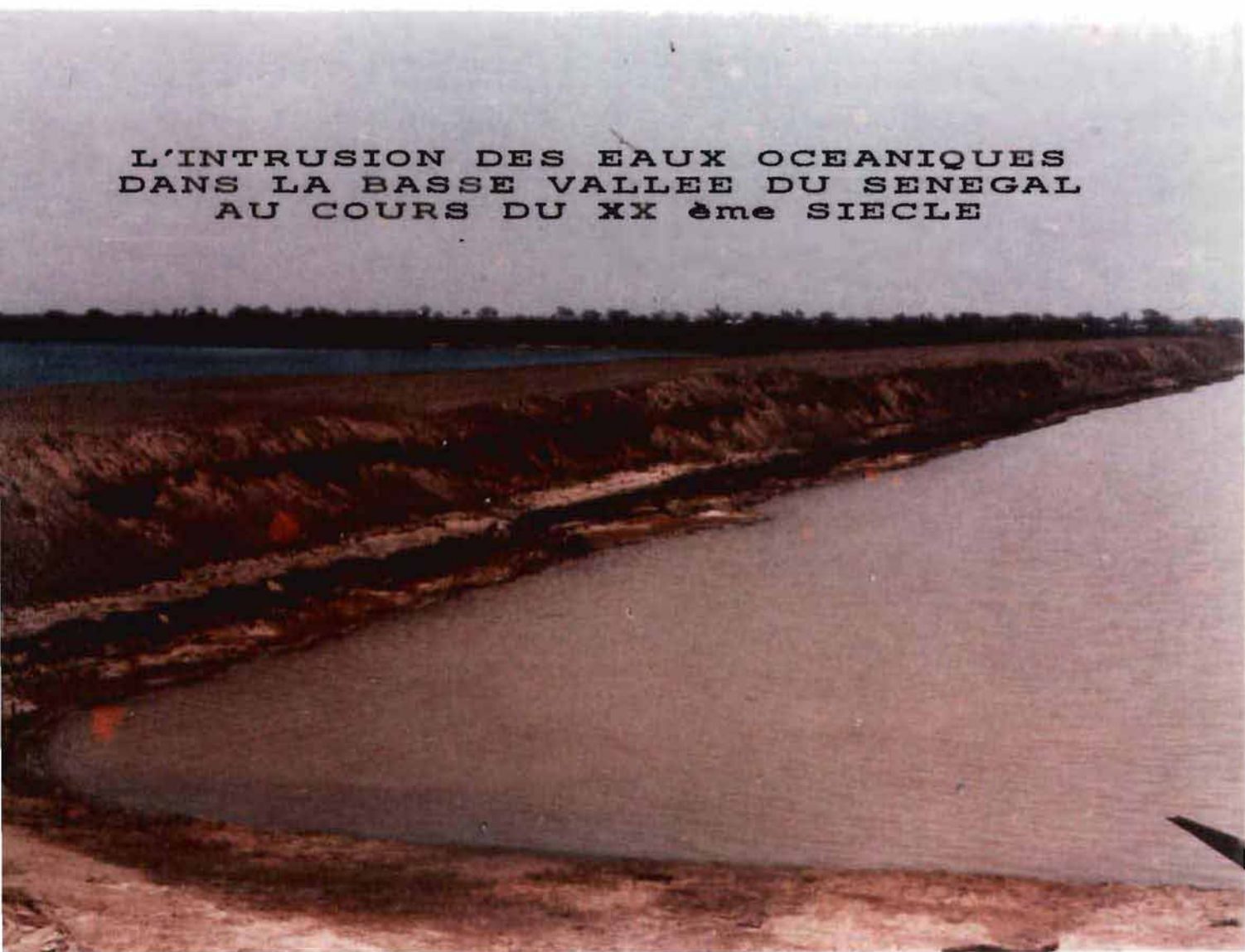


Jean Yves GAC, Jean Luc APPAY, Bernard LABROUSSE (1)

PROJET CEE (EQUESEN) TS 2 Ø 198 ~~K~~ EDB

L'INTRUSION DES EAUX OCEANIQUES  
DANS LA BASSE VALLEE DU SENEGAL  
AU COURS DU XX ème SIECLE



Février 1990

---

(1) Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en  
Coopération (ORSTOM), B.P. 1386, Dakar (Sénégal).

Jean Yves GAC, Jean Luc APPAY, Bernard LABROUSSE (1)

PROJET CEE (EQUESEN) TS 2 0 198 / F 802 3

L'INTRUSION DES EAUX OCEANIQUES  
DANS LA BASSE VALLEE DU SENEGAL  
AU COURS DU XX ème SIECLE

Photographie de la couverture: Le barrage de Rheune  
(A gauche les eaux océaniques, à droite les eaux du fleuve Sénégal)

Février 1990

---

(1) Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en  
Coopération (ORSTOM), B.P. 1386, Dakar (Sénégal).

## SOMMAIRE

	Pages
RESUME	1
INTRODUCTION	2
<i>I.- L'INVASION MARINE AVANT 1980</i>	3
I. - ANALYSE DES DONNEES ANTERIEURES	3
A - Les témoignages anciens	3
B - Les observations au cours du XX <sup>ème</sup> siècle	8
II. - CAUSES ET MECANISMES DES INVASIONS MARINES	9
A - Les causes	9
B - Les mécanismes	10
III. - PARAMETRES ET FACTEURS DE REGULATION	12
A - Les masses d'eaux océaniques	12
B - Le niveau moyen de la mer	12
C - Le marnage	14
D - Le débit fluvial	14
E - Les prélèvements pour l'irrigation	14
F - L'intervention des nappes et de l'évaporation	15
IV. - FORMULATION DES PRINCIPES DE ROCHETTE	15
A - Les principes méthodologiques	15
B - Les difficultés d'application	17
V. - L'INVASION MARINE DE 1903 A 1983	19
A - Caractéristiques et chronologie des différentes phases	19
B - Relations débits/temps de séjour/abscisse du front salé	22
C - Reconstitution de 80 années d'invasion marine	23
<i>II.- HISTORIQUE ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU FERLO.</i>	29
I. - INTRUSION SALINE EN 1980-1981	29
A - Progression des isohalines	29
B - Salinité maximale	29
C - Retrait de la salure	30

II.	- REMONTEE SALINE EN 1981-1982 ET 1982-1983	31
	A - Stations principales	32
	B - Observation de l'évolution de la salinité	35
<b>III.- MODELISATION DE L'INTRUSION SALINE</b>		40
I.	- DIVERGENCES ENTRE LE PREMIER MODELE ET LA REALITE	40
II.	- ALTERNATIVES ET MODIFICATIONS DES SEUILS	40
	A - La migration de l'embouchure	40
	B - Le début de l'intrusion saline	41
	C - Substitution des paramètres temps et débits	42
III.	- PROPOSITIONS NOUVELLES	44
CONCLUSIONS GENERALES		48
BIBLIOGRAPHIE		50

## RESUME

Cette étude reprend, en les actualisant, les travaux de ROCHETTE (1964, 1974) et ceux de GAC et al (1986 a, b) en présentant toutes les informations disponibles sur l'intrusion des eaux océaniques dans le delta et la basse vallée du fleuve Sénégal.

Après un rappel de quelques témoignages anciens fournis par les relations de voyage des explorateurs, depuis CA DA MOSTO en 1455 jusqu'à LECARD en 1866 en passant par ADANSON en 1750, les causes et les mécanismes de la remontée saline sont précisés. Les anciens abaques établis par ROCHETTE servent de base à l'évaluation du rythme annuel de la progression et du retrait du front salé, ceci depuis le début des observations des écoulements du fleuve Sénégal en 1903.

Les divergences entre la réalité et le modèle de propagation sont ensuite abordées avec l'appui des mesures de la salinité ou encore de la charge en suspension des eaux du fleuve réalisées de 1980 à 1983, lors de cycles hydrologiques particulièrement déficitaires. Une nouvelle formulation du phénomène annuel de l'invasion marine, avant 1983, est enfin proposée. Elle précise, par une série d'équations de type logarithmique, les positions respectives des différentes isohalines en fonction des seuls débits qu'à connu, dans un passé récent, le fleuve Sénégal.

### *Summary*

This study builds upon and updates the works by ROCHETTE (1964, 1974) and those by GAC (1986 a,b) by presenting all the information available on the intrusion of ocean waters in the river Senegal delta and lower part valley.

After a short recall of a few evidence from former explorers' travel accounts, starting from CA DA MOSTO in 1455 through ADANSON in 1750 to LECARD in 1866, causes and processes of the seawater incursion are explained. The old master-curves established by ROCHETTE have been used to estimate the annual propagation in space and time of the fresh-salt water interface, since the beginning of the Senegal river outflows observations, in 1903.

The discrepancies between observed and computed salinities are afterwards addressed as documented by the measures of salinity or even of the river waters suspended load made from 1980 to 1983 during particularly deficient hydrological cycles. Finally, a new formulation of the annual phenomenon of salt water intrusion, before 1983, is proposed. It specifies, through a series of logarithm - type equations, the respective positions of the various isohalines according to the sole discharges which, in a recent past, occurred in the river Senegal.

### *Zusammenfassung*

Diese Studie nimmt die Arbeiten von ROCHETTE (1964, 1974) und jene

von GAC et al. (1986 a,b) wieder auf, aktualisiert sie und präsentiert alle verfügbaren Informationen über das Eindringen von Ozeanwasser ins Delta und in das untere Tal des Senegals.

Nach Erinnerung einiger alter Zeugnisse der Reisen, zunächst wird an einige Reiseberichte der Entdecker seit CA DA MOSTO im Jahre 1455 über ADANSON 1750 bis zu LECARD 1866 erinnert. Daraufhin werden die Gründe und Mechanismen des Salzaufstiegs präzisiert. Die alten Berechnungen von ROCHETTE dienen als Grundlage zur Ermittlung des Jahresrythmus des Ansteigens und Absinkens der Salzfront seit Beginn (1903) der Abflussüberwachungen des Senegals.

Die Divergenz zwischen Wirklichkeit und Ausbreitungsmodell wird anhand von Messungen des Salzgehalts und der Schwebestoffe in den ausgesprochen wasserarmen Jahren 1980 bis 1983 diskutiert. Eine neue Formulierung der jährlichen Meerwasserinvasion vor 1983 wird vorgeschlagen. Sie präzisiert durch eine Serie logarithmischer Gleichungen die Position der verschiedenen Isohalinen in Funktion der Wassermengen, die der Fluss Senegal in seiner jüngsten Vergangenheit kannte.

### *Riassunto*

Questo studio riprende, attualizzandole, le ricerche di ROCHETTE (1964, 1974) e quelle di GAC e al (1986 a,b) presentando tutte le informazioni disponibili sull'intrusione delle acque oceaniche nel delta e nella basse valle del fiume Senegal

Dopo una rievocazione di qualche antica testimonianza fornita dalle relazioni di viaggio degli esploratori, (da CA DA MOSTO nel 1455 fino a LECARD nel 1866 passando da ADANSON nel 1750) vengono precisate le cause e i meccanismi della risalita salina. I vecchi abachi stabiliti da ROCHETTE, servono come base per la valutazione del ritmo annuale della progressione e del ritiro del fronte salato, a partire dall'inizio delle osservazioni del deflusso del fiume Senegal nel 1903.

Le divergenze tra la realtà e il modello di propagazione vengono in seguito affrontate con l'aiuto delle misure della salinità, o ancora del carico in sospensione delle acque del fiume, realizzate dal 1980 al 1983, all'epoca di cicli idrologici particolarmente deficitari.

E dunque proposta una nuova formulazione del fenomeno annuale dell'invasione marina prima del 1983 : essa precisa, tramite una serie di equazioni di tipo logaritmico, le posizioni rispettive delle differenti isoaline in funzione unicamente delle recenti portate del fiume Senegal.

### *Samenvatting*

Deze studie grijpt terug naar de werken van ROCHETTE (1964, 1974) en deze van GAC et al. (1986 a,b) om ze in een actueel daglicht te plaatsen. Dit gebeurt aan de hand van alle beschikbare informatie over het binnendringen van ozeaanwater in de delta en in het lage dal van de Senegal.

Nadat wordt teruggegrepen naar enkele oude getuigenissen van ontdekkingsreizigers, vanaf CA DA MOSTO in 1455 tot LECARD in 1866, volgt ADANSON die in 1750 de oorzaken en het mechanisme van de toename van het zoutgehalte heeft uitgewerkt. Oude "abaques" geplaatst door ROCHETTE kunnen dienen als basis voor een evaluatie van het jaarlijks ritme waarmee het zoutfront uitbreidt en terugtrekt wat betreft het stroomgebied van de Senegal, sedert het begin van de waarnemingen in 1903.

Het verschil tussen de realiteit en het model wordt behandeld met behulp van de metingen op het zoutgehalte of op de lading van gesuspenderde deeltjes in het rivierwater die werden gedaan tussen 1980 en 1983 tijdens hydrologische cycli waarbij een tekort van water kenmerkend was. Men heeft hiervoor een nieuwe formulering vooropgesteld die de respectievelijke positie van de "isohalines" in functie van de enige debieten die de Senegal heeft gekend in het recente verleden. Dit gebeurt aan de hand van een reeks logaritmische vergelijkingen.

### **Resumen**

Este estudio continua y actualiza los trabajos de ROCHETTE (1964,1974) y los de GAC et al. (1986 a,b) y presenta todas las informaciones disponibles sobre la intrusión de aguas oceánicas en el delta y el bajo valle del río senegal.

Despues de citar algunos testimonios recogidos en los relatos de viajes de exploradores, desde CA DA MOSTO en 1455 hasta LECARD en 1866, pasando por ADANSON en 1750, se precisan las causas y mecanismos del ascenso salino. Los antiguos ábacos establecidos por ROCHETTE sirven de base para la evaluación del ritmo anual del avance y retirada del frente salino, esto desde las primeras observaciones de los caudales en la desembocadura del río Senegal en 1903.

Se pasa a continuación al estudio de las divergencias entre la realidad y el modelo de propagación recurriendo a las medidas de salinidad o de contenido en materias en suspensión del agua del río realizadas entre 1980 y 1983 en ciclos hidrológicos particularmente deficitarios. Se propone finalmente una nueva formulación del fenómeno anual de la invasión marina antes de 1983. Tal formulación, mediante una serie de ecuaciones de tipo logarítmico, precisa las posiciones respectivas de las diferentes isohalinas en función unicamente de los caudales recientes del río Senegal.

## INTRODUCTION

Le 25 novembre 1983 constitue une date mémorable dans l'histoire hydrologique du fleuve Sénégal. Elle correspond à l'achèvement du barrage en terre de Rheune dont la construction, à 114 km de l'embouchure, mettait fin à l'intrusion d'eau de mer dans sa basse vallée.

Premier lien de terre ferme, établi entre le Sénégal et la Mauritanie, ce barrage en terre construit hâtivement devait, malgré sa fragilité, pallier la faiblesse de la poussée de la crue fluviale et endiguer la remontée du flot salé. En remplissant parfaitement ce rôle pendant deux années consécutives (en 1984 et 1985), cette réalisation aujourd'hui disparue, préfigurait le futur barrage de Diama édifié à 50 km en amont de l'embouchure et terminé le 14 novembre 1985.

