L'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal

I - Période 1903-1980

Jean-Yves Gac, Michel Carn, Jean-Luc Saos (1)

Résumé

Cette étude présente toutes les informations disponibles sur la pénétration annuelle des eaux océaniques dans la basse vallée du Sénégal. Après un bref rappel des données antérieures, les causes et les mécanismes de la remontée saline sont précisés. Les anciens abaques établis par Rochette *(1964-1974) sont ensuite utilisés pour évaluer le rythme annuel de la progression spatio-temporelle des différentes isohalines (0,1 ‰; 2,5 ‰; 5 ‰; 10 ‰; 15 ‰; 20 ‰; 25 ‰; 30 ‰ et 35 ‰), ceci depuis le début des observations des écoulements du fleuve Sénégal, en 1903.*

Mots-clés : Chimie de l'eau — Salinité — Fleuve Sénégal — Afrique.

Abstract

The marine influence in the lower Senegal River. I. The 1903-1980 period

All the available data on the annual seawater incursion into the lower part of the Senegal river are presented. After a short recall of the former results, causes and processes of the seawater penetration are analysed. The master-curves established by Rochette *(1964-1974) are used to estimate the annual propagation in space and time of various isohalines (0,1 ‰; 2,5 ‰; 5 ‰; 10 ‰; 15 ‰; 20 ‰; 25 ‰; 30 ‰* and *35 ‰), since the beginning of the Senegal River outflows observations, in 1903.*

Key words : Water Chemisty — Salinity — River Senegal — Africa.

INTRODUCTION

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

1. ANALYSES DES DONNÉES ANTÉRIEURES

1.1. **Témoignages anciens**

De nombreux auteurs (Henry, 1918; Trochain, 1940; Papy, 1950, Dubois, 1955) ont fait l'historique de cette remontée saline en s'appuyant essentiellement sur les témoignages des voyageurs européens. Il ressort des récits d'Adanson en 1749, de Lauzun en 1779, de Schmaltz en 1819, de Lecard en 1830, de Perrotet en 1833, d'Azan en 1863, de Borius en 1872, que l'intrusion des eaux marines dans la vallée du Sénégal était peu importante avant 1900.

1.2. **Les observations au cours du XXe siècle**

Il semble que la situation se soit modifiée à partir de 1900. Depuis cette époque, l'eau salée atteint chaque année la ville de Dagana et peut parvenir au-delà de Podor (fig. 1) lors des années de faibles écoulements. Ce fait a été souligné par Henry (1918)

(1) *ORSTOM B.P. 1386, Dakar (Sénégal).*

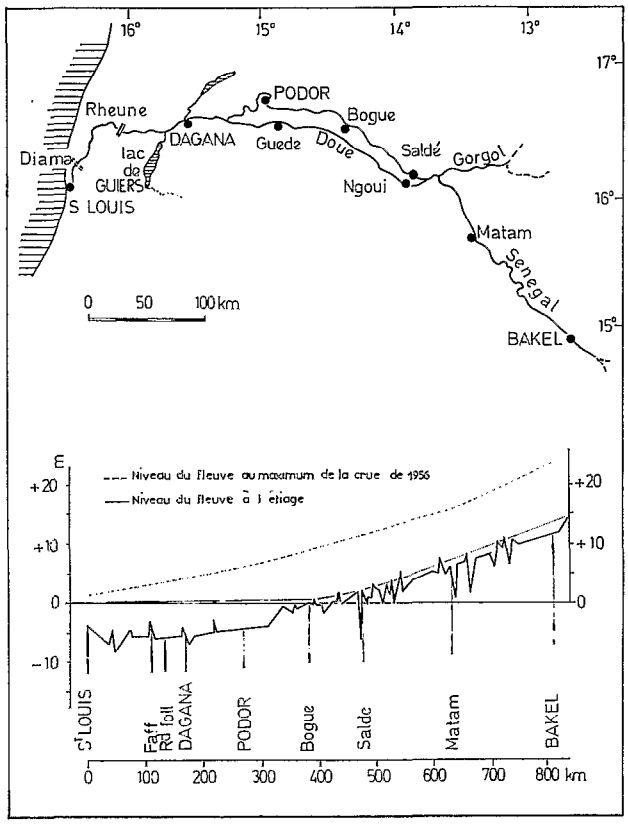

FIG. 1. — La basse vallée du Sénégal et profil longitudinal du lit mineur.

après les séquences sèches de 1913-1914 et de 1915. TROCHAIN (1940), MONTEILLET *et al.* (1981) ont avancé l'hypothèse que la présence de faunes marines fossiles à des distances importantes du rivage actuel pourrait aussi bien découler d'un affaiblissement de la crue fluviale (qui en corrolaire engendre une intrusion marine importante) que de la remontée du niveau marin à la suite d'épisodes transgressifs.

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

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

2.1. Les causes de la remontée des eaux marines

Quatre causes principales peuvent être évoquées :

— *La morphologie du lit mineur:* jusqu'à Bogué (fig. 1) 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; 0,55 m en mortes eaux), cette particularité détermine la remontée des eaux océaniques vers l'amont du fleuve.

— *Le régime 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.

— *La puissance de la houle à l'embouchure:* selon COLEMAN et WRIGHT (1975), le littoral au large de l'embouchure du fleuve Sénégal serait soumis à l'une des plus fortes agitations du monde.

