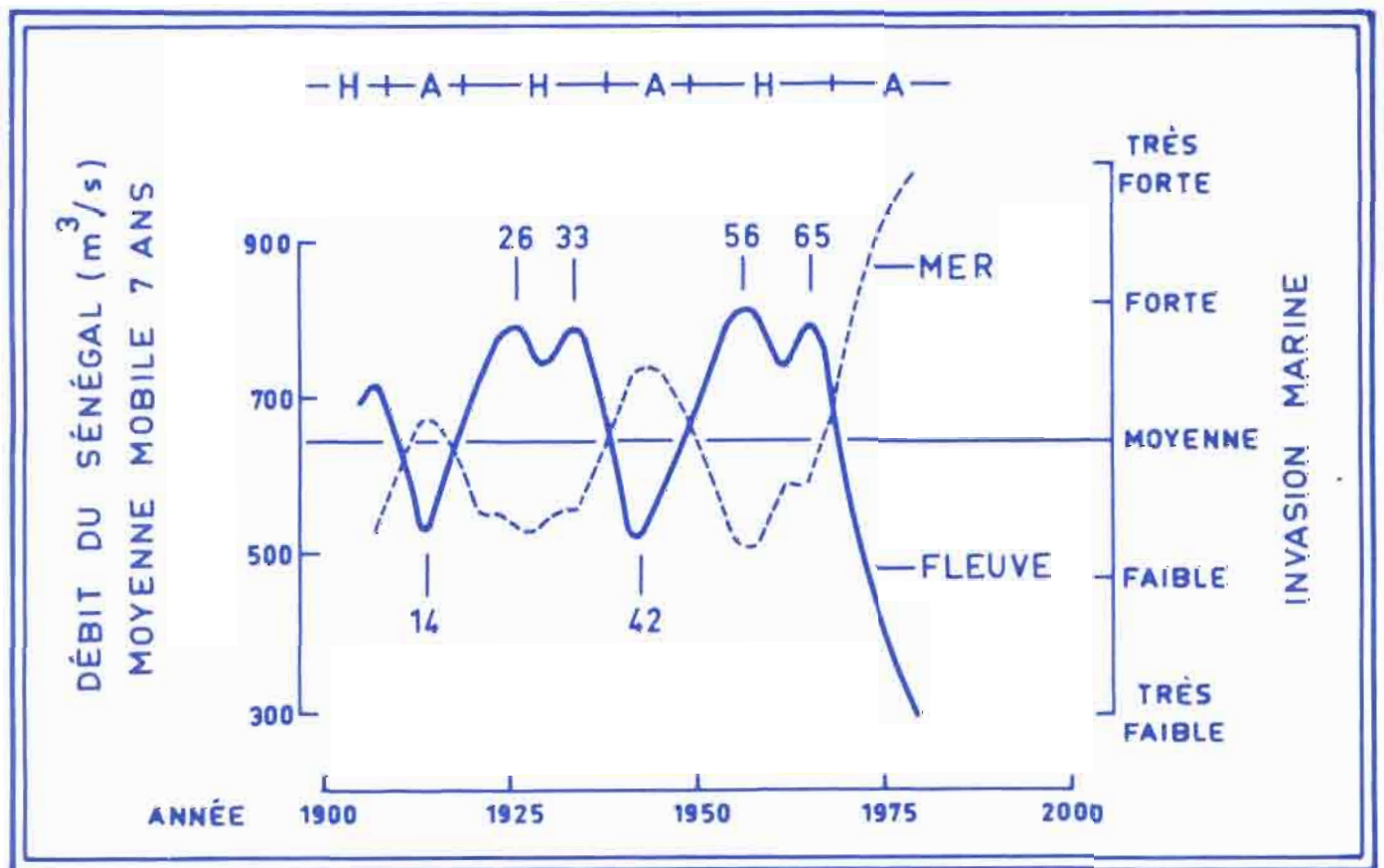


LE BASSIN DU SÉNÉGAL A L'EMBOUCHURE FLUX CONTINENTAUX DISSOUS ET PARTICULAIRES INVASION MARINE DANS LA VALLÉE DU FLEUVE

(Contribution à l'hydrologie fluviale en milieu tropical humide
et à la dynamique estuarienne en domaine Sahélien)



Alioune KANE

THESE DE DOCTORAT DE 3^e CYCLE DE GEOGRAPHIE PHYSIQUE

(Sous la direction de René FRECAUT et de Jean-Yves GAC)
Travaux du Laboratoire de Géographie Physique

LE BASSIN DU SENEGAL A L'EMBOUCHURE FLUX CONTINENTAUX DISSOUS ET PARTICULAIRES. INVASION MARINE DANS LA VALLEE DU FLEUVE

(Contributions à l'hydrologie fluviale en milieu tropical humide et
à la dynamique estuarienne en domaine sahélien)

Alioune KANE

THESE DE DOCTORAT DE 3^e CYCLE DE GEOGRAPHIE PHYSIQUE

(sous la direction de René FRECAUT et de Jean Yves GAC)

JURY :

M. R. FRECAUT, *Professeur à l'Université de Nancy II*
M. J. DION, *Professeur à l'Université de Nancy II*
M. J. Y. GAC, *Maitre de Recherches à l'ORSTOM de Dakar*
M. M. MEYBECK, *Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Paris*
M. J. C. OLIVRY, *Maitre de Recherches à l'ORSTOM de Montpellier*

Juillet, 1985

A mon Père,

A ma Mère, trop tôt enlevée
à notre affection,

A ma Grand-mère,

A Fatou TOURE,

Je dédie ce modeste travail.

SOMMAIRE

-ooo-

	<u>Pages</u>
AVANT-PROPOS.....	1
INTRODUCTION.....	4
LA DÉCOUVERTE.....	4
LE RÉGIME HYDROLOGIQUE DU FLEUVE SÉNÉGAL AVANT 1903.....	5
OBJECTIF DE L'ÉTUDE.....	7

PREMIERE PARTIE

CARACTERISTIQUES GENERALES DU BASSIN VERSANT DU FLEUVE SENEGAL

I. LE CADRE PHYSIQUE.....	8
II. LE CLIMAT.....	13
III. GÉOLOGIE ET GÉOMORPHOLOGIE.....	25
IV. SOLS ET VÉGÉTATIONS DU DELTA.....	36

DEUXIEME PARTIE

L'HYDROLOGIE MARINE ET CONTINENTALE

I. L'HYDROLOGIE MARINE.....	42
II. L'HYDROLOGIE CONTINENTALE.....	52

TROISIEME PARTIE

LES FLUX CONTINENTAUX DE MATIERES PARTICULAIRES ET DISSOUTES A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL

I. LES CYCLES HYDROLOGIQUES 1981-1982 ET 1982-1983. LEUR ORIGINALITÉ DANS LE CONTEXTE GÉNÉRAL DES ENREGISTREMENTS DEPUIS 1903.....	74
II. LES APPORTS FLUVIAUX DE MATIÈRES EN SUSPENSION À L'EMBOUCHURE DU SÉNÉGAL.....	76
III. LES APPORTS DISSOUS D'ORIGINE CONTINÉNTALE À L'EMBOUCHURE DU FLEUVE SÉNÉGAL.....	102
IV. LES FLUX CONTINENTAUX DE MATIÈRES PARTICULAIRES ET DISSOUTES À L'EMBOUCHURE DU SÉNÉGAL - LE BILAN DE L'ÉROSION MÉCANIQUE ET DE L'ALTÉRATION CHIMIQUE DANS LE BASSIN DU SÉNÉGAL.....	111

QUATRIEME PARTIE

L'INVASION SALINE DANS LA BASSE VALLÉE DU FLEUVE SENEGAL

I. ANALYSES DES DONNÉES ANTÉRIEURES.....	120
II. CAUSES ET MÉCANISMES DE LA REMONTÉE DES EAUX OCÉANIQUES DANS LA VALLÉE DU SÉNÉGAL.....	121
III. PARAMÈTRES HYDROLOGIQUES ET FACTEURS RÉGULANT L'INVASION MARINE.....	123
IV. FORMULATION DES PRINCIPES MÉTHODOLOGIQUES DE ROCHETTE (1964) - DIFFICULTÉS D'APPLICATION.....	133
V. L'INVASION MARINE DANS LA BASSE VALLÉE DU FLEUVE SÉNÉGAL AU COURS DES 80 DERNIÈRES ANNÉES (1903-1983).....	137

	<u>Pages</u>
VI. ÉTUDE DE LA REMONTÉE SALINE AU COURS DES CYCLES HYDROLOGIQUES 1981-1982 ET 1982-1983.....	151
VII. PROPOSITIONS NOUVELLES DE MODÉLISATION DE L'INTRUSION SALINE DANS LA VALLÉE DU FLEUVE SÉNÉGAL..	161
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	168
BIBLIOGRAPHIE.....	171
LISTE DES FIGURES.....	187
LISTE DES TABLEAUX.....	193
TABLE DES MATIÈRES.....	196

AVANT - PROPOS

-000-

Cette étude a été réalisée sous la co-direction de Monsieur le Professeur René FRECAUT et de Monsieur Jean Yves GAC dans le cadre du programme mené sur la Géochimie du fleuve Sénégal par l'Institut français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM).

Il m'est aujourd'hui très agréable d'exprimer ma gratitude et mes plus vifs remerciements à l'ensemble des personnes qui, par leurs enseignements, leur soutien sans réserve et leurs encouragements m'ont aidé jusqu'à la conclusion de ce travail.

Je remercie tout particulièrement, Monsieur le Professeur René FRECAUT, Directeur du Laboratoire de Géographie Physique de l'Université de Nancy II pour sa confiance. En dépit de ses lourdes tâches et de mon éloignement, il s'est constamment tenu informé et préoccupé de l'avancement de notre étude. Je lui suis reconnaissant des suggestions, des remarques, des conseils prodigués et d'avoir accepté de diriger nos recherches. Nous le remercions de l'intérêt manifesté lors de sa mission en 1982 au Sénégal et d'avoir accepté de présider le jury de notre mémoire.

Ma profonde gratitude ne saurait exprimer toute la reconnaissance que je dois à Monsieur Jean Yves GAC, Maître de Recherches à l'ORSTOM et responsable du laboratoire de Géochimie de Dakar. Je lui exprime mes sincères remerciements pour avoir initié, dirigé, animé avec clairvoyance, compétence et toute la rigueur scientifique ce travail. Je rends hommage à l'homme de science pour son exigence méticuleuse, son enthousiasme légendaire, ses conseils et ses encouragements mais aussi à l'homme de coeur envers qui j'ai contracté une immense dette de reconnaissance.

Nous remercions Monsieur J. DION, Professeur à l'Université de Nancy II et Monsieur M. MEYBECK, Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de la rue d'Ulm à Paris pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de participer à notre jury.

Monsieur Jean Claude OLIVRY, Maître de Recherches à l'ORSTOM, a eu la courtoise amabilité de mettre à notre disposition tous les documents et les données utiles, lorsqu'il dirigeait le Département de l'Hydrologie de l'ORSTOM à Dakar. Ses conseils et suggestions nous ont été très profitables et nous lui sommes reconnaissant d'avoir accepté de juger ce travail en participant au jury.

Monsieur Mamadou SALL, Professeur à l'Université de Dakar, nous a initié à la Recherche, a guidé nos premiers travaux en géomorphologie, nous a mis en relation avec l'ORSTOM et aidé efficacement lors de notre mutation à Saint-Louis. Nous lui disons toute notre gratitude pour ses conseils et son souci constant d'avoir connaissance de l'état d'avancement de notre étude. Son éloignement ne lui permet pas de venir juger ce mémoire mais il y restera associé.

Je renouvelle mes remerciements à toute l'équipe du laboratoire de Géochimie de l'ORSTOM animée par Monsieur J.Y. GAC, Messieurs M. CARN, J.E. VILLENEUVE, Hubert SANE et Souandy BADJI qui m'ont offert leur soutien amical et aidé quotidiennement dans l'accomplissement de mes recherches.

C'est au Département de Géographie de l'Université de Dakar que notre intérêt pour la recherche a été développé. Je suis profondément reconnaissant à l'ensemble du corps professoral et à tous les Maîtres qui m'ont formé par leurs enseignements : MM. Cheikh BA, Moussa SOUMAH, Marcel LEROUX, Jean LEBORGNE, P. MORAL, P. NDIAYE, S. DIOP, etc.

Je remercie Monsieur Seydou SOW, Inspecteur d'Académie, Proviseur du Lycée Charles de GAULLE à St Louis pour l'intérêt qu'il a manifesté à mon travail. Je lui suis gré de son appui constant et des aménagements qu'il a bien voulu accepter pour que ce mémoire aboutisse. J'associe à ces remerciements les censeurs successifs du Lycée Charles De GAULLE : A. DIOUF, C. BA, O. MBAYE ainsi que l'ensemble de mes collègues qui m'ont apporté leur soutien amical et en particulier Baara NDIAYE, Djibril BADJI, Mour NDOYE, Mbaye DIOUF, Amadou DIAOUNE, et Oumar DIOP.

Je voudrais aussi remercier les nombreux organismes qui m'ont apporté leur appui :

- le Centre de Documentation de l'OMVS : M. Djiby SALL, le Directeur, et l'ensemble de ses collaborateurs : Cheikh DIA, Alassane TOURE, CISSE et MBAYE, etc., m'ont accueilli avec amitié dans leur Centre. Je les remercie pour leur chaleureuse disponibilité et les facilités accordées. Je remercie O. HAMDINOUE, Hydrologue de l'OMVS, qui a bien voulu nous faire part de ses judicieux conseils.
- Le Service de l'Hydraulique du Ministère de l'Equipement m'a toujours aidé pour recueillir les données sur l'ensemble du réseau du Sénégal. J'exprime ma profonde gratitude à l'ensemble des agents du Département et à leurs Directeurs successifs : MM. CISSE, SANGHARE et THIAM, ainsi qu'à I. BOYE, DIAGNE et à M. SARR de la subdivision des Travaux Publics.
- La Capitainerie du port de St Louis et en particulier M. THIAM, qui nous a constamment laissé libre accès à ses archives et a bien voulu accéder à notre requête d'une mission commune à l'embouchure du fleuve. Qu'il soit remercié pour sa profonde connaissance du fleuve et les conseils prodigués.

- MM. Arona FALL et Amadou NDIAYE de la SAED ont bien voulu s'intéresser à nos recherches. Pour le temps qu'ils m'ont consacré et leurs conseils, qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

J'adresse également mes remerciements à M. DRAME de l'ASECNA pour sa collaboration efficace et son accueil amical ainsi qu'à l'ensemble du personnel du Centre de Recherche et de Documentation du Sénégal à Saint Louis, à son ancien Directeur, Monsieur M. Fadel DIA.

Je n'oublie pas, au terme de ce travail, le soutien amical et spontané du Cercle des Amis du Nord : Assane NDIAYE, Ousmane Sow FALL, Cheikh DIOP, Cheikhou SARR et sa famille, Mady SARR, ainsi que l'ensemble de mes amis : Georges Gormack FAYE, Madame NDIAYE/Fatou SOCK, Amara TOURE, Moussa DRAME, Médoune FALL, Daouda DIOP, Ababacar Gaye FALL, Lamine TOP, Abdou S. NDIAYE, Mactar GAYE, Amy DIOP, Fabinta LO, Ameth DIAW et Adama DIENE.

J'adresse mes remerciements à maman Diakher DIOP et à sa gentille famille, particulièrement à Awa FALL, qui s'est bien souvent interrogée et inquiétée sur l'état d'avancement de mes recherches.

Je remercie MM. Pierre T. SOSSOU, Abdoulaye THIAM et Mamadou Yatoudème NDIAYE de l'ORSTOM pour l'important effort consenti, bien souvent en dehors de leurs heures de travail, pour assurer la dactylographie et la reprographie de cette thèse.

Je ne saurais terminer sans adresser mes plus vifs remerciements à M. Iba Der THIAM, Ministre de l'Education Nationale et de l'Enseignement Supérieur, et à M. Balla Moussa DAFI, Ministre de la Recherche Scientifique et Technique, pour leur sollicitude et leur appui dans la réalisation de cette thèse.

Enfin, mes pensées vont à toute ma famille, soucieuse de mon séjour à St Louis et toujours préoccupée de mes travaux. Je remercie mon frère Assane pour m'avoir constamment soutenu et suppléé parfois dans les prélèvements.

Puisse cette modeste thèse contribuer au mieux-être de mes frères du Sahel.

I N T R O D U C T I O N

Le fleuve Sénégal nous est connu grâce aux écrits des anciens, aux récits des voyageurs arabes du Moyen-âge et aux rapports des missions et explorations européennes à partir du XVII^{ème} siècle.

I - LA DECOUVERTE

Il aura fallu plusieurs siècles pour donner au fleuve Sénégal sa "véritable carte d'identité".

A - L'EMBOUCHURE

HANNON, navigateur carthaginois, dans un document daté du V^{ème} siècle avant J.C. mentionne : "... L'embouchure du Lixus, fleuve considérable qui vient de l'intérieur de la Lybie, pour se jeter à cet endroit à la mer, c'est-à-dire à neuf journées de navigation (vers le sud) des Colonnes d'Hercule (monts Calpé et Abyla situés de chaque côté du détroit de Gibraltar.)" ; il s'agit vraisemblablement d'une des anciennes embouchures du fleuve Sénégal à la hauteur du RIO de ORO. PTOLEMÉE d'Alexandrie, (II^{ème} siècle après J.C.), fait sortir le Sénégal d'un grand lac "Negrites Palus" situé à 5° de longitude de la côte.

B - LA BASSE VALLEE

Les Arabes, au contact des grands empires africains, et dans le cadre du commerce transsaharien découvrent le bas-Sénégal. EL BEKRI (XI^{ème} siècle après J.C.) fait couler dans l'Océan Atlantique le Nil de Tékrour (Sénégal) ou Nil des Noirs, issu de l'intérieur de l'Afrique, et vers l'Est le Nil de Ras-Ek-Na (Nil d'Egypte). MONOD et al. (1951) résument fort bien l'opinion des voyageurs : "Les Arabes du Moyen-âge croyaient en effet que d'un grand lac d'Afrique centrale sortaient trois Nils différents : le Nil d'Egypte allant se jeter dans la Méditerranée, le Nil de Mogadischou coulant vers l'Océan Indien et le Nil du Soudan (des Noirs) vers l'Océan Atlantique.

C - LA CONNAISSANCE PROGRESSIVE DU BASSIN VERSANT PAR LES NAVIGATEURS PORTUGAIS AU XV SIECLE ET TROIS SIECLES DE MOUVANCE FRANÇAISE

En 1444, les caravelles du navigateur portugais TRISTÃO NUNO mouillent, sans y entrer, au large de l'embouchure du Sénégal. Il semble bien que la première remontée, dans une barque, du fleuve sur plusieurs milles ait été réalisée en 1447 par LANCELOT ETIENNE ALONZO ou en 1446 comme l'affirme SCHEIFFER (1895) par Denis FERNANDEZ qui lui donna son nom(1).

(1) : Controverses autour d'un nom (P. DECRAENE, le Monde 5/08/1979)

"Pour l'historien A. VILLARD, le Sénégal est la rivière des berbères Zenaga. Pour GAFFAREL, c'est le génois LANZAROTE qui donna au fleuve le nom d'un Maure qu'il rencontra sur ses rives ; ce dernier auteur ajoute curieusement que le vrai nom du fleuve est l'Ovidech. Pour sa part, le contre Amiral VALLON signale en 1886 que le fleuve Sénégal était dénommé : Dechgi, Dechnndai, Dechgaglle ou Gogiledch. Enfin de source moins érudites, Sénégal serait la déformation de deux mots qui signifieraient "ma pirogue".

Cependant, la distinction n'est pas encore nette entre les trois grands cours d'eau (le Sénégal, le Nil et le Niger) ni même entre le Sénégal et la Gambie. LE SIEUR DE LA COURBE (1865) est le premier qui ait affirmé que ces rivières n'avaient aucune communication navigable les uns avec les autres après les découvertes des sources du Sénégal en 1817 par T. MOLLIEN et les voyages de MUNGO PARK en 1827.

Le XVIII^{ème} siècle voit naître la période française. Sous la férule et l'impulsion de ministres tels que RICHELIEU et COLBERT, la France se lance dans la course aux conquêtes territoriales outre-mer. En 1638, une première habitation fixe est établie à l'embouchure ; elle sera transférée en 1659 un peu plus à l'amont sur l'île de Ndar. La ville de St Louis était née : elle allait servir de tête de pont à la pénétration vers l'intérieur du continent et à la reconnaissance de tout le bassin versant du Sénégal.

II - LE REGIME HYDROLOGIQUE DU FLEUVE SENEGAL AVANT 1903

Avant 1903, aucune station de mesure n'était implantée sur le fleuve. Les nombreux documents existants nous permettent cependant d'esquisser dans ses grandes lignes le régime des écoulements du fleuve.

A - UNE CERTITUDE : UN REGIME D'ABONDANCE AVANT 1903

Les récits des voyageurs confirment au XVIII^{ème} siècle l'importance des hautes-eaux, des crues et des débordements du Sénégal.

Dès 1638, date de l'installation des Français dans l'île de Baba GUEYE, ROCHEFORT signalait que : "... les débordements du fleuve étaient si grands que leurs habitations étaient pleines d'eau jusqu'au 1^{er} étage...". De nombreux auteurs, HENRY (1918), TROCHAIN (1940) et PAPY (1951) en dépouillant les archives sur l'importance de l'intrusion saline ont pu établir qu'il n'était pas nécessaire de remonter très à l'amont du fleuve pour trouver de l'eau douce pendant la saison sèche ; on sait qu'en fin de saison sèche GAC et al. (1982), la langue salée peut envahir le fleuve à plus de 250 km, et même au-delà, de son embouchure. Les témoignages sont concordants : les bateaux-citernes, chargés du réapprovisionnement en eau douce, ne remontaient pas au-delà de la ville de Richard-Toll. Les travaux d'aménagements entrepris en 1859 par FAIDHERBE sur le Kassack pour constituer une réserve d'eau douce furent emportés par la crue. Vers 1860, "Le lieutenant de vaisseau BRAOUAZEC, navigua à bord d'une canonnière sur les terres inondées du Fouta-Ferlo" aujourd'hui désertiques ; à la suite de ce voyage, on conçut même le projet "de gagner la Gambie par le lac de Guiers." Les débordements étaient parfois tellement importants que les eaux du fleuve se répandaient fort loin en Mauritanie. DURAND (1875) signale qu'"entre le Cap Mirick et la petite île de Tider, à 18 lieues environ d'Arguin, on voyait l'embouchure de la rivière St Jean formée par les eaux du Sénégal." GALLIENI, en 1879, notait l'importante inondation dans le "Walo". La crue de 1890 fut tellement forte que le Sénégal, gonflé par des précipitations abondantes, déborda dans toutes les directions. Le colonel FREY rapporte que cette année-là, "la ville de St Louis se trouva en grande partie submergée" et que "dans cette nouvelle Venise", la circulation n'était possible qu'à l'aide de bacs ou de pirogues. Selon DUCHEMIN (1951) : "L'eau de cette année (1890) aurait atteint les salines de Nouaremach situées à 100 km au nord-est de Nouakchott." Selon une autre version, l'eau du Sénégal serait remontée jusqu'à Tirovour et rejoint par la vallée de l'Oued Targa les eaux descendant de l'Adrar.

En 1906 le capitaine VALLIER, après plusieurs séjours dans le Ferlo, commentait les événements de 1890 en ces termes : "Tout, en un mot, ... donne l'impression qu'à une époque géologique antérieure, la SÉNÉGAMBIE devait être un vaste delta où un volumineux fleuve épandait ses eaux que charriaient des artères secondaires et dont nos vallées d'érosion actuelles seraient le tracé persistant."

La période d'avant 1903 a donc été caractérisée par des précipitations abondantes et des écoulements importants. Il y a cependant eu quelques séquences sèches (ex : en 1866) mais avec un caractère d'aridité certainement moins prononcé que celles de notre époque. Tout semble concorder pour affirmer qu'un profond bouleversement climatique est intervenu à la fin du siècle dernier : les écoulements du Nil se sont réduits de 30 % (PARIS - TEYNAC, 1964), le Lac Tchad a vu sa superficie se réduire considérablement (TILHO, 1910), l'invasion marine a pris des proportions inquiétantes dans la vallée du fleuve Sénégal (ROCHETTE, 1974). On peut s'interroger avec GIRAUD (1951), COGELS et GAC (1982) sur les raisons de ce bouleversement et sur le caractère irréversible ou transitoire de cet événement qui se manifeste sur toute la frange sahélienne.

B - LES CAUSES DU CHANGEMENT DE REGIME AU XX SIECLE

1. Une diminution récente des précipitations

C'est la réduction des précipitations sur le haut-bassin qui a provoqué la diminution des hauteurs de crue et des écoulements du fleuve. HENRY (1918) émet des réserves sur une diminution effective des pluies mais il constate néanmoins une baisse de pluviosité de 20 % à St Louis entre les périodes 1860-70 et 1865-72. Pour PELTIER (1945) : "l'idée naturelle d'incriminer une diminution des précipitations est démentie par les faits" ; en effet, dans la vallée du Sénégal tout au moins, on n'observe pas de réduction sensible. Il est possible que les précipitations soient devenues moins abondantes dans le massif du Fouta-Djalon où se situent les sources du Sénégal, mais cette hypothèse ne peut être confirmée, les premiers relevés météorologiques dans cette région ne datant que de 1920. De son côté, PAPY (1951) cite l'exemple de la station de Podor : de 411 mm de 1860 à 1870, les précipitations moyennes annuelles se sont abaissées à 295 mm de 1904 à 1913 et à 333 mm de 1931 à 1940. L'analyse fait ressortir une tendance à la réduction des pluies bien que certaines anomalies viennent confirmer la très importante irrégularité interannuelle (ex : St Louis, 673 mm en 1881 et 87 mm en 1913).

2. Une accélération de la vitesse des crues

Le régime des écoulements s'est transformé : "le fleuve se caractérise désormais par une chasse plus puissante que par le passé", PAPY (1951). Le fleuve s'est alors rapproché de son profil d'équilibre, a davantage creusé son lit, s'est enfoncé et a cessé ses grandes divagations. Dans sa partie aval, le Sénégal est devenu un fleuve irrégulier, incertain et capricieux, son régime est devenu torrentiel (HENRY, 1918).

3. Le déboisement

Autrefois, le delta, la vallée et le haut-bassin étaient des régions boisées comme en témoignent les relations de voyage des explorateurs du XVII^{ème} siècle. ADANSON (1748) décrit une végétation luxuriante avec des forêts de palétuviers, des peuplements de gonakiers... etc. Cette forêt a été l'objet d'une exploitation systématique pour la construction des villes, la navigation à vapeur, la fourniture de bois de chauffe lorsqu'elle n'était pas détruite sur de vastes étendues par l'extension des feux de brousse. Le recul progressif de la végétation vers le sud a entraîné une plus grande fragilité des sols, "accentué le régime torrentiel des cours d'eau et facilité l'écoulement rapide des eaux de surface" (HENRY, 1918).

4. Le défoncement du seuil de Faff

Selon BANCAL (1923), du XV^{ème} siècle à nos jours, l'estuaire du Sénégal s'est trouvé limité par un seuil qui barrait le fleuve à la hauteur de FAFF (situé 125 km en amont de St Louis). PAPY (1951) signale également l'existence de ce seuil rocheux : haut de 1,50 m environ, il était utilisé par les Maures du Trarza lors de leur pillage sur la rive gauche du fleuve. La présence de ce seuil a cependant été contestée par les ingénieurs de la Mission d'Aménagement du Sénégal (M.A.S) qui affirmaient : "qu'une telle barre rocheuse à 125 km de St Louis ne s'expliquait pas géologiquement."

BANCAL (op. cit.) ajoutait : "que les eaux de crue venant se heurter à cet obstacle, s'élevaient au-dessus des rives, se répandaient très loin dans les plaines limitrophes" provoquant ainsi les grandes inondations rapportées par la tradition orale. Ce seuil aurait été arasé en 1890 : l'ouverture pratiquée dans sa partie centrale pour livrer passage aux eaux de crue aurait eu pour conséquence de limiter l'importance et la durée des inondations dans la basse vallée en particulier lors des grandes crues de 1906, 1922, 1924, 1935, 1936, 1950 et donc la sédimentation limoneuse dans le walo. La diminution des hauteurs d'eau, l'accélération des écoulements se sont traduites par un changement brutal du régime du fleuve.

5. L'accentuation progressive de l'aridité

La réduction des précipitations, la disparition de la végétation, le passage à un régime torrentiel sont autant de facteurs annonciateurs d'un dessèchement progressif et de modification des conditions climatiques. Ils entraînent :

- la diminution des eaux de surface : la dernière inondation de la vallée du Bounoum (Ferlo) remonterait, selon HUBERT (1922), à 1861 ;

- dans le bas-Sénégal, la transformation du réseau hydrographique, autrefois étendu, fonctionnel et régulièrement alimenté, en vallées asséchées livrées au colmatage par l'avancée des sables. Aujourd'hui, la vallée du Ferlo est en voie de désertification et l'exutoire des Maringouins par où transitaient les eaux du Sénégal au XVII^{ème} siècle a été comblé ;
- la réduction des réserves souterraines : la recharge des nappes est insuffisante, leur niveau baisse et la survie des populations nécessite des puits de plus en plus profonds ;
- la disparition de la faune : nombreux autrefois dans toute la vallée du Sénégal, les éléphants, les crocodiles, les hippopotames ont aujourd'hui disparu ;
- enfin une intrusion précoce et plus profonde de la langue salée dans la basse vallée du Sénégal.

III - L'OBJECTIF DE L'ETUDE

L'énumération des causes, des effets et des conséquences de la sécheresse pourrait se poursuivre... Pour le fleuve Sénégal, l'accentuation de l'aridité s'est traduite par des modifications profondes de l'importance de ses crues et de son mode d'écoulement.

Notre étude, commencée en 1981, s'est achevée sur le terrain à la fin de l'année 1983 au moment de l'édification du barrage de Rheune, à 100 km de l'embouchure. Elle s'est déroulée sur deux cycles hydrologiques caractérisés par des écoulements extrêmement faibles du Sénégal et qui succédaient à plus d'une décennie de forts déficits hydro-pluviométriques.

L'objectif était de suivre le comportement hydro-géochimique du fleuve dans la partie aval de son bassin versant au cours de cette troisième sécheresse observée depuis le début du siècle et qui, selon OLIVRY (1982), présenterait une physionomie tout à fait différente de celle de 1913 et surtout de celle du début des années 40. Il s'agissait, dans un premier temps, d'établir un bilan quantitatif et qualitatif des apports fluviaux sous formes dissoutes et particulaires qui transitent à l'embouchure du fleuve : à cette étude était associée celles entreprises par l'ORSTOM plus à l'amont du Sénégal et sur la Gambie sur le couple érosion-sédimentation.

Les circonstances (la persistance de conditions météorologiques défavorables, et en corollaire l'accentuation de l'aridité) ont voulu que cet objectif initial ait été quelque peu délaissé afin de cerner sous tous ses aspects le phénomène de l'invasion marine qui par son ampleur exceptionnelle, au cours de nos années d'observation, mettait en péril toutes les populations riveraines de la vallée du Sénégal. L'observation minutieuse de la remontée de la langue salée dans des conditions hydrologiques tout à fait différentes de celles qui prévalaient lors de l'étude menée par ROCHETTE (1964) en 1962 et 1963 (rappelons que ces deux années furent marquées par des écoulements moyens de 770 m³/s et de 667 m³/s du même ordre de grandeur que le module moyen interannuel de 730 m³/s) nous a permis dans la quatrième partie de cette étude de proposer un nouveau modèle de propagation de la mer dans la vallée du Sénégal.

CHAPITRE I

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU BASSIN VERSANT DU FLEUVE SÉNÉGAL

I - LE CADRE PHYSIQUE

Le bassin versant du fleuve Sénégal se subdivise en deux parties (voir figure 1) :

- le cours supérieur avec les trois branches-mères de la Falémé, du Bafing et du Bakoye qui drainent le massif du Fouta-Djalou et le haut-plateau mandingue,
- la vallée alluviale que le fleuve aborde à la hauteur de Bakel : elle s'étend sur près de 800 km jusqu'à l'embouchure. La pente du cours d'eau y est très faible, les méandres nombreux et les plaines inondables en bordure du réseau hydrographique s'étendent sur de vastes étendues.

A - CADRE GEOGRAPHIQUE ET APERÇU GÉNÉRAL SUR LE DELTA DU SÉNÉGAL

En aval de Dagana, les levées qui bordent la vallée alluviale s'atténuent, la zone d'inondation s'élargit, le Sénégal entre dans son delta de forme triangulaire.

1. Le relief

La topographie du delta est monotone ; c'est une immense plaine au relief comportant :

- des levées alluviales, édifiées le long du Sénégal et de ses défluent dont l'altitude moyenne ne dépasse pas 2 mètres ;
- des dépressions ou des cuvettes ; à fond argileux, généralement salées et annuellement inondées à la saison des hautes-eaux. Elles forment de véritables lacs après le retrait des eaux avant de s'assécher progressivement ;
- un ensemble dunaire, dont les hauteurs atteignent à peine 8 à 10 mètres. Les dunes sont localisées à l'ouest où elles forment le cordon littoral, au sud-ouest, aux environs du village de Gandiole, et se poursuivent par les grands ensembles dunaires du Cayor au sud, ou du Trarza au nord.

Le modelé du delta du Sénégal est essentiellement d'accumulation, où les formations dunaires dominent, arasées au cours de l'évolution et finalement étalées.

2. Le réseau hydrographique

Dans sa partie amont, le delta du Sénégal enferme deux dépressions importantes :

- le lac de Guiers, en rive gauche du fleuve, vaste bassin peu profond (fond à la côte -2 m). Il est relié au Sénégal par la rivière de la Taouey. Le lac de Guiers était certainement un ancien déversoir du fleuve Ferlo aujourd'hui mort.
- le lac Rkiz, en rive mauritanienne, est une simple dépression communiquant avec le Sénégal par de multiples chenaux alimentés progressivement suivant l'importance de la crue.
- La cuvette du Ndiel, ancien lac à fond plat, n'est plus fonctionnelle depuis l'endiguement de la brèche de Niet-Yone (rupture de la liaison avec le lac de Guiers) et l'édification du barrage de Dakar-Bango (alimentation interrompue avec le Sénégal).

Enfin de nombreux marigots s'enchevêtrent dans le delta (le Djoudj, le Gorom, etc.). Ils sont tributaires de la crue du fleuve.

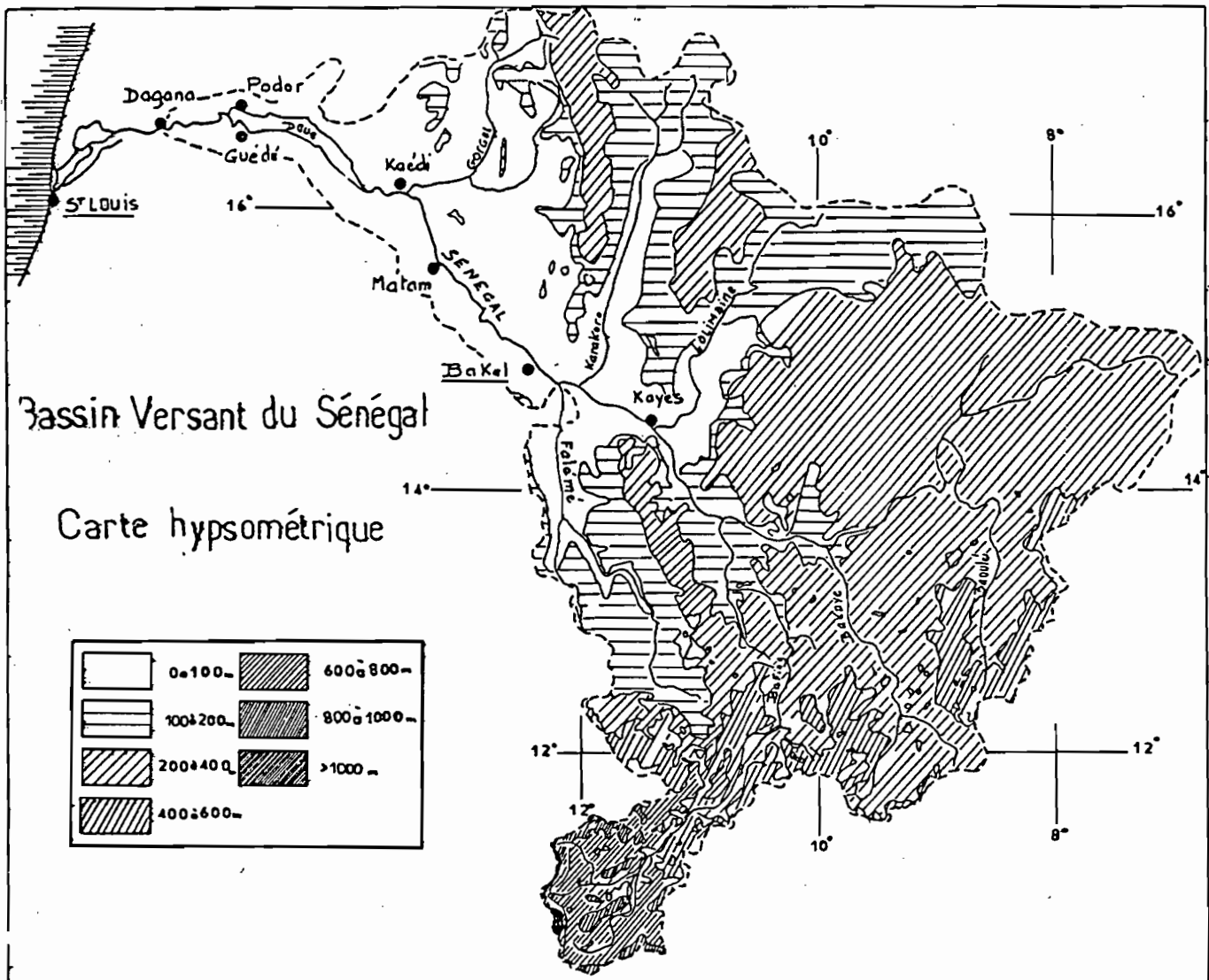
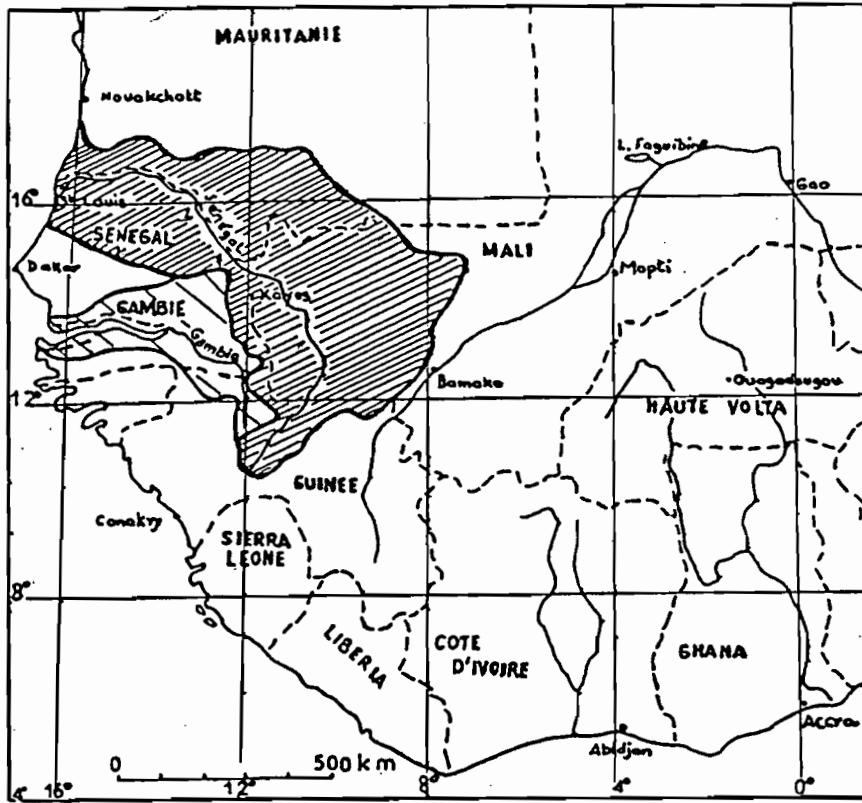


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant du Sénégal.

B - LA FORMATION DU DELTA DU SENEGAL

La formation du "delta" du Sénégal remonte au Nouakchottien (6 800 - 4 200 avant nos jours). Cette période correspond à une régression, consécutive à une baisse du niveau marin ; une lagune s'est ainsi formée derrière un puissant cordon littoral. Le Sénégal se divisait alors en plusieurs bras qui prenaient en écharpe les dunes littorales, et qui constituaient autant d'embouchures. Ce delta typique a été identifié aux Maringouins ; l'avancée des sables a aujourd'hui comblé et modifié tout cet ancien paysage. Selon TRICART (1961), "Il (ce delta) était constitué par un système de levées assez mince (généralement 0,5 km de large) escortant les bras principaux. Ces derniers avaient une disposition en pattes d'oies caractéristiques et étaient séparés par des lagunes occupées par l'eau saumâtre." Ce delta a évolué essentiellement dans sa partie aval. Après le Nouakchottien, l'assèchement climatique et les actions littorales ont progressivement modifié ces conditions avec le colmatage de l'ancienne lagune. Le maintien des bouches a rencontré des difficultés croissantes qui sont à l'origine de la situation actuelle : une seule bouche, rejetée loin vers le sud. Il s'est donc constitué un puissant cordon dunaire qui a ennoyé les formations nouakchottiennes que le fleuve a été incapable de franchir. Le Sénégal, dans l'impossibilité d'atteindre la mer, a progressivement dévié vers le sud (coude de Débi) : les anciennes embouchures se sont colmatées ; et les eaux dans un chenal ont cherché leur issue vers le sud.

Aujourd'hui, l'ambiguïté demeure sur la nature de la partie terminale du fleuve : s'agit-il d'un delta ? d'un pseudo-delta ? d'un delta fossile ? ou tout simplement d'un estuaire ? DUBOIS (1955) défendit la thèse d'un pseudo-delta en soulignant :

- l'embouchure unique du fleuve,
- la présence d'une côte à peu près rectiligne,
- l'intrication entre des dunes parallèles à la direction générale d'écoulement et les bras qui se faufilent dans leurs intervalles,
- enfin, l'importante remontée de l'eau salée dans le cours du fleuve. Tous ces arguments amènent cet auteur à conclure à l'inexistence d'un delta.

Pour TRICART (1961) "Le delta du Sénégal répond à tous les éléments génétiques de la définition d'un delta typique" par :

- une construction alluviale de niveau de base édifiée dans une nappe d'eau,
- le colmatage de l'ancien golfe nouakchottien rapidement fermé en lagune,
- l'arrivée des alluvions jusqu'au droit de la côte,
- c'est à partir de ce stade que les branches du fleuve pouvaient donner naissance à une saillie du littoral.

Ainsi, ce n'est pas parce que le delta du Sénégal ne fait pas saillie dans la mer qu'il n'existerait pas. Les raisons pour lesquelles le Sénégal se déverse dans la mer par un chenal unique sont à rechercher dans le régime hydrologique du fleuve et dans le jeu de la dynamique littorale. Il faut souligner en effet l'apparente passivité du fleuve, par suite d'une dynamique fluviale déficiente. Le fleuve n'est doté d'une réelle puissance que pendant la période des hautes-eaux (3 mois dans l'année, et son débit peut atteindre 5 000 m³/s). Pendant le reste de l'année, il est confronté aux actions marines qui contrecarrent sans peine les effets de la crue précédente. Durant cette période post-hivernage, le fleuve s'affaiblit par l'importance du phénomène d'inondation sur ses rives, son tarissement précoce et la sévérité des étiages, et il n'atteint l'océan que par une seule embouchure.

En conclusion, on peut affirmer que le cours inférieur du Sénégal se termine par un véritable estuaire. Le delta est fossile : les différents bras se sont rejoints ou se sont "récapturés" avant de s'écouler dans l'océan par un chenal unique. La faible durée de la forte hydraulité et l'existence d'une houle puissante sur le littoral expliquent l'unique embouchure du fleuve.

C - LES CARACTERES TOPOGRAPHIQUES

Le Sénégal, long d'environ 1 800 km, prend sa source dans le massif du Fouta-Djalon en Guinée. Il est formé de la jonction du Bafing et du Bakoye à Bafoulabé (confluence) et sert alors de frontière sur le reste de son parcours entre le Sénégal et la Mauritanie.

1. Profil en long

Le profil en long est très irrégulier ; les pentes des principales rivières sont élevées dans le cours supérieur mais s'abaissent rapidement au fur et à mesure du parcours.

Dans le cours supérieur :

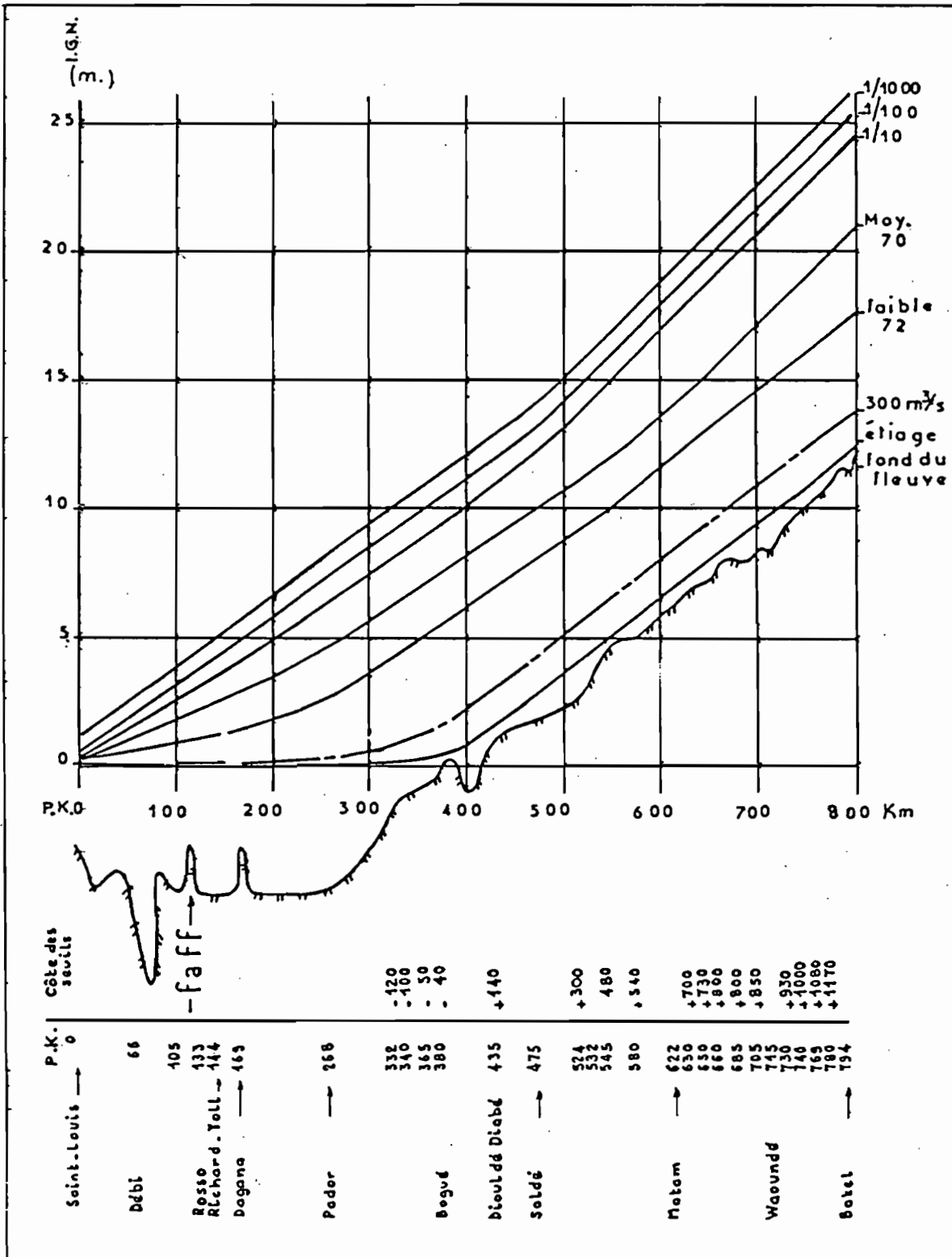


Figure 2 : Profil en long du Sénégal sur les 800 derniers kilomètres de son cours (de Bakel à l'embouchure). Position du plan d'eau pour différentes crues (selon O.M.V.S, 1980).