Cette étude se propose de retracer depuis 1903, date des premières observations hydrologiques fiables, l'histoire des remontées salines dans le bief maritime du fleuve Sénégal. Après un bref rappel des témoignages anciens, les causes et les mécanismes de l'intrusion d'eau salée sont précisés. Les anciens abaques établis par ROCHETTE (1964, 1974) servent de base à l'évaluation saisonnière et annuelle du rythme de la progression spatio-temporelle des différentes isohalines ( de 0,1 ‰ à 35 ‰). Les divergences entre ce modèle, défini pendant les crues moyennes à fortes de 1962 et 1963), et la réalité sont abordées avec l'appui des observations pendant les années de faibles écoulements (de 1980 à 1983). Enfin une nouvelle formulation est proposée pour déterminer, à tout moment des basses eaux de la période 1903-1983, la position amont du front salé dans la vallée du Sénégal.



## CHAPITRE I

### L'INVASION MARINE AVANT 1980

#### I.- ANALYSES DES DONNEES ANTERIEURES

##### A.- LES TEMOIGNAGES ANCIENS

De nombreuses études contemporaines ( LEMMET et SCORDEL, 1918 ; HENRY, 1918 ; LEMMET et SCORDEL, 1918 ; HUBERT, 1921 ; BANCAL, 1924 ; JACQUET, 1938 ; TROCHAIN, 1940 ; PAPY, 1952 ; DUBOIS, 1955 et BRIGAUD, 1961 ) ont fait l'historique de cette remontée saline en s'appuyant essentiellement sur les témoignages anciens des navigateurs et des voyageurs.

En 1455, le navigateur CA DA MOSTO, à bord de sa caravelle, devant la barre du " ruisseau Senega " décrit en ces termes la propagation de la marée: " *En ce lieu monte la marée, et cale de six en six heures, dont le montant se jette dans le fleuve par plus de soixante miles selon que j'en ai été informé par les Portugalois qui ont navigué dans iceluy longuement* ". Le mile nautique italien correspondant environ à 2 km, le front salé se situait à 120 km de l'embouchure et ne parvenait pas à la confluence avec la Taoué et le lac de Guiers.

ADANSON (cité par BANCAL, 1924) a eu soin, pendant les cinq années (de 1749 à 1753) passées à parcourir le Sénégal, de noter et de mesurer ce qui semblait pouvoir s'expliquer avec le temps. Il donne cependant deux informations contradictoires. D'un coté, il faisait remarquer que " *Les eaux étaient douces au delà de 30 lieues de l'embouchure* " : chaque degré étant divisé en 25 lieues, le front salé remontait de 130 à 135 km vers l'amont du fleuve. Il indiquait par ailleurs, en dessous de l'escale du Terrier Rouge, à la partie supérieure de sa carte 18 du Niger (appellation du Sénégal à cette époque) des environs de Podor ( Fig. 1), " *le flux de la mer se fait sentir jusqu'ici* ". Cette annotation manuscrite situe la remontée de la mer, ou du moins l'effet de l'onde de marée, sur plus de 300 kilomètres ! Il souligne également l'élimination rapide des eaux salées , au moment du changement de régime : " *Rendu à l'île Saint Louis le 15 juillet 1750, l'accroissement du fleuve fût si prompt que l'on vit le 19 le retour des eaux douces à son embouchure où deux jours auparavant on avait vu l'eau salée de la mer* ". Cette observation place le retrait des eaux marines le 19 juillet 1750.

LAUZUN (cité par TROCHAIN, 1940) précisait en 1779 : " *A Saint Louis, l'eau de la rivière est mauvaise et salée pendant dix mois de l'année et l'on est obligé de remonter 15 ou 16 lieues pour en trouver de supportable* ".

Le capitaine AZAN, qui commanda longtemps le poste de Richard Toll, indiquait dans son rapport de 1862 " *l'eau du lac de Ghier est douce toute l'année dans le milieu du bassin vers N'Der et Sanente, mais en remontant*



surtout près des rives, du mois de mai au mois de juillet, à cause des nombreux terrains salants que traverse le marigot du Bounoum, dont les eaux arrivent en présence du lac à mesure que celui-ci déverse dans la Taouey, l'eau qu'il a reçu du fleuve "

De 1865 à 1872, le Docteur BORJUS (cité par HENRY en 1918), écrivait: " la marée se fait sentir régulièrement à Dagana ( km 192 ) " mais il précisait plus loin " l'eau du fleuve y est toujours douce et de qualité ". Il s'agissait sans nul doute de l'effet d'oscillations du plan d'eau par l'onde de marée.

Enfin avant l'aménagement dans le delta du marigot du Lampsar, destiné à l'approvisionnement en eau douce de Saint Louis, jusqu'en 1990, le bateau citerne AKBA fit son plein toute l'année en aval ou très légèrement en amont de Richard Toll ; certaines années avant 1900, il ne dépassa pas la hauteur de Rosso (km 154).

A ces témoignages qui font ressortir que l'intrusion marine était peu importante avant 1890, on peut apporter d'autres arguments non moins significatifs.

D'AVEZAC (1840), indiquait " qu'à l'époque des hautes eaux le fond du lac de Guiers est salé, à cause de la proximité de salines ". Il est vraisemblable que l'auteur a confondu causes et effets, car du faisceau de témoignages pour ou contre une salure récente, paraît se dégager la conclusion suivante : c'est depuis 1890-1900 que le lac de Guiers reçoit régulièrement, chaque année, des apports d'eau salée (TROCHAIN, 1940). Avant cette date, ces apports étaient exceptionnels mais existaient.

Dans un autre rapport de 1863, AZAN évoque la salure des eaux de la Taouey " Les eaux sont généralement douces toute l'année, elles ne deviennent saumâtres que pendant les années exceptionnelles où le fleuve se trouve salé plus haut que Richard Toll, car la marée se fait parfaitement sentir jusqu'au milieu de la rivière Taouey ".

LECARD, chargé de poursuivre à la station de Richard Toll - du nom du jardinier (Fig. 2) qui l'avait créé sous le Gouvernement Français de la Restauration - les essais de cultures irriguées du cotonnier, écrit dans une brochure non datée, mais qui dut être publiée en 1866 : " Pendant plus de la moitié de l'année, le fleuve est salé par le reflux des eaux de la mer, depuis Saint Louis au marigot des Maringouins ; la même influence se fait sentir progressivement jusqu'à Richard Toll, dans le lac de Guiers et même jusqu'à l'île de Todd à 28 lieues de Saint Louis ". Le marigot des Maringouins dont parle l'auteur se situe à 10 km en amont de Saint Louis : de nombreux documents en font état comme un ancien tracé du Sénégal vers l'océan Atlantique, avant qu'il ne bifurque plus au sud. L'île de Todd se trouve sur le fleuve Sénégal, quelques kilomètres en amont de Richard Toll. L'estimation de 28 lieues paraît erronée. Quoi qu'il en soit, LECARD contredit les observations de ses contemporains sur la non salinisation des eaux du fleuve au delà de Richard Toll. La seule possibilité est d'envisager que les années entourant 1863 aient été particulièrement marquées par une extrême aridité. Elle est confortée par le fait qu'aucun récit de cette époque ne signale de crue importante du fleuve, après la spectaculaire

inondation de 1860, qui autorisa le Lieutenant de Vaisseau BRAOUZEC à

Fig. 2

Portrait de Claude RICHARD (1783 - 1869), fondateur du jardin d'essai de Richard - Toll, première station agricole créée en Afrique Occidentale ( cliché publié par A. CHEVALLIER en 1930 et par F. BRIGAUD en 1967 ).



naviguer à bord d'une canonnière sur les terres inondées du Ferlo. Une autre confirmation est apportée par MAGE en 1861 dans le document qui narre les événements de son expédition de Saint Louis au fleuve Niger en octobre 1863: " *Quelques jours après, la baisse des eaux ayant été très rapide cette année, je partais à bord de la canonnière La Couleuvrine qui remontait sur Bakel* ".

C'est à l'affaiblissement des débits du Sénégal que la majorité des auteurs attribue l'intrusion d'eau de mer, très en amont, dans la basse vallée du Sénégal. S'il est incontestable qu'au régime d'abondance de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle a succédé une diminution importante des écoulements, les causes évoquées pour expliquer ce profond bouleversement restent très controversées : réduction des précipitations, accélération de la vitesse des crues, déboisement intense, usure de seuils rocheux (KANE, 1985).

BANCAL (1924), lettré saint-louisien, s'était fait le champion local de cette dernière interprétation. Pour lui, " *c'était à l'arasement, entre 1890 et 1900, du seuil de Faff, à l'aval de Richard Toll, qu'était due la diminution de la hauteur d'eau et de la durée de la crue qui s'écoule plus facilement qu'autrefois vers l'Océan* ". PAPY (1952), signale également l'existence de ce

seuil rocheux, 125 km en amont de Saint Louis : haut de 1,50 m environ , il servait de gué aux basses eaux. Il aurait justifier selon RAFFENEL (1846), la construction d'un fortin pour la surveillance des deux escales voisines de Trarzas ou du Désert et des Darmanous, souvent indiquées sur les cartes du XVIII<sup>ème</sup> et du XIX<sup>ème</sup> siècle ( Fig. 3 ).

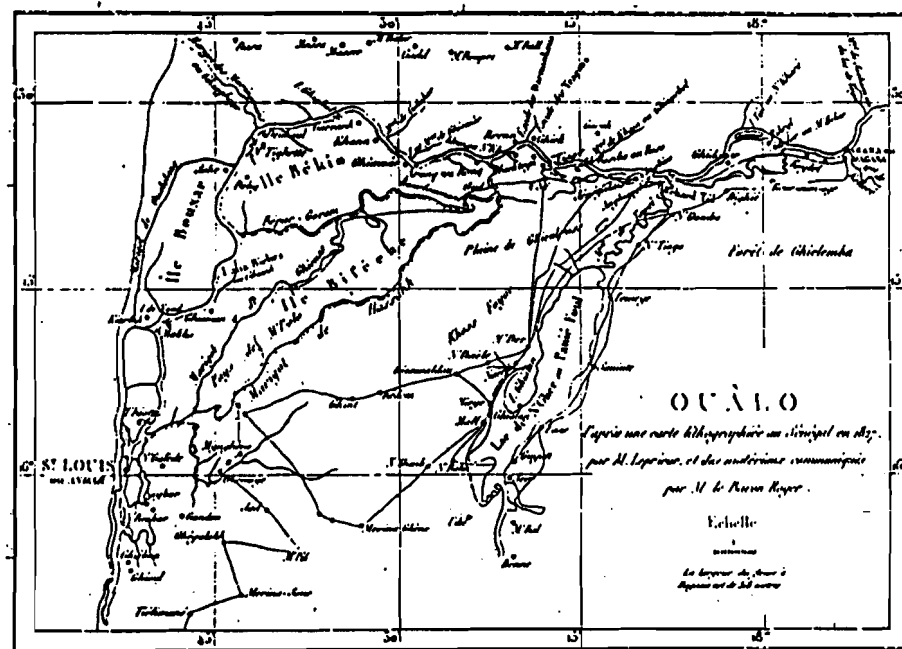


Fig. 3 - Carte du OUALO dressée par LEPRIEUR en 1817.

En 1891, le seuil fut abaissé sensiblement et dès lors selon PAPPY (1952) " la crue s'écoule plus rapidement, son débordement sur le delta diminue d'ampleur, l'eau de mer en revanche pénètre avec plus de force dans le lit du fleuve." La présence de ce seuil a cependant été contestée, parce que ne s'expliquant pas géologiquement.

L'énumération des hypothèses avancées, pour telle ou telle cause pourrait se poursuivre...Sans vouloir trancher, sur ce qui restera sans aucun doute une énigme du passé, nous laisserons le soin de conclure à cet étonnant érudit que fut Paul BANCAL :

" La limitation de l'estuaire par le barrage immergé de Faff peut-elle gêner la navigation ? Ce seuil qui a existé du XV<sup>ème</sup> siècle à 1891 passait inaperçu et il a fallu beaucoup de travail pour le retrouver. Aucune plainte n'a jamais été formulée à son sujet, il ne gênait pas plus la navigation de Saint Louis à Mafou que celui de Keur-Mour. Un chenal s'était formé dans son milieu et la limitation d'un estuaire produit une surélévation de niveau par interférence bi-quotidienne des eaux douces et des eaux salées, dues à l'action des marées...Lorsqu'en aval de Keur Mour, le barrage de Faff limitait la montée des eaux salées, c'est sur cet obstacle que se reportait l'interférence des eaux douces et salées. Il se produisait sur ce seuil une importante élévation du niveau qui provoquait l'inondation des plaines limitrophes rapportée par la tradition orale "

## B.- LES OBSERVATIONS AU COURS DU XX<sup>ème</sup> SIECLE

Il semble donc que la situation se soit modifiée à partir de 1900. Depuis cette époque et jusqu'en 1983, l'eau salée atteint chaque année la ville de Dagana et a pu parvenir au delà de Podor (Fig. 4) 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) et plus récemment, GAC et al (1981), MONTEILLET et al (1981) et MONTEILLET (1988) ont avancé l'hypothèse que la présence de faunes marines fossiles à des distances importantes du rivage actuel pouvait aussi bien découler d'un affaiblissement de la crue (qui en corrolaire engendre une intrusion marine importante), que de la remontée du niveau marin à la suite d'épisodes transgressifs.

L'impact considérable de cette intrusion marine dans une région en plein essor économique a suscité de nombreuses études pour en discerner les causes, en préciser les mécanismes à l'échelle saisonnière et en mesurer les effets sur l'environnement de la vallée alluviale.

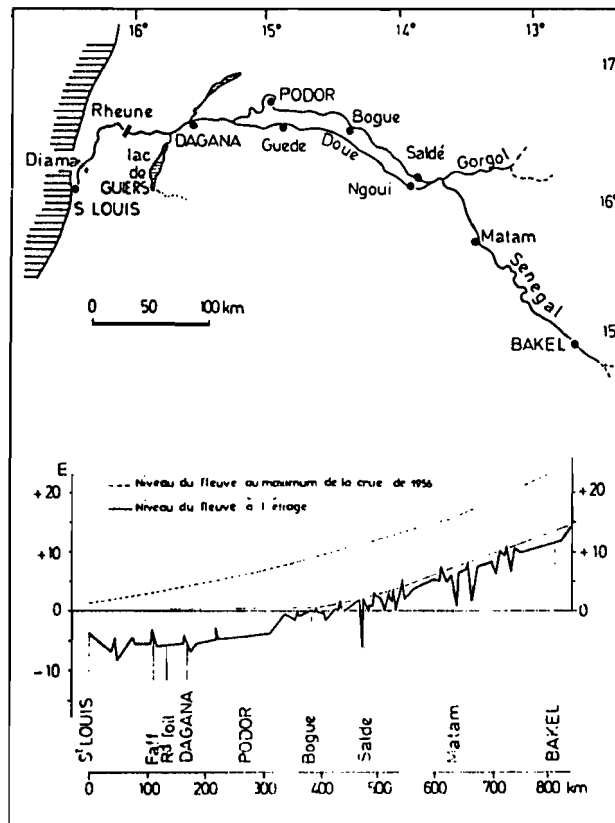


Fig. 4 - La basse vallée du Sénégal et le profil longitudinal du lit mineur.