— *La pente du talus continental:* exceptionnellement forte à proximité de l'embouchure elle peut engendrer des phénomènes de mini raz-de-marée et une intrusion plus importante d'eau salée dans la vallée surtout en période d'étiage.

2.2. Les mécanismes de l'intrusion saline

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

Phase 1: elle correspond à la période des hautes eaux. L'eau est douce depuis la source jusqu'à l'embouchure du fleuve.

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 salé 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 en dessous de 600 m^3/s et reste supérieur à 50 m^3/s.

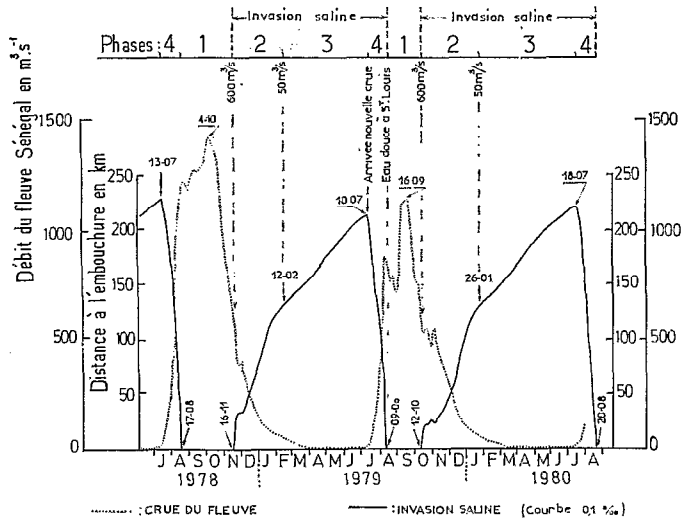

FIG. 2. — Les différentes phases de l'invasion marine annuelle (GAC, 1983).

Phase 3: Elle se poursuit tant que le débit reste inférieur à 50 m³/s; sa durée est donc liée à celle des étiages, c'est dire que tout va dépendre de l'arrivée de l'onde de crue suivante (ICOLLE *et al.*, 1982).
Phase 4: La dernière phase s'amorce avec le nouveau cycle hydrologique et la nouvelle saison des pluies. Elle correspond au retrait de la salure dans toute la vallée. Le taux maximum de salinité et la pénétration, maximale vers l'amont, du coin salé sont atteints la veille du passage de la nouvelle onde de crue. Cette phase s'achève lorsque les volumes totaux d'eau douce qui transitent à l'embouchure dépassent 900.10⁶ m³ (ROCHETTE, 1964, 1974).

En résumé, l'ampleur de la remontée saline dans la basse vallée du fleuve Sénégal va dépendre essentiellement :

— de la plus ou moins grande précocité du tarissement annuel,

— de la durée de la période d'étiage entre deux cycles hydrologiques successifs.

3. PARAMÈTRES ET FACTEURS RÉGULANT L'INVASION MARINE

3.1. Les masses d'eaux océaniques et leur salinisation

Le littoral sénégalais est assujetti 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 36 et 37 ‰); de septembre à octobre s'installent les eaux guinéennes avec des températures comparables mais des taux de salinité 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 la crue du fleuve.

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

3.2. Le niveau marin moyen

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

3.2.1. VARIATIONS RELATIVES DU NIVEAU DE LA MER AU COURS DES DERNIERS MILLÉNAIRES

La figure 3 illustre les variations récentes du niveau moyen de l'océan Atlantique; de —130 m vers 20 000 ans B.P. (grande régression ogolienne), le niveau des mers remonte rapidement jusqu'à —20 m vers 8 000 ans B.P. (Tchadien). Après un bref stationnement, la transgression reprend pour passer le niveau 0 IGN actuel vers 6000 ans B.P.; cette phase transgressive culmine à +2 m il y a 5000 ans (Nouak-

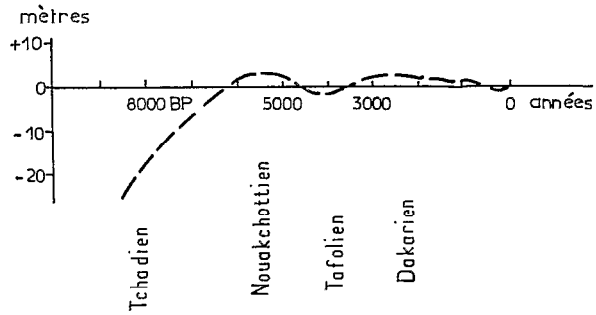

FIG. 3. — Variation du niveau de la mer au cours de l'Holocène autour de la presqu'île du Cap-Vert (ÉLOUARD *et al.*, 1977 ; MONTEILLET, 1977).

chottien). Il lui succède une nouvelle régression à —2 m (Tafolien) vers 4000 ans B.P., et enfin un nouveau retour à +2 m vers 3000 ans B.P. (Dakarien). Depuis lors, les oscillations sont de faibles amplitudes (ÉLOUARD *et al.*, 1977; MONTEILLET, 1977); la tendance actuelle étant à une légère élévation du niveau moyen des mers, de l'ordre de quelques mm/an (FAURE et ÉLOUARD, 1967; FAURE *et al.*, 1974).

3.2.2. 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-marées 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 progression ou un retrait de la salure qui se répercute de façon différée sur toute la longueur du bief maritime.

3.3. 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 du marnage sont pratiquement sans incidence sur la salinité.

3.4. Le débit 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'importance 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.