- le Bafing, considéré comme la branche-mère, naît dans le Fouta-Djalon et de sa source à Daïkka-Saïdou a une pente moyenne de 1,31 ‰ ; cette pente se réduit à 0,59 ‰ jusqu'à Bafoulabé.
- Le Bakoy, qui reprend sa source sur le rebord du plateau mandingue, a une pente légèrement supérieure à celle du Bafing. D'abord forte (2,60 ‰), elle s'abaisse et s'établit à 0,55 ‰ à la confluence avec le Bafing.

De Bafoulabé à Bakel, la pente moyenne du fleuve s'abaisse de nouveau (0,30 ‰) ; il reçoit divers affluents (Kolombiné : 0,47 ‰ ; Karakoro : 0,37 ‰) et franchit des seuils (ex : seuil de Talari), des rapides et des chutes (aux Chutes de Gouina, il passe de 62 à 47 m ; et à Félou, de 39 à 23,50 m). La pente du profil s'affaiblit, se réduisant à 0,007 ‰ jusqu'à Bakel pendant la saison des basses-eaux, le fleuve reçoit en rive sénégalaise un important affluent, la Falémé, ayant une pente forte de 8,7 ‰ dans son cours supérieur.

A partir de Bakel, le Sénégal coule dans son cours inférieur et a une pente très faible (voir fig. 2).

Dans la vallée alluviale, caractérisée par de larges zones d'inondations (largeur entre 10 et 20 km), le fleuve décrit de nombreux méandres et reçoit de multiples bras secondaires (Djamel, Doué, Gorgol) qui serpentent la vallée et la recourent. La pente est faible : au moment des moyennes-eaux, elle est de 0,03 ‰ de Bakel à Bogué, puis de 0,01 ‰ de Podor à Richard-Toll. A partir de Bogué, le fond du lit descend sous le niveau de la mer, et par forte crue ; la pente se relève entre Bakel et Matam (0,045 ‰) et reste dans la même proportion entre Kaédi et Bogué (0,03 ‰).

Dans le delta, le paysage est celui d'une large plaine, la pente est à peine perceptible ; elle passe de 0,06 ‰ à 0,01 ‰ et est à Saint-Louis au niveau de la mer.

Tableau 1 : PENTES MOYENNES DE LA LIGNE D'EAU

	Bakel à Matam	Matam à Richard-Toll	Delta
Moyennes-eaux	3 cm/km	2 cm/km	0,6 cm/km
Hautes-eaux	4,5 cm/km	3 cm/km	1 cm/km

Ainsi donc, le Sénégal serait le premier ou le second fleuve à la pente d'étiage la plus faible au monde.

2. Profils transversaux

La largeur du fleuve se modifie tout le long de son parcours ; dans la vallée alluviale, elle peut varier de 750 m à 250 m entre Dembankane et Matam pour se réduire entre 150 m et 200 m en moyenne entre Bogué et Podor. En aval, le fleuve s'étale et sa section peut atteindre près de 700 m : à St-Louis, le Pont Faidherbe enjambe le Sénégal sur une longueur de 511 m

D - LES PROFONDEURS D'EAU DANS LE FLEUVE SENEGAL

Les profondeurs dans le fleuve Sénégal sont stables, sauf à proximité de l'embouchure où les conditions changent continuellement.

1. Profondeurs dans le fleuve

Les profondeurs d'eau disponibles pour la navigation dépendent en général des débits, c'est ainsi que la différence entre la hauteur d'eau pendant la saison des hautes-eaux (juillet à octobre) et la saison des basses-eaux (12 m à Bakel, 5 m à Dagana) est appréciable. Dans l'estuaire, grâce aux travaux de SURVEYER, NENNINGER et CHENEVERT, les profondeurs sont suffisamment bien connues.

a) Le grand bras

Les profondeurs entre Saint-Louis et l'embouchure sont partout supérieures à 6 m, mais elles sont plus importantes sur la rive droite que sur la rive gauche. La profondeur maximale de 11,1 mètres a été mesurée au pont Faidherbe. A l'Hydrobase, les profondeurs varient entre 7 m pour la rive droite et 5 m pour la rive gauche.

b) Le petit bras

Entre Saint-Louis et la Langue de Barbarie, les profondeurs sont d'environ 3 mètres. Vers le sud, ce bras rejoint le bras principal du fleuve. Au nord, il en est séparé par une région dont les profondeurs sont d'environ 0,50 m.

2. Profondeurs d'eau dans l'embouchure du fleuve

Les profondeurs à l'embouchure du fleuve sont faibles et se modifient continuellement. L'embouchure, du côté de la mer, est traversée par une barre de sable sur laquelle viennent se briser de hautes vagues formées lors de la rencontre des eaux du fleuve avec les eaux océaniques. Cette barre se déplace fréquemment, ce qui rend difficile la navigation. Le fleuve, grâce à son courant et au volume d'eau charrié y fait deux ouvertures appelées passes :

- une grande passe : chenal au travers de la barre dont la profondeur est légèrement plus grande qu'ailleurs ;
- une petite passe : si étroite que seules de petites embarcations peuvent s'y risquer.

Les profondeurs à l'embouchure varient de 2,50 m à 3,50 m selon les saisons : les plus élevées sont obtenues en saison sèche et les plus faibles en hivernage. Selon MEGLISTSKY (1969) :

- environ 5 % du temps, les profondeurs sont inférieures à 2,6 m,
- environ 25 % du temps elles sont inférieures à 3,0 m,
- et que 50 % du temps, elles sont inférieures à 3,3 m.

Tableau n° 2 : FONDS MAXIMA ET MINIMA A LA BARRE SELON LES MOIS
(A. M. MEGLISTSKY, 1969)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Minima	2.7	2.6	2.2	2.0	2.5	2.5	2.4	2.1	2.2	1.9	2.4	2.2
Maxima	4.5	4.9	4.6	5.0	4.7	5.0	4.9	5.0	5.0	4.5	4.5	4.4

Selon les estimations de DEKKER (1963) "La barre est navigable environ 280 jours par an", par contre les données disponibles à l'administration de la Capitainerie du Port de Saint-Louis montrent que la barre est accessible aux navires 330 Jours par an. Il faut signaler la présence de deux barres sableuses qui se développent le long de la côte : l'une située à environ 100 m du rivage ; la seconde à 400 m n'apparaît qu'en saison sèche.

II - LE CLIMAT

Le bassin du Sénégal s'étend entre 10° 30' et 17° 30' de latitude nord. Dans cette partie de l'Afrique de l'Ouest uniformément plate, il n'y a pas de relief vigoureux ni de barrière morphologique importante pour constituer une quelconque entrave à la circulation atmosphérique générale. La situation en latitude du bassin le contraint au cours de l'année aux mouvements alternants de masses d'air d'origine et de caractères différents. Dans la partie ouest, l'influence maritime est prédominante avec la présence quasi-permanente de la cellule anti-cyclonique des Açores ; dans la partie est, le facteur continental est prépondérant : en hiver au renforcement de la cellule anticyclonique boréale se surimpose les effets de l'individualisation de la ceinture anticyclonique maghrébine qui se manifeste par des vents chauds secs (Harmattan).

La zone géographique de notre étude se situe essentiellement en domaine maritime. Les caractéristiques climatiques de la région ont été établies à partir de la longue série de données de Saint-Louis(1) mais aussi à l'aide des observations plus récentes aux stations de Dagana, Richard-Toll et Podor plus éloignées du delta.

(1) : La station météo de Saint-Louis a été fondée en 1872 par le Dr. BORIUS, médecin de la marine à l'école des Frères PLOERMEL. La station a ensuite changé de site (WANE, 1977).

Station	Nature	Date		Site
		Ouverture	Fermeture	
St-Louis I	Synoptique	1897	1942	Hôpital colonial
St-Louis II	Synoptique	1942	31/12/1957	a) Pointe Sud de l'île face à la mosquée. b) Abri sur pilotis au-dessus du fleuve.
St-Louis III	Synoptique	1/1/1958	31/1/1959	Quartier Sor
St-Louis IV	Synoptique	1/2/1959	Indéterminé	Aérodrome

A - LES FACTEURS DU CLIMAT

Le climat de la zone tropicale nord est la résultante de trois centres d'action :

- l'anticyclone des Açores et les hautes pressions d'Afrique du Nord,
- l'anticyclone de Ste Hélène,
- la dépression continentale d'origine thermique de l'Afrique de l'Ouest.

1. Les centres d'action

a) L'anticyclone des Açores et les hautes pressions d'Afrique du Nord

De novembre à avril, tout le bassin du fleuve est parcouru par la circulation de flux issue de la cellule anticyclonique des Açores et des hautes pressions d'Afrique du Nord. Cet alizé maritime, qui souffle sur la station de Saint-Louis, peut être faiblement continentalisé (11 %) et se caractérise par son humidité. En général, il n'amène pas des précipitations mais uniquement des condensations (rosée, brouillard, etc.).

b) L'anticyclone de Sainte-Hélène

Dès le mois de mai-juin et jusqu'en octobre, les flux de l'anticyclone de Ste Hélène, issus de l'Atlantique sud sont prédominants. Cet anticyclone apporte la mousson et cette période correspond à la saison des pluies.

c) La dépression continentale d'origine thermique de l'Afrique de l'Ouest

Dont la position dépend de la localisation des HP des Açores et de Ste Hélène. Ces anticyclones et dépressions engendrent des masses d'air d'origine et de nature différentes : le remplacement d'une circulation par l'autre découpe l'année en deux saisons (sèche et pluvieuse).

2. Masses d'air et discontinuités

a) Les alizés

Pendant l'hiver boréal, les flux issus de l'anticyclone des Açores et des HP maghrébines soufflent en permanence de novembre à mai ; tout le bassin du fleuve est alors parcouru par la circulation d'alizés. Le vent du nord s'installe avec force dès le mois d'octobre, il peut se maintenir jusqu'au mois de juillet sur le delta du Sénégal. La circulation d'alizé se révèle "tyrannique" à Saint-Louis : la rose des vents indique que la station est sous la domination principale des flux de direction nord, pendant 80 % de l'année (WANE, 1977). Pendant cette saison, les HP boréales atteignent leur position la plus méridionale (l'anticyclone des Açores migre entre 25° en janvier et 40° N en juillet) et sont soudées entre elles ; dans l'hémisphère sud, l'anticyclone de Ste Hélène est décalé vers le sud-est. Ce vent stable est la plupart du temps frais et humide ; mais il n'engendre pas de précipitations, car sa structure verticale s'oppose au développement de formations nuageuses. Il vaut à une bande côtière, large d'environ 10 km, un climat doux, avec des températures peu élevées et d'importantes condensations atmosphériques. Au fur et à mesure de son cheminement sur le continent, et surtout à partir de février, l'anticyclone s'étale sur l'Afrique du Nord, l'alizé maritime se continentalise ; il se réchauffe et s'assèche amenant un vent chaud du nord-est sur le bassin du Sénégal. Celui-ci atteint cependant très rarement le littoral. Pendant toujours la saison sèche, un flux est-ouest issu des cellules des HP maghrébines se fait sentir sur tout le nord de l'Afrique Occidentale. Selon LEROUX (1973) "Ce grand flux est-ouest, initialement froid, évolue rapidement sur la face équatoriale de l'anticyclone en un flux d'air chaud instable, très sec et desséchant ; il se mêle et se confond avec l'alizé continentalisé et engendre l'harmattan. Ce vent soulève fréquemment sables et poussières qui, en partie déversés dans le fleuve, sont transportés en suspension.

b) La mousson

C'est un alizé dévié après son passage de l'Equateur géographique ; c'est le vent qui apporte généralement la pluie. A partir de juin-juillet, nous avons dans l'hémisphère sud un renforcement de l'anticyclone de Ste Hélène, qui constitue une ceinture continue avec les HP de l'Océan Indien sur toute cette partie de l'Afrique. Dans la partie nord du continent, l'anticyclone des Açores est décalé plus au nord, approximativement sur la Méditerranée. Il se creuse une zone de basses pressions au niveau du tropique du Cancer qui correspond à l'Equateur thermique. Les flux issus de l'anticyclone de Ste Hélène, maintenus au sud de l'Equateur géographique sont alors aspirés vers la zone des basses pressions. Ils sont chargés d'humidité, à cause de leur parcours océanique et changent de direction (de direction initiale SW-NW, ils s'orientent au NE) en traversant l'Equateur géographique à cause de la force de CORIOLIS. C'est ce vent humide qui selon LEROUX (1973) "acquiert les caractères dynamiques d'une véritable mousson, attiré par les dépressions thermiques sahariennes et soudanaises" et qui dispense l'essentiel des précipitations pendant cette saison. Les flux de mousson recouvrent progressivement tout l'Ouest africain. La totalité du bassin du Sénégal est recouverte dès juillet, mais la saison des pluies a déjà commencé fin mai-début juin dans le haut-bassin. Elle s'étale sur environ 5 mois, l'ensemble du bassin n'est dégagé de la couche de mousson que vers octobre.

c) Le Front InterTropical (F.I.T)

C'est la discontinuité principale du domaine intertropical : il correspond à l'axe de confluence des flux issus des deux hémisphères météorologiques. Il représente une zone de perturbation à la limite entre les alizés et les moussons dont le contact favorise des cheminées d'ascendance. Le F.I.T est animé de mouvements ascendants et descendants, dont les variations en latitude sont rythmées par les migrations de la dépression saharienne en liaison avec le mouvement apparent du soleil. En hiver les HP septentrionales, très puissantes, repoussent le F.I.T au niveau de 5° latitude Nord. Pendant la saison des pluies, l'anticyclone de Sainte-Hélène devient plus actif et repousse le F.I.T vers les dépressions soudanaises et sahéliennes, l'anticyclone des Açores est alors décalé plus au nord. Le F.I.T dans sa migration connaît une progression assez lente ; il atteint en août sa position nord soit 22° de latitude nord. L'itinéraire vers le sud-est est dû à l'affaiblissement de l'anticyclone de Ste-Hélène et au regain de dynamisme de l'anticyclone des Açores. La migration vers le sud s'effectue beaucoup plus rapidement. Le F.I.T met 6 mois pour aller de 5°-8° à 22° de latitude nord alors que le retour s'effectue pratiquement en deux-trois mois (dès novembre, il atteint sa position méridionale extrême).

d) Le front des alizés

C'est une discontinuité secondaire, au contact de l'alizé maritime et de l'alizé continentalisé. Dans le delta du Sénégal, nous connaissons cette situation entre janvier et mars-avril, entre les flux issus des Açores et ceux de la cellule maghrébine. Ce front est animé de déplacements latéraux suivant la puissance des deux flux ; cependant il n'engendre jamais de précipitations. Il déplace poussières et lithométéores, provoquant des brumes sèches sur le secteur littoral.

B - LES ELEMENTS DU CLIMAT

1. Les vents

Le bassin du Sénégal se trouve dans la zone de balancement des alizés. Des nuances sont introduites par la présence de l'Océan Atlantique à l'ouest et du continent à l'est avec l'influence des brises de terre ou de mer. Cependant, c'est le recul ou l'avancée des masses d'air sèches ou humides qui règle l'alternance des saisons arides et pluvieuses. Les vents sont de direction et de vitesse variables suivant les saisons.

Pendant la saison sèche, dans le haut-bassin et la vallée alluviale, le régime est exclusivement celui des alizés Q'alizé continentalisé et l'harmattan qui peuvent atteindre des vitesses comprises entre 7 et 14 m/s).

Le delta, où s'exercent les influences océaniques, connaît un régime différent, l'alizé maritime soufflant du nord et du nord-ouest. A la station de St-Louis (fig. n° 3), les flux issus du nord s'installent dès le mois d'octobre ; en revanche ceux du NW sont permanents pendant toute la saison sèche ; les vitesses sont modérées.

Une saison de transition s'intercale entre la fin de la saison sèche et le début de la saison pluvieuse. Les vents du NE et du NW s'installent dans le Sénégal inférieur, alors que dans le haut-bassin se manifestent déjà des vents d'ouest et du nord-ouest.

Au cours de la saison des pluies, le vent de mousson souffle sur l'ensemble du bassin du Sénégal. Les vents d'ouest et du sud-ouest circulent avec une vitesse faible et constante ; le pourcentage des jours calmes est élevé : 10 % à Saint-Louis, 35 % à Podor (O.M.V.S, 1980). Une période de transition pendant laquelle la mousson s'affaiblit et se retire progressivement s'intercale entre la fin de la saison des pluies et le début de la saison sèche.

Des vents locaux apportent des nuances dans le climat :

- dans le domaine continental, l'air surchauffé, très instable, peut s'élever en tourbillons emportant sables, poussières, etc. Des vents de sable sont courants en saison sèche, ils réduisent la visibilité de l'atmosphère (harmattan et brise de terre) ;
- dans le delta et les marges littorales se manifeste la brise de mer : vent diurne, léger et doux ; fréquent en début d'après-midi, il contribue à rafraîchir le climat.

2. Les températures de l'air

Le bassin du Sénégal se caractérise par des températures moyennes annuelles élevées. La zone littorale et le delta bénéficient de l'influence océanique et de la fraîcheur des alizés. A Saint-Louis, la température moyenne interannuelle est de 25° C (tableau n° 3 et fig. 4). La proximité de l'océan réduit considérablement l'amplitude thermique annuelle (6° 5' en moyenne de 1935 à 1965). Les amplitudes diurnes sont très importantes avec une variation du simple au double. Les températures s'élèvent en hivernage avec l'arrivée des masses d'air issues de l'anticyclone de Ste Hélène ; chaudes et humides, elles repoussent les alizés maritimes qui contribuaient à rafraîchir le climat.

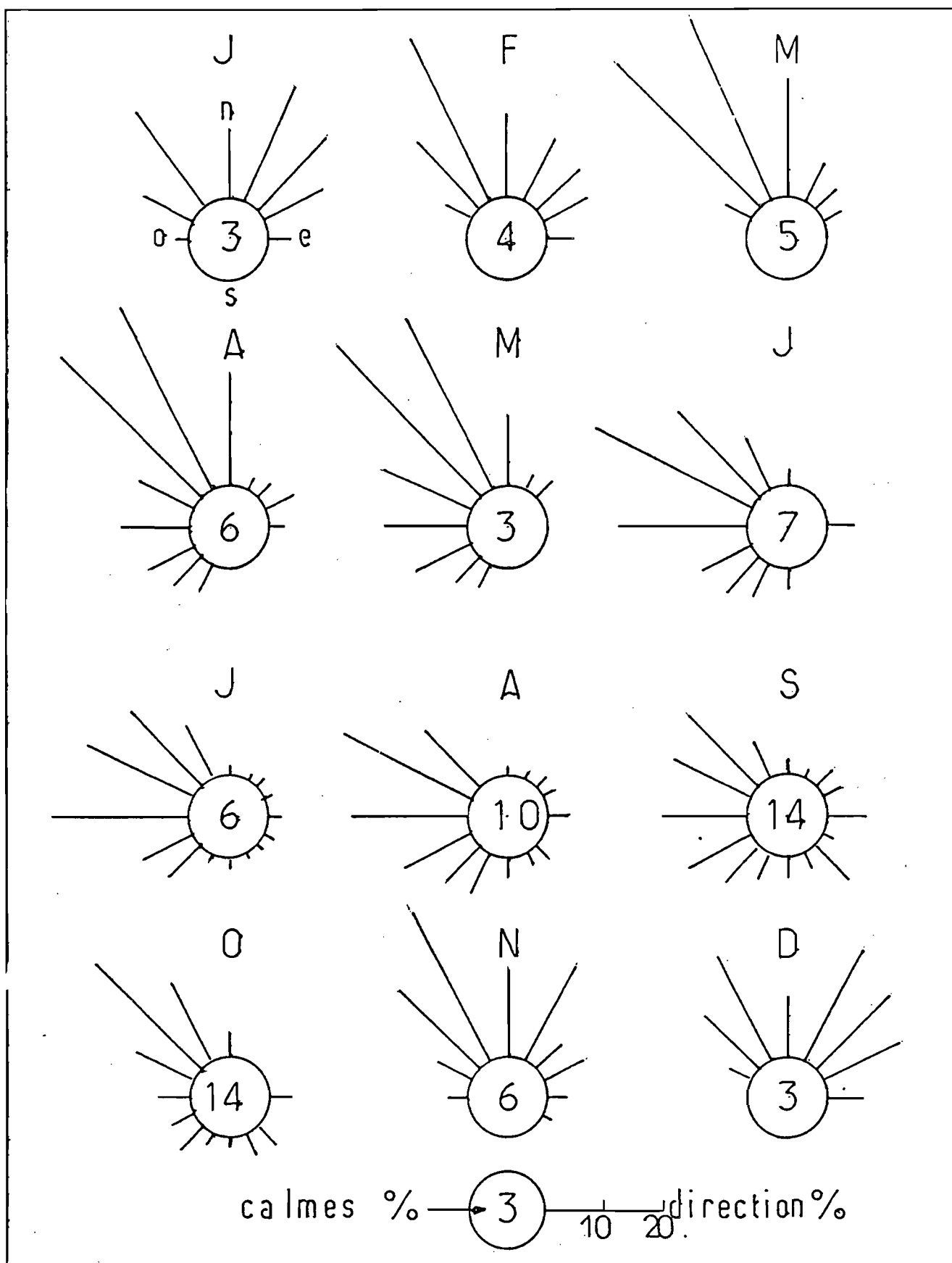
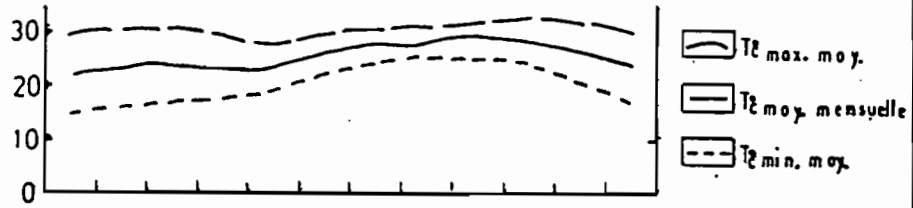
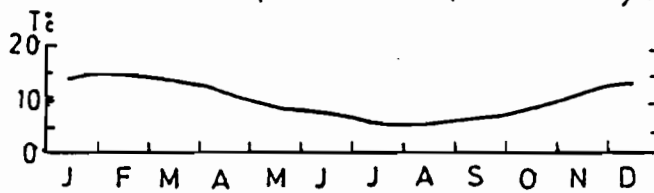


Fig. 3 - Directions des vents au sol à Saint-Louis

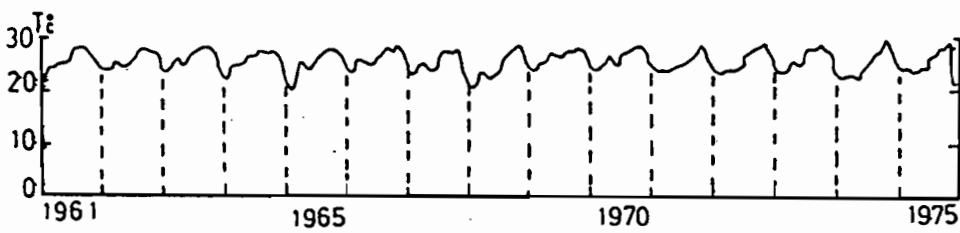
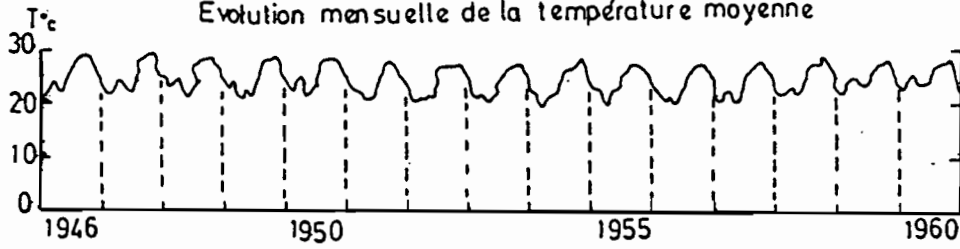
Normales des moyennes mensuelles des températures a St-Louis



Normale de l'amplitude thermique diurne moyenne



Evolution mensuelle de la température moyenne



Evolution annuelle de la température moyenne 1946-1975

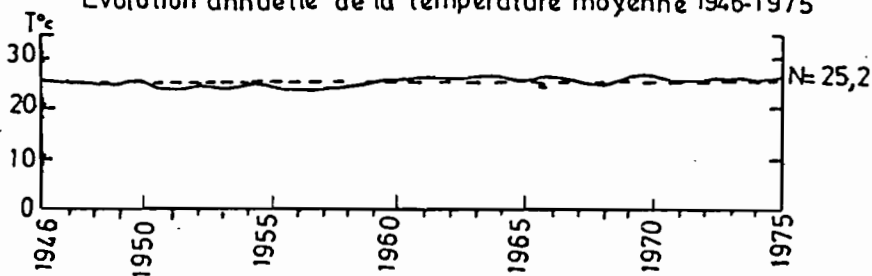


Figure 4 : Les températures de l'air à Saint-Louis (WANE, 1977).

Tableau n° 3 : TEMPERATURE MOYENNE A ST-LOUIS EN °C
(GUEYE, 1980)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
T X	28	29	28	26	26	29	31	31	32	31	30	29	29.3
T N	16	16	17	18	19	23	25	25	25	24	21	18	20.7
$\frac{TX + TN}{2}$	22	23	23	22	23	26	28	28	29	27	26	23	25

T X = Température maximale mensuelle
T N = Température minimale mensuelle
 $\frac{TX + TN}{2}$ = Température moyenne mensuelle.

Tableau 4 : CARACTERISTIQUE DES DIFFERENTS REGIMES THERMIQUES EN °C
(les chiffres entre parenthèses indiquent les mois)
Source : O.M.V.S

Station	T° Maximale		T° Minimale		Amplitude Diurne	
	Absolue	Minimale	Absolue	Minimale	Absolue	Minimale
St-Louis	32 (9)	26 (5)	16 (1-2)	27 (7-8)	13 (2)	6 (6-7-8)
Podor	41.07 (6)	31.38 (1)	15.06 (17)	25.16 (6)	18.20 (5)	11.71 (8)
Matam	42.79 (5)	34.22 (12)	18.87 (1)	27.47 (6)	20.17 (1)	9.79 (8)

A Saint-Louis, les températures maximales n'atteignent que très rarement 35° C. Cette valeur du maximum dépend de la hauteur zénithale du soleil et devait se produire à Saint-Louis en mai et en août ; mais du fait de la situation littorale de la station et de l'inertie thermique océanique, le maximum est décalé de 2 mois (WANE, 1977). Les fortes précipitations du mois d'août, l'importante couverture nuageuse réduisent l'insolation ; le maximum est décalé en septembre et en octobre. Il y a un maximum secondaire en février ou mars.

La courbe des températures minimales moyennes mensuelles (fig. 4) est unimodale avec le maximum de septembre (25° C) et le minimum de janvier (16° C), lié à l'influence de l'Océan (l'inertie continentale est courte).

L'amplitude thermique diurne présente le maximum en janvier (14° 2) et le minimum en juillet-août (5° 8 et 6°). Le maximum est élevé car janvier a les journées chaudes mais aussi les nuits les plus froides ; ce mois correspond au cœur de l'hiver boréal et l'alizé est faiblement continentalisé. La station de Saint-Louis a un régime thermique d'alizé maritime avec quelques influences continentales.

Le reste du bassin offre des régimes thermiques différents. Dans la moyenne vallée, les effets de la continentalité font subir leur influence ; les températures commencent à s'élever.

Ex : Podor : températures moyennes annuelles : minima 21° 09 C max : 36° 50 C
Matam : " " : minima 22° 07 C max : 37° 09 C.

Les contrastes diurnes sont également plus accusés (Podor : 9° 7 C ; Matam : 9° 4 C), les plus forts écarts thermiques correspondent à la saison sèche où les journées sont torrides et les nuits froides. Dans le haut-bassin, en amont de Bakel, les effets de la latitude et de la continentalité sont modifiés par l'importante couverture nuageuse, les températures cependant restent élevées.

3. Les précipitations

Les pluies, pour l'essentiel, tombent pendant l'hivernage ; celles qui se déversent pendant la saison sèche sont extrêmement faibles. Le delta situé aux confins de la zone sahélienne connaît des conditions d'alimentation pluviométrique très peu favorable ; la région est toute entière située entre les isohyètes 300 mm au nord et 400 mm au sud (fig. 5).

Dans le delta du Sénégal, le régime des précipitations se caractérise par une diminution de leur intensité et de leur durée du sud au nord et par une grande variabilité interannuelle.

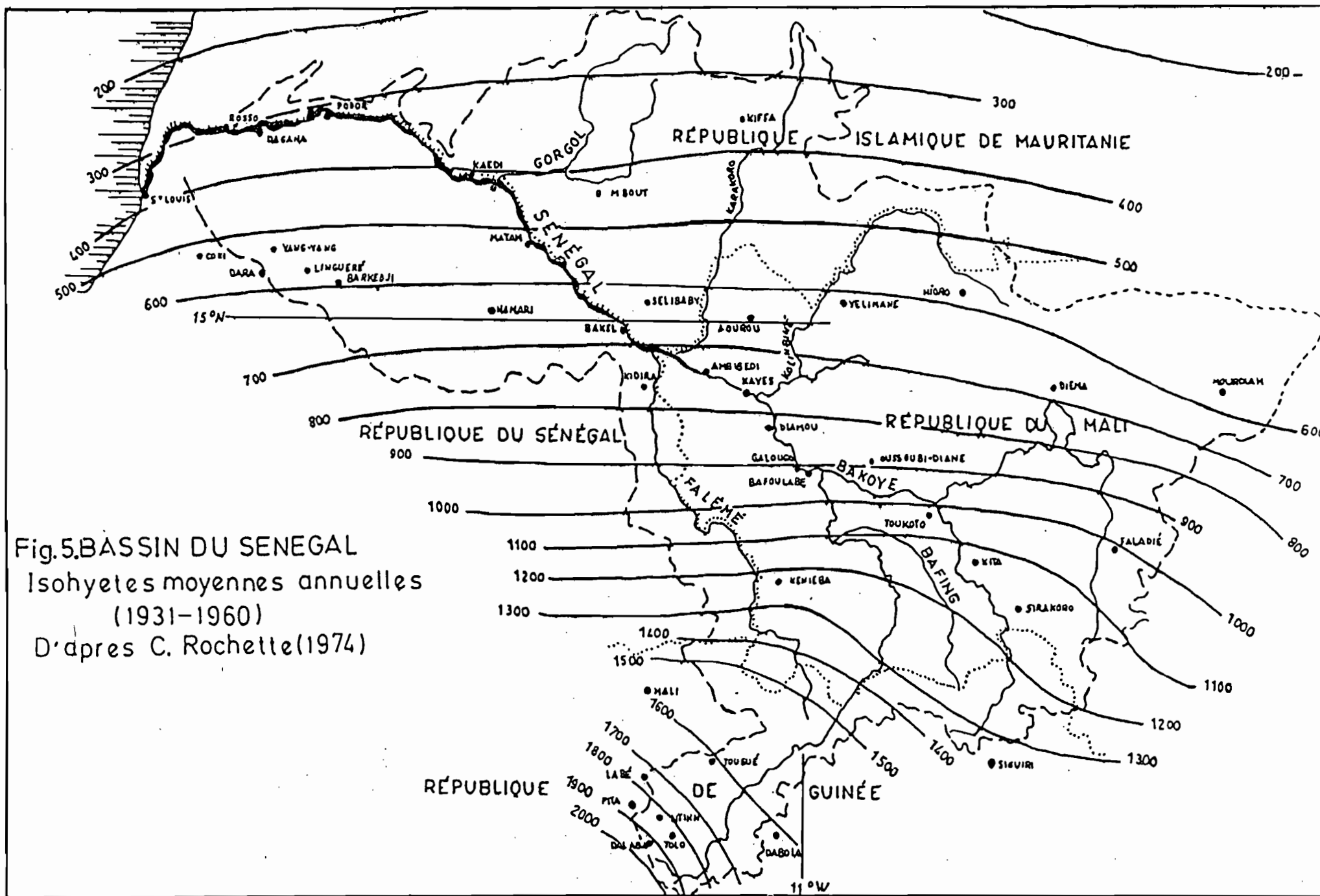


Fig.5.BASSIN DU SENEGAL
Isohyetes moyennes annuelles
(1931-1960)
D'apres C. Rochette(1974)

a) Diminution des pluies du sud au nord

Aux mois d'avril-mai, les premières pluies apparaissent sur le haut-bassin dans le massif du Fouta-Djalon. En juin, Bakel et Kayes enregistrent à leur tour des précipitations assurées par des lignes de grain. Au mois de juillet, l'ensemble du pays connaît la situation d'hivernage, y compris le littoral saint-louisien qui demeure en grande partie sous la domination des flux d'alizés issus de l'anticyclone des Açores. Cette situation se traduit par des lignes de grain isolées qui peuvent apporter la pluie. Le maximum des précipitations se situe en août-septembre ; le mois d'octobre est marqué par une baisse brutale des hauteurs de pluie à cause du renforcement des effets anticycloniques mais également du retrait rapide des vecteurs de pluie.

Les précipitations persistent davantage au sud qu'au nord (Saint-Louis a 5 mois de pluie ; Podor 5 mois de pluie ; Bakel 6 à 7 mois de pluie, etc.) ; elles varient en moyenne de 495 mm à Bakel à 355 mm à Saint-Louis avec la persistance de la sécheresse, et il s'établit un véritable "gradient pluviométrique" tout le long de la vallée du fleuve Sénégal.

b) Analyse des précipitations à la station de Saint-Louis

- Variations interannuelles :

Les données rassemblées ici sont tirées des travaux de OLIVRY (1982) à la station de Saint-Louis pour laquelle "on dispose de la plus longue série chronologique d'observations des précipitations au Sénégal et en Afrique de l'Ouest" (tableau 5)(1).

"Cette série commence en 1854, comprend quelques lacunes et est malheureusement interrompue dans les années 1880. Elle reprend de manière continue de 1892 à nos jours."

Périodes d'abondances et de sécheresses alternent sur le bassin du Sénégal et montrent que la notion de moyenne annuelle n'a pas une grande signification ; ainsi l'écart entre l'année la plus pluvieuse pour la station de Saint-Louis 674,9 mm en 1912 (en dehors des années aux valeurs douteuses) et l'année la plus déficitaire 102,3 mm en 1977 est de loin supérieur à la normale (335 mm).

La figure 6 (OLIVRY, 1982) donne le report des hauteurs de précipitations depuis 1892. L'évolution de la pluviométrie et les moyennes mobiles montrent une très grande irrégularité dans la distribution des précipitations. La courbe de OLIVRY montre plusieurs séquences humides et sèches :

- . 1854-1891 : la période est globalement humide avec une moyenne autour de 400 mm (les minimums se situent en 1863 avec 141 mm et 1872 avec 188 mm).
- . Les 20 années suivantes sont assez fluctuantes avec une moyenne annuelle de 330-350 mm de précipitation mais avec des séquences sèches en 1913 et 1914 où les pluies tombent au niveau des 150 mm par an.
- . 1916-1930 : la séquence est humide. Après cette séquence humide, on enregistre une diminution relative des précipitations avec une alternance de phases humides et sèches.
- . Jusqu'en 1942, c'est une phase décroissante de la pluviométrie.
- . De 1943 à 1955, correspond à une période de pluviométrie abondante.
- . Une série brève de décroissance s'installe vers le début des années 60, mais vers la fin de cette décennie une phase ascendante se met en place.
- . La période actuelle se caractérise par un déficit pluviométrique sévère et persistant.

Il faut souligner que les périodes humides signalées s'inscrivent dans une baisse généralisée des précipitations. D'ailleurs, depuis 1968, la règle générale est à la dégradation climatique, et ces années "insolites" parce que humides ne sont que des exceptions au sein d'un "train d'années sèches". La sécheresse, que nous analyserons ultérieurement, qui se singularise aujourd'hui par sa persistance, son extension spatiale et sa gravité est une succession de forts déficits pluviométriques observés sur une échelle de temps relativement longue (plusieurs années consécutives) présentant des "pics" tels en 1972, en 1982, etc.

- Analyse de la normale pluviométrique :

Etablie sur 30 ans (1946-1975), elle montre une inégale répartition des précipitations au cours de l'année. Le mois de juin est pluvieux 2 années sur 3 à Saint-Louis ; en 30 ans la station n'a enregistré durant ce mois que 208,7 mm, soit une moyenne de 7 mm. Le mois de juillet enregistre des pluies pendant toutes les années. Le seul mois d'août concentre les 2/5 des pluies (40 %) ; il est humide, avec un maximum enregistré en 1949 (290,2 mm) et le minimum en 1972 (33 mm). Septembre est le 2ème mois le plus pluvieux ; le maximum a été observé en 1957 avec 297,8 (maximum absolu de la station) et le minimum en 1971 avec 17,5 mm. Les mois d'août et de septembre totalisent près de 70 % des pluies, juillet-août-septembre près de 85 % du total.

(1) : Dans le texte de OLIVRY, la série qui est donnée pour Saint-Louis correspond en fait à 3 postes (Saint-Louis Ecole, Saint-Louis Ville, Saint-Louis aéro) ; l'homogénéité de l'échantillon n'est pas démontrée.

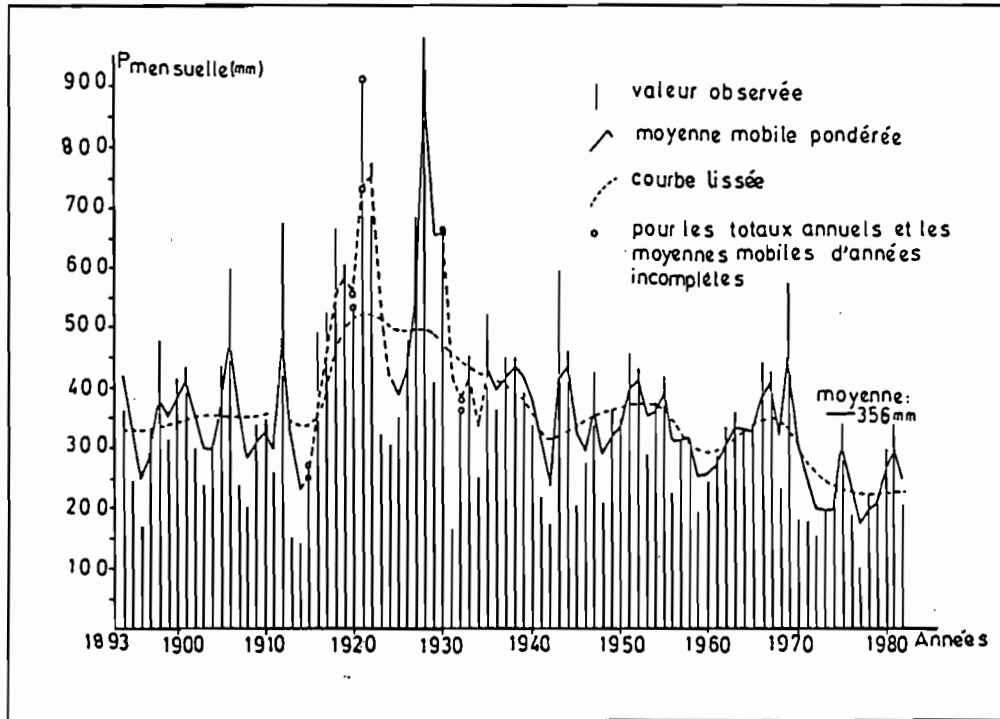


Figure 6 : Pluviométrie et moyennes mobiles annuelles à Saint-Louis (OLIVRY, 1983).

PLUVIOMETRIE ANNUELLE A SAINT-LOUIS (selon OLIVRY, 1982)

Tableau 5

République du Sénégal

Année	P (mm)	Année	P (mm)	Année	P (mm)	Année	P (mm)	Année	P (mm)	Année	P (mm)
1854	575	1876	608	1898	478.1	1919	604.6	1940	334.2	1961	283.9
1855	298	1877	314	1899	315.5	1920	532.2	1941	218.7	1962	331.8
1856	335	1878	286	1900	415.4	1921	(905.4)	1942	173.5	1963	358.7
1857	268	1879	424	1901	434.7	1922	769.5	1943	592.7	1964	328.0
1858	459	1880	572	1902	301.3	1923	320.1	1944	459.2	1965	323.4
1859	816	1881	667	1903	238.0	1924	304.9	1945	206.4	1966	438.6
1860		1882	392	1904	298.1	1925	347.9	1946	274.8	1967	415.6
1861	293	1883		1905	437.6	1926	477.0	1947	424.5	1968	233.4
1862	558	1884		1906	595.5	1927	685.8	1948	209.1	1969	531.0
1863	141	1885		1907	237.7	1928	(1239.4)	1949	357.2	1970	179.9
1864	403	1886		1908	203.2	1929	406.1	1950	345.0	1971	177.0
1865	343	1887	554	1909	338.6	1930	662.9	1951	455.5	1972	152.1
1866	331	1888	250	1910	343.5	1931	164.3	1952	427.3	1973	190.1
1867	390	1889		1911	261.0	1932	351.7	1953	288.7	1974	196.2
1868	304	1890	254	1912	674.9	1933	450.2	1954	373.5	1975	389.4
1869	649	1891	336	1913	150.1	1934	251.0	1955	416.2	1976	186.6
1870	511	1892	385.1	1914	143.7	1935	521.6	1956	225.0	1977	102.3
1871		1893	553.0	1915	278	1936	361.8	1957	310.9	1978	220.9
1872	188	1894	363.3	1916	493.0	1937	449.4	1958	317.1	1979	220.5
1873	330	1895	248.4	1917	524.0	1938	449.5	1959	192.5	1980	294.3
1874	605	1896	169.3	1918	663.5	1939	390.2	1960	259.6	1981	335.2
1875	450	1897	330.1							1982	200

N.B. : - en roma, relevés anciens en millimètres entiers ;
- en italiques, relevés d'années incomplètes ;
- entre parenthèses, valeurs douteuses.

La saison sèche n'est pas absolument sans eau. Sur le littoral, les condensations sont fréquentes ; des quantités négligeables sont recueillies en mars et avril appelées pluies de "Heug" ou de "mangues" ou encore "pluies de contre-saison". Ces pluies sont des manifestations du domaine polaire qui, selon SECK (1962), apparaissent "comme un écho assourdi des perturbations atmosphériques hivernales des régions tempérées qui envoient de l'air dans les basses latitudes."

- Précipitations moyennes mensuelles

Les pluies sont très concentrées dans le temps (tableau 6) pendant l'hivernage (août-septembre). Les précipitations à Saint-Louis sont liées aux perturbations de lignes de grain qui prennent croissance dans la zone du Lac Tchad et celle située à l'ouest de la boucle du Niger. A partir du mois d'octobre, les formations nuageuses donnent des pluies fines, ce qui marque la fin de l'hivernage.

Tableau 6 : PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLES
(1949 - 1978)

Stations	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	An
Podor	0.8	2.2	0.3	0.4	1.5	15.4	55.2	92.3	90.5	26.7	0.7	1.9	287.9
Matam	0.4	1.1	0.0	1.3	2.7	34.6	110.5	156.7	116.7	26.5	3.6	1.1	455.7
St-Louis	1.1	1.2	0.1	0.1	0.8	7.3	43.2	117.2	93.1	35.6	1.2	2.2	303.1
Bakel	0.3	0.5	0.1	0.4	5.3	48.4	123.0	156.0	127.1	33.0	3.9	2.0	500
Mamou	5.1	5.8	35.4	86.5	182.1	212.6	332.1	419.7	367.2	233.7	61.5	14.9	1956.6

La station de Mamou, contrôlée depuis 1922 sans omission, enregistre d'importantes pluies de par sa position dans le domaine guinéen.

En saison sèche, les orages sont bloqués, ils ne peuvent se développer car l'épaisseur de mousson est très faible ; les nuages sont cisailés par l'importante couche d'alizé sec qui surmonte la mousson. Les pluies faibles avec le maximum secondaire de février résultent des incursions d'air polaire.

En conclusion, on peut dire que St Louis est sous la mouvance directe des lignes de grains ; "St-Louis est donc une station où les orages organisés (ou lignes de grain) se désorganisent pendant la saison sèche, alors que la saison pluvieuse est essentiellement orageuse." (WANE, 1977).

4. Les autres éléments du climat

D'autres paramètres climatiques entrent en ligne de compte dans le bilan de l'eau : il s'agit de la durée d'insolation, de l'humidité relative et de l'évapotranspiration.

Tableau 7 : INSOLATION - HUMIDITE RELATIVE ET EVAPORATION MOYENNE A ST LOUIS

INSOLATION EN HEURE - DUREE MENSUELLE ET ANNUELLE ET MOYENNE JOURNALIERE

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Saint-Louis	216	220	283	289	280	242	230	221	225	237	233	213	2 889
	7	8	9	9	9	8	7	7	7	8	8	7	8
Humidité relative en % maxima et minima journalier (Ux, Un)													
Saint-Louis	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Ux	82	88	91	93	95	94	91	92	91	91	87	83	90
Un	36	45	51	61	73	76	74	73	70	62	48	39	59
Evaporation moyenne journalière (Piche en mm) de 1949 à 1978 par SECK - 1981													
Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
													Moy. Total
Saint-Louis	7.3	7.1	6.5	5.4	4.3	3.9	3.9	3.6	3.4	4.1	5.7	6.6	5.1 1879.6
Podor	7.0	8.2	9.9	11.4	12.0	10.3	7.4	5.2	4.4	6.0	6.5	6.2	7.9 2866.6
Matam	8.6	10.1	11.6	12.9	13.2	12.1	7.7	5.1	4.4	6.4	7.6	7.6	8.9 3264.7

Le tabl. 7 rassemble les données moyennes sur la durée de l'insolation, l'humidité relative et l'importance du phénomène d'évaporation.

a) L'insolation

Le début de l'insolation se situe généralement vers 7 heures, la durée moyenne journalière est égale ou supérieure à 7. Le nombre d'heures d'insolation montre au cours de l'année un minimum en janvier-février et un maximum de mars-avril-mai. La progression annuelle montre un minimum secondaire en août par suite de la forte couverture nuageuse et un maximum secondaire en octobre-novembre. La station de Saint-Louis totalise environ 3 000 heures d'insolation ; la durée de l'insolation augmente dans les stations plus continentales.

b) L'humidité relative

Elle est étroitement liée aux régimes pluviométriques et thermiques. L'évolution générale de l'humidité relative est liée à la station de St-Louis aux masses d'air et à leur déplacement et elle est influencée par la proximité de l'Océan. Le minimum de décembre-janvier montre que la station est sous la domination de vent du nord-est continentalisé qui renferme peu d'humidité. Le maximum se situe en août-septembre et avoisine 90 % (abondance des pluies et présence de la mousson). Néanmoins, la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère reste élevée durant toute l'année, le minimum de décembre-janvier reste élevé (54-59 %) pour une normale d'environ 65 %. St-Louis baigne en permanence dans un air humide et cette humidité constante favorise les condensations (rosée, brouillard, brume, etc.).

c) L'évaporation

D'une manière générale, l'évaporation est minimale pendant la saison des pluies (importante couverture nuageuse, humidité de l'air élevée correspondant à une pénétration maximale de la mousson, baisse des températures, insolation très faible). La tranche d'eau évaporée est importante : 1 879 mm à St-Louis, 3 264 mm à Matam. La région du delta connaît la plus faible évaporation de tout le bassin à cause des températures plus fraîches qui règnent sur le littoral. L'évaporation augmente et décroît en sens inverse des précipitations : ainsi le maximum pluviométrique d'août (117,2 mm) correspond au minimum du taux d'évaporation (3,6 mm en moyenne par jour). Le taux d'évaporation est également fonction de la température et du degré d'humidité de l'air : l'évaporation est maximale au coeur de la saison sèche quand l'insolation est importante, les précipitations inexistantes, l'air froid et sec (janvier le mois le plus froid de l'année enregistre une des plus fortes évaporations : 7,3 mm/jour), tandis que le maximum thermique de septembre (32° C) correspond à une évaporation minimale (3,4 mm/jour).

d) Le bilan de l'eau

Le bilan de l'eau découle des valeurs relatives des précipitations et de l'évaporation, ou plus exactement de l'évapotranspiration dont les valeurs moyennes mensuelles et annuelles figurent dans le tableau 8.

