salinités demeurent supérieures à 35 ‰.

Au cours de cette saison froide (sèche sur le continent), qui coïncide avec l'incursion marine dans la vallée du Sénégal, les salinités sont maximales en bordure du littoral (PINSON-MOUILLOT, 1980)

## B - LE NIVEAU MARIN MOYEN

Le niveau des mers à la surface du globe est marqué par une profonde instabilité. Les traces d'anciens rivages au cours des derniers millénaires témoignent des fluctuations importantes du niveau marin, surtout sur les côtes atlantiques.

### 1. Variations du niveau marin sur les côtes d'Afrique Occidentale au cours des derniers millénaires

Les variations du niveau de la mer résultent de nombreux phénomènes. On peut évoquer avec PIRAZZOLI (1977) la tectonique des plaques, l'isostasie, les grands déplacements de sédiments et naturellement les changements importants du climat :

- les mouvements relatifs des plaques et l'affaissement des grands fonds modifient le volume d'eau disponible dans les océans ;
- les déplacements sédimentaires de grande amplitude, en introduisant des bouleversements dans la morphologie littorale, peuvent déterminer des variations dans l'amplitude des marées ;
- les réchauffements ou refroidissements d'origine climatique, en provoquant une réduction ou une extension des calottes glaciaires entraînent montée et descente du niveau des mers.

La figure 4 illustre les variations récentes du niveau moyen de l'Océan Atlantique ; de -200 m vers 20 000 ans B.P. (grande régression Ogolienne), le niveau des mers remonte rapidement jusqu'à -20 m, atteint vers 8 000 ans B.P. (Tchadien) ; après un bref stationnement, la transgression reprend pour passer le niveau 0 IGN vers 6 000 ans ; cette phase transgressive culmine à +2 m il y a 5 000 ans (Nouakchottien), puis lui succède une nouvelle régression à -2m (Tafolien) vers 4 000 ans B.P., et enfin un nouveau retour à +2 m vers 3 000 ans B.P. (Dakarrien). Depuis lors, les oscillations sont de faible amplitude (ELOUARD *et al.*, 1977 ; MONTEILLET, 1977), la tendance étant à une légère élévation du niveau moyen des mers, de l'ordre de quelques mm/an (FAURE et ELOUARD, 1967 ; FAURE *et al.*, 1974).

## 2. Les oscillations annuelles du niveau marin

BRUNET-MORET (1970) définit le niveau moyen comme "une moyenne des niveaux moyens journaliers de 365 jours consécutifs ou comme une moyenne des niveaux moyens mensuels de 12 mois consécutifs." Les variations du niveau marin sont sous la dépendance des marées et sont relativement importantes.

A St-Louis, ROCHETTE (1964), par des mesures effectuées de janvier à juillet 1963, trouve pour le niveau de mi-marées "des maximum compris entre -0,06 m et +0,26 m IGN" tout en soulignant que dans le bief maritime,

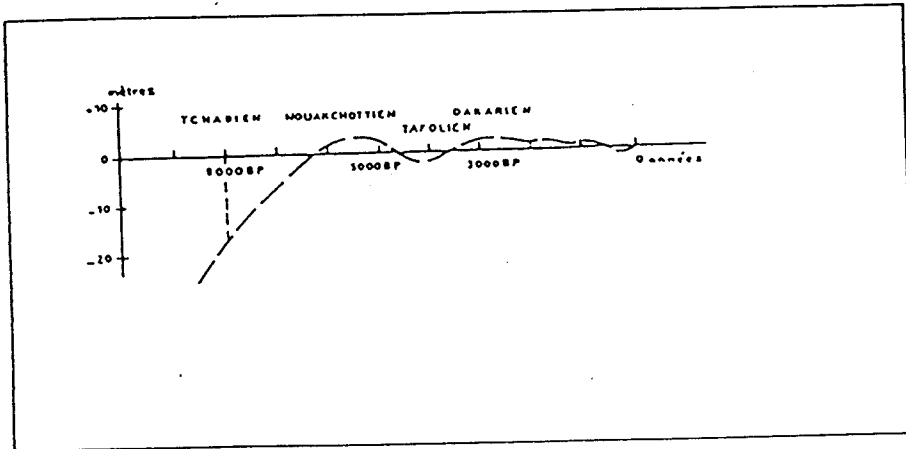


Fig. 4 : Variation du niveau de la mer au cours de l'Holocène autour de la presqu'île du Cap-Vert (ELOUARD *et al.*, 1977 ; MONTEILLET, 1977).

## D - LE DEBIT FLUVIAL

Son importance et ses variations saisonnières conditionnent les pulsations journalières de la remontée saline dans l'estuaire. Nous y reviendrons plus en détail en présentant les abaques de ROCHETTE (1964) sur les relations entre la salinité moyenne de base et la valeur du débit fluvial. On peut rappeler succinctement les principes essentiels définis par cet auteur :

- l'intrusion saline dans le fleuve Sénégal est possible dès que le débit tombe en dessous de 600 m<sup>3</sup>/s ;
- quand les débits en fin d'étiage franchissent le seuil de 50 m<sup>3</sup>/s, la propagation des eaux salées vers l'amont ne dépend plus que du temps, variable chaque année, qui va s'écouler jusqu'à l'arrivée de la crue suivante.

Autrement dit, deux crues totalement différentes peuvent se par des invasions marines tout à fait comparables et similaires caractère tardif ou précoce des cycles hydrologique

## RELEVÉS POUR L'IRRIGATION

La salinité augmente au fur et à mesure de la réduction du débit. En période de basses-eaux, lorsque les écoulements sont inférieurs à 300 m<sup>3</sup>/s et 50 m<sup>3</sup>/s, les prélèvements d'eau douce pour l'agriculture sont réduits. Les aménagements agricoles le long de la vallée ont pour but de limiter la remontée de la langue salée.

Il est cependant difficile d'établir une relation précise entre les volumes prélevés dans le fleuve et la nouvelle impulsion qui en résulte réellement pour la progression de la langue salée. CHAUMENEY (1974), en envisageant l'hypothèse la plus défavorable du remplacement instantané du m<sup>3</sup> d'eau douce pompé par 1 m<sup>3</sup> d'eau de mer, aboutit à la conclusion que "la diminution correspondante du débit pour repousser la langue salée entraînerait une remontée supplémentaire de 7 à 15 km pour un même débit à Dagana." Lorsque seul le facteur temps conditionne la remontée saline, COGELS et GAC (1981) ont montré que le soutirage d'eau pour les besoins de l'irrigation dans un fleuve déjà "moribond" accélérerait le tarissement du fleuve et la perception de plus en plus précoce de l'onde de marée à la hauteur du lac de Guiers.

#### F - L'INTERVENTION DES NAPPES ET LE JEU DE L'EVAPORATION

Dans la zone du delta inférieur, les nappes de sub-surface sont salées et leur influence sur la remontée saline est négligeable. Plus en amont, le soutien au débit d'étiage du fleuve apporté par les nappes d'eau douce limitrophes constitue un frein à la progression des eaux marines.

L'évaporation annuelle d'une lame d'eau de l'ordre de 2 500 mm/an dans le cours du fleuve contribue à la baisse du niveau du plan d'eau dans le lit mineur, favorise la concentration en sels minéraux, et donc l'augmentation de la salinité. Au moment des fortes incursions d'eaux océaniques et de leurs débordements dans les cuvettes latérales, l'évaporation joue un rôle déterminant dans la sursalure des solutions et fixe les limites spatio-temporelles du fonctionnement inverse des estuaires.

#### G - VARIATIONS DE LA MORPHOLOGIE ET DE LA POSITION DE L'EMBOUCHURE DU FLEUVE SENEGAL

L'embouchure du fleuve Sénégal se déplace constamment et ses migrations, associées à l'extension plus ou moins importante de la flèche littorale constituée par la Langue de Barbarie, peuvent influencer la progression continentale des eaux marines.

##### 1. Caractéristiques de l'embouchure

La morphologie du cours inférieur du fleuve Sénégal est celle d'un delta (COLEMAN et WRIGHT, 1975) dont les deffluents ont été, à l'Holocène, recapturés par le cours principal brusquement détourné vers le Sud (MICHEL, 1973). Ainsi, dans l'ultime partie de son cours, le Sénégal abandonne la direction Est-Ouest pour obliquer vers le Sud et longer la mer en s'en rapprochant progressivement. Au niveau et en aval de la ville de St Louis, le fleuve n'est plus séparé de l'Océan que par un unique cordon sableux : la Langue de Barbarie. Large de 200 à 500 mètres et haute de près de 5 mètres, cette barre dunaire de sable fin blanc est la dernière née d'une série de cordon fossiles dont l'âge s'échelonne entre 4 000 et 1 900 ans B.P. (MICHEL, 1973).

Dans son cours inférieur, par suite de la faible pente, le Sénégal ne transporte en période de crue que de fines particules en suspension (diamètre inférieur à 0,05 mm). Si à l'heure actuelle le fleuve Sénégal ne joue donc aucun rôle dans l'édification de la flèche littorale, il peut en revanche contribuer à l'érosion du cordon au cours de la crue. La pression du fleuve, limitée à 3 mois par an, due à l'importance des courants de la lame d'eau douce (0,5 mètre environ au-dessus du niveau moyen de la mer à Saint Louis) peut rendre temporairement fonctionnelles d'anciennes embouchures.

## 2. Mécanismes de la migration

Le maintien d'une embouchure soit à l'extrémité, soit le plus souvent au travers du cordon littoral, est essentiellement le résultat de l'influence des courants de marées (TRICART, 1961 ; GAC *et al.*, 1982). En effet, on rencontre sur les côtes du Sénégal des flèches semblables qui ne coïncident pas nécessairement avec une importante arrivée actuelle d'eau douce (BARUSSEAU, 1980). La Langue de Barbarie en fournit le "prototype" mais on les observe également au sud de Dakar (pointes de Sarène et de Joal, flèche de Sangomar).

L'embouchure du Sénégal est caractérisée par sa mobilité. Tout en conservant une largeur assez constante d'ordre kilométrique, la passe subit une translation vers le Sud. Ce déplacement implique une mobilisation et un dépôt de sable sur le bord nord et simultanément une érosion sur le bord sud. Au bout d'une période d'environ 14 ans en moyenne (GAC *et al.*, 1982), durant laquelle l'embouchure progresse vers le Sud, une nouvelle brèche se produit dans le cordon littoral à 7-8 km au Nord, l'ancienne embouchure se ferme. Il faut remarquer que l'ouverture d'une nouvelle passe creusée dans le cordon n'entraîne pas la disparition de sa partie aval (fig. 5) : au contraire, celle-ci subsiste et peut se rattacher au continent par son extrémité méridionale. Il se forme alors au Sud de la passe une lagune dont l'étendue est peu à peu réduite par la migration de la nouvelle embouchure.

## 3. Facteurs de la translation

De nombreuses études effectuées en vue d'aménagements portuaires ont souligné le rôle primordial de la dynamique littorale dans la construction et l'érosion du cordon sableux. Les résultats de ces travaux peuvent être résumés en soulignant plusieurs points :

- La Langue de Barbarie est une formation marine issue de la dérive littorale, parallèle à la côte et orientée vers le Sud. Ce courant est la résultante du déferlement des houles du nord-ouest qui atteignent la côte avec une incidence de 18°, dans la zone de déferlement.
- La vitesse du courant et donc le transport littoral sont fonction de l'énergie de la houle. Cette puissance de la houle augmente en saison sèche et coïncide avec la progression de l'embouchure vers le sud.
- La partie active du transit littoral est localisée à faible profondeur (de 0 à -250 m IGN) dans la zone des brisants où le courant atteint sa valeur maximale (0,8 m/s).

- Parallèlement à la côte, il existe une ou deux barres sableuses immergées. La première, située à environ 100 m du rivage, est permanente ; la seconde est visible sur les photos aériennes de la saison sèche à près de 400 m de la côte, lorsque la dérive littorale est à son maximum (IVANOV, 1969).

Le principal enseignement est qu'il existe une relation directe entre le transit littoral et l'énergie cinétique de la houle. On sait que les houles sont engendrées par l'action du vent soufflant à la surface de l'eau. Le souffle de l'alizé maritime peut être considéré comme responsable des houles du nord-ouest, de la dérive littorale et de la migration de l'embouchure qui en résultent.

#### 4. Déplacements de l'embouchure depuis 1850

Les déplacements de l'embouchure (repérés arbitrairement par rapport à l'île de St Louis) ont été partiellement reconstitués à partir d'anciens documents cartographiques (DELISLE, 1726 ; D'AVEZAC, 1840 ; HUBERT, 1921), d'étudier sur la Langue de Barbarie (CHUDEAU, 1921 ; JOIRE, 1947 ; GUILCHER et NICOLAS, 1954 ; MICHEL, 1973) ou encore sur l'invasion marine de l'estuaire du fleuve (ROCHETTE, 1974). Les données principales sont indiquées dans le tableau I et illustrées par la figure 6a.

D'anciennes embouchures avaient été reconnues au nord de St Louis : l'un des premiers débouchés connus avec certitude est le marigot de Niader (dit marigot des Maringouins), situé à 66 km au nord de St Louis. D'autres traces d'embouchures ont été décelées au nord de Ndiago et de Salsal (NICOLAS, 1954).

L'ouverture à proximité de St Louis date du milieu du XVII<sup>ème</sup> siècle (JOIRE, 1947 ; TRICART, 1961), et depuis 1850 il n'y aurait jamais eu de nouvelles communications fleuve/océan au nord de la ville<sup>(1)</sup>. L'embouchure du Sénégal s'est alors acheminée très régulièrement vers le sud, avec par intermittence des replis de 4 à 5 km vers le nord.

Depuis son origine, le cordon littoral extrêmement mobile ne s'est ni élargi, ni surélevé ; il n'a cependant pas cessé de se développer, de s'étendre et de reprendre inlassablement après chaque rupture sa progression vers le sud.

- de 1850 à 1900, 7 ruptures importantes ont été dénombrées ; la plus importante a eu lieu en 1884 en provoquant le démantèlement du cordon sableux sur près de 4 km (l'allongement de 24 km entre 1850 et 1851 paraît trop considérable pour être vraisemblable) ;
- depuis 1900, 13 ruptures d'importance inégale se sont produites : la plus connue au mois de mars 1959 (BRIGAUD, 1961), la plus récente à 1973.

---

(1) : NICOLAS (1954) signale que l'île de St Louis, établie sur un banc de sable, n'aurait pu exister à son emplacement actuel qu'après la migration de l'embouchure vers une position plus méridionale. Sinon, elle aurait disparu comme beaucoup d'autres îles avec les divagations de l'embouchure.

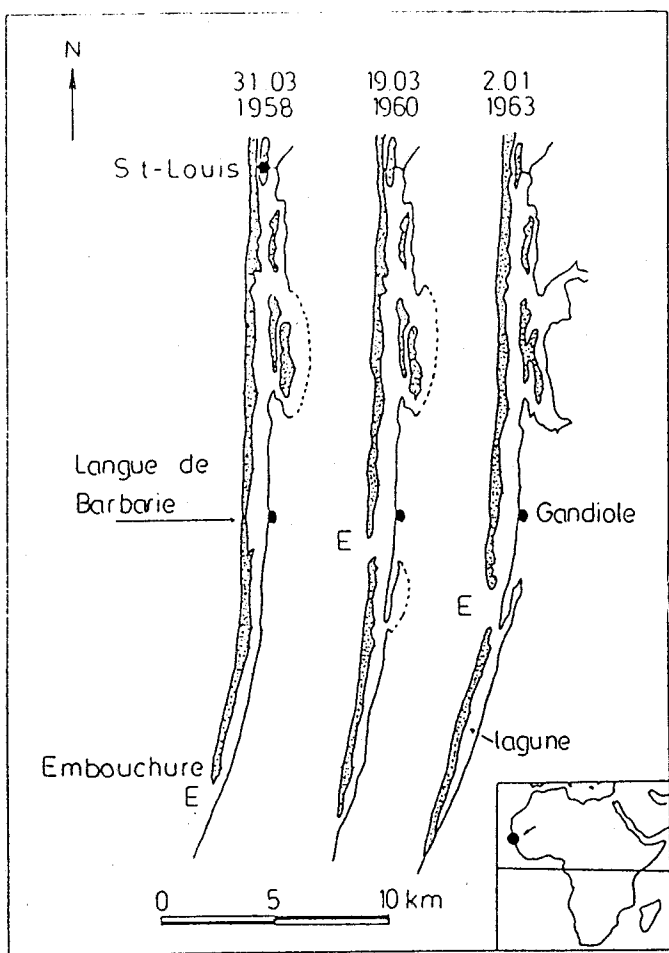


Figure 5 :

Mécanismes de la migration de l'embouchure du Sénégal. Evolution de la position de l'embouchure de mars 1958 à janvier 1983 (MONTEILLET *et al.*, 1980).

Tableau I : Extension de la Langue de Barbarie et position de l'embouchure du Sénégal depuis 1658.

Année	km	Année	km	Année	km	Année	km
1658	2.5	1872	10.3	1921	16.0	1960	18.9
1726	10.0	1874	11.5	1921	21.0	1962	18.0
1790	4.5	1878	13.0	1923	15.0	1963	17.7
1801	27.5	1882	17.0	1928	24.2	1966	20.1
1810	6.0	1883	14.0	1929	20.8	1967	21.3
1825	14.0	1884	18.3	1932	23.4	1968	22.2
1840	20.0	1884	14.4	1936	15.7	1969	22.5
1850	3.4	1887	12.1	1945	23.9	1969	22.8
1851	27.5	1889	15.7	1948	16.8	1970	20.0
1854	4.5	1894	14.3	1950	25.5	1971	24.3
1856	4.5	1897	12.8	1955	25.5	1973	15.0
1861	10.9	1904	18.3	1958	28.0	1977	16.3
1862	8.5	1905	15.0	1958	27.0	1978	19.6
1864	6.0	1906	15.7	1959	27.0	1980	21.5
1870	12.0	1909	20.0	1959	16.5	1981	21.8
1872	12.4	1913	20.0	1960	16.7	1983	21.0

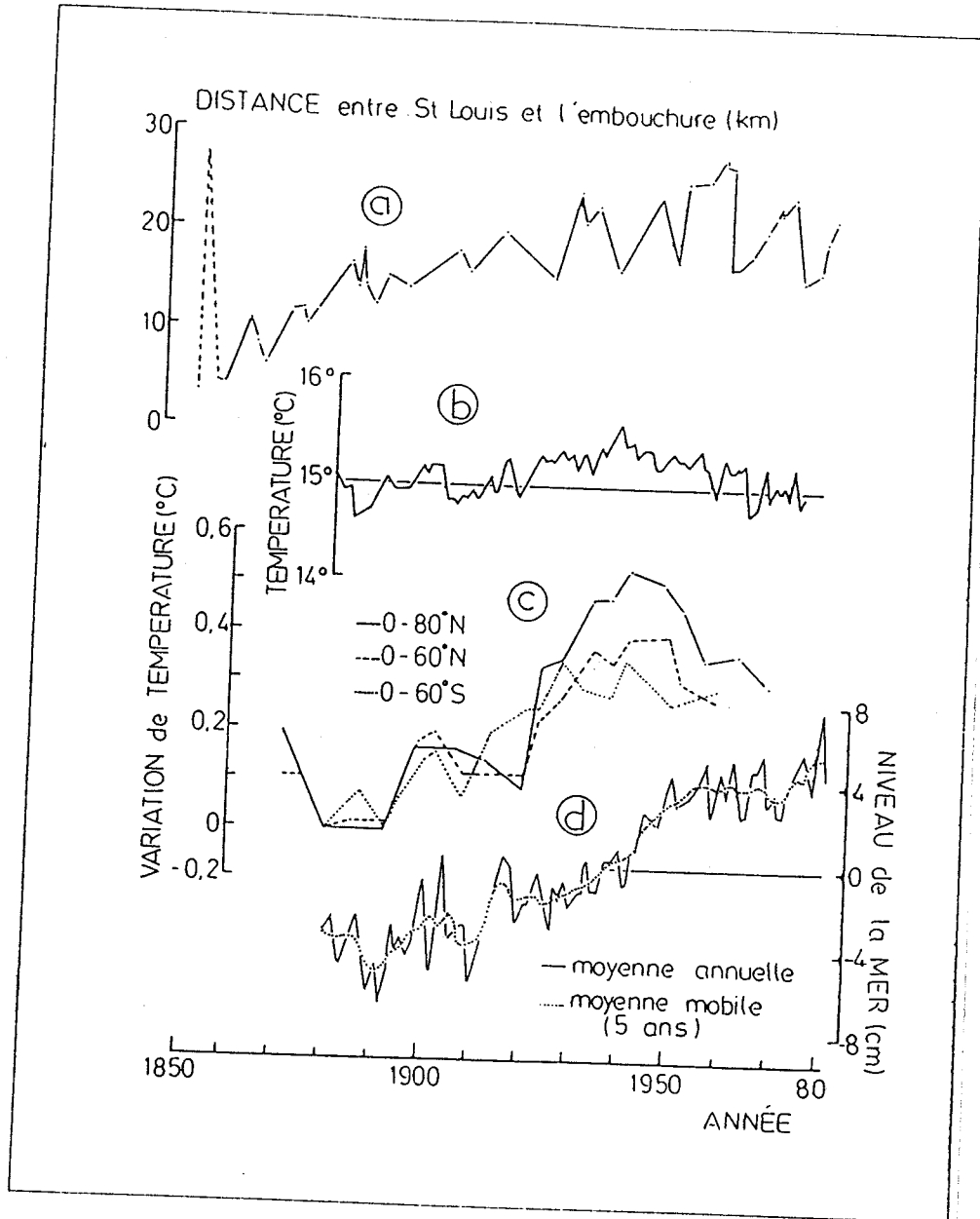


Figure 6 : Distance entre St-Louis et l'embouchure (a). Température de l'air dans l'hémisphère Nord (b). Température de l'atmosphère (c). Evolution du niveau de la mer.

En ne tenant compte que des ruptures les plus importantes, GAC *et al.* (1982) ont avancé l'hypothèse d'un affaiblissement du cordon littoral tous les 14 ans, périodicité qui a souvent été évoquée pour expliquer les variations enregistrées dans l'importance de la remontée saline.

Depuis un siècle, les variations de la position de l'embouchure suivent celles des températures de l'air dans l'hémisphère nord (fig. 6a, b). Les deux courbes se décomposent en trois périodes sensiblement identiques :



- une première phase globalement ascendante jusqu'en 1920 ;
- une relative stabilité, de 1920 à 1960 ;
- l'esquisse d'une phase descendante depuis 1960,

qui confirment le lien étroit entre les températures de l'hémisphère nord, les déplacements de l'embouchure et le régime des alizés. La relation avec les variations de la température moyenne annuelle de l'atmosphère (fig. 6c) est moins marquée de 1920 à 1950 où l'on observe un brusque réchauffement de la terre sous toutes les latitudes, suivi d'une phase plus atténuée de refroidissement. Enfin, l'évolution du niveau moyen des mers (fig. 6d) suit dans l'ensemble et plus ou moins fidèlement celle des migrations de l'embouchure qui pourrait, si ceci était confirmé, constituer une sorte de marégraphe mondial.

En définitive, il apparaît que la propagation des eaux marines dans la vallée du fleuve et l'abscisse maximale de la salure, variable chaque année, soient fortement tributaires de la situation géographique de l'embouchure et de ses caractéristiques topographiques.

#### IV. FORMULATION DES PRINCIPES METHODOLOGIQUES DE ROCHETTE (1964) - DIFFICULTÉS D'APPLICATION

La remontée des eaux saumâtres baptisée "langue salée" a fait l'objet d'études importantes justifiées essentiellement par toute l'infrastructure agricole mise en place ou en projet dans toute la basse vallée du Sénégal (REIZER, 1971). Dans ce domaine, les travaux qui font autorité sont ceux de ROCHETTE (1964) qui a particulièrement attiré l'attention sur les trois principaux aspects de la salure dans le Bas-Sénégal : l'évolution à l'échelle d'une marée, l'évolution de la salure au cours de la décrue et la phase finale concernant le retrait des eaux saumâtres au cours de la crue.

##### A - LES PRINCIPES METHODOLOGIQUES DE ROCHETTE (1964)

Les travaux de ROCHETTE (1964) ont déjà été largement synthétisés par REIZER et nous emprunterons à cet auteur l'essentiel de ses conclusions.

##### 1. Evolution de la salure à l'échelle d'une marée

La salinité ne présente aucune variation perceptible en relation avec sa répartition transversale à profondeur constante. La salinité le long d'une verticale augmente avec la profondeur, mais cette augmentation est très irrégulière. L'allure des courbes isohalines est différente suivant l'importance de la pénétration saline :

- lorsque la pénétration saline est inférieure à 100 km, soit jusqu'à l'aval de Diawar, la configuration des isohalines peut présenter tous les aspects intermédiaires entre deux situations extrêmes : stratification maximale avec une très faible inclinaison des isohalines (25 cm/km) qui indique des eaux peu mélangées et de la présence d'un véritable "coin salé" ; stratification minimale avec des isohalines fortement inclinées (de 2,5 m à 0,60 m/km) significatives d'eaux bien brassées et à mélange accentué ;
- lorsque la pénétration saline est supérieure à 100 km, les divergences sur un cycle de marée s'atténuent. La répartition spatiale de la salinité est pratiquement indépendante des conditions de marée.