3.5. Les prélèvements pour l'irrigation

Les prélèvements d'eau douce 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 m³ d'eau douce par jour, et ceci pendant toute l'année. Le soutirage dans le fleuve est de l'ordre de 10 m³/s, seuil franchit en période d'étiage dès la fin février.

Le développement des systèmes de pompages a donc pour effet d'accélérer la remontée de la langue salée 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 pour la progression vers l'amont des eaux marines.

3.6. L'intervention des nappes et le jeu de l'évaporation

Dans la zone du delta inférieur, les nappes de subsurface 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.

3.7. **Variations de la morphologie et de la position de l'embouchure du fleuve Sénégal** (fig. 4)

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

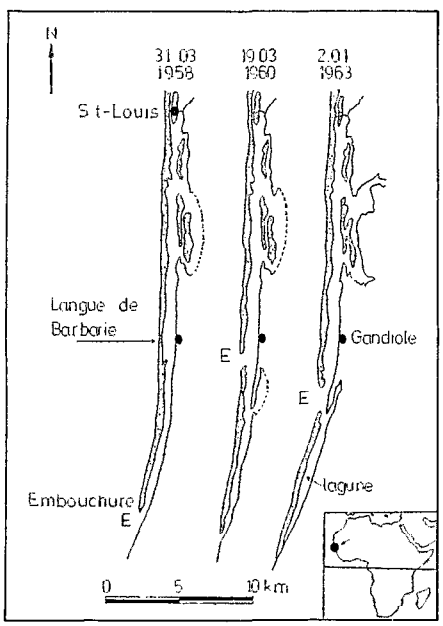

FIG. 4. — Mécanismes de la migration de l'embouchure du Sénégal. Évolution de la position de l'embouchure de mars 1958 à janvier 1963 (MONTEILLET *et al.*, 1980).

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

— de 1850 à 1900, 7 ruptures importantes ont été dénombrées; la plus importante a eu lieu en 1894 en provoquant le démantèlement du cordon sableux sur près de 4 km (l'allongement de 24 km entre 1850 et 1851 paraît trop considérable pour être vraisemblable);

— depuis 1900, 13 ruptures d'importances inégales se sont produites : la plus connue au mois de mars 1959 (BRIGAUD, 1961), la plus récente en 1973.

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

4. FORMULATION DES PRINCIPES MÉTHODOLOGIQUES DE ROCHETTE (1964). DIFFICULTÉS D'APPLICATION

La remontée des eaux saumâtres baptisée « langue salée » a fait l'objet d'études importantes justifiées essentiellement par toute l'infrastructure agricole mise en place ou en projet dans toute la basse vallée du Sénégal. 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.

4.1. **Les principes méthodologiques de Rochette** (1964)

Les travaux de ROCHETTE (1964) ont déjà été largement synthétisés par REIZER (1971) et nous emprunterons à cet auteur l'essentiel de ses conclusions.

4.1.1. ÉVOLUTION DE LA SALURE A L'ÉCHELLE D'UNE MARÉE

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

— lorsque la pénétration saline 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 0,60 m/km) significatives d'eaux bien brassées et à mélange accentué;

— lorsque la pénétration saline est supérieure à 100 km, les divergences sur un cycle de marée s'accentuent. La répartition spatiale de la salinité est pratiquement indépendante des conditions de marée.