Tableau 8 : EVAPOTRANSPIRATION - VALEUR MENSUELLE EN mm
SECK (1981)

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Podor	138	166	203	203	243	238	217	189	173	176	144	133	2223
Saint-Louis	151	154	198	183	181	175	185	172	162	167	152	145	2025
Richard-Toll	132	160	223	260	260	277	224	182	168	178	170	134	2368
Matam	125	149	176	186	240	216	197	169	156	164	128	115	2021

Ce bilan de l'eau est négatif dans tout le delta et même dans la vallée car partout la normale pluviométrique est inférieure, et de loin d'ailleurs, à la normale de l'évaporation. A la station de Saint-Louis, pour une normale pluviométrique d'environ 335 mm, l'évaporation se situe entre 1 895 mm et 2 025 mm. Les variations en cours d'année montrent que le bilan hydrique est déficitaire : seul le mois d'août enregistre quelques années positives mais, avec la persistance de la sécheresse, connaît une tendance négative. Le déficit est peu important en septembre mais tous les autres mois de l'année sont déficitaires avec un maximum en janvier (supérieur à 150 mm).

CONCLUSION

La pluviométrie détermine le type de climat dans le bassin du Sénégal ; on distingue plusieurs régions climatiques :

- le domaine climatique tropical de transition, limité par l'isohyète 1 500 mm, couvre tout le haut-bassin jusqu'à Daikha-Saïdou.
- Le domaine climatique tropical pur entre les isohyètes 150 mm et 750 mm ; intéresse surtout la vallée alluviale du Sénégal.

- Le domaine sahélien, avec 750 mm de pluie par an. Ce domaine s'étend sur le reste du bassin à l'exception de la zone littorale.
- Le climat subcanarien ou cap-verdien : de P. MORAL (1965) est limité à la frange côtière. Ce climat se caractérise par une prolongation de la saison fraîche jusqu'en mai-juin. Saint-Louis bénéficie ainsi d'un microclimat tout à fait particulier : situé dans le domaine sahélien par sa pluviométrie, la station appartient en définitive au domaine bioclimatique subcanarien caractérisé par l'alizé maritime stable.

Les conditions climatiques sur l'ensemble du bassin versant sont sévères avec une dégradation du sud au nord et une importante irrégularité interannuelle. L'accentuation de l'aridité depuis une quinzaine d'années oppose de plus en plus une longue saison sèche et froide à une courte saison pluvieuse chaude avec des précipitations à caractère orageux.

III - GÉOLOGIE ET GÉOMORPHOLOGIE

Le bassin du Sénégal se rattache aux vieilles plateformes (fig. 7). Elles datent de l'Antécambrien (3,5 milliards à 500 000 000 d'années) et couvrent plusieurs cycles de métamorphismes et plusieurs phases orogéniques. On distingue :

- la plateforme ouest-africaine qui affleure dans la partie méridionale (Sénégal-Oriental, Guinée, Haute-Volta, etc.),
- la plateforme saharienne qui affleure en Mauritanie, au Mali, au Niger.

Elles sont constituées de roches sédimentaires très anciennes, plissées, injectées de granite et métamorphisées. Le socle antécambrien est recouvert en discordance par trois formations plus récentes : les grès du Paléozoïque, les formations détritiques du Secondaire et du Tertiaire et les sédiments quaternaires.

A - LES FORMATIONS DU PALEOZOIQUE

Essentiellement gréseuses, elles affleurent dans le bassin du Sénégal, dans le Fouta-Djalou, dans les pays de la Falémé. Les séries s'échelonnent de l'Infra-cambrien au Carbonifère. Ce socle précambrien est recouvert par des formations sédimentaires très anciennes qui sont traversées à plusieurs endroits par des intrusions granitiques. Ces séries du Paléozoïque sont pénéplanisées et débitées en massifs faisant place à des plateaux (ex : le Fouta-Djalou).

B - LES DEPOTS DETRITIQUES DU SECONDAIRE ET DU TERTIAIRE

A la fin du Paléozoïque, se sont mises en place les séries détritiques du Continental intercalaire en bordure des régions montagneuses ; le faciès dominant est le grès grossier. A cette même période, à la suite d'affaissements et de soulèvements consécutifs aux mouvements épirogéniques, des transgressions se produisent ; il se forme deux grands bassins sédimentaires :

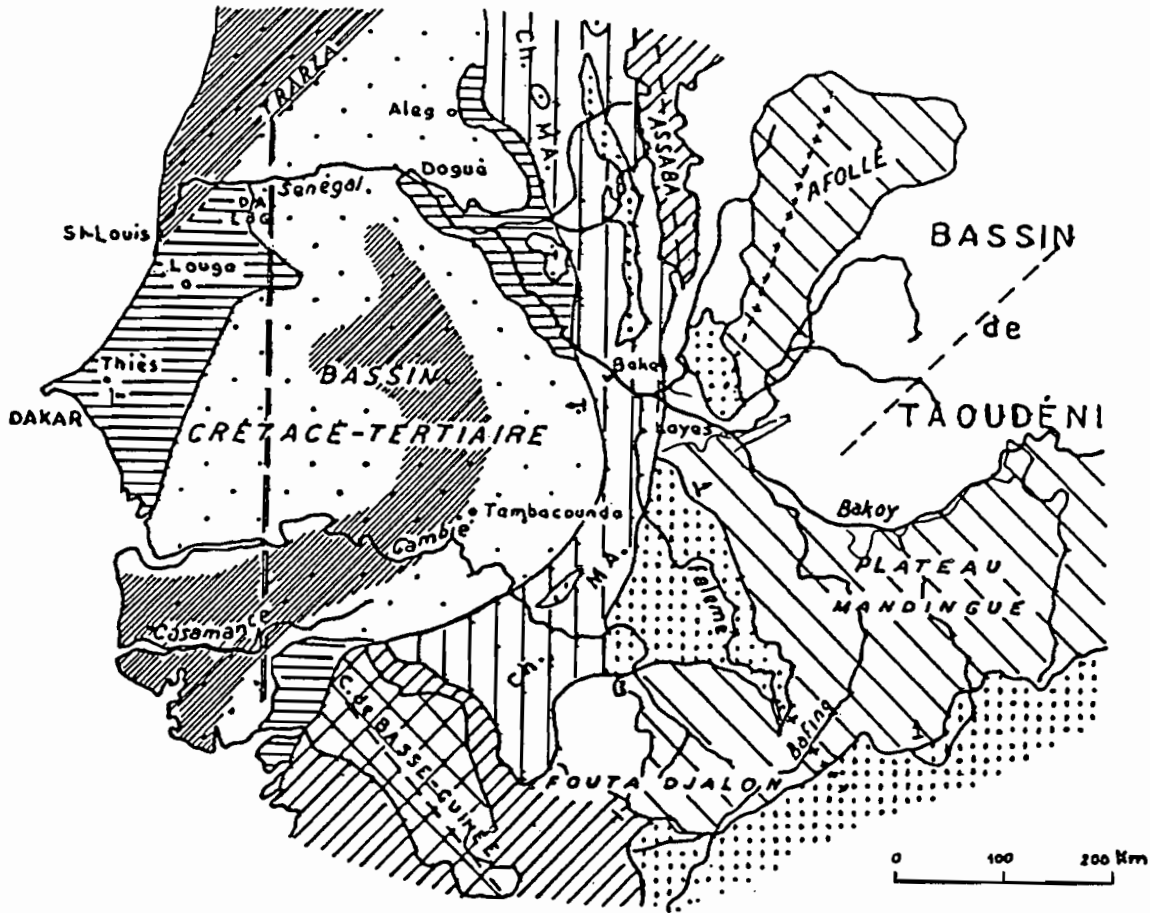
- à l'est : depuis l'est du Mali jusqu'au Niger central,
- à l'ouest : le bassin sédimentaire sénégal-mauritanien, dans lequel s'écoule le Sénégal dans son cours inférieur et moyen.

1. Le Secondaire

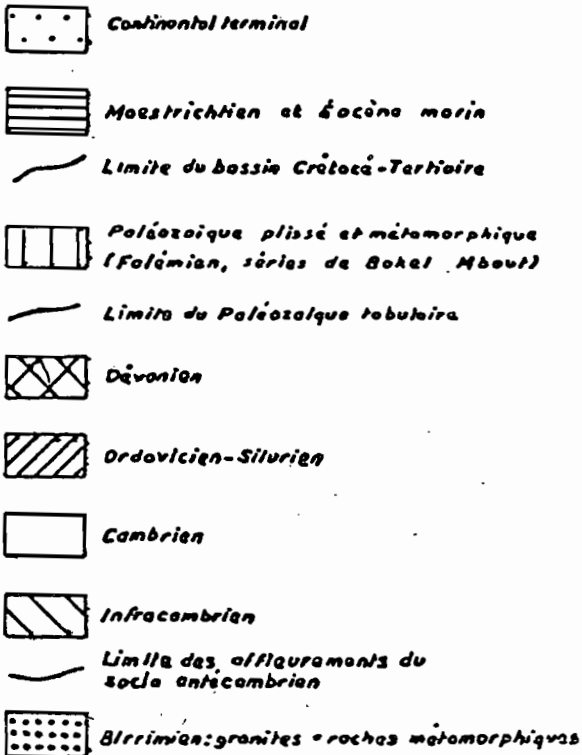
Le Secondaire est représenté par des sédiments sableux ou gréseux pour le Jurassique supérieur, ensuite par des argiles, des marnes et des calcaires. Près de Dagana, il est très proche de la surface par le jeu de l'Anticlinal de Guiera.

2. Le Tertiaire

Le Paléocène marin et transgressif est représenté dans le delta par des marnes, des grès calcaires et des calcaires coquilliers d'une trentaine de mètres d'épaisseur à l'est de Rosso (AUDIBERT, 1970). A l'Eocène inférieur, le faciès est marneux : les couches sont épaisses de 200 m à Saint-Louis, 30 m à Rosso et affleurent sur les berges du lac de Guiera. L'Eocène moyen rencontré à l'ouest du delta, d'une épaisseur de 200 m, est composé de calcaires marneux et de marnes. L'existence de l'Eocène supérieur est hypothétique. Dans les sondages de Saint-Louis (voir fig 8), un faciès marneux et calcaire de 60 m de puissance a été trouvé. A la fin de l'Eocène moyen, la régression s'amorce ; par érosion une nouvelle nappe détritique se met en place, elle s'est sédimentée dans les parties déprimées et couvre indifféremment les formations du Paléozoïque et les formations marines de l'Eocène. Ces sédiments (sables, grès argileux et argiles) couvrent le bassin sédimentaire et constituent la nappe détritique du Continental Terminal.



STRATIGRAPHIE



TECTONIQUE

BASSIN CRÉTACÉ-TERTIAIRE

DA.L.G. Dorsale anticlinale du Lac de Guié

Zone d'effaissement post-éocène

Ligne de flexure du substratum préjurassique

MOUVEMENTS HERCINIENS

Déformation des séries de couverture du socle

GRANDES UNITÉS TECTONIQUES

— — — axe des cuvettes

+ + + zone anticlinale

ACCIDENTS SECONDAIRES

— — — axe synclinal

+ + + axe anticlinal

PLISSEMENT

Ch.M.A. Chaine des Mauritanides

→ direction de pendage des couches

Figure 7 : Croquis structural des bassins versants du Sénégal, de la Gambie et de la Casamance (MICHEL, 1973).

Figure 8 : Sondages à St-Louis (AUDIBERT, 1970).

SONDAGE N°1		
Niveau	Nature du Sol	
(0.00)		
- 2.18		
- 5.18		Détritus de bois et briques
- 6.18		Détritus, des pierres et galets
- 6.30		Sable fin gris vaseux
- 7.10		Coquilles grossières avec sables
- 8.10		Sable gris vaseux coquille
- 10.00		Sable gris avec fragments de coquilles
- 11.30		Sable gris compact
- 14.10		Vase noir plastique
- 14.25		Morceaux de roches noires de sable
- 15.25		Agglomération de coquilles avec sable blanc
- 16.45		Sable blanc compact
- 17.30		Agglomération de coquilles (assez dure)

SONDAGE N°2		
Niveau	Nature du Sol	
(0.00)		
- 2.10		
- 12.55		Sable gris compact
- 16.50		Vase noir plastique
- 16.55		Coquilles fines grises noires et sables
- 17.55		Ardoises avec grès compacts et très durs
- 18.50		Sable gris vaseux compact
- 20.50		Banc de roche

SONDAGE N°3		
Niveau	Nature du Sol	
(0.00)		
- 11.00		
- 12.00		Vase noir plastique
- 12.50		Coquilles roulées de grès et de sable
- 13.25		Roche dure compacte

SONDAGE N°4		
Niveau	Nature du Sol	
(0.00)		
- 6.25		Vase noir plastique
- 7.00		Sable gris vaseux coquille
- 10.16		Vase noir plastique
- 11.10		Coquilles compactes dures
- 12.05		Sable gris compact à coquilles
- 12.10		Sable gris compact à coquilles
- 12.25		Sable gris compact à coquilles
- 12.50		Sable gris compact à coquilles
- 13.25		Sable gris compact à coquilles
- 14.25		Sable gris compact un peu de coquilles

SONDAGE N°5		
Niveau	Nature du Sol	
(0.00)		
- 0.00		Sable gris blanchâtre et vaseux
- 2.10		Vase noir plastique
- 8.00		Sable noir plastique
- 15.25		Vase noir plastique
- 15.30		Grès jaunâtre coquilleux de sable
- 16.20		Grès sublimé résistant
- 16.15		Sable avec grès blanc compact
- 17.15		Cailloux avec grès roulés avec sable blanc
- 17.00		

C - LE QUATERNAIRE

L'évolution est beaucoup plus complexe au Quaternaire, avec la formation de dunes et l'édification de cordons littoraux. Dans l'ensemble, c'est un relief de pénéplaine, avec cependant des dépressions correspondant à des zones peu soulevées, régions affaissées que l'érosion différentielle a marquées.

Le delta appartenant au vaste bassin sédimentaire sénégal-mauritanien est géologiquement une zone de subsidence, qui s'enfonce au fur et à mesure que les dépôts sédimentaires s'y accumulent. Ceci s'explique par le fait que le delta repose sur un substratum faillé, soulevé dans la partie est en bordure du lac de Guiers.

Sur le plan géologique, le delta du Sénégal se caractérise par la rareté des affleurements des formations du Secondaire et du Tertiaire ennoyées sous les dépôts du Quaternaire qui se sont mis en place lors d'alternances successives de mouvements transgressifs et régressifs. Lors des variations du niveau marin engendrées par des changements climatiques et des mouvements épeirogéniques, le delta a vu ainsi se succéder des phases de dépôt et d'érosion.

1. Le Quaternaire ancien et moyen

L'évolution a été différente dans le haut-bassin et la basse vallée. Trois transgressions ont été identifiées, et sous l'effet de l'érosion des glacis se sont édifiés lors de climats secs tropicaux avec alternance de saison sèche et de saison humide. On rencontre trois glacis :

- le Haut-glacis se rencontre dans le cours supérieur du Sénégal : des lambeaux de conglomérat, de galets avec des grès quartzites persistent dans les pays de la moyenne Falémé et le Bakoye ;
- le Moyen-glacis apparaît dans la Falémé, en contrebas des principaux reliefs. Il est fréquent le long du cours moyen du Sénégal à partir de Bakel : atteint par un sondage à Boghé, il est constitué d'un conglomérat de grès et de débris de quartz ;
- le Bas-glacis est moins évolué que les autres par suite d'une altération moins importante : atteint par sondages à Ourosogui dans la moyenne vallée, il est essentiellement constitué par un gravier ferrugineux.

La cuirasse quaternaire existe en bordure du delta, notamment sur les rives du lac de Guiers et à l'est de Ross-Béthio : son démantèlement fournit d'importants amas de gravillons ferrugineux. Le Quaternaire ancien au cours de transgressions a connu des extensions très variables dans le delta :

- au Tafarien, se constitue un vaste golfe marin surtout en Mauritanie, il n'occupe qu'une zone très limitée dans le delta ;
- à l'Aoujien, les dépôts de la transgression marine n'affectent pas le delta du Sénégal ;
- à l'Inchirien, le climat devient humide ; il s'amorce une transgression marine qui est également très peu connue. Cette transgression s'est faite en deux épisodes :
 - L'Inchirien inférieur : les coupes indiquent un faciès marin, ce sont des sédiments sablo-argileux qui se déposent dans un vaste golfe qui se prolonge loin en Mauritanie. On estime qu'à cette époque, à la suite de mouvements tectoniques qui provoquent l'enfoncement du delta et du Trarza, le relèvement de l'Anticlinal de Guiers, la mer s'avance alors dans le golfe, le fleuve Sénégal en aval de Boghé se dirigeait vers le N-O et rejoignait l'Océan dans la région de Nouakchott.
 - L'Inchirien supérieur : après un retrait et une phase d'érosion, avec un changement de climat qui devient plus sec vers 40 000 B.P., le niveau de la mer s'élève à nouveau (période humide), mais sa pénétration vers l'intérieur est plus limitée. Il se dépose essentiellement des sédiments sableux évoluant en vase et gréseux dans la partie Est et Ouest du delta. C'est au cours de cette période, à la suite du rejeu de la flexure continentale, accompagné de failles, d'affaissements que le delta est devenu une immense lagune : le cours du fleuve par suite des mouvements tectoniques a été détourné vers le sud en occupant approximativement sa position actuelle.

2. Le Quaternaire récent

Il est plus connu et les dépôts sont très variés, voir figure 9. Les sédiments marins, le modelé du delta résultent des dernières oscillations climatiques, des variations du niveau marin et datent de la dernière transgression. Ces séries sédimentaires constituent l'ossature géologique de la région. Il faut signaler que dans la vallée du Sénégal, il y a eu une phase d'entaille du réseau hydrographique qui s'est produite au cours d'une régression marine : ce matériel grossier déposé constitue "la nappe alluviale des graviers sous berge" visible au moment des étiages importants dans le cours inférieur.

a) L'Ogolien (20 - 22 000 BP à 13 000 BP)

Le climat a évolué vers l'aride dans les dernières périodes du Quaternaire. Le niveau marin a baissé et la mer en se retirant a déposé des sédiments marins sableux. Les alizés continentaux mettent en place des ensembles dunaires depuis le sud de la Mauritanie, en passant par le nord du Sénégal jusqu'à

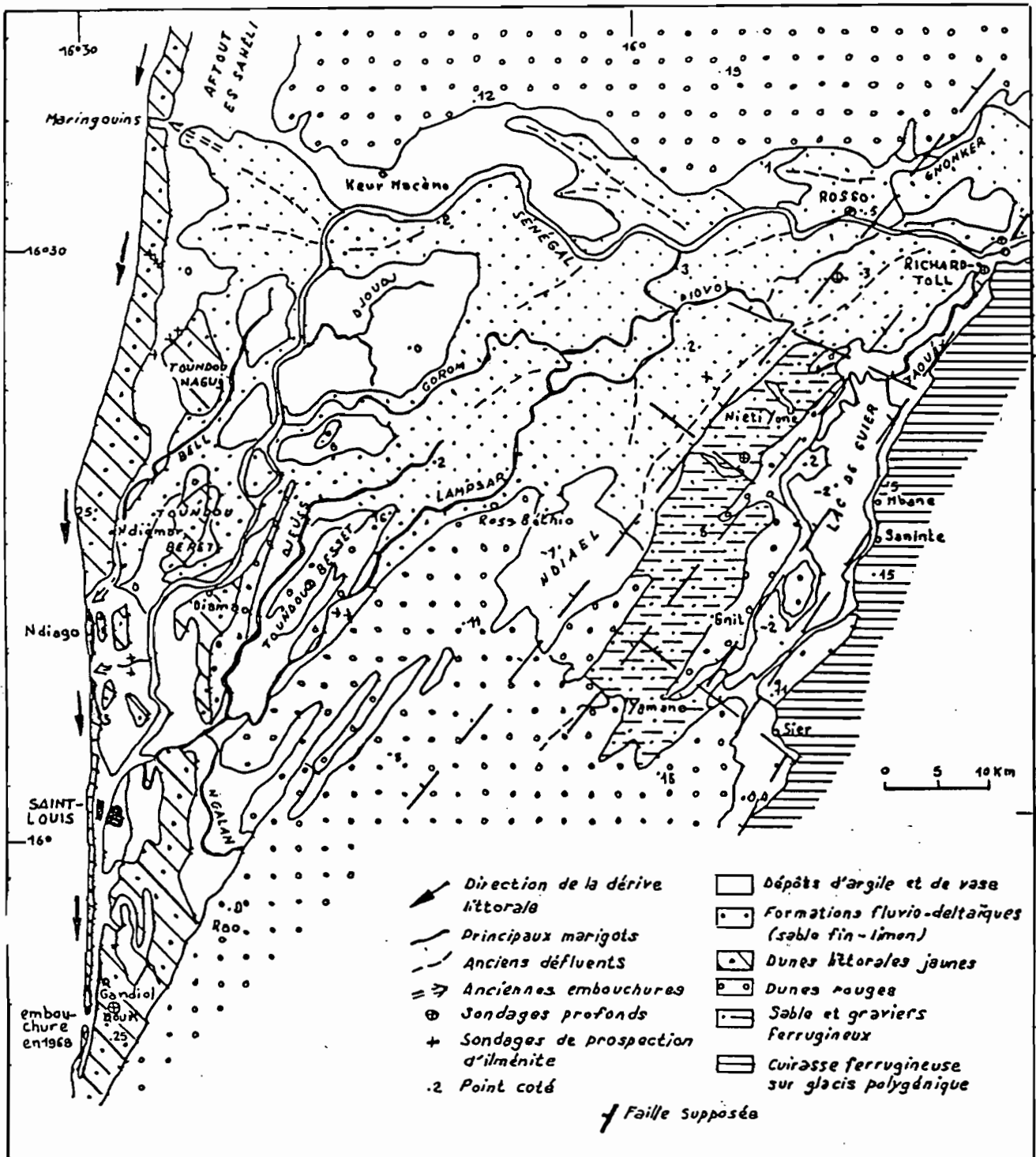


Figure 9 : Croquis géomorphologique et géologique du Delta du Sénégal.
D'après P. MICHEL (1969).

la latitude du Sine-Saloum. Ce sont de grandes dunes longitudinales orientées N-E-S-W selon la direction des vents dominants ; c'est à cette époque que se sont mis en place les ergs du Cayor et du Trarza. Dans la partie NE, en Mauritanie et dans le delta du Sénégal, ces dunes ont une direction confuse : dans l'ensemble orientées NNE-SSW, leur direction change localement sur le littoral. Ces dunes, longues de plusieurs dizaines de km, sont séparées par des couloirs interdunaires de largeur variable, "l'aspect général évoque celui d'une tôle ondulée." (TRICART, 1961). L'altitude des dunes est variable (de 10 à 30 m) mais s'atténue dans le sud-est du delta. Au maximum de l'aridité, le Sahara s'est étendu vers le sud. Les dunes ont barré le fleuve, à la hauteur de Kaédi dans la basse vallée. Selon MICHEL (1960) "Le fleuve devenu endoréique abandonne sa charge solide en amont, construisant le 1er remblai sablo-argileux" que l'on retrouve dans le lit majeur depuis le haut-bassin jusqu'à Kaédi. Tout le réseau hydrographique est barré (Gorgol, Ferlo, etc.), s'accompagnant d'un alluvionnement en amont. Il ne subsiste de ces dunes ogoliennes que quelques témoins au milieu de dépôts plus récents. Dans le delta, les dunes ne constituent plus que des reliefs résiduels, leurs formes sont éoussées progressivement par ablation du sable sur les sommets et colmatage des interdunes.

Les dunes ogoliennes sont constituées uniquement par du sable bien trié, de couleur rouge en surface, tirant sur l'orange en profondeur, d'où leur dénomination de "dunes rouges", TRICART (1954). Les dunes sont formées d'un sable homométrique, la granulométrie révèle un mode constant. Selon TRICART (1961), "le mode de tous les échantillons étudiés se situe entre 0,24 et 0,36 mm (tamis 70) et représente une médiane de 58 % de l'échantillon." Le sable est homogène et bien trié (50 % de fin et très fin, et 50 % de moyen et grossier), ce qui traduit un façonnement unique par le vent et l'absence de remaniement par l'eau.

Ces dunes rouges sont relativement fixées aujourd'hui, cependant les conditions climatiques assez sévères qui prévalent maintenant et les actions d'origine anthropique peuvent contribuer à les raviver en certains endroits, et à leur migration sous les processus éoliens.

b) Le Tchadien (10 000 BP à 6 800 BP)

Le climat devient plus humide, le niveau marin remonte. L'écoulement reprend dans la plupart des réseaux hydrographiques, qui réaménagent ainsi leurs cours à travers les sables dunaires. Cette nouvelle organisation du réseau hydrographique a été appelée la seconde phase d'entaille. Le Sénégal recrée son lit à travers les dunes ogoliennes pour rejoindre l'Océan dont le niveau monte progressivement ; la mer envahit toute la basse vallée.

Les dépôts sont connus essentiellement par sondages et se traduisent par la présence d'argiles au-dessus des sables de l'Ogolien. MONTEILLET (1977), lors de sondages effectués sur le Tchadien dans le delta du Sénégal, suggère l'existence de lagunes au cours de cet épisode. Les deux datations effectuées (lat 16° 29' 45" N, long 16° 17' W, altitude moins 23 m IGN) et (lat 16° 30' 15" N, long 16° 17' W, altitude moins 25,50 m IGN) ont donné respectivement les âges suivants : 8 870 ± 240 BP et 8 450 ± 220 BP. Ainsi les dépôts lacustres du Tchadien sont postérieurs aux formations sableuses de l'Ogolien et sont essentiellement des sables azoïques qui renferment des fragments de végétaux, des tourbes. Le Tchadien s'intercale dans la chronologie du Quaternaire entre l'Ogolien représenté par les sables et le Nouakchottien au caractère marin nettement tranché. En effet, le climat va devenir moins humide entre 8 000 et 6 800 BP ; cette phase sèche du Tchadien s'est traduite par un remaniement des formes dunaires.

c) Le Nouakchottien (6 800 BP à 4 200 BP)

Cette transgression culmine vers 5 500 BP ; à son maximum le niveau marin atteint la cote 2,5 m au-dessus du zéro actuel (I.G.N.). Le Nouakchottien a édifié un golfe sur le delta (voir fig. 10) et la basse vallée, créant une vaste ría dans le bas-Sénégal, "au maximum de la transgression, la mer a atteint Boghé qui se trouve à environ 250 km de la côte", d'après MICHEL (1957) dans la vallée du Sénégal. On connaît de multiples affleurements du Nouakchottien dans le delta ; les dépôts sont essentiellement des sables marins avec des intercalations de niveaux d'accumulation coquilliers (Anadara senilis, Dosinia isocardia, Cardium edule).

Durant cet épisode, les précipitations sont abondantes et le paysage de mangrove se développe jusqu'à Boghé. L'existence de certaines espèces fossiles tel que Tympanotus fuscatus, qui supportent de l'eau douce et des températures moyennes de l'ordre de 20° C, laisse supposer que les crues du Sénégal étaient importantes.

L'âge des coquilles prélevées en différents points s'échelonne autour de 5 500 BP : "Le Nouakchottien a été daté de 5 470 BP à 4 km au NW de Rao." La remontée du niveau marin s'est accompagnée d'une importante sédimentation de type marin ou lagunaire, surtout sableuse avec de grandes quantités de sédiments apportées par les houles du nord-ouest qui ont en même temps arasé les dunes rouges situées à l'ouest. Le matériel sableux des dunes rouges arasées a été repris par les eaux de la mer ; mélangé à une faune d'arche, déposé, il forme une terrasse dénommée "terrasse nouakchottienne" très développée entre Rao et Gandon sur 4 km de large pour 25 km de long.

Le matériel sableux de la terrasse est légèrement argileux et parfois même contient des niveaux de vase. Selon TRICART (1961), "les sables marins nouakchottiens sont fins ; le mode est entre 0,24 et 0,36 mm (tamis 70) ; ils sont assez bien triés puisque la fraction modelée représente 60 % (médiane) de l'échantillon." Les caractéristiques d'ailleurs varient suivant les lieux de prélèvement, car selon NDIAYE (1975), on peut trouver plusieurs types de terrasses :

- une terrasse sableuse où les arches constituent près de 80 % à 90 % du matériel,
- une terrasse sableuse ou vaseuse à niveau d'Arca, d'Ostrea et de Tympanotus,
- une terrasse uniquement sableuse où les arches sont presque inexistantes.

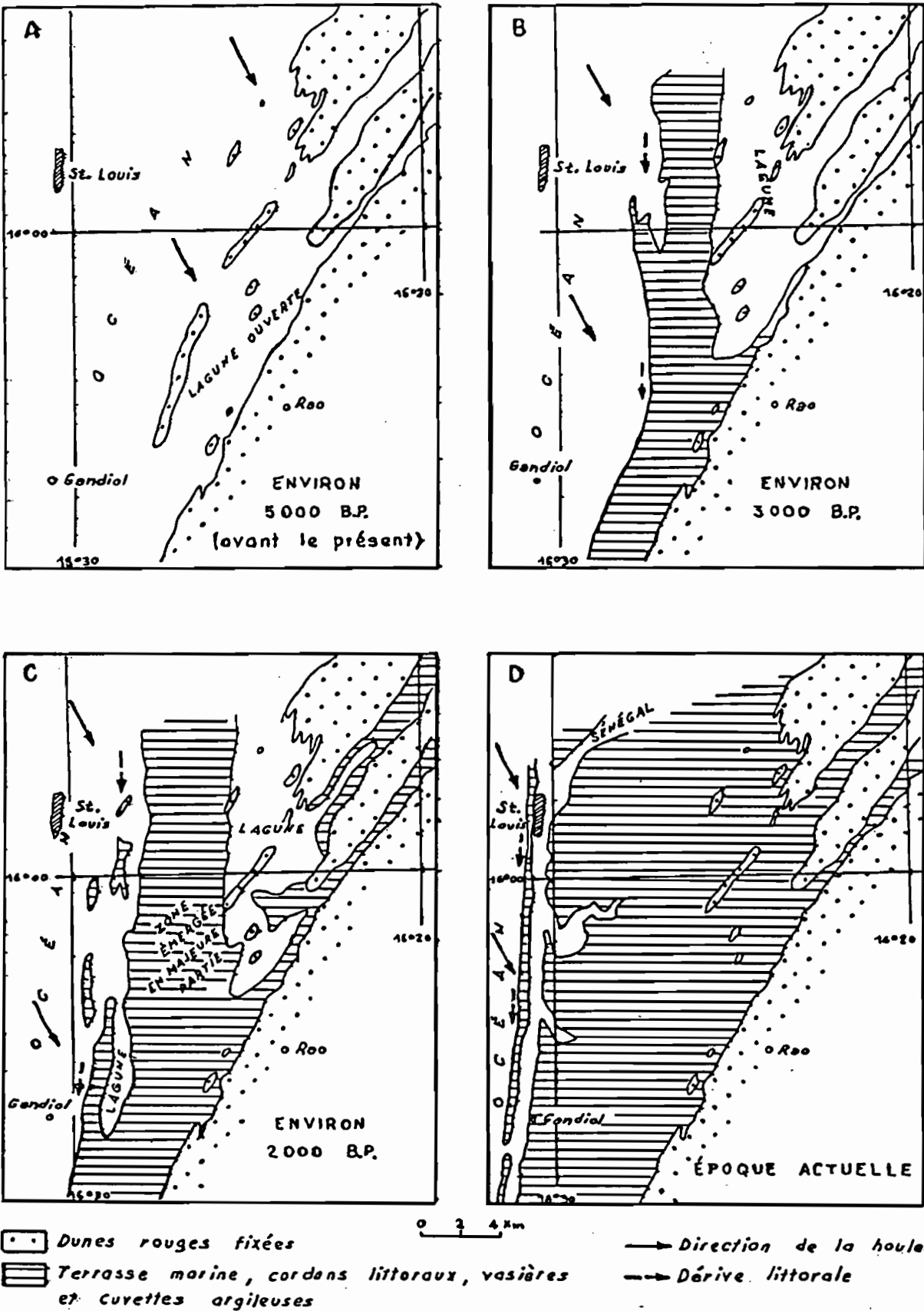


Figure 10a : Principaux stades de l'évolution de l'extrémité Sud-Ouest du delta du Sénégal (MICHEL, 1969).

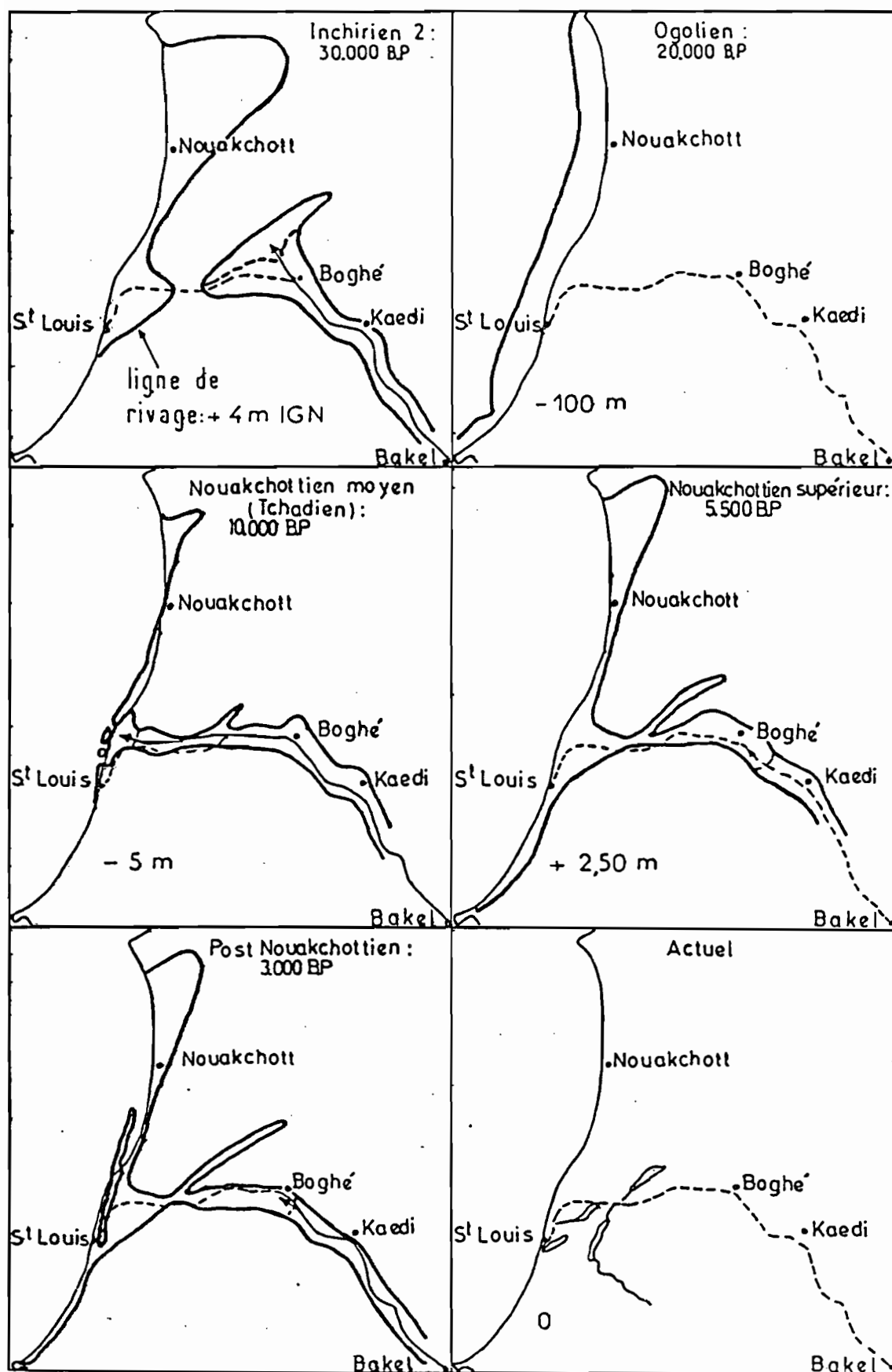


Figure 10b : Principaux stades de l'évolution de l'extrêmité Sud-Ouest du delta du Sénégal (AUDIBERT, 1970).

Le matériel sableux a subi en fonction des terrasses qu'il occupait des remaniements par l'eau, le vent et a également subi un brassage important. TRICART (1961) souligne que l'analogie avec les matériaux des dunes est grande, les courbes granulométriques presque identiques.

La période du Nouakchottien se caractérise par une importante présence humaine, qui se signale saint-louisienne par l'existence de Kjökkenmodding, visible le long de la route Rao-Gandiole. Les datations au radiocarbone donnent un âge de 5 060 ans BP (MICHEL, 1968) pour un lot d'Arcas prélevés à Ndiader à 1,50 m de profondeur, vers la cote + 2,70 m.

d) Le Tafolien (4 200 BP à 2 000 BP)

C'est une période aride. A partir du maximum, la régression s'amorce par un lent retrait de la mer. La berge se retire, il s'établit une importante dérive littorale nord-sud engendrée par la houle du NW qui charriait de grandes quantités de sables provenant de l'abrasion des dunes rouges du Trarza. Le fleuve édifie à cette époque de puissants bourrelets de berge, formés de sables et de limons fins : ce sont les levées post-nouakchottiennes, insubmersibles dans la vallée, qui se terminent par des formations deltaïques.

Avec le transport du matériel sableux, de nouveaux cordons littoraux formés grâce aux apports de la dérive nord-sud s'étirent à l'ouest de la terrasse nouakchottienne. Ces cordons littoraux ont un âge absolu allant de 4 000 BP à 2 000 BP, ont isolé une série de lagunes qui communiquaient avec la mer par des passes instables. La sédimentation s'est modifiée, avec un niveau de vase qui recouvre désormais les sables nouakchottiens (sédimentation de type lagunaire). C'est à cette époque que le fleuve édifiait un "delta" qui se digitait à la hauteur de Richard-Toll.

Les dunes qui se forment alors se différencient des dunes antérieures ; elles ont été dénommées "dunes jaunes" par J. TRICART (1961) à cause :

- de leur moindre importance ; elles dépassent rarement 6 m,
- de la couleur des formations superficielles (le coloris du matériel sableux allant du brun très pâle au jaune clair).

Ces dunes qui se forment jusqu'à l'Actuel se sont progressivement épaissies ; elles sont orientées nord-sud dans le sens de la dérive littorale. Ensuite elles ont été déplacées et remaniées par le souffle des alizés maritimes et présentent ainsi une orientation confuse. Le profil des "dunes jaunes" présente dans l'ensemble une superposition de sable brun, de racines et de sables gris à coquilles d'*Anadara senilis*. Les dunes, rencontrées au sud de Gandon, au niveau de Ndiol, s'ennoient au milieu des formations estuariennes. D'autres cordons formés plus à l'ouest ont une extension moindre mais leur orientation reste nord-sud. Ces dunes ont isolé une série de lagunes où la faune s'est plus ou moins spécialisée avec *Arca senilis* prédominant nettement, des huîtres (*Gryphea gasar*), des *Tympanotus fuscatus*. MICHEL (1968), sur un échantillon daté au radiocarbone, a trouvé un âge de 1 880 ans BP, relevé entre + 0,80 et + 1 m.

Les "dunes jaunes" "sont constituées d'un matériel extrêmement trié dont le mode situé entre 0,24 et 0,36 représente une médiane de 60 % de l'échantillon contre 50 % pour les dunes rouges" (TRICART, 1961). Si dans l'ensemble les sables sont homogènes et bien triés, ils ont subi un façonnement marin en profondeur tandis qu'en surface le façonnement observé est plutôt dû à des actions éoliennes.

e) Le subactuel (2 000 BP à 400 BP)

Au début de l'ère chrétienne, prend place un épisode sec "marqué par une recrudescence de l'action éolienne principalement dans les régions littorales" (ELOUARD, 1973) qui provoque l'ensablement du golfe marin. Des dunes se sont formées, recouvrant les anciens cordons littoraux ; "ces dunes semi-fixées, qui peuvent être qualifiées de subactuelles, atteignent une largeur de 3,5 km au sud de Gandiole" (MICHEL, 1969). Cette époque correspond également à une désorganisation de l'écoulement du fleuve Sénégal dans son delta : les anciennes embouchures, plus septentrionales se sont fermées progressivement, colmatées par les apports de sable de la dérive littorale (TRICART, 1961). Ainsi, le fleuve s'est détourné progressivement vers le SSW, tandis que se formait la flèche littorale de la Langue de Barbarie. Les "dunes littorales" se sont édifiées dans la région saint-louisienne et bordent l'estuaire du Sénégal depuis Tassinère jusqu'à Taré. Elles se différencient et se reconnaissent des dunes jaunes par :

- leur forme parabolique : elles dessinent des vagues de sable, orientées vers le NW, prises en écharpe par le vent ;
- leur altitude qui peut atteindre 15 à 20 m : ce système dunaire s'étire de Yoff (Cap-Vert) à St-Louis ;
- elles se reconnaissent par la blancheur de leur matériel et contiennent des débris de coquilles brisées. Ces dunes sont sans cesse alimentées par le sable de l'estran, approvisionné en matériel par la dérive littorale. On distingue deux générations de dunes littorales :
 - les dunes littorales semi-fixées, colonisées par de la végétation et qui avancent en vagues successives vers l'intérieur. Elles surplombent les dunes jaunes par un talus abrupt, s'épaississent sous l'effet du vent qui agit intensément dans la région. Certaines parties de la dune peuvent être ravivées surtout en saison sèche par les alizés maritimes et aussi par l'action anthropique.
 - Les dunes vives littorales : dans la région de Saint-Louis, s'est construite une flèche littorale qui s'est allongée progressivement vers le sud. Elle sépare le fleuve Sénégal de l'Océan Atlantique ; "elle existe au moins depuis le XVII^e siècle" (TRICART, 1961). Elle est large d'environ 100 à 400 m, évolue essentiellement sous l'action du vent qui y façonne des micro-reliefs, de la houle et de la dérive littorale.

f) L'Evolution actuelle

L'évolution actuelle dépend de la position du delta du Sénégal (16° et 16° 30', en pleine zone sahélienne), de la division de l'année en deux saisons (hautes et basses-eaux), des mécanismes éoliens qui assurent les transports littoraux. La dynamique actuelle dépend des conditions bioclimatiques et hydrologiques des différentes régions traversées, elle est faible et inégale dans l'espace.

- *Le rythme saisonnier des précipitations :*

Les pluies locales n'ont aucune incidence sur le régime du fleuve qui est essentiellement alimenté à partir des précipitations sur le haut-bassin. Le delta est ainsi soumis à 2 types de régimes :

- De la fin juillet à début octobre, la saison des hautes-eaux s'installe dans le delta. Le fleuve déborde à cause de la pente très faible ; les eaux remplissent les cuvettes ; limons et argiles s'y déposent par sédimentation. Il s'y ajoute un sapement latéral des berges par les eaux du fleuve. Tout ce matériel est transporté vers l'Océan ou déposé dans les cuvettes ; "une lente décantation s'opère, aboutissant à un véritable saupoudrage de limons sur toute la surface noyée, plus importante sur le fond des cuvettes que sur leurs rebords" (TRICART, 1961). La décrue s'opère lentement ; les limons ont pu se déposer, le courant fluvial s'avérant trop faible pour les enlever.

Dans le haut-bassin, l'érosion peut se développer, raviner les pentes et alimenter les eaux en charge solide ; dans la vallée l'action du fleuve est plus réduite à cause de l'étalement des eaux, mais il y a un dépôt de sables érodés et une décantation des éléments transportés dans les cuvettes.

- Pendant la saison sèche, à la période des basses-eaux, les cuvettes s'assèchent progressivement sous l'effet de l'évaporation. L'eau qui y est restée prisonnière (par densité, en saison des pluies, l'eau douce se superpose à l'eau salée qui reste au fond de la cuvette) au début de la saison des basses-eaux est également évaporée, et le sel se dépose, donnant à ces cuvettes l'évolution de sebkhas. Elles deviennent des aires de déflation : limons et argiles sont enlevés par les vents dominants ; les particules les plus grosses sont déposées sur les rebords des cuvettes ; les plus fines sont emportées en suspension. A cause de la sécheresse et de la tendance à l'aridité qui se maintiennent de nos jours, les vasières évoluent en tannes.

- *Les actions éoliennes :*

Selon l'O.M.V.S (1980) : "la déflation éolienne faible sur les bourrelets de berge et les marges du fleuve, mais sensible tout de même en saison sèche, est importante sur le delta et le littoral sous l'action des alizés maritimes." Cependant, ces actions éoliennes sont freinées dans le delta à cause de l'importante couverture végétale, mais la sécheresse et les actions anthropiques rendent ses effets de plus en plus sensibles. Pour TRICART (1961), quatre types de manifestations s'observent de nos jours :

- Les transports de limons diffus : ont lieu à la fin de la saison sèche. Ce sont des trombes de poussières qui prennent en charge le sol limoneux qui affleure à nu entre les touffes de végétation. Il se produit généralement une accélération de la vitesse du mouvement, liée à une forte insolation, ce qui met en marche des tourbillons de sable. Ces mouvements tourbillonnaires ne modèlent aucun relief, car l'ablation et l'accumulation qu'ils exercent ont un caractère diffus.
- Les actions éoliennes liées au sol : la présence de sel sur les sols nuit au développement de la végétation. En saison sèche ces sols, balayés par le vent dont aucun obstacle ne ralentit la vitesse, ont une texture cendreuse ou poussiéreuse. Toute leur partie superficielle constituée de limons cimentés par le sel sur une épaisseur de 10 à 15 cm peut-être mobilisée à cause de leur faible densité. Ces actions s'exercent surtout sur les levées ; elles donnent naissance à de petites dunes hautes de 1 à 2 m, qui s'accumulent au pied de la maigre végétation.
- Les actions éoliennes littorales : elles sont surtout favorisées par les vents constants du NW qui sont de la plus grande importance dans la région. En plus, dans la région de St-Louis la marée est faible, la forte évaporation permet au sable de sécher rapidement et d'être ainsi disponible pour le transport éolien. Tout le littoral est ainsi sillonné de formations dunaires avec une série de micro-formes s'édifiant sur la Langue de Barbarie.
- Les actions éoliennes anthropiques : elles prennent une ampleur considérable dans le delta au climat sahélien, à la pluviométrie peu abondante (335 mm), à la longue saison sèche de 8 à 9 mois et où la végétation se dégrade sous les actions conjuguées de la sécheresse, des hommes et des animaux. Le sable mis à nu est facilement mobilisable par les actions éoliennes.

En conclusion, l'évolution géologique et surtout géomorphologique au cours du Quaternaire a laissé un héritage important dans le delta ; elle est à l'origine du modelé actuel et de la mise en place des unités du relief (tableau 9). Ainsi, aux périodes humides, ont correspondu des mouvements de transgression (Inchirien, Nouakchottien) et les périodes sèches connaissent des phases de régression (Ogolien, Tafolien) où les actions érosives et éoliennes ont prédominé, avec l'édification de cordons dunaires. Cette évolution explique la répartition des sols et, avec l'interférence des éléments hydroclimatiques, la distribution des espèces végétales.