Cette différence s'explique selon ROCHETTE (1964) par une diminution progressive de la poussée des eaux douces sur les eaux saumâtres au fur et à mesure que la salure envahit le lit du fleuve. Au début de l'intrusion saline, l'eau douce s'écoule sur l'eau marine sous-jacente (mélange réduit, isohalines horizontales) ; vers la fin de la saison sèche, les eaux sont fortement mélangées et les isohalines sont verticales.

## 2. Evolution de la salure au cours de la décrue

A partir des campagnes de mesure en 1962 et 1963 et des observations tout le long de la vallée, ROCHETTE (1964) a pu tracer les courbes d'évolution des salinités journalières et en déduire les salinités moyennes de base en "lissant" les courbes précédentes. Il en tire les conclusions suivantes :

- le niveau moyen à l'embouchure qui produit, suivant le sens de son évolution, une progression ou un retrait de la salure n'a pas d'incidence significative sur les variations de salinité.
- Au début de l'intrusion saline, l'influence relative du marnage se traduit par une augmentation de la salinité en période de morte-eau et par une diminution de la salinité en période de vive-eau. Lorsque la pénétration saline devient importante, la stratification disparaît et les effets du marnage ne se font plus ressentir sur la salinité.
- Enfin résultat capital pour la compréhension du phénomène, il précise le rôle fondamental joué par l'importance du débit fluvial. Il existe, souligne ROCHETTE (1964), "une valeur du débit fluvial en dessous de laquelle l'évolution de la salinité ne sera pratiquement plus conditionnée par le débit mais dépendra alors essentiellement du temps." "Cette valeur", poursuit l'auteur, "est délicate à déterminer." Nous l'avons fixée arbitrairement à  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , valeur volontairement élevée pour tenir compte de l'avantage que présente la substitution du paramètre temps au paramètre débit quand ce dernier ne peut être déterminé avec précision."
- En conséquence, "la salinité moyenne à la distance  $x$  de l'embouchure est donnée suivant la nature du paramètre de référence par l'un des graphiques (fig. 7 et 8), dans lesquels les résultats sont mis sous une forme directement exploitable qui permette de déterminer la salinité en fonction du débit ( $D > 50 \text{ m}^3/\text{s}$ ), et en fonction du temps pour  $D < 50 \text{ m}^3/\text{s}$ ."
- L'auteur souligne enfin que l'intrusion des eaux marines est possible dès que le débit tombe en dessous de  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  à l'embouchure.

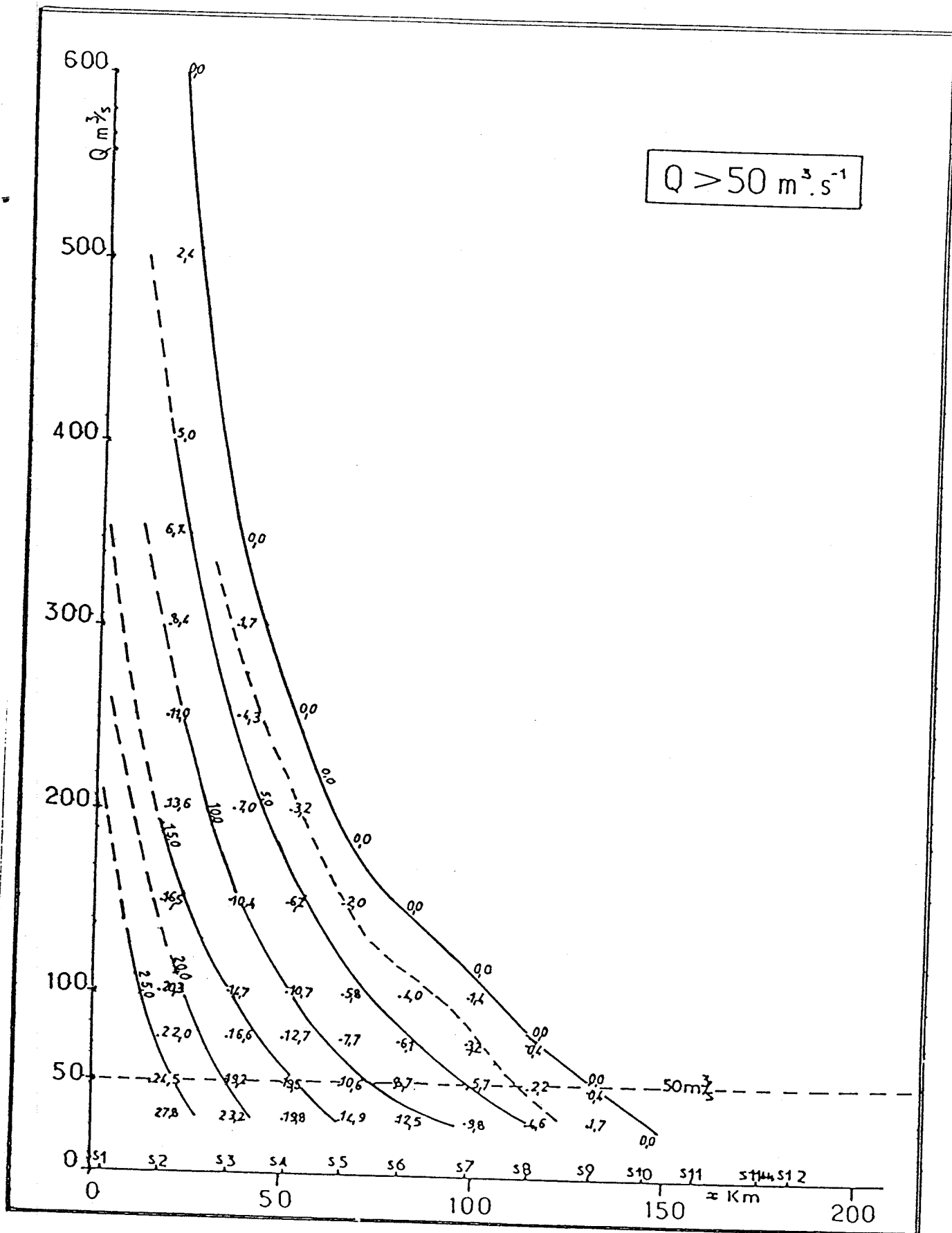


Figure 7 : Relation débit/salinité moyenne de base ( $Q > 50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (ROCHETTE, 1964).

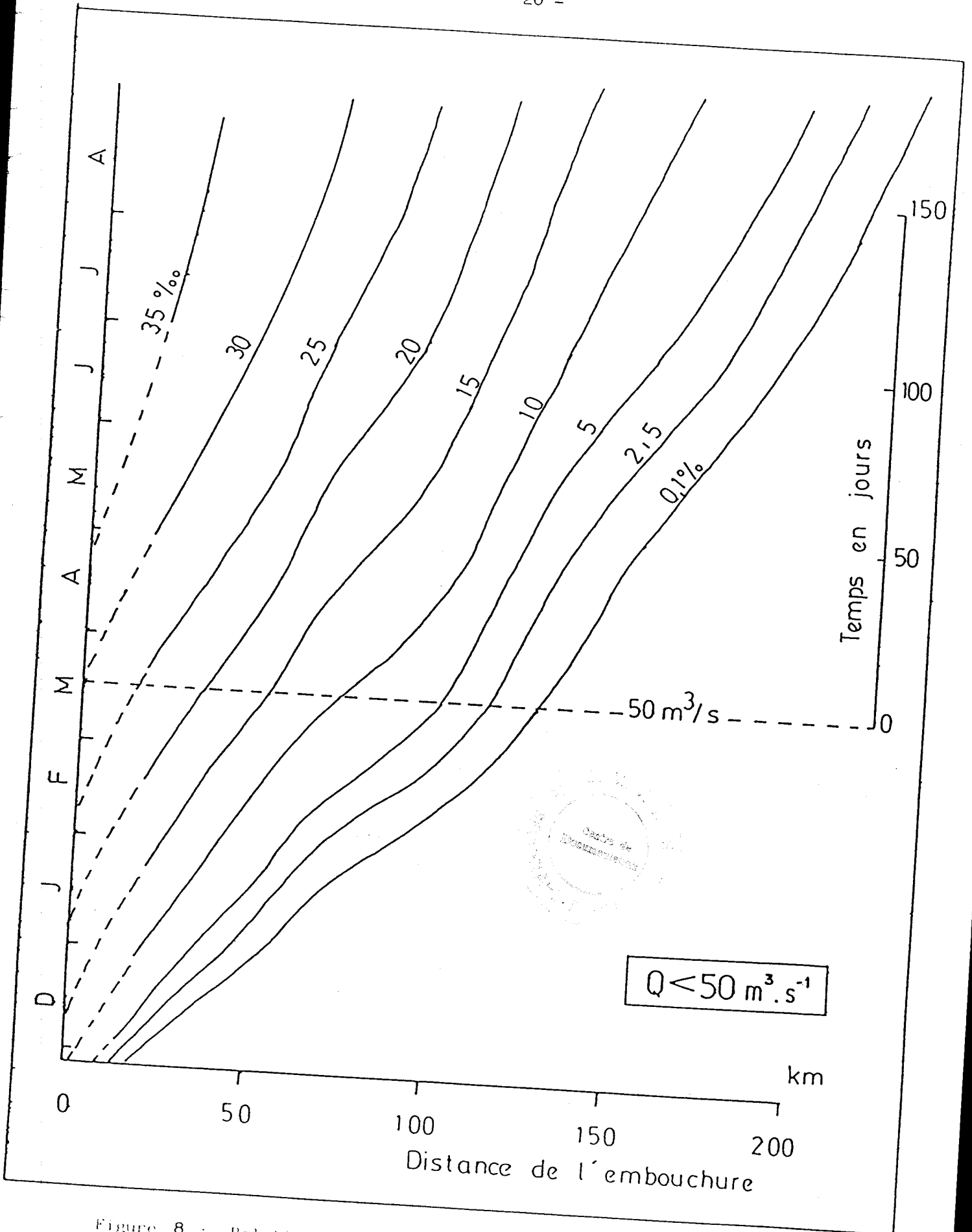


Figure 8 : Relation temps/salinité moyenne de base ( $Q > 50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (ROCHETTE, 1964).

### 3. Le retrait des eaux saumâtres

L'étude de ROCHETTE (1964) le conduit à la conclusion que, durant la phase de retrait, l'évolution spatio-temporelle de la salinité dépend étroitement des deux paramètres (débit et temps), autrement dit en définitive, du volume total écoulé.

"A la condition généralement réalisée, d'un débit constamment supérieur au débit juste nécessaire pour provoquer la régression de la salure, l'évolution de la salinité pendant le retrait dépendra essentiellement du volume écoulé depuis l'arrivée de l'onde de crue, et la forme d'écoulement du débit n'interviendra pratiquement pas." Par des approches successives, il estime à 900 millions de  $m^3$  le volume nécessaire (de la nouvelle onde de crue) pour que la salure soit entièrement retirée à l'embouchure.

#### B - LES DIFFICULTES D'APPLICATION

Comme nous venons de le préciser, trois seuils dans les écoulements du fleuve doivent être connus avant de pouvoir suivre l'évolution saisonnière de la salinité. Ces trois valeurs ( $50 m^3/s$ ,  $600 m^3/s$  et  $900.10^6 m^3$ ) sont indéterminables directement à l'embouchure : elles doivent être évaluées à partir des données recueillies plus à l'amont.

##### 1. Le seuil des $600 m^3/s$ : début de l'intrusion saline

De 1903 à 1964, la monographie hydrologique du fleuve Sénégal (ROCHETTE, 1974) donne, pour chaque phase de tarissement, la date présumée où le débit franchit le seuil de  $600 m^3/s$ . On ne relève sur l'ensemble de cette période que 6 lacunes mineures (1903-1904 ; 1912-1913 ; 1915-1916 ; 1925-1926 ; 1932-1933 ; 1947-1948). Dans ces six cas, l'estimation des débits par les hydrologues de l'ORSTOM s'arrête en général à une valeur proche de  $600 m^3/s$  ; deux années seulement font exception à la règle : 1903-1904 ( $800 m^3/s$  le 11/11/1903) et 1915-1916 ( $700 m^3/s$  le 12/11/1915). La formule de propagation entre bief amont et bief aval a alors été utilisée pour situer le passage à  $600 m^3/s$ .

Pour les années récentes (de 1964 à 1983), les difficultés les plus importantes concernent les années 1964-1965 ( $2 680 m^3/s$  le 2 novembre 1964), 1967-1968 ( $2 100 m^3/s$  le 30 novembre 1967), 1969-1970 ( $1 560 m^3/s$  le 30 novembre 1969). Pour ces trois années, nous n'avons pas d'autres possibilités que d'utiliser à nouveau la formule de propagation des eaux dans la vallée proposée par ROCHETTE (1974). Les résultats sont évidemment très approximatifs et doivent être considérés sous toute réserve.

Enfin, il arrive assez fréquemment qu'une reprise des écoulements (occasionnée par des pluies tardives en fin d'hivernage) provoque un retrait momentané et de courte durée des eaux océaniques déjà "engagées" dans la vallée. La première phase de progression vers l'amont de l'eau salée est alors dédoublée (exemple 1907-1908) et l'invasion saline différée pendant quelques jours.

2. Le seuil de 50 m<sup>3</sup>/s : substitution du paramètre "temps" au paramètre "débit"

C'est le point le plus difficile à évaluer : la raison essentielle tient au fait que durant toute la période précédant la fin de la seconde guerre mondiale, les hauteurs limnimétriques en basses-eaux étaient peu (postes de Bakel, Matam, Kaédi) ou pas (Podor, Dagana) relevées.

La méthode a donc consisté à mener tout d'abord une étude critique des observations de chaque année : cette tentative d'extrapolation, des données connues, a nécessité de reprendre tous les manuscrits originaux pour en définitive aboutir à la conclusion : que la revalorisation des anciens enregistrements par ROCHETTE (1974) constituait la meilleure approche possible et qu'il était utopique d'envisager une quelconque amélioration des résultats de cet auteur : ceci clos le débat sur ce problème.

Dans un premier temps, les débits moyens journaliers manquant à la station de Bakel ont été évalués en supposant une décroissance proportionnelle dans l'intervalle séparant deux valeurs données. En fin d'étiage, les erreurs vraisemblables n'ont qu'une incidence mineure ; elles peuvent être bien plus importantes lorsque l'extrapolation porte sur les premières phases de tarissement (en effet, toutes les éventuelles reprises d'écoulement sont alors oblitérées).

La formule de propagation des débits dans la vallée en l'absence de débordements (pas de phénomène d'inondation) a alors été appliquée entre les biefs de Bakel et de Dagana :

$$Q_{D1} = -0,2 Q_{B1} + 0,28 Q_{B0} + 0,92 Q_{D0}$$

Rappelons que  $Q_{B0}$  et  $Q_{D0}$  représentent les débits respectifs à Bakel et Dagana le jour  $j$ ,  $Q_{D1}$  et  $Q_{B1}$  ceux du lendemain. En étudiant le régime des débits pendant l'étiage et l'évolution des volumes stockés dans le lit mineur pendant la phase de tarissement, ROCHETTE (1964) précise que le débit à Dagana de 50 m<sup>3</sup>/s correspond à un débit de 45 m<sup>3</sup>/s le même jour à Bakel.

Nous avons alors deux possibilités :

- connaissant tous les débits journaliers durant les basses-eaux à Bakel et la date où à Dagana le seuil de 600 m<sup>3</sup>/s est franchi, évaluer jour après jour les débits à Dagana jusqu'au seuil de 50 m<sup>3</sup>/s ;
- admettre que la substitution du paramètre débit par le paramètre temps est effective le jour où à Bakel le débit est de 45 m<sup>3</sup>/s.

La seconde possibilité consiste en réalité à entreprendre les calculs en sens inverse. On admet que  $Q_{D1} = 50$  m<sup>3</sup>/s et on remonte chronologiquement dans le temps à l'aide des débits de Bakel ; les débits à Dagana sont obtenus par :  $Q_{D0} = (50 + 0,20.45 - 0,28 Q_{B0})/0,92$ . Les calculs menés sur quelques phases de tarissement montrent que l'on aboutit à chaque fois à une "impasse", le terme soustractif  $(0,28 Q_{B0})$  devenant au bout de quelques jours plus important que le gain dû à  $Q_{D1}/0,92$ .

Pour les 80 années, l'application de la formule de propagation donne des résultats sensiblement identiques ; le seuil de 50 m<sup>3</sup>/s à Dagana se présente en général avec un retard de 8 à 10 jours par rapport à l'enregistrement du débit de 45 m<sup>3</sup>/s à Bakel. En moyenne, la valeur de 50 m<sup>3</sup>/s est observée à l'aval, quant à l'amont, les débits sont de l'ordre de 37 m<sup>3</sup>/s.

3. Le seuil des  $900.10^6 \text{ m}^3$  et la relation temporelle entre les volumes écoulés à Bakel et à Dagana au début de la crue

Le retrait de la salure a été défini par ROCHETTE (1964) en fonction des volumes totaux écoulés à Dagana, eux-mêmes déduits de ceux des stations de Ngoui et de Saldé. L'étude statistique sur de nombreuses années nécessite donc de faire appel aux relevés limnimétriques de ces deux stations qui, malheureusement, présentent de nombreuses lacunes. Il n'y avait alors pas d'autres possibilités ni d'autres alternatives que de prendre en compte les données de Bakel.

Le fait aussi d'admettre comme constant le volume global nécessaire au retrait total de la salure introduit, selon l'importance de l'intrusion qui précède la nouvelle onde de crue, une surestimation ou une sous-évaluation du temps de présence des eaux océaniques dans la vallée du fleuve. Faut de pouvoir disposer de mesures précises et quotidiennes de salinité sur de nombreuses années, nous avons conservé l'hypothèse d'un volume constant mais modifié celle qui consiste à admettre un temps moyen de propagation constant.

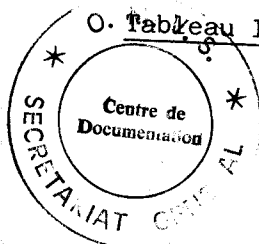
En effet, pour chaque crue, nous avons repris toutes les hauteurs limnimétriques disponibles à toutes les stations de la vallée pour déterminer avec le plus de précision possible l'arrivée de la crue à Dagana (ceci revient aussi à fixer la date où la salinité est à son maximum dans la vallée). Après cette compilation rigoureuse d'une masse importante de documents et l'étude critique entreprise sur les observations anciennes, nous pensons, qu'à l'exception de quelques années (1909-1910, 1910-1911, 1913-1914, 1919-1920), notre erreur d'estimation est de l'ordre de 3 à 4 jours. Pour les années récentes, l'évaluation est plus précise puisqu'on dispose en effet de mesures de salinité ou encore d'observation sur la charge solide (la reprise des écoulements s'accompagne en effet d'une augmentation des concentrations de matières en suspension). Une fois fixé le jour de la salinité maximum, on évalue en fonction des écoulements observés à Bakel la durée de la phase de retrait.

V. L'INVASION MARINE DANS LA BASSE VALLÉE DU FLEUVE SÉNÉGAL AU COURS DES 80 DERNIÈRES ANNÉES (1903-1983)

A - CARACTERISTIQUES ESSENTIELLES DE LA ZONE D'INTRUSION D'EAU SAUMATRE - CHRONOLOGIE DES DIFFÉRENTES PHASES

Deux aspects de la salinité dans les eaux du Bas-Sénégal sont particulièrement intéressants à préciser : l'étendue de la zone atteinte et la durée du phénomène. Les différentes phases ont été déterminées en adoptant comme valeur limite de perception de l'intrusion marine une concentration en solution de 0,1 g/l (rappelons que la charge dissoute des eaux du Sénégal varie entre 37 et 75 mg/l). La chronologie des différentes phases est indiquée dans le tableau II.

- dans la colonne 1 figure la date à partir de laquelle l'eau est douce dans toute la vallée ;



O. Tableau II : Chronologie des différentes phases de l'intrusion saline de 1903 à 1983 - (1) eau douce dans toute la vallée ; (2) date où D = 600 m<sup>3</sup>/s ; (3) date où D = 50 m<sup>3</sup>/s ; (4) maximum de l'incursion marine ; (5) date du retrait total.

Cycles hydrologiques	1	2	3	Maximum 4	5	Cycles hydrologiques	1	2	3	Maximum 4	5
1902-1903				(fin 06.02)	19.07.03	1943-1944	05.08.43	25.11.43	09.03.44	05.07.44	15.08.44
1903-1904	20.07.03	24.11.03	20.03.04	09.07.04	30.07.04	1944-1945	16.08.44	14.11.44	06.03.45	15.07.45	02.08.45
1904-1905	31.07.04	30.11.04	28.03.05	22.06.05	21.07.05	1945-1946	03.08.45	01.12.45	07.03.46	09.07.46	07.08.46
1905-1906	22.07.05	14.12.05	09.04.06	10.06.06	22.07.06	1946-1947	08.08.46	03.12.46	17.03.47	15.07.47	09.08.47
1906-1907	23.07.06	03.12.06	22.04.07	13.07.07	05.08.07	1947-1948	10.08.47	16.11.47	08.03.48	30.06.48	30.07.48
1907-1908	06.08.07	19.11.07	08.04.08	20.06.08	25.07.08	1948-1949	01.08.48	27.11.48	08.03.49	10.07.49	08.08.49
1908-1909	26.07.08	25.11.08	21.03.09	14.06.09	13.07.09	1949-1950	09.08.49	09.11.49	22.02.50	08.07.50	31.07.50
1909-1910	14.07.09	02.12.09	26.03.10	30.06.10	22.07.10	1950-1951	01.08.50	15.12.50	21.03.51	23.06.51	01.08.51
1910-1911	23.07.10	22.11.10	15.03.11	19.06.11	25.07.11	1951-1952	02.08.51	28.12.51	07.04.52	30.06.52	01.08.52
1911-1912	26.07.11	25.11.11	13.03.12	30.06.12	31.07.12	1952-1953	02.08.52	11.12.52	16.03.53	25.06.53	23.07.53
1912-1913	01.08.12	18.11.12	19.03.13	30.06.13	30.07.13	1953-1954	24.07.53	24.11.53	21.03.54	14.06.54	15.07.54
1913-1914	31.07.13	09.11.13	06.02.14	06.07.14	31.07.14	1954-1955	16.07.54	06.12.54	23.04.55	20.06.55	21.07.55
1914-1915	01.08.14	10.11.14	14.03.15	19.06.15	29.07.15	1955-1956	22.07.55	15.12.55	12.04.56	07.07.56	31.07.56
1915-1916	30.07.15	16.11.15	08.03.16	05.07.16	29.07.16	1956-1957	01.08.56	09.12.56	04.04.57	26.06.57	20.07.57
1916-1917	30.07.16	24.11.16	16.03.17	08.07.17	12.08.17	1957-1958	21.07.57	18.12.57	10.04.58	23.06.58	21.07.58
1917-1918	13.08.17	17.11.17	06.03.18	17.06.18	23.07.18	1958-1959	22.07.58	14.12.58	20.04.59	20.06.59	22.07.59
1918-1919	24.07.18	09.12.18	19.04.19	18.06.19	28.07.19	1959-1960	23.07.59	28.11.59	22.03.60	31.06.60	26.07.60
1919-1920	29.07.19	16.11.19	15.03.20	21.06.20	14.07.20	1960-1961	27.07.60	26.11.60	21.03.61	28.06.61	27.07.61
1920-1921	15.07.20	25.11.20	31.03.21	30.06.21	01.08.21	1961-1962	28.07.61	28.11.61	20.03.62	27.06.62	28.07.62
1921-1922	02.08.21	08.11.21	26.02.22	25.06.22	31.07.22	1962-1963	29.07.62	06.12.62	16.03.63	12.07.63	10.08.63
1922-1923	01.08.22	12.12.22	03.04.23	17.06.23	23.07.23	1963-1964	11.08.63	06.12.63	16.03.64	23.06.64	23.07.64
1923-1924	24.07.23	06.12.23	23.03.24	23.06.24	14.07.24	1964-1965	24.07.64	07.12.64	04.04.65	07.07.65	09.08.65
1924-1925	15.07.24	12.12.24	16.04.25	18.06.25	20.07.25	1965-1966	10.08.65	13.12.65	04.04.66	02.07.66	16.08.66
1925-1926	21.07.25	10.12.25	08.04.26	30.06.26	26.07.26	1966-1967	17.08.66	20.12.66	06.04.67	01.07.67	21.07.67
1926-1927	27.07.26	21.11.26	21.03.27	30.06.27	28.07.27	1967-1968	22.07.67	24.12.67	16.04.68	11.07.68	27.08.68
1927-1928	29.07.27	17.12.27	13.04.28	29.06.28	28.07.28	1968-1969	29.08.68	07.11.68	04.03.69	12.07.69	14.08.69
1928-1929	29.07.28	10.12.28	13.03.29	14.06.29	12.07.29	1969-1970	15.08.69	18.12.69	28.03.70	26.07.70	10.09.70
1929-1930	13.07.29	06.12.29	17.03.30	17.06.30	21.07.30	1970-1971	11.09.70	11.11.70	02.03.71	18.07.71	15.08.71
1930-1931	22.07.30	03.12.30	05.04.31	24.06.31	20.07.31	1971-1972	16.08.71	10.11.71	24.02.72	15.07.72	24.08.72
1931-1932	21.07.31	02.12.31	31.03.32	14.06.32	21.07.32	1972-1973	25.08.72	15.10.72	19.01.73	22.06.73	02.08.73
1932-1933	22.07.32	03.12.32	19.03.33	19.06.33	12.07.33	1973-1974	03.08.73	21.10.73	19.01.74	17.07.74	09.08.74
1933-1934	13.07.33	25.11.33	13.03.34	11.07.34	08.08.34	1974-1975	10.08.74	15.11.74	08.02.75	19.07.75	11.08.75
1934-1935	09.08.34	30.11.34	19.03.35	24.06.35	22.07.35	1975-1976	12.08.75	11.11.75	11.02.76	16.07.76	09.08.76
1935-1936	23.07.35	10.12.35	30.03.36	15.06.36	28.07.36	1976-1977	10.08.76	27.11.76	23.02.77	27.07.77	29.08.77
1936-1937	29.07.36	12.12.36	11.04.37	09.07.37	05.08.37	1977-1978	30.08.77	25.10.77	10.01.78	13.07.78	17.08.78
1937-1938	06.08.37	27.11.37	21.03.38	04.07.38	24.07.38	1978-1979	18.08.78	16.11.78	12.02.79	10.07.79	09.08.79
1938-1939	25.07.38	14.12.38	27.03.39	07.07.39	04.08.39	1979-1980	10.08.79	13.10.79	26.01.80	18.07.80	20.08.80
1939-1940	05.08.39	22.11.39	16.03.40	05.07.40	16.08.40	1980-1981	21.08.80	17.10.80	19.01.81	05.07.81	08.08.81
1940-1941	17.08.40	28.11.40	17.03.41	18.07.41	12.08.41	1981-1982	09.08.81	27.10.81	24.01.82	21.07.82	23.08.82
1941-1942	13.08.41	09.11.41	21.02.42	16.07.42	07.08.42	1982-1983	24.08.82	22.10.82	14.01.83	14.07.83	12.08.83
1942-1943	08.08.42	31.10.42	23.02.43	01.07.43	04.08.43	1983-1984	13.08.83	(barrage de Rheune le 26/11/83)			



- dans la colonne 2, la date indiquée correspond au jour où l'intrusion saline débute à l'embouchure, c'est-à-dire le moment où le débit devient inférieur à  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  ;
- dans la colonne 3, apparaît la date où le paramètre "temps" se substitue au paramètre "débit" ( $D < 50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ;
- le maximum de la salinité et donc l'abscisse maximale de l'invasion marine sont atteints le jour figurant dans la colonne 4 ;
- enfin, la colonne 5 donne la date du retrait définitif des eaux salées (la nouvelle onde de crue a fait transiter à l'embouchure  $900.10^6 \text{ m}^3$ ). Le lendemain, l'eau est de nouveau douce dans toute la vallée du fleuve.