Cette " progression continentale de la salinité " a nécessité de mettre en place de nombreux programmes interdisciplinaires qui prennent

en compte la diminution des précipitations sur l'ensemble du bassin versant, la réduction des débits, l'abaissement des hauteurs d'eaux et de la durée de la crue et, ensuite d'établir tout un réseau d'observations en continu de la progression du front salé. Ces dernières ont essentiellement été réalisées par les hydrologues et les géochimistes de l'ORSTOM : tout d'abord de 1962 à 1963 au cours de cycles hydrologiques proches de la normale ou légèrement excédentaires puis, de 1980 à 1983 pendant les années sèches de faibles hydraulicités qui ont précédé la fermeture de Rheune

## II.- LES CAUSES ET LES MECANISMES DES INVASIONS MARINES

### A.- LES CAUSES DES INVASIONS MARINES

Dans une zone côtière les invasions marines peuvent provenir de causes locales (morphologie de vallée, variation du régime des précipitations sur le bassin versant et des écoulements du fleuve, modification du littoral...), ou régionales (changements de température de l'eau de mer, puissance de la houle, variations de marnage...) ou plus générales liées à un changement global au niveau de la planète (fonte des calottes glaciaires, modification de volume de bassin océanique, déformations du géoïde...). Des informations plus détaillées sur les fluctuations majeures, rapides et brusques du niveau marin figurent dans l'ouvrage de MONTEILLET (1988).

#### 1. La morphologie du lit mineur du Sénégal

Jusqu'à Bogué (Fig. 4) à plus de 400 km de l'embouchure, le lit mineur du fleuve Sénégal se situe en contrebas de l'océan. Malgré la faible amplitude des marées (1,15 m en vives eaux et 0,55 m en mortes eaux), cette particularité détermine la remontée des eaux océaniques vers l'amont du fleuve.

#### 2. Le régime des écoulements du fleuve

La période des basses eaux du Sénégal dure près de 6 mois. Le tarissement est précoce et les étiages sont très sévères avec des écoulements insignifiants pendant une bonne partie de l'année.

#### 3. Les variations de marnage et la puissance de la houle

Les marées peuvent présenter, à l'échelle de la planète, des amplitudes extrêmes en fonction de certaines configurations astronomiques périodiques. Ainsi, elles sont maximales lorsque la lune et le soleil alignés passent dans le plan de l'équateur terrestre, c'est à dire aux équinoxes.

Remarque : Ces conditions pour être exceptionnelles se sont produites au niveau du Sénégal depuis l'achèvement de Diama : elles ont imposé, au moment des étiages particulièrement prononcés, de laisser temporairement

pénétrer les eaux océaniques en amont du barrage. Depuis l'achèvement de Manantali, ce sont les eaux du lac de Guiers qui servent d'appoint pour la retenue de Diama lorsque, aux périodes équinoxiales, le dénivelé de part et d'autre du barrage devient trop important (GAC et al. 1990).

L'importance des marées dépend de la forme des bassins océaniques, mais aussi des golfes et des estuaires qui ont une période qui leur est propre. Si cette période est en résonance avec celle de l'onde principale, le phénomène de la marée est amplifiée. Ainsi toute modification de la configuration du littoral engendre une évolution du marnage (MONTEILLET, 1988). Selon COLEMAN et WRIGHT (1975), la côte du delta du Sénégal est assujettie à l'une des plus fortes agitations du monde. Son contour est le résultat d'un état d'équilibre provisoire entre l'action du fleuve et des courants de houle.

#### 4. Les changements de température de l'océan

Des cycles saisonniers de variation d'ordre décimétrique du niveau moyen dans l'Atlantique tropical et équatorial ont pu être établis : ils se caractérisent par deux maxima de saisons chaudes et par deux minima de saisons froides. VERSTRAETE (1986), les relie au rythme des remontées d'eau froide profonde (Upwelling).

#### 5. L'onde de tempête

A la période historique de tels phénomènes d'amplitude limitée ne sont pas exceptionnels (HUBERT, 1936). Ils peuvent occasionner une rupture momentanée de la flèche littorale (Langue de Barbarie) séparant le fleuve de l'océan. Ces tempêtes semblent présenter une certaine périodicité, comme sur la côte Est des Etats-Unis. Depuis 1900, les ruptures importantes de la Langue de Barbarie (1906, 1923, 1936, 1948, 1959, 1973) sont en moyenne intervenues tous les 14 ans (GAC et al. 1981/82). Cette périodicité a été évoquée pour expliquer l'importance de l'invasion marine du cours inférieur du Sénégal.

#### 6. Les glissements sous-marins (slumpings) sur le talus continental

La pente du talus continental est exceptionnellement forte à proximité de l'embouchure du Sénégal et il existe une remarquable concentration de complexes de glissement quaternaires sur la marge océanique du bassin sénégal-mauritanien. Ces éboulements de sédiments sur la pente raide du plateau continental, creusé de canyons sous-marins, peuvent provoquer des phénomènes de mini raz-de-marée et engendrer, surtout en période d'étiage, une intrusion plus importante d'eau salée dans la vallée.

### B.- LES MECANISMES DE LA REMONTEE DES EAUX OCEANIQUES

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 sénégalomauritanien se décompose en quatre phases (GAC et al., 1986 a, b). Leurs durées respectives sont variables et liées aux caractéristiques saisonnières de chaque crue, elles mêmes dépendantes de l'abondance et de la répartition des précipitations sur le bassin versant. La figure 5 permet de visualiser les événements successifs observés de 1978 à 1980 :

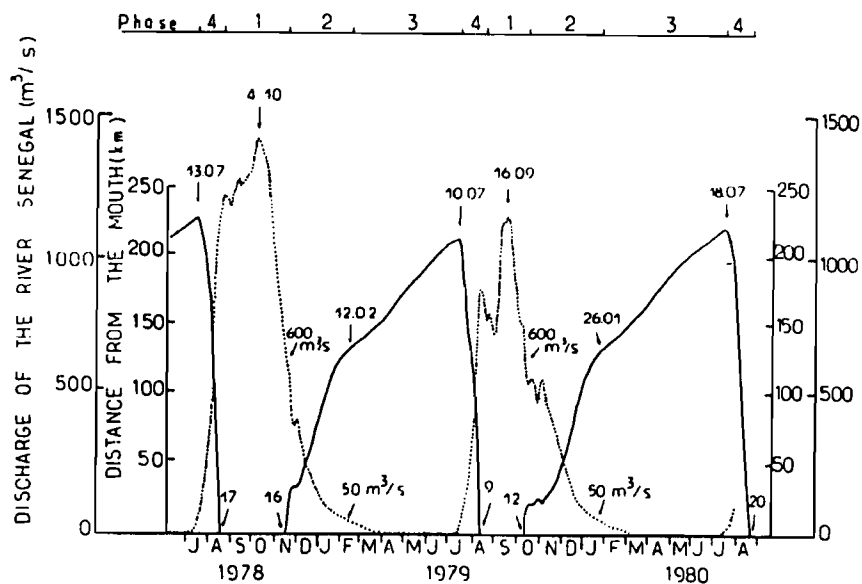


Fig. 5 - Les différentes phases de l'invasion marine annuelle.

### 1. Phase 1

Elle correspond à la période des hautes eaux. L'eau est douce depuis la source jusqu'à l'embouchure du fleuve du 17/08 au 16/11/1978 puis du 9/08 au 12/10/1979 et à partir du 20/08/1980.

### 2. Phase 2

L'interface eau douce/eau salée entame son déplacement saisonnier vers l'amont. L'intrusion débute par une oscillation sinusoïdale et cyclique du plan d'eau due à l'onde de marée et la progression du front salée ne dépend plus que de la forme du tarissement du fleuve. Selon les estimations de ROCHETTE (1964), cette phase débute lorsque le débit du fleuve descend au dessous de 600 m³/s et reste supérieur à 50 m³/s. Dans l'exemple choisi, cette phase s'étend du 16/11/1978 au 12/02/1979 et du 12/10/1979 au 26/01/1980 (Fig.5).

### 3. Phase 3

Elle se poursuit tant que le débit reste inférieur à 50 m³/s ; sa durée est indépendante des écoulements du fleuve et n'est liée qu'à la

durée de l' étiage, c'est à dire à l'arrivée de l'onde de crue suivante (ICOLLE et al, 1974). Cette phase concerne ici les périodes allant du 12/02 au 10/07/1979 et du 26/01 au 18/07/1980.

#### 4. Phase 4 ou phase de retrait

La dernière phase s'amorce avec chaque nouveau cycle hydrologique et son cortège de précipitations. Elle correspond au retrait progressif de la salure dans la vallée. Le taux maximum de salinité et l'abscisse maximale atteinte, vers l'amont, par le coin salé se produisent la veille du passage de la nouvelle onde de crue. Cette phase s'achève lorsque le cumul des volumes d'eaux douces qui transitent à l'embouchure franchissent le seuil de 900 millions de m<sup>3</sup> (ROCHETTE, 1964, 1974) ; dans le cas présent, les 17/08/1978, 9/08/1979 et 20/08/1980.

*En résumé, l'ampleur de la remontée saline dans la basse vallée du fleuve Sénégal est essentiellement tributaire de la plus ou moins grande précocité du tarissement annuel et de la durée de la période d'étiage entre deux cycles hydrologiques consécutifs.*

### III.- PARAMETRES ET FACTEURS REGULANT L'INVASION MARINE.

#### A.- LES MASSES D'EAUX OCEANIQUES ET LEUR SALINISATION

Le littoral Sénégalais est assujéti à deux saisons océaniques l'une chaude de juin à octobre, l'autre froide de novembre à mai.

La saison chaude de juin à août est marquée par la présence des eaux tropicales du contrecourant équatorial (les températures oscillent entre 27° et 28°C ; les salinités entre 35 et 36 ‰) ; de septembre à octobre s'installent les eaux guinéennes avec des températures comparables mais des taux de salinités inférieurs à 35 ‰. Au large de l'embouchure du Sénégal, PINSON-MOUILLOT (1980) a relevé des taux de salinité de l'ordre de 32 ‰ au moment du développement du panache turbide engendré par les alluvions de la crue du fleuve.

La saison froide, avec des températures fréquemment inférieures à 20°C, correspond à la remontée d'eaux profondes (Upwelling). Au cour de cette saison sèche (sur le continent), qui coïncide avec l'incursion saline dans la vallée du fleuve Sénégal, les salinités sont maximales en bordure du littoral (PINSON-MOUILLOT, 1980).

#### B.- LE NIVEAU MOYEN DE LA MER

Le niveau des mers à la surface du globe est marqué par une grande instabilité comme en témoigne l'existence d'anciens rivages le long des côtes tropicales basses de l'Afrique de l'Ouest.

## 1. Variations du niveau de la mer au cours des derniers millénaires.

La figure 6 illustre les variations récentes du niveau moyen de l'océan atlantique. Abstraction faite de quelques anomalies, la courbe de variation du niveau de la mer, depuis 10 000 ans montre deux périodes principales. De 10 000 à 6 000 ans B.P., la vitesse d'ascension est élevée et prédomine sur les autres phénomènes. Vers 6 500 ans, l'océan atteint à plus ou moins 1 mètre son altitude actuelle. A partir de cette date, le niveau de la mer a subi (ELOUARD et al. 1977, MONTEILLET 1977 et 1988), à différentes échelles de temps, des fluctuations de durée variable et de faible amplitudes comprise entre + 1,50 et - 2 mètres.

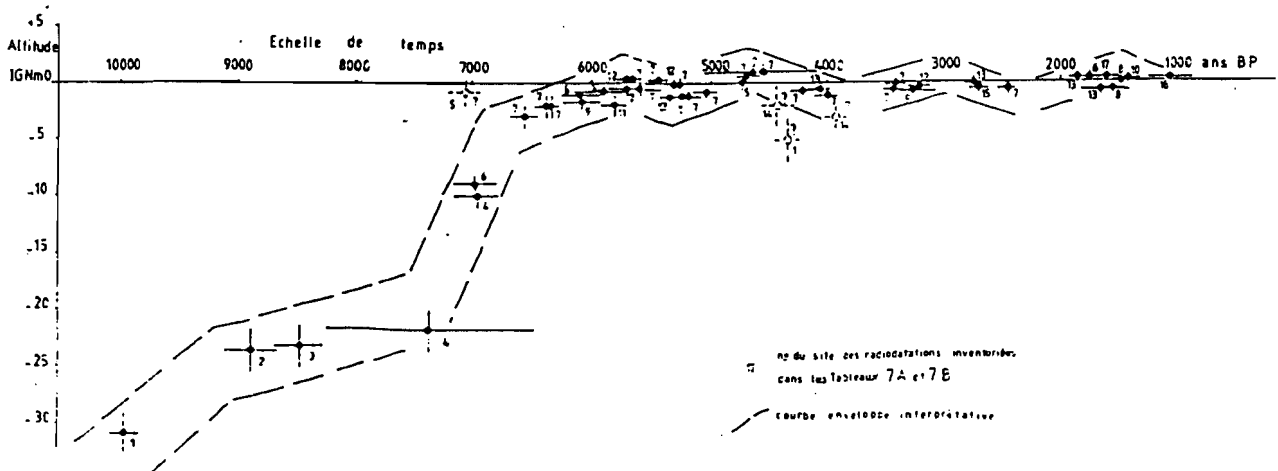


Fig. 6 - Oscillations du niveau marin depuis 10 000 ans B.P.

A partir de 3 000 ans B.P., la communication du cours inférieur avec la mer s'est réduite. Les périodes d'inondation du delta sont fréquentes : elles correspondent à des oscillations positives du niveau associées à une recrudescence des débits du fleuve. L'importante intrusion saline dans la vallée du Ferlo, vers 1 800 ans B.P. a été attribuée à une chute brutale des écoulements fluviaux (MONTEILLET et al., 1981).

## 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 annuelles 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-marée, des maximums compris entre - 0,06 et + 0,26 m IGN.

Les variations du niveau moyen sont perceptibles à une très grande distance de l'embouchure du fleuve. Suivant le sens de son évolution, il

provoque une régression ou un retrait de la salure qui se répercute de façon différée sur toute la longueur du bief maritime.

#### C.- LE MARNAGE

Selon ROCHETTE (1964), " le caractère cyclique des variations de l'amplitude des marées laisse présumer que l'influence du marnage se traduit par une évolution périodique de la salinité ". L'amplitude du marnage est de 30 à 80 cm à St-Louis, de 25 à 65 cm à Dagana et de 15 à 35 cm à Podor.

L'influence de la marée sur la répartition spatiale de la salinité est surtout importante jusqu'à 30 km de l'embouchure. Au-delà d'une incursion supérieure à 100 km, les variations de marnage sont pratiquement sans importance sur la salinité

#### D.- LE DEBIT FLUVIAL

Son importance et ses variations conditionnent les pulsations journalières et saisonnières de la remontée saline dans l'estuaire.

*Il faut cependant souligner que deux crues, d'importances très inégales, peuvent en définitive se traduire par des invasions marines tout à fait comparables et similaires selon, le caractère tardif ou précoce des cycles hydrologiques qui leur succèdent.*

#### E.- LES PRELEVEMENTS POUR L'IRRIGATION

Les prélèvements d'eaux douces sont devenus de plus en plus importants avec le développement de grands programmes agricoles, le long de la vallée. Si en période de crue, la réduction des écoulements n'entraîne aucune conséquence fâcheuse, il en va tout autrement lors de la phase de tarissement où les besoins pour l'irrigation sont du même ordre de grandeur que les faibles débits qui transitent dans le lit du fleuve. COGELS et GAC (1982), ont montré que la seule exploitation des 7 000 ha de canne à sucre dans la région de Richard-Toll nécessite près de 800 000 m<sup>3</sup> d'eau douce par jour et ceci pendant toute l'année. Le soutirage dans le fleuve est de l'ordre de 10 m<sup>3</sup>/s, seuil franchit en période d'étiage dès la fin février.