TABLEAU 9 : SUCCESSION DES GRANDES ÉTAPES DU QUATERNAIRE (MICHEL, 1960, 1973 ; PINSON - MOUILLOT, 1980)

Étages	Quotations absolues (BP)	Mouvements de l'Océan	Altitudes (en m)	Climat	Correspondance avec le Quaternaire européen	Morphogénèse dans le bassin du fleuve Sénégal	Morphogénèse dans le bassin de la Casamance
SUBACTUEL	1 700		0	Sénégal Tropical sec Soudanien	Casamance Tropical humide Subguinéen	dunes et levées subactuelles	Sédimentation très limitée
TAFOLIEN	2 000	T	0	aride		Courant de dérive littorale N-S - régularisation côtes du Sénégal, + larges plages sableuses au N - détournement du fleuve Sénégal vers SW dans le delta - cordons littoraux successifs ; nombreuses lagunes à mangrove.	- fermeture du golfe par des cordons littoraux - formation de lagunes où se développe la mangrove.
	4 200		- 3 m	semi-aride			
NOUAKCHOTTIEN	4 200 max 5 500	T	+2,5 m +1 à 1,5 m	humide	FLANDRIEN	Terrasses marines Mise en place 2e remblai (MICHEL, 1973)	Comblement alluvial dès 6 500, matériau vaso-argileux ou sable fluviomarin - terrasse subactuelle de 0,5 à 2 m.
	8 000 - 8 800	R		sec			
TCHADIEN	8 000	T	- 18 m	Très humide		Remaniement des dunes rouges - Pédogénèse 2ème phase d'entaille : recrausement des vallées - dunes rouges de l'Ogoulien NE-SW fleuve Sénégal endoréique - mise en place 1er remblai	- affaissement partie centre-ouest de la Basse-Casamance et jeu fractures - formation du réseau hydrographique hiérarchisé
	11 000		- 30 m				
OGOLIEN	15 000	R	- 100 à 120 m	aride	WURM RECENT	Profonde entaille des cours d'eau : 1ère phase d'entaille, qui atteint les sédiments tertiaires	
	max 17 000						
	20 000	R	- 50 m	sub-aride			
2 INCHIRIEN II	31 000	T	+ 4 m	humide	Interstade du WURM MOYEN	Pédogénèse	Mise en place de la terrasse supérieure (VIETILLEFON, 1974)
	max 33 000 37 000 40 000	T	+12 m +6 à 8 m				
		R		sub-aride	WURM ANCIEN	Mise en place du bas glaciaire et d'un grand erg sur le Fierle septentrional. Creusement des vallées qui atteint -5 à -15 m selon les endroits.	
P R E I N C H I R I E N	AIOUJIIEN 85 000 ou 125 000-145 000 200 000	T	+20 m ou +40 m	humide sec	RISS MINDEL	DEFORMATION TECTONIQUE IMPORTANTE	
						Formation des 2 glacis haut et moyen - Puls entaille avec mise en place de deux niveaux de culasses ferrugineuses (MICHEL, 1973).	Formation d'un seul niveau à cuirasse ferrugineuse
	TAFARITIEN 1 000 000	T		humide sec		Creusement des grès du "Continental Terminal"	

IV - SOLS ET VÉGÉTATION DU DELTA

La région est caractérisée par la présence de sols salés. La végétation, variée sur le plan des espèces et des groupements végétaux, joue un rôle mineur sur la formation des sols. Elle n'a qu'un rôle indicateur des conditions écologiques des sols. Les sols du delta, formés sous des influences marines et fluviales, ont une teneur élevée en sels qui limite la masse végétale et sur le plan agricole, leur productivité.

A - ORIGINE DE LA SURSALURE DES SOLS

Trois types de mécanismes peuvent être évoqués pour expliquer la salinisation progressive des terres du delta :

- La salinisation d'origine continentale : elle s'est développée au cours de périodes géologiques anciennes (Trias, Oligocène, Miocène) lors du développement de paysages lagunaires. Ce sel est resté prisonnier, incorporé dans les couches sédimentaires ; repris par les mouvements tectoniques il a ainsi acquis une grande mobilité à cause de ses déplacements successifs.
- La salinisation marine ancienne : se manifeste sur les terrains submergés par les transgressions marines qui ont lieu au cours du Quaternaire (Inchirien, Nouakchottien). Lors du retrait de la mer, les eaux sursalées et les dépôts marins n'ont pu être évacués en raison de l'absence de relief et aussi du climat qui tendait vers l'aridité. Ces dépôts ont modifié la composition originelle du matériel et provoqué leur évolution vers des sols salés.
- La salinisation marine actuelle : elle s'exerce par la contamination des terrains non salés à la suite de l'intrusion marine dans le fleuve Sénégal et également à la remontée de la nappe phréatique littorale fortement minéralisée qui se trouve à très faible profondeur. La salinisation actuelle est alimentée par l'eau de mer qui envahit le delta lors des basses-eaux (GAC et al., 1983). La SEDAGRI (1970) distingue plusieurs phénomènes dans la salinisation actuelle des cuvettes du delta avec le jeu des marées périodiques :
 - . les sels se déposent dans les cuvettes après évaporation,
 - . ensuite remontent par capillarité dans les parties hautes,
 - . les eaux qui ont envahi les cuvettes seraient en partie diluées à la saison des hautes-eaux, mais elles s'évaporent et le sel se concentre sur place.

Les sols du delta, constamment imprégnés de sel marin et ne recevant qu'une quantité insignifiante d'eau de pluie, sont impropres à la culture ; le sous-sol même renferme une quantité considérable de sels dont une grande partie est dissoute dans l'eau de la nappe. Cet excès de sel accroît le taux de sodium échangeable dans le complexe absorbant, d'où une structure physique peu favorable au développement de la végétation.

B - VEGETATION ET SOLS DES ZONES SAUMATRES ET SALEES

C'est le domaine des dépressions inondées en eau douce pendant un temps plus ou moins long dépassant généralement la durée de la saison des pluies. Leur végétation est spécifique et dépend de deux facteurs essentiels :

- la côte d'inondation : l'eau d'inondation peut alimenter des nappes qui subsistent (après le retrait des eaux de surface) et maintiennent en profondeur des conditions d'hydromorphie qui se traduisent par l'existence d'horizons différenciés ;
- la salinité du sol, surtout quand l'inondation est faible à moyenne.

Les sols sont halomorphes ; on distingue plusieurs catégories :

- sols salins qui contiennent au moins 0,2 % de sels sodiques : ils sont les plus fréquents, classés dans la catégorie des sols salins, halomorphes à structure non dégradée ;
- sols à encroûtement salin superficiel : ils ne portent aucune végétation et se rencontrent dans quelques cuvettes, vasières, tannes anciennes ou schorrea ;
- sols salins à horizon superficiel friable : ils ont colonisé les levées fluvio-deltaïques, les cuvettes de décantation et les vasières. Ils portent une végétation à peuplement clair. Leur texture indique de 70 à 85 % d'argile et de limons. Leur salinité est très forte et atteint entre 1 900 et 2 250 micromhos ;
- sols acides indifférenciés : ils sont localisés dans les formations fluvio-deltaïques, les terrasses marines (du Nouakchottien), sur les remaniements éoliens des bords des cuvettes. La végétation, variable suivant le taux de salinité et le degré d'humidité, est caractéristique de la savane avec Acacia seyal, Balanites aegyptiaca, etc. ;

- sols salins peu acides de cuvettes et vasières : le pH de ces sols est supérieur ou égal à 5 ; la végétation est à base de Sporobolus, Tamarix, Panicum ou Oryza barthii lorsque la salure n'est pas trop forte ;
- sols salins très acides des cuvettes et vasières : le pH est supérieur à 5 et ils portent une végétation spécifique à base de Sporobolus. On note l'apparition des Typhacées, Tamarix et de palétuviers dans les zones inondées par l'eau saline.

C - VEGETATION ET SOLS DES ETAGES ADLITTORAL, PARALITTORAL ET SUPRALITTORAL DU DELTA

Les formations végétales du littoral se caractérisent par une zonation due aux taux de salinité des sols. On distingue tout d'abord :

- un étage infralittoral, en dessous du niveau des basses mers ; c'est le domaine des algues ;
- la zone intertidale, représentant la zone de balancement des marées (estran), ne porte pas de végétation à proximité de l'Océan ; la marée remontant le fleuve, une végétation spécifique colonise les abords du Sénégal ;
- les étages adlittoral, paralittoral et supralittoral avec des sols émergés incluent les vasières, les tannes, les dunes et la mangrove.

1. Etages adlittoral et paralittoral

a) L'étage adlittoral

Il correspond à la bande de dunes dépourvues pratiquement de végétation qui s'étire en retrait de la plage (voir fig. 11). Les cordons littoraux (dunes blanches) portent une végétation xérophile qui colonise les sables marins secs car non atteints par les marées. Les sols homogènes sont des sols minéraux bruts ne présentant pas d'horizon pédologique différencié. L'aspect du groupement végétal est très ouvert, les sables supportent des touffes clairsemées d'Ipomea pes-caprae, plantes qui supportent de fortes teneurs en sels. En association, on trouve d'autres groupements moins fréquents : Sporobolus spicatus (joue un rôle pionnier ; grâce à ses stolons, il peut résister à l'ensablement et il est à l'origine de la formation de micro-relief dunaire du type nébka), Philoxerus vermicularis, Scaevola plumieri (très commun sur le littoral ; plante crassulescente dont les racines maintiennent très bien le sable, ses tiges souterraines donnent naissance à des rameaux aériens), Cyperus maritimus, Sesuvium portulacastrum, Ipomea stolonifera, etc. Toutes ces espèces constituent le groupement végétal pionnier dans la colonisation des sables littoraux. A ces groupements herbacés, il faut ajouter deux espèces introduites : le cocotier (Cocos nucifera) et le filao (Casuarina equisetifolia) ; ce dernier a été planté pour empêcher la migration des sables vers le sud et à stabiliser les coupures de la Langue de Barbarie.

b) L'étage paralittoral

Il constitue la transition entre le littoral (dunes blanches) et les autres domaines phytogéographiques (TROCHAIN, 1940). Selon BOULET et al. (1966) "Ces dunes jaunes présentent les caractères d'un sol peu évolué ; le profil se réduit à un horizon humifère brun épais de 55 cm à 60 cm, séparé du matériau originel par une zone de transition." Acôté de ces sols peu évolués, existent d'autres types de sols hydromorphes, fortement influencés par le sel ; ce sont des sols à alcalis retrouvés dans les dépressions interdunaires inondées pendant la saison des hautes-eaux.

L'aspect du groupement végétal est dispersé. Dans certaines zones, la végétation est absente. Les plantes doivent lutter contre les vents (déchaussement ou enfouissement) mais aussi contre la salinité du sol et de l'air avec les embruns. La végétation steppique est constituée d'halophytes et de psammophytes ; elle est représentée par le groupement à Aristida longiflora et Hyparrhenia dissoluta dont quelques espèces sont abondantes (Arinari macrophylla), Maytenus senegalensis et Chrysobalanus orbicularis, espèces assez touffues exerçant un effet de frein à l'avancée des dunes. La strate arbustive comprend Opuntia tuna, une végétation d'euphorbes (Euphorbia balsamifera) et sur les sols salés, Sesuvium portulacastrum, Philoxerus vermicularis. La strate arborée est composée de ligneux : Acacia adansonii est l'espèce la plus répandue avec Balanites aegyptiaca, Faidherbia albida, Combretum glutinosum. Dans les dépressions interdunaires, les espèces sont hygrophyles. Elles sont constituées par les groupements à Polycarpon Sp sur les sables peu humides ; dans les dépressions où la nappe est chargée d'un taux de sel assez élevé, les espèces sont Lippia nodiflora, Heliotropium ovalifolium ; alors que dans les dépressions où les fonds sont humides, les plantes sont constituées par une ceinture de Vetiveria negritana.

2. L'étage supralittoral

a) La mangrove

Selon TROCHAIN (1940), "on désigne par mangrove, les petites forêts littorales tropicales ou forêts de palétuviers ou encore forêts de mangliers de l'étage littoral (zone intercotidale) des pays tropicaux." La mangrove saint-louisienne (fig. 12) atteint ici la limite septentrionale de l'extension

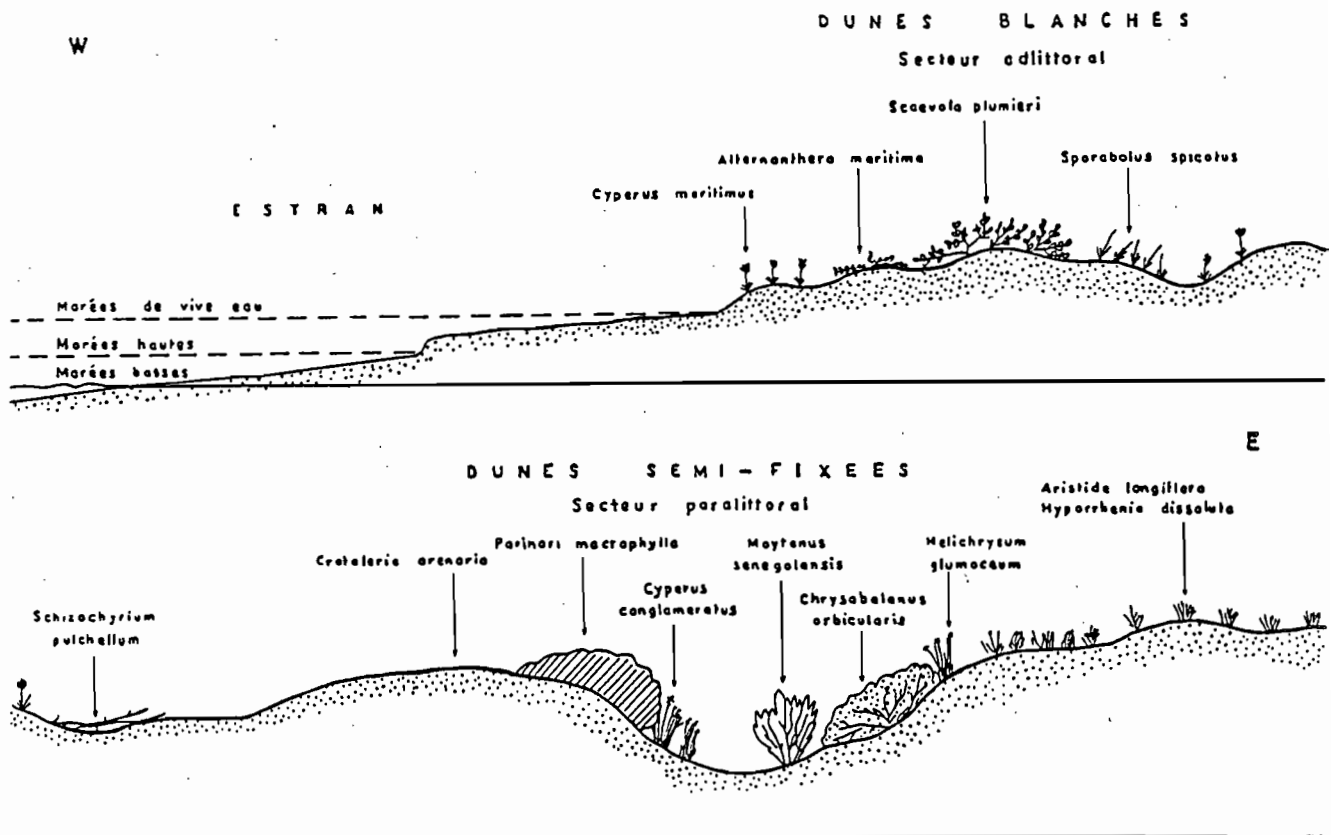


Figure 11 : Représentation schématique de la végétation des étages adlittoral et paralittoral des dunes littorales. (D'après MICHEL, NAEGELE et TOUPET)

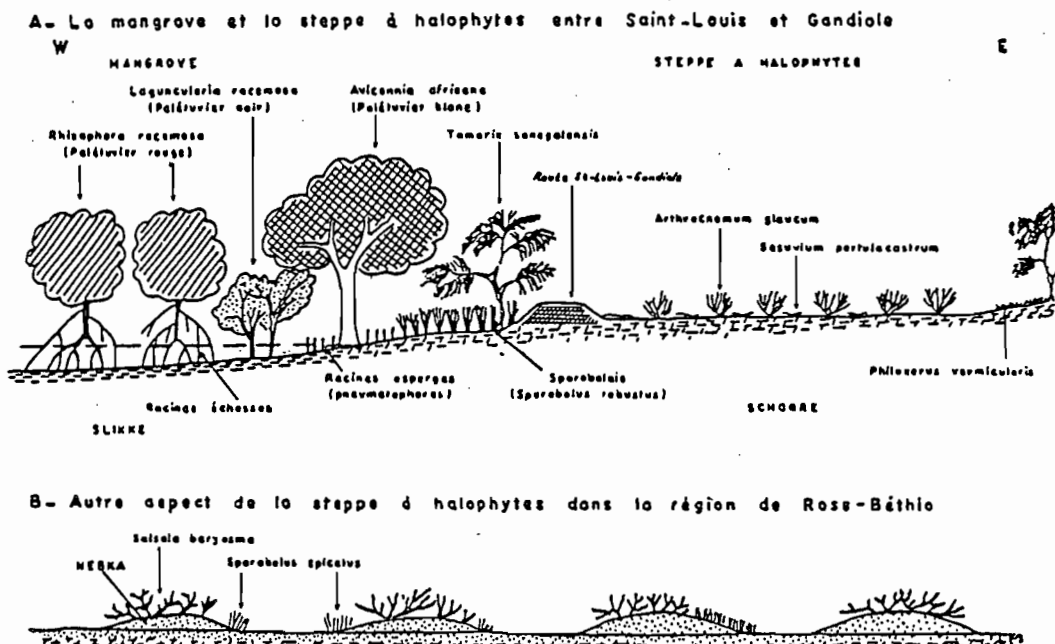


Figure 12 : Représentation schématique de la végétation dans le delta du Sénégal. (D'après A. NAEGELE).

de ce paysage ; elle ne se cantonne pas à la zone côtière mais elle apparaît aussi sur les berges basses et marécageuses du fleuve et des marigots, dans les lagunes et les estuaires. ADANSON (1749) signale les derniers mangliers sur le grand bras du fleuve à une vingtaine de km au nord de Saint-Louis. MICHEL et ASSEMIEN (1967) cités par ELOUARD (1973) signalent la présence de pollen de *Rhizophora* dans un niveau de vase à Boghé. Ainsi, l'existence de la mangrove à palétuviers au fond du golfe du Sénégal est indéniable au cours du Nouakchottien et même le long de l'Aftout-es-Sahel presque jusqu'à Nouakchott. La végétation de mangrove s'est raréfiée ou a disparu au fur et à mesure de l'évolution avec le colmatage du golfe marin et l'édification des cordons dunaires.

Les sols de la mangrove sont essentiellement composés de la vase : il s'agit d'un milieu complexe et d'un véritable sol sous-marin. La vase est un milieu réducteur pour le fer, ce qui lui confère sa couleur noire surtout en profondeur ; recouverte par les eaux du fleuve, elle est souvent brunâtre. Elle est riche en éléments minéraux, mais aussi en matière organique provenant de la décomposition rapide, grâce à une activité bactérienne particulièrement intense des phytoplanctons et zooplanctons d'une part, et d'autre part des animaux et plantes vivant sur ou dans la vase. Le milieu se caractérise également par un excès d'eau et de sel. La mangrove comporte deux espèces végétales essentielles : *Rhizophora racemosa* et *Avicennia africana*.

Rhizophora racemosa se développe dans les vases presque toujours recouvertes par les eaux (de la slikke, niveau le plus bas, à la schorre, niveau supérieur, micro-falaise recouverte par les plus fortes marées, composée de vase molle). MAYMARD (1955) signale cette espèce végétale sur la berge Est du Sénégal, non loin du confluent avec le marigot du Djeuss.

Avicennia africana, qui croît sur un terrain plus ferme, est rencontré dans les régions marécageuses, dans la limite supérieure de la slikke atteinte par les hautes marées (Ex : région entre les marigots de Djeuss-Diaoudoune-Makana). L'horizon supérieur des sols est imbibé par les eaux de marée, au ssi, elles sont affectées d'un fort pH (7,8). La salinité de 4 ‰ pendant la submersion par les eaux de crue augmente considérablement pendant la saison sèche et peut atteindre 230 ‰ de NaCl. L'horizon inférieur profond et toujours humide ne subit pas les effets de la submersion des hautes-eaux ; la salinité y est élevée, soit environ 25 ‰ (MAYMARD, 1955).

D'autres arbustes associés à la mangrove, mais beaucoup moins fréquents, sont aussi représentés : *Laguncularia racemosa* ou palétuvier noir, *Conocarpus erectus* ou palétuvier gris ; à la limite externe de la mangrove, *Tamarix senegalensis*, *Ecastaphyllum browneri* et quelques herbacées, *Sporobolus robustus*, *Phragmites communis*, *Paspalum vaginatum*, etc. Une faune marine composée d'espèces peu diversifiées se rencontre dans les vasières actuelles : *Tellina nymphaeus*, *Tagelus angulatus*, *Uca tengensi*, *Pevioptalmus papilis*. Deux espèces ont complètement disparu : *Arca senilis* et *Gryphaea gazar*.

b) Les vasières anciennes ou tannes

Il y a un net recul des vasières au niveau du delta. Les sables vaseux se dessèchent et prennent suivant leur teneur en fer et en matières organiques, une couleur gris clair, ocre ou même rouge. Cette dessiccation permet le craquellement (fissuration), la perméabilité puis le lessivage de ces sols et leur conquête par une strate naine composée d'espèces halophiles : ce sont les tannes herbues ou schorres. Il s'y ajoute d'autres vasières plus anciennes, complètement dénudées, avec une concentration des effluences salines en saison sèche : ce sont les tannes nues.

Sur les tannes herbacées, en fonction de la pente, il y a une répartition de la salinité, des sols et de la végétation. Les terrains à topographie plane ou légèrement inclinée vers le chenal sont occupés par une végétation de *Sporobolus spicatus* et de *Sporobolus robustus* (c'est la sporobolaie). A l'arrière des vasières à mangrove évoluant en schorre, la végétation est composée de *Sesuvium portulacastrum*, *Phloxeris vermicularis*. Les terrains assez élevés et dessalés par les eaux d'infiltration supportent une steppe halophile composée de *Tamarix senegalensis*, *Arthrocnemum glaucum*.

Les tannes nues sont des dépressions généralement inondées pendant la saison des hautes-eaux par les eaux de ruissellement pouvant se charger de sel des formations lessivées et par la remontée de la nappe phréatique salée peu profonde. Dans ces cuvettes, l'eau disparaît par évaporation et l'évolution pédogénétique aboutit à un sol fortement salé et très acide sur lequel aucune espèce végétale ne peut se développer. La sursalure donne en saison sèche, à la surface du sol, une structure poudreuse, qui se craquelle et se fendille au cours de cette période ; le sel sert surtout de liant à toutes les particules fines. Des tannes nues à croûte saline sont localisées entre les cordons de dunes et communiquent mal avec le fleuve. Leur sel provient des infiltrations des eaux marines à travers le cordon littoral ou des embruns, mais rarement de la marée. Dans ces cuvettes humides, tapissées de vase noire, avec l'évaporation, les sels se cristallisent à la surface sous forme de croûtes exploitées par les populations surtout dans le Gandiolais.

c) Les dunes ogoliennes

Les dunes se sont formées lors de la pulsation humide qui suivit l'Ogolien pendant laquelle le fleuve a entaillé les cordons dunaires pour rejoindre la mer (MICHEL, 1969). Ces sols des dunes rouges sont classés parmi des sols ferrugineux tropicaux non lessivés (sols diors) ou comme "intergrade vers les sols bruns rouges" (BOULET et al., 1966). Ces sols, formés sur l'erg aplati des dunes rouges, sont bien drainés grâce à leur matériel sableux et à leur position topographique. Ce sont des sols indifférenciés présentant un horizon superficiel "humifère" brun jaune, surmontant un horizon de transition un peu plus clair. Le matériau originel caractérisé par une teinte homogène (jaune rouge très clair) marque l'amorce de la tendance évolutive des sols subarides bruns rouges. Ces sols voient leur horizon superficiel décappé par la déflation éolienne surtout en saison sèche, à cause de la faiblesse du couvert végétal et de leur mise en culture par l'homme. Ils se caractérisent aussi par l'accumulation sur une assez grande profondeur d'une matière organique bien évoluée, mais peu abondante.

Les espèces végétales sont celles de la savane, la strate arborée est composée d'Acacia raddiana, de Balanites aegyptiaca et de Faidherbia albida. La strate arbustive se compose de Combretum glutinosum, Guiera senegalensis, Euphorbia balsamifera ; la strate herbacée, d'Aristida longiflora, Andropogon gayanus, Cenchrus biflorus.

D - SOLS ET VEGETATION DES GRANDES DEPRESSIONS ET DU WALO

C'est le domaine des dépressions inondées en eau douce pendant un temps plus ou moins long selon l'importance de la saison des pluies. On distingue plusieurs types de cuvettes allant de bas-fonds argileux de décantation aux dépressions interdunaires constituées par les niayes. Ce sont des sols hydromorphes, dont les colorations variées sont liées à un engorgement temporaire ou permanent.

1. Les cuvettes

a) Les dépressions argileuses de décantation

Elles sont localisées entre les hautes levées fluvio-deltaïques et sont annuellement inondées à la saison des hautes-eaux. Les eaux peuvent stagner dans certaines d'entre elles pendant toute l'année (elles constituent alors des mares), d'autres dépressions par contre voient leurs eaux disparaître au cours de la saison sèche sous l'effet de l'infiltration et de l'évaporation. Dans les cuvettes, les éléments limoneux, argileux sédimentent ; selon MICHEL (1973), l'épaisseur des dépôts peut atteindre de 1 m à 1,70 m dans les parties centrales et même 3 m dans les cuvettes profondes. Au cours de la saison sèche, l'argile se rétracte sous l'effet de la dessiccation ; la surface des cuvettes se craquelle et se fendille.

Plusieurs types de sols peuvent se développer :

- dans les cuvettes de décantation où la durée d'inondation varie, il y a des vertisols topomorphes non grumosoliques. Ce sont des sols minéraux à pseudogley et à gley, à taches et à concrétions qui se sont formées dans certaines dépressions et qui se sont développées dans les matériaux fluviaux de décantation. Les matériaux des sols sont des argiles lourdes, compactes (environ 55 % de l'ensemble du matériel sablo-argileux) ; la quantité de matière organique est faible. Ces cuvettes sont soumises à l'influence saline, surtout en saison sèche. L'évolution en sebkhas donne des dépôts de fines couches salées. Ce sont alors des sols acidifiés, des gleys salés à croûte saline de surface. Ces sols supportent une végétation d'Acacia nilotica, des groupements herbacés avec une graminée vivace Vetiveria negritana en association avec Oryza barthii, Helicochloa schoenoides.
- Dans les cuvettes basses ou les parties basses des cuvettes de décantation, les sols sont soumis à l'influence prépondérante de la submersion et de la nappe (la durée de la submersion dépasse 150 jours, alors qu'elle varie de 30 jours à 120 jours dans les cuvettes de décantation). Ces cuvettes ont des sols à gleys, acides, qui ont subi une pédogenèse saline ; la matière organique est peu abondante. Ces sols plus humides supportent une végétation composée d'Acacia scorpioides, d'Acacia nilotica, de Myragina inermis qui s'élèvent au-dessus de peuplements herbacés de Vetiveria negritana, Cynodon dactylon. Les cypéracées sont également nombreuses (Cyperus iria).

b) Les niayes

C'est une zone définie par MICHEL (1955) comme "des dépressions interdunaires plus ou moins inondées qui s'étendent derrière le cordon littoral depuis Dakar jusqu'à l'embouchure du fleuve Sénégal." Elles apparaissent comme des anomalies ; la végétation qu'on y rencontre est inadaptée au climat actuel, ce sont des reliques d'une époque beaucoup plus humide et elles ne sont conservées que grâce à une nappe phréatique située à faible profondeur. Les niayes sont assez développées à Gandiole : la strate arborée est dominée par Elaeis guineensis, associé à Cocos nucifera. Dans la niaye inondée, la végétation est luxuriante avec des peuplements de Typha australis, d'espèces comme Bridelia micrantha, Cyclosorus goggilodus, Xylopi aethiopica. Dans la niaye non inondée, la végétation est moins riche avec Typha elephantina, une strate herbacée comprenant Oplismenus burmannii, Borreria verticillata, Sporobolus spicatus, etc. La niaye renferme également de nombreuses espèces de lianes parmi lesquelles Ficus congensis, Ficus vogelii.

2. Sols et végétation du walo et de ses bordures

Le walo ou lit mineur est plus ou moins inondé régulièrement pendant la période des hautes-eaux. Les sols sont hydromorphes, développés surtout en amont de Richard-Toll où le régime des eaux, l'évolution morphologique orientent la pédogenèse. Les sols ne se différencient guère des sols analysés dans les cuvettes ; MAYMARD (1955) y distingue 3 types :

- les sols peu évolués d'apport : ce sont des sols à taches et à concrétions,
- les vertisols topomorphes non grumosoliques,
- les sols à gley.

Une zone de transition s'intercale entre le lit mineur inondé (Walo) et le champ jamais inondé. Elle peut d'ailleurs être envahie par les eaux lors des hautes-eaux exceptionnelles. Selon SECK (1981) "les sols très variés sont généralement des sols bruts d'apport éolien, des sols peu évolués nodaux ou hydromorphes, des sols à taches et à concrétions et des sols bruns rouges subarides. Sauf sur les terrasses marines où ils sont plus fins, ces sols ont tous une texture sableuse et légèrement gravillonnaire par endroits."

La végétation comprend une strate arborée avec Acacia raddiana, Acacia seyal, Balanites aegyptiaca, une strate arbustive comprenant Maytenus senegalensis, Bauhinia rufus et enfin une strate herbacée à base de graminées.

Sur la zone bordière, jamais atteinte par les eaux d'inondation ou Diéri, les terrains sont exondés. Ces sols, développés dans les régions sahéliennes, sont bruns ou bruns rouges ; ce sont des sols isohumiques ou encore subarides tropicaux. Ils se caractérisent par une épaisseur faible à moyenne du profil (environ 2 m), sans horizon nettement différencié ; l'horizon brun atteint 50 cm d'épaisseur. Il faut également souligner leur "faible teneur en matière organique (0,3 à 0,6 %) et en éléments fins (moins de 5 %)." SECK, 1981.

La végétation est clairsemée sur les dunes. Plus dense dans les interdunes, la strate arborée est composée d'Acacia raddiana, Balanites aegyptiaca... ; la strate herbacée comprend des graminées pour l'essentiel, surtout des plantes annuelles comme Andropogon gayanus, Aristida longiflora, Cenchrus biflorus.

CHAPITRE II

L'HYDROLOGIE MARINE ET CONTINENTALE

I - L'HYDROLOGIE MARINE

Les mouvements des masses d'eau et de la matière en bordure de la côte de Barbarie sont contrôlés par la forme du plateau continental, les marées océaniques, les courants marins, la houle, la dérive littorale et les vagues. Notons également l'intervention des vents de secteur nord qui peuvent entraîner vers le large d'importantes quantités de poussières (phénomène de sable brassé et de brumes sèches) et surtout le rôle prépondérant du fleuve Sénégal qui déverse chaque année ses alluvions dans l'Océan sous la forme d'un "panache turbide".

A - LE PLATEAU CONTINENTAL

Le plateau continental, limité à l'isobathe 200 m, se prolonge sur près de 40 km au large de la région de Saint-Louis. Plus au sud, son extension en mer diminue progressivement pour se réduire à une bande de 9 à 10 km au niveau de la presqu'île du Cap-Vert. La pente est peu accusée ; le profil en plan incliné est à peine ondulé et présente quelques replats et de rares fonds de 1 000 à 1 200 mètres de profondeur sur la bordure externe.

L'accident majeur est constitué au nord de la presqu'île du Cap-Vert par l'importante fosse de Cayar, véritable canyon sous-marin qui entaille la marge sénégalaise sur près de 430 km et dont la tête s'établit en bordure du littoral par des fonds de 15 à 20 mètres seulement. DOMAIN (1977) a signalé par ailleurs la présence de canyons de moindre importance par 16° 30' et 16° 50' de latitude Nord.

Plusieurs séries de reliefs longitudinaux existent devant la côte du Sénégal. Ces zones non rocheuses sont recouvertes de sédiments et se développent en une succession de petits bancs à -15, -20 m de profondeur au nord de Saint-Louis (DOMAIN, 1977). A proximité de l'embouchure, vers -10, -15 m de profondeur, les bancs rocheux sont surmontés par des sédiments vaseux ou sableux.

1. Les fonds vaseux

Une importante zone vaseuse "s'étend de part et d'autre de l'embouchure du fleuve Sénégal, de 16° 30' à 15° 15' de latitude Nord entre les isobathes 20 et 80 m", DOMAIN (1977). Cette zone est alimentée par les particules limoneuses transportées par le fleuve jusqu'à la mer où elles sont reprises par les courants qui les entraînent vers le sud-ouest. L'extension de cette vaseuse jusqu'à la latitude de 16° 30' Nord s'expliquerait par le fait que le Sénégal, au Quaternaire récent, a vu son embouchure située à cette latitude migrer peu à peu vers le sud.

2. Les fonds de sable

Ils occupent une surface réduite à proximité de la côte et au nord de 16° 30' de latitude. Le matériel est riche en lutites (particules inférieures à 63 microns), mélangés à un sable grossier et moyen (particules comprises entre 500 microns et 2 mm) et à des coquilles brisées. On rencontre également des sables fins (particules comprises entre 63 et 500 microns), abondants sur le plateau continental, associés à des proportions variables de lutites (parfois moins de 5 %), qui constituent soit des sables vaseux, soit des vases sableuses. DOMAIN (1977) signale qu'un important banc de vase s'étend de 16° 30' à 15° 15' N entre les isobathes -15 et -80 à -100 m.

Le plateau continental est important en morphologie littorale dans la mesure où de son extension dépend l'amplitude des marées et l'importance du marnage.

B - LES ELEMENTS DE LA CIRCULATION OCEANIQUE GENERALE

Les côtes tropicales basses de l'Afrique de l'Ouest sont, au fil des saisons, soumises à l'influence de quatre masses d'eau transportées par les courants.

1. Les principaux courants

Les côtes sénégalaises sont sous l'influence de deux types de courants très différents (fig. 13) étudiés notamment par MASSE (1968), DOMAIN (1977), REBERT (1977) :

- le courant froid des Canaries de direction NE-SW ;
- le contre courant équatorial de direction SE qui alimente le courant de Guinée.

Les courants marins délimitent deux grandes saisons océaniques :

a) La saison froide (fig. 13)

Pendant la saison des alizés, de novembre à mai, les courants océaniques, au large de Saint-Louis, sont essentiellement tributaires du courant froid des Canaries. Les courants de surface portent au S-W entre Saint-Louis et Dakar, puis au S-E de Dakar au Cap-Roxo jusqu'à la Gambie, et enfin au sud vers la Casamance (DOMAIN, 1977). La vitesse du courant est de l'ordre d'un noeud. Une branche du courant des Canaries bifurque vers l'ouest pour former le courant nord équatorial et se déplace vers le sud. Le long de la côte septentrionale, il existe un contre courant remontant la côte et dirigé vers le nord (REBERT - DOMAIN, 1977).

b) Les "up-wellings"

Les côtes sénégalaises sont baignées par d'importantes remontées d'eaux profondes ou "up-wellings" qui proviennent de la région des eaux centrales sud-atlantiques (REBERT, 1977). Ces courants se manifestent intensément de février à avril entre Saint-Louis et Dakar et dépendent essentiellement de deux facteurs :

- la morphologie du plateau continental, en effet sa faible extension est un élément favorable à leur développement ;
- le régime du vent.

c) La saison chaude (fig. 13)

Dès le début de la saison humide, la mousson succède aux alizés. Les masses d'eau méridionales repoussent le front des remontées d'eaux froides, les up-wellings disparaissent. Le courant de surface se propage alors du sud au nord à une vitesse d'environ 0,5 noeud.

2. La Houle

Elle a été définie par GUILCHER (1954) comme "un système de vagues plus ou moins régulier dans lequel la hauteur est faible par rapport à la longueur d'onde et qui se propage dans la mer lors de la présence du vent qui en a été la cause initiale." Deux types de houle, dont les caractéristiques sont différentes selon leur origine et les saisons, se manifestent alternativement dans la région saint-louisienne : les houles de NW avec leurs variantes et les houles de SW.

a) La houle de NW

Elle prédomine pendant toute la saison sèche d'octobre à juin et a pour origine les tempêtes lointaines de l'Atlantique nord. Cette houle atteint la côte sous forme de trains de grande longueur d'onde (en moyenne de 190 à 300 mètres), avec des périodes oscillant de 11 à 15 secondes. A cette époque, l'amplitude de la houle est généralement plus forte que pendant le reste de l'année (les valeurs moyennes sont comprises entre 1 et 1,60 m) et elle se propage à une vitesse de l'ordre de 22 m/s.

Dans l'ensemble, la direction moyenne de propagation, pour ces houles d'origine septentrionale, se situe par 22° Nord-ouest. A l'approche de la côte de Barbarie, elles subissent une réfraction sur le fond au niveau du plateau continental ; elles perdent une grande partie de leur énergie et déferlent plus ou moins obliquement par rapport à la côte.

NDIAYE (1975) tire de l'observation des plans de houle (fig. 14) établis par GUILCHER (1954) les enseignements suivants :

- pour les deux premières houles (N 10° W et N 30° W), elles ont grossièrement une composante N après avoir subi une réfraction au niveau de l'isobathe des 50 m à quelques 20-25 km de la côte ;
- la dernière (N 60° W) a une composante N sur la Langue de Barbarie, mais elle change d'orientation et devient presque parallèle à la côte sur le littoral sud sénégalais.

Ces houles, qui interviennent par fréquence d'environ 1 %, sont les plus fortes enregistrées à Saint-Louis car à cette époque de l'année (de novembre à mai), les vents sont les plus violents dans l'Atlantique nord.

Elles provoquent sur le littoral une mobilisation puis un important transport de sable, le façonnement du littoral, par l'apport de quantités considérables de sédiments sur l'estran se produit par houle allongée et régulière, et surtout aux environs de l'équinoxe de printemps. Cette période de l'année correspond à "l'engraissement" maximum de la plage et au changement du profil littoral.

Figure 13 : LES COURANTS MARINS (REBERT, 1977).

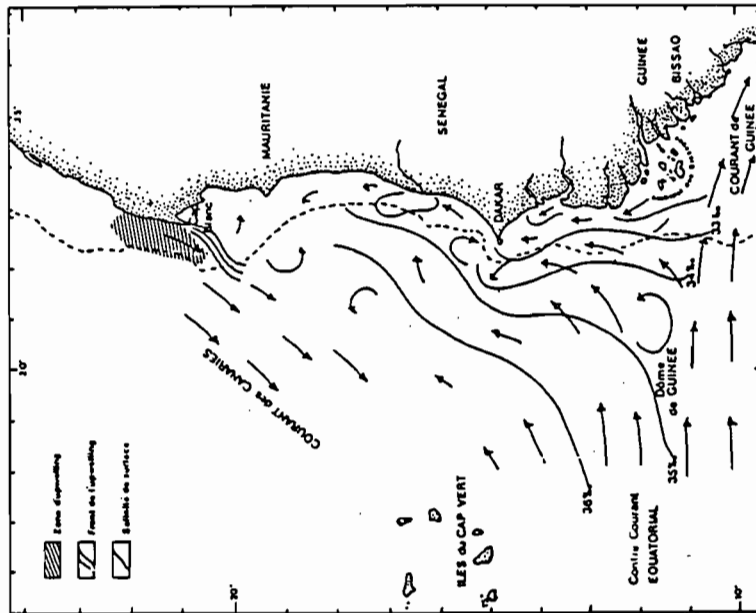


Fig. 13c : Les courants de surface, zone d'up-welling et salinité de surface en saison chaude (juin-octobre). (REBERT, 1977).

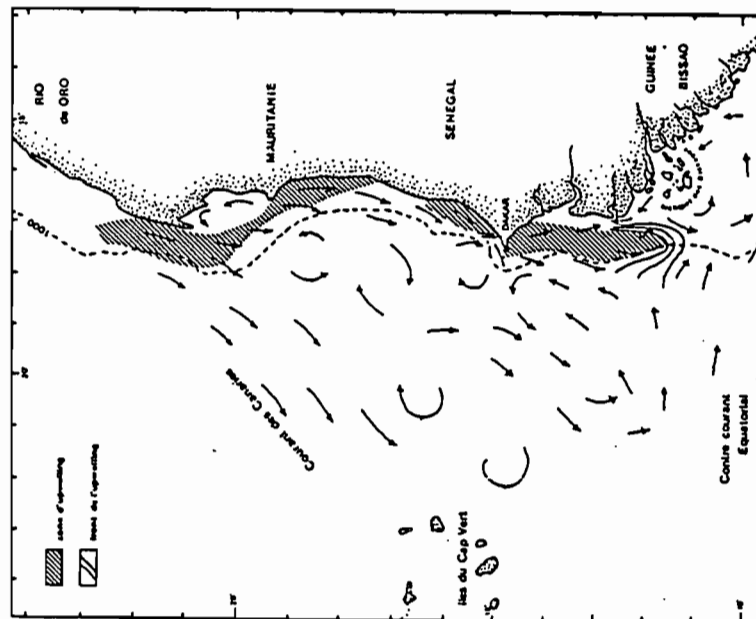


Fig. 13b : Courant de surface, zone d'up-welling et leur front en saison froide (novembre-mai). (REBERT, 1977).

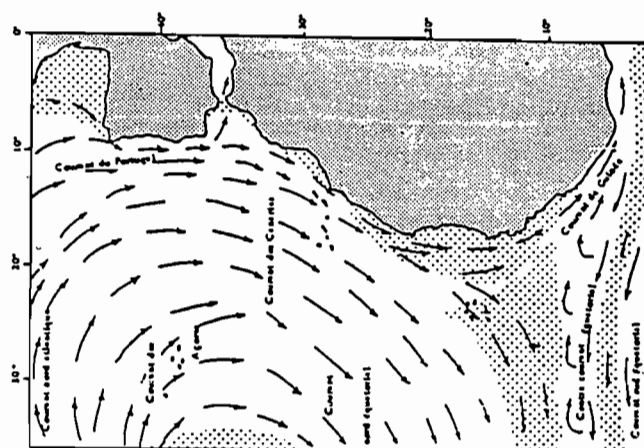
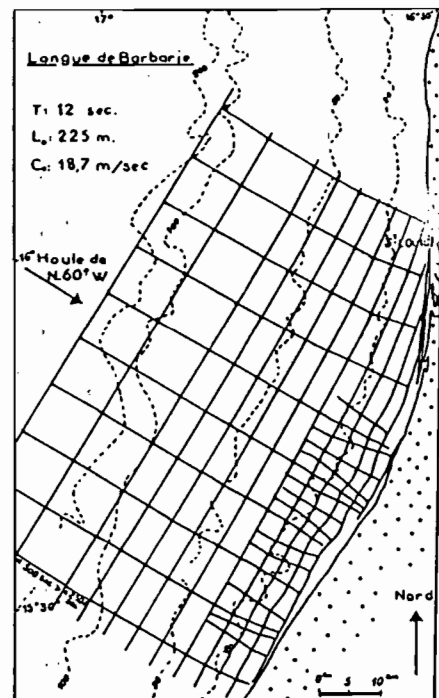
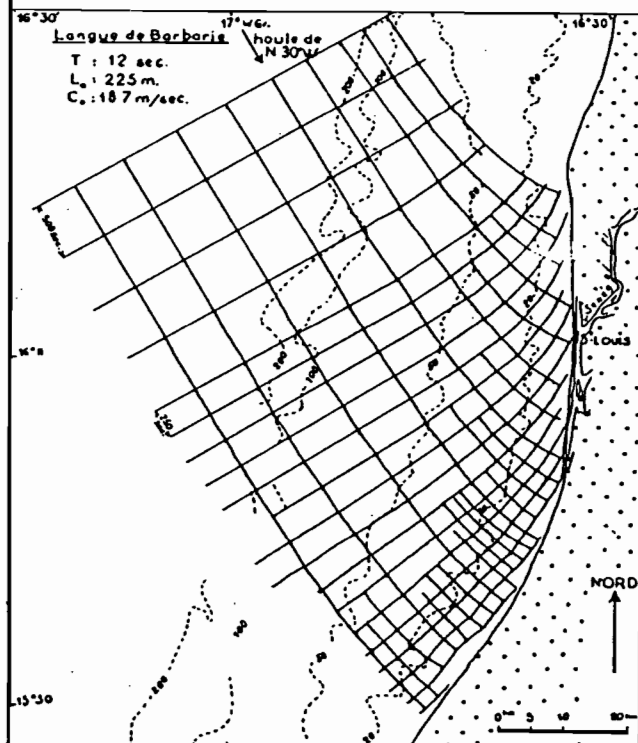


Fig. 13a : Les courants principaux au large des côtes de l'Afrique de l'Ouest. (REBERT, 1977).

PLAN de HOULE



PLAN de HOULE



PLAN de HOULE

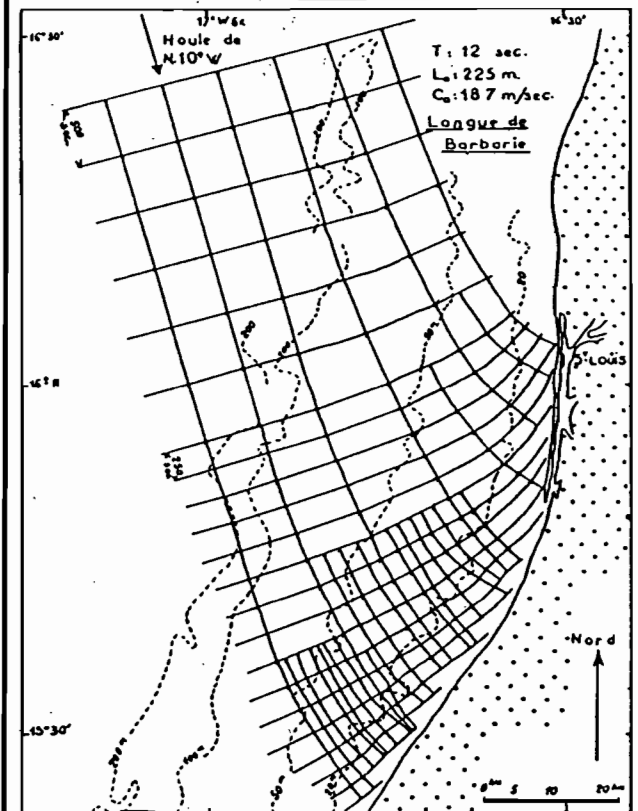


FIG. 14 : Plans de houle
(GUILCHER, 1954).

b) Les houles du sud-ouest

Elles se manifestent le reste de l'année et ont pour origine les grands vents d'ouest de l'Atlantique sud ; elles sont liées par leur direction et leur fréquence aux flux de mousson issus de l'Anticyclone de Ste Hélène. Leur amplitude est moins importante (valeurs moyennes comprises entre 0,80 et 1,20 m) et leur période plus courte (entre 5 et 10 secondes). Leur action est aussi moins marquante : elles perdent une bonne partie de leur énergie par suite d'une diffraction subie au niveau de la presqu'île du Cap-Vert, véritable écran dont l'abri englobe toute la Langue de Barbarie. Cette période (de juin à octobre) des houles australes correspond au "démaigrissement" de la plage par suite de la diminution du transport du matériel sableux.

Sur la côte, toutes ces houles, surtout celles du NW, engendrent deux phénomènes importants : les vagues et la dérive littorale.

3. Les vagues

A l'approche de la côte, la houle est influencée par la présence du fond : l'onde de houle y subit des déformations, elle se cambre et donne naissance à des vagues, de courte longueur d'onde, qui déferlent sur le rivage. Les vagues sont dues à l'action du vent et leur amplitude est d'autant plus grande que celui-ci souffle avec le plus de violence. Les vagues sont des ondes de translation animées d'une forte turbulence.

Pendant la saison des alizés, de novembre à mai, les vagues sont les plus hautes et sont orientées plus au nord que pendant le reste de l'année. Les grands vents locaux créent des vagues venant de l'est, mais elles ne jouent qu'un rôle secondaire dans les phénomènes côtiers. Les vents créent néanmoins des vagues sur le fleuve (le mascaret n'est pas perceptible), surtout au niveau de la barre : elles atteignent, près de la rive ouest des périodes d'environ 2 secondes, une hauteur significative de 0,3 mètre. Les déferlements sur la côte se font sous forme de gros rouleaux, de façon très fréquente ; ces mouvements ont pour effet une évolution très rapide des profils de la plage. Le rôle des vagues est en fait mineur, mais en saison sèche, leur action peut renforcer considérablement celle de la houle et de la dérive littorale, en prenant en charge et en brassant les matériaux fins ou grossiers arrivés sur le littoral.

Les directions des vagues ne sont pas toujours celles de la houle, elles sont plus obliques par rapport à la côte. L'obliquité sur le trait de côte semble responsable des croissants de plage et des bermes qui jalonnent l'estran.