Le tableau III récapitule en jours la durée des différentes phases ainsi que la répartition dans l'année entre eau douce et eau saumâtre à l'embouchure.

### 1. Présence d'eau douce des sources à l'embouchure

En général, l'eau douce s'installe dans toute la vallée du Sénégal entre août et novembre. Une analyse fréquentielle des 80 années d'observation permet de préciser qu'en moyenne, la crue du fleuve se maintient à l'embouchure du 3 août au 27 novembre, soit pendant une période moyenne de 117 jours (GAC *et al.*, 1983). Les phases 1 les plus précoces ont été observées en 1929 et 1933 (13 juillet), et la plus tardive en 1970 (11 septembre). Les durées extrêmes de cette présence d'eau douce dans toute la vallée concernent respectivement l'année 1972 (51 jours : du 25 août au 15 octobre) et l'année 1967 (155 jours : du 22 juillet au 24 décembre).

**Tableau III :** Variations annuelles de la durée des différentes phases et de l'intrusion (jours) ; abscisse maximale atteinte par la salure (km).

Cycles hydrologiques						Abcisse Max (km)	Cycles hydrologiques						Abcisse Max (km)	Cycles hydrologiques						Abcisse Max (km)
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5			1	2	3	4	5	
1903-04	127	117	112	21	250	194	1931-32	134	120	76	37	233	172	1959-60	128	115	101	26	242	188
04-05	121	119	87	29	235	179	32-33	135	106	93	23	222	183	60-61	123	115	100	29	244	187
05-06	145	116	63	42	221	163	33-34	135	109	121	28	258	199	61-62	123	112	99	32	243	187
06-07	133	140	83	23	246	176	34-35	113	109	98	28	235	186	62-63	130	100	119	29	248	194
07-08	105	141	74	35	250	171	35-36	140	111	78	43	232	172	63-64	117	101	100	30	231	188
08-09	122	115	86	29	230	179	36-37	137	120	90	27	237	181	64-65	136	118	95	33	246	184
09-10	140	114	97	22	233	186	37-38	113	114	106	28	248	191	65-66	125	112	90	45	247	181
10-11	122	113	97	36	246	185	38-39	143	105	103	28	236	189	66-67	125	117	87	20	224	178
11-12	122	109	110	31	250	199	39-40	109	115	112	42	269	195	67-68	155	113	87	47	247	178
12-13	109	121	104	30	255	194	40-41	103	109	124	25	258	201	68-69	70	117	131	33	281	204
13-14	101	89	151	25	265	216	41-42	88	104	146	22	272	211	69-70	124	100	121	46	267	199
14-15	101	124	98	40	262	186	42-43	84	115	129	34	278	203	70-71	61	111	139	28	278	207
15-16	109	112	120	24	256	200	43-44	112	105	119	41	265	198	71-72	86	106	143	40	289	210
16-17	117	113	115	35	263	196	44-45	90	112	122	18	252	205	72-73	51	96	155	41	292	214
17-18	96	108	104	36	248	190	45-46	120	96	125	29	250	201	73-74	79	90	180	23	293	225
18-19	138	131	61	40	232	161	46-47	117	104	121	25	250	199	74-75	97	85	162	23	270	217
19-20	110	119	99	23	241	186	47-48	98	113	115	30	256	196	75-76	91	92	157	24	273	218
20-21	133	127	92	32	251	182	48-49	118	101	125	29	255	196	76-77	109	88	155	33	276	203
21-22	98	110	120	36	266	199	49-50	91	105	137	23	265	207	77-78	56	77	184	35	296	228
22-23	133	112	76	36	224	171	50-51	136	96	95	39	230	187	78-79	90	88	149	30	267	211
23-24	135	108	93	21	222	182	51-52	148	101	85	32	218	179	79-80	64	105	175	33	313	223
24-25	150	125	64	32	221	163	52-53	131	95	102	28	225	189	80-81	57	94	168	34	296	220
25-26	142	119	84	26	229	177	53-54	123	117	86	31	234	179	81-82	79	89	179	33	291	226
26-27	117	120	102	28	250	189	54-55	143	138	58	31	227	159	82-83	61	82	178	35	295	221
27-28	141	118	78	29	225	173	55-56	145	119	87	24	220	179	83-84	51	(81)	181	32	294	(227)
28-29	134	93	94	28	215	181	56-57	130	116	84	24	224	179	84-85						(> 225)
29-30	146	101	93	34	228	183	57-58	150	113	75	28	216	171	( ) estimés : implantation de Rheune en novembre 83 et reconstruction en novembre 84						
30-31	134	123	81	26	230	172	58-59	145	127	62	32	221	162							

Remarques : (1) : période d'eau douce ; (2) :  $50 \text{ m}^3/\text{s} < D < 600 \text{ m}^3/\text{s}$  ; (3) :  $D < 50 \text{ m}^3/\text{s}$  ; (4) : phase de retrait de la salure ; (5) : durée totale de l'intrusion.

2. Le début de l'intrusion saline ( $D < 600 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Les eaux marines commencent leur remontée dans la vallée du fleuve entre novembre et décembre (en moyenne le 27 novembre). L'intrusion la plus précoce a été observée en 1979 (le 13 octobre), et la plus tardive en 1951 (le 28 décembre).

3. Interdépendance avec le paramètre débit ( $50 \text{ m}^3/\text{s} < D < 600 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Cette seconde phase se termine en général vers le 15 mars : elle dure en moyenne 110 jours avec des valeurs extrêmes de 77 jours en 1977-1978 (du 25 octobre 1977 au 10 janvier 1978) et de 141 jours en 1907-1908 (du 19 novembre 1907 au 8 avril 1908). Cette phase est étroitement liée à la forme du tarissement du fleuve et elle peut se prolonger jusqu'au 23 avril (1955) lorsque la crue a été forte ou au contraire s'achever très tôt après une crue faible (exemple : le 10 janvier 1978).

4. Interdépendance avec le paramètre temps ( $D < 50 \text{ m}^3/\text{s}$ )

L'importance de la pénétration saline pendant cette troisième phase ne dépend plus du débit du fleuve mais de la durée de la période d'étiage ; c'est-à-dire aussi de l'arrivée de l'onde de crue suivante et de la plus ou moins grande précocité de la nouvelle saison des pluies. Lorsqu'elle s'achève, la remontée saline atteint son abscisse maximale dans la vallée du fleuve. Pour fixer les idées, cette pénétration maximum a lieu en moyenne vers le 2 juillet : les dates extrêmes ont été notées en 1906 (10 juin) et en 1977 (27 juillet). Cette troisième phase, assujettie seulement au facteur temps, s'étend en moyenne sur 107 jours, mais elle peut être réduite à 58 jours comme en 1955 (du 23 avril au 26 juin) ou au contraire se prolonger pendant 184 jours comme en 1978 (du 10 janvier au 13 juillet).

5. Le retrait de la salure avec la reprise des écoulements

Elle est provoquée par l'arrivée de la nouvelle onde de crue occasionnée par l'installation de la saison des pluies sur le haut-bassin. Cette phase de retrait est mal connue du fait des nombreuses incertitudes dans l'évaluation des écoulements du fleuve ; c'est aussi la plus brève, la quasi-totalité du sel étant rejetée dans l'Océan au bout d'un mois (31 jours en moyenne). Les durées extrêmes du retrait ont été observées en 1945 (18 jours : du 15 juillet au 2 août) et en 1968 (47 jours : du 11 juillet au 27 août).

Les différentes phases (1, 2 et 3) sont en année moyenne de durée sensiblement égale (117, 110 et 107 jours). Dans ces conditions moyennes, qui correspondent approximativement à celles observées entre les deux cycles hydrologiques 1916-1917 et 1917-1918, la pénétration saline dans la vallée est de l'ordre de 200 km.

La figure 9 et le tableau III illustrent les variations annuelles de la durée des différentes phases, la durée de l'intrusion à la suite de chaque cycle hydrologique et l'abscisse maximale atteinte chaque année par la salure. On constate d'abord que la durée de l'intrusion saline varie de façon considérable d'une année sur l'autre : 215 jours en 1928-1929 et 313 jours en 1979-1980. On remarque ensuite que les remontées minimales ne succèdent pas systématiquement aux crues les plus fortes ; de même, les plus longues intrusions ne suivent pas nécessairement les crues les plus faibles. Les deux exemples précédents en sont la plus belle illustration : la crue de 1928-1929 (avec un module moyen annuel de  $818 \text{ m}^3/\text{s}$ ) n'occupe en abondance que le 17ème rang ; de même, la crue 1979-1980 (avec un module moyen annuel de  $269 \text{ m}^3/\text{s}$ ) se situe au 4ème rang des plus faibles écoulements enregistrés depuis 1903. On aboutit aux mêmes conclusions que COGELS et GAC (1983) : "En général, une crue faible engendre une intrusion rapide du biseau salé, une crue forte, un temps de séjour moins long des eaux saumâtres dans la vallée du fleuve. Mais, deux crues d'importance très inégale peuvent aussi introduire deux incursions marines tout à fait identiques, selon le caractère tardif ou précoce des ondes de crue suivantes."

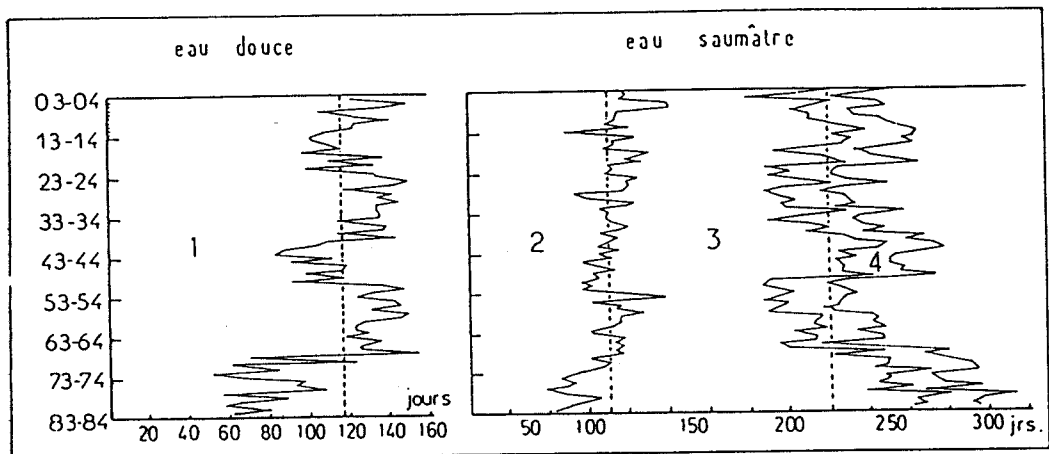


Fig. 9 : Variations interannuelles des différentes phases de l'intrusion saline.

## B - RELATIONS DEBITS/TEMPS DE SEJOUR DES EAUX MARINES ET DEBITS/ABSCISSE MAXIMALE ATTEINTE

### 1. Relation entre le module et le temps de séjour des eaux saumâtres

La figure 10 permet de visualiser la relation entre le temps de séjour des eaux saumâtres dans la vallée et le débit moyen annuel enregistré à Dagana au cours du cycle hydrologique précédent.

La relation est assez étroite (le calcul de régression donne un coefficient de corrélation de :  $-0,86$ ), mais de nombreuses distorsions apparaissent et ceci quelque soit l'importance de la crue. On retrouve cependant les 20 crues les plus faibles en correspondance avec les temps de séjour les plus longs et les 20 plus fortes crues associées aux temps de séjour les plus réduits. Ce résultat montre aussi que l'ampleur de la remontée saline est bien plus sous la dépendance de la crue qui précède que de celle qui lui succède.

## 2. Relation entre le module et l'abscisse maximale

La dispersion des points représentatifs est comparable au cas précédent (coeff. de corrélation :  $-0,74$ ). On retrouve les abscisses maximales à la suite des faibles crues et les invasions restreintes lors des crues importantes (fig. 11).

On peut signaler enfin que quelle que soit l'importance des écoulements (donc des précipitations sur les hauts-bassins), le biseau salé franchit tous les ans la section au droit de Richard-Toll avec toutes les conséquences que cet événement annuel implique pour la dépression lacustre du Guiers. En utilisant les abaques de ROCHETTE (1964), on peut en effet suivre pas à pas la progression dans le temps et dans l'espace des différentes isohalines.

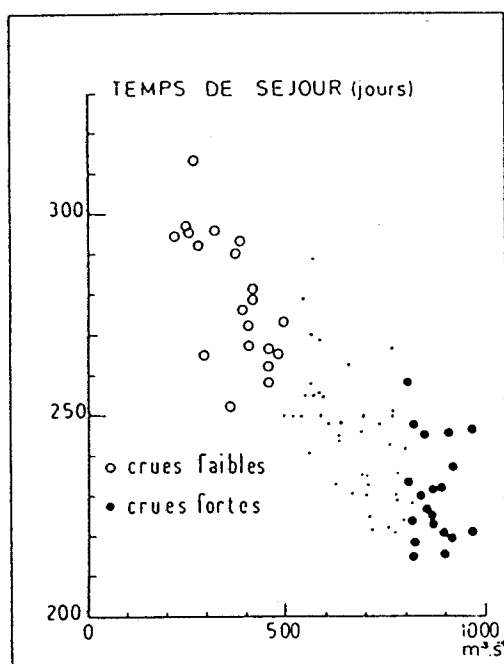


Fig. 10 : Relation entre le débit moyen annuel et le temps de séjour des eaux saumâtres.

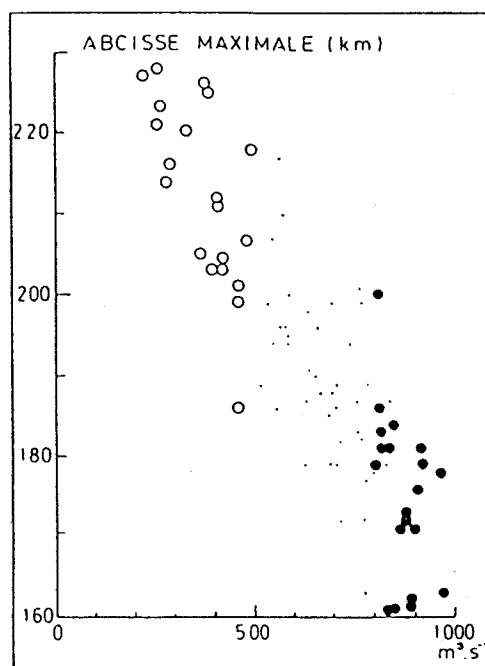


Fig. 11 : Relation entre le module et l'abscisse maximale atteinte par le front salé.

C - EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DE LA SALINITE DEPUIS 1903

1. Méthode d'évaluation du déplacement progressif des isohalines -  
Représentation graphique de l'intrusion saline au cours du  
cycle 1980-1981 pris comme exemple

a) Début de l'intrusion saline

Après le passage de la crue 1980-1981, dont le maximum s'est présenté le 20 septembre 1980 (débit : 1 565 m<sup>3</sup>/s), le fleuve amorce sa décrue puis entre dans sa phase de tarissement. Le débit à l'embouchure (en réalité prise en compte des écoulements observés à Dagana) décroît et le seuil de 600 m<sup>3</sup>/s est franchi entre le 16 octobre 1980 (660 m<sup>3</sup>/s) et le 17 octobre 1980 (585 m<sup>3</sup>/s). On admet que le phénomène de la remontée débute le 17 octobre.

b) Progression des isohalines à partir de la relation débit-salinité  
moyenne de base

A partir de l'abaque établi par ROCHETTE (fig. 7), on évalue la position respective des différentes isohalines (0,1 % ; 2,5 % ; 5 % ; 10 % ; 15 % ; 20 % ; 25 % ; 30 % et 35 %) au fur et à mesure de la décroissance des débits entre 585 m<sup>3</sup>/s et 50 m<sup>3</sup>/s (les débits journaliers successifs sont, rappelons-le, calculés à l'aide de la formule de propagation entre Bakel et Dagana).

Le déplacement des isohalines a été évalué jour après jour ; dans un souci de simplification, le tableau IV résume les résultats obtenus tous les 5-6 jours.

Le seuil de 50 m<sup>3</sup>/s est atteint le 19 janvier 1981 (le décalage avec le débit de 45 m<sup>3</sup>/s observé à Bakel le 7 janvier est de 12 jours). Au 19 janvier 1981, les taux de salinité à l'embouchure sont compris entre 25 % et 30 %, et le "coin salé" est décelable à 133 km en amont.

c) La détermination de la date de salinité maximale et la progression  
des isohalines en fonction du temps

A partir du 19 janvier, l'avancée des isohalines est indépendante du débit et leur progression vers l'amont est liée au facteur temps. La durée de cette phase nécessite au préalable de connaître la date de l'onde de crue suivante.

Le cycle hydrologique 1981-1982 débute à Bakel le 8 juin 1981, mais ces premiers écoulements sont éphémères et réduits. Ils n'ont vraisemblablement pas d'incidence à l'aval. La véritable onde de crue se présente à Bakel le 27 juin. D'après les analyses chimiques des eaux du fleuve, la salinité maximale aurait été atteinte à Dagana entre le 1er et le 8 juillet 1981, et la charge en matières en suspension croît brutalement à partir du 8 juillet (GAC et KANE, 1985). La crue atteint Saldé entre le 3 et le 10 juillet, Podor entre le 5 et le 12 juillet. Nous avons donc admis comme date probable de la salinité maximale le 5 juillet 1981.

**Tableau IV :** Positions successives des différentes isohalines dans l'intervalle de temps ou le débit décroît de 600 à 50 m<sup>3</sup>/s.

Date	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Position (en km) des différentes isohalines								
		0 %	2,5 %	5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %
(1980)										
16/10	660	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17/10	585	19	11	4	0	0	0	0	0	0
22/10	485	25	18	11.5	0	0	0	0	0	0
27/10 <sup>(1)</sup>	540	21	15	7	0	0	0	0	0	0
02/11	467	34	26	21	9	2	0	0	0	0
07/11	331	39	30	24	13	3	0	0	0	0
14/11	276	47	38	31	19	7.5	1	0	0	0
21/11	231	56	47	38	25	12	6	1	0	0
26/11	200	62	54	44	29	16	10	2	0	0
03/12	170	71	61	51	34	20	13	5.5	0	0
08/12	150	80	66	56	38	24	15.5	7	0	0
12/12	135	88	71	60	42	27	18	8.5	0	0
19/12	111	101	84	68	49	33	21.5	11.0	0	0
22/12	102	105	89	72	52	35	23.5	12.0	0	0
25/12	90.5	110	96	77	55	39	26	14	0	0
31/12	79.3	115	101	83	59	43	28	16	0	0
(1981)										
05/01	69.8	121	104	88	63	46	30	17	0	0
11/01	60.0	127	109	94	69	50	33	19	0	0
19/01	50.0	133	113	100	75	54	36	20	0	0

(1) : Une reprise des écoulements du 23 au 27/10 provoque un recul momentané des isohalines.

**Tableau V :** Positions successives des différentes isohalines pendant la période d'étiage consécutive à la crue 80-81.

Date	Nombre de jours	Position des isohalines (en km)								
		0 %	2,5 %	5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %
19.01.81	0	133	113	100	75	54	36	20	0	0
29.01.81	10	136	118	106	83	58	40	21	4	0
08.02.81	20	139	123	110	91	63	47	26	8	0
18.02.81	30	144	128	115	99	69	52	32	11	0
28.02.81	40	150	132	119	104	77	57	38	16	1
10.03.81	50	155	138	123	108	84	61	44	21	3
20.03.81	60	162	144	128	112	91	65	49	26	6
30.03.81	70	169	150	133	116	97	70	54	30	8
09.04.81	80	175	158	139	120	101	77	57	35	11
19.04.81	90	182	165	146	125	105	83	61	39	14
29.04.81	100	188	173	153	129	109	88	64	44	16
09.05.81	110	194	178	160	133	113	93	68	47	19
19.05.81	120	200	183	166	137	116	97	73	51	22
29.05.81	130	204	187	172	141	119	100	78	54	24
08.06.81	140	208	192	176	146	121	103	82	58	26
18.06.81	150	212	196	181	150	124	106	85	61	27
28.06.81	160	216	201	186	155	128	108	87	63	29
05.07.81	167	220	204	189	158	130	110	89	65	30

Dans cette hypothèse, la phase de tarissement (débit  $< 50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) se prolonge du 20 janvier 1981 au 5 juillet 1981, soit pendant 167 jours. L'application du deuxième abaque de ROCHETTE (fig. 8) permet alors de suivre la nouvelle progression des différentes isohalines.

Le tableau V donne leurs déplacements successifs tous les dix jours. L'abscisse maximale au cours de cette intrusion saline est de 220 km (soit approximativement le confluent du Sénégal et du Ngalanka). La ville de Richard-Toll a été "touchée" par des taux de salinité de 10 %, et les eaux marines à 35 ‰ (eau de mer pure) sont remontées de 30 km vers l'amont du fleuve.

#### d) Le retrait de la salure

La phase de retrait commence le 6 juillet 1981 ; sa durée va dépendre du flot de la nouvelle onde de crue. Nos observations sur les flux détritiques dissous et particulaires, en particulier la mesure des teneurs en chlorures et sodium et de la charge solide, permettent d'estimer que le retrait total du sel dans la vallée a eu lieu entre le 6 et le 13 août 1981. Le calcul des volumes totaux écoulés depuis le début des premiers écoulements indique que  $894.10^6$  de  $\text{m}^3$  ont franchi l'embouchure le 8 août 1981. On estime que le 9 août 1981, l'eau est de nouveau douce dans toute la vallée du Sénégal. Le recul progressif des différentes isohalines est précisé dans le tableau VI.