Le développement de systèmes de pompage a pour effet d'accélérer la remontée de la langue salée et, notamment lorsque seul le facteur temps conditionne cette intrusion. Il est cependant difficile d'établir une relation précise entre l'importance des volumes prélevés dans le fleuve et la nouvelle impulsion qui en résulte dans la progression vers l'amont des eaux marines.

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

Dans la zone du delta inférieur, les nappes de sub-surfaces 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 de l'estuaire.

## IV.- FORMULATION DES PRINCIPES METHODOLOGIQUES DE ROCHETTE (1964) DIFFICULTES 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. 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 pendant la crue.

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

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

L'allure des courbes isohalines est différentes à l'échelle d'une marée suivant l'importance de la pénétration marine :

- lorsque la pénétration marine est inférieure à 100 km, 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 la présence d'un véritable coin salé ; stratification minimale des isohalines fortement inclinées (de 2,5 m à 0,6 m/km) et significative 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'accroissent. La répartition spatiale de la salinité est pratiquement indépendante des conditions de marée.

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

A partir des campagnes de mesures 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 en lissant les courbes précédentes. Il en tire les précisions suivantes :

- 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 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, l'auteur précise le rôle fondamental joué par le débit fluvial. Il existe, souligne-t'il, " 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 fixé arbitrairement à 50 m<sup>3</sup>/s, valeur volontairement élevée pour tenir compte, de l'avantage que représente 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 permet de déterminer la salinité en fonction du débit ou du temps selon que les écoulements sont supérieurs ou non à 50 m<sup>3</sup>/s.

- l'auteur souligne enfin que l'intrusion des eaux marines, est possible dès que le débit tombe en dessous de 600 m<sup>3</sup>/s à l'embouchure.

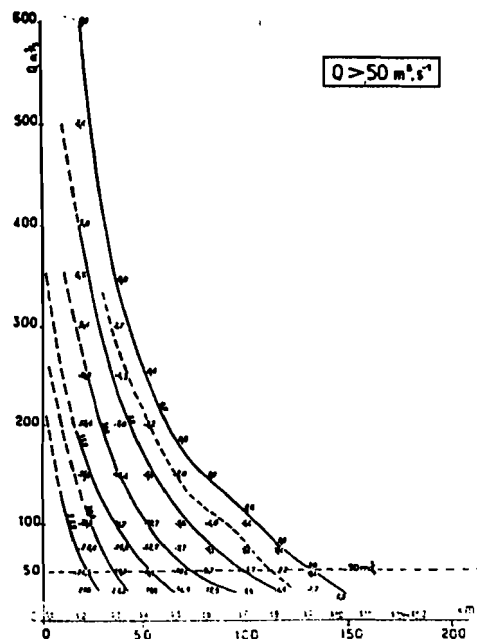


Fig. 7 - Relation débit / salinité (  $Q \geq 50 \text{ m}^3/\text{s}$  )

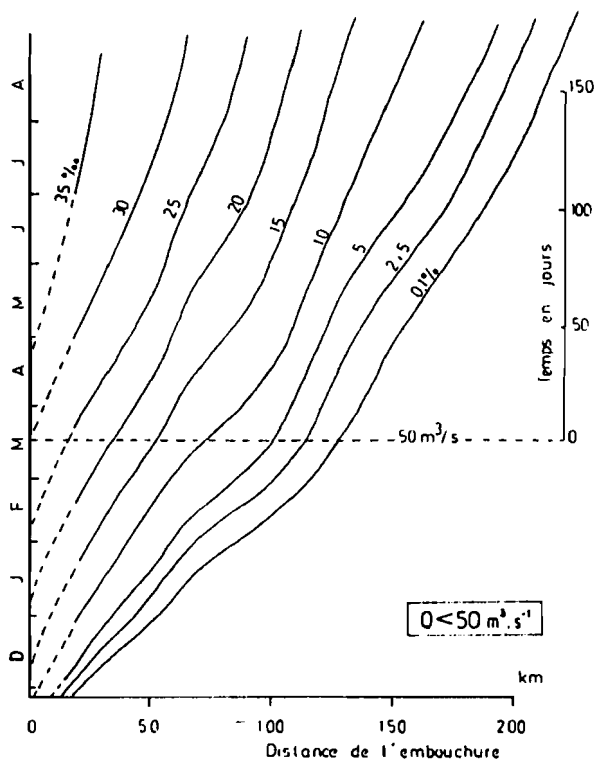


Fig. 8 - Relation temps / salinité (  $Q \leq 50 \text{ m}^3/\text{s}$  )

### 3. Le retrait des eaux saumâtres

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 écoulé. Par approches successives, ROCHETTE estime à 900 millions de  $\text{m}^3$ , le volume nécessaire (de la nouvelle onde de crue) pour que la salure se soit entièrement retirée de l'embouchure.

### B. - LES DIFFICULTES D'APPLICATION

La reconstitution des chroniques salines, depuis le début du siècle, impose de connaître, année après année, les dates où les écoulements du fleuve atteignent les seuils de  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  (début de l'intrusion saline), de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  (substitution du paramètre " temps " au paramètre " débit ") et enfin à l'amorce de toutes les crues, le seuil de 900 millions de  $\text{m}^3$  qui correspond au retrait du sel dans toute la vallée.

Ces trois valeurs sont indéterminables à l'embouchure. Elles doivent être précisées à partir des données recueillies plus en amont (station de Dagana).

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

De 1903 à 1964, la monographie hydrologique du fleuve Sénégal, donne pour chaque phase de tarissement la date présumée où le débit franchit le seuil des 600 m<sup>3</sup>/s. Pour les années récentes, l'information est plus complète bien que l'on relève quelques lacunes dans les observations limnimétriques. Pour les combler, la formule de propagation de l'onde de crue entre le bief amont de Bakel (où les débits sont connus depuis 1903) et le bief aval de Dagana a été appliquée.

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

$Q_{B0}$  et  $Q_{D0}$  représentent les débits respectifs à Bakel et à Dagana le jour  $J$  et  $Q_{D1}$  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.

Enfin il arrive, au cours de certains cycles hydrologiques, qu'une reprise des écoulements (occasionnée par des pluies tardives en fin d'hivernage) provoque un retrait momentané des eaux océaniques déjà engagées dans la vallée. La première phase de progression vers l'amont de l'eau salée est alors dédoublée et l'invasion saline différée pendant quelques jours.

### 2. Le seuil de 50 m<sup>3</sup>/s : substitution du facteur temps au facteur 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 étaient peu ou pas relevées.

La méthode a consisté à mener tout d'abord une étude critique des observations de chaque année. Nous en avons conclu que l'essai de 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.

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 se présente à Dagana 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, quand à l'amont, les débits sont de l'ordre de 37 m<sup>3</sup>/s.

### 3. Le seuil du passage en début de crue d'un volume de 900 millions de m<sup>3</sup>

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 Saldé. L'étude statistique sur de nombreuses années nécessite donc de faire appel aux relevés limnimétriques de ces deux stations, lesquelles présentent malheureusement des lacunes. Il n'y avait alors pas 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 du temps de présence des eaux océaniques dans la vallée du fleuve. Faute de pouvoir disposer de mesures précises et quotidiennes de la salinité sur de nombreuses années, nous avons admis l'hypothèse d'un volume constant mais avec un temps de propagation de l'onde de crue variable.

Après une compilation rigoureuse d'une masse importante de données et l'étude critique entreprise sur les observations anciennes, nous pensons, exception faite de quelques années (1909-1910, 1910-1911, 1913-1914, 1919-1920), que l'erreur d'estimation n'excède pas 3 à 4 jours. Pour les années récentes, l'évaluation est plus précise, puisqu'on dispose en effet des mesures de salinité ou encore d'observations sur la charge solide (la reprise des écoulements s'accompagne d'une augmentation des concentrations des matières en suspension). Une fois fixé le jour de la salinité maximale, on évalue en fonction des écoulements observés à Bakel la durée de la phase de retrait.

## V.- L'INVASION MARINE DANS LA VALLEE DU SENEGAL DE 1903 A 1980

### A.- CARACTERISTIQUES DE LA ZONE D'INTRUSION D'EAU SAUMATRE CHRONOLOGIE DES DIFFERENTES PHASES ,

Deux aspects de la salinité dans le 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 I.

Le tableau II 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 : phase 1

En général l'eau douce s'installe dans toute la vallée du Sénégal entre août et novembre. Une analyse de fréquence sur les 78 cycles hydrologiques étudiés 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. 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 26 août au 15 octobre) et l'année 1967 (155 jours : du 22 juillet au 24 décembre).

Tableau I

Chronologie des phases de l'intrusion saline de 1903 à 1983.:

1. eau douce dans toute la vallée
2. date à laquelle le débit devient inférieur à 600 m<sup>3</sup>/s
3. date à laquelle le débit est de 50 m<sup>3</sup>/s
4. salinité maximale dans la vallée
5. date du retrait total de la salure

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)			

Tableau II

Variations annuelles de la durée des différentes phases de l'intrusion saline (en jours) et abscisse maximale amont du front salé (en km).  
La phase 5 correspond à la durée totale de la présence d'eau salée.

Cycles hydro- logiques						Abcisse Max (km)	Cycles hydro- logiques						Abcisse Max (km)	Cycles hydro- logiques						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	258	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 Rhône en novembre 83 et reconstruction en novembre 84						
30-31	134	123	81	26	230	172	58-59	145	127	62	32	221	162							

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

Les eaux marines amorcent 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 après la grande crue de 1951 (le 28 décembre).

3. Interdépendance avec le paramètre débit ( $50 \text{ m}^3/\text{s} < D < 600 \text{ m}^3/\text{s}$ )  
Phase 2

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 77 au 10 janvier 78) 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 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 de l'arrivée de l'onde de crue suivante, tributaire elle-même de la 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 maximale 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 s'étend en moyenne sur 107 jours, mais elle peut-être réduite à 58 jours comme en 1955 ou au contraire se prolonger pendant 184 jours comme en 1978.

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

Elle est provoquée par l'arrivée de la nouvelle onde de crue après 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) et en 1968 (47 jours).

Les différentes phases (1, 2 et 3) sont, en année moyenne, de durée sensiblement égale (117, 110 et 107 jours). Dans ces conditions moyennes, la pénétration saline dans la vallée est de l'ordre de 200 km.

On constate que la durée de l'intrusion saline varie d'une 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.

*On aboutit aux mêmes conclusions que COGELS et GAC (1983) : "D'une manière générale, 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 du fleuve. Cependant, deux crues d'importance très inégale peuvent aussi s'achever par deux incursions marines tout à fait identiques, selon le caractère tardif ou précoce des ondes de crues suivantes."*

### B. - LES RELATIONS DEBITS/TEMPS DE SEJOUR DES EAUX MARINES ET DEBITS/ABSCISSE MAXIMALE ATTEINTE PAR LE FRONT SALE

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

La figure 9. 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 précédent.

La relation est assez étroite. Le calcul de régression linéaire donne

un coefficient de corrélation de  $-0,86$ ), mais de nombreuses distorsions apparaissent et ceci quelle que 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 au temps de séjour les plus courts. Ce résultat montre aussi que *l'ampleur de la remontée saline est bien plus sous la dépendance de la crue qui la précède que de celle qui lui succède.*

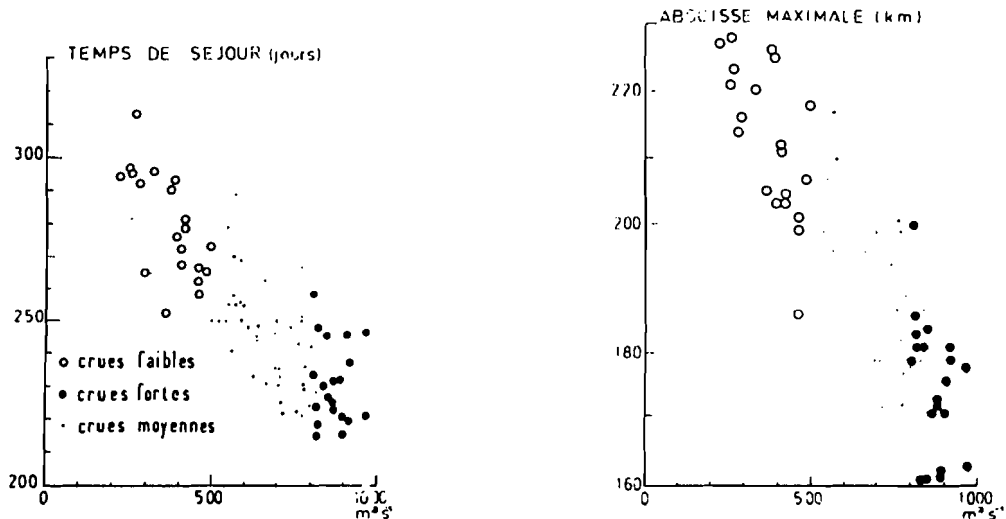


Fig. 9 - Relation débit moyen annuel et temps de séjour      Fig. 10 - Relation entre le module et l'abscisse maximale

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

Le coefficient de corrélation est de  $-0,74$  et la dispersion des points représentatifs est comparable au cas précédent. Les abscisses maximales se situent après les faibles crues et les invasions restreintes succèdent aux crues importantes (Fig.10).

Quelle que soit l'importance des écoulements (donc des précipitations sur les hauts bassins), le biseau salé franchit tous les ans la section de Richard Toll avec toutes les conséquences que cette répétition saisonnière implique pour la dépression du lac de Guiers.

## C.- RECONSTITUTION DE L'EXTENSION SPATIO-TEMPORELLE DE LA SALINITE DANS LA VALLEE DU FLEUVE DEPUIS 80 ANS

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

Les déplacements interannuels des différentes isohalines sont très importants, 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 présenté par GAC *et al.* (1983). Les déplacements des isohalines sont

illustrés par la figure 11 et leurs abscisses maximales données dans le tableau III.

- 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 Saint Louis.

- en période sèche, caractérisée en particulier par une succession ininterrompue de crues faibles, la mer se déploie très largement et en profondeur jusqu'au km 217, bien en amont de la ville de Dagana. Des taux de salinité de 35 ‰ sont observables jusqu'au km 28.

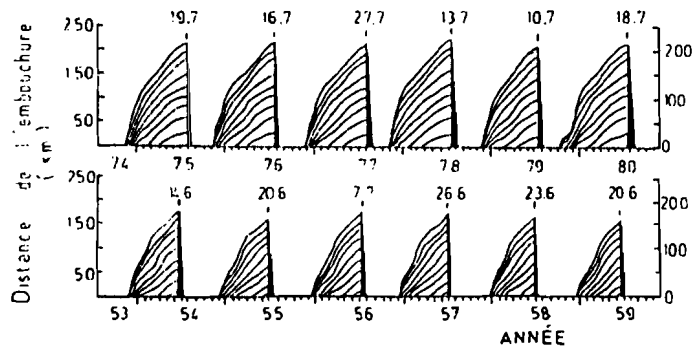


Fig. 11 - Remontées salines en période sèche (74/80) et humide (53/59).

### 1. Les incidences paléoclimatiques

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

Tableau III

Pénétration maximale moyenne (en km) des différentes isohalines lors des séquences humides et sèches. Valeurs extrêmes observées en 1955 et 1978.

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

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 des périodes de faibles écoulements fluviatiles.

Nous avons retenu deux sites lacustres (le Rkiz et le Guiers) pour leur importance paléogéographique et deux sections pour leur impact actuel et futur sur l'environnement fluvial (Rheune et Diama). Pour permettre une ouverture vers les études paléogéographiques et paléoclimatique, 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 IV.

Tableau IV

Taux de salinité et temps de présence des eaux saumâtres dans quelques sites de la vallée dans les deux exemples de séquences sèche et humide.