4. La dérive littorale

C'est un courant littoral, parallèle au rivage, et qui résulte de tous les mouvements dirigés vers la terre et non perpendiculaires aux côtes. Ce courant est une résultante de l'obliquité de la houle par rapport à la ligne de rivage ; son existence est admise sur la côte de Saint-Louis où elle a une direction N-S en face de la Langue de Barbarie ; sa vitesse varie entre 0,13 et 0,57 m/s. C'est à son existence que l'on attribue la faible élévation du seuil de l'embouchure du fleuve Sénégal qui aurait tendance à former un delta pendant les grandes marées.

La dérive littorale transporte et dépose les sables sur les plages ; elle connaît des périodes d'accélération et de ralentissement, en étroite relation avec les phases d'engraissement et de démaigrissement de la plage (GAC et al., 1982). La dérive littorale transporte dans la zone d'aboutissement du jet de rive les matériaux en suivant une direction en "dents de scie".

La dynamique marine joue un rôle fondamental sur le transport littoral des sédiments. Selon SURVEYER, NENNIGER et CHENEVERT (1972) "les calculs préliminaires fondés sur les relevés houlométriques indiquent que le transport littoral vers le sud sur la côte de Barbarie est en moyenne de 900 000 m³/an". Ce transport a pour effet de repousser l'embouchure du Sénégal et de la faire migrer vers le sud.

C - LES MAREES

1. Caractéristiques générales

La marée, phénomène périodique, abondamment décrit par GUILCHER (1954), est aisément observable sur la côte saint-louisienne. Elle résulte de l'attraction exercée sur les molécules d'eau des océans par la lune et le soleil : leurs mouvements relatifs, leur proximité et leur masse déterminent un balancement général de l'eau. La marée varie selon BRUNET-MORET (1970) en fonction :

- de la latitude du point considéré,
- et de la configuration des fonds marins au voisinage de ce point.

On peut distinguer trois ondes dans la marée :

- une onde annuelle et une onde semi-annuelle dues aux mouvements du soleil en déclinaison ;
- des ondes mensuelles et des ondes semi-mensuelles, dues aux mouvements en déclinaison et en phases de la lune (la période des variations lunaires est de 14 jours) ;

- des ondes diurnes ou à peu près journalières et des ondes semi-diurnes dues à la rotation de la terre sur elle-même.

Enfin signalons l'existence d'ondes extra-astronomiques, liées aux déplacements à peu près réguliers des grandes zones anticycloniques et cycloniques d'Afrique et de l'Océan Atlantique. Attractions lunaires et solaires déterminent un balancement général de l'eau des grands océans, la différence de niveau entre la haute et la basse mer dépendant beaucoup de l'orientation de la côte.

L'amplitude des marées est variable : la plus forte amplitude de marée s'observe lorsque la lune et le soleil sont en conjonction (Nouvelle lune) ou en opposition (Pleine lune). La haute marée ne se produit qu'un certain temps, les jours de vives-eaux sont ceux où les amplitudes de marées sont nettement supérieures à l'amplitude moyenne, la période de sizygie correspondant au point culminant de la grande marée. Les marées de mortes-eaux se produisent lorsque les deux astres sont en quadrature (premier et dernier quartier), les jours de mortes-eaux étant ceux où les amplitudes des marées sont nettement inférieures à l'amplitude moyenne.

Sur les côtes, les plus fortes amplitudes sont données en général par les ondes semi-diurnes et diurnes qui se composent pour former marées hautes et basses. Sur les côtes sénégalaises, les marées sont de faible marnage (marnage moyen de 1 m à 1,6 m en période de vives-eaux), ce qui a pour conséquence un faible développement des estrans. Les flux et les reflux de la marée déterminent des courants appelés respectivement flot et jusant ; ils sont généralement faibles et de l'ordre de 0,2 à 0,3 noeud.

2. La Marée Océanique

D'après les carnets océanographiques de la Capitainerie du port de Saint-Louis, l'onde de marée qui se manifeste sur la côte saint-louisienne vient du sud, le retard par rapport à Dakar est d'environ 34 minutes. Selon LOUISE (1919) "La durée de propagation entre Dakar et Saint-Louis varie dans les limites de 60 à 120 minutes lors des pleines mers et de 30 à 60 minutes pour les basses-mers" ; la presqu'île du Cap-Vert, orientée est-ouest, provoque des perturbations dans la progression de l'onde de marée venant du sud. La marée maritime à Saint-Louis est de type semi-diurne ("deux phases de flot et deux phases de jusant en un peu plus de 24 heures") ; l'allure graphique des variations de niveau est très voisine d'une sinusoïde (fig. 15) mais présente tout de même une composante diurne de l'ordre de 20 cm d'amplitude. Le mouvement des eaux, qui est biquotidien, ne se fait pas à intervalles de temps réguliers, mais avec des décalages importants : "la mer monte beaucoup plus lentement qu'elle ne descend". En effet, le temps qui sépare une basse-mer de la haute-mer suivante est de 7 heures, tandis que la descente de cette haute-mer à la basse-mer qui suit dure 5 h 45 mn (LOUISE, 1919). Les fluctuations du niveau de la mer à Dakar et à Saint-Louis sont indiquées dans le tableau 10 ci-dessous.

Tableau 10 : AMPLITUDE ET MARNAGE (m) A DAKAR ET ST-LOUIS
(LOUISE, 1919)

Marée	Dakar	Saint-Louis	Rapport St-Louis/Dakar
Haute-mer	1.38	1.16	0.84
Basse-mer	0.68	0.42	0.62
Marnage	0.70	0.74	1.05

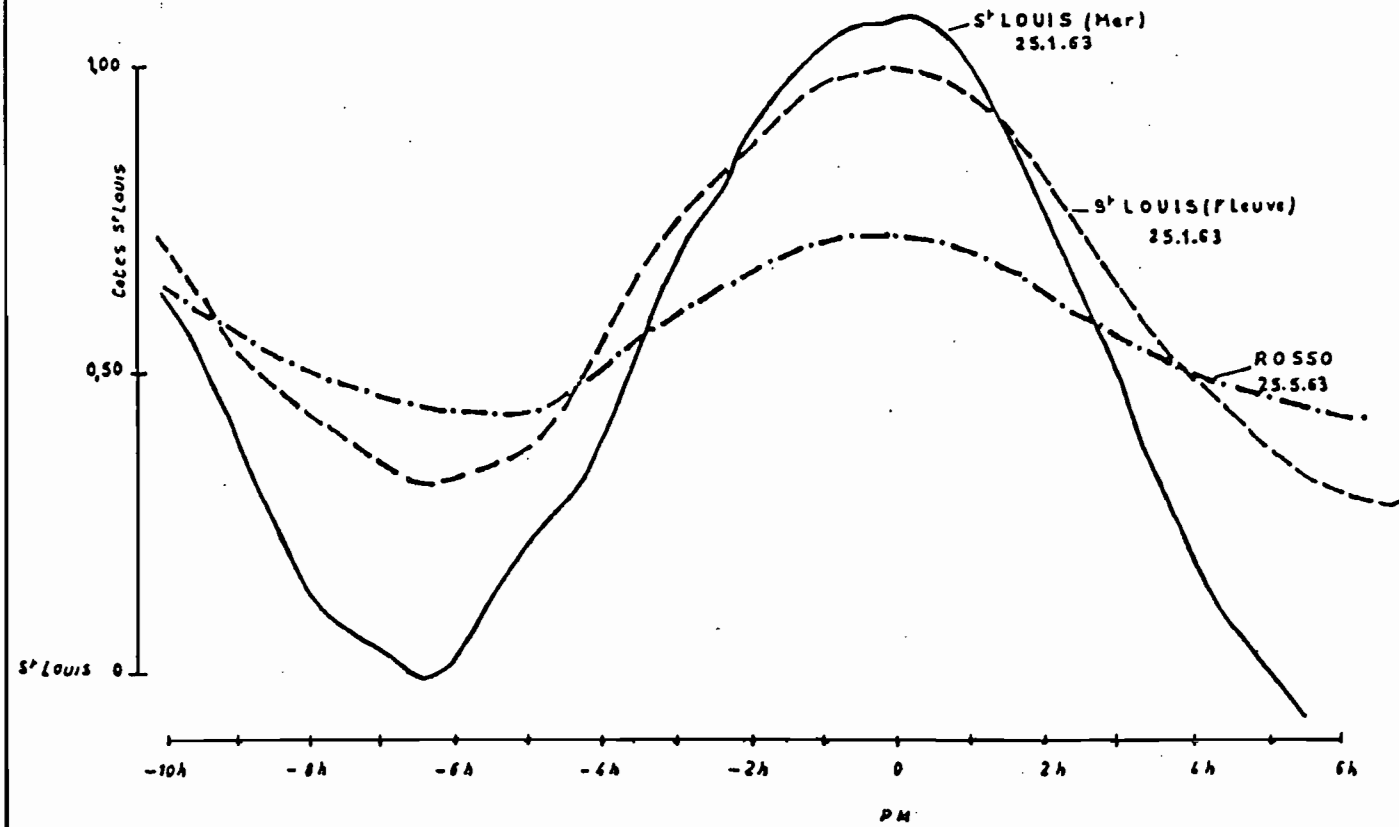
L'amplitude et la hauteur totale de la marée sont plus élevées à Dakar qu'à Saint-Louis ; par contre le marnage est plus important à Saint-Louis du fait d'une extension plus importante du plateau continental ; les observations ont d'ailleurs montré que le rapprochement de l'embouchure du Sénégal vers St-Louis se traduit par un accroissement du marnage.

En l'absence de marégraphe, l'amplitude en mer n'est pas connue avec précision. SURVEYER, NENNIGER et CHENEVERT (1972) donne les fluctuations suivantes : maximum : 1,8 m ; moyenne de vives-eaux : 1,20 m ; moyenne des mortes-eaux : 0,6 m. Elle diminue en principe lorsque l'onde remonte vers le nord. En marée de vives-eaux, le niveau de la mer à l'embouchure peut osciller entre -0,75 m et +0,75 m IGN (amplitude de 1,50 m). L'amplitude moyenne, après corrélation avec Dakar, serait de 1,15 m en vive-eau et de 0,55 m en morte-eau.

La marée est sujette à des variations momentanées sous l'action des vents :

- les vents du nord provoquent un abaissement du niveau moyen de la mer à la cote +0,60 m ;
- pendant la période de mousson, la côte du niveau de la mer s'élève à 0,80 m, élévation du niveau moyen qui se comprend d'autant plus que l'onde marée qui se propage au large de la côte de Barbarie vient du sud.

Fig.15_COURBES DE MARÉE



3. La Marée fluviale

Dans la partie estuarienne d'un fleuve, l'onde de marée qui se produit devant l'embouchure donne naissance à une onde dérivée qui remonte le fleuve vers l'amont : c'est la marée fluviale issue de la marée océanique. Le lit du Sénégal, sur une longueur d'environ 450 km depuis l'embouchure, se situe nettement en dessous du niveau moyen de l'Océan. Il en résulte pour les sections d'écoulement du delta une situation particulière créée par la présence de deux forces antagonistes : le débit du fleuve d'une part et la poussée océanique d'autre part. Cette dernière tend à imposer un régime cyclique à l'écoulement fluvial où surtout en période des basses-eaux la dynamique fluviale se manifeste par une opposition flots et jusants à amplitude faible à St-Louis. L'importance de la pénétration de la marée vers l'amont du fleuve va alors dépendre :

- des migrations de l'embouchure : sa mobilité et les variations qu'elle entraîne dans la section au débouché dans l'Océan font sentir leurs effets dans tout le delta,
- du marnage plus important par suite de la grande extension vers le large du plateau continental,
- de l'écart de temps entre la durée du jusant et celle du flot (GUILCHER, 1979).

En juin, avant l'arrivée de l'onde de crue du fleuve, l'écart entre jusant (6 h 48 mn) et flot (5 h 48 mn) est en moyenne d'une heure au niveau de St-Louis. En juillet, lors du début des hautes-eaux, l'écart peut atteindre 3 heures (flot 4 h 47 mn et jusant : 7 h 30 mn). La plus longue durée du jusant pendant l'étiage du fleuve est due selon GUEYE (1980) à l'étranglement de la barre par suite de l'absence d'un courant fluvial fort pour maintenir une bouche à section plus large. En période de hautes-eaux, au contraire, le courant fluvial est assez fort pour démanteler la barre à l'embouchure.

Dans cette partie maritime du fleuve (de l'embouchure jusqu'au point où, pendant les périodes d'étiage, les effets des plus grandes marées sont ressentis), qui peut s'étendre selon les années jusqu'à Diouldé Diabé à 435 km de l'embouchure, le débit du fleuve (faible ou nul lors des basses-eaux), la pente et la morphologie du lit sont autant de facteurs qui interviennent dans la pénétration et la propagation du biseau salé vers l'amont du fleuve.

a) La marée fluviale dans la zone estuarienne

Selon la SOGREAH (1961) "dans les 20 derniers km du parcours du fleuve avant St-Louis, dans cette zone au caractère estuarien marqué, la surélévation quotidienne du plan par la conjugaison des forces de l'écoulement de crue et des phénomènes de marée devient sensible" et donne les indications suivantes :

- l'amplitude de la marée au large des côtes diminue de 10 cm en franchissant l'embouchure et est réduite de moitié à la hauteur de la ville de St-Louis ;
- la cote de la basse-mer à l'embouchure est en moyenne semblable à celle de St-Louis et est située en dessous du niveau des basses-mers au large ;
- pendant les crues du fleuve, l'amplitude de la marée à St-Louis peut être réduite à 10 cm (lors de la crue de 1950, par exemple, le plan d'eau se stabilisa fréquemment entre +1,30 m et +1,50 m ; en octobre de la même année, le niveau se maintient entre +1,70 m et +1,80 m). Ces faibles variations sont toutefois peu fréquentes et constituent des anomalies liées à la coïncidence en période de crue de marées de mortes-eaux et d'écoulements fluviaux sans à-coup. Le tableau résume pour différentes situations observées à l'amont (à Dagana) les cotes moyennes journalières à St-Louis en fonction du coefficient de marée et de la position de l'embouchure.

Tableau 11 : COTES MOYENNES JOURNALIERES DU PLAN D'EAU A ST-LOUIS - SOGREAH, 1961

1. Les cotes moyennes journalières du plan d'eau à St-Louis (cotes en IGN)

D A G A N A		SAINT-LOUIS	
2 m 3,70 m		0,28 m ou 0,64 IGN 0,52 m ou 0,70 IGN	
2. Si l'on considère seulement les jours où le coefficient de marée en mer est 70, ce qui élimine les variations sinusoïdales du niveau marin, la fluctuation quotidienne du plan d'eau à Saint-Louis peut être :			
Pour H à Dagana	Amplitudes de marées à Saint-Louis	Cotes marées basses	Cotes marées hautes
2 m	environ 0,40 m	entre 0,20 et 0,40 soit imprécision de	entre 0,60 et 0,80 0,20
3,70 m	environ 0,30 m	entre 0,40 et 0,55 soit imprécision de	entre 0,75 et 0,90 0,15
3. Si l'on tient compte du relèvement général du plan d'eau en fonction de l'éloignement de l'embouchure, les cotes journalières en période à coefficient 70 en mer peuvent varier à Saint-Louis de :			
Pour H à Dagana	Débouché km 16,5	Débouché km 27	
2,00 m	0,55	0,85	
3,70 m	1,00	1,15	

La déformation accidentelle des ondes de marée dans le fleuve est donc importante et les variations locales, d'ordre météorologique (vents et pressions entre autres) rendent trop imprécises les relations entre les niveaux marins prévus et les niveaux des hautes-eaux à St-Louis. ROCHETTE (1974) signale que "la forme de la marée fluviale au pont FAIDHERBE est déjà légèrement différente. Flot et jusant ont la même durée, mais on observe une légère dissymétrie de la courbe" (fig. 15).

La position et l'état de l'embouchure ont aussi une influence importante sur les variations de niveau dans le fleuve ; ROCHETTE (1974) mentionne : "qu'entre l'embouchure et Diaouar, la réduction d'amplitude est, par une marée moyenne de vive-eau, d'environ 42 % sur 115 km, et seulement de 28 % entre Diaouar et Serpoli distants de 250 km", et qu'en se propageant vers l'amont du fleuve, les effets de l'onde de marée sur le niveau du plan d'eau fluvial s'atténuent progressivement.

a) Propagation de la marée dans la basse vallée du fleuve

L'onde de marée peut se propager dans le fleuve jusqu'au village de Diouldé-Diabé situé à 450 km de l'embouchure par suite de la position du lit en contrebas de l'Océan.

- L'amortissement :

L'amortissement de la marée est en étroite relation avec le débit fluvial. Selon ROCHETTE (1964), "plus le débit fluvial est élevé, plus l'amortissement de l'onde considérée est importante et plus la longueur du bief soumis à cette onde est faible."

La réduction d'amplitude, en période de basses-eaux, est plus importante en vive-eau qu'en morte-eau. Cette réduction d'amplitude :

- . est maximale entre la mer et Gandiole (réduction de 33 % pour la marée moyenne de vive-eau et de 20 % pour la marée moyenne de morte-eau) ;
- . l'amortissement est plus faible entre Gandiole et Saint-Louis (7 % environ) et diminue encore plus à l'amont ;
- . le taux d'amortissement varie assez brusquement au niveau de Diaouar ; il est de 0,336 % par km en aval et de 0,112 % par km à l'amont.

L'amortissement dépend également de la section du fleuve qui tend à décroître de l'embouchure vers l'amont.

- La vitesse de propagation :

En assimilant l'onde de marée semi-diurne pénétrant dans le fleuve à une onde de translation, la vitesse de propagation théorique est, d'après BRUNET-MORET (1970), donnée par la relation suivante :

$$V = \sqrt{g(H + h)} - u$$

g, accélération de la pesanteur

H, profondeur moyenne de la section (pour h = 0)

h, hauteur de l'onde de marée

u, vitesse moyenne dans la section du courant d'eau douce.

Dans l'estuaire, pendant la saison des basses-eaux, l'eau étant exclusivement salée, la formule peut se réduire à sa plus simple expression :

$$V = \sqrt{gH} \text{ , la vitesse de propagation n'est fonction que de la profondeur H.}$$

La vitesse de propagation de l'onde de marée est maximale à marée haute et minimale à marée basse ; cette variation du temps de propagation s'explique par le fait que l'onde de marée en se déformant lors de sa progression vers l'amont entraîne un accroissement sensible de la durée du jusant par rapport à celle du flot. ROCHETTE (1964) aboutit aux résultats suivants (tableau 12) :

Tableau 12 : TEMPS DE PROPAGATION DE LA MAREE DANS LE DELTA DU SENEGAL
(ROCHETTE, 1974)

Stations	Distance de l'embouchure (km)	Temps de propagation		Vitesse partielle de propagation à marée haute (m/s)
		Marée haute	Marée basse	
Gandiole	2,5	20 mn	(25 mn)	2,08
Saint-Louis	18	1 h 35 mn	1 h 45 mn	3,44
Maka	51	3 h 05 mn	3 h 20 mn	6,11
Débi	81	4 h 45 mn	4 h 55 mn	5,00
Diaouar	115	6 h 15 mn	6 h 40 mn	6,30
Richard-Toll	158	8 h 00 mn	8 h 20 mn	6,82

De ces observations, on remarque :

- que la vitesse de propagation croît brusquement en amont de St-Louis, résultat vraisemblablement lié à la réduction de la section du fleuve. Nous verrons ultérieurement les anomalies introduites par la présence de seuil rocheux ;
- que la vitesse de propagation de la marée haute est toujours plus rapide que celle observée à la marée basse, la différence de temps étant encore plus importante lorsque les écoulements du fleuve ne sont pas négligeables. Notons aussi que le rétrécissement de l'embouchure se traduit par un flux d'eau salée plus facile dans le sens océan-fleuve.

- *Caractéristiques des courants de marée :*

Ce sont les courants de flot et de jusant. Lors du jusant, la vitesse reste toujours plus forte en surface qu'au fond ; elle varie dans le temps et d'une rive à l'autre.

Selon P. LOUISE (1919), les rapports entre la vitesse en surface et la vitesse au fond du lit sont les suivants :

	Rive droite	Rive gauche
au début du flot :	1,42	1,90
en plein jusant :	1,19	1,42
à la fin du jusant :	1,53	1,13

Aux abords immédiats du fleuve Sénégal, l'intensité du flot reste toujours plus grande en rive gauche qu'en rive droite. Les vitesses maxima sont en rive gauche de 0,60 m/s au fond et de 0,30 m/s en surface ; pour la rive droite, de 0,48 m/s et 0,32 m/s. Il faut signaler que le premier flot se manifeste d'abord au fond sur toute la largeur du fleuve.

4. Les courants fluviaux

Les courants fluviaux sont variables dans le temps et dans l'espace. Ils sont la résultante des effets antagonistes ou conjugués de l'onde de marée et de l'onde de crue.

a) En saison sèche

Le débit du fleuve est extrêmement faible ou presque nul et les courants sont exclusivement tributaires de la marée : la vitesse de déplacement des masses d'eau salées augmente avec le flot, diminue avec le jusant et est voisine de zéro au moment de l'étale bas. Les vitesses les plus importantes sont observées au voisinage de la marée haute et de la marée basse (à l'embouchure, les vitesses maximum se présentent 1 heure avant la pleine mer ; à St-Louis, sur le grand bras 1 heure $\frac{1}{4}$ avant la pleine mer).

Les mesures réalisées par LOUISE (1919) ont donné les résultats suivants :

- à l'embouchure : 0,35 m/s en surface et 0,60 m/s en profondeur,
- sur le petit bras à St-Louis : 0,25 m/s (en saison sèche),
- sur le grand bras à St-Louis : 0,80 m/s en surface et 1,25 m/s au fond (flot),
1,48 m/s en surface et 1,0 m/s au fond (1 h 30') avant la basse-mer.

SURVEYER, NENNIGER et CHENEVERT (1972) ont signalé, qu'en 1971, au plus fort des marées de vives-eaux, les vitesses maximales ascendantes ou descendantes étaient de 45 cm/s et de 20 à 20 cm/s durant les marées de mortes-eaux : près de St-Louis, les vitesses sont très faibles pendant la saison sèche (20 à 30 cm/s) alors que les vitesses maximales peuvent atteindre 50 à 75 cm/s. La dissymétrie de l'onde de marée renforce quelque peu les vitesses du jusant qui sont de 1,2 à 1,5 fois les valeurs mesurées au flot.

b) Renversement du courant

Le renversement observé dans tous les postes ne se présente pas à la mi-marée mais en général au voisinage de la pleine-mer ou de la basse-mer. Selon LOUISE (1919) :

- à l'embouchure, le renversement du flot au jusant se produit en surface 1 h 48 mn après la pleine-mer et au fond une demi-heure plus tard. Le courant de flot, au contraire, commence environ 2 h 45 mn après la basse-mer ;
- à St-Louis, ce renversement a lieu 1 h 36 mn après la pleine-mer avec environ 10 mn de retard entre le fond et la surface ;
- à Débi (km 81), le renversement du flot au jusant se produit 1 h 48 mn après la haute marée dans ce poste et sans retard sensible entre le fond et la surface.

c) En période de crue

Pendant la saison des pluies, les écoulements dans le fleuve contrecarrent la remontée d'eau salée. Le renversement du courant significatif de l'intrusion marine ne se produit plus lorsque le débit franchit le seuil de 500 m³/s (SURVEYER, NENNIGER et CHENEVERT, 1972). Lors des grandes marées, l'eau reste donc douce en amont de l'embouchure si le débit du fleuve se maintient au-dessus de 1 000 m³/s.

II - L'HYDROLOGIE CONTINENTALE

A - LE REGIME DU FLEUVE SENEGAL

Le régime du fleuve Sénégal a été étudié à partir de deux stations-clefs de la vallée : Bakel à l'amont et Dagana à l'aval.

La station de Bakel a été exploitée sans interruption depuis 1901. Le zéro de l'échelle actuelle est à la cote 11,16 m IGN. L'étude critique des anciens relevés (période 1901-1950) permet aujourd'hui de disposer pour cette station, située à l'exutoire du haut-bassin, des hauteurs d'eau et des débits journaliers sur 80 ans (1903-1983).

La station de Dagana a été choisie, de préférence à celle de St Louis trop influencée par le phénomène journalier de la marée, pour préciser l'importance des volumes d'eau à la sortie de la basse-vallée du fleuve. Les observations des variations du plan d'eau, qui datent de 1904, présentent quelques lacunes annuelles (1912-1913-1915) et surtout journalières lorsqu'en saison sèche, la station subit l'influence de l'intrusion saline. Le zéro de l'échelle actuelle est à la cote -0,44 m IGN.

FRECAUT (1981) a classé le Sénégal dans "les régimes pluviaux tropicaux humides boréaux". Ces régimes fluviaux sont déterminés essentiellement par le rythme pluviométrique saisonnier : ainsi le Sénégal, qui pénètre profondément en domaine sahélien, connaît un régime tropical humide simple, homogène, monomodal, "mimant" avec un faible décalage la répartition des précipitations sur le bassin amont.

Le régime tropical humide boréal du Sénégal, alimenté par les eaux du haut-bassin, comporte deux saisons bien différenciées :

- une période de hautes-eaux de juin-juillet à octobre-novembre, avec un maximum qui se situe généralement dans la seconde quinzaine de septembre ou dans les premiers jours d'octobre ;
- une période de basses-eaux de novembre-décembre à mai-juin, pendant la saison sèche, avec une décroissance régulière des débits.

Sur le haut-bassin versant, limité à la station-clef de Bakel, on distingue trois régimes caractéristiques : le régime tropical humide de "transition", le régime tropical "pur" et le régime sahélien.

1. Le régime tropical humide de "transition"

Le régime tropical humide de "transition" concerne une superficie de l'ordre de 28 000 km² où les pluies annuelles sont supérieures à 1 250 mm. Il affecte les 2/3 du Bafing, les 2/5 de la Falémé et le cours supérieur du Bakoye. C'est un régime caractérisé par des variations brutales et une très grande irrégularité dans la date d'apparition des maximum et des minimum mensuels : les faibles réserves en eau des sols et du sous-sol se traduisent par des étiages très prononcés.

2. Le régime tropical humide "pur"

Il se différencie du précédent par une saison des hautes-eaux moins longue et une durée plus importante de la saison des basses-eaux. Ce régime concerne une superficie de 108 000 km², soit environ 45 % du bassin. Les pluies annuelles sont comprises entre 1 250 mm et 750 mm, ou le plus souvent sont inférieures à 1 000 mm. Le régime tropical humide "pur" s'étend sur le bassin inférieur du Bafing, les 3/5 de la Falémé, le Bakoye et l'intégralité du Baoulé. Les hautes-eaux, qui durent de 3 à 4 mois (maximum en septembre-octobre), se poursuivent par une longue saison des basses-eaux où persiste un faible écoulement. Le régime tropical pur apparaît selon FRECAUT (1981) "comme plus irrégulier et surtout comme plus immodéré". Le rapport entre les modules extrêmes est de 250 à Galougo, sur le Sénégal supérieur, et de 354 pour le Sénégal moyen à Bakel.

3. Le régime sahélien

Il concerne toute la zone du bassin versant où la pluviométrie est inférieure à 750 mm (134 000 km², 40 % de la superficie totale). Ce régime s'étend à la totalité du bassin de la Kolombiné, du Karakoro, du Gorgol et à la "Vallée du Serpent" pour le Baoulé. Il faut signaler que les apports du régime sahélien sont à peu près négligeables ; les écoulements devenant de plus en plus sporadiques au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers le nord.

Le Sénégal, dont le régime est essentiellement de type "tropical de transition" et "tropical pur", pénètre très profondément en domaine sahélien pour parvenir à son débouché sur l'Océan. En aval de Bakel, le régime reflète étroitement les conditions hydrologiques de l'amont avec des modifications mineures introduites par la présence de vastes plaines d'inondations, de nombreux défluent, de l'évapo-transpiration et de l'absence d'affluents à écoulements importants.

La "dégradation hydrologique" est assez marquée sur le Sénégal qui se comporte, selon FRECAUT (1981), comme un "élément étranger en domaine sahélien où son régime diffère fondamentalement de celui des cours d'eau indigènes."

B - L'ABONDANCE FLUVIALE

1. Bilan moyen annuel des écoulements

C'est à ROCHETTE (1968) que l'on doit la valorisation des anciens relevés et la meilleure estimation possible des écoulements du Sénégal à Bakel et à Dagana depuis l'origine des observations communes en 1903 jusqu'en 1965. Les travaux plus récents de GUIGUEN et LERIQUE (1977), et surtout de OLIVRY (1982, 1983) ont conduit à affiner considérablement l'étalonnage de la station de Bakel en précisant la non-univocité de la courbe de tarage, c'est-à-dire les relations différentes entre hauteurs d'eau et débits en crue et en décrue. A Dagana, les écoulements sont déterminés en période de crue et partiellement en décrue par un faisceau de courbes d'étalonnage. Lorsque, à cette station, le niveau descend en dessous de 1,20 m, le tarissement est presque totalement masqué par les oscillations de la marée, et les débits des basses-eaux ne peuvent être évalués qu'en estimant le temps de propagation de l'écoulement depuis les stations situées plus à l'amont. La formule de propagation des débits dans la vallée en l'absence de débordements (ici entre Bakel et Dagana) a été établie par ROCHETTE (1964) :

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

Q_{B0} et Q_{D0} représentent respectivement les débits à Bakel et à Dagana le jour j (ce jour j variable chaque année correspond au jour où le débit à Dagana devient inférieur à 600 m³/s) ; Q_{B1} et Q_{D1} , les débits dans les mêmes sections à l'instant $j + 1$.

avec : $Q_{B1} = Q_{B0} - \Delta Q$ (en période de tarissement $Q_{B1} < Q_{B0}$).

$$\begin{aligned} Q_{D1} &= -0,2 (Q_{B0} - \Delta Q) + 0,28 Q_{B0} + 0,92 Q_{D0} \\ &= 0,08 Q_{B0} + 0,2 \Delta Q + 0,92 Q_{D0} \end{aligned}$$

le terme $0,2 \Delta Q$ étant négligeable devant Q_{B0} (il ne représente lors du tarissement que de 0 % à 5,8 % de Q_{B0}) :

$$Q_{D1} = 0,08 Q_{B0} + 0,92 Q_{D0} \text{ (formule simplifiée).}$$

Il est certain que les écoulements dans le bief aval ne peuvent qu'être estimés. Ceci tient d'abord aux difficultés liées à leur évaluation en période de tarissement et ensuite à l'impossibilité de les préciser lorsque la nouvelle onde de crue atteint déjà Bakel à l'amont, alors que la précédente manifeste toujours ses effets à Dagana (durant cette dernière phase, la formule de propagation n'est plus valable).

On dispose ainsi d'une série de valeurs complètes de 1903-04 à 1983-84, période d'observation de 81 années la plus longue sur un fleuve de la frange sahélienne. A Bakel, le module moyen interannuel s'élève à 715 m³/s, soit un écoulement moyen de $22,55 \cdot 10^9$ m³/an ; à Dagana, le module moyen interannuel est de 640 m³/s correspondant à un écoulement moyen de $20,17 \cdot 10^9$ m³/an.

Tableau 13 : DEBITS MOYENS MENSUELS (m³/s) A BAKEL ET A DAGANA POUR LA PERIODE 1903-1983
() % MENSUEL DE L'ECOLEMENT ANNUEL

Stations	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	Année
Bakel	8,20	96,3	552	2188	3147	1537	530	232	127	74,2	40,3	16,9	714,9
%	(0,1)	(1,11)	(6,55)	(25,98)	(36,17)	(18,25)	(6,10)	(2,76)	(1,51)	(0,80)	(0,48)	(0,19)	100
Dagana	14,8	28,5	393	1167	1884	2111	1280	408	181	101	54,8	26,9	639,7
%	(0,20)	(0,37)	(5,21)	(15,49)	(24,19)	(28,02)	(16,43)	(5,42)	(2,40)	(1,20)	(0,73)	(0,34)	100

Les variations mensuelles dans les écoulements sont données dans le tableau 13 et illustrées par la figure 16. On remarque :

- qu'en année moyenne, les entrées et les sorties d'eau aux biefs amont et aval sont du même ordre de grandeur,
- que les mois d'août, de septembre, d'octobre et novembre voient transiter près de 85 % des écoulements.

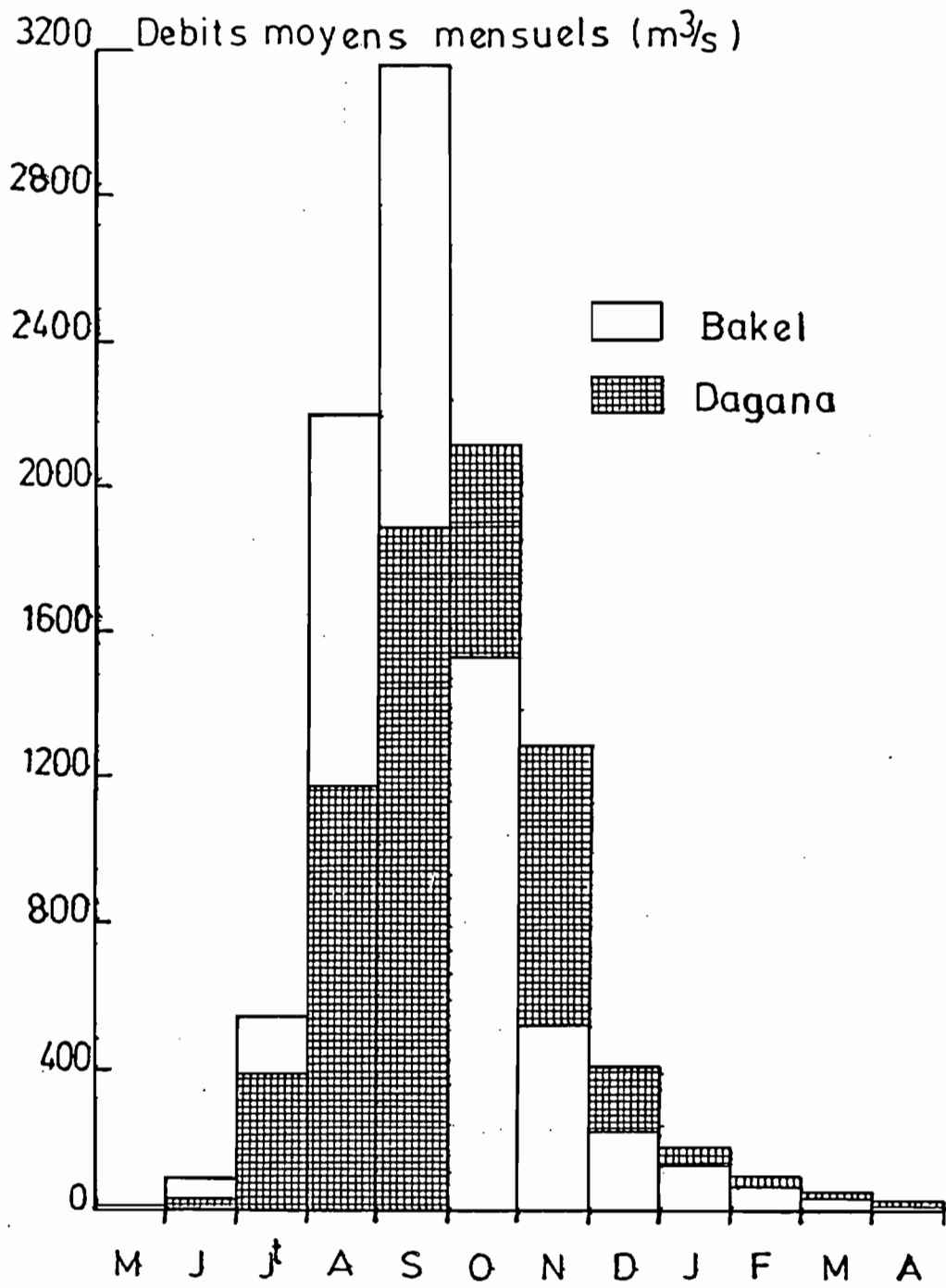


Fig 16: Evolution des debits moyens mensuels a
Bakel et Dagana de 1903 a 1983

Tableau 14 : Evolution des débits moyens mensuels à Dagana de 1903 à 1983.

Cycle Hydrologique	N	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	Module
1903 - 1904	(15)	(30)	(400)	1162	1951	2035	(750)	(370)	(180)	(110)	(60)	(30)	(588)
1904 - 1905	(15)	(15)	(389)	1170	2217	2199	998	(400)	(220)	(130)	(75)	(40)	(693)
1905 - 1906	(18)	(87)	(512)	1450	1936	2153	1992	(600)	(230)	(130)	(75)	(40)	(771)
1906 - 1907	(20)	(42)	(617)	1765	2840	2755	1761	461	(250)	(145)	(80)	(40)	(901)
1907 - 1908	(20)	(15)	(245)	683	1534	1671	738	471	(280)	(160)	(90)	(45)	(497)
1908 - 1909	(20)	(20)	(485)	1328	2107	2450	(1287)	(390)	(195)	(110)	(65)	(35)	(700)
1909 - 1910	(20)	(43)	774	1607	2357	2595	1376	(430)	(210)	(120)	(65)	(35)	(806)
1910 - 1911	(20)	(27)	591	1335	2095	2352	(999)	(340)	(180)	(100)	(60)	(30)	(686)
1911 - 1912	(15)	(30)	(400)	992	1778	1732	(719)	(350)	(185)	(105)	(60)	(30)	(534)
1912 - 1913	(15)	(15)	(359)	1050	1663	1842	(815)	(380)	(205)	(115)	(65)	(35)	(549)
1913 - 1914	(20)	(30)	(200)	(543)	1066	910	(400)	(170)	(80)	(45)	(20)	(12)	(292)
1914 - 1915	(12)	((12))	((450))	(993)	1448	1288	(555)	(110)	(170)	(105)	(60)	(30)	(455)
1915 - 1916	(15)	(50)	(490)	(1136)	(1937)	(2054)	(700)	(370)	(160)	(90)	(50)	(25)	(587)
1916 - 1917	(12)	(6)	(421)	1268	1915	2303	1271	(300)	(175)	(105)	(60)	(30)	(658)
1917 - 1918	(12)	(7)	(97)	1069	2087	1555	(914)	(290)	(150)	(85)	(50)	(25)	(602)
1918 - 1919	(12)	(60)	(493)	1532	2343	3033	7000	(550)	(280)	(150)	(80)	(40)	(885)
1919 - 1920	(20)	(57)	(340)	1173	1859	1884	(708)	(300)	(170)	(100)	(60)	(30)	(559)
1920 - 1921	(15)	(60)	(600)	1262	2254	2676	(1294)	(400)	(240)	(140)	(75)	(40)	(769)
1921 - 1922	(20)	(70)	(318)	841	1744	1571	(466)	(225)	(130)	(75)	(45)	(20)	(458)
1922 - 1923	(20)	(20)	(332)	1276	2224	3140	2111	(620)	(240)	(140)	(80)	(40)	(862)
1923 - 1924	(20)	(35)	(558)	1273	1948	2358	1504	(451)	(205)	(120)	(65)	(35)	(716)
1924 - 1925	(25)	(100)	(555)	1702	2471	3088	2007	(616)	(330)	(190)	(100)	(50)	(969)
1925 - 1926	(25)	(59)	(494)	1701	1983	2304	2022	(520)	(280)	(160)	(95)	(45)	(773)
1926 - 1927	(22)	(24)	(435)	1168	1586	1469	(654)	(400)	(195)	(110)	(65)	(35)	(516)
1927 - 1928	(17)	(8)	(403)	1275	2077	2693	2359	(908)	(320)	(180)	(100)	(50)	(866)
1928 - 1929	(25)	(15)	(388)	1202	2220	2783	2002	(569)	(290)	(160)	(90)	(45)	(818)
1929 - 1930	(25)	(160)	749	1365	2235	2670	1722	(440)	(220)	(125)	(70)	(35)	(816)
1930 - 1931	(15)	(75)	(546)	1251	2185	2507	1723	(450)	(240)	(140)	(80)	(40)	(773)
1931 - 1932	(20)	(38)	(597)	1500	1734	2184	1514	(411)	(230)	(130)	(75)	(40)	(708)
1932 - 1933	(20)	(51)	(571)	1576	2245	2546	1240	(350)	(190)	(115)	(65)	(35)	(754)
1933 - 1934	(20)	(25)	820	1774	2448	2619	1115	(310)	(170)	(105)	(60)	(30)	(802)
1934 - 1935	(15)	(7)	(178)	1214	2130	2569	1459	(350)	(190)	(110)	(65)	(35)	(700)
1935 - 1936	(20)	(15)	(608)	1453	2345	2958	2044	(540)	(230)	(130)	(75)	(40)	(873)
1936 - 1937	(20)	(10)	(414)	1434	2606	3184	2096	(626)	(267)	(155)	(90)	(40)	(913)
1937 - 1938	(20)	(12)	(214)	1062	1934	2292	1299	(380)	(190)	(105)	(60)	(30)	(635)
1938 - 1939	(15)	(6)	(524)	1165	1941	2450	2120	(628)	(220)	(125)	(70)	(35)	(778)
1939 - 1940	(20)	(12)	(236)	1040	1886	2065	(1000)	(350)	(185)	(90)	(60)	(30)	(582)
1940 - 1941	(15)	(30)	(109)	(788)	1559	1395	925	(310)	(180)	(100)	(55)	(25)	(457)
1941 - 1942	(12)	(6)	(70)	807	1565	1487	(487)	(190)	(110)	(65)	(35)	(15)	(406)
1942 - 1943	(7)	(4)	(211)	1027	1758	1180	(380)	(180)	(110)	(65)	(40)	(15)	(417)
1943 - 1944	(12)	(8)	(262)	1107	1940	2292	1390	(300)	(160)	(95)	(55)	(25)	(638)
1944 - 1945	(12)	(6)	(134)	(642)	1351	1173	(577)	(240)	(140)	(80)	(45)	(20)	(368)
1945 - 1946	(10)	(40)	(250)	1278	2195	2843	1759	(400)	(180)	(95)	(55)	(25)	(764)
1946 - 1947	(15)	(8)	(153)	1185	2002	2386	1697	(470)	(200)	(110)	(65)	(30)	(692)
1947 - 1948	(15)	(7)	(206)	(1037)	1866	2135	(871)	(300)	(155)	(90)	(50)	(25)	(564)
1948 - 1949	(10)	(5)	(355)	1049	1674	1775	903	(340)	(155)	(90)	(50)	(25)	(569)
1949 - 1950	(10)	(10)	(170)	992	1867	1686	(521)	(210)	(120)	(70)	(40)	(20)	(478)
1950 - 1951	(12)	(5)	(316)	1220	2203	2986	2110	(726)	(212)	(125)	(65)	(30)	(837)
1951 - 1952	(21)	(30)	(285)	1018	1736	2210	2490	1415	(328)	(187)	(95)	(42)	(822)
1952 - 1953	(15)	(10)	(324)	1050	1646	2168	2218	(591)	(170)	(100)	(55)	(30)	(702)
1953 - 1954	(12)	(36)	(540)	1224	1771	2091	(1039)	(350)	(200)	(120)	(60)	(25)	(625)
1954 - 1955	(25)	(152)	(545)	1613	2327	2652	1625	(501)	(285)	(180)	(100)	(60)	(850)
1955 - 1956	(30)	(93)	533	1571	2275	2778	2268	(743)	(292)	(196)	(100)	(55)	(912)
1956 - 1957	(25)	(12)	(337)	1177	2070	2680	2093	(537)	(243)	(133)	(80)	(40)	(805)
1957 - 1958	(25)	(24)	(611)	1272	2135	2753	2408	(910)	(291)	(171)	(95)	(50)	(894)
1958 - 1959	(30)	(53)	570	1367	2328	2967	1993	(650)	(325)	(214)	(113)	(60)	(892)
1959 - 1960	(18)	(83)	(492)	1075	1786	2505	1414	(345)	(217)	(128)	(70)	(30)	(698)
1960 - 1961	(15)	(7)	(489)	1282	1859	2097	1109	(322)	(192)	(107)	(60)	(25)	(633)
1961 - 1962	(15)	(7)	(460)	1499	2208	2695	1440	(332)	(172)	(105)	(60)	(25)	(755)
1962 - 1963	(10)	(12)	(383)	1236	1978	2459	1763	(451)	(228)	(124)	(65)	(30)	(731)
1963 - 1964	(15)	(7)	(149)	1192	1798	2181	1778	(423)	(200)	(110)	(55)	(25)	(661)
1964 - 1965	(15)	(47)	(497)	1420	2135	2871	2138	(473)	(250)	(155)	(85)	(40)	(847)
1965 - 1966	15	15	300	1220	2210	3130	2000	400	220	130	70	35	822
1966 - 1967	(15,0)	(15,0)	(350)	919	1708	2225	2634	1081	246	135	80,3	40,7	798
1967 - 1968	15,5	(50)	(450)	1330	2149	3017	2923	(979)	296	166	104,4	52,9	962
1968 - 1969	(23,9)	(40,0)	(400)	940	1315	1348	479	222	121	70,4	37,2	15,0	420
1969 - 1970	(4,82)	(1,70)	(475,4)	1211	1910	2300	2010	(757)	(239)	(121)	(69,2)	34,0	764
1970 - 1971	12,6	(30)	(300)	1238	1996	1925	577	208	108,0	65,7	38,2	16,8	546
1971 - 1972	6,40	2,04	(500)	1274	2073	2067	557	184	97,3	58,6	31,7	9,15	570
1972 - 1973	1,94	1,00	(300)	678	1013	635	362	149	74,2	37,5	16,1	4,63	274
1973 - 1974	0,90	(100)	494	1073	1590	879	300	111,2	54,2	26,7	12,1	3,06	385
1974 - 1975	1,0	1,0	(320)	1183	1995	2104	740	224	86,3	45,3	22,5	7,93	564
1975 - 1976	2,37	0,68	(300)	1214	1599	1746	637	227	91,7	46,8	21,1	6,36	490
1976 - 1977	(1,40)	(2,0)	(300)	963	1102	1009	776	313	135	63,1	30,0	11,1	394
1977 - 1978	(2,8)	(1,2)	(150)	(506)	982	912	347	112	45,8	19,8	7,04	1,77	258
1978 - 1979	(0,85)	(0,50)	(200)	1044	1277	1271	587	309	98,2	47,5	17,7	5,75	407
1979 - 1980	1,92	(1,2)	(167)	731	1013	605	423	173	63,5	28,1	9,06	2,53	269
1980 - 1981	1,0	0,4	(300)	945	1362	908	770	123,4	54,7	25,0	8,69	2,55	327
1981 - 1982	(0,70)	(0,3)	(150)	1131	1566	970	404	143	60,8	27,9	9,76	2,88	374
1982 - 1983	0,91	0,49	156	637	1109	637	313	114	47,7	21,3	7,70	2,12	254
1983 - 1984	0,75	(0,12)	(340)	591	734	639	252	85,0	37,2	16,6	6,00	2,34	226
Moyenne	14,8	28,5	393	1167	1884	2111	1290	408	181	101	54,8	26,9	641,3

Tableau 15 : Evolution des débits moyens mensuels à Bakel de 1903 à 1983.