En résumé, l'intrusion saline en 1980-1981, illustrée par la figure 12, a présenté les caractéristiques suivantes :

- début de l'intrusion saline le 17/10/80 ;
- intervention du paramètre débit du 19/01/81 au 05/07/81 ;
- salinité maximale le 5/07/81, abscisse : 220 km ;
- retrait de la salure du 5/07/81 au 8/08/81 ;
- eau douce dans le fleuve du 8/08/81 au 28/10/81.

#### 2. Reconstitution de l'extension spatio-temporelle de la salinité dans la vallée du fleuve depuis 80 ans

Les calculs entrepris pour le cycle 80-81 ont été menés sur l'ensemble des 80 années d'observations (du 24/11/1903 au 25 novembre 1983, date de la construction du barrage provisoire de Rheune).

Les déplacements interannuels des différentes isohalines sont représentés sur la figure 13. Les variations observées sont très importantes, et la comparaison entre période aride et période humide est évidemment très significative. Nous avons choisi comme exemple de séquence humide la période 1953-1959, et comme séquence aride la série 1974-1980 déjà présentée par GAC *et al.* (1983). Les déplacements des isohalines sont illustrés par la figure 14 et leurs abscisses maximales données dans le tableau VII.

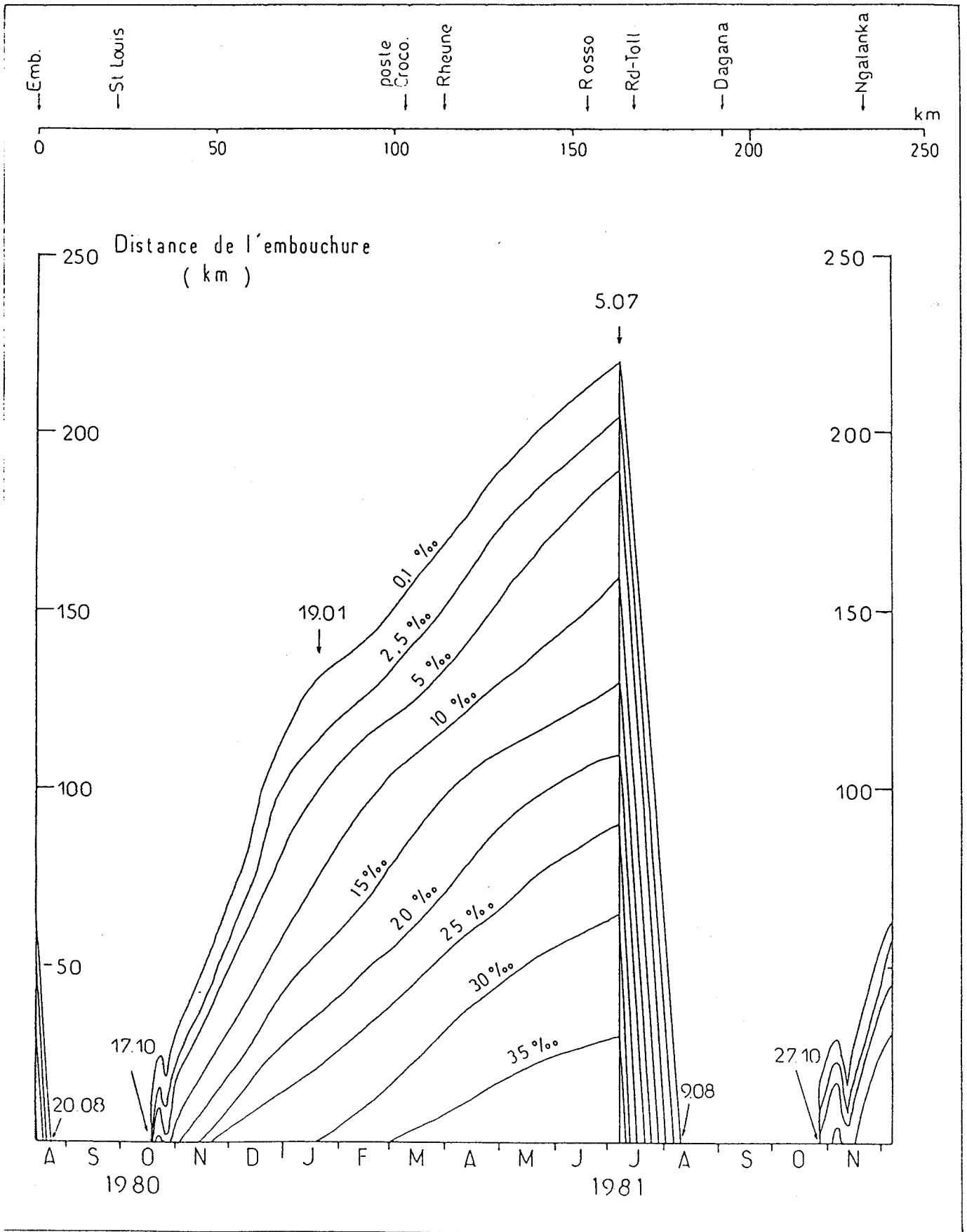


Fig. 12 : L'invasion marine en 1980-1981.



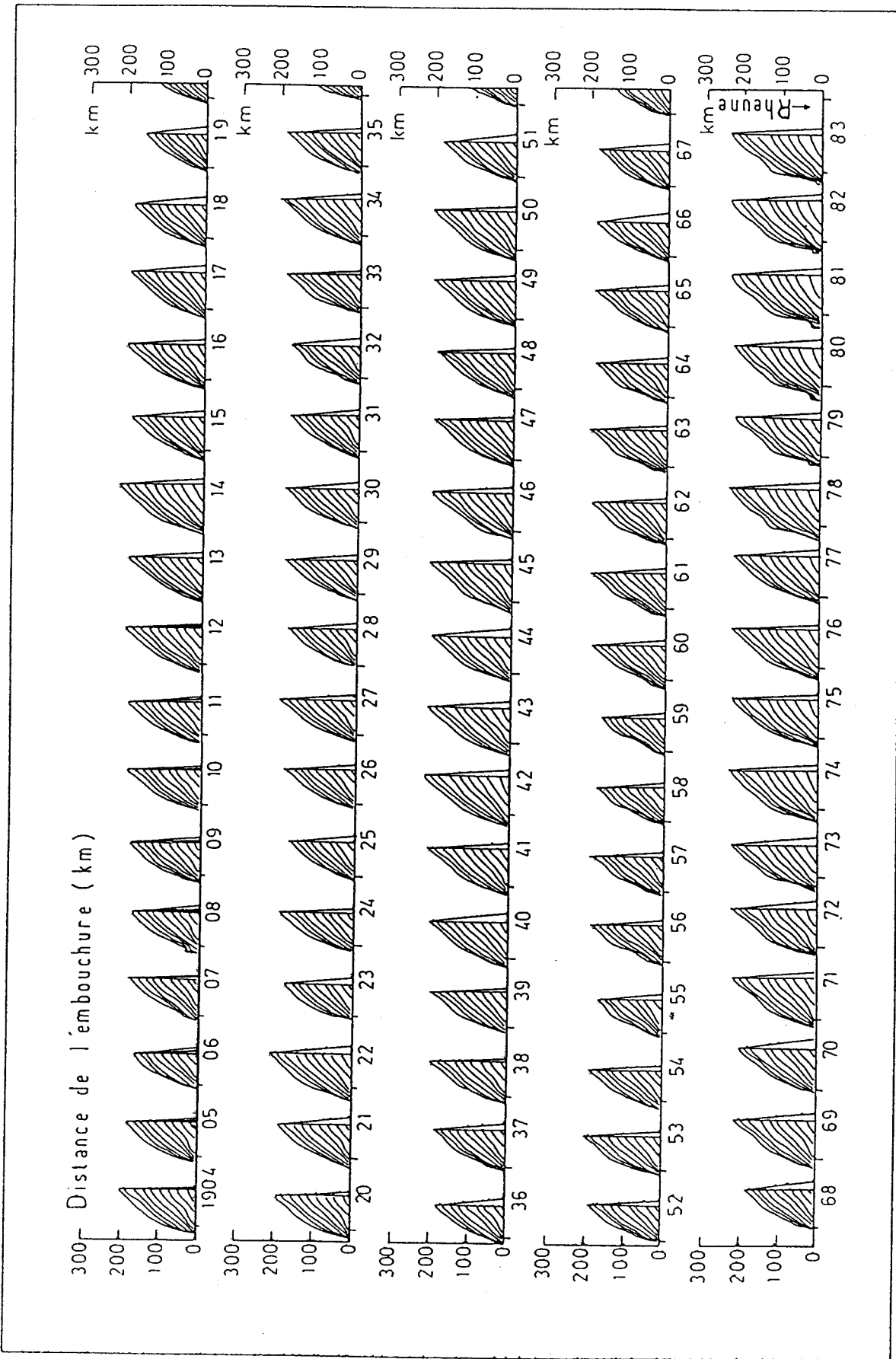


Fig. 13 : Evaluation des différentes invasions marines depuis 1903.

Tableau VI : Positions successives des différentes isohalines au cours de la phase de retrait.

Date (1981)	Volume écoulé (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Position des isohalines (en km)									
		0 %	2,5 %	5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %	
05.07	0	220	204	189	158	130	110	89	65	30	
31.07	402	129	93	75	53	28	2	0	0	0	
01.08	457	122	82	69	48	25	0	0	0	0	
02.08	514	112	78	62	44	19	0	0	0	0	
03.08	575	105	71	53	39	14	0	0	0	0	
04.08	632	96	65	48	35	9	0	0	0	0	
05.08	688	86	59	42	30	5	0	0	0	0	
06.08	750	74	54	35	26	2	0	0	0	0	
07.08	816	59	44	27	20	0	0	0	0	0	
08.08	894	35	34	20	13	0	0	0	0	0	
09.08	976	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tableau VII : Pénétration maximale moyenne des différentes isohalines lors des séquences sèches et humides. Positions amont extrêmes observées entre 1903 et 1983.

Isohalynes	Distance de l'embouchure (km)		Valeurs extrêmes	
	Séquence humide	Séquence sèche	1955	1978
0.1 %	170	217	159	228
2.5 %	150	195	140	210
5.0 %	130	180	125	196
10.0 %	116	148	109	164
15.0 %	88	122	84	136
20.0 %	72	106	63	119
25.0 %	54	85	46	92
30.0 %	30	62	22	67
35.0 %	9	28	3	32

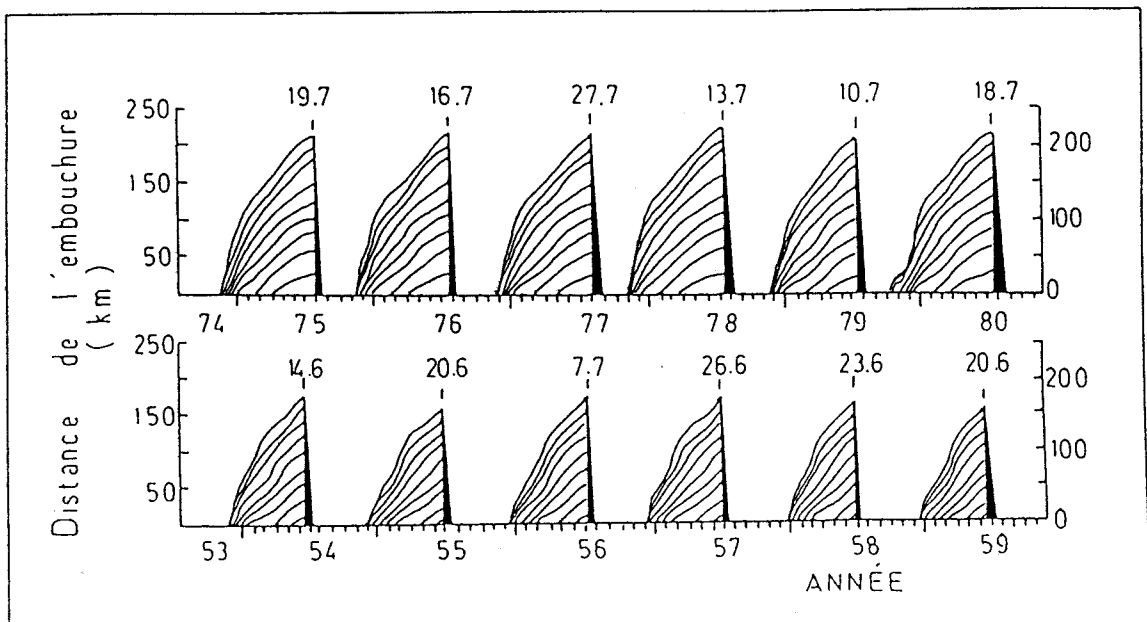


Fig. 14 : Remontées salines en période sèche (1974-1980) et en période humide (1953-1959).

- En période humide, le front salé se stabilise vers le km 170, soit à quelques kilomètres en amont de la ville de Richard-Toll. L'eau de mer "pure" (à 35 ‰) se cantonne à la hauteur du km 10 et reste bien en aval de la ville de St Louis.
- En période sèche (caractérisée en particulier par une succession ininterrompue de crues faibles), la mer se déploie largement et en profondeur jusqu'au km 217, bien en amont de la ville de Dagana. Des taux de salinité à 35 ‰ sont observables jusqu'au km 28.

### 3. Les incidences paléo-climatiques

Il est intéressant de suivre l'évolution de la salinité en différents points de la vallée et d'y associer comme cela a été fait récemment par MONTEILLET et ROSSO (1977) l'étude de la faune et de la flore actuelle. En effet, la présence de faunes marines fossiles dans les rivages anciens a souvent été attribuée à des mouvements positifs du niveau de la mer au cours de l'Holocène ; on peut aussi avec MONTEILLET *et al.* (1981) envisager que sous certaines conditions, les faunes marines qui se développent dans les estuaires peuvent résulter simplement d'invasion d'eau de mer pendant les périodes de faibles écoulements fluviaux. Autrement dit, à partir d'une association de faune fossile observée, on peut, à l'aide des études paléontologiques actuelles, en déduire les exigences de salinité de l'association rencontrée, de la salinité, estimer l'importance des écoulements et, du débit, avoir une idée assez précise des conditions météorologiques sur le bassin versant. La démarche initiale consistant évidemment à déterminer la position géographique de la faune et à préciser l'éloignement de l'Océan par le paléochenal le plus probable.

Nous avons retenu deux sites pour leur importance paléogéographique (lacs de Rkiz et de Guiers) et deux sections pour leur impact actuel et futur sur l'environnement (Rheune et Diama). Pour permettre une ouverture vers les études paléogéographiques et paléo-climatiques, nous y avons associé les sections du fleuve séparées les unes des autres par une distance de 25 km. Les conditions de salinité, propres à chaque site (durée et taux), sont résumées dans le tableau VIII.

Tableau VIII : Taux de salinité et temps de présence (en jours) des eaux saumâtres en différents sites de la vallée du Sénégal

Sites (km)	Séquence sèche Temps de présence (en jours)										Séquence humide Temps de présence (en jours)									
	0,1 ‰	2,5 ‰	5 ‰	10 ‰	15 ‰	20 ‰	25 ‰	30 ‰	35 ‰	0,1 ‰	2,5 ‰	5 ‰	10 ‰	15 ‰	20 ‰	25 ‰	30 ‰	35 ‰		
225	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
210 (Rkiz)	26	tr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
200	49	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
175	96	59	32	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
164 (Guiers)	115	86	53	tr	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
150	138	106	76	16	0	0	0	0	0	39	10	0	0	0	0	0	0	0	0	
125	194	154	122	81	15	0	0	0	0	98	60	28	4	0	0	0	0	0	0	
114 (Rheune)	206	177	149	109	54	0	0	0	0	109	82	50	12	0	0	0	0	0	0	
100	217	202	178	143	93	37	0	0	0	125	107	80	45	5	0	0	0	0	0	
75	231	220	207	176	137	92	39	0	0	148	133	115	83	41	5	0	0	0	0	
54 (Diama)	244	236	228	208	178	142	101	36	0	174	160	142	116	81	43	9	0	0	0	
50	247	240	230	213	188	151	112	54	0	179	165	148	122	89	53	15	0	0	0	
25	272	261	254	242	223	205	161	112	31	215	204	192	165	137	112	63	18	0	0	
0 (embouch.)	284	281	279	268	256	245	231	174	110	225	222	218	210	194	174	158	76	34	0	

Les graphiques établis pour des séquences sèches et humides (fig. 15) peuvent être utilisés comme des abaques pour l'estimation des paléosalinités en fonction de la distance à la mer d'une faune fossile. On utilise ensuite les abaques débit/salinité et pluviométrie/débit (fig. 16 et 17) fournis par GAC *et al.* (1983) pour préciser la durée maximale et minimale des paléodébits et enfin l'allure des paléoprécipitations.

#### 4. Relations entre les modules interannuels et l'ampleur de l'intrusion saline

Nous avons vu précédemment que les caractéristiques hydrologiques d'une crue imposaient en moyenne à 80 % son "poids" sur l'intrusion saline qui lui succédait. Pour mieux cerner cette relation entre modules interannuels et l'extension spatio-temporelle des eaux marines dans la vallée du fleuve, nous avons recherché un mode d'expression chiffré pour chaque intrusion saline annuelle.

La notion km/jour/salinité nous a paru la plus adaptée pour quantifier relativement les unes par rapport aux autres les 80 intrusions salines recalculées depuis le début du XXème siècle. La méthode d'évaluation a donc consisté à planimétrer chaque année les aires comprises entre les différentes isohalines et à calculer pour chacune d'entre elles l'équivalent en eau de mer "pure" à 35 ‰ .

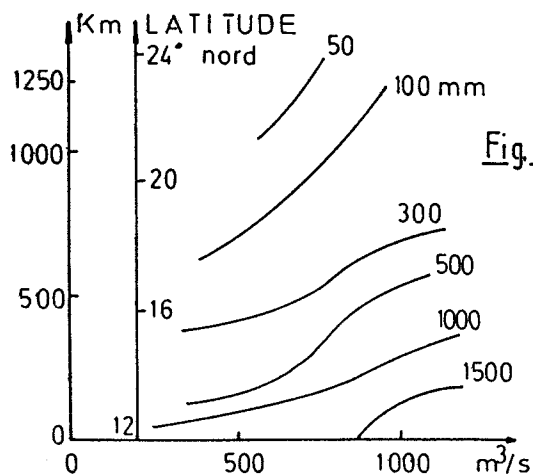
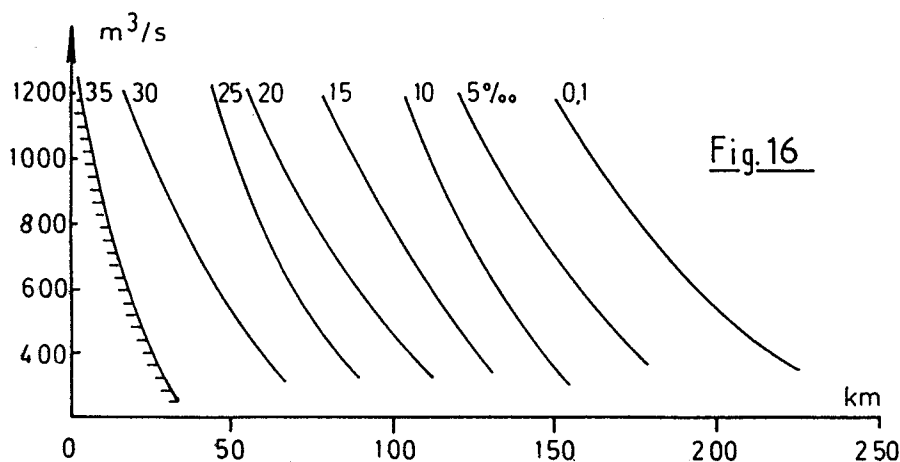
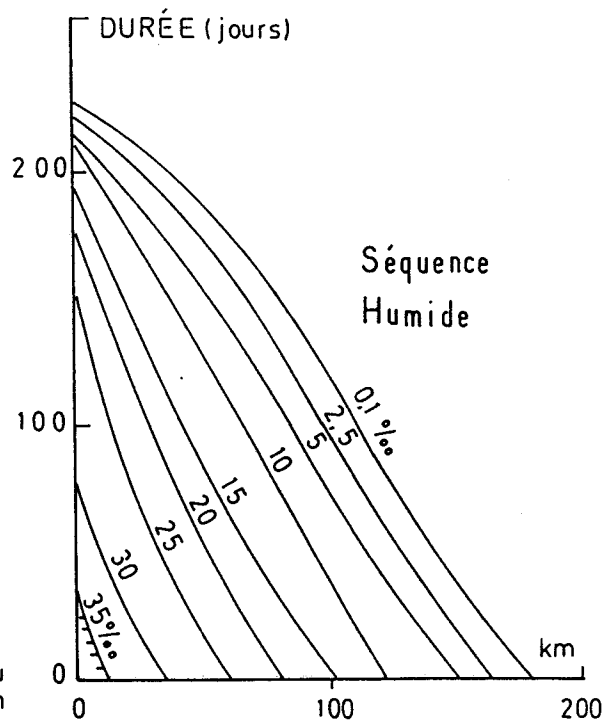
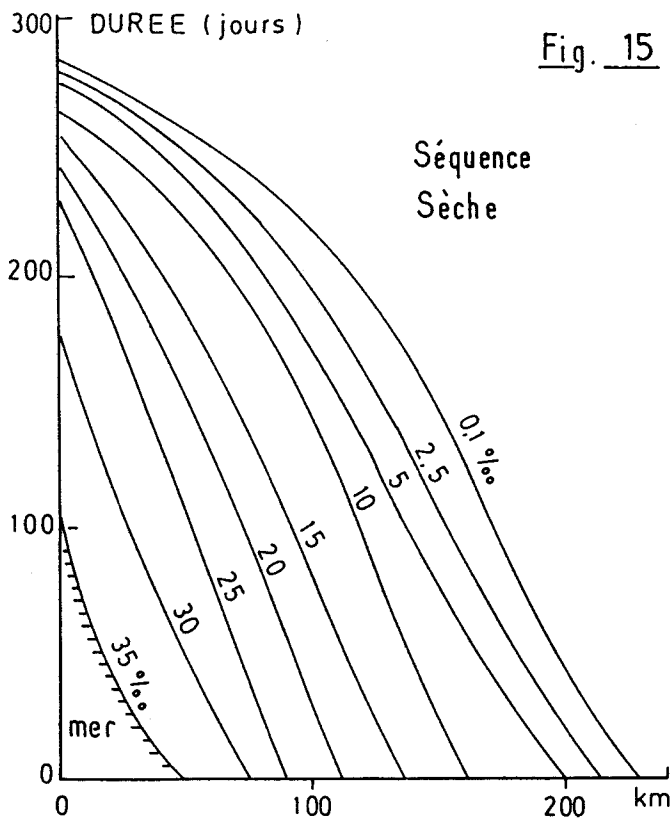
Pour reprendre l'exemple de l'intrusion saline de 1980-1981 illustrée par la figure 25, les surfaces respectives (exprimées sous la forme abstraite de km/jour) entre les différentes isohalines s'établit dans les proportions suivantes :

- de 0 à 2,5 ‰ :	19,3	- de 2,5 à 5 ‰ :	18,5
- de 5 à 10 ‰ :	26,0	- de 10 à 15 ‰ :	25,6
- de 15 à 20 ‰ :	21,1	- de 20 à 25 ‰ :	21,4
- de 25 à 30 ‰ :	20,8	- de 30 à 35 ‰ :	18,3
- supérieur à 35 ‰ :	10,7		

L'attribution d'une salinité moyenne aux différentes surfaces ainsi calculées (exemple : 7,5 ‰ entre les isohalines 5 et 10 ‰) permet de préciser la valeur de l'"équivalent eau de mer".

- 19,3 x 1,25 / 35 =	0,689	- 18,5 x 3,75 / 35 =	1,982
- 26,0 x 7,5 / 35 =	5,571	- 25,6 x 12,5 / 35 =	9,143
- 21,1 x 17,5 / 35 =	10,550	- 21,4 x 22,5 / 35 =	13,757
- 20,8 x 27,5 / 35 =	16,343	- 18,3 x 32,5 / 35 =	16,993
- 10,7 x 35 / 35 =	10,70	==> Somme :	85,728.

L'équivalent "eau de mer" pour l'intrusion saline 1980-1981 s'élève à 85,73. Le tableau IX donne les résultats chiffrés pour les 80 dernières années. La valeur moyenne s'élève à 56,46 Eq. à 35 ‰ et les extrêmes correspondent aux années 1958-1959 (33,93 Eq. à 35 ‰) et 1977-1978 (114,25 Eq. à 35 ‰).



Légende des Figures :

**Fig. 15 :** Schéma approximatif montrant la relation entre le temps de séjour des différentes isohalines tout le long de la vallée (séquences sèche et humide).

**Fig. 16 :** Remontée de la langue salée (km) en fonction du débit moyen annuel ( $m^3/s$ ) du fleuve Sénégal. La position respective des isohalines a été calculée pour une durée de 15 jours (GAC et al., 1983).

**Fig. 17 :** Schéma approximatif montrant la relation entre le déplacement en latitude des isohyètes annuels (mm) et le module du fleuve Sénégal ( $m^3/s$ ), in GAC et al. (1983).