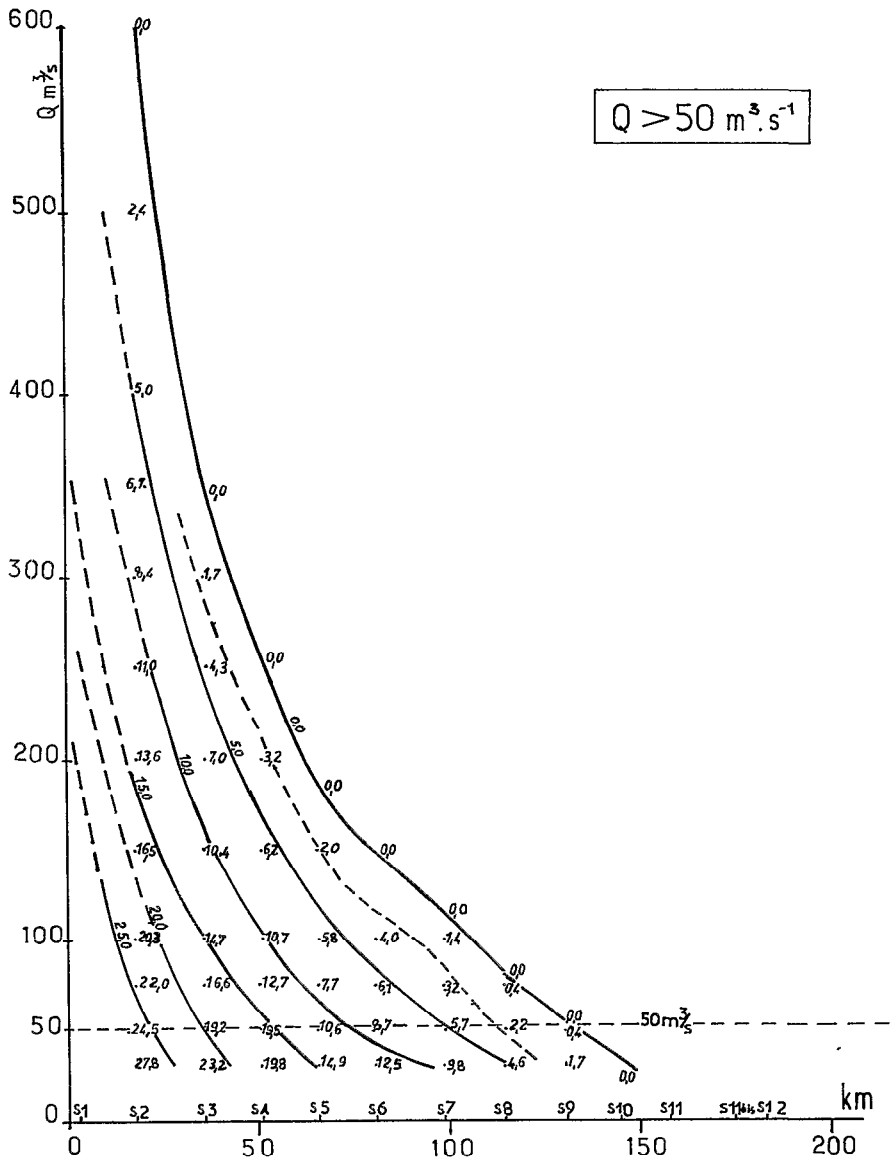

FIG. 5. — Relation débit/salinité moyenne de base (Q > 50 m³/s) (ROCHETTE, 1964).

4.1.2. ÉVOLUTION 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 conclusions 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, il précise le rôle fondamental joué par le débit fluvial. Il existe souligne ROCHETTE, « 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 essentielle-

ment du temps. Cette valeur, poursuit l'auteur, « est délicate à déterminer; nous l'avons fixée arbitrairement à 50 m³/s, valeur volontairement élevée pour tenir compte de l'avantage que présente la substitution du paramètre *temps* au paramètre *débit* quand ce dernier ne peut être déterminé avec précision ».

— En conséquence, « la salinité moyenne à la distance x de l'embouchure est donnée suivant la nature du paramètre de référence par l'un des graphiques (fig. 5 et 6), dans lesquels les résultats sont mis sous une forme directement exploitable qui permette de déterminer la salinité en fonction du débit pour D>50 m³/s, et en fonction du temps pour D<50 m³/s ».

— L'auteur souligne enfin que l'intrusion des eaux marines est possible dès que le débit tombe en dessous de 600 m³/s à l'embouchure.

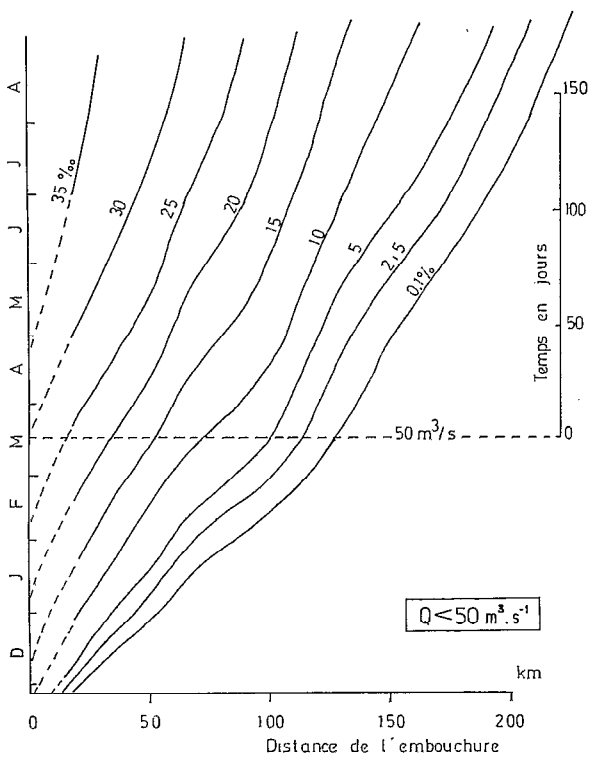

FIG. 6. — Relation temps/salinité moyenne de base (Q < 50 m³/s) (ROCHETTE, 1964).

4.1.3. 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 des approches successives, ROCHETTE estime à 900 millions de m³ le volume nécessaire (de la nouvelle onde de crue) pour que la salure soit entièrement retirée de l'embouchure.

4.2. Les difficultés d'application

Trois seuils dans les écoulements du fleuve doivent être connus avant de pouvoir suivre l'évolution de la salinité. Ces trois valeurs (50 m³/s, 600 m³/s et 900,10⁶ m³) sont indéterminables à l'embouchure; elles doivent être évaluées à partir des données recueillies plus à l'amont (station de Dagana).

4.2.1. LE SEUIL DES 600 M³/S : DÉBUT DE L'INTRUSION SALINE

De 1903 à 1964, la monographie hydrologique du fleuve Sénégal (ROCHETTE, 1974) donne pour chaque phase de tarissement la date présumée où le débit franchit le seuil des 600 m³/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 a été appliquée entre le bief amont de Bakel (où les débits sont connus depuis 1903) et le bief aval de Dagana.

$$QD1 = -0{,}2\ QB1 + 0{,}28\ QB0 + 0{,}92\ QD0$$

Rappelons que QB0 et QD0 représentent les débits respectifs à Bakel et à Dagana le jour J, et QD1 et QB1 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 m³/s correspond à un débit de 45 m³/s le même jour à Bakel.

Enfin il arrive fréquemment 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.