Cycle	M	J	JL	A	S	O	N	D	J	I	M	A	Module
1903 - 1904	(10)	(120)	746	1937	2535	1060	476	(202)	(174)	(74)	(40)	(15)	(631)
1904 - 1905	(10)	(29)	682	2626	3187	1113	583	272	144	86	(50)	(22)	(737)
1905 - 1906	(10)	(735)	(403)	905	2740	2284	1607	(375)	(192)	(113)	(64)	(30)	(874)
1906 - 1907	(15)	(143)	1121	5831	4184	1607	825	(465)	(250)	(140)	(80)	(20)	(1233)
1907 - 1908	(10)	(120)	(403)	905	2740	2284	1607	(375)	(192)	(113)	(64)	(30)	(874)
1908 - 1909	(10)	(81	799	2195	3691	1305	(500)	(725)	(130)	(75)	(42)	(18)	(767)
1909 - 1910	(10)	(286)	949	2967	4144	1296	590	(755)	(140)	(83)	(46)	(20)	(902)
1910 - 1911	(10)	(590)	(590)	2134	3004	1221	472	(215)	(170)	(38)	(16)	(16)	(670)
1911 - 1912	(10)	(170)	(590)	1455	2436	930	431	(220)	(125)	(72)	(38)	(16)	(537)
1912 - 1913	(10)	(120)	(590)	1455	2436	930	431	(220)	(125)	(72)	(38)	(16)	(537)
1913 - 1914	(10)	(120)	(333)	704	918	680	(251)	(121)	(64)	(30)	(4)	(4)	(272)
1914 - 1915	(10)	(120)	(590)	1455	2442	1261	(350)	(190)	(105)	(62)	(34)	(12)	(592)
1915 - 1916	(10)	(20)	(293)	1373	3393	1185	(330)	(165)	(100)	(58)	(32)	(11)	(647)
1916 - 1917	(5)	(4)	726	1732	3223	1664	(400)	(210)	(120)	(70)	(38)	(16)	(691)
1917 - 1918	(10)	(20)	(293)	1373	3393	1185	(330)	(165)	(100)	(58)	(32)	(11)	(647)
1918 - 1919	(10)	(200)	836	3147	5216	2573	(645)	(335)	(202)	(122)	(65)	(30)	(1144)
1919 - 1920	(10)	(140)	(404)	(1704)	2261	1026	(354)	(210)	(115)	(70)	(38)	(15)	(530)
1920 - 1921	(10)	(120)	(590)	2535	4252	1311	596	(290)	(160)	(95)	(52)	(23)	(834)
1921 - 1922	(10)	(120)	(354)	1201	(2100)	736	(270)	(150)	(90)	(26)	(10)	(10)	(431)
1922 - 1923	(10)	(30)	482	3213	6745	2778	778	(150)	(90)	(50)	(26)	(10)	(431)
1923 - 1924	(10)	(90)	628	1808	3764	1433	741	272	138	(80)	(44)	(19)	(1219)
1924 - 1925	(10)	(144)	1385	(3973)	5300	2463	796	384	(210)	(125)	(70)	(32)	(1247)
1925 - 1926	(14)	(14)	161	3275	2280	1741	715	(325)	(185)	(110)	(65)	(30)	(841)
1926 - 1927	(10)	(140)	(507)	(1607)	1741	(971)	715	(270)	(130)	(76)	(43)	(18)	(521)
1927 - 1928	(10)	(120)	(777)	2800	4745	(2743)	878	(380)	(205)	(120)	(70)	(32)	(1075)
1928 - 1929	(10)	(50)	351	2973	4568	1679	695	(240)	(130)	(77)	(39)	(15)	(904)
1929 - 1930	(10)	(300)	664	2948	4399	1340	434	(123)	(71)	(38)	(15)	(15)	(899)
1930 - 1931	(10)	(170)	(649)	(2621)	5300	2463	796	384	(210)	(125)	(70)	(32)	(1247)
1931 - 1932	(10)	(170)	500	1755	2715	2119	505	(270)	(159)	(90)	(50)	(22)	(739)
1932 - 1933	(10)	(130)	(780)	2780	3181	1369	(445)	(227)	(130)	(75)	(43)	(19)	(770)
1933 - 1934	(10)	(150)	1087	3302	3571	1666	(386)	(200)	(115)	(88)	(35)	(12)	(838)
1934 - 1935	(10)	(20)	270	2339	3496	1315	(440)	(220)	(130)	(75)	(43)	(19)	(770)
1935 - 1936	(10)	(120)	(896)	(4269)	(4971)	2487	(630)	(265)	(152)	(88)	(50)	(20)	(1166)
1936 - 1937	(10)	(55)	599	(5825)	2261	707	334	172	105	62	(25)	(1236)	(1236)
1937 - 1938	(10)	(120)	797	1748	3108	1339	504	(230)	(130)	(75)	(41)	(17)	(865)
1938 - 1939	(10)	(120)	1826	3995	1870	800	800	(270)	(150)	(88)	(41)	(21)	(808)
1939 - 1940	(10)	(273)	362	1935	2089	1377	(435)	(220)	(125)	(72)	(40)	(16)	(560)
1940 - 1941	(10)	(50)	210	1316	1343	1254	(529)	(200)	(120)	(68)	(38)	(15)	(632)
1941 - 1942	(10)	(120)	339	1158	1896	539	(266)	(140)	(80)	(45)	(25)	8	(438)
1942 - 1943	(10)	(120)	385	1896	1715	539	(266)	(140)	(80)	(45)	(25)	8	(438)
1943 - 1944	(10)	(120)	385	1896	1715	539	(266)	(140)	(80)	(45)	(25)	8	(438)
1944 - 1945	(10)	(120)	385	1896	1715	539	(266)	(140)	(80)	(45)	(25)	8	(438)
1945 - 1946	(10)	(120)	385	1896	1715	539	(266)	(140)	(80)	(45)	(25)	8	(438)
1946 - 1947	(10)	(120)	385	1896	1715	539	(266)	(140)	(80)	(45)	(25)	8	(438)
1947 - 1948	(10)	(120)	385	1896	1715	539	(266)	(140)	(80)	(45)	(25)	8	(438)
1948 - 1949	(10)	(120)	385	1896	1715	539	(266)	(140)	(80)	(45)	(25)	8	(438)
1949 - 1950	(5)	(5)	325	2052	5891	3071	(216)	(123)	(73)	(42)	(10)	(10)	(469)
1950 - 1951	(5)	(5)	325	2052	5891	3071	(216)	(123)	(73)	(42)	(10)	(10)	(469)
1951 - 1952	(4)	(4)	57	387	3581	1455	423	214	125	86	43	13	1154
1952 - 1953	(5)	(5)	22	524	1395	3126	(592)	(246)	(134)	(71)	(64)	(27)	843
1953 - 1954	3	3	101	788	1547	1236	444	219	140	81	41	13	632
1954 - 1955	12	12	253	963	4419	1655	681	396	116	68	42	42	1070
1955 - 1956	32	32	207	612	3563	2615	770	347	203	119	69	24	1051
1956 - 1957	13	13	40	495	2210	2159	634	285	163	99	60	24	953
1957 - 1958	8	8	215	608	2688	2904	935	351	197	118	67	32	1031
1958 - 1959	18	18	175	556	3985	1916	745	444	237	139	84	40	1040
1959 - 1960	(19)	(19)	164	583	4047	1247	789	223	126	76	47	17	788
1960 - 1961	5	5	82	789	2508	1301	504	213	120	75	47	16	623
1961 - 1962	34	34	162	781	2966	1360	458	207	121	74	40	12	945
1962 - 1963	27	27	85	511	3632	1620	594	262	138	84	43	18	770
1963 - 1964	8	8	7	473	1988	1988	636	230	127	72	36	13.8	667
1964 - 1965	(3.2)	(3.2)	171	402	5680	1989	580	285	166	105	58	26	970
1965 - 1966	93	93	84	509	3362	2033	648	289	170	103	57	28	1049
1966 - 1967	10.9	10.9	76	366	2817	3302	852	319	173	105	61	27	841
1967 - 1968	11.3	11.3	89	560	2740	2796	764	344	211	133	77	36	1040
1968 - 1969	16.6	16.6	126	795	1060	497	218	106	54.2	27.0	9.24	1.83	264
1969 - 1970	2.64	2.64	29.6	297	2500	791	284	144	85	52.6	27.7	10.2	542
1970 - 1971	5.47	5.47	29.6	297	2500	791	284	144	85	52.6	27.7	10.2	542
1971 - 1972	3.95	3.95	481	2530	2740	810	281	131	75.6	46.4	20.8	3.18	598
1972 - 1973	0.97	0.97	43	795	1060	497	218	106	54.2	27.0	9.24	1.83	264
1973 - 1974	0.34	0.34	126	1670	1340	497	180	106	54.2	27.0	9.24	1.83	264
1974 - 1975	0.60	0.60	3	326	3188	1321	371	143	59.7	34.1	14.4	4.2	760
1975 - 1976	1.2	1.2	0.3	1586	3281	1158	382	149	60.7	34.4	14.4	4.2	760
1976 - 1977	4.57	4.57	480	1528	1162	1162	890	226	88.5	44.9	19.0	5.46	470
1977 - 1978	1.40	1.40	1.7	1728	1728	752	211	61	32.2	12.8	3.2	0.9	324
1978 - 1979	0.71	0.71	7.8	1764	1892	1214	462	153	67.9	31.5	9.7	2.85	323
1979 - 1980	1.7	1.7	42.3	1263	1263	573	233	98	43.2	17.3	4.2	1.43	303
1980 - 1981	0.56	0.56	21.6	318	2070	475	191	83.3	38.1	15.4	4.5	1.28	402
1981 - 1982	0.35	0.35	34.8	1889	1889	639	222	87.6	42.9	16.6	5.1	1.43	423
1982 - 1983	0.57	0.57	0.34	1165	1322	540	217	65.7	34.0	14.3	3.92	1.31	303
1983 - 1984	0.54	0.54	77.7	330	817	475	174	52.4	25.9	10.4	3.52	1.53	219.6

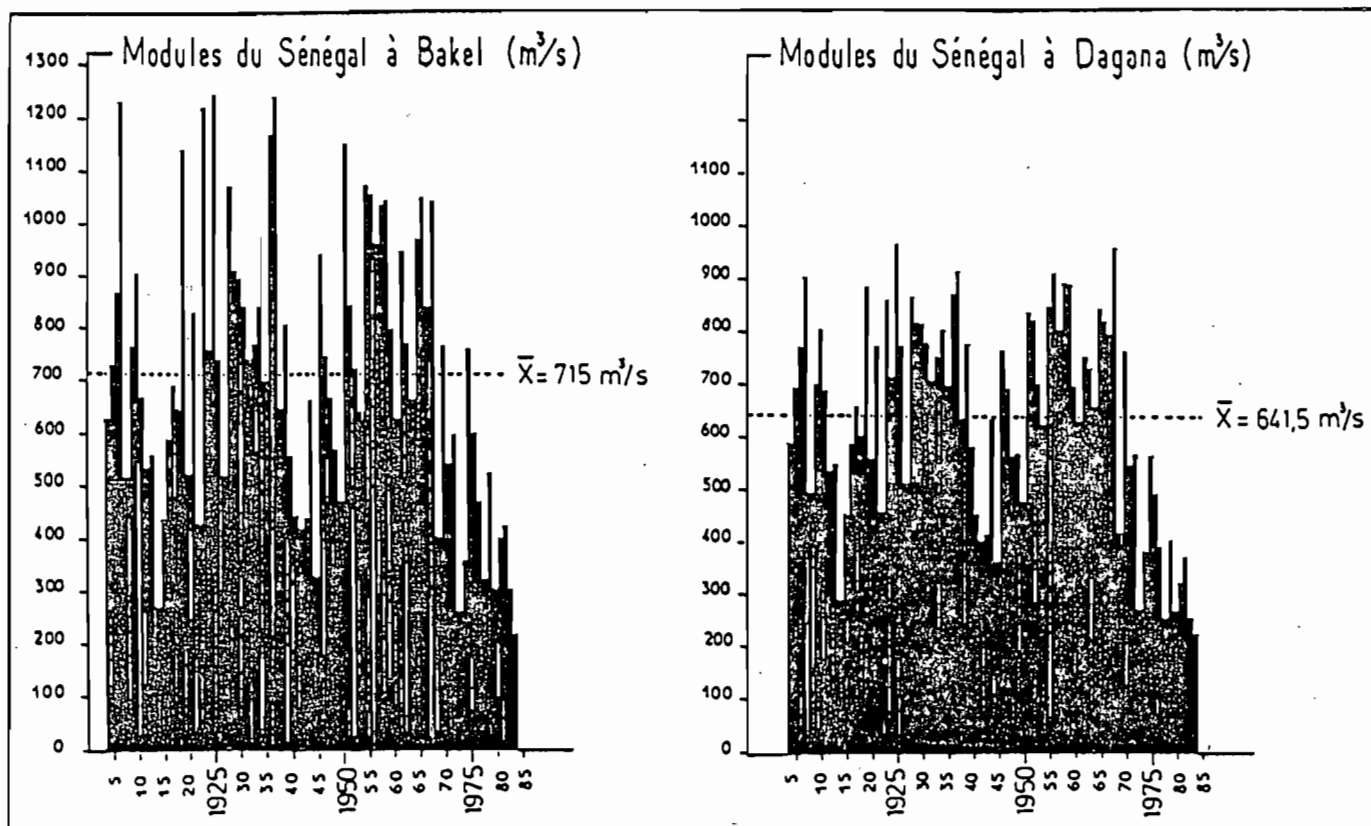


Figure 17 : Evolution des écoulements du Sénégal (m³/s) depuis 1903 à Bakel et à Dagana.

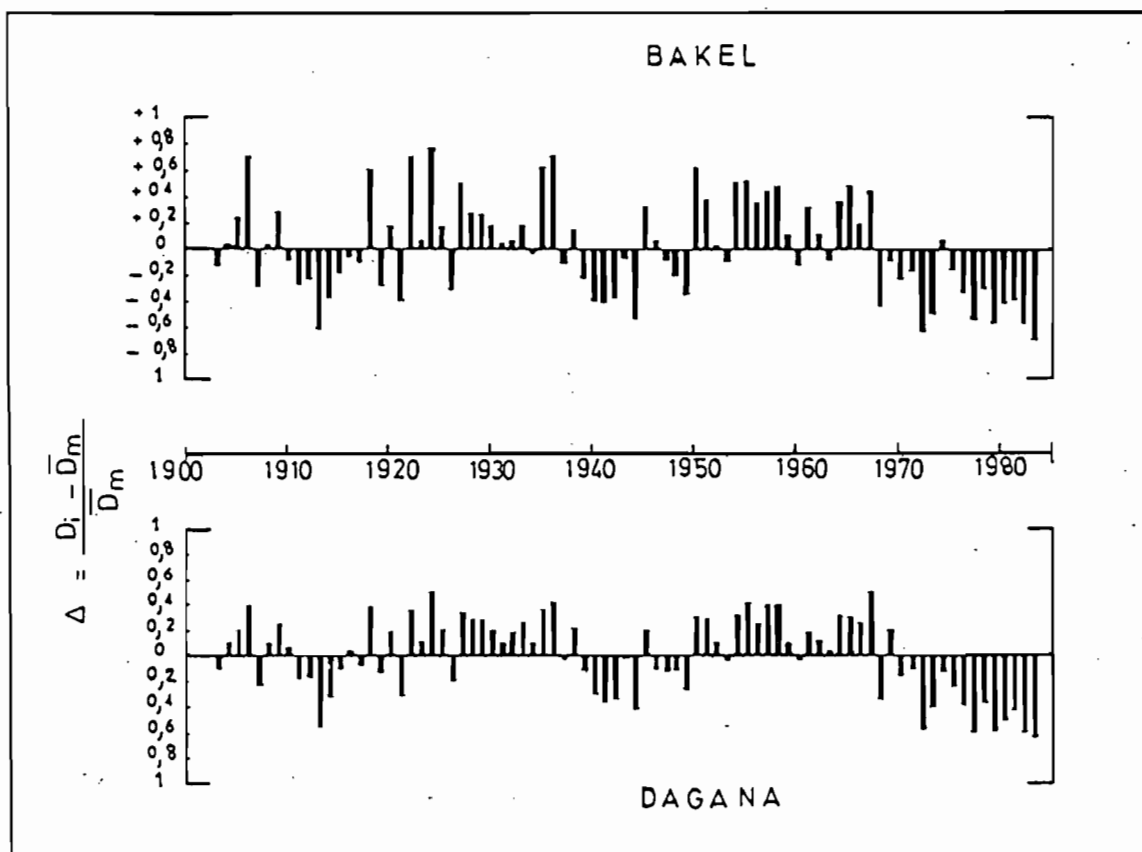


Figure 18 : Variation des écarts à la normale depuis 1903 à Bakel et à Dagana.

2. Variabilité interannuelle, mensuelle et journalière

L'irrégularité des écoulements constitue la caractéristique principale des fleuves sahéliens et le Sénégal n'échappe pas à cette règle : de 1903 à 1983, les débits à Bakel ont varié dans le rapport de 1 à 5,7 et de 1 à 4,3 dans le bief aval de Dagana.

A Bakel, comme à Dagana, les valeurs extrêmes ont été observées au cours des mêmes cycles hydrologiques. Les écoulements maximum ont eu lieu en 1924-1925 ($39,3.10^9$ m³ à Bakel et $30,6.10^9$ m³ à Dagana) et les minimum en 1983-1984 ($6,9.10^9$ m³ à Bakel et $7,1.10^9$ m³ à Dagana). Il est vraisemblable, au vu des enregistrements des hauteurs d'eau des derniers mois de juillet, août et septembre, que la crue 1984-1985 sera aussi faible, voire plus faible que celle de 1983-1984.

A l'irrégularité interannuelle s'ajoute celle des débits moyens mensuels. A Bakel, le plus important débit moyen mensuel a été observé en septembre 1922 avec 6 746 m³/s ; le plus faible au cours du même mois sera probablement celui de 1984, débit que l'on peut estimer de l'ordre de 600 m³/s ; à Dagana, le maximum moyen mensuel de 3 184 m³/s a été enregistré en octobre 1936, le minimum sera vraisemblablement aussi celui d'octobre 1984.

Signalons enfin que sur la période de 81 ans, le plus fort débit journalier a été de 9 340 m³/s en septembre 1936 à Bakel et de 3 570 m³/s en octobre de la même année à Dagana (la différence importante constatée entre les deux stations met en relief le rôle régulateur joué par les plaines d'inondation).

3. Etude des Ecoulements

a) Modules spécifiques

Les modules spécifiques permettent la comparaison entre bassins de taille différente, leur importance exprimée en l/s/km² étant directement fonction de la tranche d'eau annuelle écoulée par unité de surface. Dans les régions chaudes et humides des basses latitudes, FRECAUT (1981) a présenté une classification de valeurs-types de modules spécifiques qui vont :

- d'"énormes" : supérieures à 100 l/s/km²
- à "très élevées" : comprises entre 35 et 100 l/s/km²
- à "honorables" : allant de 10-15 à 30-35 l/s/km²
- à "moyennes et médiocres" : de 5 à 10-15 l/s/km²
- et les valeurs "faibles" inférieures à 5 l/s/km².

Les écoulements moyens du Sénégal à Bakel et à Dagana correspondent à des modules de 3,3 l/s/km² et de 2,4 l/s/km² et se situent donc dans la catégorie des valeurs dites "faibles". Comparativement, les abondances spécifiques du Congo, du Niger, du Nil, de la Volta, du Chari sont respectivement de 10,7 - 6,3 - 0,9 - 3,1 et 2,1 l/s/km² (FRECAUT, 1981).

b) Modules bruts

Les tableaux 14 et 15 donnent de 1903-1904 à 1983-1984 les modules et les débits moyens mensuels aux deux stations. Les figures 17 et 18 illustrent les variations observées dans les écoulements du Sénégal depuis le début du XX^{ème} siècle et mettent en évidence, à l'amont comme à l'aval du bassin versant, la succession de périodes humides (avant 1910, de 1919 à 1939 et de 1950 à 1967) et de périodes arides (de 1911 à 1918, de 1940 à 1949 et depuis 1968).

Depuis 1968, conséquence d'une sécheresse sans précédent depuis le début des observations en 1903, le module moyen annuel du fleuve Sénégal n'a cessé de diminuer : il est successivement passé de 771 m³/s en 1968, à 765 m³/s en 1971, à 747 m³/s en 1975, à 736 m³/s en 1977 et à 733 m³/s en 1979, selon les estimations de FAURE et GAC (1981). La persistance de conditions climatiques défavorables permet d'affirmer qu'en 1985, le module moyen interannuel du fleuve Sénégal s'établira autour de 710 m³/s.

Les auteurs, comme l'a récemment souligné OLIVRY (1982), "ont peut-être indiqué un peu trop vite l'année 1972 comme le cœur de l'actuelle sécheresse." Le démenti à cette assertion a été apporté par les dernières observations sur les biennales 1983-1984 et 1984-1985 qui constituent pour l'instant les périodes déficitaires les plus marquées de la sécheresse du Sahel.

Les modules du Sénégal à Bakel et à Dagana des 16 derniers cycles hydrologiques, ainsi que les écarts à la normale ont été reportés dans le tableau 16. La moyenne sur 81 ans étant de 715 m³/s à Bakel et de 641 m³/s à Dagana, on constate que les moyennes obtenues sur les 16 dernières années s'élèvent à 453 m³/s à Bakel et à 408 m³/s à Dagana, ce qui représente un écart à la normale de plus de 36 % aux deux stations.

Tableau 16 : MODULES (m³/s) ET ECART A LA NORMALE DU FLEUVE SENEGAL A BAKEL ET A DAGANA DEPUIS 1968

BAKEL						DAGANA					
Année	M (m ³ /s)	Ecart (%)	Année	M (m ³ /s)	Ecart (%)	Année	M (m ³ /s)	Ecart (%)	Année	M (m ³ /s)	Ecart (%)
1968-69	404	-43,5	1976-77	470	-34,3	1968-69	420	-34,5	1976-77	394	-38,5
1969-70	767	+ 7,3	1977-78	324	-54,7	1969-70	764	+19,2	1977-78	258	-59,8
1970-71	542	-24,2	1978-79	505	-29,4	1970-71	546	-14,8	1978-79	407	-36,5
1971-72	598	-16,4	1979-80	303	-57,6	1971-72	570	-11,1	1979-80	269	-58,0
1972-73	264	-63,1	1980-81	402	-43,8	1972-73	274	-57,3	1980-81	327	-49,0
1973-74	360	-49,7	1981-82	423	-40,8	1973-74	385	-40,0	1981-82	374	-41,7
1974-75	760	+ 6,3	1982-83	303	-57,6	1974-75	564	-12,0	1982-83	254	-60,4
1975-76	602	-15,8	1983-84	220	-69,2	1975-76	490	-23,6	1983-84	226	-64,7

Le caractère exceptionnel de la sécheresse actuelle et de l'accentuation de l'aridité apparaît encore plus nettement en comparant les mesures récentes à l'échantillon des observations sur 81 ans. Le classement des modules dans l'ordre croissant donne la succession suivante :

- à Bakel : 1983, 1984 (probable), 1972, 1913, 1979, 1982, 1977, 1944, 1973, 1980 (soit 8 années récentes sur 10) ;
- à Dagana : 1983, (1984), 1982, 1977, 1979, 1972, 1913, 1980, 1944, 1981 (soit aussi 8 années récentes sur 10).

Depuis 1979, le déficit à l'amont comme à l'aval du bassin a été supérieur à 40 % . L'effet de cumul, de cette succession sans répit d'années à faible écoulement, s'est traduit par une baisse importante du niveau des nappes souterraines et en corollaire par une phase "d'épuisement du fleuve" de plus en plus précoce dans l'ensemble de la vallée puis par une intrusion saline d'une ampleur et d'une durée exceptionnelle dans le delta.

c) Comparaison des écoulements à Bakel et à Dagana

La comparaison des modules aux exutoires amont et aval du bassin versant du Sénégal (fig. 19) permet de tirer les enseignements suivants :

- à quelques exceptions près, les écoulements à l'aval sont inférieurs ou égaux à ceux de l'amont ;
- il existe une très bonne corrélation entre les modules aux deux stations pour des débits compris entre 400 et 850 m³/s ;
- en années très humides (module supérieur à 900-1 000 m³/s à l'amont), les écoulements à l'aval du bassin tendent vers une valeur limite de l'ordre de 900-950 m³/s ;
- en années sèches, les volumes d'eau qui transitent au bief aval peuvent être supérieurs à ceux du bief amont ;
- la dernière décade écoulée présente une tendance particulière et se singularise par une réduction considérable des écoulements à Dagana. On peut remarquer en effet que, depuis 1974, il existe une relation nouvelle entre les modules des deux stations et que pour des débits identiques à l'amont, la période de sécheresse actuelle se traduit par des écoulements moins importants à l'aval que dans le passé.

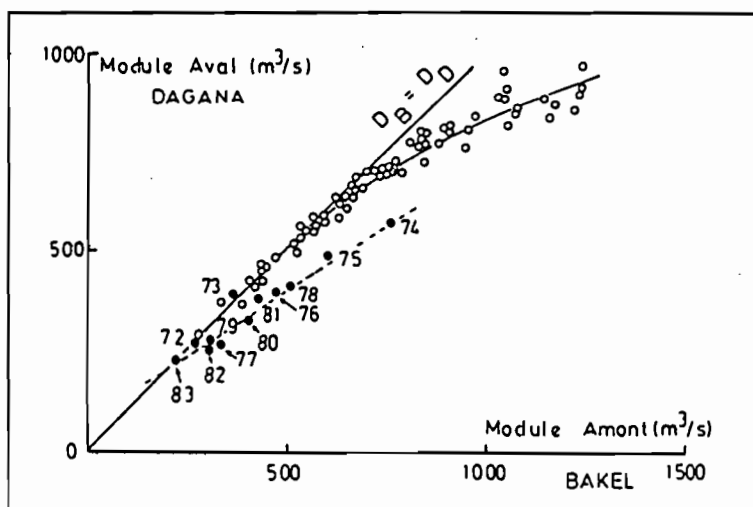


Figure 19 : Comparaison des écoulements du Sénégal à Bakel et Dagana.

Cette situation récente met en évidence le rôle fondamental joué par les plaines d'inondation situées en bordure du réseau hydrographique. On perçoit de nouveau ici l'effet de cumul d'une succession d'années déficitaires qui ont provoqué l'assèchement de nombreux points d'eau et l'abaissement du niveau des nappes souterraines. Il est vraisemblable aujourd'hui que les réductions de volume, constatées lors du transit des eaux dans la vallée, soient la conséquence directe des pertes par infiltrations vers les nappes phréatiques. Les écarts constatés avec les périodes antérieures pourraient éventuellement permettre d'évaluer la contribution, en période de tarissement, des aquifères limitrophes aux écoulements du Sénégal.

4. Les maximums de la crue annuelle du Sénégal

a) Irrégularité et variabilité interannuelles des maximums

Les débits et les hauteurs maximum enregistrés depuis 1903 aux stations de Bakel et de Dagana ont été reportés dans le tableau 17. Les cotes sont données par rapport aux zéros des 2 échelles limnimétriques situées respectivement à +11, 16 m IGN à Bakel et -0,44 m IGN à Dagana. En 1984, le plan d'eau à Dagana a atteint deux maximum (2,06 m le 24 Juillet et 1,49 m le 29 août) : le premier correspond à la remontée du niveau imposé par la présence du barrage de Rheune(1), le second à la pointe de crue après la rupture du barrage sous la poussée des eaux.

Tableau 17 : DEBITS ET HAUTEURS MAXIMUMS DU FLEUVE SENEGAL A BAKEL ET A DAGANA

Année	BAKEL		DAGANA		Année	BAKEL		DAGANA		Année	BAKEL		DAGANA	
	Q (m3/s)	H (m)	Q (m3/s)	H (m)		Q (m3/s)	H (m)	Q (m3/s)	H (m)		Q (m3/s)	H (m)	Q (m3/s)	H (m)
1903	3560	9,49	2275	3,50	1930	4610	11,00	2590	3,88	1957	5660	11,82	2850	4,27
1904	4790	11,15	2410	3,65	1931	4300	10,70	2300	3,53	1958	8170	12,89	3100	4,46
1905	3840	10,19	2190	3,39	1932	4850	11,20	2680	4,01	1959	5460	11,68	2615	3,94
1906	9340	13,28	3370	4,75	1933	5490	11,70	2760	4,12	1960	3550	9,84	2160	3,37
1907	2850	8,90	1830	2,98	1934	5340	11,60	2680	4,02	1961	7030	12,51	2910	4,33
1908	4200	10,60	2505	3,75	1935	6680	12,35	3280	4,63	1962	4410	10,80	2560	3,78
1909	5490	11,70	2780	4,14	1936	7600	12,70	3570	4,94	1963	3760	10,11	2235	3,45
1910	3840	10,20	2460	3,70	1937	3590	9,90	2360	3,59	1964	7180	12,56	3190	4,52
1911	3330	9,55	2095	3,30	1938	5630	11,80	2585	3,83	1965	7000	12,48	3390	4,70-5,00
1912	3290	9,50	1935	3,10	1939	3400	9,65	2140	3,35	1966	5450	11,70	2800	4,04
1913	1040	5,20	1100	2,00	1940	2760	8,75	1625	2,72	1967	5820	11,94	3400	4,65
1914	1885	7,25	1460	2,50	1941	2890	8,95	1805	2,95	1968	2880	8,94	1660	2,80
1915	3140	9,30	(2190)	(3,40)	1942	3590	9,90	1870	3,02	1969	3770	10,11	2360	3,64
1916	4200	10,60	2360	3,60	1943	3480	9,75	2315	3,55	1970	3440	9,70	2170	3,43
1917	4960	11,30	2505	3,75	1944	1740	6,95	1510	2,56	1971	4320	10,72	2300	3,59
1918	7300	12,60	3200	4,55	1945	6480	12,26	3010	4,40	1972	1430	6,24	1070	2,00
1919	3560	9,85	2060	3,25	1946	4460	10,85	2430	3,68	1973	2550	8,38	1660	2,81
1920	5630	11,80	2785	4,15	1947	4360	10,75	2215	3,45	1974	5780	11,91	2310	3,60
1921	2850	8,90	1970	3,14	1948	3590	9,90	2095	3,30	1975	5000	10,14	1920	3,13
1922	9070	13,19	3540	4,89	1949	3760	10,10	2010	3,20	1976	2500	6,96	1340	2,29
1923	4670	11,05	2430	3,69	1950	7630	12,71	3390	4,77	1977	2700	7,06	(1330)	2,29
1924	6350	12,20	3290	4,65	1951	5340	11,60	2540	3,80	1978	3250	7,87	1435	2,52
1925	4610	11,00	2480	3,72	1952	5060	11,38	2450	3,69	1979	1760	6,20	1140	2,09
1926	2290	8,00	1745	2,87	1953	4180	10,58	2155	3,37	1980	3640	8,66	1565	2,66
1927	6460	12,25	2830	4,24	1954	6610	12,32	2920	4,32	1981	2840	7,74	1670	2,75
1928	5490	11,70	2920	4,34	1955	5260	11,54	2920	4,33	1982	2280	6,95	1300	2,20
1929	5490	11,70	2790	4,16	1956	6050	12,06	3160	4,49	1983	1200	4,92	(850)	1,58
										1984	995	4,34	(770)	1,49-2,06

A Bakel, les valeurs extrêmes correspondent aux années 1906 et 1984 ($Q_{\max}$: 9 340 m3/s ; $Q_{\min}$: 995 m3/s ; $H_{\max}$: 13,28 m et $H_{\min}$: 4,38 m) : les débits maximums ont varié dans un rapport de 9,4 et les hauteurs maximums, dans un rapport de 3. A Dagana, les plus importants écoulements journaliers et la cote maximale ont été observés en 1936 ($Q_{\max}$: 3 570 m3/s et $H_{\max}$: 4,94 m ou 4,50 m IGN) ; l'année 1984 correspond aussi à une défaillance, sans précédent connu de la puissance des crues à l'aval du bassin ($Q_{\min}$: 770 m3/s environ et $H_{\min}$: 1,49 m ou 1,05 m IGN).

(1) : Le barrage de Rheune, situé à 110 km de l'embouchure du fleuve, fut édifié le 26/11/1983 à la suite de la crue déficitaire 83/84 afin de stopper l'intrusion saline et pour permettre un meilleur remplissage du Lac de Guiers. Ce barrage en terre, construit hâtivement, fut emporté à moitié par la crue le 23 juillet 1984 et reconstruit le 13 novembre 1984. Il est vraisemblable que Rheune III devra être envisagé fin 1985.

La sévérité de la sécheresse actuelle est aussi nettement perceptible aux niveaux des débits maximum des pointes de crue(1). A Bakel, la moyenne des maximum annuels des 16 dernières années s'élève à 2 970 m³/s pour une moyenne de 4 370 m³/s sur 82 ans ; à Dagana, les résultats sont analogues : 1 570 m³/s pour les 16 dernières années et 2 330 m³/s pour les 82 années d'observation. A l'aval comme à l'amont, la réduction dans les écoulements est de l'ordre de 32 % depuis 1968.

b) Formes de l'hydrogramme

L'étude hydrologique montre que les hautes-eaux annuelles présentent toujours la même configuration avec simplement des variations d'amplitude en fonction des années humides (1924-1925) des années moyennes (1962-1963) et des années sèches (1983-1984) : fig. 20.

L'hydrogramme annuel aussi bien à Bakel qu'à Dagana est monomodal ; il présente une seule intumescence en août-septembre et une longue courbe de tarissement d'octobre à mai. Le régime est monogénique simple avant Bakel où tous les pics successifs se rencontrent.

Après cette station-clé, la pente devient faible, le fleuve déborde par-dessus les berges et la propagation est plus lente ; la hauteur d'eau diminue également ; il n'y a plus de pulsations comme dans le bassin supérieur. L'hydrogramme s'aplatit et ce "laminage" s'explique par l'absence d'apports importants le long de la vallée pour déterminer des pointes secondaires.

Dans le cours inférieur, l'hydrogramme est unimodal, l'étalement devient plus considérable et influence le temps de propagation des eaux.

La SOGREAH (1972) a établi les hydrogrammes et limnigrammes pour les crues types à la station de Bakel (fig. 21). L'année de référence est 1972 qui est centennale faible. Les allures des courbes millénaires, centennales, décennales et médianes confirment l'évolution des hydrogrammes annuels.

5. Propagation des écoulements en périodes de crue

La saison des hautes-eaux se déroule annuellement de juin-juillet à octobre-novembre ; ses traits caractéristiques se conservent avec des modifications mineures dans toute la vallée et le delta du Sénégal.

Sur le haut-bassin, "le profil des hautes-eaux annuelles est très irrégulier et présente une allure en dents de scie", MICHEL (1971). Ce sont des ondes successives, entrecoupées de périodes de répit et d'irrégularité notables, selon que les contributions des différents affluents parviennent à l'exutoire de Bakel avec un parfait synchronisme ou au contraire différées dans le temps ; la date d'arrivée du maximum, variable chaque année, dépend à la fois de la répartition des précipitations sur les têtes de bassin et de la durée de leur cheminement vers le bief amont.

Dans la vallée, les débordements dans le lit majeur entraînent une évolution progressive de l'onde de crue ; les irrégularités s'estompent, l'amplitude maximale s'atténue et la durée de la propagation augmente.

a) Etude de la propagation dans le Sénégal inférieur

A Bakel, en tête de la vallée, le commencement de la première montée se manifeste fin mai ou au début de juin. Les premières ondes sont absorbées par le sol desséché, par l'infiltration et elles recouvrent les seuils et les bancs ; la montée des eaux reste lente jusqu'au mois de juillet. A la fin juillet-début août, l'élévation du plan d'eau est plus régulière et s'accélère ; elle coïncide avec les premières grandes pluies ; le lit mineur se remplit et les bras secondaires sont submergés.

A Dagana, "porte" du delta, la montée des eaux s'échelonne entre le 25 Juin et reste peu importante jusqu'à la mi-juillet ; ensuite, elle est progressive. Les pointes maximales sont atteintes entre septembre et octobre (le maximum se présente en général vers le 10 octobre ; il se maintient pendant quelques jours, puis la décrue s'amorce).

b) Temps et vitesse de propagation

Les vitesses de propagation calculées dans le haut-bassin par ROCHETTE (1974) sont indiquées dans le tableau 18.

(1) : Selon FRECAUT (1981), il convient de distinguer nettement crues et hautes-eaux qui se différencient par leur durée et les valeurs des débits écoulés. Les hautes-eaux "correspondent à une situation hydrologique se répétant tous les ans aux périodes d'abondance pluviométrique : leur fréquence est quasi annuelle et leur durée porte au minimum sur plusieurs mois." La crue se produit pendant la saison des hautes-eaux et "constitue un phénomène hydrologique exceptionnel, irrégulier de fréquence faible et de durée relativement brève, sauf sur les grands organismes fluviaux." Nous avons assimilé "crue" et "hautes-eaux" dans la mesure où FRECAUT (1981) admet que "les crues deviennent effectivement la seule forme d'écoulement lors de la saison des pluies" sur les marges semi-arides et arides des régions chaudes et humides.

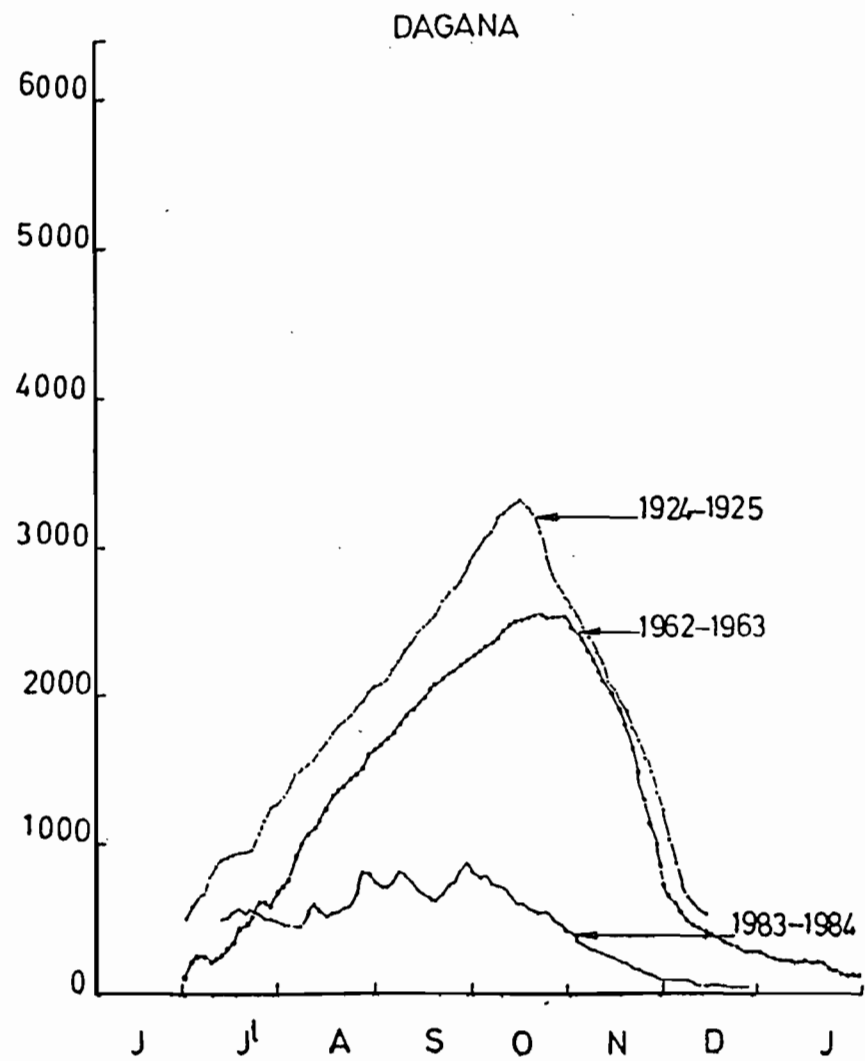
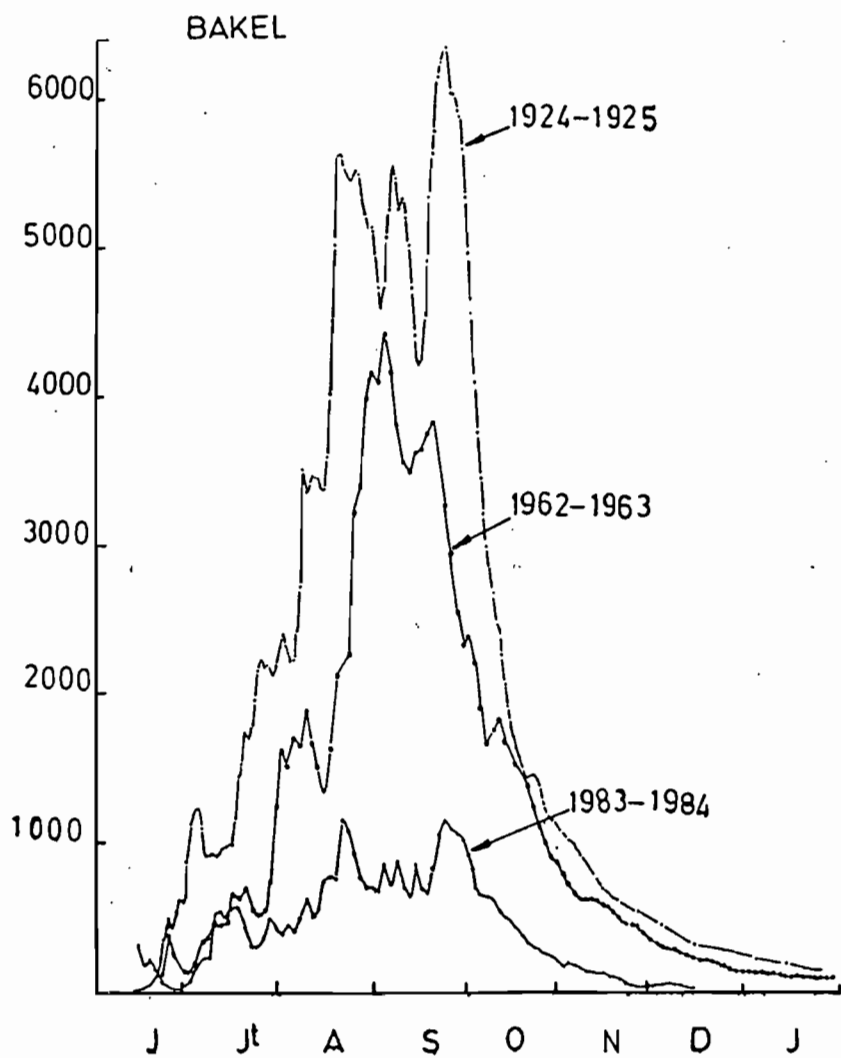


Figure 20 : Formes des hydrogrammes à Bakel et à Dagana.

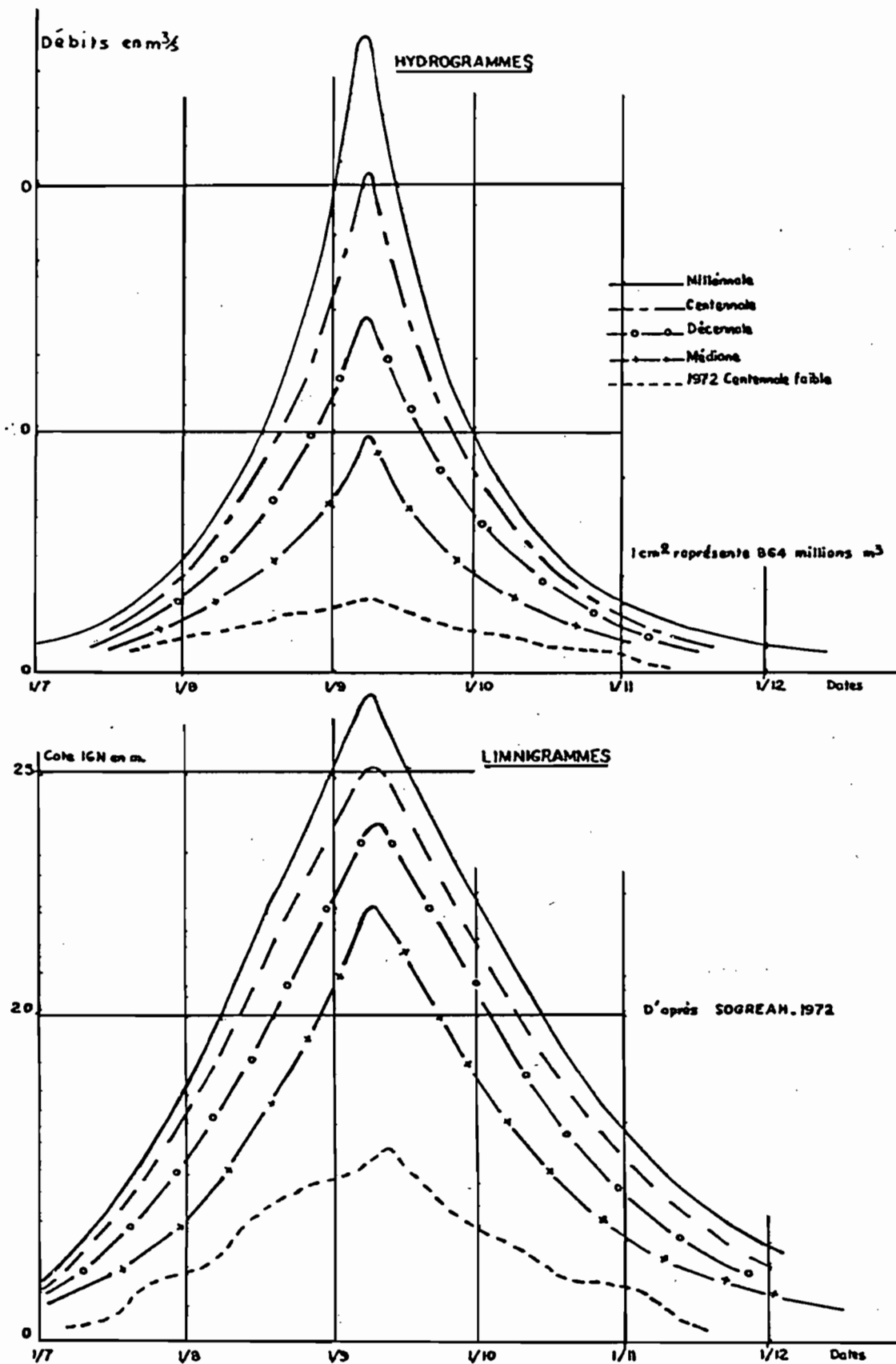


Figure 21 : Les crues types à Bakel - Hydrogrammes et limnigrammes (SOGREAH, 1972)

Tableau 18 : TEMPS DE PROPAGATION DANS LE HAUT-BASSIN

Section	Temps de propagation (jours)	Vitesse de propagation km/jour	Distance km
Falémé			
Fadougou/Gourbassi	2	84	168
Gourbassi/Kidira	2,3	84	192
Fadougou/Kidira	4,3	84	360
Fadougou/Confluent	(5,0)	(82)	410
Bafing			
Dakka-Saïdou/Dibia	1,7	168	168
Dakka-Saïdou/Confluent	(2,2)	(170)	377
Sénégal Moyen			
Bafoulabé/Kayes	1	127	127
Kayes/Bakel	1,8	70	126
Kidira/Bakel	1,2	67	80

Dans le haut-bassin, les écoulements du Bafing et de la Falémé atteignent Bakel en 5 Jours, et le plus souvent le temps de propagation se réduit à 2 et 3 jours. La plus grande vitesse de propagation (1 jour) a été observée entre Bafoulabé et Kayes distants de 127 Km (soit 1,5 m/s) ; la plus faible (5 jours) de Fadougou à Bakel sur une distance de 410 Km (0,9 m/s). A partir de Bakel, "le laminage important que subissent les crues à l'aval de Bakel complique singulièrement l'étude de leur propagation et fait qu'il n'existe pas de définition vraiment satisfaisante du temps de propagation de la crue annuelle dans la vallée", ROCHETTE (1974). Deux facteurs essentiels interviennent sur les conditions de propagation des hautes-eaux :

- l'amplitude de la crue,
- la forme du limnigramme à la station de Bakel.

A partir de Matam, la courbe de l'hydrogramme est plus régulière ; il y a une diminution de l'amplitude par suite du débordement des eaux dans la vallée alluviale. Cet épandage de la crue vers les eaux avoisinantes diminue considérablement la vitesse de propagation et les caractéristiques de l'onde de crue au-delà de Matam (tableau 19).

Tableau 19 : TEMPS DE PROPAGATION DU MAXIMUM DE LA CRUE (en jours)
DE BAKEL A MATAM ET DAGANA - ROCHETTE (1974).

	Matam	Dagana
Valeur maximale	9,5	55
Valeur de fréquence		
25 %	7	45
50 %	5	39
75 %	3	32
Valeur minimale	1	12

En année de très faibles écoulements, le fleuve ne déborde pas, réduisant considérablement la durée normale de propagation. L'étalement des eaux à l'approche du delta, et surtout la force contraire opposée par la marée ralentissent considérablement la marche des eaux douces. Les faibles crues se déplacent à une vitesse moyenne de 50 Km par jour entre Bakel et Dagana, mais dépassent 100 km/jour dans le secteur amont.

ROCHETTE (1974) confirme qu'il y a également une variation considérable dans le temps de propagation du maximum des hautes-eaux (tableau 20).