A l'exception de quelques anomalies (positives en 1921-1922, 1933-1934, et négatives en 1914-1915), ce tableau permet de dissocier les séquences sèches et humides et de mettre en évidence la "monstrueuse" sécheresse qui affecte le Sahel depuis 1968 :

Séquences sèches	Séquences humides
avant 1903 (? années)	1904 - 1913 (9 années)
1913 - 1918 (5 " )	1919 - 1939 (20 " )
1939 - 1950 (11 " )	1950 - 1968 (18 " )
1968 - 1983 (15 " )	

Tableau IX : Equivalent "eau de mer" pour les intrusions salines depuis 1903 - (Eq. 35 %) : (+) années supérieures à 56,46 Eq. 35 %.

Années	Eq. 35 %	Années	Eq. 35 %	Années	Eq. 35 %	Années	Eq. 35 %
1903-1904	+ 58.42	1923-1924	47.02	1943-1944	+ 59.69	1963-1964	48.10
1904-1905	45.38	1924-1925	35.88	1944-1945	+ 68.28	1964-1965	49.80
1905-1906	34.91	1925-1926	43.95	1945-1946	+ 61.31	1965-1966	45.96
1906-1907	44.75	1926-1927	52.48	1946-1947	+ 60.28	1966-1967	46.04
1907-1908	41.04	1927-1928	40.92	1947-1948	+ 59.10	1967-1968	44.87
1908-1909	45.36	1928-1929	44.36	1948-1949	+ 63.20	1968-1969	+ 68.41
1909-1910	49.23	1929-1930	47.06	1949-1950	+ 71.09	1969-1970	+ 59.79
1910-1911	46.91	1930-1931	39.77	1950-1951	47.28	1970-1971	+ 73.72
1911-1912	55.63	1931-1932	40.39	1951-1952	41.46	1971-1972	+ 76.05
1912-1913	53.29	1932-1933	43.63	1952-1953	50.65	1972-1973	+ 75.77
1913-1914	+ 76.49	1933-1934	+ 61.68	1953-1954	44.59	1973-1974	+ 93.16
1914-1915	50.63	1934-1935	49.98	1954-1955	34.70	1974-1975	+ 83.23
1915-1916	+ 60.94	1935-1936	40.98	1955-1956	43.90	1975-1976	+ 79.89
1916-1917	+ 59.75	1936-1937	47.14	1956-1957	43.63	1976-1977	+ 79.06
1917-1918	+ 56.53	1937-1938	54.88	1957-1958	37.99	1977-1978	+114.25
1918-1919	35.48	1938-1939	52.22	1958-1959	(min) 33.23	1978-1979	+ 76.93
1919-1920	54.01	1939-1940	+ 56.67	1959-1960	49.95	1979-1980	+ 90.44
1920-1921	46.71	1940-1941	+ 64.10	1960-1961	50.70	1980-1981	+ 85.73
1921-1922	+ 61.21	1941-1942	+ 75.21	1961-1962	50.95	1981-1982	+ 92.58
1922-1923	39.78	1942-1943	+ 66.46	1962-1963	55.20	1982-1983	+ 84.95

La figure 18 traduit l'ampleur de la sécheresse actuelle qui, par sa durée et son intensité, est tout à fait différente de celles des années 15 et 45 qui l'ont précédée au cours du siècle. Cette réduction considérable des écoulements et l'effet cumulatif sur plus de 16 ans se traduisent par une intrusion saline exceptionnelle (COGELS et GAC, 1983).

Enfin, nous avons schématisé sur la figure 19 la relation entre flux d'eau douce et flux d'eau de mer en utilisant pour la représentation graphique la méthode des moyennes mobiles sur 7 ans pour les débits à Dagana et l'invasion marine (exprimée en Eq. à 35 %). Les deux courbes sont symétriques de part et d'autre des valeurs moyennes (646 m<sup>3</sup>/s pour les débits et 56,46 Eq. à 35 % pour l'intrusion saline). En conclusion, il nous paraît difficile d'achever notre étude sur une note optimiste : rien en effet ne permet d'affirmer à court terme un retour à l'humidité.

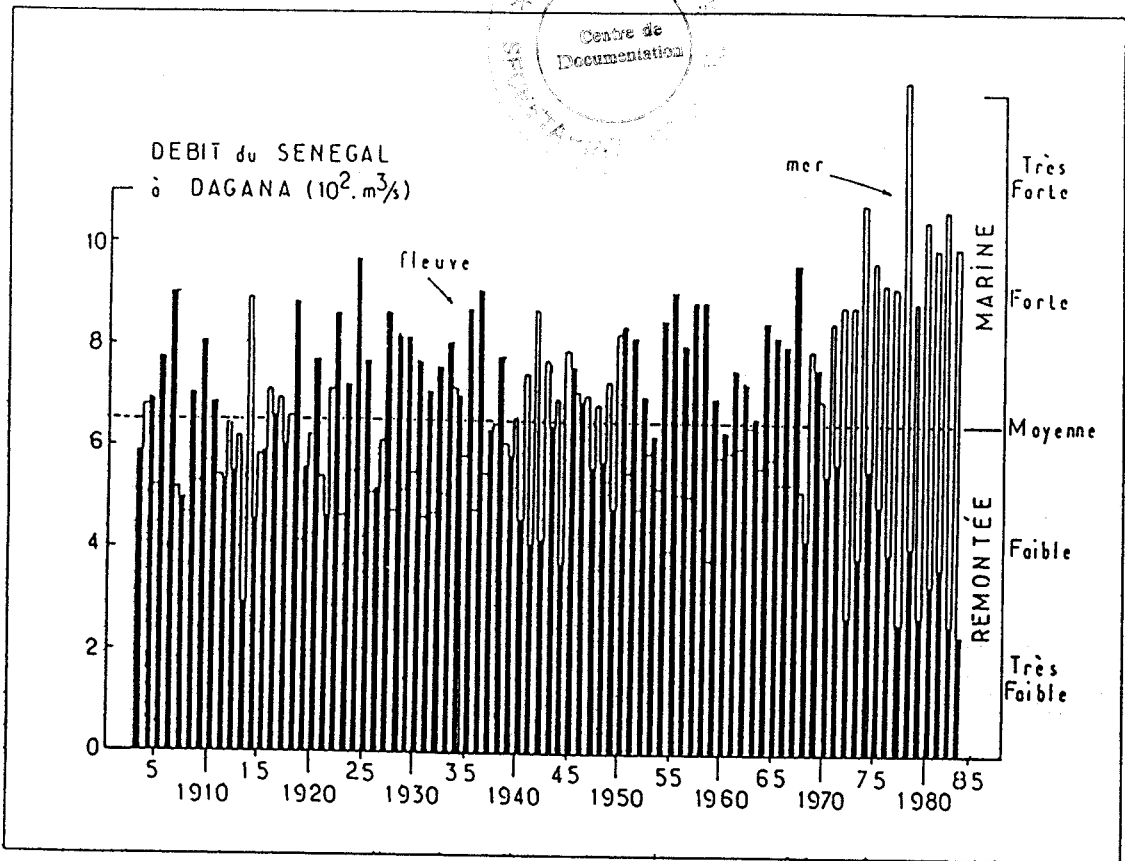
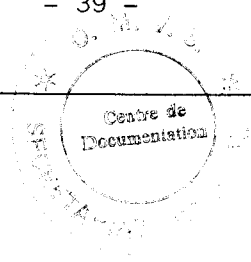


Figure 18 : Comparaison entre les modules interannuels et l'intrusion saline.

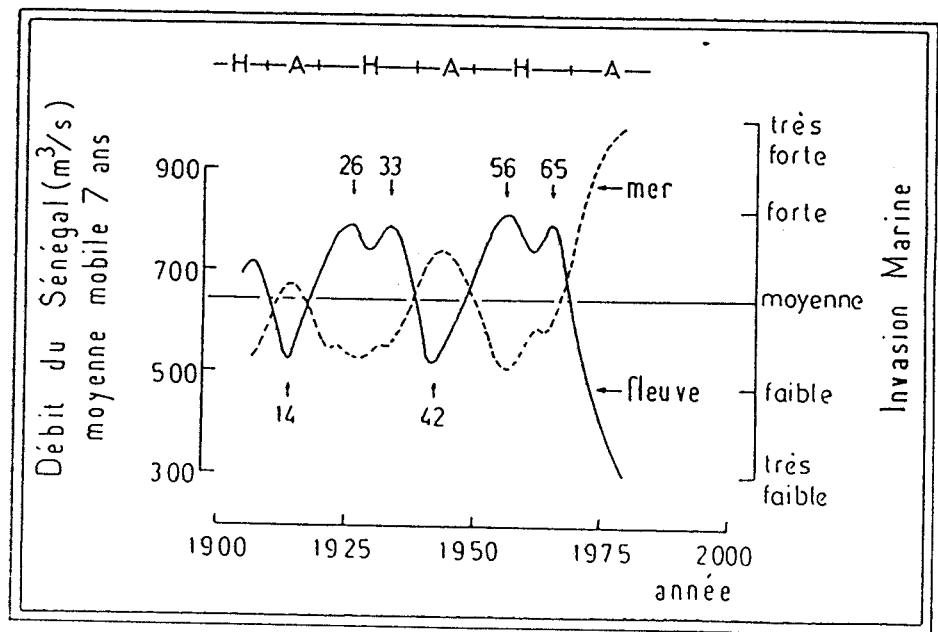


Figure 19 : Antagonisme flux d'eau douce - Flux d'eau de mer.

## VI. ÉTUDE DE LA REMONTÉE SALINE AU COURS DES CYCLES HYDROLOGIQUES 1981-1982 ET 1982-1983

L'étude de la remontée saline entreprise par l'ORSTOM à la suite des deux cycles hydrologiques 1981-1982 et 1982-1983 comprenait :

- le suivi quotidien ou hebdomadaire de la salinité en quatre stations principales : St Louis (km 22), le poste Crocodiles du parc National du Djoudj (km 102), la station de Dagana (km 192) et celle de Podor (km 292) ;
- la surveillance mensuelle de la salinité par des campagnes de mesure en 56 sections du fleuve, situées entre l'embouchure et le village de Mbayo au km 322 ;
- des mesures de salinité réalisées très irrégulièrement sur quelques profils pour préciser les variations en fonction de la profondeur dans la section.

### A - LES QUATRE STATIONS-CLES DE ST LOUIS, DU DJOUDJ, DE DAGANA ET DE PODOR

#### 1. Variations saisonnières de la salinité à St Louis (km 22)

Toutes les mesures de salinité effectuées à St Louis sont reportées dans le tableau X et l'évolution de la salinité en surface est illustrée par la figure 20. Cette évolution a été schématisée en traçant sur les deux graphiques la courbe moyenne qui représente la salinité de base (l'évolution observée en 1962/1963 par ROCHETTE est donnée à titre indicatif).

Les deux remontées salines étudiées présentent les caractéristiques suivantes :

#### 1981-1982 :

- retrait du sel vers le 6 août 1981
- eau douce du 7 août au 20-21 octobre 1981
- nouvelle intrusion le 21 Octobre 1981
- date estimée du maximum de salinité : 18 juillet 1982
- phase de retrait du 19 juillet au 23 août 1982
- durée totale de l'intrusion : 307 jours.

A St Louis, le temps de présence des différentes isohalines est le suivant : 0,1 ‰ (307 jours) ; 2,5 ‰ (287 jours) ; 5 ‰ (277 jours) ; 10 ‰ (246 jours) ; 15 ‰ (220 jours) ; 20 ‰ (190 jours) ; 25 ‰ (159 jours) ; 30 ‰ (125 jours). Des taux de salinité supérieurs à 35 ‰ ont été observés du 17 mai au 26 juillet 1982, soit pendant 71 jours : il est remarquable de constater que le fonctionnement en estuaire inverse (taux de salinité > 35 ‰) persiste aussi longtemps que la présence d'eau douce durant la crue suivante (75 jours).



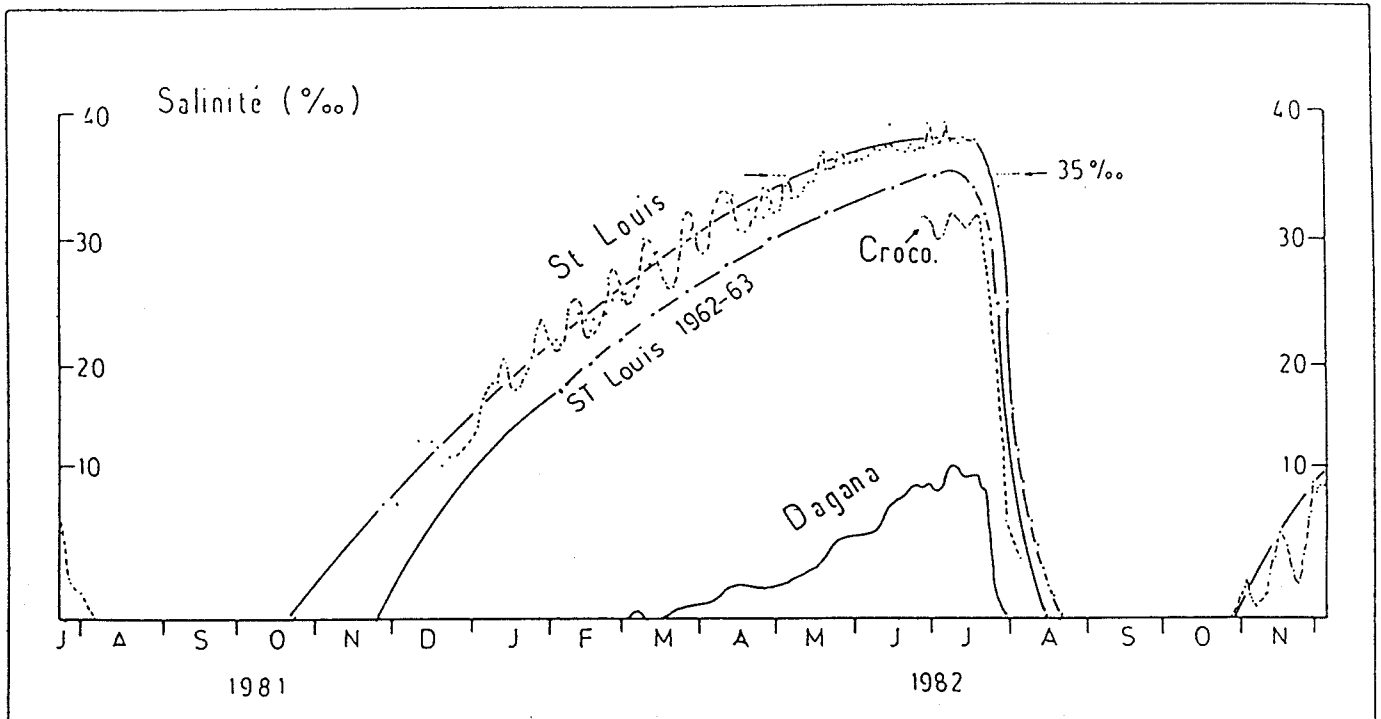


Figure 20a : Variations saisonnières de la salinité à St-Louis, à Dagana et au Djoudj.

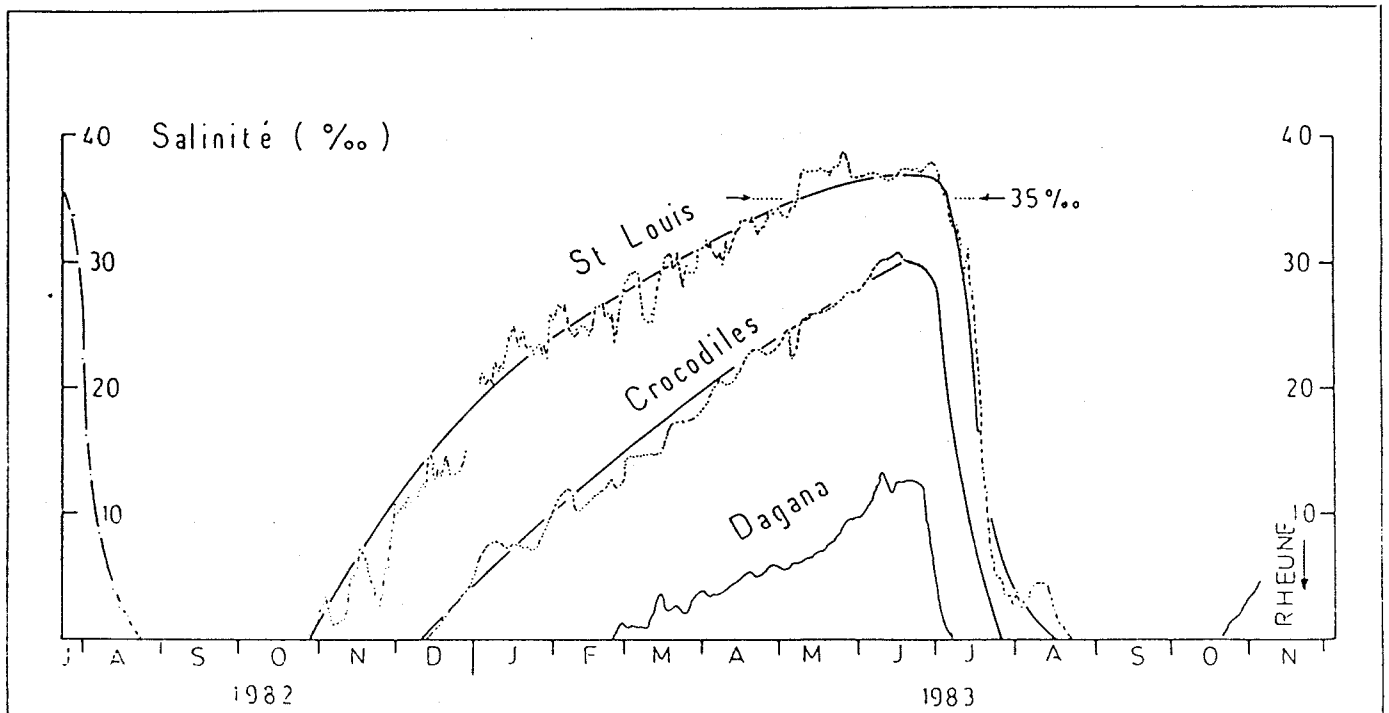


Figure 20b : Variations saisonnières de la salinité à St-Louis, à Dagana et au Djoudj.

1982-1983 :

- retrait du sel le 24 août 1982
- eau douce du 24 août au 23 octobre 1982
- nouvelle intrusion le 23 octobre 1982
- date estimée du maximum de salinité le 28 juin 1983
- phase de retrait du 29 juin au 23 août 1983
- durée totale de l'intrusion : 307 jours.

Tableau X : Salinité (‰) au pont FAIDHERBE de St Louis de 1979 à 1983

Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰
1979		1981		1982		1982		1982		1983		1983		1983	
30.08	0.09	16.10	0.09	24.03	29.38	12.07	37.60	19.11	5.70	10.01	21.80	01.03	28.60	24.06	37.01
29.09	0.21	23.10	0.11	26.03	31.50	14.07	37.80	20.11	5.00	11.01	21.70	03.03	29.10	26.06	37.71
1980		27.11	8.50	29.03	30.80	16.07	38.40	21.11	4.80	12.01	23.00	05.03	29.00	28.06	38.08
22.08	0.13	02.12	8.47	31.03	30.53	19.07	38.00	22.11	3.80	13.01	24.10	07.03	26.80	30.06	37.33
25.08	0.08	11.12	14.04	12.04	32.90	21.07	37.70	23.11	2.70	14.01	24.20	09.03	25.20	02.07	36.19
02.09	0.09	16.12	13.85	14.04	33.43	26.07	37.50	24.11	2.60	15.01	25.10	11.03	25.30	04.07	34.82
08.09	0.08	20.12	12.10	16.04	30.80	28.07	34.06	25.11	3.70	16.01	24.10	13.03	28.10	06.07	32.94
15.09	0.13	23.12	12.84	19.04	30.80	30.07	26.40	26.11	5.10	17.01	23.40	15.03	29.60	08.07	33.10
22.09	0.06	1982		21.04	32.37	02.08	16.53	27.11	5.80	18.01	24.30	17.03	30.50	10.07	31.52
14.10	0.38	04.01	16.40	23.04	31.80	04.08	13.23	28.11	8.10	19.01	24.60	19.03	30.90	11.07	28.65
29.10	0.55	06.01	17.29	26.04	31.70	06.08	10.83	29.11	8.44	20.01	23.20	21.03	30.90	12.07	30.21
12.11	3.84	09.01	18.70	28.04	33.36	09.08	7.59	30.11	10.90	21.01	23.50	23.03	28.10	13.07	31.08
25.11	9.50	11.01	18.70	30.04	32.10	11.08	5.84	01.12	10.00	22.01	23.20	25.03	29.40	14.07	27.86
02.12	6.61	13.01	20.57	03.05	32.50	13.08	3.88	02.12	10.49	23.01	22.80	28.03	29.50	15.07	25.00
10.12	11.82	15.01	19.90	05.05	34.06	16.08	2.64	03.12	10.70	24.01	23.40	30.03	31.20	16.07	24.50
1981		19.01	18.10	08.05	33.20	18.08	1.93	04.12	10.60	25.01	23.60	02.04	31.40	17.07	21.00
06.01	13.97	20.01	18.29	10.05	33.40	21.08	0.25	05.12	11.55	26.01	22.70	05.04	30.50	18.07	18.40
13.01	20.35	22.01	19.40	12.05	34.00	24.08	0.18	06.12	10.90	27.01	23.50	07.04	29.90	19.07	13.50
20.01	27.51	25.01	20.90	14.05	34.40	(27.08		07.12	11.30	28.01	22.30	10.04	30.90	20.07	11.70
27.01	27.81	27.01	23.04	17.05	34.60	(28.10	<0.1	08.12	11.58	29.01	24.80	13.04	32.50	21.07	8.40
23.06	36.05	29.01	23.70	19.05	36.68			09.12	11.90	30.01	25.88	16.04	33.40	22.07	7.00
30.06	36.24	01.02	21.90	21.05	35.50	29.10	0.37	10.12	12.30	31.01	25.60	19.04	33.60	23.07	6.10
09.07	36.08	03.02	22.13	24.05	35.60	30.10	0.95	11.12	12.51	01.02	26.30	22.04	32.70	24.07	5.20
12.07	37.74	05.02	21.90	26.05	36.78	31.10	1.63	12.12	12.40	02.02	26.70	25.04	33.80	25.07	5.00
15.07	33.76	08.02	24.20	28.05	35.80	01.11	2.10	13.12	14.30	03.02	26.30	28.04	34.20	26.07	4.50
18.07	24.07	10.02	25.19	31.05	36.00	02.11	2.60	14.12	14.26	04.02	26.80	01.05	33.80	27.07	3.60
21.07	14.48	12.02	24.20	02.06	36.73	03.11	3.10	15.12	14.00	05.02	25.80	04.05	34.90	28.07	3.60
24.07	9.72	15.02	23.70	04.06	36.10	04.11	1.90	16.12	12.60	06.02	24.70	07.05	35.80	29.07	3.60
27.07	2.96	17.02	22.85	07.06	36.50	05.11	1.65	17.12	13.32	07.02	24.40	10.05	37.30	30.07	2.90
30.07	2.13	19.02	23.70	09.06	36.95	06.11	1.03	18.12	13.00	08.02	24.10	13.05	37.20	31.07	3.30
05.08	0.31	22.02	24.20	11.06	36.80	07.11	1.12	19.12	14.00	09.02	24.80	16.05	37.20	01.08	3.90
07.08	0.16	24.02	27.05	14.06	36.90	08.11	1.28	20.12	13.57	10.02	24.50	19.05	37.00	03.08	2.70
09.08	0.12	26.02	25.20	16.06	38.88	09.11	1.47	21.12	13.00	11.02	25.00	22.05	37.70	05.08	3.40
13.08	0.08	01.03	25.20	18.06	36.80	10.11	1.74	25.12	13.40	12.02	25.10	25.05	38.80	07.08	4.40
19.08	0.07	03.03	25.86	21.06	36.70	11.11	2.20	28.12	15.00	13.02	24.90	28.05	36.80	09.08	4.50
25.08	0.06	05.03	25.20	23.06	37.38	12.11	3.30	1983		14.02	24.10	01.06	36.90	11.08	4.50
30.08	0.07	08.03	26.50	25.06	36.80	13.11	4.50	03.01	21.5	15.02	24.90	04.06	37.10	13.08	3.90
04.09	0.07	10.03	30.13	28.06	37.00	14.11	4.60	04.01	20.4	17.02	26.70	07.06	37.00	15.08	2.20
10.09	0.06	12.03	28.10	30.06	38.96	15.11	5.40	05.01	20.8	19.02	26.90	10.06	36.65	17.08	1.30
16.09	0.06	15.03	29.00	02.07	37.40	16.11	6.80	06.01	20.7	21.02	26.00	13.06	36.70	19.08	1.0
21.09	0.06	17.03	27.51	05.07	37.60	17.11	6.80	07.01	20.4	23.02	25.90	16.06	37.33		
27.09	0.06	19.03	26.50	07.07	39.01	18.11	6.27	08.01	22.2	25.02	24.90	19.06	37.35		
06.10	0.06	22.03	26.20	09.07	37.70	19.11	5.70	09.01	21.4	27.02	27.30	22.06	37.42		

A St Louis, le temps de présence des différentes isohalines s'établit comme suit : 0,1 ‰ (305 jours) ; 2,5 ‰ (282 jours) ; 5 ‰ (254 jours) ; 10 ‰ (233 jours) ; 15 ‰ (204 jours) ; 20 ‰ (198 jours) ; 25 ‰ (167 jours) ; 30 ‰ (107 jours). Des taux de salinité supérieurs à 35 ‰ ont été observés du 7 mai au 3 juillet 1983, soit pendant 58 jours, durée à nouveau très proche du temps de séjour (61 jours) des eaux douces à la hauteur de la ville de St Louis pendant la crue précédente.