4.2.2. LE SEUIL DE 50 M³/S : SUBSTITUTION DU PARAMÈTRE « TEMPS » AU PARAMÈTRE « DÉBIT »

C'est le point le plus difficile à évaluer : la raison essentielle tient au fait que durant toute la période précédant la fin de la Seconde Guerre mondiale, les hauteurs limnimétriques en basses eaux étaient peu ou pas relevées.

La méthode a consisté à mener tout d'abord une étude critique des observations de chaque année. Nous 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^3/s se présente en général à Dagana avec un retard de 8 à 10 jours par rapport à l'enregistrement du débit de 45 m^3/s à Bakel. En moyenne, la valeur de 50 m^3/s est observée à l'aval, quant à l'amont, les débits sont de l'ordre de 37 m^3/s.

4.2.3. Le seuil des 900.10^6 m^3 et la relation temporelle entre les volumes écoulés a Bakel et a Dagana au début de la crue

Le retrait de la salure a été défini par Rochette (1964) en fonction des volumes totaux écoulés à Dagana, eux-mêmes déduits de ceux des stations de Ngoui et 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 conservé 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 documents et l'étude critique entreprise sur les observations anciennes, nous pensons, qu'à l'exception de quelques années (1909-1910, 1910-1911, 1913-1914 et 1919-1920), notre erreur d'estimation est de l'ordre de 3 à 4 jours. Pour les années récentes, l'évaluation est plus précise puisqu'on dispose en effet de mesures de salinité ou encore d'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 fonctions des écoulements observés à Bakel la durée de la phase de retrait.

5. L'INVASION MARINE DANS LA BASSE VALLÉE DU FLEUVE SÉNÉGAL AU COURS DES 80 DERNIÈRES ANNÉES

5.1. **Caractéristiques essentielles de la zone d'intrusion d'eau saumâtre. Chronologie des différentes phases**

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

5.1.1. Présence d'eau douce des sources à l'embouchure

En général l'eau douce s'installe dans toute la vallée du Sénégal entre août et novembre. Une analyse de fréquence des 80 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 (Gac *et al.*, 1983). Les phases 1 les plus précoces ont été observées en 1929 et 1933 (13 juillet), et la plus tardive en 1970 (11 septembre). Les durées extrêmes de cette présence d'eau douce dans toute la vallée concernent respectivement l'année 1972 (51 jours : du 26 août au 15 octobre) et l'année 1967 (155 jours : du 22 juillet au 24 décembre).

5.1.2. Le début de l'intrusion saline ($D<600$ m^3/s)

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

5.1.3. Interdépendance avec le paramètre débit (50 $m^3/s<D<600$ m^3/s)

Cette seconde phase se termine en général vers le 15 mars : elle dure en moyenne 110 jours avec des valeurs extrêmes de 77 jours en 1977-1978 (du 25 octobre 1977 au 10 janvier 1978) et de 141 jours en 1907-1908 (du 19 novembre 1907 au 8 avril 1908). Cette phase est étroitement liée à la forme du tarissement du fleuve et 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).

5.1.4. Interdépendance avec le paramètre temps ($D<50$ m^3/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

TABLEAU I

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

1. eau douce dans toute la vallée ; 2. date à laquelle D = 600 m³/s ; 3. date à laquelle D = 50 m³/s ; 4. maximum de l'incursion marine ; 5. date du retrait total

Cycles hydro-logiques	1	2	3	Maximum 4	5	Cycles hydro-logiques	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	15.06.69	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 (jours) ; abscisse maximale atteinte par la salure (km) d'après le modèle de ROCHETTE

Cycles hydro-logiques	1	2	3	4	5	Abcisse Max (km)	Cycles hydro-logiques	1	2	3	4	5	Abcisse Max (km)	Cycles hydro-logiques	1	2	3	4	5	Abcisse Max (km)
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 Rheune en novembre 83 et reconstruction en novembre 84						
30-31	134	123	81	26	230	172	58-59	145	127	62	32	221	162							

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

elle-même de la plus ou moins grande précocité de la nouvelle saison des pluies. Lorsqu'elle s'achève, la remontée saline atteint son abscisse maximale dans la vallée du fleuve. Pour fixer les idées, cette pénétration 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.

5.1.5. LE RETRAIT DE LA SALURE AVEC LA REPRISE DES ÉCOULEMENTS

Elle est provoquée par l'arrivée de la nouvelle onde de crue occasionnée par l'installation de la saison des pluies sur le haut-bassin. Cette phase de retrait est mal connue du fait des nombreuses incertitudes dans l'évaluation des écoulements du fleuve; c'est aussi la plus brève, la quasi-totalité du sel étant rejetée dans l'océan au bout d'un mois (31 jours en moyenne). Les durées extrêmes du retrait ont été observées en 1945 (18 jours) 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 de façon considérable d'une année sur l'autre : 215 jours en 1928-1929 et 313 jours en 1979-1980. On remarque ensuite que les remontées minimales ne succèdent pas systématiquement aux crues les plus fortes; de même, les plus longues intrusions ne suivent pas nécessairement les crues les plus faibles. On aboutit aux mêmes conclusions que COGELS et GAC (1983) : « En général, une crue faible engendre une intrusion rapide du biseau salé, une crue forte un temps de séjour moins long des eaux saumâtres dans la vallée du fleuve. Mais, deux crues d'importance très inégale peuvent aussi introduire deux incursions marines tout à fait identiques, selon le caractère tardif ou précoce des ondes de crue suivantes. »

5.2. Relations débits/temps de séjour des eaux marines et débits/abscisse maximale atteinte

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

La figure 7 a 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 donne un coefficient de corrélation de : —0,86), mais de nombreuses distorsions apparaissent et ceci quel 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 aux temps de séjour les plus réduits. Ce résultat montre aussi que l'ampleur de la remontée saline est bien plus sous la dépendance de la crue qui précède que de celle qui lui succède.