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	0	4	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.12) peuvent être utilisés comme des abaques pour l'estimation des paléosalinités en fonction de la distance à la mer d'une faune fossile. Les deux abaques débit/salinité et pluviométrie/débit fournis par GAC *et al.* (1981) servent ensuite à préciser la durée maximale et minimale des paléodébites et enfin l'allure des paléoprécipitations.

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

Nous avons vu précédemment que les caractéristiques hydrologiques d'une crue imposait en moyenne à 80% son "poids" sur l'intrusion 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 a paru la plus adaptée pour quantifier relativement les unes par rapport aux autres les quelques 80 intrusions salines reconstituées depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle. La méthode

salinité moyenne de l'intervalle, à calculer pour chacune d'entr' elles l'équivalent en eau de mer "pure" à 35 ‰.

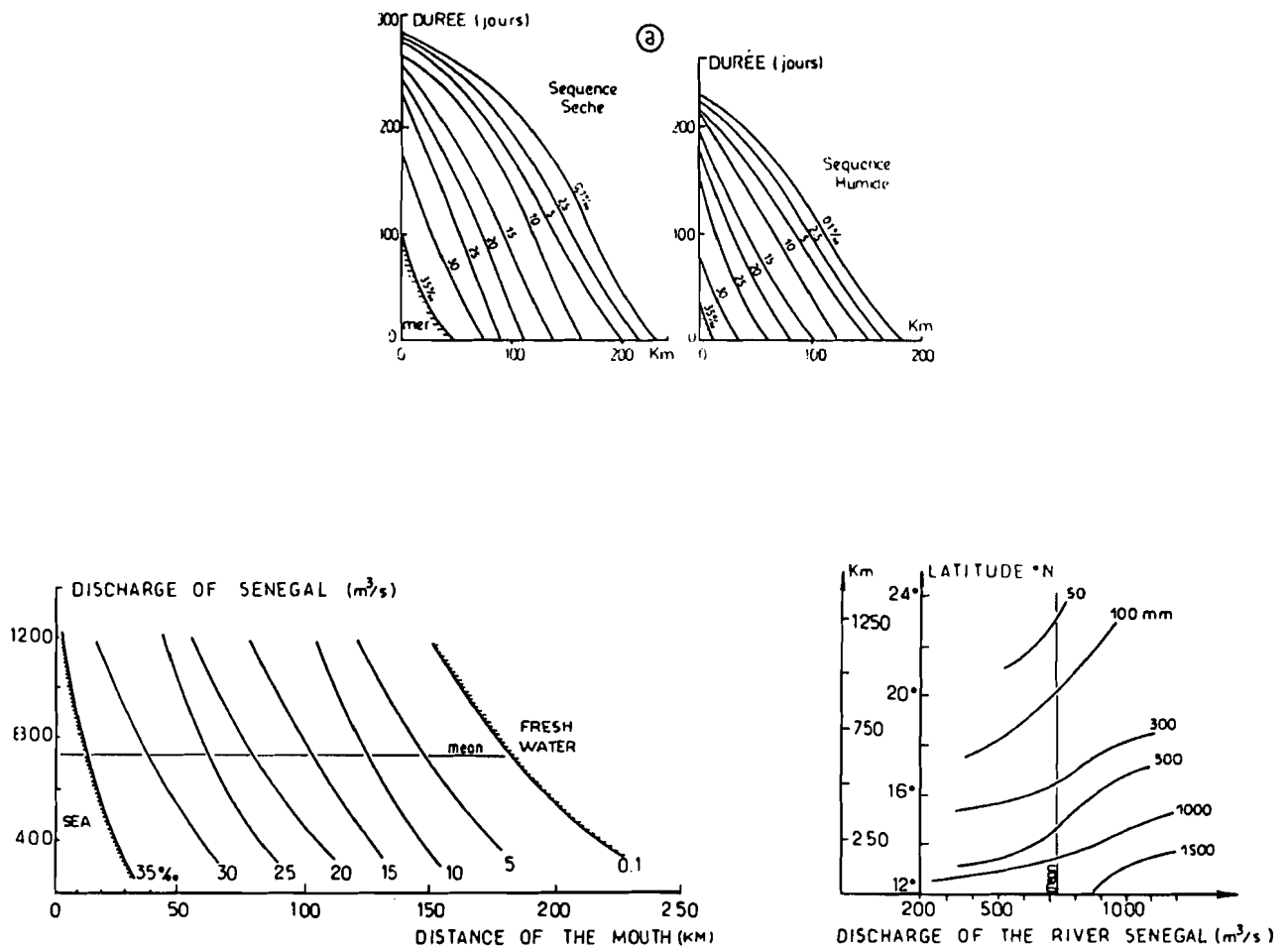


Fig.12

a) Schéma approximatif montrant la relation entre le temps de séjour des différentes isohalines et leurs positions respectives par rapport à l'embouchure.

b) Remontée de la langue salée en fonction du débit moyen annuel.

c) Relation entre le déplacement en latitude des isohyètes annuels et le module du Sénégal (GAC et al.,1981).



Tableau V

" Equivalent eau de mer " pour les intrusions salines depuis 1903.

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

Le tableau V 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 ‰).

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*

avant 1903 ( ? années )  
 1913-1918 ( 5 années )  
 1939-1950 (11 années )  
 1968- ? ( ? années )

*Séquences humides*

1904-1913 ( 9 années )  
 1919-1939 (20 années )  
 1950-1939 (18 années )

La sécheresse des deux dernières décennies est, par sa durée, son intensité et ses conséquences sur l'intrusion océanique dans les bassins ouverts sur le domaine marin, tout à fait différente de celles des années centrées sur 1915 et 1945. Cette réduction considérable des écoulements et l'effet cumulatif sur plus de 16 ans s'est traduit par une remontée saline d'une ampleur exceptionnelle (COGELS et GAC, 1983).

Enfin, nous avons schématisé sur la figure 13, 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. Les deux courbes sont symétriques de part et d'autre des valeurs moyennes (646 m<sup>3</sup>/s pour

le module interannuel du Sénégal à Daqana, et 56,5 éq. à 35 ‰ pour l'intrusion saline).

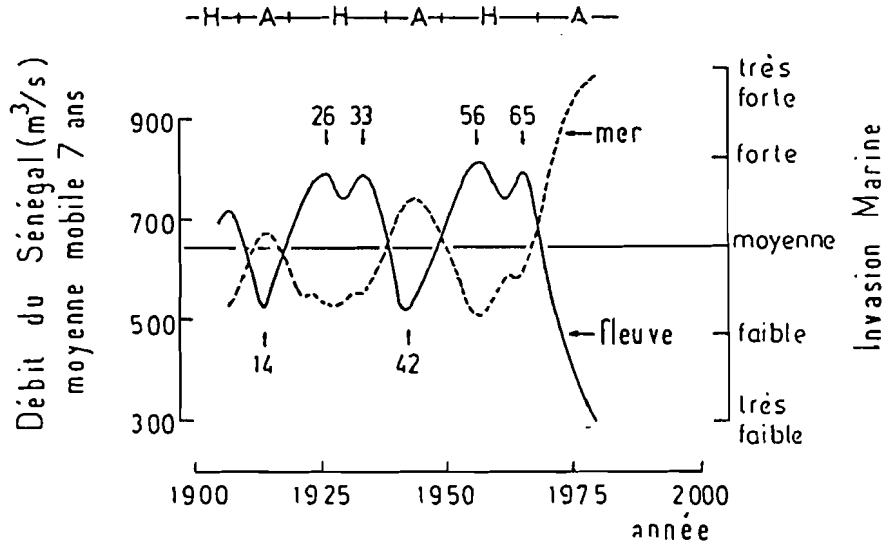


Fig. 13 - Comparaison entre les modules interannuels et l'intrusion saline.

## CHAPITRE II

### *L'INVASION MARINE DE 1980 A 1983*

#### I.- RECONSTITUTION DE L'INTRUSION SALINE AU COURS DU CYCLE 1980-1981 PRIS COMME EXEMPLE

Après le passage de la crue 1980-1981 dont le maximum (1565 m<sup>3</sup>/s) s'est présenté le 20 septembre 1980, le fleuve amorce sa décrue puis entre dans sa phase de tarissement. Le débit à l'embouchure décroît et le seuil de 600 m<sup>3</sup>/s est franchi le 17 octobre 1980 (Fig. 14) : les eaux marines entament leur " incursion annuelle " en domaine continental.

#### A. - PROGRESSION DES ISOHALINES A PARTIR DE LA RELATION ENTRE LE DEBIT ET LA SALINITE MOYENNE DE BASE

A partir des abaques établis par ROCHETTE (1964), 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 600 m<sup>3</sup>/s et 50 m<sup>3</sup>/s.

Le déplacement des isohalines a été évalué jour après jour. Le seuil de 50 m<sup>3</sup>/s est franchi le 19 janvier 1981 ; les taux de salinité à l'embouchure sont alors compris entre 25 et 30 ‰, et le "coin salé" est décelable à 133 km en amont.

#### B. - LA DETERMINATION DE LA DATE DE SALINITE 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 les premiers écoulements sont éphémères et réduits. Ils " s'évanouissent " avant d'avoir la moindre incidence à l'aval. La véritable onde de crue parvient à cette station le 27 juin. D'après les analyses chimiques des eaux du fleuve, la salinité maximale aurait été atteinte à Dagana entre le 1<sup>er</sup> et le 8 juillet 1981, et la charge en matières en suspension croît brutalement à partir du 8 juillet (GAC et KANE, 1986 a). La date probable de la salinité maximale a due se situer vers le 5 juillet 1981.

Dans cette hypothèse, la phase de tarissement se prolonge du 20 janvier 1981 au 5 juillet 1981, soit pendant 167 jours. L'application du deuxième abaque de ROCHETTE (1974) permet alors de suivre la nouvelle progression des différentes isohalines.

L'abscisse maximale au cours de cette intrusion saline est de 220 km. 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 dans le lit mineur du fleuve sur une distance de 30 km.

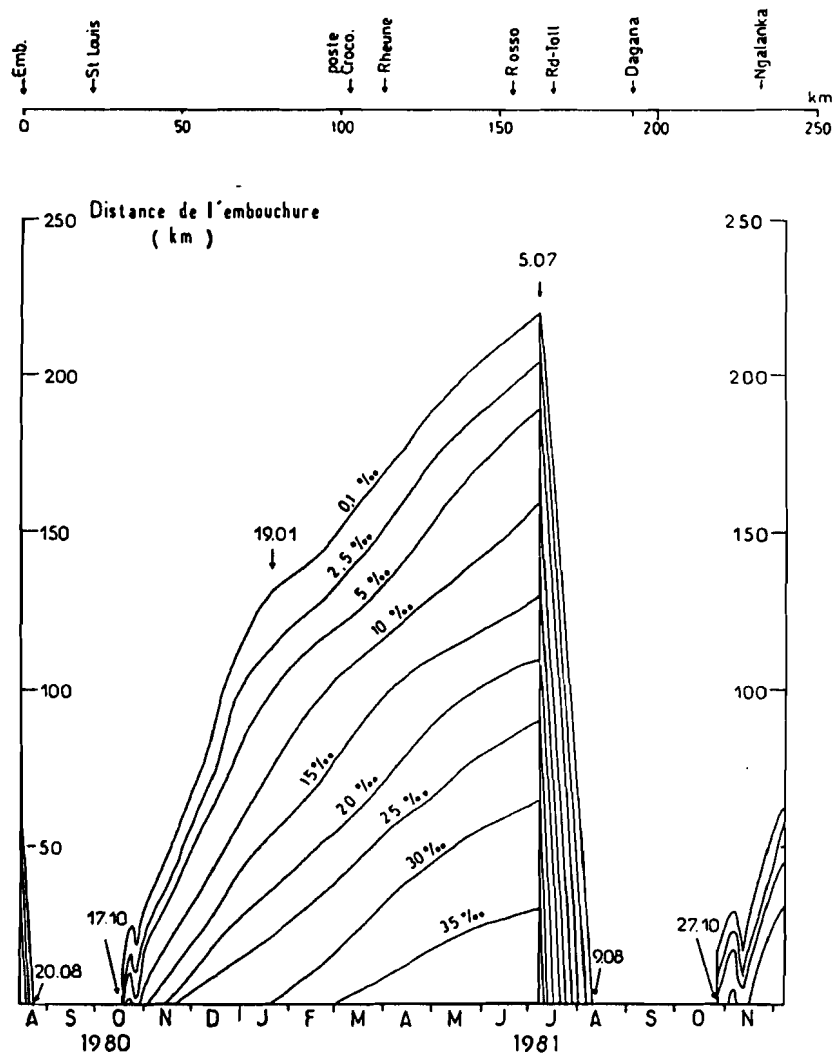


Fig. 14 - L'invasion marine en 1980-1981.

### C. 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. L'observation des flux détritiques

dissous et particulaires (GAC et KANE, 1986 a, b), en particulier la mesure des teneurs en chlorures et en sodium et de la charge solide, permettent d'estimer que le retrait total du sel dans la vallée a eu lieu entre le 7 et le 13 août 1981. Le calcul des volumes totaux écoulés depuis le début des premiers écoulements indique que 894 millions m<sup>3</sup> 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.

En résumé, l'intrusion saline en 1980-1981, illustrée par la figure 14, a présenté les caractéristiques suivantes :

- début de l'intrusion le 17/10/80
- intervention du paramètre débit du 19/01 au 05/07/81
- salinité maximale le 05/07/81, abscisse : 220 km
- retrait de la salure du 05/07 au 08/08/81.

## II.- LA REMONTEE SALINE AU COURS DES CYCLES 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),

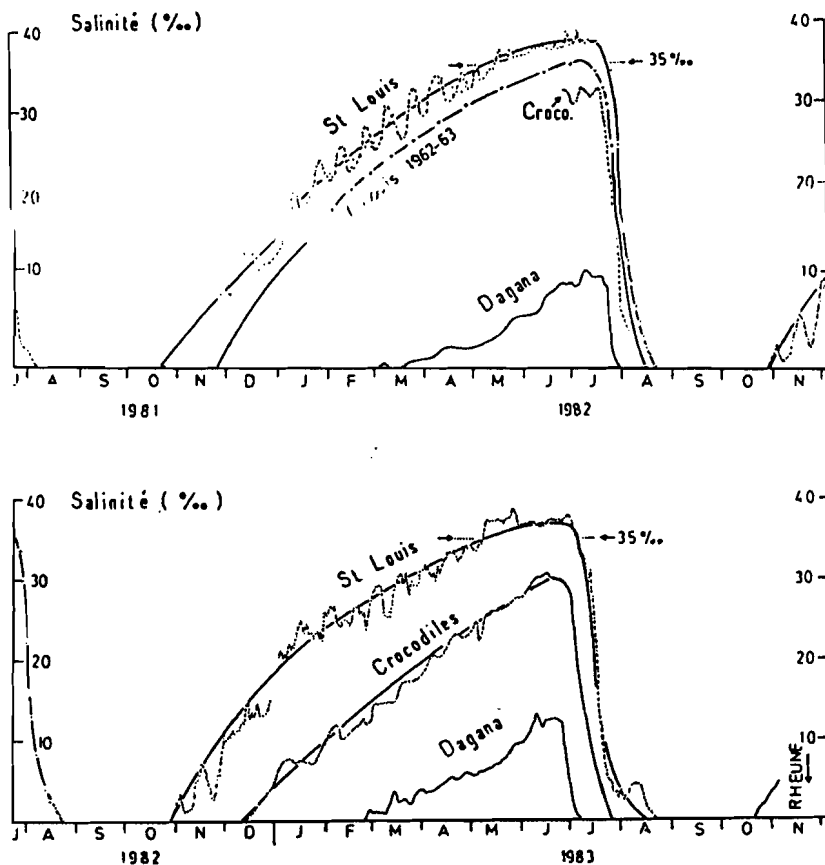


Fig. 15 - Variations de la salinité à Saint louis, Dagana et au Djoudj.