2. Variations saisonnières de la salinité à la limite amont du parc National du Djoudj (km 102)

Les mesures de la salinité à la limite amont du parc du Djoudj ont été réalisées au poste Crocodiles grâce à l'obligeance de la Direction des Parcs Nationaux du Sénégal<sup>(1)</sup>. Les observations commencées en 1982 se poursuivent aujourd'hui, la station se trouvant à quelques km en aval du barrage provisoire de Rheune (tableau XI).

Tableau XI : Salinité (‰) à la limite amont du parc du Djoudj (poste Crocodiles)

Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰
<u>1982</u>		<u>1983</u>		<u>1983</u>		<u>1983</u>		<u>1983</u>	
27/06	31.8	02/01	6.9	01/03	14.8	27/04	23.3	14/06	29.6
30/06	31.6	05/01	7.4	04/03	14.9	30/04	23.4	16/06	29.5
03/07	29.9	08/01	7.9	07/03	14.9	03/05	25.0	18/06	30.4
06/07	30.3	11/01	7.8	10/03	15.0	04/05	22.5	20/06	30.4
09/07	32.0	14/01	7.5	13/03	15.0	06/05	23.0	22/06	30.0
15/07	30.8	17/01	7.6	16/03	16.0	09/05	25.7	24/06	30.5
18/07	31.8	20/01	7.4	19/03	17.6	12/15	26.2	25/11	Rheune
21/07	33.4	23/01	7.1	22/03	17.4	15/05	26.3	27/12	16.7
24/07	30.1	26/01	8.0	25/03	17.6	18/05	26.4	30/12	17.0
27/07	20.6	29/01	9.5	28/03	17.8	21/05	27.0		
30/07	7.6	01/02	10.9	31/03	18.3	24/05	27.5	<u>1984</u>	
02/08	4.7	04/02	11.8	03/04	19.9	27/05	26.9	05/01	17.5
05/08	3.2	07/02	12.3	06/04	20.7	29/05	28.0	11/01	17.8
08/08	0.2	10/02	10.4	09/04	20.3	31/05	31.1	17/01	18.2
11/08	0.9	13/02	10.8	12/04	20.6	02/06	28.2	23/01	19.5
14/08	0.2	16/02	11.5	15/04	21.6	04/06	28.8	29/01	21.0
17/08	0.1	19/02	11.8	18/04	23.0	06/06	29.1	07/02	21.5
20/08	0.1	22/02	12.9	21/04	23.2	08/06	29.3	16/02	22.5
23/08	<0.1	25/02	12.1	24/04	22.9	10/06	30.5	22/02	22.7
30/12	4.7	28/02	13.0	27/04	23.3	12/06	31.0	25/02	23.5
								28/02	23.7

1982-1983 : (fig. 20)

- début de l'intrusion saline, à la hauteur de la station, vers le 10 décembre 1982 ;
- le maximum de salinité s'est vraisemblablement produit autour du 23 juin 1983 par suite du caractère tout à fait exceptionnel des pluies torrentielles (153 mm) tombées dans la région de Matam dans la nuit du 23 au 24 juin 1983 ;
- phase de retrait du 23 juin à la fin juillet ;
- temps de séjour estimé du sel : 234 jours.

(1) : Nous remercions ici M. DUPUY, Directeur des Parcs Nationaux, pour nous avoir facilité l'accès aux différentes zones du Djoudj.

La présence des différentes isohalines à la limite amont du parc du Djoudj est la suivante : 0,1 ‰ (234 jours) ; 2,5 ‰ (215 jours) ; 5 ‰ (200 jours) ; 10 ‰ (175 jours) ; 15 ‰ (124 jours) ; 20 ‰ (96 jours) ; 25 ‰ (48 jours) ; 30 ‰ (21 jours). La persistance pendant des périodes aussi longues de salinité élevée sur toute la façade fluviale du parc a eu des conséquences incalculables sur la faune avicole du parc.

Enfin, la fermeture de la vallée par le barrage de Rheune le 23 novembre a déterminé, vers l'aval, et en particulier au niveau du Djoudj, l'apparition précoce de taux de salinité tout à fait inhabituels : la salinité, au niveau de la station, était déjà supérieure à 20 ‰ fin janvier 1984, contre seulement 10 ‰ fin janvier 1983.

### 3. Variations saisonnières de la salinité à la hauteur du lac de Guiers

La Compagnie Sucrière Sénégalaise (C.S.S.), dont les périmètres d'exploitations de la canne à sucre se situent dans la région du lac de Guiers (km 163), assure un suivi bi-quotidien de la salinité en amont et en aval de la ville de Richard-Toll. Les données sont diffusées sous forme de bulletins mensuels et de tableaux récapitulatifs annuels.

### 4. Variations saisonnières de la salinité à Dagana

La station de Dagana, située à 192 km de l'embouchure du fleuve, constitue la station principale de la basse vallée du Sénégal. Le suivi de la minéralisation des eaux fluviales à la hauteur de cette section a permis d'établir (GAC et KANE, 1985) les flux dissous d'origine continentale. Le tableau XII rassemble l'essentiel des informations de 1979 à 1983, et la figure 20 illustre l'évolution de la salinité à Dagana de 1981 à 1983.

En 1979, la langue salée parvient à Dagana entre le 22 mars et le 20 avril. Le retrait a lieu entre le 6 juin et le 21 juillet.

En 1980, la salinité touche vraisemblablement la station dans la première semaine d'avril ; le taux maximum de salinité est enregistré vers le 8 juillet et le retrait définitif se produit au cours des derniers jours de juillet.

En 1981, la présence d'eau salée est observée entre le 4 et le 11 mars. Les plus fortes salinités datent du 1er juillet, et le retrait total a lieu entre le 5 et le 12 août.

Les caractéristiques des deux intrusions salines 1982-1983 sont les suivantes :

#### 1981-1982 :

- eau douce à Dagana entre le 12 août 1981 et le 4 mars 1982
- arrivée de l'eau salée le 4 mars 1982
- maximum de salinité le 9 juillet 1982
- phase de retrait du 10 juillet au 5 août 1982
- temps de présence du sel : 155 jours.

(ann 1982) est mesurée régulièrement depuis 1980 par l'ORSTOM. Cette station n'est citée ici que pour mémoire à la suite des variations singulières observées dans les concentrations de la silice en solution. On observe en effet un phénomène similaire à celui mis en évidence dans toute la partie

du fleuve touchée par la remontée des eaux marines : une diminution importante de la teneur en silice en relation avec une augmentation de la conductivité des eaux. Si les eaux du fleuve se concentraient par évaporation, il serait plus vraisemblable de voir simultanément croître les teneurs en silice et la conductivité. L'évolution inverse observée suggère que la diminution des teneurs en silice dissoute serait due au passage fugace d'eau de mer dans la section de Podor. Dans cette hypothèse, le coin salé aurait été présent entre le 11 et le 25 juillet 1982 (salinité : 0,13 ‰ le 18 juillet) et du 13 juin au 7 juillet 1983 (salinité : 0,12 ‰ le 19 juin).

B - OBSERVATIONS DE 1981 A 1983 DE L'EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DE LA SALINITE DANS LA BASSE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

1. La position géographique des stations et les différentes campagnes de contrôle de la salinité

Les stations, au nombre de 56, sont disposées le long de la vallée du fleuve depuis l'embouchure jusqu'au km 322, situé en amont de la ville de Podor. Elles sont en général espacées de 4 à 5 km dans la partie proche de l'Océan ; au-delà de Dagana (km 192), le maillage est plus lâche. Deux sites ont été retenus également sur le Doué pour déceler en fin d'étiage les éventuelles arrivées d'eau de mer dans cet effluent du Sénégal. Les positions des différentes stations sont indiquées sur la figure 21.

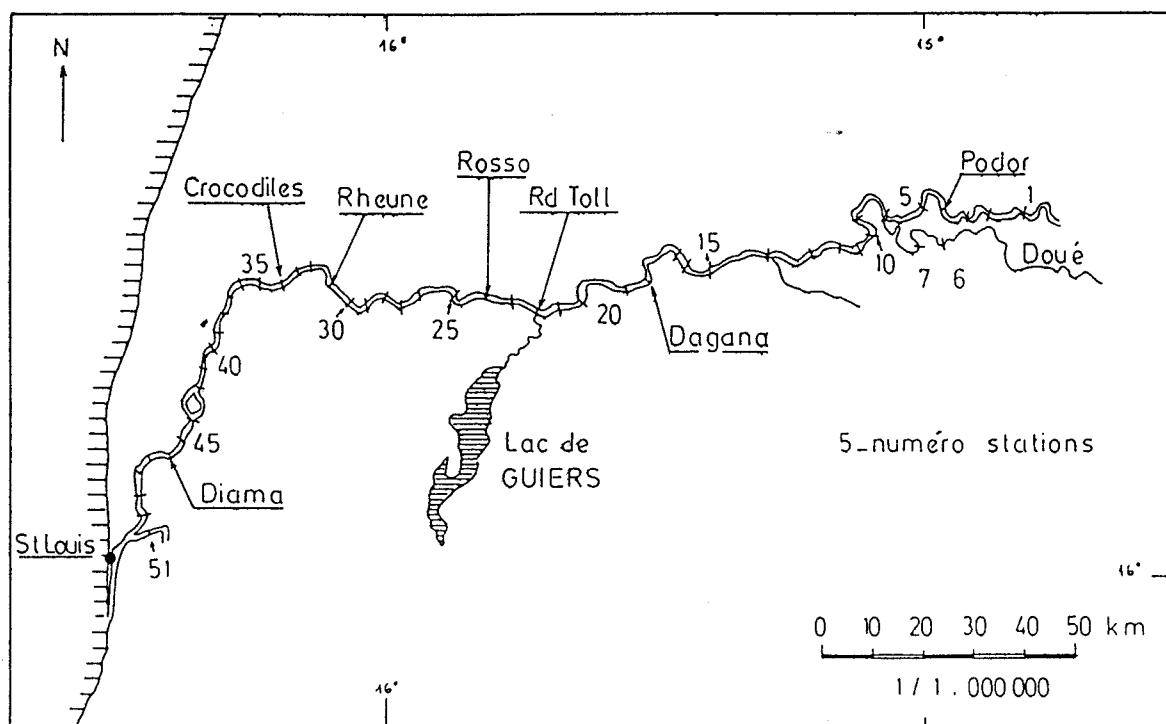


Figure 21 : Situation géographique des stations de contrôle de salinité.

Les campagnes de contrôle de la salinité, réalisées par l'équipe de l'ORSTOM ont souvent été incomplètes suivant l'accessibilité des stations aux différentes saisons. L'intervalle d'un mois a en général été respecté entre les différentes campagnes de 1980-1981 (mai, juin, juillet) et de 1981-1982 (décembre, janvier, février, mars, avril, mai, juin et juillet) ; en 1982-1983, devant la précocité de l'intrusion, 15 séries d'observations ont été effectuées entre octobre 82 et juin 83. Il est cependant regrettable que les dernières mesures n'aient pas coïncidé avec la date du taux maximum de salinité en 1982 et surtout en 1983 (vers le 22 juin).

## 2. Progressions saisonnières du front salé de 1981 à 1983

Les progressions saisonnières du front salé sont représentées pour les trois épisodes étudiés sur les figures 22 et 23, et les résultats des mesures de salinité aux différentes sections sont donnés dans les tableaux XIII et XIV.

### 1980-1981 :

On dispose de trois contrôles dont l'un concerne la phase de retrait (tracé du 15/07). Le maximum de salinité s'est présenté entre le 22 juin et le 15 juillet, et l'abscisse maximale atteinte a dû être légèrement supérieure ou égale à 282 km. Des taux de salinité de plus de 35 ‰ semblent avoir été observés jusqu'à 80 km de l'embouchure (entrée du parc du Djoudj). Notons enfin que la progression du front salé n'est pas homogène et présente quelques irrégularités : deux sont particulièrement nettes (vers le km 70, et le km 120) sur la courbe représentative des mesures du 4/05/1981. A l'exception de la zone située la plus à l'amont (au-delà du km 180 environ), les deux courbes de mai et de juin présentent une forme convexe. Nous reviendrons plus loin sur ces deux points : les à-coups et le "changement de rythme" dans la progression du front que semblent indiquer respectivement les irrégularités signalées et les inclinaisons des courbes.

### 1981-1982 : (fig. 22)

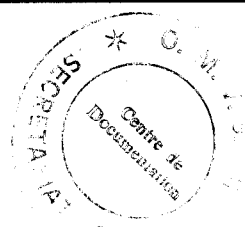
Lors de la première campagne de mesures (26 octobre 1981), le sel était déjà perceptible à St Louis, ce qui laisse supposer que le franchissement de la passe à l'embouchure, par les eaux océaniques, a dû se produire vers la mi-octobre 1981.

La progression du front salé vers l'amont se poursuit ensuite jusqu'en juillet 1982. Le maximum de salinité est atteint à la mi-juillet, les eaux marines atteignant les portes de la ville de Podor à près de 300 km de l'embouchure du fleuve. Des taux de salinité supérieurs à celui de l'eau de mer (35 ‰) sont observés jusqu'au km 70. Les mêmes irrégularités dans la propagation de l'onde salée se manifestent vers les points kilométriques 70 et 120.

L'inclinaison des courbes, situant les positions du front salé, se modifie à partir du 24 février 82 : de concaves auparavant, les courbes deviennent convexes ensuite. Cette modification suggère intuitivement

Stations	Point kilométrique et n°		Intrusion 1980-1981 (salinité ‰)			Intrusion 1981-1982 (salinité ‰)							
	Km	N°	4/05/81	22/06/81	15/07/81	20/12/81	28/01/82	23/02/82	24/03/82	20/04/82	25/05/82	24/06/82	14/07/82
Gandiole	5	56	-						35.0			35.0	36.8
"	10	55	-						-				36.9
"	15	54	-						-				37.1
"	20	53	-						-				37.2
St Louis	22	52	-			13.0		25.6	-		35.0	37.9	36.2
Dkr Bango	29	51	-			12.1	18.1	24.2	26.9	31.5	32.8	38.8	-
"	32	50	-			10.0	18.5	23.2	30.6	29.5	-	-	-
"	36	49	-			-	-	-	-	-	-	-	-
"	40	48	-			-	-	-	-	-	-	-	-
"	45	47	-			8.0	14.8	20.4	25.6	26.1	-	38.0	34.5
Maka	49	46	30.10	36.94		6.3	13.6	17.3	23.2	27.1	30.8	37.9	34.7
"	54	45	-	-		4.8	-	17.3	23.2	25.3	31.8	37.9	35.3
I. Tieng (aval)	60	44	-	-		4.3	13.2	-	21.5	24.2	-	-	-
(amont)	65	43	26.41	36.37		2.6	9.1	-	20.4	23.4	29.9	35.5	33.4
Diar	69	42	-	-		4.40	10.0	14.8	18.8	24.2	28.9	35.1	33.9
"	73	41	-	39.84		3.80	10.5	14.7	18.8	24.2	28.0	-	-
Tiguët	76	40	-	34.76		3.40	10.0	13.4	18.3	23.4	28.0	34.2	33.6
Djoudj	79	39	26.67	33.21		3.50	10.3	13.9	19.8	23.4	-	-	-
"	82	38	26.33	-		3.50	11.4	12.5	17.7	23.4	27.0	34.4	32.3
Débi	87	37	25.54	33.09		2.50	9.3	12.1	17.3	23.8	-	-	33.2
Diamer	92	36	-	32.08		2.60	9.4	10.5	16.8	20.2	26.7	33.7	-
"	98	35	-	31.35		1.90	9.3	10.5	15.8	19.7	26.2	32.8	31.9
Crocodiles	102	34	-	30.72		1.50	9.0	9.9	14.4	18.7	24.0	32.0	31.3
Diakal	105	33	-	30.03	15.11	1.20	8.5	8.3	13.4	17.4	-	30.8	-
"	109	32	-	28.93		0.85	6.0	8.6	-	16.6	-	-	30.4
Rheune	114	31	18.31	27.56	11.81	0.16	5.5	7.1	12.2	15.8	22.5	-	28.7
Diawar	122	30	16.34	25.89		-	5.0	7.0	11.2	14.5	19.8	29.1	-
Ouassoul	126	29	16.59	25.67		-	-	6.8	9.9	14.5	19.5	27.9	26.2
Rong	130	28	14.46	24.71	7.49	-	3.9	6.4	9.5	13.4	-	-	-
Corom	134	27	13.72	24.19		-	2.8	6.0	8.4	12.1	18.8	26.0	23.0
Rhor	140	26	12.78	22.80		-	2.2	3.3	6.4	11.2	15.6	24.4	21.3
Ntiagar	150	25	10.71	20.40	8.26	<0.1	0.65	2.7	5.7	9.3	13.6	21.8	19.4
Rosso	154	24	10.36	18.89			0.40	2.6	4.8	8.4	13.9	21.2	18.2
Mbagam	158	23	8.91	17.59			0.15	2.2	4.3	7.7	12.4	19.6	17.1
Rd Toll	167	22	8.11	16.33			<0.01	2.4	3.9	6.0	11.2	17.5	18.1
Rhouma	170	21	-	16.15			-	1.9	-	5.8	-	-	-
Guidakar	176	20	7.55	14.02			-	1.2	2.5	5.6	-	14.9	15.4
K. Mour	187	19	5.50	12.83			-	0.23	2.0	3.5	-	13.6	14.4
Dagana	192	18	4.93	11.04				<0.1	0.9	2.6	6.6	12.4	11.5
Gaé	205	17	2.80	9.64				-	0.1	1.8	-	9.0	9.8
Ndiarème	210	16	2.65	8.54					<0.1	1.4	-	8.7	8.7
Hokoul	217	15	1.45	8.01					-	0.5	3.8	8.3	8.0
Ngalanka	233	14	0.35	4.55						<0.1	-	4.7	5.4
Ndiayao	241	13	<0.1	3.84						-	0.44	4.2	3.80
Dar Salam	245	12		2.61		<0.1	<0.1				0.35	3.4	3.10
Bakao	249	11		1.52							0.10	2.8	2.52
L. Peul	254	10		1.39							<0.1	1.95	-
I. Lam Nayo	261	9		1.13				<0.1				1.25	2.09
L. Doué	272	8		0.34								0.31	0.74
Niandane	288	7		0.03					<0.1	<0.1		<0.1	0.1
Guia	304	6	<0.1	<0.1									<0.1
Niaoulé	283	5		0.06									
Podor	292	4		0.03							<0.1		
Diatal	300	3		<0.1								<0.1	<0.1
Danaye	309	2		<0.1									
Mbayo	322	1		<0.1									

Tableau XIII : Evolution saisonnière de la salinité (‰) dans la basse vallée du Sénégal de mai 1981 à juillet 1982.



Stations	Point kilométrique et n°		Intrusion saline 1982-1983 (salinité ‰)														
	Km	N°	25/10	17/11	30/11	13/12	28/12	12/01	27/01	10/02	22/02	15/03	31/03	19/04	03/05	26/05	09/06
			1982	1982	1982	1982	1982	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983
Gandiole	5	56			27.0						35.0	34.1	35.0	35.5	0		
"	10	55								29.6	29.8	32.6	34.7	34.7	34.9		
"	15	54								28.1	29.0	32.0	33.2	34.1	34.5		
"	20	53							21.1	23.1	26.2	27.7	31.1	32.2	34.5	34.7	
St Louis	22	52					15.4	21.0	21.6	25.3	25.3	29.7	31.4	32.9	33.2	38.1	
Dkr Bango	29	51	0.19	3.8	7.4	11.2	13.1	19.2	20.4	23.9	25.7	27.4	30.4	32.5	33.7	-	
"	32	50	<0.1	3.6	6.8	9.9	12.4	-	18.8	21.2	24.5	-	28.3	30.4	31.6	31.3	-
"	36	49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
"	40	48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
"	45	47	0.19	1.8	4.4	7.8	9.8	14.8	14.2	18.3	21.7	25.1	28.6	29.9	31.4	-	-
Maka-Diama	49	46	0.13	1.5	4.2	5.8	8.85	14.6	14.2	17.6	21.3	24.5	27.3	28.5	28.6	-	-
"	54	45	<0.1	-	3.4	-	7.7	15.3	14.4	15.2	18.6	21.9	-	28.0	28.6	-	-
I. Tieng (aval)	60	44	-	-	-	-	6.1	-	13.7	13.3	17.7	20.4	24.9	-	-	-	-
" (amont)	65	43	-	0.28	-	4.2	4.4	-	13.0	14.0	15.7	17.8	23.6	26.4	26.7	-	-
Diar	69	42	0.1	2.0	2.6	6.1	11.1	11.4	13.1	17.6	20.2	23.6	25.8	25.8	32.4		
"	73	41	<0.1	-	1.95	5.4	10.6	-	13.0	17.1	20.4	23.2	25.8	27.6	30.9		
Tiguet	76	40	-	0.9	1.6	4.95	10.0	9.6	12.5	16.9	20.2	23.2	25.4	25.4	31.4		
Djoudj	79	39	-	0.3	1.65	5.0	10.0	9.9	12.5	17.0	20.3	23.8	25.4	25.8	30.9		
"	82	38	-	<0.1	1.58	5.0	-	9.6	12.3	16.4	20.5	23.7	25.4	25.6	-		
Débi	87	37	-	-	1.25	4.2	9.9	-	12.2	16.2	19.6	21.7	24.6	24.9	30.6		
Diamer	92	36	-	-	0.95	4.0	-	8.3	10.0	14.0	18.0	21.4	23.9	24.1	31.0		
"	98	35	-	-	0.31	3.95	8.0	8.5	9.8	12.0	16.8	19.4	23.0	22.0	27.9		
Crocodiles	102	34	-	-	0.12	3.53	7.4	7.9	9.7	11.5	16.3	18.8	23.0	22.5	27.8		
Diakal	105	33	-	-	<0.1	3.40	-	-	8.1	9.9	15.3	-	-	-	-		
"	109	32	-	-	-	2.62	6.2	7.6	7.8	9.4	15.2	18.4	21.8	21.7	26.7		
Rheune	114	31	-	-	-	1.43	4.9	5.0	6.25	8.2	14.4	16.6	19.0	20.3	24.9		
Diawar	122	30	-	-	-	1.23	4.1	4.8	5.55	7.2	12.4	14.2	17.6	17.5	26.1		
Ouassoul	126	29	-	-	-	1.15	4.05	5.3	5.40	7.0	11.6	14.4	17.4	17.6	22.9		
Rong	130	28	-	-	-	0.87	-	4.2	4.8	5.75	12.3	14.0	15.8	16.7	20.8		
Gorom	134	27	-	-	-	0.65	2.4	3.8	4.55	5.4	10.2	13.0	14.7	14.7	20.1		
Rhor	140	26	-	-	-	0.13	1.08	2.3	3.8	5.3	8.8	11.2	14.2	13.4	18.9		
Ntiagar	150	25	-	-	-	0.1	0.20	1.8	2.8	3.88	8.6	10.2	12.2	12.2	17.0		
Rosso	154	24	-	-	-	<0.1	0.31	1.5	2.55	3.64	7.8	9.9	11.3	11.3	16.4	22.5	
Mbagam	158	23	-	-	-	-	0.37	1.4	2.12	3.46	6.3	9.3	10.5	8.0	15.2	21.6	
Rd Toll	167	22	-	-	-	-	0.19	0.55	1.50	2.90	6.3	7.5	9.5	9.2	13.8	19.9	
Rhouma	170	21	-	-	-	-	0.1	0.33	1.04	2.20	6.2	6.0	7.7	7.1	-	19.0	
Guidakar	176	20	-	-	-	-	<0.1	0.1	1.7	2.60	5.4	7.2	8.8	9.0	12.1	16.3	
K. Mour	187	19	-	-	-	-	-	<0.1	0.45	1.10	5.0	5.0	7.4	7.0	10.1	16.0	
Dagana	192	18	-	-	-	-	-	-	0.1	0.38	4.2	3.3	5.5	5.7	9.65	13.6	
Gaé	205	17	-	-	-	-	-	-	<0.1	0.1	0.9	2.3	4.3	4.7	7.5	11.0	
Ndiarème	210	16	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	0.8	1.9	3.8	4.3	7.3	10.7	
Bokoul	217	15	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5	1.3	2.9	2.9	6.1	10.1	
Ngalanka	233	14	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	0.25	1.1	1.2	2.75	6.1	
Ndiayao	241	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	0.3	0.38	2.65	4.7	
Dar Salam	245	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.12	2.40	4.4	
Bakao	249	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	-	1.92	3.8	
L. Peul	254	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	1.42	3.0	
I. Lam Nayo	261	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	1.20	-	
L. Doué	272	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.28	1.2	
Niandane	288	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.3	
Guia	304	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	
Niaoulé	283	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	0.29
Podor	292	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	-	<0.1	
Diatal	300	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	-	
Donaye	309	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Mbayo	322	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1

Tableau XIV : Evolution saisonnière de la salinité (‰) dans la basse vallée du Sénégal d'octobre 1982 à juin 1983.