5.2.2. Relation entre le module et l'abscisse maximale

La dispersion des points représentatifs est comparable au cas précédent (coefficient de corrélation : —0,74). On retrouve les abscisses maximales à la suite des faibles crues et les invasions restreintes lors des crues importantes (fig. 7 b).

On peut signaler enfin que, quelle que soit l'importance des écoulements (donc des précipitations sur les hauts-bassins), le biseau salé franchit tous les ans la section au droit de Richard-Toll avec toutes les conséquences que cet événement annuel implique pour la dépression du lac de Guiers.

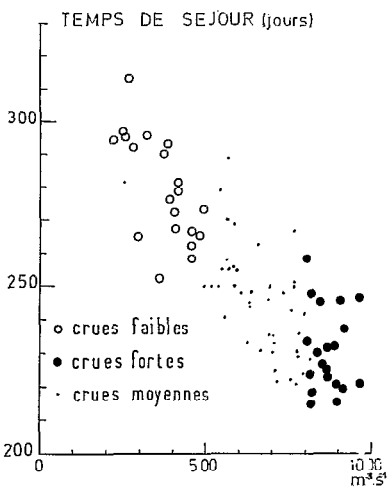

FIG. 7 a. — Relation entre le débit moyen annuel et le temps de séjour des eaux saumâtres.

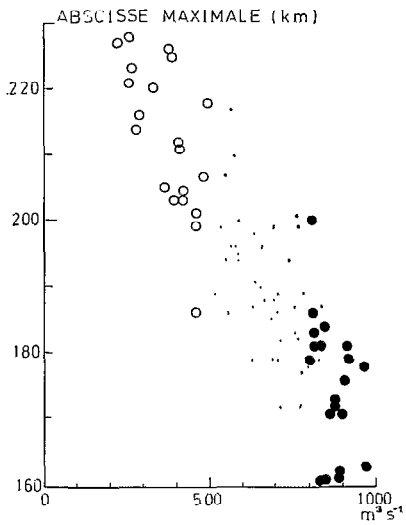

FIG. 7 b. — Relation entre le module et l'abscisse maximale atteinte par le front salé.

5.3. Reconstitution de l'extension spatio-temporelle de la salinité dans la vallée 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 présentée par GAC *et al.* (1983). Les déplacements des isohalines sont illustrées par la figure 8 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 St-Louis.

— En période sèche (caractérisée en particulier par une succession ininterrompue de crues faibles), la mer se déploie largement et en profondeur jusqu'au

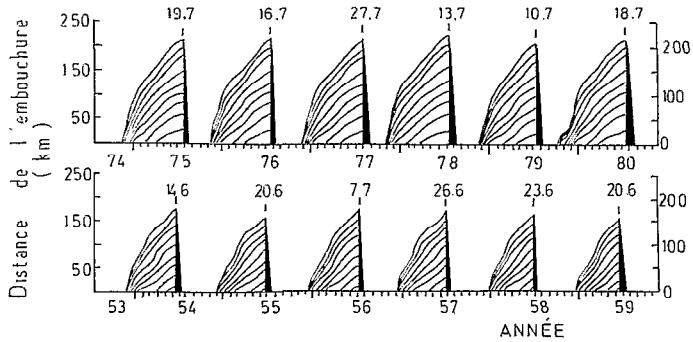

FIG. 8. — Remontées salines en période sèche (1974-1980) et en période humide (1953-1959).

TABLEAU III

Pénétration maximale moyenne des différentes isohalines lors des séquences sèches et humides. Positions amonts extrêmes observées entre 1903 et 1983

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

km 217, bien en amont de la ville de Dagana. Des taux de salinité de 35 ‰ sont observables jusqu'au km 28.

5.3.1. Les incidences paléo-climatiques

Il est intéressant de suivre l'évolution de la salinité en différents points de la vallée et d'y associer comme cela a été fait récemment par Monteillet et Rosso (1977), l'étude de la faune et de la flore actuelle. En effet, la présence de faunes marines fossiles dans les rivages anciens a souvent été attribuée à des mouvements positifs du niveau de la mer au cours de l'Holocène; mais 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 écoulement fluviatiles.

Nous avons retenu deux sites pour leur importance paléographique (lacs de Rkiz et de Guiers) et deux sections pour leur impact actuel et futur sur l'environnement (Rheune et Diama). Pour permettre une ouverture vers les études paléographiques et paléoclimatiques, 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 résumés dans le tableau IV.

Les graphiques établis pour des séquences sèches et humides (fig. 9) peuvent être utilisés comme des abaques pour l'estimation des paléosalinités en fonction de la distance à la mer d'une faune fossile. On utilise ensuite les abaques débit/salinité et pluviométrie/débit fournis par Gac *et al.* (1983) pour préciser la durée maximale et minimale des paléodébits et enfin l'allure des paléoprécipitations.