- la surveillance mensuelle de la salinité par des campagnes de mesures 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 QUATRES STATIONS CLES DE St-LOUIS, DU DJOUDJ, DE DAGANA ET DE PODOR

##### 1. Les variations saisonnières de la salinité à St-Louis

Toutes les mesures de salinité effectuées à St-Louis et leurs évolutions saisonnières sont illustrées par la figure 15.

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 21 octobre 1981,
- nouvelle intrusion le 23 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.

###### 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 : 28 juin 1983,
- phase de retrait du 29 juin au 23 août 1983,
- durée totale de l'intrusion : 307 jours.

Il est remarquable de constater que le fonctionnement du Sénégal en estuaire inverse (taux de salinité supérieur à 35 ‰) persiste aussi longtemps que la présence d'eau douce pendant la crue suivante.

##### 2. Variations saisonnières de la salinité à la limite amont du Parc du Djoudj

Les mesures de 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 ; la station se trouve à quelques kilomètres du barrage provisoire de Rheune.

###### 1982-1983

- début de l'intrusion saline, à la hauteur de la station, le 10/12/1982
- maximum de salinité vers le 23/06/1983. Le retrait s'est en effet

amorcé après cette date, par suite du caractère tout à fait exceptionnel des pluies torrentielles (153 mm) tombées dans le région de Matam dans la nuit du 23 au 24 juin 1983,

- phase de retrait du 23/06/1983 à la fin juillet,
- temps de séjour estimé du sel : 234 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 de cette zone.

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

### 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 de mesurer (GAC et KANE, 1986b) les flux dissous d'origine continentale. Le tableau VI rassemble l'essentiel des informations de 1979 à 1983 et la figure 15 indique l'évolution de la salinité à Dagana de 1981 à 1983.

Tableau VI

Taux de salinité observés à la station de Dagana de 1979 à 1984

Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰
<b>1979</b>		<b>1981</b>		<b>1982</b>		<b>1982</b>		<b>1983</b>	
22/03	<0.1	06/05	4.13	20/04	2.91	02/08	0.13	25/05	9.65
20/04	0.86	13/05	4.94	27/04	2.44	05/08	<0.1	28/05	9.80
06/06	6.16	20/05	5.28	04/05	2.96	1983		04/06	9.88
21/07	<0.1	27/05	7.03	11/05	3.64	03/02	<0.1	09/06	13.6
<b>1980</b>		03/06	7.81	18/05	3.93	17/02	0.1	10/06	13.5
15/04	1.25	10/06	8.28	25/05	6.36	22/02	0.38	13/06	11.8
15/05	4.49	17/06	10.18	01/06	6.58	27/02	1.33	16/06	12.9
27/05	3.91	24/06	10.49	08/06	6.72	06/03	1.22	19/06	13.0
03/06	6.00	01/07	10.70	15/06	8.80	17/03	2.50	22/06	13.0
11/06	6.53	08/07	10.43	18/06	9.75	20/03	2.64	25/06	12.4
20/06	8.07	15/07	0.54	21/06	9.73	23/03	2.30	28/06	8.6
22/06	8.57	22/07	0.18	24/06	10.77	26/03	2.90	01/07	3.7
08/07	9.40	29/07	0.12	27/06	10.50	27/03	2.63	04/07	1.95
16/07	6.00	05/08	0.15	30/06	10.56	29/03	4.10	07/07	0.63
27/07	0.23	12/08	<0.1	03/07	10.21	30/03	3.30	10/07	0.32
02/08	<0.1	<b>1982</b>		06/07	10.58	01/04	3.80	13/07	0.35
<b>1981</b>		03/03	<0.1	09/07	12.17	03/04	3.45	16/07	0.1
04/03	<0.1	05/03	0.26	12/07	11.37	04/04	3.60		
11/03	0.33	07/03	0.84	15/07	11.15	10/04	3.43	25/11/83	Rheune I
18/03	0.84	09/03	0.75	18/07	11.43	17/04	4.97		
25/03	0.24	15/03	0.29	21/07	10.22	19/04	5.50	<b>1984</b>	
01/04	0.70	22/03	0.78	24/07	6.31	03/05	5.70	01/03	<0.1
08/04	2.18	30/03	1.23	27/07	0.92	07/05	6.11	15/07	<0.1
22/04	2.88	06/04	1.43	29/07	0.30	14/05	6.57		
29/04	3.25	13/04	2.63	30/07	0.17	21/05	7.93	12/11/84	Rheune II

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

En 1980, la salinité touche vraisemblablement la station dès 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 1<sup>er</sup> juillet et le retrait total a lieu entre le 5 et le 12 août.

Les caractéristiques des deux intrusions salines 1981-1982 et 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.

#### 1982-1983

- eau douce à Dagana entre le 6 août 1982 et le 16 février 1983,
- arrivée de l'eau salée le 16 février 1983,
- maximum de salinité vraisemblablement autour du 22 juin 1983 (la date est, comme dans le cas du Djoudj, difficile à préciser à la suite de pluies torrentielles dans la région de Matam),
- phase de retrait du 23 juin au 16 juillet 1983,
- temps de présence du sel : 151 jours.

### 5. Variations saisonnières de la minéralisation des eaux fluviales à Podor

La charge dissoute des eaux du Sénégal à la station de Podor située au km 292 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 de 0,13 ‰ le 18 juillet) et du 13 juin au 7 juillet 1983 (salinité de 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 16

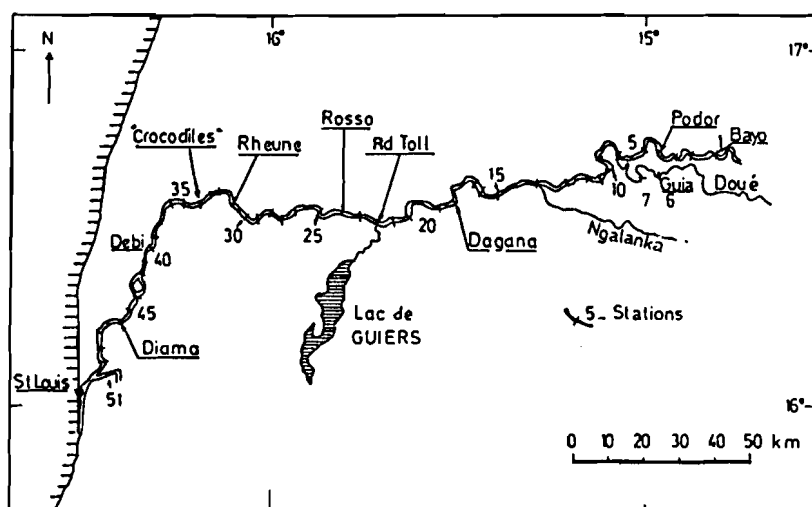


Fig. 16 - situation géographique des stations de contrôle de la salinité.

Les campagnes de contrôle de la salinité 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 et de 1981-1982; en 1982-1983, devant la précocité de l'intrusion, 15 séries d'observations ont été réalisées entre octobre 82 et juin 83.

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

Les progressions saisonnières du front salé sont représentées pour les deux épisodes étudiés sur les figures 17 et 18, et les résultats des mesures de salinité aux différentes sections sont donnés dans les tableaux VII et VIII.

#### 1980-1981

On dispose de trois contrôles dont l'un concerne la phase de retrait. 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



1981-1982

Lors de la première campagne de mesures (26 octobre 1981), le sel était 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.

La forme des courbes, situant les positions du front salé s'inverse à partir du 24 février 1982 : de concaves elles deviennent convexes. De cette constatation est née l'idée maîtresse qui conduira à envisager de nouvelles propositions de modélisation de l'intrusion marine telles que les avaient pressenties ROCHETTE (1974) en suggérant 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 m<sup>3</sup>/s, valeur bien éloignée des 50 m<sup>3</sup>/s initialement proposés.

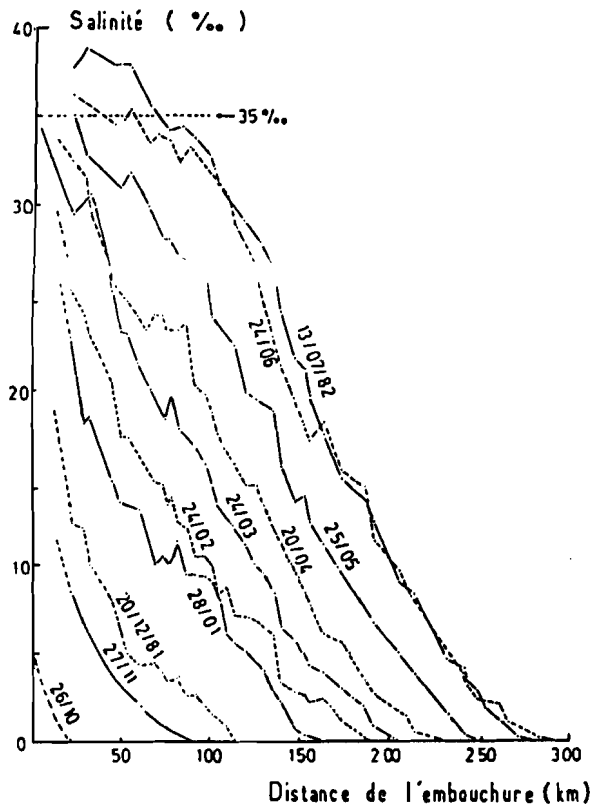


Fig. 17 - Salinité d'octobre 1981 à juillet 1982

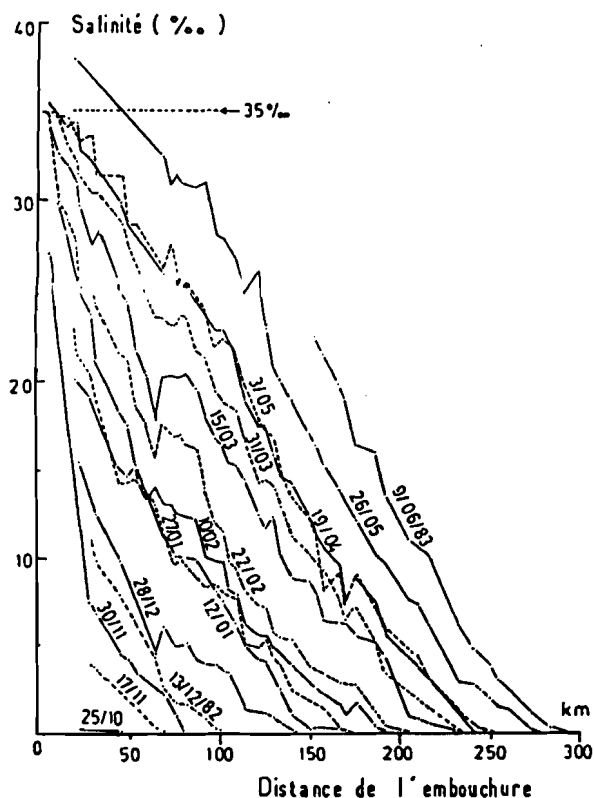


Fig. 18 - Salinité d'octobre 1982 à juin 1983

Tableau VIII

Evolution saisonnière de la salinité dans la vallée d'octobre 1982 à juin 1983

Stations	Point kilométrique et n°		Intrusion saline 1982-1983 (salinité ‰)														
	Km	N°	25/10	17/11	30/11	13/12	26/12	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 (avul)	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	-
Tiguët	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. Paul	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															0.25
Podor	292	4													<0.1		<0.1
Diatal	300	3														<0.1	
Donaye	309	2															
Mbayo	322	1															<0.1

1982-1983

"L'épisode marin" présente une physionomie tout à fait comparable à celle de l'année précédente. SAOS et al. (1984) ont présenté, dans ses

grandes lignes, les caractéristiques essentielles de cette nouvelle intrusion saline :

- début de l'intrusion vraisemblablement vers la mi-octobre 82,
- 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 m<sup>3</sup>/s.

De ces différentes campagnes on peut retirer les enseignements suivants :

- l'application des anciens abaques 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 se positionnent 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.4).

-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'était devenue l'invasion marine annuelle dans l'ensemble des estuaires de la Sénégambie.

### CHAPITRE III

## *PROPOSITIONS NOUVELLES DE MODELISATION DE L'INTRUSION SALINE DANS LA BASSE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL*

#### I.- CONFRONTATION ENTRE LES ESTIMATIONS A L'AIDE DU MODELE PROPOSE PAR ROCHETTE ET LA REALITE DES OBSERVATIONS EN PERIODE ARIDE

Les deux figures 19 et 20 montrent, pour les années 1981-1982 et 1982-1983, 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 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 de Ngalanka soit vers le km 230),

- la même constatation peut être faite pour l'isohaline à 35 ‰ figurant l'eau de mer "pure". Dans les deux exemples présentés, les abaques la situent lors du maximum de pénétration saline, à quelques kilomètres en amont de la ville de St-Louis ; 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 supérieurs 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" réside à Diama pendant plus de trois semaines.

Ces différences importantes entre les estimations à l'aide du modèle 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 fleuve Sénégal.

#### II.- LES ALTERNATIVES DE MODIFICATIONS DES DIFFERENTS SEUILS

##### A - LA PRISE EN COMPTE DES MIGRATIONS DE L'EMBOUCHURE ET DE SA SECTION

Les migrations fréquentes de l'embouchure et les variations de sa

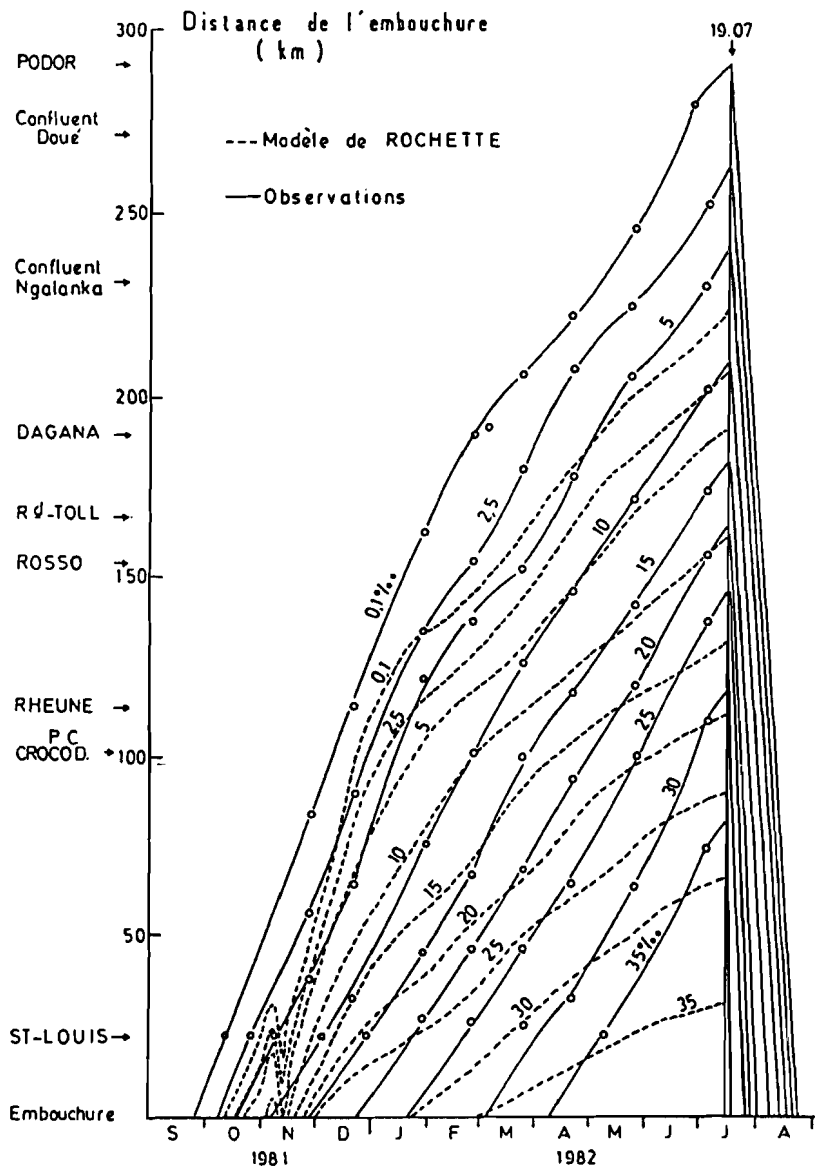


Fig. 19 - Comparaison entre les salinités observées et les estimations. (1981 - 1982)

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.