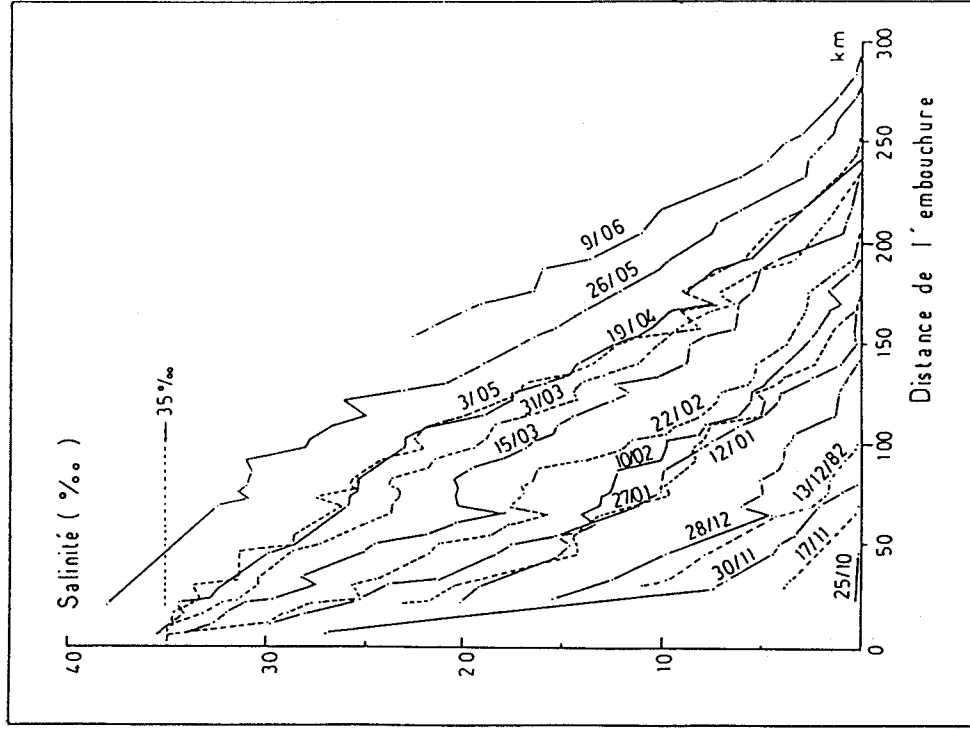
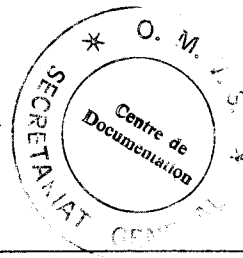


Fig. 23 : Evolution de la salinité dans la vallée d'octobre 1982 à juin 1983.

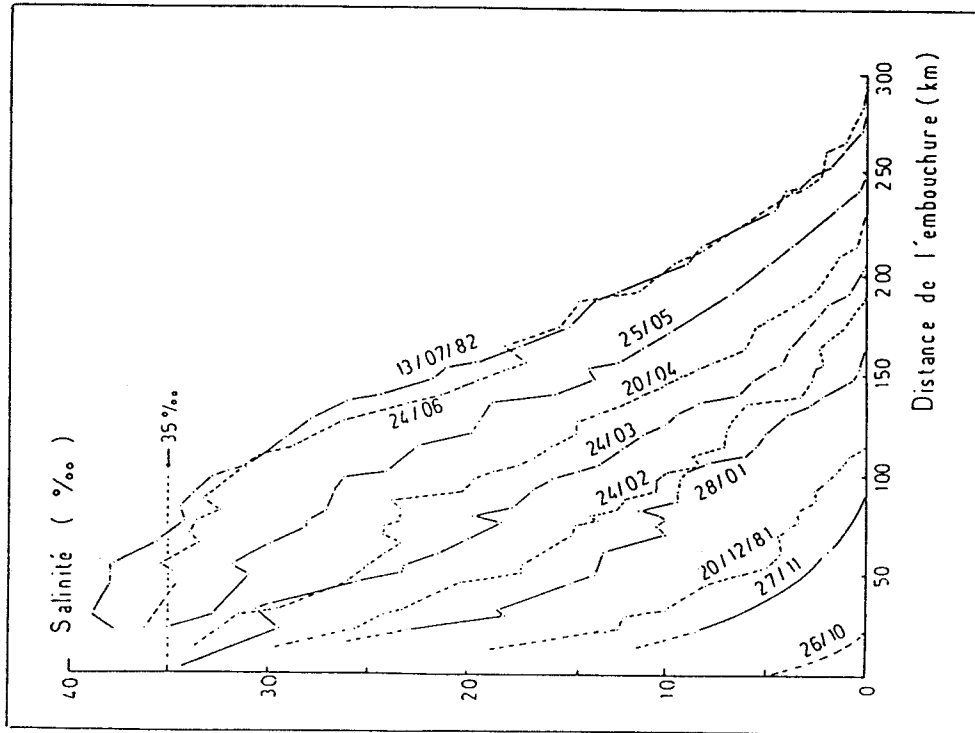


Fig. 22 : Evolution de la salinité dans la vallée d'octobre 1981 à juillet 1982.

l'idée de ROCHETTE (1974) d'une substitution vers cette date du paramètre "débit" par le paramètre "temps". On remarque déjà que cette transition s'effectue pour une valeur du débit à Dagana de l'ordre de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  (Débit à Dagana :  $19,9 \text{ m}^3/\text{s}$  le 24 février 1982), valeur bien éloignée des  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  proposés par ROCHETTE (1964).

1982-1983 : (fig. 23)

"L'épisode marin" présente une physionomie tout à fait comparable à celle de l'année précédente. SAOS *et al.* (1984) ont présenté les caractéristiques essentielles de cette nouvelle intrusion saline :

- début de l'intrusion saline vraisemblablement vers la mi-octobre 1982 ;
- taux maximum de salinité vers le 22 juin 1983, le sel ayant probablement dépassé pendant quelques jours la section de Podor (km 292) ;
- présence des mêmes irrégularités sensiblement dans les mêmes secteurs de la vallée (vers les km 70 et 120) ;
- modifications dans l'allure des courbes : le passage d'une forme concave à une forme convexe semblant se situer entre les campagnes du 22 février et du 15 mars 1983, c'est-à-dire pour des débits à Dagana de l'ordre, à nouveau, de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ .

De ces différentes campagnes, on peut tirer les enseignements suivants :

- l'application des abaques proposés par ROCHETTE (1964) nous conduit à sous-estimer l'ampleur de l'intrusion saline ;
- la progression du front salé n'est pas régulière et les à-coups observés sont vraisemblablement imputables à la présence de seuils rocheux dans le lit mineur de la vallée. On remarque en effet que les irrégularités observées se situent approximativement à la hauteur du haut-fond de Faff (km 120) et de la grande dépression topographique signalée peu en amont de Débi, vers le km 70 dans le profil longitudinal du lit du fleuve (fig. 1) ;
- les modifications dans l'allure des courbes traduisent, avec certitude, un changement de rythme dans la progression du front salé vers l'amont.

Ces différentes conclusions nous ont amené, au terme de cette étude, à reconsidérer les propositions de ROCHETTE (1964) afin de mieux saisir cette "réalité contraignante" qu'est devenue l'invasion marine annuelle dans l'ensemble des estuaires de la Sénégambie.

## VII. PROPOSITIONS NOUVELLES DE MODÉLISATION DE L'INTRUSION SALINE DANS LA VALLÉE DU FLEUVE SÉNÉGAL

A - CONFRONTATION ENTRE LES ESTIMATIONS A L'AIDE DU MODELE DE ROCHETTE ET LA REALITE DES OBSERVATIONS

Les deux figures 24 et 25 montrent les principales divergences dans les positions saisonnières respectives des différentes isohalines :

- le trait le plus marquant réside dans la position géographique de l'abscisse maximale atteinte par le front salé : nos observations la fixent à la hauteur de Podor, soit entre 50 et 70 km plus à l'amont que le modèle de ROCHETTE (l'application des abaques de cet auteur ne l'estime en effet qu'au niveau du confluent entre le Sénégal et le marigot du Ngalanka) ;
- la même constatation peut être faite pour l'isohaline à 35 ‰ figurant l'eau de mer "pure". Dans les deux exemples, les abaques la situe, lors du maximum de pénétration saline, à quelques km en amont de la ville de St Louis, alors que nos observations la positionnent à près de 70 km de l'embouchure (soit plus de 20 km en amont du futur barrage anti-sel de Diama) ;
- le temps de séjour des différents taux de salinité dans toute la vallée est bien plus élevé que prévu. On relève, par exemple à Richard-Toll, la présence de taux supérieur à 10 ‰ pendant près de 40 jours ; à Rheune, la salinité se maintient au-dessus de 25 ‰ durant un mois, et l'eau de mer "pure" (35 ‰) réside à Diama pendant plus de 3 semaines.

Ces différences importantes entre les estimations à l'aide du modèle de ROCHETTE (1964) et les valeurs observées sur le terrain nous ont amené à revoir les abaques proposés afin de mieux cerner la réalité de chaque intrusion saline dans la basse vallée du Sénégal.

B - LES ALTERNATIVES DE MODIFICATIONS DES DIFFERENTS SEUILS

1. La prise en compte des migrations de l'embouchure et de sa section

Les déplacements de l'embouchure et les variations de sa section influencent le phénomène annuel de la remontée saline. Pour sa part, ROCHETTE (1964) attribue un rôle plus important à la largeur de "la passe" qu'à la migration proprement dite de l'embouchure du fleuve : une ouverture plus grande engendrant une augmentation de l'amplitude moyenne de la marée.

2. Le début de l'intrusion saline : le seuil des 600 m<sup>3</sup>/s

D'après les observations journalières de la salinité à St Louis, l'intrusion saline débiterait avant le franchissement du seuil de 600 m<sup>3</sup>/s, lors de la phase de tarissement du fleuve. Le gain de temps reste cependant très faible (au maximum : une semaine) et le "débit-clef" pour le début de la remontée saline serait de l'ordre de 750 m<sup>3</sup>/s (d'après les données de 1981-1982 et 1982-1983).

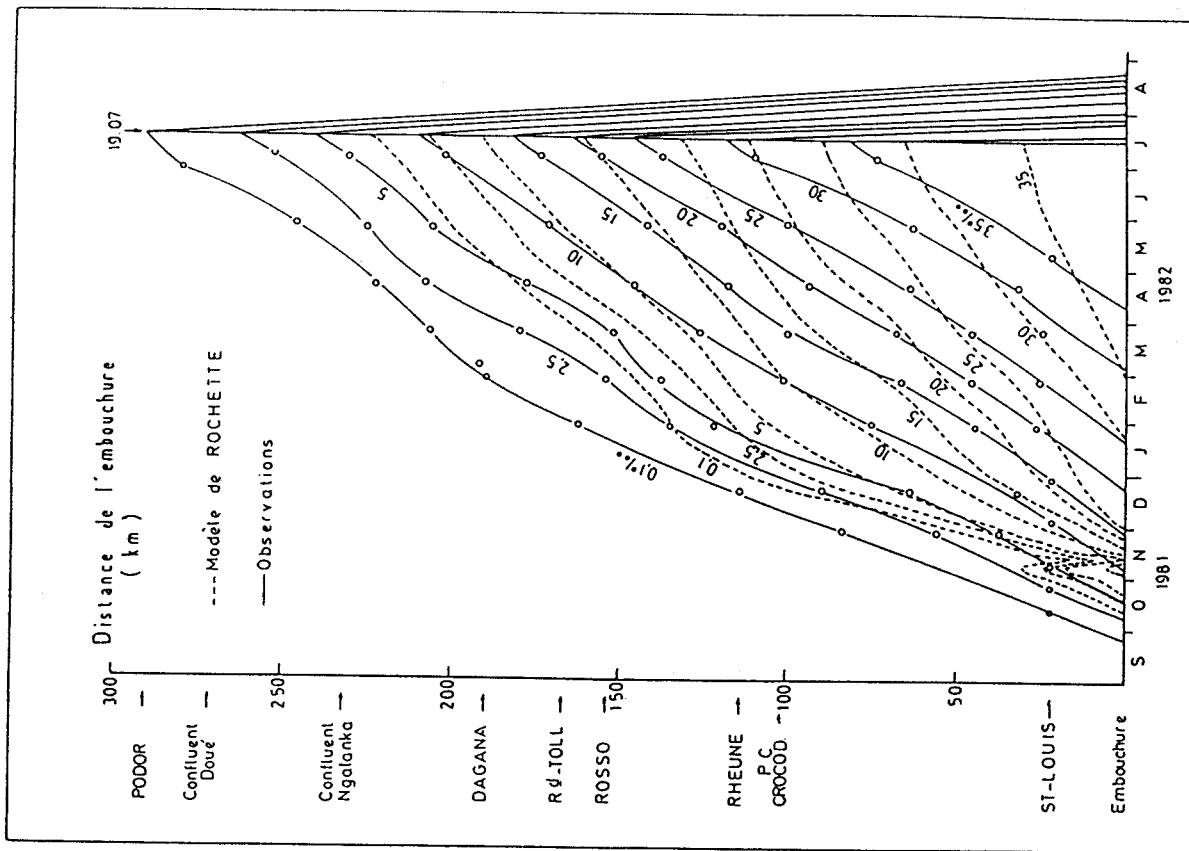


Figure 24 : Comparaison entre les salinités observées et les estimations à l'aide des diagrammes de ROCHETTE (1964) en 1981-1982.

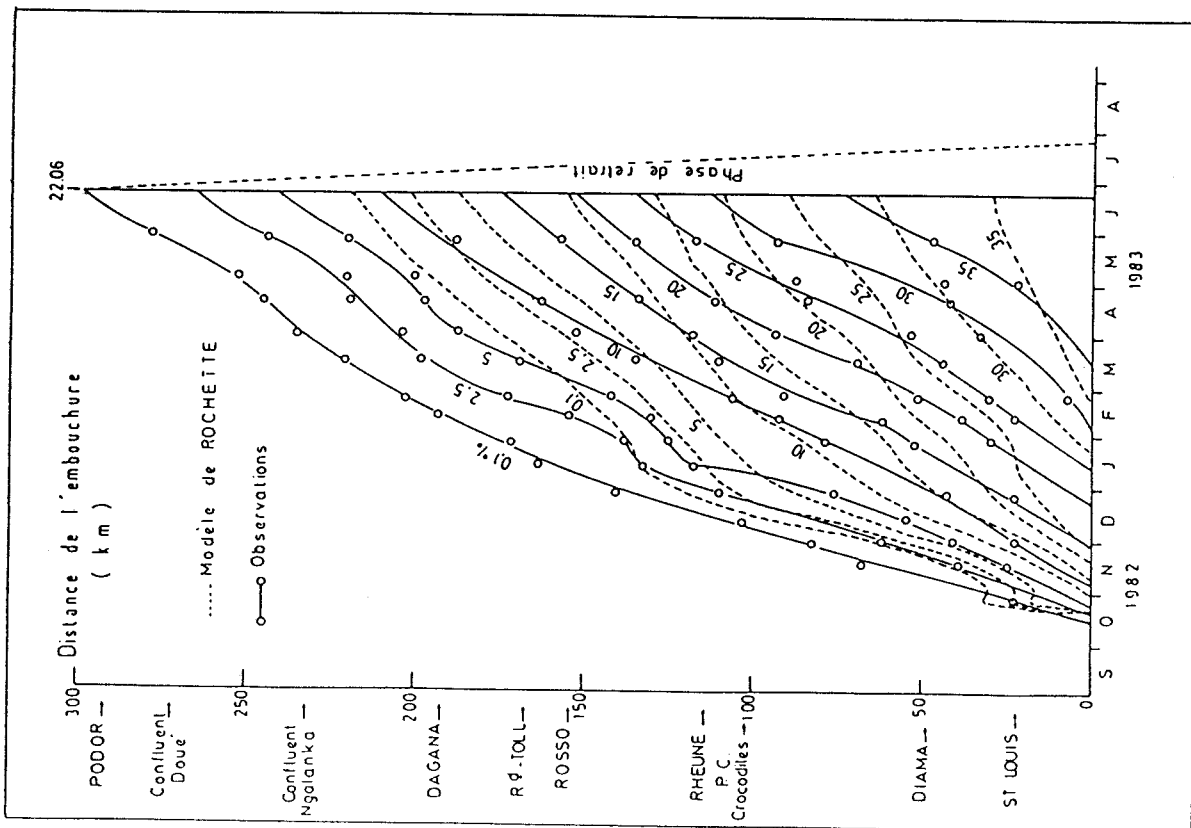


Figure 25 : Comparaison entre les salinités observées et les estimations à l'aide des diagrammes de ROCHETTE (1964) en 1982-1983.

3. La substitution du paramètre "temps" au paramètre "débit" :  
les seuils de 50 m<sup>3</sup>/s, 20 m<sup>3</sup>/s et 5 m<sup>3</sup>/s

On peut rappeler à ce sujet les propos de ROCHETTE (1964) :  
"La valeur limite du débit fluvial est assez délicate à déterminer ; nous l'avons fixée arbitrairement à 50 m<sup>3</sup>/s, valeur volontairement élevée pour tenir compte de l'avantage que présente la substitution du paramètre "temps" au paramètre "débit" quand ce dernier ne peut être déterminé exactement."

A la réflexion, il s'agit bien là de la difficulté principale. Dans toute tentative de compréhension d'un mécanisme, ou d'un phénomène qui se prolonge, la substitution d'un paramètre explicatif par un autre implique nécessairement la notion de modification profonde dans les caractéristiques du mécanisme ou du phénomène concerné. Dans le cas de l'intrusion saline, une seule hypothèse paraît plausible : un changement de rythme dans la progression du front salé vers l'amont.

Cette hypothèse d'un changement de rythme nous a conduit à envisager plusieurs valeurs de ce débit critique volontairement choisi trop élevé par ROCHETTE (1964).

En se basant sur les campagnes de mesure de salinité menées d'octobre 1981 à juin 1983, le "lissage" des courbes obtenues sur les figures 22 et 23 permet d'aboutir à la représentation graphique de la figure 26 (les irrégularités introduites vraisemblablement par la présence de seuils rocheux ont été négligées). Les deux intrusions salines consécutives de 1981-1982 et 1982-1983 se caractérisent par un changement dans l'allure des courbes : de concaves, elles deviennent convexes, et sensiblement aux mêmes dates (entre le 24/02 et le 24/03 en 1982 ; entre le 22/02 et le 15/03 en 1983). Ces dates correspondent à des débits respectifs à Dagana de 19,9 m<sup>3</sup>/s et 6,68 m<sup>3</sup>/s en 1982 et à 17,3 m<sup>3</sup>/s et 4,9 m<sup>3</sup>/s en 1983.

Le changement de rythme dans la progression du front salé se situerait donc bien plus tardivement que ne l'admet ROCHETTE (1964) : le seuil de 50 m<sup>3</sup>/s a en effet été franchi les 23 janvier 1982 et 14 janvier 1983. Les valeurs sensiblement identiques en 1982 et 1983 des débits "critiques" à Dagana amènent à envisager deux possibilités : substitution du paramètre "temps" au paramètre "débit" pour les seuils de 20 m<sup>3</sup>/s et de 5 m<sup>3</sup>/s.

La figure 27 montre qu'il n'y a pas de variations significatives dans le déplacement des différentes isohalines en utilisant les débits de 20 m<sup>3</sup>/s et de 5 m<sup>3</sup>/s. En 1981-1982 par exemple, l'abscisse maximale se situe le 19 juillet 1982 vers le km 240 (les observations "in situ" donnent 290 km environ, et le modèle de ROCHETTE en utilisant le seuil de 50 m<sup>3</sup>/s la fixe à 226 km). L'isohaline à 35 ‰ franchit la section de Diamas : elle atteint le km 56 avec 20 m<sup>3</sup>/s et le km 58 avec 5 m<sup>3</sup>/s (les mesures de salinité la positionnent au km 80 et le modèle à 30 km de l'embouchure).

En conclusion, l'introduction de nouvelles valeurs de débit (déterminées par l'allure des courbes et le changement, constaté, de rythme dans la progression du front salé vers l'amont) et l'utilisation de la relation salinité-temps établi par ROCHETTE (1964) conduisent à une sous-estimation de l'évolution spatio-temporelle de la salinité dans la vallée.

Figure 27 : Les divergences entre l'observation et l'utilisation des diagrammes de ROCHETTE pour différentes valeurs du débit critique (50, 20, 5 m<sup>3</sup>/s). Représentation de l'isohaline 0,1 ‰ .

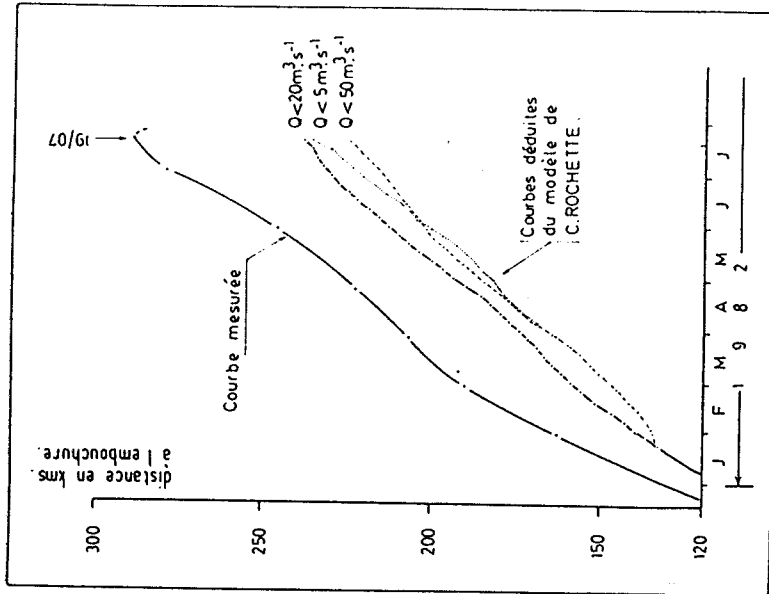
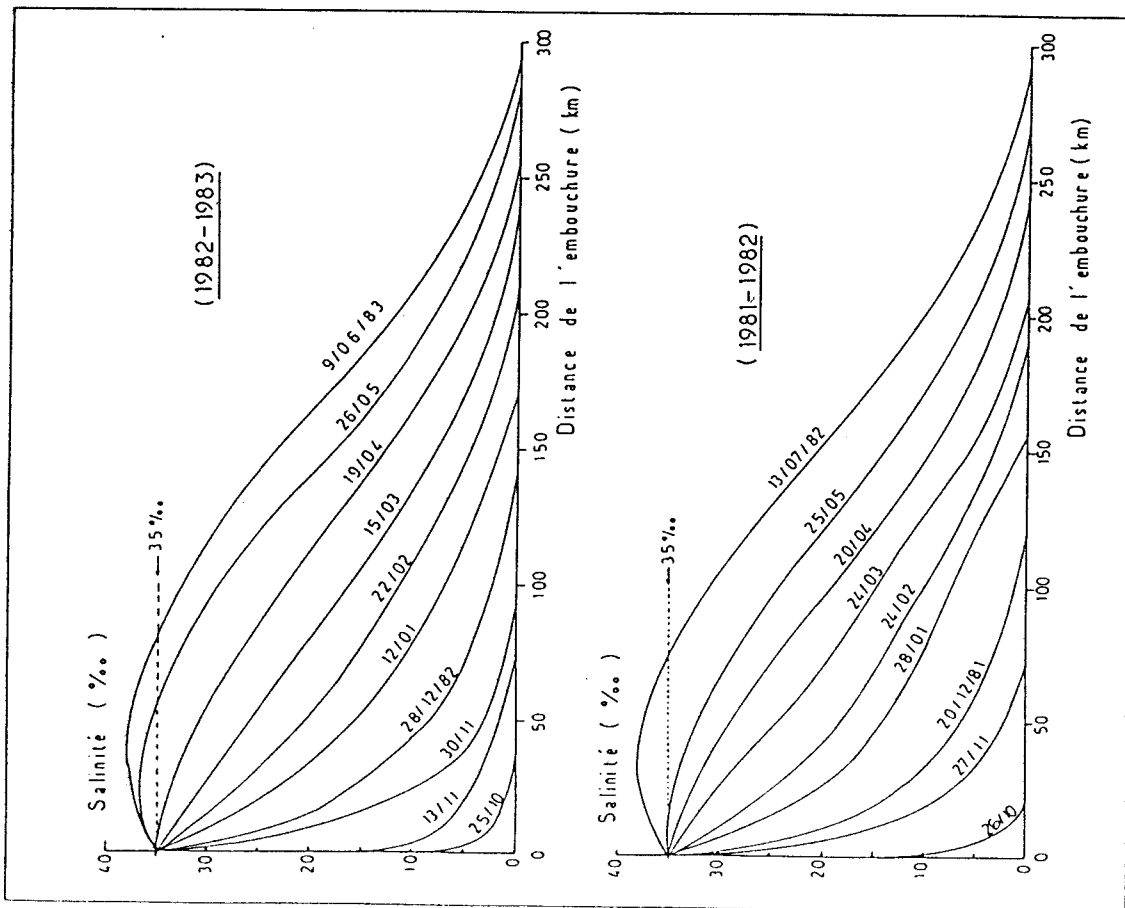


Figure 28 : Représentation schématique de la progression saisonnière du front salé de 1981 à 1983.