Tableau 20 : TEMPS DE PROPAGATION DU MAXIMUM DE LA CRUE (en jours)
DE BAKEL A MATAM, KAEDI, BOGHE, PODOR ET DAGANA
ROCHETTE (1974)

	Matam	Kaédi	Boghé	Podor	Dagana
Valeur maximale	25	31	38	48	59
Valeur de fréquence (au dépassement)					
25 %	8	17	27	39	46
50 %	6	13	23	31	37
75 %	3	9	18	26	33
Valeur minimale	1	3	4	6	8

La date du maximum de la crue fluctue d'une année à l'autre ; elle se situe en général dans la 2ème quinzaine du mois de septembre pour toutes les stations de la vallée et du delta. Les vitesses de propagation sont sensiblement constantes (18 km/jour), ROCHETTE (1974).

6. Etude du retrait des eaux

a) Le tarissement

Le retrait des eaux s'amorce au fur et à mesure que diminuent les pluies dans le haut-bassin et ses caractéristiques sont liées à celles de la saison des hautes-eaux précédentes (c'est-à-dire de la hauteur et de la durée du maximum précédent). Ce retrait est beaucoup plus brutal dans le cours supérieur en amont de Bakel, où il commence dès la fin septembre-début octobre, que dans la basse vallée où il ne devient manifeste qu'à partir du mois de novembre.

La première baisse résulte de la vidange des eaux accumulées dans le lit majeur. Le véritable tarissement, qui correspond à un écoulement d'origine presque uniquement souterraine, ne commence pratiquement qu'en décembre. Il est suivi, si la réalimentation des nappes n'a pas été suffisante (situation actuelle), par une phase d'épuisement.

A Bakel, le retrait des eaux s'amorce en octobre ; ce retrait est rapide et peut être parfois perturbé par de petites remontées passagères. (ROCHETTE, 1974, a signalé sur 15 années d'observations 4 cas de précipitations survenant au cours du tarissement.) Ces précipitations n'ont qu'une action momentanée sur le niveau, la décroissance redevient normale dans un délai maximum de 15 jours après l'arrêt des précipitations.

ROCHETTE (1974) a pu établir que la phase de tarissement débute à Bakel lorsque le plan d'eau atteint le seuil de 2,80 m à l'échelle limnimétrique (soit pour un débit d'environ 370 m³/s). Lors des années très humides comme 1906-1907 (cycle au plus fort débit journalier) ou 1924-25 (cycle au module le plus élevé), ce seuil a été franchi le 9 janvier 1907 et le 30 décembre 1924. L'examen de l'ensemble des courbes de décrue depuis 1903 montre que les phases de tarissement les plus précoces correspondent aux trois derniers cycles hydrologiques : en effet 1913-1914 présente un tarissement plus lent et des débits plus soutenus que 1982-1983, 1983-1984 et 1984-1985 (OLIVRY, 1983). Pour ces trois cycles, la hauteur de 2,80 m a été franchie le 3 Novembre 1982, le 18 octobre 1983 et le 25 octobre 1984.

A Dagana, le retrait des eaux est effectif à partir de début novembre et il prend une allure beaucoup plus progressive. Le temps d'observation du tarissement est réduit ou il est presque totalement masqué par les oscillations de la marée.

En décembre, le plan d'eau à Dagana a retrouvé celui de juillet ; le fleuve est cantonné dans son lit mineur et seuls subsistent en eau les affluents et les défluent les plus importants. La majeure partie des eaux d'inondation du lit majeur sont restituées au fleuve d'octobre à novembre ; le tarissement ne débute qu'en décembre. Les pertes dues à l'évaporation sont compensées par les apports de la nappe phréatique par suintements et ruissellements. Il s'agit d'un inféro-flux dans les alluvions plus ou moins perméables. Les apports de cette nappe soutiennent ainsi les débits pendant la période d'épuisement. Le fleuve, faiblement alimenté par les eaux d'infiltration, se réduit à son lit mineur et coule parmi des bancs de sable grossiers et des graviers.

Les perturbations du cycle hydrologique introduites par les années exceptionnellement sèches que nous connaissons actuellement remettent en cause les lois établies pour une série d'années humides par l'ORSTOM ou l'ONVS. Ainsi :

- les débits pendant les périodes de tarissement ne sont plus suffisamment soutenus par la nappe phréatique ;
- la nappe phréatique elle-même n'est plus suffisamment rechargée ; elle subit une baisse de niveau continue.

Une reprise des données statistiques sur 75 années a permis d'indiquer les dates probables d'apparition des débits charnières à Bakel (tableau 21).

Tableau 21 : DECRUE A BAKEL (source : OMVS, 1978)

Garantie	Crue tardive	Crue moyenne	Crue précoce	Crue 1973/74	Crue 77/88
Date de passage des débits					
300 m3/s	29 déc	2 déc	8 nov	27 oct	2 nov
100 m3/s	24 fév	1 fév	16 janv	6 déc	2 dé
50 m3/s	31 mars	8 mars	17 fév	23 janv	3 janv

Tableau 22 : CARACTERISTIQUES DU TARISSEMENT (ROCHETTE, 1974)

Rivière	Station	Tarisement			Epuisement			Nbre d'années d'observation
		K	N Jours	Q ₀ m3/s	K'	N' Jours	Q' ₀ m3/s	
Bakoye	Toukoto	(0,024)	(95)	(45)				6
	Oualia (ou Kale)	0,020	117	90	0,046	50	9	11
Bafing	Dakka-Saïdou	0,014	160	90				7
	Dibia (ou Deguerre)	0,020	114	140				8
Falémé	Fadougou	0,020	114	80				7
	Gourbassi	0,020	115	80				10
	Kidira	0,024	96	100	0,035	66	3,5	14
Sénégal	Galougo ou Gouina	0,0185	124	260	0,038	60	40	14
	Kayes	0,0185	124	300	0,037	62	54	14
	Bakel	0,0185	125	325	0,048	48	40	15
	Matam	0,0185	123	340	0,046	50	40	14
	Kaédi	0,0185	125	360	0,041	56	42	6
	Diouldé-Diabé (Sénégal + Doué)	0,0185	123	380	0,037	62	45	6

K et K' = Valeurs médianes des coefficients de tarissement et d'épuisement.

N et N' = Nombre de jours que met le débit pour descendre de 10 à 1.

Q₀ et Q'₀ = Valeurs médianes des débits pour l'apparition du tarissement et de l'épuisement.

b) Coefficient de tarissement

Les coefficients de tarissements sont significatifs et fiables selon ROCHETTE (1974) à cause du nombre d'années d'observations relativement élevées (entre 6 et 15 années, suivant les stations) et les débits utilisés qui sont connus avec une grande précision.

Le tableau 22 montre une homogénéité assez remarquable du tarissement des différents bassins aux stations de la Falémé, du Bakoye et du Bafing, avec une augmentation sensible du coefficient de tarissement de l'amont vers l'aval pour les deux dernières rivières (ROCHETTE, 1974). L'écart est notable entre les vitesses de tarissement du Bafing et de la Falémé, la décroissance des débits est plus lente sur le Bafing.

Dans le Sénégal moyen et la vallée, le coefficient de tarissement est inférieur à ceux observés dans le haut-bassin mais garde une valeur identique (0,0185) depuis Kayes jusqu'au seuil de Diouldé-Diabé. Il y a un renforcement du débit d'étiage consécutif aux restitutions opérées par la nappe phréatique.

c) Les étiages très prononcés de la saison des basses-eaux au cours de ces années sèches

Les étiages sont des phénomènes irréguliers, et leur analyse a été très peu suivie. Ce n'est qu'à partir des années 50 que les hydrologues se sont attachés à son étude sur le fleuve Sénégal. FRECAUT (1981) définit "les étiages fluviaux, ou maigres très prononcés, ou très basses-eaux, phénomènes exceptionnels, se différencient nettement des basses-eaux ordinaires ou "habituelles", analysées dans le cadre des régimes fluviaux saisonniers par leur gravité ou profondeur, par leur durée et fréquence."

Les étiages(1) se produisent pendant les basses-eaux, mais la limite entre étiages et basses-eaux est difficile à établir.

La gravité du phénomène sur le Sénégal est analysée dans le tableau 23 à la station de Bakel. Les étiages sont une manifestation d'un déficit dans l'alimentation fluviale et de l'absence durable des pluies, les sécheresses climatiques fréquentes de nos jours viennent aggraver davantage le phénomène. Les étiages sont d'autant plus sévères à cause :

- de l'intense évaporation qui varie peu d'une année à l'autre,
- des réserves hydrologiques médiocres : en domaine tropical humide de "transition", la saison sèche dure 6 mois ; "la faiblesse des précipitations est partiellement compensée par les réserves hydrologiques de l'année précédente" (FRECAUT, 1981). En domaine tropical humide "pur", la saison sèche est longue, le tarissement est rapide et les réserves en eau sont médiocres. Le domaine sahélien est pratiquement dépourvu de réserve hydrologique. Ces deux derniers domaines étant les plus étendus (85 % du bassin), les étiages ne peuvent être que sévères, surtout au cours de ces années successives de péjoration climatique.

Tableau 23 : ETIAGES ABSOLUS (m3/s) DU SENEGAL A BAKEL

Année	Date	Débit	Année	Date	Débit	Année	Date	Débit
1951	04/06	2,3	1962	26/05	1,2	1973	10/05	0,25
1952	31/05	2,0	1963	17/06	2,6	1974	15/06-19/06	0
1953	02/05	0,3	1964	30/05	(1,2)	1975	02/07	0,10
1954	03/05	4,7	1965	18/06	(1,8)	1976	16/05	0,52
1955	28/05	22,5	1966	28/05	(5,0)	1977	27/05	0,88
1956	08/06	7,5	1967	09/06	(3,5)	1978	06/06	0,33
1957	03/06	3,2	1968	22/05	(5,0)	1979	11/05	0,74
1958	21/05	10,5	1969	31/05	0,50	1980	07/06	0,21
1959	24/05	9,0	1970	30/05	2,00	1981	06/06	0,14
1960	08/06	0,9	1971	22/06	0,40	1982	24/06-30/06	0
1961	08/06	1,2	1972	20/05	0,78	1983	12/06	0,05
						1984	23/05-02/06	0

Les débits d'étiage sont fréquemment inférieurs à 1 l/s/km² au cours des épisodes secs, et au cours des trente dernières années des valeurs nulles ont été observées. Le Sénégal s'est tari à plusieurs reprises au cours du XXème siècle : ce fut le cas en 1902 et 1913 où selon REIZER (1971) "on traversait le fleuve à pied sec à Kayes." Ces dernières années, la recharge insuffisante des nappes phréatiques situées en bordure du réseau hydrographique s'est traduite à l'étiage du fleuve par l'absence d'écoulement apparent au niveau des sections de Bakel et de Matam.

C - SECHERESSES

1. La notion de sécheresse

a) Problème de définition

Il convient d'abord de définir ce qu'est la sécheresse. La réponse n'est pas si simple, car cette locution peut varier d'un domaine scientifique à l'autre (climatologie, pédologie, biogéographie, hydrologie, agronomie, etc.). La notion de sécheresse, qui n'est pas la même pour les différents utilisateurs de l'eau, est admise par tous comme une période de déficience ou de déficit en eau. Selon SERRA, cité par RODIER (1974) "la sécheresse est relative : c'est une diminution anormale des apports en eau à certaines époques de l'année. Elle ne peut donc être confondue avec l'aridité qui, pour certains régimes, correspond à des conditions normales." La sécheresse signifie un déficit à la fois de la hauteur annuelle des pluies mais aussi de l'écoulement annuel des cours d'eau : elle est donc une différence négative par rapport à une moyenne établie.

(1) : Les étiages sont exprimés par les débits minimum spécifiques et classés suivant leur sévérité par PARDE (1968) :

- des étiages "peu marqués" (q minimal 5 l/s/km²),
- des étiages "atténués" (q minimal de 5 à 1 l/s/km²),
- des étiages "marqués" (q minimal de 1 à 0,2 l/s/km²),
- des étiages "très marqués" ou "graves" (q minimal 0,2 l/s/km²).

b) Un milieu structurellement sec

Les caractères des domaines sahéliens ou sahélo-soudaniens sont bien connus ; il sont secs et non arides :

- la sécheresse est permanente au cours de l'année, elle couvre une période continue d'au moins 6 à 8-9 mois. SECK (1981) mentionne que "le nombre de mois logiquement secs est très élevé dans la moyenne vallée et le Ferlo : 8 à 9 mois à Matam et Linguère, 9 à Podor et St Louis, alors qu'il est seulement de 6 à Kédougou."
- Cette longue succession de mois "sans pluie" contraste avec une petite saison humide, marquée elle-même par des précipitations très irrégulières, très aléatoires et espacées dans le temps.
- Les températures sont toujours très fortes, les vents chauds et secs dominent dans l'année.
- Le réseau hydrographique est peu organisé, les fleuves permanents sont rares, l'écoulement temporaire ou sporadique caractérise la plus grande partie de ces milieux particulièrement fragiles à tout instant à la recherche d'un état d'équilibre.

c) Sécheresses conjoncturelles

Dans ce milieu "structurellement sec", viennent se greffer des sécheresses "conjoncturelles" ou de longues périodes d'aggravation qui sont des ruptures d'équilibre ou des écarts par rapport à ces normes déjà si "dures" ; de telle sorte que selon GAZEILLES cité par SECK (1981) "la sécheresse apparaît comme un phénomène exceptionnel, même dans ces régions qui souffrent assez régulièrement du manque d'eau." Ces sécheresses ne sont connues de façon certaine que depuis la fin du XIXe siècle à travers les récits et témoignages des voyageurs anciens, les rapports des administrations de l'époque coloniale, ou dans les calendriers historiques des populations locales, et plus récemment grâce aux relevés des stations météorologiques.

2. La sécheresse des années 1968-1984

La récente sécheresse des années 1968 à 1984 s'est développée surtout dans l'hémisphère nord, sur des bandes à peu près parallèles à l'Equateur. Selon FRECAUT (1981), son originalité tient à 3 caractères :

- "une rigueur exceptionnelle entraînant un déficit pluviométrique lui-même exceptionnel en Afrique de l'Ouest" ;
- une extension planétaire : dans l'Ouest Africain, cette sécheresse a affecté près de 5 millions de km², soit la totalité de la Mauritanie et du Sénégal, une grande partie du Mali et de la Haute-Volta, la totalité du Niger et une grande partie du Tchad, mais aussi les Antilles, le Nord-Est du Brésil, l'ensemble Saharo-arabique, l'Inde, l'Afrique du Sud, l'Australie ;
- une durée "anormalement" longue sur plus de dix ans.

La sécheresse des années 1968-1984 peut compter comme "l'un des cataclysmes climatiques les plus graves du XXe siècle."

a) Le déficit pluviométrique (fig. 22)

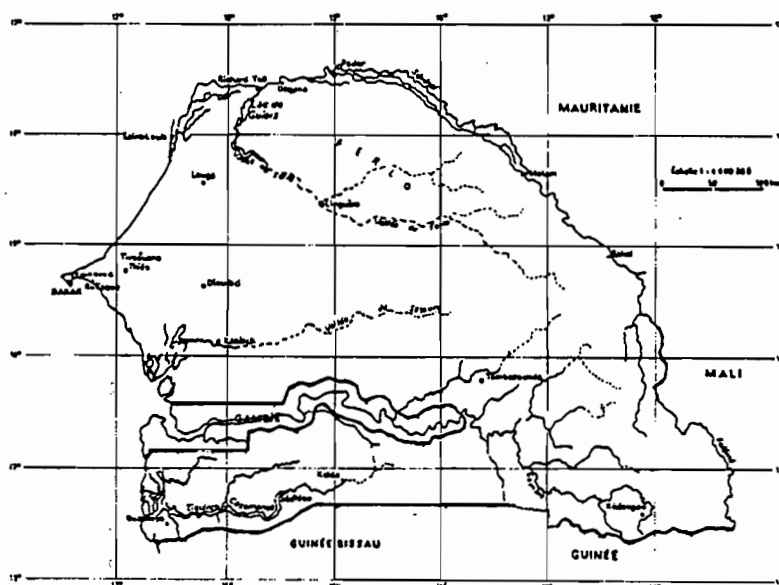


Figure 22 : Position géographique de différentes stations climatologiques du Sénégal.

- L'année 1967 a connu un fort excédent en Afrique, il faut souligner cependant que des déficits pluviométriques importants ont été enregistrés en 1965 dans de vastes régions du Mali et du Tchad. La récente sécheresse commence en 1968 qui est partout déficitaire.
 - Dès 1968, la sécheresse est brutale, surtout en Mauritanie et au Sénégal avec des déficits dépassant 50 %. Au Sénégal, toutes les stations météorologiques enregistrent des hauteurs d'eau inférieures à leur normale. Le nord du pays situé dans la bande sahélienne connaît des déficits de l'ordre de 30 à 40 % (Bakel, pour une normale de 712 mm n'enregistre qu'une pluviométrie de 484 mm, soit un déficit de 32 %) ; la région du Ferlo est la plus touchée, avec celle de Matam (déficit de 42 %). En comparaison, l'ouest du pays a davantage souffert et accuse des déficits de l'ordre de 50 à 60 % : Dakar-Yoff, 55 % ; Thiès, 66 % ; Mbao - Thiaroye, 70 %. Seul le sud-est du pays où la pluviométrie est relativement abondante enregistre des déficits de 10 à 20 % (Kédougou : 9 %), cependant que Ziguinchor au sud-ouest enregistre un déficit de 43 %.
 - L'année 1969 est caractérisée par un répit de courte durée ou un retour à la normale. C'est une rupture, avec un relèvement des totaux pluviométriques au-dessus de la moyenne annuelle. L'année est excédentaire (au nord, on enregistre + 75 % à St-Louis, + 50 % à Podor et + 45 % à Linguère ; au sud, les précipitations sont plus proches de la moyenne avec + 17 % à Bakel, + 20 % à Kédougou).
 - En 1970, la sécheresse reprend, les pluies sont nettement en dessous de la normale. La sécheresse est quasi-générale, les précipitations se caractérisent par leur début tardif (un mois de retard environ) et leur arrêt prématuré. Le déficit pluviométrique est modéré et varie de 10 à 30 % dans les régions septentrionales (avec des pointes à St-Louis, 180 mm de pluie soit 55 % de la normale, et Matam : 280 mm soit 52 % de la normale) et entre 10 et 17 % de déficit dans les autres régions.
 - En 1971, la sécheresse se maintient avec une intensité supérieure à celle de 1970 et une grande extension géographique. Outre les régions déjà touchées, elle s'étend sur les marges subéquatoriales du domaine tropical (sud du Bénin, du Cameroun et en République Centrafricaine). Dans les régions septentrionales du Sénégal, les stations enregistrent des déficits de l'ordre de 50 % (St-Louis enregistre 177 mm de pluie et Podor 137 mm). L'ouest du Sénégal connaît également un important déficit (Dakar enregistre 73 % de la normale). Cependant certaines stations ont des écarts à la normale moins accusés, c'est l'exemple de Dagana, avec seulement 5 % de déficit. Le Sénégal Oriental et la Casamance sont à peine touchés ; les régions méridionales connaissent une situation plus nuancée, le déficit persiste. La région de Bakel, elle, a une pluviométrie légèrement excédentaire (+ 8,5 % selon SECK, 1981).
 - L'année 1972 a été considérée un peu prématurément comme le point culminant de la sécheresse, aussi bien par son intensité (les stations enregistrent des déficits records) que par son extension (toutes les régions subéquatoriales, tropicales humides et sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest sont durement touchées). Néanmoins les années récentes sont comparables à cette période déficitaire très marquée dans le Sahel et dans les régions subéquatoriales qui ont enregistré des déficits compris entre 30 et 40 % (Côte d'Ivoire, Cameroun, R.C.A.). Dans les régions sahéliennes, ce déficit dépasse 60 % ; dans le nord et l'ouest du Sénégal, il est compris entre 50 et 70 % :
 - pour les stations de la vallée, la réduction des précipitations est encore plus importante (à Dagana avec 24 % de la normale, 33 % de la normale à Podor) ;
 - dans la presqu'île du Cap-Vert, Dakar enregistre une hauteur d'eau jamais relevée de 117 mm (23 % de la normale) ;
 - les régions de la Casamance et du Sénégal Oriental ne sont guère épargnées : Ziguinchor (38 % de la normale), Kédougou (23 % de la normale) et Tambacounda (33 % de la normale). L'année 1972 se caractérise par un déficit global de tous les mois de la saison pluvieuse et une vingtaine de stations au Sénégal après 40 ans d'observation affichent leur minimum absolu (SIRCLOULON, 1976). Cet auteur souligne par ailleurs que le temps de récurrence des totaux pluviométriques se situe "entre 10 et 50 ans dans la bande comprise entre les isohyètes 300 et 650 mm, entre 50 et 100 ans au nord de l'isohyète 100 mm."
 - En 1973, la sécheresse persiste et reste pratiquement identique à celle de 1972. Certaines régions épargnées en 1972 sont touchées à leur tour (Haute-Volta, Sud du Mali) et d'autres souffrent davantage de la sécheresse. La saison des pluies a connu partout un démarrage tardif et, tous les mois accusent des déficits supérieurs à 33 %.

Au Sénégal :

 - Kaolack reçoit 444 mm en 1973 contre 481 mm en 1972 ;
 - Diourbel enregistre 333 mm en 1973 contre 420 en 1972.

A part la Casamance où les précipitations sont presque normales, le déficit est généralisé sur le reste du pays. En pourcentage, les déficits sont compris entre 37 et 52 % au nord de Bakel et varient de 7 à 20 % au sud.
 - En 1974, le déficit pluviométrique se maintient mais il est moins important que celui des années précédentes. Les déficits sont encore notables et de l'ordre de 30 à 40 %, surtout dans les régions de la moyenne vallée. La tendance reste déficitaire sauf dans le sud-est (Kédougou connaît un excédent de 3 % et Bakel de 33 %).
- La tendance à la hausse des précipitations va se confirmer en 1975 ; la pluviométrie redevient à peu près "normale" sur l'Afrique de l'Ouest.

- . En 1976, la sécheresse reprend ; la région de Bakel avec un déficit de 36 % connaît sa plus faible pluviométrie des 20 dernières années. Le déficit est de 15 % au sud de Kédougou, de 20 à 27 % à Matam et dans le Ferlo et de plus de 45 % à St-Louis sur le littoral.
- . En 1977, St-Louis enregistre 102,4 mm, soit le minimum minimorum de toute la période d'observation (déficit de + de 60 %). Ailleurs, l'importance du déficit dépasse celui de 1973 et atteint presque celui de 1972 à Matam, Podor et Bakel.
- . En 1978, une tendance à la reprise de la pluviométrie s'affirme. Cette année est plus pluvieuse que 1974 et moins que 1975.

Pour les années récentes, OLIVRY (1983) a établi pour quatre stations de la vallée l'évolution de la pluviométrie sur 15 ans (tableau 24) :

- à St-Louis, seules deux années (1969 et 1975) sont excédentaires. Les écarts à la normale sont importants (-39 % en 1979, -44 % en 1982) et les périodes de récurrences sont comprises entre 8 et 12 ans, moins sévères que celle de l'année 1972 qui est de 20 ans ;
- à Podor, l'année 1972 constitue également le coeur de la sécheresse. L'année 1981 (écart à la normale -52 %) a une période de 20 ans, tandis que 1982 (-41 % d'écart à la normale) a une fréquence décennale sèche ;
- à Matam, le déficit est sévère pour les dernières années, mais en comparaison il est plus important en 1972 (écart à la normale de -63 %). L'année 1980 est l'une des plus faibles (écart à la normale -54 %) avec une période de retour de 20 ans. Le déficit est également élevé en 1982 (-41 % par rapport à la normale).

Tableau 24 : EVOLUTION RECENTE DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS ANNUELLES (mm) SUR QUATRE STATIONS DE LA VALLEE DU FLEUVE SENEGAL (OLIVRY, 1983)

	Saint-Louis	Podor	Matam	Bakel
Latitude Nord	16° 03	16° 39	15° 39	14° 54
Longitude Ouest	16° 27	14° 58	13° 15	12° 28
1) Moyenne sur la période 1931-1960	346,9	335,7	536,7	712,0
2) Moyennes ORSTOM précédemment publiées	394 (52 ans 1902-58)	304 (47 ans 1923-72)	508 (46 ans 1922-72)	683 (43 ans 1922-65)
3) Moyenne actualisée jusqu'à 1982 compris	356 (76 ans)	285 (57 ans)	468 (56 ans)	638 (60 ans)
4) Valeurs des 15 dernières années et écarts (%) à la normale (3)				
1968	233,4 - 35	209,8 - 27	308,0 - 34	483,7 - 25
1969	531,0 + 40	431,4 + 51	534,0 + 14	575,0 - 10
1970	179,9 - 50	255,1 - 11	281,0 - 40	456,7 - 29
1971	177,0 - 51	136,7 - 53	431,0 - 8	540,6 - 16
1972	152,1 - 58	104,9 - 64	173,5 - 63	391,7 - 39
1973	190,1 - 47	153,0 - 47	219,5 - 53	395,6 - 38
1974	196,2 - 45	150,9 - 48	327,5 - 30	681,5 + 6
1975	389,4 + 9	225,5 - 21	407,5 - 13	667,1 + 4
1976	186,6 - 48	264,0 - 18	326,0 - 30	318,2 - 51
1977	102,3 - 72	133,4 - 54	194,0 - 59	384,0 - 40
1978	220,9 - 38	303,9 + 6	272,1 - 42	528,3 - 18
1979	220,5 - 39	226,6 - 22	259,0 - 45	409,3 - 36
1980	294,3 - 18	219,6 - 24	217,5 - 54	410,0 - 36
1981	335,2 - 6	139,5 - 52	370,8 - 21	533,0 - 17
1982	200 - 44	169,2 - 41	275,5 - 41	573,6 - 10
5) Moyenne 1968-82 (15 ans) et écarts (%) à la normale (3)	240,6 - 32	208,2 - 27	306,5 - 35	489,0 - 23
6) Moyenne 1972-81 (10 ans) et écarts (%) à la normale (3)	228,8 - 36	192,1 - 33	276,7 - 41	471,9 - 26

- à Bakel, l'année 1976 (écart à la normale de - 51 %) est celle du plus important déficit pluviométrique de toute la période d'observation de cette station. On note cependant une diminution des déficits au cours de ces dernières années (écart à la normale de - 17 % en 1981 et de - 10 % en 1982).

Sur l'ensemble du bassin du fleuve Sénégal, la sécheresse persiste en 1983 et 1984 avec une forte intensité ; le taux du déficit à toutes les stations est de 20 et 50 % de la situation normale, les isohyètes sont décalées par rapport à la moyenne de 50 à 150 km vers le sud.

b) Comparaison avec les sécheresses des années "13" et "40"

La sécheresse actuelle n'est pas un phénomène nouveau, les pays du Sahel ont connu des années exceptionnellement sèches dans le passé. Elles sont souvent désignées par le succédané alimentaire que les populations étaient réduites à manger. Dans la vallée du Sénégal, 1913-14 est l'année de la distribution du riz (Hitande Marodi), 1927 ou l'année du "Jijile", 1935 ou Hitande Marodi (ou année des mange-mil), 1942 ou l'année des pastèques (Hitande Denné). Dans le Sahel nigérien, les sécheresses sont affublées de noms évocateurs : "Izénéré" ou l'année de la vente des enfants où l'on échange des bouches "inutiles" contre un peu de nourriture, l'année du "Yollou Morou" caresse tes nattes, il n'y a plus que ça à faire, l'année "Wande Waasu" écarte l'épouse, car chacun pensait d'abord à la survie individuelle. Ces années de sécheresses se sont accompagnées d'épidémies (variole, peste, etc.) et seules celles des années 1910-1916 et 1940-1949 sont bien connues et ont fait l'objet d'études approfondies (SIRCOULON, 1976).

- La sécheresse des années "1913"

La sécheresse des années "1913" a duré en moyenne six années consécutives, avec un déficit pluviométrique culminant en "1913" (c'est l'année de la "Grande béri", c'est-à-dire de la grande famine, ou encore l'année "Tasbane", c'est-à-dire année calamiteuse). Malgré les données nettement insuffisantes des stations climatologiques (au Sénégal, seuls 8 postes étaient alors fonctionnels), on sait que la sécheresse a débuté en 1910 avec des déficits continus de 10 à 36 % jusqu'en 1913-1914 (cette dernière enregistre des déficits records de plus de 40 %). Au Sénégal, St-Louis a présenté une moyenne faible de 147 mm pour 2 ans, soit près de 60 % de déficit (150 mm en 1913 ; 143 mm en 1914 pour une normale de 382 mm). Dakar a connu un déficit de 43,5 % (300 mm en 1910 pour une normale de 536 mm). Les autres stations du pays étaient aussi largement déficitaires (334 mm à Rufisque, 235 mm à Thiès, 238 mm à Tivaouane, 128 mm à Podor). La partie sud du pays n'était guère épargnée ; Sédhio, pour une normale de 1 350 mm, recevait 914 mm en 1915. Ainsi, la sécheresse des années "13" a affecté l'ensemble du pays ; le déficit moyen de la période se chiffrait entre 29 et 33 %, avec une période de retour comprise entre 30 et 40 ans.

- La sécheresse des années "1940"

Elle a régné sur tout le Sahel, mais l'observation reste aussi fragmentaire par suite de la rareté des postes pluviométriques. Cette sécheresse a eu une extension considérable ; mais elle s'est manifestée avec une intensité variable d'une région à l'autre et d'une année sur l'autre. Ce sont les années 1941 et 1942 qui ont été marquées au Sénégal par les plus faibles totaux pluviométriques :

- . En 1942, Podor enregistre son minimum absolu (98 mm pour une normale de 336 mm, déficit de plus de 60 %) ainsi que Linguère.
- . A St-Louis, le déficit connu est de 55 %. Dans certaines stations, le déficit enregistré en 1941 est important (36 % à Dakar, 47 % à Matam).

Cette sécheresse a été moins intense que celle des années "13" et "72" ; elle a été fréquemment entrecoupée d'années normales qui ont limité l'effet de cumul entraîné par la succession d'années déficitaires.

Dans le passé, la moyenne vallée a connu d'autres sécheresses (on cite souvent celle des années "30"), mais elles sont moins connues et il est vraisemblable que leurs effets ont été très localisés géographiquement.

- Des sécheresses identiques

Selon SIRCOULON (1976), les sécheresses des années "13", "40" et "68-84" ont présenté à peu près les mêmes caractéristiques :

- . Extension géographique considérable, ne se limitant pas au seul domaine sahélien, mais aussi aux domaines tropicaux humides et équatoriaux.
- . Durée exceptionnelle : persistance pendant plusieurs années avec une rigueur accrue sur une ou deux années, ou un étalement sur un certain nombre d'années.
- . Sécheresse d'une extrême sévérité dans tous les pays, et même d'une gravité exceptionnelle, notamment dans les pays sahéliens.

Aussi, ces sécheresses sont-elles voisines ou identiques : celle des années "13" présente une rigueur voisine à celle de "1972" ; il n'en demeure pas moins qu'elle a connu une durée, une sévérité, une acuité et une ampleur importantes.

La sécheresse des années "40" a été sévère, mais variable suivant les régions ; elle a été moins importante que celle des années "13" ou "68-84" ; les séquences sèches furent moins prononcées. SIRCOULON (1976), qui a étudié dans les détails ces trois périodes arides, précise qu'au niveau du Sénégal :

- . Il apparaît qu'à l'échelle de l'année, "1913" est la plus faible sur le plan du déficit pluviométrique ;
- . il faut une période de 5 années consécutives pour que la récente sécheresse "1968-84" apparaisse comme la plus sèche ; l'influence de l'année déficitaire 1972-73 se fait durement sentir ;
- . à l'échelle des 10 années consécutives, c'est encore la période récente qui est la plus aride pour le Sénégal. Les trois séquences sèches sont comparables ; celles des années "13" et surtout "68-84" ont été les "plus dures" et les plus sévères ; la sécheresse actuelle continue toujours de sévir avec une très forte intensité.

c) Les causes des sécheresses

Les causes sont essentiellement d'ordre météorologique et sont peu faciles à cerner. L'explication la plus communément admise est liée à la circulation générale de l'atmosphère. Sans revenir sur le mécanisme des précipitations, déjà analysé dans le chapitre du climat, on peut rappeler que les pluies sont conditionnées par l'importance du déplacement du front intertropical vers le nord. Il y a une liaison étroite entre la faible pénétration de la mousson issue de l'Anticyclone sud sur le continent africain et les fortes expulsions cycloniques au large de l'Arctique. Le dynamisme des hautes pressions du nord, les déficiences de l'Anticyclone du sud entraînent une faible activité des fronts, rétrécissent la bande où se produit la convergence intertropicale. L'origine des sécheresses résulte de l'oscillation annuelle du F.I.T et de son balancement saisonnier. Au nord du F.I.T s'établit la sécheresse, tandis qu'au sud, c'est le domaine des pluies abondantes.

D'autres tentatives d'explications ont été avancées. La sécheresse trouverait son origine dans :

- . Les variations de l'énergie solaire : 98 % de l'énergie solaire nous arrive sur la terre sous forme de rayonnement visible et d'infrarouge en quantité constante. Le complément étant constitué de rayons ultraviolet, de rayons X, d'ondes radios et de particules de diamètres variables. L'astre solaire ne pouvant pas toujours rayonner la même quantité d'énergie, les températures changent et des modifications interviennent dans les couches atmosphériques. Les alternances de froid et de chaud entraînées obéissent, selon MILENKOVITCH (1980), à trois rythmes principaux :
- d'abord le "cycle d'inclinaison" de l'astre terrestre, qui a pour périodicité 40 000 ans. L'angle de la terre par rapport à son plan orbital se retrouve en position initiale tous les 40 millénaires ; et plus l'inclinaison est proche de sa valeur maximale, plus les écarts de température entre saisons sont importantes ;
- ensuite le "cycle d'excentricité" qui se produit tous les 92 000 ans. La forme de l'orbite décrite par la terre n'est pas constante, et à certaines périodes le globe terrestre est plus éloigné de la terre, amenant une baisse sensible des températures à la surface de la planète ;
- enfin le "cycle de précession" des équinoxes qui a pour durée 21 000 ans et 25 900 pour le retour de la terre à sa position initiale dans l'espace. La conséquence est que l'un des 2 hémisphères se trouve plus proche du soleil (aujourd'hui l'hémisphère nord), de sorte que la glaciation progresse au sud, et régresse au nord.

La conjonction de ces cycles peut, selon MILENKOVITCH, produire des variations climatiques considérables et conduire à des mutations profondes sur la surface du globe.

- . Le rayonnement solaire est un processus complexe : 34 % est renvoyé dans l'espace ; 18 % est absorbé par l'atmosphère et 48 % arrivent au sol. En absorbant cette énergie thermique, le sol s'échauffe. Divers mécanismes naturels lui permettent d'en transférer une partie vers l'atmosphère. C'est ce qui se passe à la surface des océans et des mers par évaporation d'eau ; c'est aussi ce que l'on observe lorsque les sols sont humides, et c'est aussi le cas pour les plantes par évapotranspiration. Dans nos régions à couverture végétale dégradée, il y a une élévation anormale de l'albedo (qui est le rapport de la quantité de lumière diffusée par une planète et la quantité reçue par celle-ci, et est de 0,34 en moyenne pour la terre) ; cela signifie que la température au sol n'assure plus une convectivité correcte, les pluies deviennent de plus en plus rares et risquent d'être violentes et destructrices.
- . La restitution du rayonnement solaire peut être, au contraire, plus élevée par rapport à sa diffusion (cette dernière est d'ailleurs en diminution). Il se produit dans la haute atmosphère une augmentation importante de poussières et d'aérosols : au Sénégal, la ville de St-Louis connaît depuis longtemps le phénomène des brumes sèches ; Dakar, autrefois épargné, commence à être coutumier du fait (GAC et al., 1984), de même que le centre et le sud du pays. Ce phénomène est certainement lié à l'absence de barrières naturelles que constituent les nuages d'eau dans l'atmosphère, barrières qui se raréfient précisément parce que leur régénération fait appel à cette humidité, qui tend à disparaître des sols, et à l'évaporation qui n'est plus favorisée à la surface des mers et océans. Au niveau de la planète, il y a une aggravation très nette de la situation due à l'accumulation de micro-éléments satellisés : gaz carbonique, cendres volantes, fumées d'usines, gaz d'échappement des automobiles, avions, fusées, explosions nucléaires aériennes ou souterraines, etc. Il est difficile de mesurer l'influence de ces filtres ainsi formés contre l'action du soleil, cependant les chercheurs pensent qu'ils contribuent inexorablement à un échauffement de la terre.

La variation de l'énergie solaire en général entraîne une modification des conditions de réception du rayonnement solaire et de la composition physico-chimique de l'atmosphère. Les déplacements des ceintures de pressions zonales sont perturbés, le régime thermique des océans modifié, les écosystèmes dégradés. Tout cela se traduit par une influence "négative" sur le climat et une baisse de la pluviométrie.

La périodicité de ce phénomène a été une question souvent posée : y a-t-il dans cette région du monde une tendance générale à l'assèchement ? La sécheresse est-elle endémique ou épisodique ? Est-il possible de prévoir une reprise de la pluviométrie dans les prochaines années ? La réponse à ces questions permettrait la mise sur pied de moyens préventifs et de lutter efficacement contre les effets spectaculaires et dévastateurs de la sécheresse.

Au cours du Quaternaire, l'Afrique occidentale a connu deux périodes de grande sécheresse : l'une au cours de l'Ogolien, entre 14 000 et 20 000 BP, et l'autre au cours de l'Holocène (2 000 ans BP). Il y a un dessèchement progressif incontestable qui se poursuit depuis le Néolithique jusqu'à nos jours (les grottes sahariennes sont ornées de peintures qui attestent d'une vie plus luxuriante ; la découverte en Mauritanie et dans la vallée du Sénégal d'anciens villages d'agriculteurs laisse entendre que ceux-ci ont progressivement émigré vers le sud au fur et à mesure que le climat se dégradait). De nombreux témoignages d'ordre géologique, géomorphologique, paléontologique, etc., de même que les études climatiques récentes (HUBERT, 1917 ; HENRY, 1921) attestent de la réalité d'une évolution majeure du climat avec des périodes de répit (pulsations humides) et des aggravations (sécheresses).

Les sécheresses périodiques ne peuvent cependant s'insérer dans les grandes oscillations climatiques constatées. Comme le souligne CHARRE, cité par SECK (1981), "déduire la sécheresse récente (et celles passées) d'une tendance plurimillénaire à l'assèchement relève de la confusion des genres, c'est-à-dire de la confusion d'échelle."

L'analyse des relevés météorologiques effectués au Sénégal montre qu'à l'échelle des décennies, il existe des tendances à la hausse ou à la baisse des pluies tous les 30 ans environ en se référant aux périodes de déficit pluviométrique maximal (1913, 1942, 1972). Cependant, GUIRAUD et ROSSIGNOL (1973), en étudiant les pluies de Dakar et du Sénégal, arrivent à la conclusion "que les tests n'ont pas mis en évidence de cycles dans les séries étudiées", mais qu'ils ont permis de déceler "l'apparition de périodes fugaces, élastiques et locales qui sont à l'origine de l'impression de cycles dans les pluies annuelles." Cette opinion est aussi partagée par ROCHE (1973) qui affirme "il n'y a aucune tendance générale au dessèchement des zones tropicales et sahéliennes. Il n'y a pas de variations périodiques ou si elles existent, leur amplitude est tellement faible qu'elles ne peuvent être d'aucun secours pour organiser une prévision des sécheresses..." ni a fortiori pour une quelconque prévision d'un retour à des conditions plus humides.

Les écoulements du Sénégal à Bakel ont été pris comme exemple typique des fleuves sahéliens pour donner un aperçu des variations annuelles de la pluviosité depuis le début du siècle. Etudiant les modules du fleuve sur une période de 80 ans, FAURE et GAC (1981) se sont interrogés sur le caractère répétitif des sécheresses tous les 31 ans (1913, 1941, 1975). L'exploitation de la courbe des débits (fig. 23) suggère la fin de la sécheresse vers 1985 (± 2 ans) et un retour à l'humidité qui se maintiendrait jusqu'aux environs de 2005, date à laquelle une nouvelle période d'aridité s'installerait.

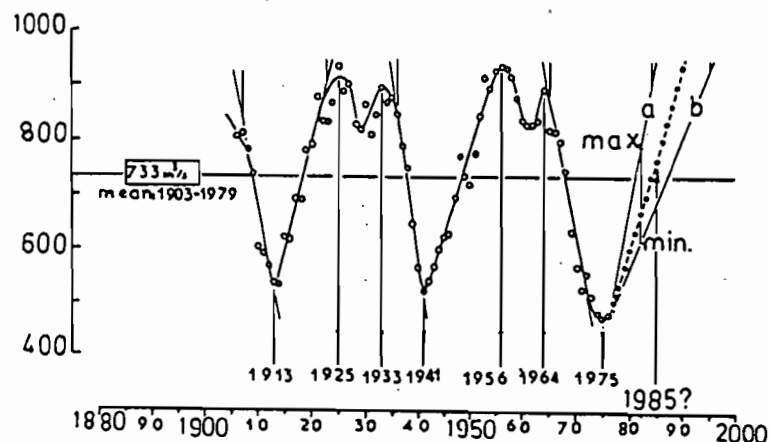


Figure 23 : Variations des modules du fleuve Sénégal à Bakel depuis 80 ans.

L'analyse de FAURE et GAC (1981), bien que présentée avec toutes les nuances et les réserves nécessaires, si elle a été fortement controversée (PALUTIKOF et al., 1981 ; OLIVRY, 1982) a eu le mérite d'ouvrir à nouveau le débat sur le caractère irréversible ou transitoire du phénomène de la désertification. Rien, dans la situation actuelle, n'indique une quelconque amélioration des conditions climatiques ; on peut seulement espérer, comme le souligne OLIVRY (1982), "que la probabilité d'un renversement de tendance augmente au fil des années et il n'est pas exclu alors que l'on retrouve très rapidement un régime de précipitations favorable aux régions du Sahel." Cet espoir semble confirmé par les récentes études de GUILLOT et CITEAU (1984), chercheurs de l'ORSTOM qui utilisent les mesures réalisées par le satellite METEOSAT. Bien que très prudents, employant le conditionnel et se défendant "de faire, à proprement parler, une prévision climatique avec trois ou neuf mois d'avance", ces auteurs ne parviennent pas à cacher leur "intime conviction" : la monstrueuse sécheresse au Sahel serait bel et bien sur le point de prendre fin.

CHAPITRE III

LES FLUX CONTINENTAUX DE MATIÈRES PARTICULAIRES ET DISSOUTES À L'EMBOUCHURE DU SÉNÉGAL

Depuis plusieurs années, de nombreuses études ont été entreprises sur les flux saisonniers de matières particulaires et dissoutes acheminées par les grandes rivières sahéliennes vers des dépressions endoréiques (Tchad), des cuvettes semi-fermées (delta central du Niger) ou, cas le plus fréquent, vers les océans (Bandama, Gambie, Comoé...). Assez paradoxalement, le Sénégal, septième artère fluviale de l'Afrique par l'importance de ses écoulements, est resté jusqu'en 1979 en dehors des grands courants de recherche sur les altérations continentales et la dynamique des paysages sur les bassins versants.

En 1979, l'ORSTOM (Institut Français pour la Recherche et le Développement en Coopération) mit sur pied un vaste programme multidisciplinaire sur les fleuves Sénégal et Gambie. L'un des objectifs consistait à évaluer les flux de matière tout le long des deux axes hydrographiques. Les résultats acquis sur la Gambie ont été récemment présentés (LO, 1984). Sur le Sénégal, les premières mesures furent réalisées à Bakel, puis peu à peu le réseau d'observation se développa vers l'aval. En 1981, l'ensemble du dispositif de contrôle était fonctionnel dans la vallée avec les stations de Bakel, Saldé, Ngoui, Podor, Guédié, Dagana et St Louis. Cette dernière station, dont l'étude nous a été confiée, peut être géographiquement assimilée à l'embouchure du fleuve. Les mesures y sont difficiles et, comme nous le verrons plus loin, de nombreuses approximations ont été nécessaires pour quantifier les héritages de l'amont lorsque le phénomène de la marée océanique se développe profondément dans la vallée.

La précision dans l'abondance des écoulements est importante. Il paraît en effet illusoire de vouloir saisir la réalité des flux détritiques si au préalable le bilan de l'eau n'est pas établi avec toute la rigueur souhaitable. Aussi, avant de présenter les résultats de nos mesures, nous aborderons dans une première partie les conditions hydrologiques particulières qui ont régné pendant nos campagnes de prélèvement en 1981-1982 et 1982-1983.

I - LES CYCLES HYDROLOGIQUES 1981-1982 ET 1982-1983. LEUR ORIGINALITÉ DANS LE CONTEXTE GÉNÉRAL DES ENREGISTREMENTS DEPUIS 1903.

Parmi tous les fleuves sahéliens, le Sénégal est celui qui dispose de la plus longue série d'observations limnimétriques. Grâce à l'effort de valorisation des données anciennes entrepris par ROCHETTE (1974), l'information est en effet complète sur les écoulements du fleuve depuis 1903 aux deux stations-clefs de Bakel et de Dagana (tableaux 14, 15 et 16).

A notre connaissance, il n'existe aucune tentative d'évaluation des débits du fleuve à son embouchure à partir des seuls enregistrements de l'échelle de St Louis. Il est désormais communément admis que l'unique possibilité consiste à les identifier quotidiennement à ceux de Dagana (on fait donc abstraction du temps de parcours entre les deux stations distantes d'environ 150 km). Ensuite, il faut rappeler qu'au-dessus de la cote +1,20 m IGN, les débits qui transitent à Dagana ne peuvent qu'être estimés à partir d'un faisceau de courbes d'étalonnage. Enfin, la principale source d'erreur réside dans le fait qu'en dessous de 1,20 m on doit faire appel à une formule de propagation des eaux entre le bief amont et le bief aval ; cette formule n'est plus utilisable dès que la nouvelle onde de crue se manifeste à Bakel alors que la précédente achève de s'écouler à Dagana. Comme on le voit, le bilan de l'eau lui-même est entaché d'imprécisions et ceci montre une fois encore la difficulté d'apprécier l'importance des flux dissous et particuliers à l'embouchure du Sénégal.

A - LES MODULES BRUTS OU ABSOLUS

Les cycles hydrologiques 1981-1982 et 1982-1983 se sont traduits à l'embouchure du Sénégal par des modules respectifs de 374 m³/s et de 254 m³/s. Ces valeurs placent ces deux cycles parmi les

dix plus faibles écoulements annuels sur la période d'observation de 81 ans (1903-1984)⁽¹⁾. L'écart à la moyenne est de -42 % pour 1981-1982 et de -60 % pour 1982-1983.

B - LES REGIMES SAISONNIERS ET LES COEFFICIENTS MENSUELS DE DEBIT (CMD)

Les variations saisonnières des débits fluviaux peuvent être perçues par divers modes d'expressions impliquant des représentations graphiques propres (FRECAUT, 1982). Pour nos deux années de mesure, les variations dans les écoulements ont été précisées à partir des coefficients mensuels de débit (CMD), qui traduisent le rapport du module d'un mois considéré (Q_i) au module moyen annuel ($\bar{Q}$). Rappelons que lorsque le coefficient mensuel est supérieur à 1, on considère que le fleuve enregistre ses "hautes-eaux" ; si le coefficient est inférieur à l'unité, l'écoulement correspond à la période des "basses-eaux".

Le tableau 25 récapitule les valeurs obtenues pour les deux cycles 81-82, 82-83, la période 1903-1984 et la dernière séquence sèche 1968-1984.

Tableau 25 : LES COEFFICIENTS MENSUELS DE DEBIT A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL

Cycles Périodes	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A
1981-1982	< 0.01	< 0.01	(0.40)	3.02	4.19	2.59	1.08	0.38	0.16	0.07	0.03	< 0.01
1982-1983	< 0.01	< 0.01	(0.61)	2.51	4.34	2.51	1.23	0.45	0.19	0.08	0.03	< 0.01
1903-1984	0.02	0.04	0.61	1.82	2.94	3.29	2.00	0.64	0.28	0.16	0.09	0.04
1968-1984	< 0.01	0.03	0.74	2.34	3.47	3.05	1.38	0.53	0.22	0.11	0.05	< 0.01

La période des hautes-eaux est limitée à 4 mois (août, septembre, octobre et novembre). Sur les 81 années d'observations, on ne relève que cinq années (1927, 1951, 1957, 1966 et 1967) où elle s'est prolongée jusqu'au mois de décembre. Les moyennes établies de 1903 à 1984 situent le maximum en octobre ; celui-ci se présente en septembre lors des années sèches (fig. 24). Cinq mois (de février à juin) ont un CMD < 0.01, traduisant de très fortes inégalités dans l'abondance et la répartition des précipitations et la sévérité des étiages.