#### B - LE DEBUT DE L'INTRUSION SALINE : LE SEUIL DE 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).

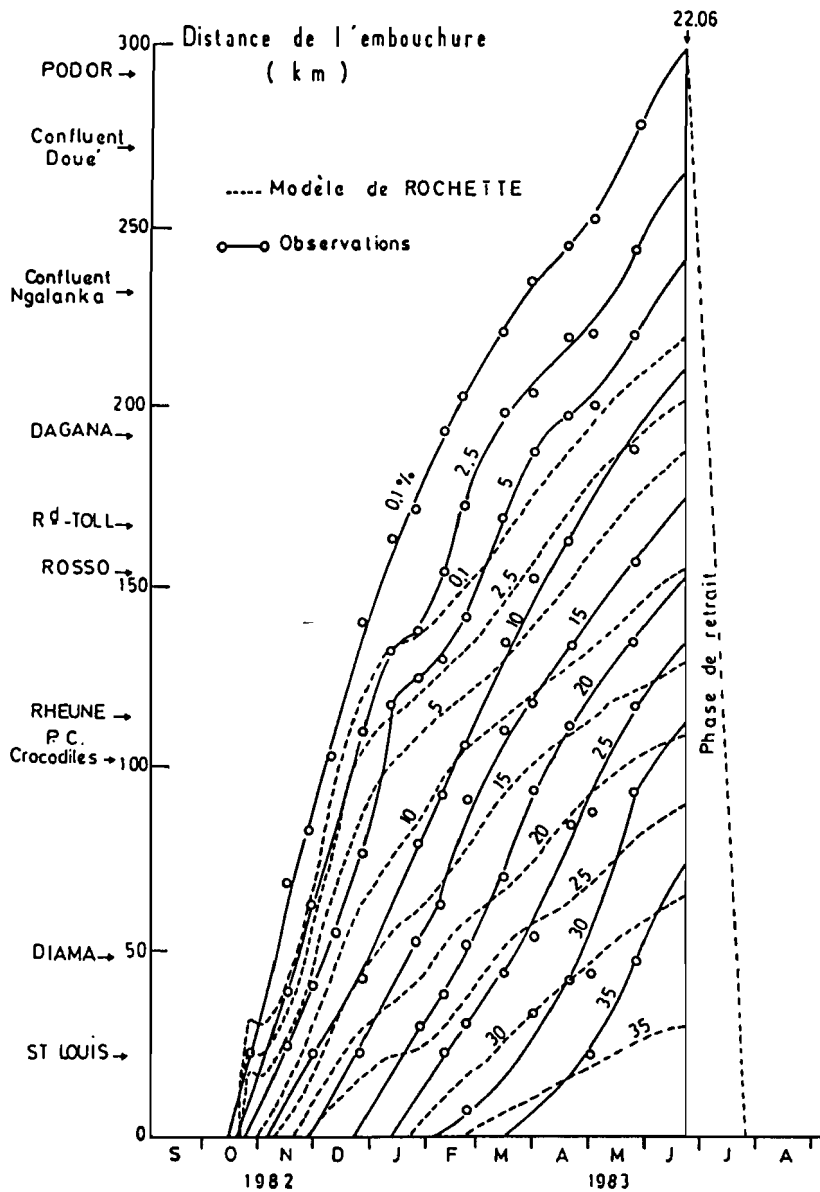


Fig. 20 - Comparaison entre les salinités observés et les estimations (1982 / 1983).

### C - LA SUBSTITUTION DES PARAMETRES TEMPS ET DEBIT : LES SEUILS DE 50 m<sup>3</sup>/s, 20m<sup>3</sup>/s et 5 m<sup>3</sup>/s

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 caractères du



mécanisme ou du phénomène concerné. Dans le cas de l'intrusion saline, une seule hypothèse paraissait plausible : un changement de rythme dans la progression du front salé vers l'amont.

Cette hypothèse 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 mesures de salinités menées d'octobre 1981 à juin 1983, le "lissage" des courbes obtenues sur les figures 17 et 18 permet d'aboutir à la représentation graphique de la figure 21 (les irrégularités introduites vraisemblablement par la présence de seuils rocheux ont été négligées).

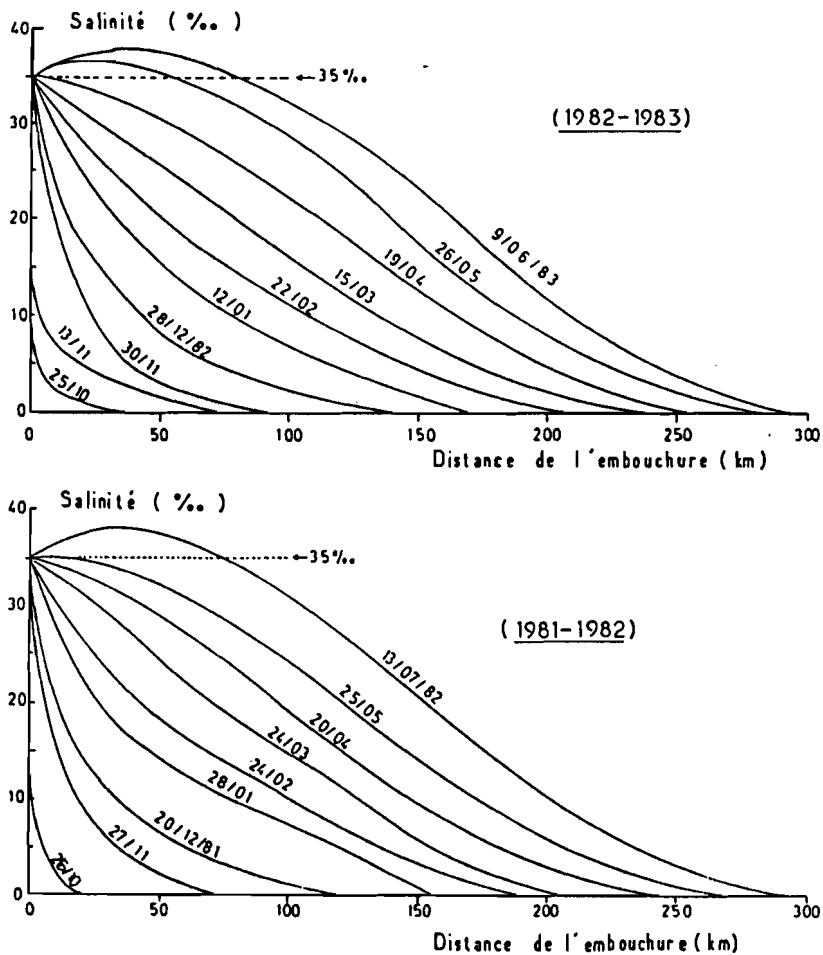


Fig. 21 - Représentation schématique de la progression du front salé (de 1981 à 1983).

Les deux intrusions salines de 1981-1982 et 1982-1983 se caractérisent par un changement important 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). Celles ci 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

$m^3/s$  et  $4,9 m^3/s$  en 1983. Le changement de rythme dans la progression du front salé se situerait donc bien plus tardivement - c'est à dire pour des écoulements en décrue plus faibles - et les valeurs 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  $20 m^3/s$  et de  $5 m^3/s$ .

La figure 22 montre qu'il n'y a pas de variations significatives dans le déplacement des différentes isohalines en utilisant les débits de  $20 m^3/s$  et de  $5 m^3/s$ . 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  $50 m^3/s$ , le fixe à

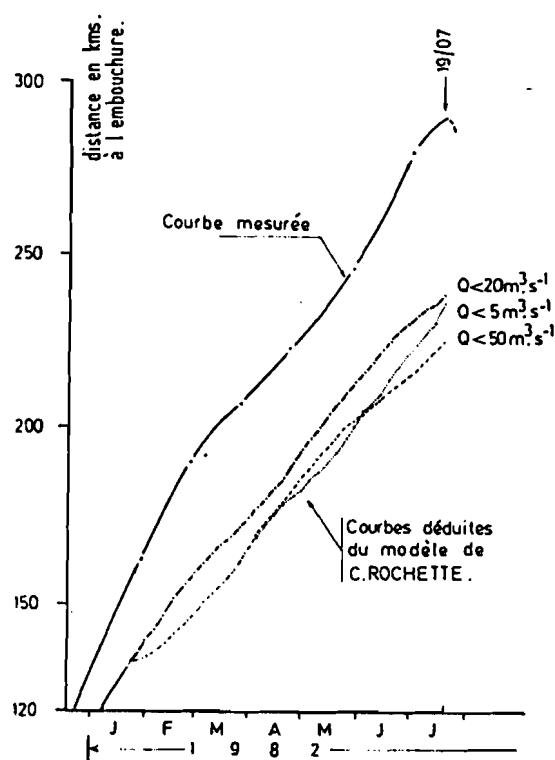


Fig. 22 - Les divergences dans la progression de l'isohaline à  $0,1 \text{ ‰}$  et de sa position amont pour différentes valeurs du débit critique.

226 km). L'isohaline à  $35 \text{ ‰}$  franchit la section de Diama : elle atteint le km 56 avec  $20 m^3/s$  et le km 58 avec  $5 m^3/s$  (les mesures de salinité la positionnent au km 80 et le modèle à 30 km de l'embouchure).

### III.- 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 23 et 24 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  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  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  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  (figure 23) et, en fonction du temps (figure 24) pour des débits inférieurs, tant que l'étiage du fleuve se poursuit.

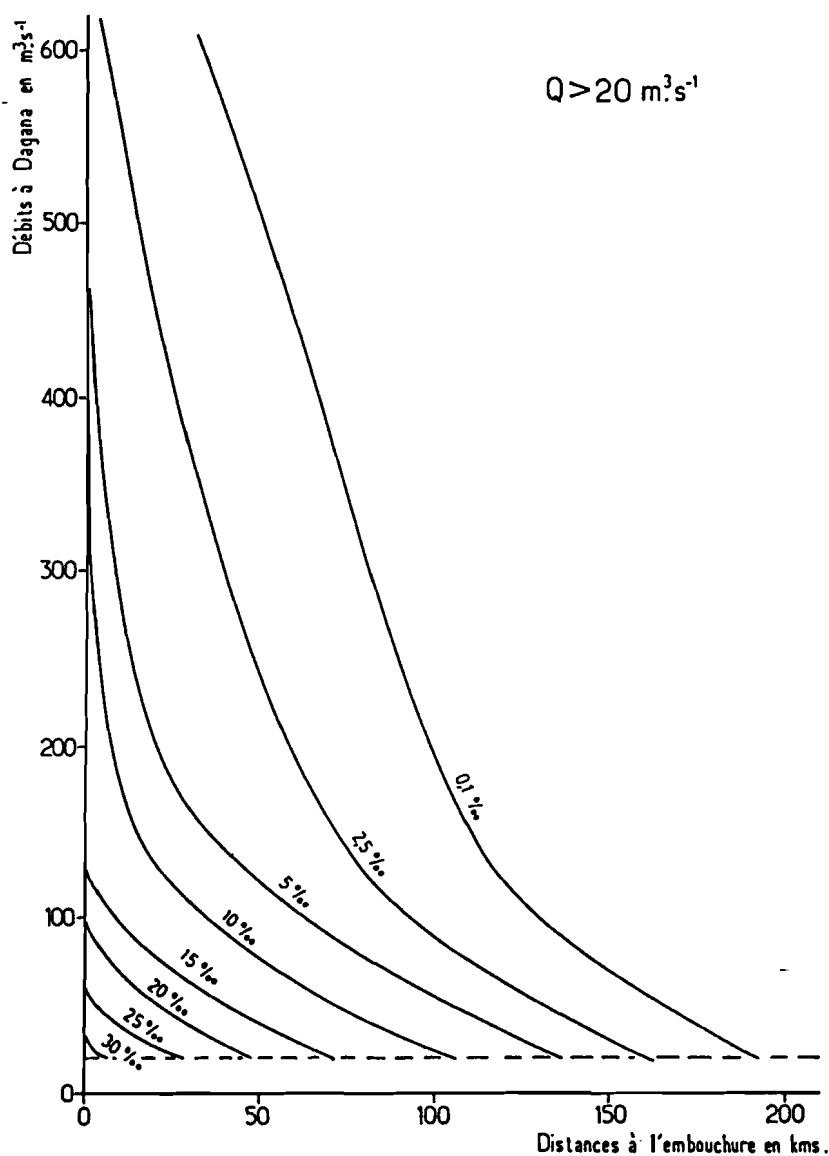


Fig. 23 - relation débit/salinité de base (  $Q \geq 20 \text{ m}^3/\text{s}$  )

Les abaques sont directement exploitables. 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.