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

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

La notion km jour/salinité a paru la plus adaptée pour quantifier relativement les unes par rapport aux autres les 80 intrusions salines recalculées depuis le

TABLEAU IV

Taux de salinité et temps de présence des eaux saumâtres en différents sites de la vallée

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

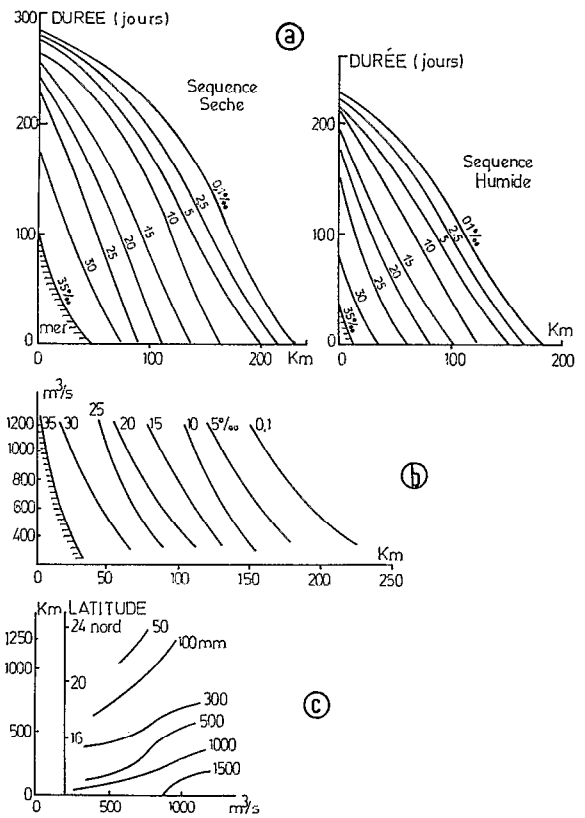

FIG. 9. — a) Schéma approximatif montrant la relation entre le temps de séjour des différentes isohalines et leurs positions respectives par rapport à l'embouchure.
b) Remontée de la langue salée en fonction du débit moyen annuel (GAC *et al.*, 1983).
c) Schéma approximatif montrant la relation entre le déplacement en latitude des isohyètes annuels et le module du fleuve (GAC *et al.*, 1983).

début du XXe siècle. La méthode d'évaluation a donc consisté à planimétrer pour chaque année les aires comprises entre les différentes isohalines et à calculer pour chacune d'entre elles l'équivalent en eau de mer « pure » à 35 ‰.

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

La sécheresse actuelle est, par sa durée et son intensité tout à fait différente de celles des années 1915 et 1945. Cette réduction considérable des écoulements et l'effet cumulatif sur plus de 16 ans se traduit par une intrusion saline exceptionnelle (COGELS et GAC, 1983).

Enfin, nous avons schématisé sur la figure 10 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 m³/s pour le module interannuel du Sénégal à Dagana, et 56,5 eq. à 35 ‰ pour l'intrusion saline).

TABLEAU V

Équivalent « 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

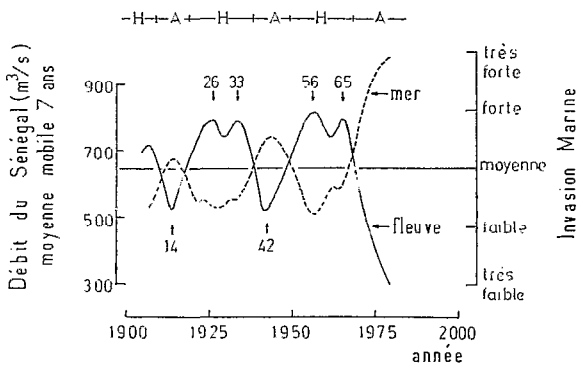

FIG. 10. - Comparaison entre les modules interannuels et l'intrusion saline.

CONCLUSION

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

Quatre causes principales permanentes déterminent chaque année, après le passage de la crue, la remontée des eaux marines vers l'amont du fleuve : la morphologie du lit mineur, le régime du fleuve et ses faibles débits de basses eaux, la puissance de la houle à l'embouchure et la forte pente du talus continental. D'une marée sur l'autre, la propagation du front salé est étroitement liée à la nature des masses d'eaux océaniques qui séjournent temporairement en bordure du littoral, aux oscillations du niveau marin, aux effets différés du marnage et aux constantes variations de la morphologie et de la position de l'embouchure. Elle est aussi assujettie aux caractéristiques annuelles des phases de tarissement et d'épuisement du fleuve elles-mêmes dépendantes 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 marine à l'intérieur du bassin sénégalo-mauritanien se décompose en quatre épisodes dont les durées respectives sont déterminées par les conditions d'écoulements propres à chaque crue et donc à l'importance et à la répartition des précipitations sur le bassin versant. La première phase correspond à la présence d'eau douce depuis les sources du fleuve jusqu'à son embouchure et les trois dernières au séjour des eaux saumâtres et salées dans la vallée. Selon ROCHETTE (1964, 1974), la migration vers l'amont de l'interface eau salée/eau douce se déclenche lorsque le débit du fleuve descend en dessous de 600 m³/s : l'importance de cette migration va alors dépendre de la plus ou moins grande précocité du tarissement et de la durée de la période des basses eaux où les écoulements restent inférieurs à 50 m³/s. L'arrivée de la crue suivante fixe l'abscisse maximale atteinte par la salure et contrôle la phase finale du retrait des eaux saumâtres.