C - PROPOSITIONS DE NOUVEAUX DIAGRAMMES FIXANT LA SALINITE MOYENNE  
A UNE DISTANCE DONNEE DE L'EMBOUCHURE EN EPISODE ARIDE

Les nouveaux diagrammes présentés sur les figures 28 et 29 ont été établis à partir de l'ensemble des mesures de salinités réalisées au cours des deux intrusions marines de 1981-1982 et de 1982-1983 dont les caractéristiques sont très semblables. Le seuil de 20 m<sup>3</sup>/s a été adopté pour fixer la transition entre les paramètres temps et débit. Ces deux diagrammes permettent de déterminer à tout moment la salinité moyenne, en un point donné de la vallée, en fonction du débit pour des valeurs supérieures à 20 m<sup>3</sup>/s (abaque I), et en fonction du temps (abaque II) pour des débits inférieurs tant que l'étiage du fleuve se poursuit.

On peut également mettre ces résultats sous une forme directement exploitable. L'allure des courbes représentatives des différentes isohalines n'est pas en effet sans rappeler la loi exponentielle qui caractérise la décroissance des écoulements du fleuve pendant les phases de tarissement et d'épuisement. La formulation du phénomène annuel de l'invasion marine s'exprime alors par une série d'équations donnant la position des isohalines en fonction des seuls débits exprimés en coordonnées logarithmiques.

En distinguant les deux épisodes (débit supérieur ou inférieur à 20 m<sup>3</sup>/s), on aboutit aux équations suivantes où D indique l'éloignement en km de l'embouchure et Q le débit fluvial en m<sup>3</sup>/s.

750 m<sup>3</sup>/s > Q > 20 m<sup>3</sup>/s

Isohalines 0,1 ‰	:	D(0,1)	=	-100,0 log Q + 325
" 2,5 ‰	:	D(2,5)	=	-104,4 log Q + 301
" 5 ‰	:	D(5,0)	=	-109,0 log Q + 282
" 10 ‰	:	D(10,0)	=	-107,3 log Q + 252
" 15 ‰	:	D(15,0)	=	- 95,9 log Q + 203
" 20 ‰	:	D(20,0)	=	- 77,9 log Q + 153
" 25 ‰	:	D(25,0)	=	- 68,2 log Q + 117

Q < 20 m<sup>3</sup>/s

Isohalines 0,1 %	:	D	=	-46,1 log Q + 255
" 2,5 %	:	D	=	-46,9 log Q + 226
" 5 %	:	D	=	-49,2 log Q + 204
" 10 %	:	D	=	-43,8 log Q + 169
" 15 %	:	D	=	-48,4 log Q + 141
" 20 %	:	D	=	-52,5 log Q + 120
" 25 %	:	D	=	-43,6 log Q + 85
" 30 %	:	D	=	-41,0 log Q + 53
" 35 %	:	D	=	-14,0 log Q + 15

Selon nos estimations, le débit maximum au cours du cycle hydrologique 1983-1984 n'a pas atteint à l'embouchure la valeur de 900 m<sup>3</sup>/s. De plus, l'hydrogramme de crue présente une éphémère remontée des débits vers la mi-août avant une première phase de décrue en septembre : entre

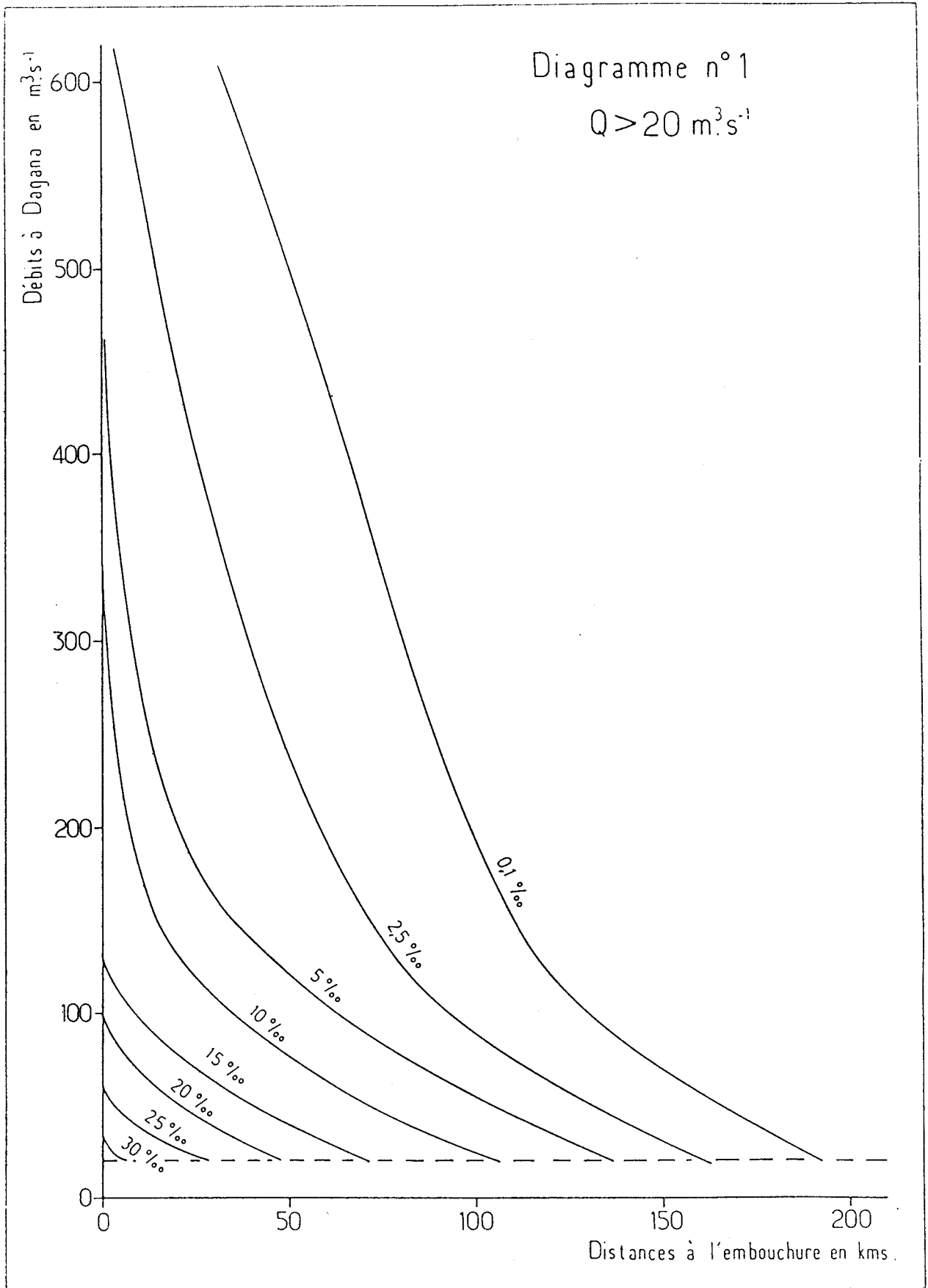
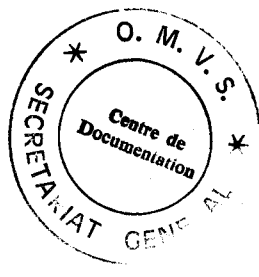
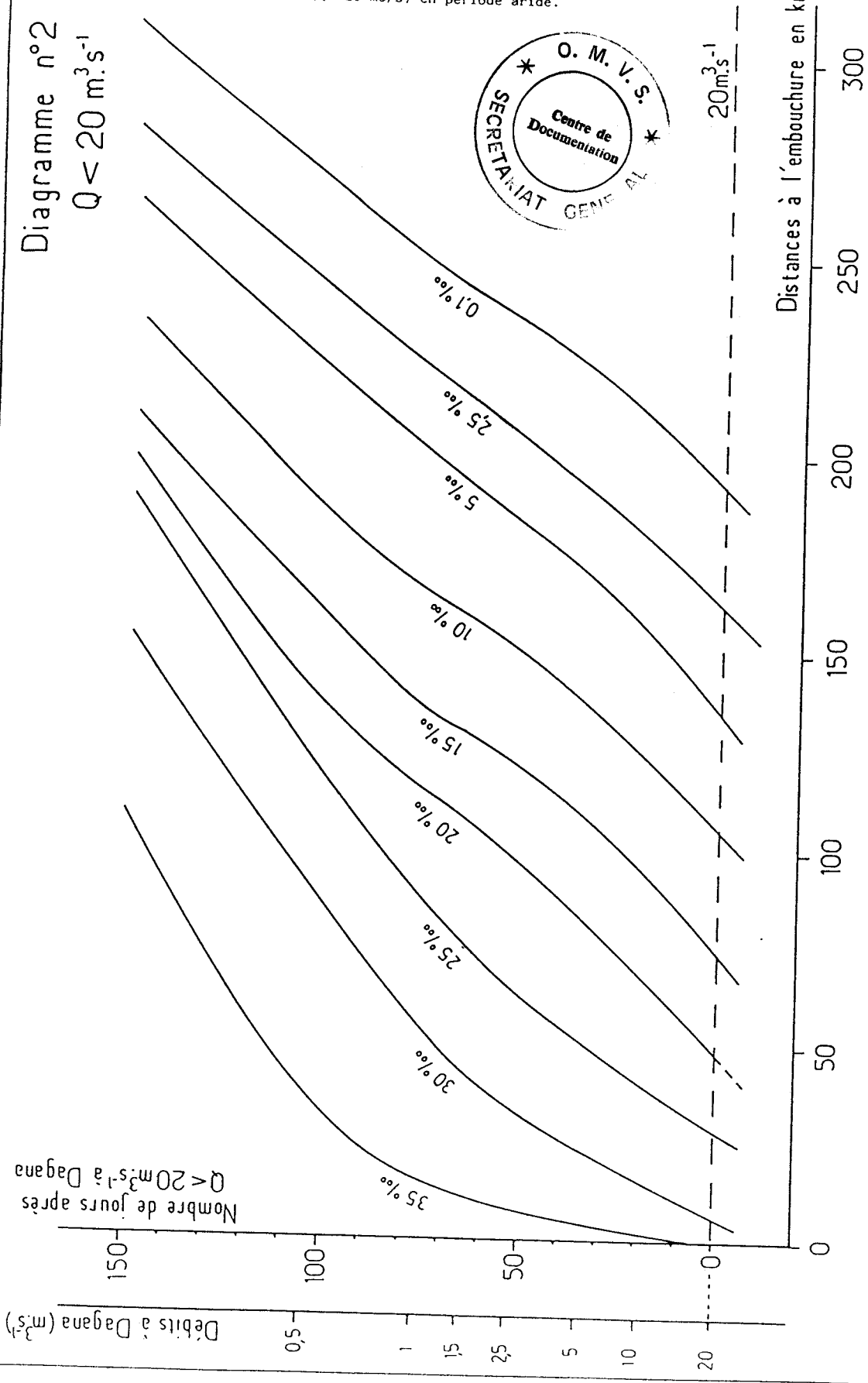


Figure 28 : Relation débit-salinité moyenne de base ( $Q > 20 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en période aride.



Diagramme n°2  
 $Q < 20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Figure 29 : Relation temps-salinité moyenne de base  
( $Q < 20 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en période aride.



le 13 et le 23 septembre 1983, les écoulements ont à peine été supérieurs à  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  et le sel a pu entamer sa remontée vers l'amont du fleuve. La décrue générale a eu lieu dès le début d'octobre, et l'invasion marine a dû s'amorcer vers le 15 octobre. Cette date précoce a, on le sait, été à l'origine de l'édification du barrage en terre de Rheune I.

Ce barrage provisoire, situé à 114 km de l'embouchure, fut achevé en toute hâte le 25 novembre 1983, le sel ayant atteint la hauteur de Rheune quelques jours auparavant. Ces précisions nous ont permis de tester les abaques proposés. Le 25 novembre 1983, pour un débit de  $150 \text{ m}^3$  environ, abaques et équations positionnent le front salé au niveau du km 108, soit seulement à 6 km en aval de Rheune !

Le barrage de Rheune I a été emporté par la crue 1984-1985 : d'après les observateurs de l'ORSTOM (M. BENOIT et H. SANE), le bouchon aurait "sauté" le 23 juillet 1984 sous la poussée des eaux douces. Même en admettant que la première onde de crue se soit présentée vers le 1er juillet 1984, nos abaques permettent d'affirmer qu'en l'absence de Rheune, l'invasion saline 1984-1985 aurait été ressentie bien en amont de Podor sur le Sénégal et de Guia, sur le Doué, soit à plus de 300 km de l'embouchure. Il se serait agi de la plus importante pénétration marine depuis le début du XXème siècle.

## CONCLUSION

Ouvert sur l'Océan Atlantique, le bassin du fleuve Sénégal est envahi régulièrement par les eaux marines. Cette intrusion saline est devenue par son ampleur et son extension vers l'amont un événement saisonnier majeur pour les populations riveraines de la basse vallée du fleuve.

Quatre causes principales permanentes déterminent chaque année, après le passage de la crue, la remontée des eaux marines vers l'amont du fleuve : la morphologie du lit mineur, le régime du fleuve et ses faibles débits <sup>des</sup> basses-eaux, la puissance de la houle à l'embouchure et la forte pente du talus continental. D'une année sur l'autre, la propagation du front salé est étroitement liée à la nature des masses d'eaux océaniques qui séjournent temporairement en bordure du littoral, aux oscillations du niveau marin, aux effets différés du marnage et aux constantes variations de la morphologie et de la position de l'embouchure. Elle est aussi assujettie aux caractéristiques annuelles des phases de tarissement et d'épuisement du fleuve elles-mêmes dépendantes de l'importance des prélèvements pour l'irrigation, de l'intervention des nappes superficielles situées en bordure du réseau hydrographique et de l'évaporation.

Le mécanisme de l'incursion marine à l'intérieur du bassin sénégal-mauritanien se décompose en quatre épisodes dont les durées respectives sont déterminées par les conditions d'écoulements propres à chaque crue et donc à l'importance et à la répartition des précipitations sur le bassin versant. La première phase correspond à la présence d'eau douce depuis les sources du fleuve jusqu'à son embouchure et les trois dernières, au séjour des eaux saumâtres et salées dans la vallée. Selon ROCHETTE (1964, 1974), la migration vers l'amont de l'interface eau salée-eau douce se déclenche lorsque le débit du fleuve descend en dessous de  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  : l'importance de cette migration va alors dépendre de la plus ou moins grande précocité du tarissement et de la durée de la période des basses-eaux où les écoulements restent inférieurs à  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . L'arrivée de la crue suivante fixe l'abscisse maximale atteinte par la salure et contrôle la phase finale du retrait des eaux saumâtres.

A l'aide des abaques proposées par ROCHETTE (1964, 1974), les caractéristiques essentielles et la chronologie des différentes phases de l'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal ont été précisées au cours des 80 dernières années (1903-1983). Avec toutes les réserves nécessaires, dues à certaines approximations souvent contestables mais indispensables pour progresser, les principaux enseignements de cette reconstitution sont les suivants :

- en moyenne, l'eau douce se maintient à l'embouchure d'août à novembre, soit pendant une période de 120 jours ; le temps de séjour le plus bref a été de 50 jours (en 1972) et le plus long, de 155 jours (en 1967) ;

- l'intrusion saline la plus précoce a été observée en 1979 et en 1983 (le 13 octobre) et la plus tardive, estimée pour l'année 1951 (le 28 décembre) ;
- sur la période de 80 ans, les eaux saumâtres ont en moyenne été décelables jusqu'à 200 km de l'embouchure, et leur temps de séjour moyen a pu être évalué à 250 jours ;
- les remontées minimales ne succèdent pas systématiquement aux crues les plus fortes et les plus importantes ne suivent pas nécessairement les crues les plus faibles ;
- autrement dit, si en général une crue faible engendre une intrusion rapide du biseau salé et une crue forte un temps de séjour moins long des eaux saumâtres dans la vallée, à deux crues d'importance très inégale peuvent aussi succéder deux incursions marines tout à fait comparables selon le caractère tardif ou précoce des ondes de crue suivantes (COGELS et GAC, 1983).

Les observations minutieuses de la remontée saline à la suite des cycles hydrologiques 1981-1982 et 1982-1983 (caractérisés par des écoulements extrêmement faibles) et leur confrontation avec les estimations à l'aide du modèle proposé ont permis de mettre en évidence des divergences importantes dans l'évaluation de l'évolution spatio-temporelle de la salinité. Les propositions anciennes ont été reconsidérées et une nouvelle formulation du phénomène annuel de l'invasion marine établie : elle précise à tout instant par une série d'équations la position respective des différents taux de salinité dans la vallée en fonction des seuls débits exprimés en coordonnées logarithmiques. Ces nouvelles équations de la forme  $(D = a \log Q + b)$  seront utilisées dans un prochain article pour réévaluer l'importance réelle de la remontée saline au cours des trois épisodes arides du siècle dans le fleuve Sénégal. Enfin, une extrapolation de la méthode proposée sera tentée au niveau des autres estuaires de la Sénégalie.

BIBLIOGRAPHIE

-oOo-

- BARUSSEAU (J.P.), 1980.- Essai d'évaluation des transports littoraux sableux sous l'action des houles entre St-Louis et Joal (Sénégal). Bull.ASEQUA, 58-59 :31-39.
- BRUNET-MORET (Y.), 1970.- Etude hydrologique en Casamance.Rapp.multigr. ORSTOM, Paris, 52p.
- BRIGAUD (F.), 1961.- Connaissance du Sénégal: L'hydrographie.Etudes Sénégalaises, IFAN, 9, 102 p.
- CHAUMENEY (P.), 1974.- Utilisation des eaux du Sénégal.Etude hydroagricole du bassin du fleuve Sénégal.R.A.F. 65/061.
- CHUDEAU (R.), 1916.- Le climat de l'Afrique occidentale et équatoriale. Ann.Géogr., XXV: p 429.
- COGELS (F.X.), GAC (J.Y.), 1982.- Le lac de Guiers: fonctionnement, bilans hydriques; Evoluton d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne Cah.ORSTOM, Sér.Géol., VII, 1:41-60.
- COGELS (F.X.), GAC (J.Y.), 1983.- Aménagement et évolution hydrogéochimique du lac de Guiers au Sénégal depuis 1916.Actes du colloque de l'AUPELF "Barrages en terre et développement des zones rurales en Afrique", 11-16 avril 1983 ,Thiès (Sénégal), 18p.
- COLEMAN (J.M.), WRIGHT (L.D.), 1975.- Moderns rivers deltas: Variability of processes and sand bodies. In deltas (Ed.M.L.Broussard): 99-149 Houston Geological society.
- D'AVEZAC (M.), 1840.- Analyse d'un voyage de MM.Caille, Huard, Bessiniere Potin, Petterson et Paul Holle au lac de Paniefoul et au pays wolof en octobre, novembre, décembre 1839. Bull.Soc.Géogr., XIV, 82:193-217.
- DUBOIS (J.), 1955.- Les sols du delta du Sénégal. Bull.M.A.S, St-Louis, Sénégal, 77p.
- ELOUARD (P.), FAURE (M.), HEBRARD (L.), 1977.- Variations du niveau de la mer au cours des 15000 dernières années autour de la presqu'île du Cap vert, Dakar-Sénégal. Bull.ASEQUA, 50:29-49.
- FAURE (H.), ELOUARD (P.), 1967.- Schéma des variations du niveau de l'océan Atlantique sur la côte Ouest de l'Afrique depuis 40 000 ans. C.R.Acad.Sci., Paris, 265:784-787.
- FAURE (H.), VIEILLEFON (J.), DIOP (CH.A.), 1974.- Evolution de la ligne de rivage holocène en Casamance(sud du Sénégal). Bull.ASEQUA, 42-43.

- GAC (J.Y.), KANE (A.), MONTEILLET (J.), 1982.- Migrations de l'embouchure du fleuve Sénégal depuis 1850. Cah. ORSTOM, Sér. Géol, XII, 1:73-76.
- GAC (J.Y.), MONTEILLET (J.), FAURE (M.), 1983.- Marine shorelines in estuaries as palaeoprecipitation indicators. Symposium on "Variations in the global water budget" (Eds A. Street-Perrot, M. Beran and R. Ratcliffe), Oxford (G.B.) 9-15 août 1981, Eds Reidel Pub. Comp., 1983, 361-370.
- GAC (J.Y.), KANE (A.), 1985.- Les flux continentaux particuliers et dissous à l'embouchure du fleuve Sénégal (Station de St-Louis) Rapp. ORSTOM, Dakar, février 1985, (sous presse).
- GUILCHER (A.), NICOLAS (J.P.), 1954.- Observations sur la Langue de Barbarie et les bras du Sénégal aux environs de St-Louis. Com. Centr. Oceanogr. Et. Côtes Fr., 6:227-243.
- HENRY (Y.), 1918.- Irrigations et cultures irriguées en Afrique tropicale. Eds. Larose, Paris, 296p.
- HUBERT (H.), 1921.- Eaux superficielles et souterraines au Sénégal. Eds. Larose, Paris, 30p.
- ICOLE (M.), GAC (J.Y.), MONTEILLET (J.), FAURE (H.), 1982.- Marqueurs biogéochimiques d'aridité dans l'estuaire du Sénégal et le Manga Nigérien. Bull. Assoc. Géogr. Paris, 484:62-64.
- IVANOV (V.V.), 1969.- Rapport sur les études hydrologiques du fleuve Sénégal. Mission 1968-1969. Trad. Russe par V.S VOSTRIKOV. ST-LOUIS Sénégal. O.E.R.S/U.N, 161p.
- JOIRE (J.), 1947.- Amas de coquillages du littoral Sénégalais dans la banlieue de St-Louis. Bull. IFAN, 9:170-340.
- MAC CULLOUGH (C.), 1977.- The thorn birds. Harper and Row (Ed.), New-York, 536p.
- MICHEL (P.), 1973.- Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Mém. ORSTOM, 63:845p.
- MONTEILLET (J.), 1977.- Tourbes de l'holocène inférieur (tchadien) dans le nord du delta du Sénégal. In colloque sur les variations des lignes de rivages à l'holocène. Bull. ASEQUA, 50:23-28.
- MONTEILLET (J.), ROSSO (J.C.), 1977.- Répartition de la faune testacée actuelle (mollusques et crustacés cirripèdes) dans la basse vallée et le delta du Sénégal. Bull. IFAN, A 39:788-820.
- MONTEILLET (J.), FAURE (H.), GAC (J.Y.), 1981.- Variations du niveau de la mer ou crues fluviales. IGCP project 61 / INQUA Meeting, Columbia (South Carolina) U.S.A., April 1981: Abstract.

- NICOLAS (J.P.), 1954.- Essai d'interprétation de l'évolution récente et contemporaine de l'embouchure du Sénégal. St-Louis, IFAN/MAS, :12p.
- PAPY, 1951.- La vallée du Sénégal. Agriculture traditionnelle et riziculture mécanisée. Cahiers d'outre mer . oct. Dec. 1951, 16:227-234. Etudes Sénégalaises, 2.
- PINSON-MOUILLOT (J.), 1980.- Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires du plateau continental Sénégalais. Thèse Univ. Bordeaux I, 106p.
- PIRAZZOLI (P.), 1977.- les variations des lignes de rivage depuis 2000 ans et leurs causes possibles. Ass. Sénégal. Quater. Afr. Bull. ASEQUA, 50: 95-105.
- REIZER (C.), 1971.- Contribution à l'étude hydrologique du bas Sénégal. Premières recommandations d'aménagements halieutiques. Nogent sur Marne, France, CTFT, 1971, 142p.
- ROCHETTE (C.), 1964.- Remontée des eaux marines dans le fleuve Sénégal. St-Louis. Sénégal, .M.A.S. et ORSTOM , 81p.
- ROCHETTE (C.), 1974.- Le bassin du fleuve Sénégal. Paris , ORSTOM, Monog. Hydrol, 1:391p.
- TRICART (J.), 1961.- Notice explicative de la carte géomorphologique du delta du Sénégal. Mémoire BRGM , 8:137p.
- TROCHAIN (J.), 1940.- Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal. Paris, Eds. Larose, 434p.