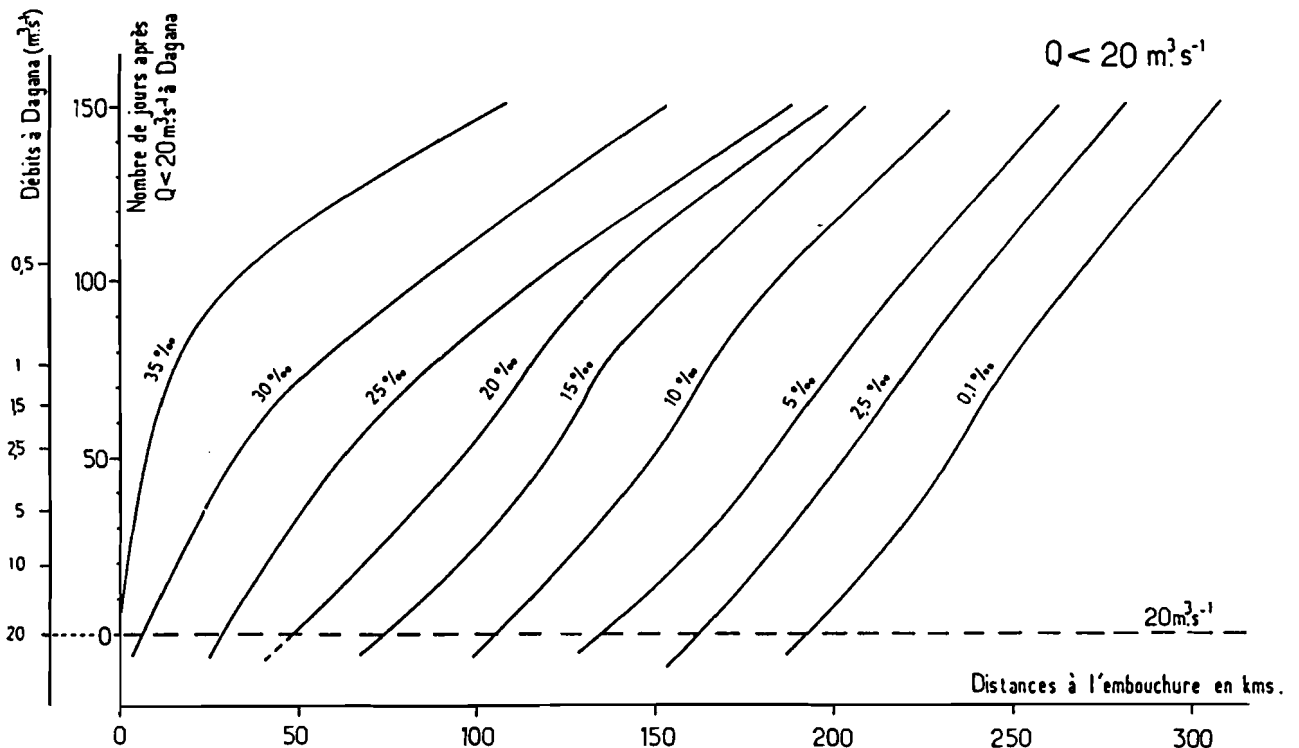


Fig. 24 - Relation temps/salinité moyenne de base (  $Q \leq 20 \text{ m}^3/\text{s}$  )

En distinguant les deux épisodes (débits inférieurs ou supérieurs à  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ), on aboutit aux équations suivantes où :  $D$  indique l'éloignement en km de l'embouchure et  $Q$  le débit fluvial (en  $\text{m}^3/\text{s}$ ) à l'embouchure ou ce qui revient sensiblement au même à Dagana , précisé à partir de la propagation de l'onde de crue à Bakel.

$$750 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 20 \text{ m}^3/\text{s}$$

Position des isohalines:

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

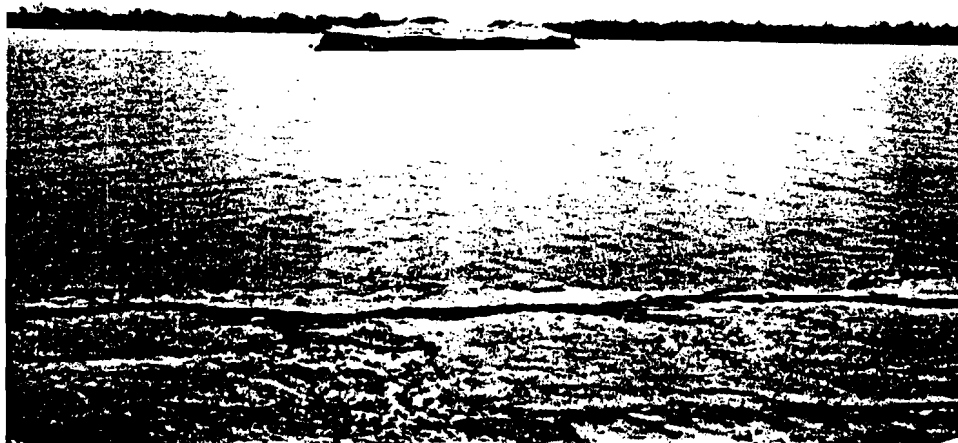
$$Q < 20 \text{ m}^3/\text{s}$$

0,1 ‰	: D = - 46,1 log Q + 255
2,5 ‰	: D = - 46,9 log Q + 226
5,0 ‰	: D = - 49,2 log Q + 204
10,0 ‰	: D = - 43,8 log Q + 169
15,0 ‰	: D = - 48,4 log Q + 141
20,0 ‰	: D = - 52,5 log Q + 120
25,0 ‰	: D = - 43,6 log Q + 85
30,0 ‰	: D = - 41,0 log Q + 53
35,0 ‰	: 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 le 13 et le 23 septembre, les écoulements ont à peine été supérieurs à 600 m<sup>3</sup>/s et le sel a pu entamer sa remontée vers l'amont du fleuve. La décrue générale a eu lieu dès le début octobre et l'invasion 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, fût achevé en toute hâte le 25 novembre 1983, le sel ayant atteint le village de Rheune quelques jours auparavant. Ces précisions nous ont permis de tester les abaques proposés. Le 25 novembre 1983 pour un débit de 150 m<sup>3</sup>/s environ, abaques et équations positionnent le front salé au niveau du km 108, soit seulement 6 km en aval de Rheune !

Le barrage de Rheune a été emporté, comme prévu, par la crue 1984-1985 : le bouchon aurait sauté le 22 juillet 1984 sous la poussée des eaux douces. Même en admettant que la première onde de crue se soit présentée le 1<sup>er</sup> juillet, nos abaques permettent d'affirmer qu'en l'absence du barrage, 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 agité de la plus importante pénétration marine depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle.



BRECHE DANS LE BARRAGE DE RHEUNE I LE 23 JUILLET 1984



## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Ouvert sur l'océan Atlantique, le bassin du fleuve Sénégal a été régulièrement envahi, au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, par les eaux marines. Pendant la décennie, qui succéda à la sécheresse de 1973, cette incursion saline était devenue par ampleur et son extension en domaine continental un évènement saisonnier redouté par les populations riveraines de la vallée. Le 25 novembre 1983 la décision fût prise de bâtir, à 115 km de l'embouchure du Sénégal, le barrage de Rheune. Il constituait le premier lien de terre ferme entre le Sénégal et la Mauritanie. Son objectif: pallier les faibles crues du fleuve en endiguant la remontée des eaux océaniques.

Quatre causes principales permanentes déterminaient chaque année, après le passage de la crue, la remontée de la langue salée : la morphologie du lit mineur, le régime d'étiages prononcés du fleuve, la puissance de la houle à l'embouchure et la forte pente du talus continental. D'une marée à l'autre, la progagation du front salé était étroitement liée à la nature des masses d'eaux océaniques qui séjournaient 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 était aussi assujettie aux caractéristiques annuelles des phases de tarissement et d'épuisement du fleuve, elles-mêmes dépendantes des pluies sur le bassin versant, 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 saline se décomposait en quatre phases dont les durées respectives étaient déterminées par les conditions d'écoulements propres à chaque crue et en corrolaire à l'importance et à la répartition des précipitations sur le bassin versant. La première phase correspondait à la présence d'eau douce depuis les sources guinéennes du fleuve jusqu'à son embouchure et les trois dernières à la présence momentanée d'eaux saumâtres, puis de plus plus salée dans la basse vallée et enfin de nouveau saumâtre pendant la phase de retrait..

A l'aide des abaques proposés par ROCHETTE (1964, 1974), les caractéristiques essentielles et la chronologie des différentes phases de l'intrusion saline ont été précisés au cours de 80 années. Avec toutes les réserves, dues à certaines approximations contestables mais souvent incontournables pour progresser, les principaux enseignements de cette tentative de reconstitution sont les suivants :

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

- l'intrusion saline la plus précoce a été observée en 1979 (13/10) et la plus tardive estimée pour l'année 1951 (28/12),

- au cours de 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 de faible importance n'ont pas succéder de façon inéluctable aux crues les plus fortes et les plus marquantes n'ont pas suivi nécessairement les cycles hydrologiques les plus déficitaires,

- autrement dit, si en général une crue faible a engendré une intrusion rapide du biseau salé et une forte crue un temps de séjour moins long des eaux saumâtres, à deux crues d'importance très inégale ont pu aussi succéder deux incursions marines tout à fait comparables selon le caractère tardif ou précoce de l'onde de crue suivante.

Les observations minutieuses de la remontée saline dans la vallée du fleuve Sénégal à la suite des cycles hydrologiques 1981-1982 et 1982-1983 caractérisés par des écoulements très 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 de ROCHETTE (1964,1974) 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 et en fonction des seuls débits ( $Q$ ), les positions respectives des différentes isohalines ( $D$ ) dans la basse vallée du fleuve. Ces équations de la forme ( $D = a \log Q + b$ ) peuvent être utilisées pour déterminer l'importance relative des différentes intrusions salines entre 1903 et 1983.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AVEZAC (D') M. (1840) - Analyse géographique d'un voyage de MM. CAILLE, HUARD-BESSINIÈRE, POTIN-PATERSSON et PAUL'HOLLE au lac Paniéfoul et au pays Yolof, en octobre, novembre et décembre 1839. *Bull. Soc. de Géogr.*, IIème série, t. XIV, pp. 193-216.
- BANCAL P. (1924) - Le problème de l'eau au Sénégal. *Document inédit non publié, Rapport multigr.* de 107 p., Bordeaux.
- BRIGAUD F. (1961) - Connaissance du Sénégal : l'hydrographie. *Bull. I.F.A.N. et Etudes Sénégalaises*, n° 9, 102 p.
- BRUNET-MORET Y. (1970) - Etude hydrologique en Casamance. *Rapp. multigr. ORSTOM*, Paris, 52 p.
- COGELS F.X. et GAC J.Y. (1982) - Le lac de Guiers: fonctionnement, bilans hydriques; évolution d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne. *Cah. ORSTOM, série Géol.*, vol. VII, n° 1, pp. 41-60.
- COGELS F.X. et GAC J.Y. (1983) - Aménagement et évolution hydrogéochimique du lac de Guiers au Sénégal depuis 1916. *Actes du Coll. de l'AUPELF " Barrages en terre et développement des zones rurales en Afrique "*, 11-16 avril, Thiès (Sénégal), 18 p.
- COLEMAN J.M., WRIGHT L.D. (1975) - Modern river deltas : variability of processes and sand bodies. *In Deltas (Ed. M. L. Broussard), Houston Geol. Soc.*, pp. 99-149.
- DUBOIS J. (1955) - Les sols du delta du Sénégal. *Bull. de la M.A.S.*, 77 p.
- ELOUARD P. et ROSSO J.C. (1977) - Biogéographie et habitat des mollusques actuels laguno-marins du delta du Saloum (Sénégal). *Géobios*, Lyon, n° 10, Fasc.2, pp. 275-299.
- GAC J.Y., KANE A., MONTEILLET J. (1981/82) - Migrations de l'embouchure du fleuve Sénégal depuis 1850. *Cah. ORSTOM, sér. Géologie*, vol. XII, n°1, pp. 73-75.
- GAC J.Y., MONTEILLET J., FAURE H. (1981) - Marine shorelines in estuaries as a palaeoprecipitation indicators. *Symposium on " Variation in the global water budget "*, Oxford 1981, Ed. A. Street Perrot et al. (1983), Reidel Publishing Company, pp. 361-370.
- GAC J.Y., CARN M., SAOS J.L. (1986 a) - L'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal : I.- Période 1903-1980. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale*, 19, (1), pp. 3-17.
- GAC J.Y., CARN M., SAOS J.L. (1986 b) - L'invasion marine dans la basse

vallée du fleuve Sénégal : II.- Période 1980-1983, proposition d'un nouveau modèle d'intrusion continentale des eaux océaniques. *Rev. d'Hydrobiologie Tropicale*, 19, (2), pp. 93-108.

GAC J.Y. et KANE A. (1986 a) - Le fleuve Sénégal. I : Bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulaires à l'embouchure. *Sciences Géologiques*, 39, 1, pp. 99-130.

GAC J.Y. et KANE A; (1986 b) - Le fleuve Sénégal. II : Flux continentaux de matières dissoutes à l'embouchure. *Sciences Géologiques*, 39,2, pp. 151-172.

GAC J.Y., COGELS F.X., APPAY J.L., BOUCHEZ J.M., DUPREY J.L., LABROUSSE B., ORANGE D. (1988).- Reconnaissance géochimique sur les eaux de la lame de submersion de la vallée du Ferlo (Sénégal). *Rapport multigr.*, ORSTOM, Centre de Dakar, 86 p.

HENRY H. (1918) - Irrigations et cultures irriguées en Afrique tropicale. *Ed. Larose*, Paris, 8°, 296 p.

HUBERT H. (1921) - Eaux superficielles et souterraines du Sénégal. *Ed. Larose*, Paris, 30 p.

HUBERT H. (1936) - Les envahissements brusques du littoral par la mer dans les colonies françaises. *Ann. Phys. du Globe de la France d'Outre Mer*, pp. 97-101.

ICOLE M., GAC J.Y., MONTEILLET J., FAURE H. (1982).- Marqueurs biogéochimiques d'aridité en milieu ouvert et fermé: estuaire du fleuve Sénégal et dépressions interdunaires du bassin du lac Tchad. *Bull. Assoc. Géographie Franç.*, Paris, 484, pp. 61-64.

JACQUET F. (1938) - Sur l'hydrologie profonde du Djolof et du Sine Saloum. *Bull. Serv. Mines Gouvern. Génér. A.O.F.*, n°1, pp. 12-18.

KANE A. (1985) - Le bassin du Sénégal à l'embouchure. Flux continentaux et particulaires. Invasion marine dans la vallée du fleuve. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle*, Université de Nancy II, 205 p.

LEMMET J. et SCORDEL M. (1918) - Contribution à l'étude agrologique du Bas-Sénégal. *Bull. Com. Et. Hist. Sc. A.O.F.*, 1918, pp. 17-56.

MONTEILLET J. (1977) - Tourbes de l'Holocène inférieur (Tchadien) dans le nord du delta du Sénégal. *Bull. ASEQUA*, n° 50, pp. 23-28.

MONTEILLET J. (1988) - Environnements sédimentaires et paléoécologie du delta du Sénégal au Quaternaire. *Thèse de Doctorat*, 1986, Université de Perpignan, Lab. de Sédimentologie Marine (Ed.), Perpignan, 1988, 267 p.

MONTEILLET J., FAURE H. et GAC J.Y. (1981) - Variation du niveau de la mer et crues fluviales. *Abstract in the proceedings of the INQUA meeting*, Columbia, 1981, 1 p.

MONTEILLET J. et 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*, n° 39, pp. 788-820.

PAPY L. (1952) - La vallée du Sénégal : agriculture traditionnelle et riziculture mécanisée. *Bull. I.F.A.N., Etudes Sénégalaises*, n°2, pp. 1-48.

PINSON-MOUILLOT J. (1980) - Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires du plateau continental Sénégalais. *Thèse 3ème Cycle, Université Bordeaux I*, 106 p..

ROCHETTE C. (1964) - Remontée des eaux marines dans le fleuve Sénégal. *Rapport multigr. ORSTOM, Dakar*, 81 p.

ROCHETTE C. (1974) - Le bassin du fleuve Sénégal. *Monog. Hydrologique de l'ORSTOM, Paris*, n°1, 391 p.

SAOS J.L., KANE A., CARN M. et GAC J.Y. (1984). Persistance de la sécheresse au Sahel : invasion marine exceptionnelle dans la vallée du fleuve Sénégal. *X ème réunion Annuelle des Sciences de la Terre (RAST), Bordeaux, Bull. Soc. Géologique de France*, p. 499.

TROCHAIN J. (1940) - Contribution à l'étude de la végétation au Sénégal. Ed. Larose, Paris et Mém. IFAN, n°2, 434 p.

VERSTRAETE J.M. (1986) - Variations saisonnières et interannuelles du niveau moyen dans l'Atlantique équatorial et tropical en 1983-1984. *Travaux et Documents de l'ORSTOM*, n°197, p.481.