A l'aide des abaques proposés par ROCHETTE (1964, 1974), les caractéristiques essentielles et la chronologie des différentes phases de l'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal ont été précisées au

cours des 80 dernières années (1903-1983). Avec toutes les réserves nécessaires dues à certaines approximations souvent contestables mais indispensables pour progresser, les principaux enseignements de cette reconstitution sont les suivants :

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

— l'intrusion saline la plus précoce a été observée en 1979 et en 1983 (le 13 octobre) et la plus tardive, estimée pour l'année 1951 (le 28 décembre);

— sur la période de 80 ans, les eaux saumâtres ont en moyenne été décelables jusqu'à 200 km de l'embouchure, et leur temps de séjour moyen a pu être évalué à 250 jours;

— les remontées minimales ne succèdent pas systématiquement aux crues les plus fortes et les plus importantes ne suivent pas nécessairement les plus faibles;

— autrement dit, si en général une crue faible engendre une intrusion rapide du biseau salé et une forte crue un temps de séjour moins long des eaux saumâtres dans la vallée, à deux crues d'importance très inégale peuvent aussi succéder deux incursions marines tout à fait comparables selon le caractère tardif ou précoce des ondes de crue suivantes (Cogels et Gac, 1983).

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 3 juillet 1986.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Brunet-Moret (Y.), 1970. — Étude hydrologique en Casamance. *Rapport ORSTOM*, Paris, 52 p., *multigr.*

Brigaud (F.), 1961. — Connaissance du Sénégal : l'hydrographie. Études Sénégalaises, IFAN, 9, 102 p.

Cogels (F. X.), Gac (J. Y.), 1982. — Le lac de Guiers : fonctionnement, bilans hydriques ; évolution d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol. VII, n° 1 : 41-60.

Cogels (F. X.), Gac (J. Y.), 1983. — Aménagement et évolution hydrogéochimique du lac de Guiers au Sénégal depuis 1916. Actes du colloque de l'AUPELF, « Barrages en terre et développement des zones rurales en Afrique », 11-16 avril 1983, Thies (Sénégal), 18 p.

Coleman (J. M.), Wright (L. D.), 1975. — Moderns rivers deltas : variability of processes and sand bodies. *In* « Deltas » (éd. M. L. Broussard), Houston Geological Society : 99-149.

Dubois (J.), 1955. — Les sols du delta du Sénégal. *Bull. M.A.S.*, Saint-Louis (Sénégal), 77 p.

Élouard (P.), Faure (H.), Hébrard (L.), 1977. — Variations du niveau de la mer au cours des 15 000 dernières années autour de la presqu'île du Cap-Vert, Dakar, Sénégal. *Bull. ASEQUA*, n° 50 : 29-49.

Faure (H.), Élouard (P.), 1967. — Schéma des variations du niveau de l'océan Atlantique sur la côte Ouest de l'Afrique depuis 40 000 ans. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, n° 265 : 784-787.

Faure (H.), Vieillefon (J.), Diop (C. A.), 1974. — Évolution de la ligne de rivage holocène en Casamance (sud du Sénégal). *Bull. ASEQUA*, n°s 42-43 : 91-100.

Gac (J. Y.), Kane (A.), Monteillet (J.), 1982. — Migrations de l'embouchure du fleuve Sénégal depuis 1850. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol. XII, n° 1 : 73-76.

Gac (J. Y.), Monteillet (J.), Faure (H.), 1983. — Marine shorelines in estuaries as palaeoprecipitation indicators. Symposium on « Variation in the global water budget » (éd. A. Street-Perrot, M. Beran, and R. Ratcliffe), Oxford (G.B.), 9-15 août 1981, Eds. Reidel Pub. Comp. : 361-370.

Henry (Y.), 1918. — Irrigations et cultures irriguées en Afrique tropicale. Éd. Larose, Paris, 296 p.

Monteillet (J.), 1977. — Tourbes de l'holocène inférieur dans le nord du delta du Sénégal. *In* : « colloque sur les variations des lignes de rivage à l'holocène ». *Bull. ASEQUA*, n° 50 : 23-28.

Monteillet (J.), Rosso (J.-C.), 1977. — Répartition de la faune testacée actuelle (mollusques et crustacés cirripèdes) dans la basse vallée et le delta du Sénégal. *Bull. IFAN*, n° 39 : 788-820.

Monteillet (J.), Faure (H.), Gac (J. Y.), 1981. — Variation du niveau de la mer et crues fluviales. IGCP project 61/INQUA meeting, Columbia (South Carolina), U.S.A., april 1981 : abstract.

Papy, 1951. — La vallée du Sénégal. Agriculture traditionnelle et riziculture mécanisée. *Cahiers d'outre-mer*, oct.-déc. 1951, n° 16 : 227-234.

Pinson-Mouillot (J.), 1980. — Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires du plateau continental sénégalais. Thèse Univ., Bordeaux I, 106 p.

Reizer (C.), 1971. — Contribution à l'étude hydrologique du bas-Sénégal. Premières recommandations d'aménagements halieutiques. Nogent/Marne, France, CTFT, 1971, 142 p.

Rochette (C.), 1964. — Remontée des eaux marines dans le fleuve Sénégal. Saint-Louis, Sénégal, M.A.S. et ORSTOM, 81 p.

Rochette (C.), 1974. — Le bassin du fleuve Sénégal. ORSTOM, Paris, *Monographie Hydrol.* n° 1, 391 p.

Trochain (J.), 1940. — Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal. Éd. Larose, Paris, 434 p.