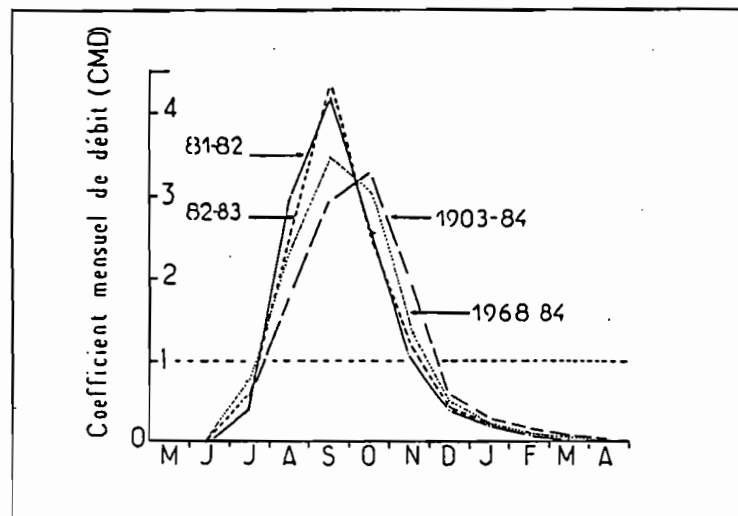


Figure 24 : Coefficients mensuels de débit à l'embouchure du Sénégal.

(1) : Les dernières informations qui nous sont parvenues font état d'une sécheresse encore plus prononcée au cours des cycles hydrologiques 83-84 et 84-85. L'analyse des enregistrements permet en effet d'évaluer à 226 m³/s et 220 m³/s les modules respectifs de ces deux cycles.

C - LA FAIBLESSE DES CRUES 1981-1982 ET 1982-1983

Nous avons représenté sur les figures 25, 26 et 27 les variations journalières des hauteurs d'eau et des débits correspondants à Dagana au cours des deux cycles hydrologiques. L'évolution quotidienne de la position du plan d'eau et celle des écoulements sont données dans les tableaux 26, 27, 28 et 29.

Le premier point qui mérite d'être souligné concerne la faiblesse des débits de pointe ($1\,670\text{ m}^3/\text{s}$ en septembre 81 et $1\,315\text{ m}^3/\text{s}$ en septembre 82) et le franchissement précoce en décrue des seuils de $600\text{ m}^3/\text{s}$ et de $50\text{ m}^3/\text{s}$ (nous verrons plus loin qu'ils fixent la durée de l'invasion marine dans la basse vallée du fleuve).

Le phénomène de la marée océanique qui introduit des oscillations cycliques du plan d'eau est nettement perceptible dès le début de novembre et il se prolonge bien au-delà du mois d'avril qui, en principe, marque la fin du cycle hydrologique. En 1981 comme en 1982, la forme sinusoïdale sur les enregistrements limnimétriques se maintient jusqu'en juillet.

Ce séjour prolongé des eaux marines dans la basse vallée du fleuve gêne considérablement l'évaluation quantitative des flux de matières particulières et dissoutes d'origine continentale. Les données recueillies à St Louis ont été utilisées tant que l'eau reste douce à l'embouchure. Au fur et à mesure de la remontée de la langue salée, l'apport d'éléments dissous et de matières en suspension a été déterminé à partir des échantillonnages effectués à l'amont (Dagana, Podor et éventuellement Guédi, sur le Doué).

II - LES APPORTS FLUVIAUX DE MATIÈRES EN SUSPENSION À L'EMBOUCHURE DU SÉNÉGAL

A - DONNÉES ANTERIEURES

Il existe peu de données sur les débits solides du Sénégal. Les quelques mesures connues ne concernent que quelques stations (Kayes, Bakel, Dagana...) et ont le plus souvent été limitées dans le temps (RIOU, 1936 ; SEGUY, 1955 ; MANDIN, 1957 ; MICHEL, 1970 ; SENEGAL-CONSULT, 1970 ; SURVEYER-NENNIGER-CHENEVERT, 1972).

RIOU (1936) signale des mesures faites en différents points du fleuve, en particulier à Bakel et à St Louis au cours des années 1908, 1934-1935 pour évaluer les débits solides du Sénégal. Cet auteur souligne qu'à partir d'un écoulement total de 39 millions de m^3 , la quantité de limons transportés par le Sénégal serait de l'ordre de 4 millions de m^3 (30 % se déposeraient dans les plaines d'inondation et 70 % seraient jetés à la mer).

SEGUY (1955) et MANDIN ont effectué des mesures de matières en suspension à Dagana - Bakel et Fadougou au cours de la décrue en 1953 et lors des crues fortes en 1955 et 1956. La charge moyenne des matières en suspension en début de crue a été évaluée à 250 mg/l à Dagana et à 170 mg/l à Bakel. À la pointe de crue, les deux stations ont donné des résultats sensiblement identiques, les concentrations oscillant entre 80 et 90 mg/l . La turbidité ne présentait aucune tendance systématique d'augmentation ou de diminution en fonction de la profondeur, phénomène caractéristique d'un transport de particules très fines.

Ces premières mesures sur la charge solide des eaux du Sénégal et l'observation minutieuse du recul des berges ont conduit MICHEL (1968b, 1970), SALL (1982), MICHEL et SALL (1984) à souligner l'importance du façonnement continu de la vallée, par la crue annuelle, dans l'apport de matériel fin à l'embouchure du fleuve. En effet, l'érosion latérale par le sapement des berges des rives concaves dans les méandres les plus importants serait de l'ordre de $1\text{ à }1,50\text{ m/an}$: les fractions grossières restant temporairement piégées aux pieds des rives convexes, les limons et les particules argileuses poursuivant avec le flot leur course vers l'aval. En reprenant les mesures de la M.A.S., à la station de Bakel, MICHEL (1970) a estimé l'apport détritique annuel à 2 800 000 tonnes (crue très forte), à 1 900 000 tonnes (crue moyenne) et à 1 000 000 tonnes (crue très faible).

Des contrôles plus précis à la turbisonde ont été réalisés par SENEGAL-CONSULT (1970) avec un suivi quotidien de la charge solide à Kayes lors des crues de 1968 et de 1969. Bien que la ville de Kayes (5 km en amont du confluent avec la Kolombine) soit située à environ 900 Km de St Louis, il nous a paru opportun, étant donné la rareté des mesures, de reprendre ici l'ensemble des résultats obtenus à cette station. Les mesures à la turbisonde NEYRPEC, couplées avec des échantillonnages à la bouteille de prélèvement, ont été réalisées à l'aide d'un ponton flottant placé sur deux pirogues. Les déplacements sur cinq profils verticaux étaient assurés à l'aide d'un treuil ; simultanément aux cinq prélèvements par profil, un moulinet permettait d'enregistrer les vitesses du courant. Les deux campagnes de mesure de la turbidité en 1968 et en 1969 se sont déroulées du 2 juillet au 30 septembre. Le tableau 30 montre

Tableau 26 : RELEVES LIMNIMETRIQUES MOYENS JOURNALIERS (en cm) DE MAI 1981 A AVRIL 1982 A DAGANA
(le zéro de l'échelle est situé à la cote -0,44 m IGN)

Jours	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avril
1	-	68	72	120	253	271	115	82	65	49	50	29
2	48	70	77	125	255	271	106	85	62	43	39	27
3	60	82	82	130	256	270	98	76	57	37	44	33
4	69	84	89	129	255	267	94	66	62	34	45	39
5	60	82	94	127	257	264	91	57	55	56	45	41
6	71	82	94	133	259	260	90	54	56	62	50	51
7	66	77	86	141	260	255	89	58	53	65	59	57
8	58	69	88	164	260	247	89	66	60	65	61	68
9	47	69	70	170	261	241	95	72	62	66	70	79
10	55	54	68	174	262	236	102	75	-	69	65	72
11	32	56	69	179	263	232	103	76	65	68	64	68
12	42	54	78	186	267	228	113	86	66	59	65	-
13	50	55	87	192	268	220	118	92	58	35	63	68
14	57	60	95	201	270	212	109	72	52	45	65	64
15	54	71	102	205	270	200	108	64	49	39	60	51
16	54	78	104	211	271	198	95	61	40	35	53	43
17	74	81	106	216	273	193	104	63	41	36	49	44
18	68	83	116	218	274	183	86	60	43	42	41	49
19	67	82	100	222	275	173	90	61	40	44	36	49
20	69	76	104	226	274	163	73	58	32	49	37	49
21	67	75	103	228	273	152	74	39	33	50	51	51
22	67	72	105	229	274	144	78	36	34	52	54	53
23	62	69	108	231	274	138	84	46	32	64	59	54
24	62	65	103	233	274	136	85	52	33	66	62	57
25	61	68	94	235	274	132	85	62	41	61	71	60
26	57	60	95	236	275	132	85	63	49	59	75	56
27	52	57	98	242	274	131	85	61	58	58	71	52
28	50	55	100	244	274	125	82	63	68	51	67	44
29	51	60	104	246	274	121	81	68	66		65	35
30	60	71	106	247	273	121		68	61		61	32
31	65		106	250		117		69	55		53	

Tableau 27 : RELEVES LIMNIMETRIQUES MOYENS JOURNALIERS (en cm) DE MAI 1982 A AVRIL 1983 A DAGANA
(le zéro de l'échelle est situé à la cote -0,44 m IGN)

Jours	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avril
1	29	49	65	91	191	172	103	74	59	56	62	60
2	29	51	64	97	196	172	108	76	51	56	62	60
3	30	53	71	101	201	171	107	75	50	55	61	54
4	37	54	74	106	206	167	111	63	43	54	59	45
5	38	60	73	103	211	164	100	43	37	55	58	45
6	56	64	75	104	214	159	92	39	29	45	52	34
7	51	67	76	100	218	156	89	41	26	43	43	30
8	51	73	80	101	220	153	84	36	32	44	40	40
9	50	75	86	103	223	150	78	34	35	45	38	41
10	47	77	86	98	221	145	82	34	42	45	33	51
11	38	76	83	93	224	139	80	41	45	54	33	51
12	46	69	64	86	222	134	80	43	48	49	42	60
13	48	68	61	86	220	130	82	51	52	49	-	60
14	42	65	59	85	220	134	86	65	56	49	67	74
15	35	64	60	87	219	134	94	54	60	50	69	72
16	32	67	60	103	219	138	97	43	61	53	69	70
17	32	65	59	112	219	141	94	46	57	52	71	63
18	32	73	65	123	219	142	92	47	50	57	65	59
19	46	75	88	135	217	139	81	50	50	49	59	55
20	53	77	84	148	217	140	75	47	50	45	57	44
21	57	81	95	157	217	139	70	49	35	45	56	36
22	65	88	106	158	215	126	67	50	42	39	55	37
23	79	92	110	156	212	116	64	52	43	38	53	-
24	80	90	108	162	208	108	60	50	45	42	52	51
25	81	87	95	159	204	99	59	45	46	46	51	64
26	78	79	98	158	199	91	64	40	46	54	47	69
27	71	75	97	159	194	87	65	41	46	60	55	70
28	69	74	94	164	189	90	62	45	45	61	52	71
29	54	73	83	172	182	92	67	52	49		59	64
30	49	68	87	179	176	93	73	57	50		61	51
31	48		91	186		101		57	59		59	

Tableau 28 : DEBITS MOYENS JOURNALIERS (m³/s) DE MAI 1981 A AVRIL 1982 A DAGANA
(n.d. : non déterminé) - Module : 374 m³/s.

Jours	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avril
1	1.27	0.35		635	1525	1465	535	231	85.1	40.5	16.5	4.88
2	1.22	0.34		665	1540	1450	490	222	82.8	39.5	15.9	4.69
3	1.17	0.32		700	1545	1450	(444)	213	80.6	38.5	15.3	4.50
4	1.12	0.31		670	1500	1425	(425)	205	78.7	37.5	14.7	4.32
5	1.07	0.30		640	1555	1390	(410)	198	76.8	36.4	14.2	4.15
6	1.03	0.29		715	1565	1345	(405)	191	75.0	35.4	13.7	3.99
7	0.98	0.30		765	1575	1310	(400)	184	73.2	34.4	13.2	3.83
8	0.94	0.28		905	1575	1250	(400)	178	72.5	33.4	12.7	3.68
9	0.90	0.27		950	1580	1210	(450)	171	69.9	32.4	12.2	3.53
10	0.86			965	1590	1180	(495)	165	68.3	31.5	11.7	3.39
11	0.83			995	1595	1155	(565)	160	66.7	30.5	11.2	3.26
12	0.79		n.d.	1045	1625	1120	(585)	154	65.2	29.6	10.7	3.13
13	0.76			1085	1635	1090	(625)	149	63.6	28.6	10.3	3.01
14	0.73			1150	1650	1060	(500)	144	62.1	27.7	9.93	2.89
15	0.70			1175	1650	980	(500)	139	60.7	26.8	9.55	2.77
16	0.67			1220	1655	970	(430)	135	59.4	26.0	9.19	2.56
17	0.64			1255	1670	940	412	130	58.1	25.2	8.84	2.56
18	0.62			1270	1670	880	395	126	56.9	24.4	8.50	2.46
19	0.59	n.d.		1295	1600	835	379	122	55.6	23.6	8.17	2.36
20	0.57			1330	1540	775	364	119	54.5	22.8	7.85	2.26
21	0.55			1345	1490	720	349	115	53.3	22.1	7.54	2.17
22	0.53			1355	1510	680	334	112	52.1	21.3	7.23	2.08
23	0.51			1365	1510	645	321	109	50.1	20.6	6.95	1.99
24	0.49			1380	1510	640	307	105	49.7	19.9	6.68	1.92
25	0.47			1395	1510	620	295	103	48.6	19.2	6.41	1.84
26	0.45			1405	1550	620	283	100	47.4	18.5	6.16	1.77
27	0.43			1445	1520	615	271	97.1	46.3	17.8	5.93	1.70
28	0.41			1465	1520	580	261	94.6	45.1	17.2	5.70	1.63
29	0.40			1475	1520	565	250	92.2	44.0		5.47	1.56
30	0.38			1485	1490	565	240	89.8	42.8		5.26	1.50
31	0.37		(500)	1505		545		87.5	41.7		5.07	
Mois	0.70	(0.3)	(150)	1131	1566	970	404	143	60.8	27.9	9.76	2.88

Tableau 29 : DEBITS MOYENS JOURNALIERS (m³/s) DE MAI 1982 A AVRIL 1983 A DAGANA
(n.d. : non déterminé) - Module : 254 m³/s.

Jours	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril
1	1.44	0.56		380	1070	820	417	186	66.5	30.0	13.3	3.39
2	1.38	0.57		450	1100	820	416	179	64.9	29.0	12.8	3.26
3	1.33	0.58		480	1140	810	413	172	63.6	28.1	12.3	3.14
4	1.28	0.58		530	1175	800	409	165	62.2	27.3	11.9	3.02
5	1.23	0.58		500	1205	785	404	159	60.8	26.5	11.6	2.91
6	1.18	0.59		520	1235	755	398	153	59.5	25.8	11.3	2.81
7	1.14			500	1270	745	391	147	58.5	25.1	10.9	2.72
8	1.10	n.d.	n.d.	480	1280	725	383	141	57.0	24.4	10.6	2.63
9	1.06			530	1300	715	375	136	55.7	23.8	10.2	2.54
10	1.03			510	1240	690	366	131	54.6	23.2	9.8	2.46
11	0.99	0.59		440	1315	660	357	126	53.6	22.7	9.3	2.38
12	0.96	0.58		430	1150	635	347	122	52.2	22.1	8.8	2.31
13	0.93	0.58		430	1125	605	337	118	51.0	21.7	8.4	2.24
14	0.90	0.57		370	1115	615	327	114	49.8	21.2	8.0	2.18
15	0.88	0.56		365	1115	730	317	110	48.5	20.8	7.6	2.12
16	0.86	0.55		480	1105	760	307	106	47.2	20.3	7.2	2.07
17	0.83	0.53		535	1115	785	297	103	46.0	19.9	6.8	2.01
18	0.81	0.52		605	1115	770	288	99.7	44.9	19.4	6.5	1.95
19	0.79	0.49		700	1095	785	280	96.8	43.7	18.8	6.2	1.78
20	0.78	0.48		790	1105	700	272	93.7	42.6	18.3	5.9	1.72
21	0.76	0.45		850	1105	615	263	90.7	41.4	17.8	5.6	1.65
22	0.74	0.42		870	1090	550	255	87.9	40.1	17.3	5.4	1.58
23	0.72	0.39	535	870	1070	515	247	85.2	39.0	16.7	5.1	1.52
24	0.71	0.365	575	905	1045	470	239	82.7	37.9	16.2	4.9	1.46
25	0.66	(0.336)	440	790	1015	405	231	80.2	36.8	15.6	4.7	1.41
26	0.65	(0.309)	505	790	980	408	223	77.8	35.7	15.1	4.4	1.35
27	0.64	(0.284)	500	790	950	410	215	75.6	34.7	14.5	4.2	1.31
28	0.62	(0.26)	430	890	920	411	207	73.5	33.8	13.8	4.04	1.26
29	0.61	(0.24)	410	940	880	413	200	71.6	32.9		3.86	1.22
30	0.59	(0.22)	490	990	855	415	193	69.7	31.9		3.69	1.18
31	0.59		380	1035		417		68	31.0		3.53	
Mois	0.91	0.49	(156)	637	1109	637	313	114	47.7	21.3	7.7	2.12

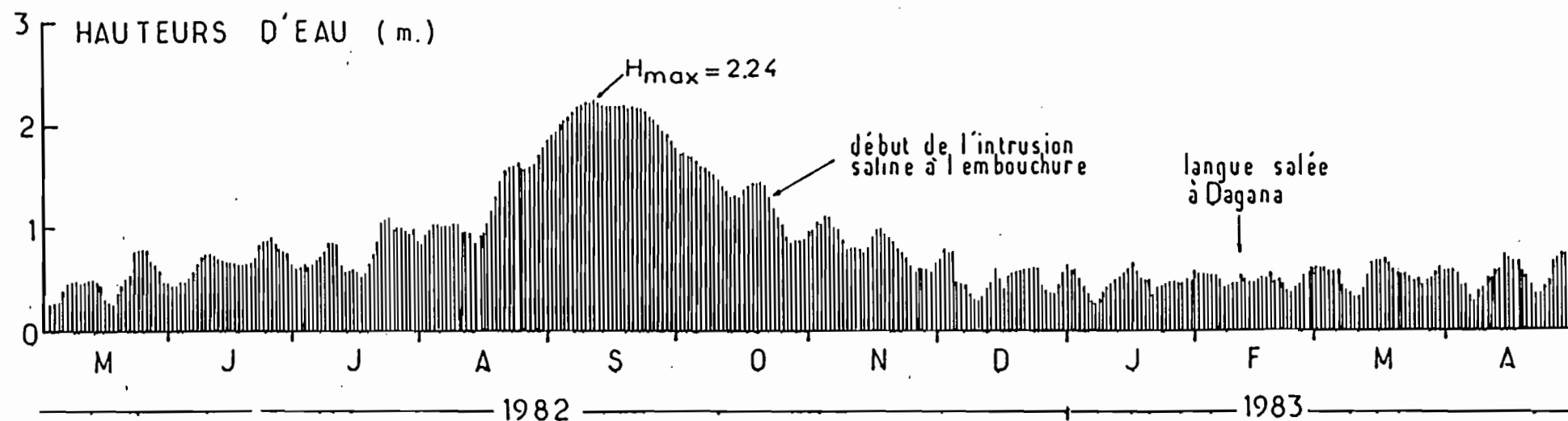
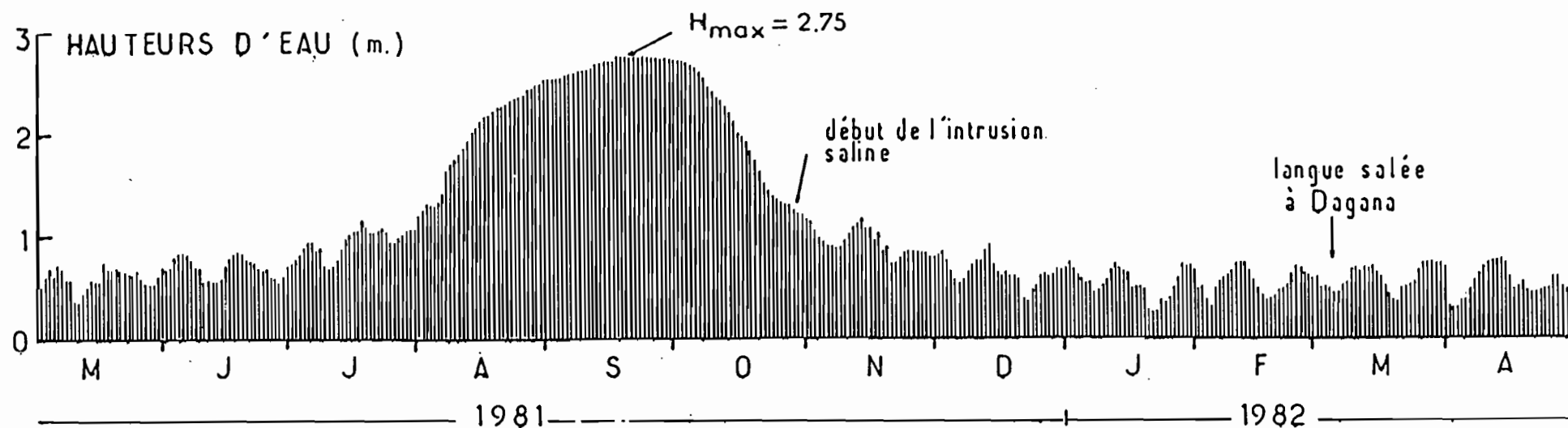


Fig 25_Variations des hauteurs d'eau journalières à Dagana de mai 81 à avril 82

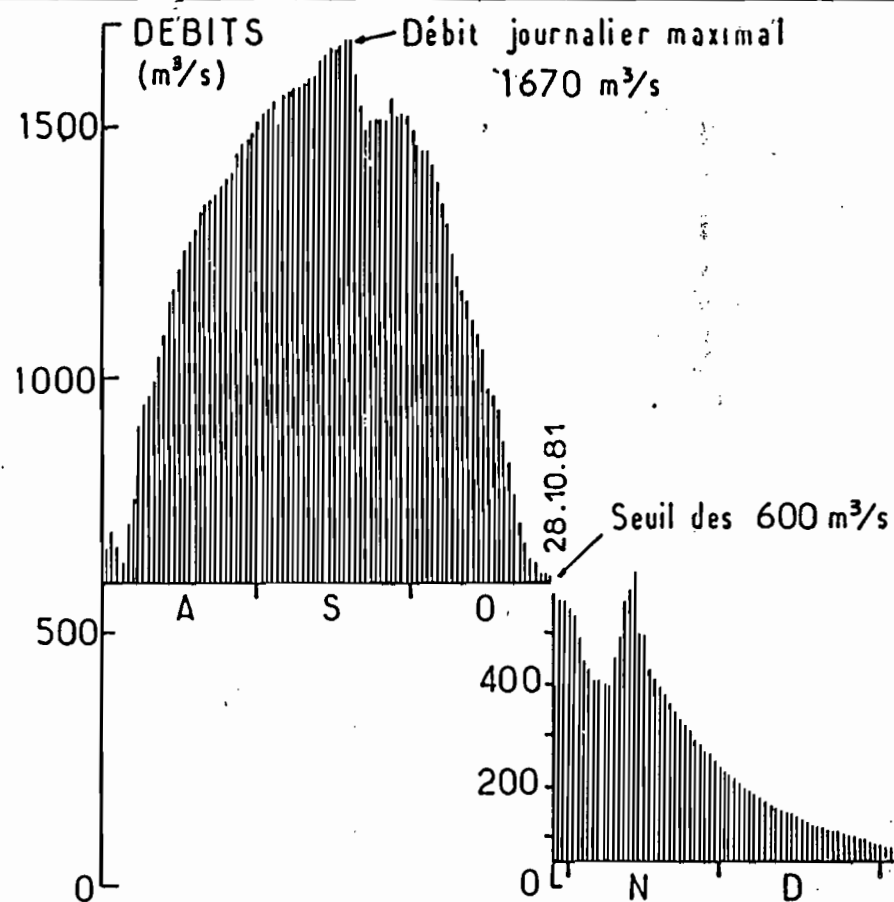
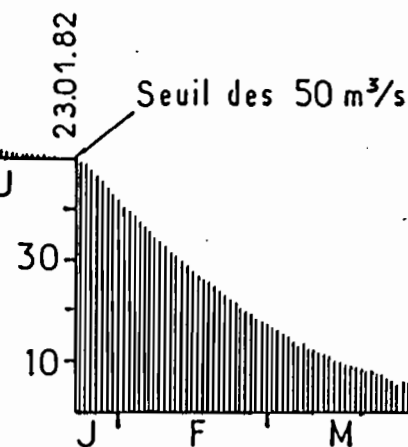
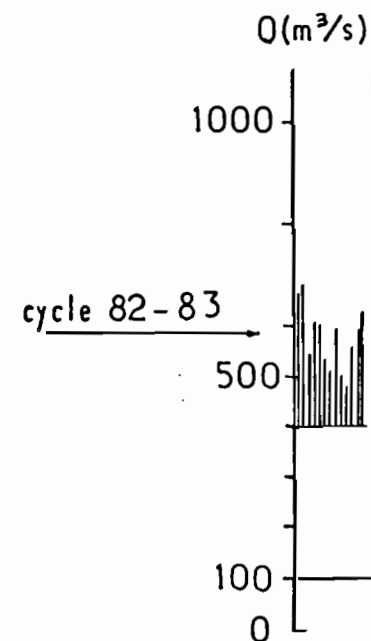
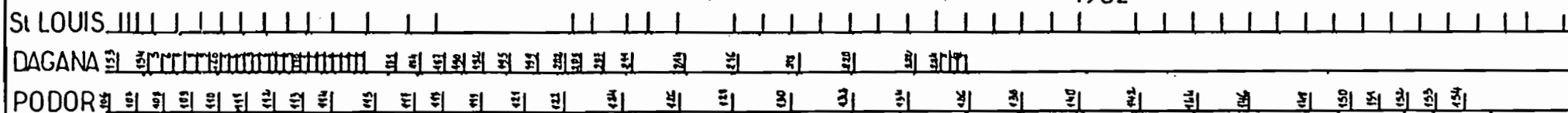
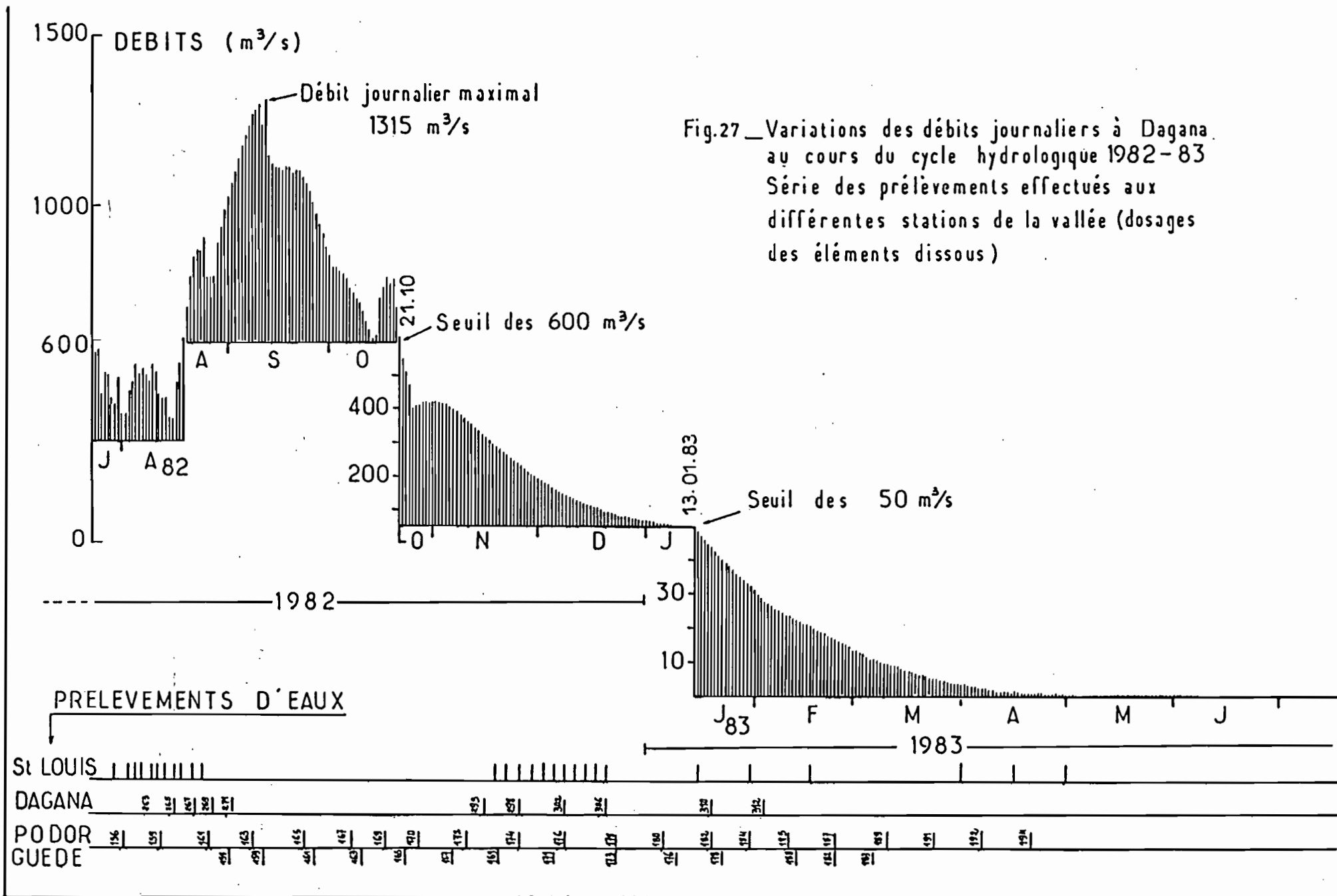


Fig. 26_Variations des débits journaliers à Dagana
au cours du cycle hydrologique 1981- 82
Série des prélèvements effectués aux
différentes stations de la vallée (dosages
des éléments dissous)



PRELEVEMENTS D'EAUX





que les concentrations moyennes quotidiennes sont de l'ordre de 100 mg/l, avec des pointes pouvant atteindre 300 mg/l. Il ressort de l'examen des résultats que les turbidités sont toujours plus élevées en début de crue pour diminuer ensuite progressivement. En année moyenne, l'exportation de matériaux en suspension serait de l'ordre de 2,3 millions de tonnes (dont 300 000 tonnes de matière organique). Par extrapolation, SENEAL-CONSULT (1970) évalue à 1,4 et 2,9 millions de tonnes les flux détritiques annuels aux stations de Manantali et de Bakel.

La mission SURVEYER-NENNIGER-CHENEVERT (1972) a pour sa part estimé à 1 million de tonnes les quantités de matières en suspension véhiculées par le fleuve Sénégal vers son embouchure.

Rappelons enfin pour mémoire la récente étude entreprise par LO (1984) sur le fleuve Gambie qui, pour le cycle hydrologique très déficitaire de 1983-1984, évalue à 87 000 tonnes (turbidité moyenne de 46 mg/l) le bilan des exportations de matières à Gouloumbou.

Tableau 30 : TURBIDITE (mg/l) DES EAUX DU SENEGAL A KAYES AU COURS DES CRUES DE 1968 ET DE 1969 (SENEGAL-CONSULT, 1970)

Jours	1968			1969		
	Juil	Août	Sept	Juil	Août	Sept
1		145	60		130	105
2		155	110		127	95
3		155	115		125	95
4		180	90		102	95
5		135	55		90	200
6		160	40		107	160
7		175	60		80	165
8		150	90		65	185
9		190	70		55	190
10		165	55		65	150
11		140	240		65	95
12		80	235		62	107
13		75	250		70	135
14		120	175		70	85
15		135	160		65	90
16		115	165		70	100
17		110	135		65	95
18		68	135		55	100
19		72	100		85	105
20		105	70		90	100
21		63	75		135	65
22		92	55		115	65
23		120	55		115	30
24	130	120	60	140	90	50
25	125	105	55	150	160	45
26	240	90	35	100	172	40
27	140	40	35	82	145	50
28	135	85	30	82	147	45
29	180	100	25	95	150	40
30	130	95	20	88	105	40
31	160	115		100	105	

8 - LE PROTOCOLE DES PRELEVEMENTS DE MATIERES EN SUSPENSION

A l'instar de GAC (1979), "l'élaboration de la méthodologie afin de déterminer le mode, la densité et la fréquence des prélèvements" est due à BERTHELOT (1956), COLOMBANI (1967), BILLON (1968) et NOUVELOT (1969).

Le contrôle des flux détritiques d'origine continentale à l'embouchure du Sénégal a été entrepris au cours de la saison des hautes-eaux 1981-1982 et 1982-1983. Les prélèvements ont été effectués à St Louis au niveau du Pont FAIDHERBE, qui enjambe le bras principal du fleuve. Chaque échantillonnage consistait en une prise d'eau de 64 litres à l'aide d'une bouteille à renversement de 1 litre munie d'un messageur, les prélèvements successifs se faisant sur cinq profils transversaux et à différentes profondeurs. Cette technique est évidemment assez rudimentaire, mais elle présente l'avantage d'allier simplicité et rapidité dans le prélèvement. Il nous était en effet difficile de faire appel à des méthodes plus sophistiquées (turbisonde ou bouteille de DELFT) sans dépasser le seuil des limites matériellement et financièrement supportables. Quelques déterminations de la turbidité ont cependant été réalisées selon la méthode préconisée par BILLON (1968). Elle consiste, lorsque jaugeage et prélèvement des matières en suspension sont effectués simultanément, à fixer un ajutage entre le moulinet et le saumon ; en surface, le tuyau est couplé à une pompe JAPY et le récipient collecteur est une dame-jeanne.

Le traitement "in situ" de l'échantillon prélevé a consisté à déverser les 64 litres dans un fût plastique. L'objectif étant de ramener rapidement à 1 litre le volume à acheminer vers le laboratoire, nous avons procédé par décantation accélérée ou floculation en additionnant 5 cc d'HCl dans le fût. Au bout de 24 heures, on procède, à l'aide d'un tube recourbé, au siphonnage de l'eau claire surnageante ; le volume restant (un peu moins de 10 litres) est alors transvasé dans une dame-jeanne récipient en verre qui permet de visualiser 24 heures plus tard la dernière opération de siphonnage. En fin d'opération, le litre recueilli est transféré au laboratoire d'hydrogéochimie de l'ORSTOM à Dakar. Le procédé de floculation pouvant entraîner des modifications dans les échantillons, ceux-ci ont été lavés par centrifugation à l'eau distillée (4 lavages successifs sur les résidus obtenus), puis séchés à l'étuve à 80° C et pesés.

Ainsi, 75 échantillons pour les matières en suspension ont été recueillis (27 en 1981-1982, 48 en 1982-1983). Le régime du cours d'eau a guidé la répartition et la densité du prélèvement au cours de la période des hautes-eaux (août-septembre et octobre) pour déterminer les principales caractéristiques du transport solide en suspension et évaluer les flux particuliers annuels.

C - EVOLUTION SAISONNIERE DE LA TURBIDITE AU COURS DES CYCLES HYDROLOGIQUES 81-82 ET 82-83

Les variations saisonnières de la turbidité des eaux du Sénégal sont très visibles et il est aisé d'en esquisser le schéma général. Pendant la saison des hautes-eaux, les eaux sont extrêmement turbides en raison de leur importante charge en limons, leur couleur est alors "jaune sale". Elles s'éclaircissent à partir d'octobre et deviennent "bleu sombre" dès le mois de décembre avec l'arrivée massive des eaux océaniques à la hauteur de St Louis. Selon REIZER (1974), la diminution de la turbidité dès l'amorce de la décrue est vraisemblablement liée au mélange des eaux de ruissellement (issues de la partie du bassin soumise au régime tropical de transition) et des eaux de vidanges des réserves supérieures. On retrouve ici le phénomène classique engendré par la présence de plaines d'inondation qui jouent le rôle de filtres et ne restituent au collecteur que des eaux limpides délestées de leur charge solide (GAC, 1979).

Nous avons reporté dans le tableau 31 l'ensemble des mesures sur la charge solide du fleuve Sénégal à St Louis(1). Les plus fortes concentrations journalières observées au cours des deux cycles successifs ont été de 686,4 mg/l (15/08/81) et de 415,8 mg/l (20/08/82). Ces valeurs sont bien plus élevées que celles connues antérieurement et sont vraisemblablement liées au fait qu'en période de sécheresse, l'écoulement du fleuve canalisé dans le lit mineur pendant le passage de la première onde de crue provoque des sapements latéraux plus importants des rives. Comme ceci a été déjà souligné pour le Chari (CARRE, 1972 ; CHOURET, 1977), pour la Sanaga (NOU/ELLOT, 1972), pour le Bandama (LENGUIR, 1972 ; MONNET, 1972) et pour la Gambie (LO, 1984), les turbidités maximales précèdent toujours la pointe de crue (fig. 28).

Les charges solides restent supérieures à 200 mg/l jusqu'à l'amorce de la décrue puis diminuent ensuite très rapidement. Dès novembre, avec l'achèvement de la saison des pluies, le développement de la végétation atténue le transport des matériaux en suspension ; la dégradation des sols est moindre et les eaux n'assurent plus que l'évacuation des fines particules déjà libérées. La période des basses-eaux est marquée par la restitution progressive au fleuve des eaux d'inondation du lit majeur, des eaux d'infiltration et la vidange des nappes. Les eaux deviennent limpides, acquièrent une charge dissoute plus importante ; les concentrations de matières en suspension diminuent fréquemment en dessous de 10 mg/l. Pour cette période qui s'étend en général de décembre à juillet, nous avons adopté pour la station de St Louis les concentrations mesurées successivement à Richard-Toll, Dagana ou Podor, délaissant l'une après l'autre ces stations de l'amont lorsqu'elles étaient touchées par la langue salée.

L'acquisition de la charge solide et les mécanismes, qui de l'amont vers l'aval des bassins versants président, règlent et contrôlent les variations brutales des concentrations, restent mal connus. Les nombreuses études menées dans ce domaine ont montré que la charge en suspension est plus dépendante de la période de l'année que du débit. On a coutume de distinguer trois phases dans l'hydrogramme de crue :

- une période d'érosion précoce qui se traduit par une augmentation rapide de la turbidité et du débit. Cette phase correspond à l'arrivée des matières en suspension apportées par le ruissellement superficiel dues aux premières averses sur les versants et aussi à la reprise des "laissés" de crue déposés par le clapotis sur une succession de petites banquettes dans la partie inférieure des berges : rappelons ici l'hypothèse émise par GAC (1979) sur la charge solide constante (1 gr/l pour le Chari et 1,3 gr/l pour le Sénégal du ruissellement superficiel) ;
- une période d'érosion tardive où la charge en suspension diminue dans le cours d'eau alors que les débits augmentent. Cette phase de transition correspond à la fin de l'érosion des versants et surtout à l'érosion des berges et du lit mineur de la rivière. La charge solide initiale est diluée par une forte augmentation des débits liquides ;
- enfin une période d'alluvionnement, qui se traduit par une diminution simultanée de la turbidité et des écoulements. Au cours de cette phase, la rivière perd rapidement de sa compétence et les matériaux décantent en partie dans le lit mineur.

La phase 1 est en général de courte durée (de 20 à 30 jours) ; la seconde, de transition, se prolonge environ durant 2 mois, la phase terminale s'étendant jusqu'à la crue suivante. Schématiquement, l'extension de chacune des périodes serait de 1/12, 2/12 et 9/12 de l'année.

(1) : Les concentrations indiquées en 1979, en 1980 et du 23/06/81 au 30/07/81 nous ont été fournies par J.Y. GAC, qui dirige l'ensemble du programme de l'ORSTOM sur la géochimie du fleuve Sénégal.

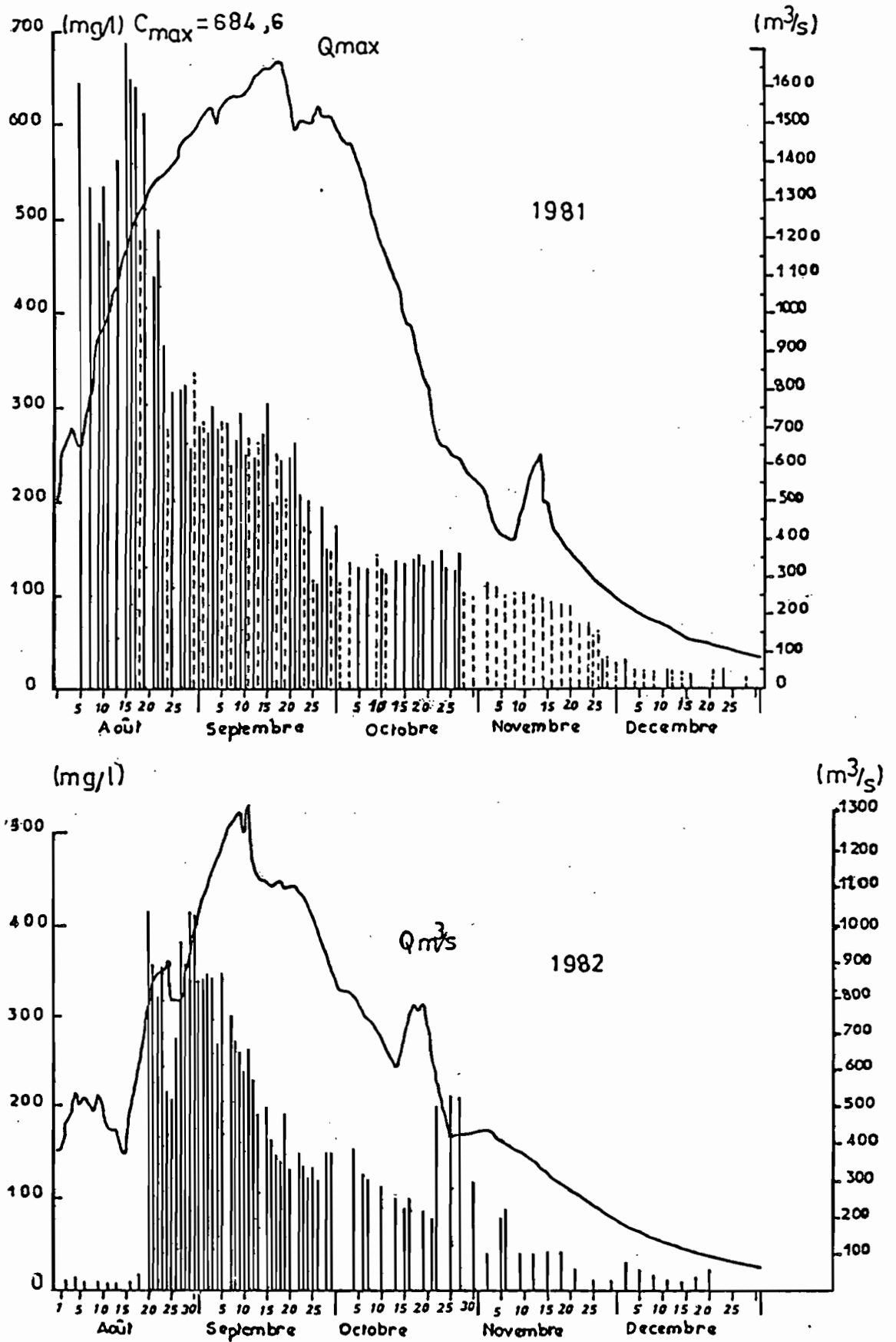


Figure 28 : Variations des concentrations moyennes journalières des matières en suspension avec les débits à Dagana en 1981 et en 1983.

Tableau 31 : MATIERES EN SUSPENSION (en mg/l) DANS LES EAUX DU FLEUVE
SENEGAL A SON EMBOUCHURE (station de Saint-Louis)

Date	C (mg/l)	Date	C (mg/l)	Date	C (mg/l)	Date	C (mg/l)	Date	C (mg/l)
1979		1981		1981		1982		1982	
30/08	214.0	16/08	647.1	24/10	130.0	09/08	10.4	29/09	147.0
29/09	209.0	17/08	638.5	26/10	126.7	11/08	8.8	04/10	151.2
1980		19/08	611.8	27/10	140.7	13/08	7.7	06/10	124.7
22/08	205.2	21/08	439.7	27/11	34.3	16/08	10.0	07/10	119.5
25/08	554.1	22/08	490.8	02/12	28.6	18/08	18.4	10/10	113.4
02/09	358.8	23/08	366.0	11/12	21.3	10/08	415.8	13/10	99.4
08/09	188.4	25/08	316.2	16/12	17.4	21/08	356.8	15/10	89.5
15/09	318.1	27/08	319.7	23/12	19.7	22/08	320.0	16/10	98.1
22/09	289.7	28/08	324.5	1982		23/08	355.0	19/10	85.6
14/10	281.4	29/08	257.0	06/01	13.6	24/08	215.5	21/10	78.4
17/10	91.0	31/08	281.0	13/01	14.5	25/08	208.3	22/10	200.2
29/10	95.3	02/09	275.0	20/01	11.4	26/08	275.6	25/10	212.7
12/11	20.5	03/09	302.2	27/01	17.2	27/08	383.6	27/10	206.2
25/11	15.6	04/09	278.2	03/02	20.0	28/08	358.4	30/10	128.7
02/12	17.2	06/09	283.6	10/02	20.7	29/08	414.9	01/11	40.2
10/12	50.6	08/09	267.1	17/02	15.5	30/08	411.2	05/11	81.5
1981		09/09	295.7	24/02	21.9	31/08	339.2	09/11	88.9
06/01	< 10.0	10/09	249.3	03/03	10.1	01/09	343.8	12/11	40.2
13/01	< 10.0	12/09	246.0	10/03	5.3	02/09	347.5	15/11	38.8
20/01	< 10.0	14/09	273.6	17/03	30.4	03/09	343.7	18/11	41.5
27/01	< 10.0	15/09	303.8	24/03	21.9	04/09	269.0	21/11	21.9
23/06	29.8	16/09	199.8	31/03	8.4	05/09	350.1	25/11	9.9
25/06	32.1	18/09	243.1	14/04	22.2	07/09	299.6	29/11	11.2
30/06	29.2	20/09	248.6	21/04	16.6	08/09	271.9	02/12	28.2
03/07	26.0	21/09	263.4	28/04	30.0	09/09	260.3	05/12	20.4
06/07	38.6	22/09	208.6	05/05	28.4	10/09	238.6	08/12	15.8
09/07	35.1	24/09	201.6	12/05	34.8	11/09	262.3	14/12	12.0
12/07	28.3	26/09	113.5	19/05	24.6	12/09	226.3	14/12	10.4
15/07	29.5	27/09	195.8	26/05	50.3	13/09	190.3	17/12	15.5
18/07	10.3	28/09	150.3	02/06	36.1	15/09	197.6	20/12	24.6
21/07	6.8	30/09	174.4	09/06	37.2	16/09	161.8		
24/07	16.0	05/10	131.4	16/06	40.5	17/09	145.7		
27/07	15.9	07/10	130.4	23/06	57.3	18/09	137.7		
30/07	26.5	10/10	130.4	30/06	31.8	19/09	191.4		
05/08	644.9	13/10	136.4	07/07	58.3	20/09	129.3		
07/08	535.1	15/10	134.7	14/07	71.0	22/09	149.3		
09/08	498.1	17/10	139.0	19/07	52.1	23/09	134.1		
10/08	536.9	18/10	143.6	28/07	22.1	24/09	122.6		
11/08	480.5	19/10	133.2	02/08	11.5	25/09	133.2		
13/08	562.8	21/10	136.3	04/08	14.8	26/09	118.3		
15/08	686.4	23/10	147.0	06/08	10.4	28/09	147.0		

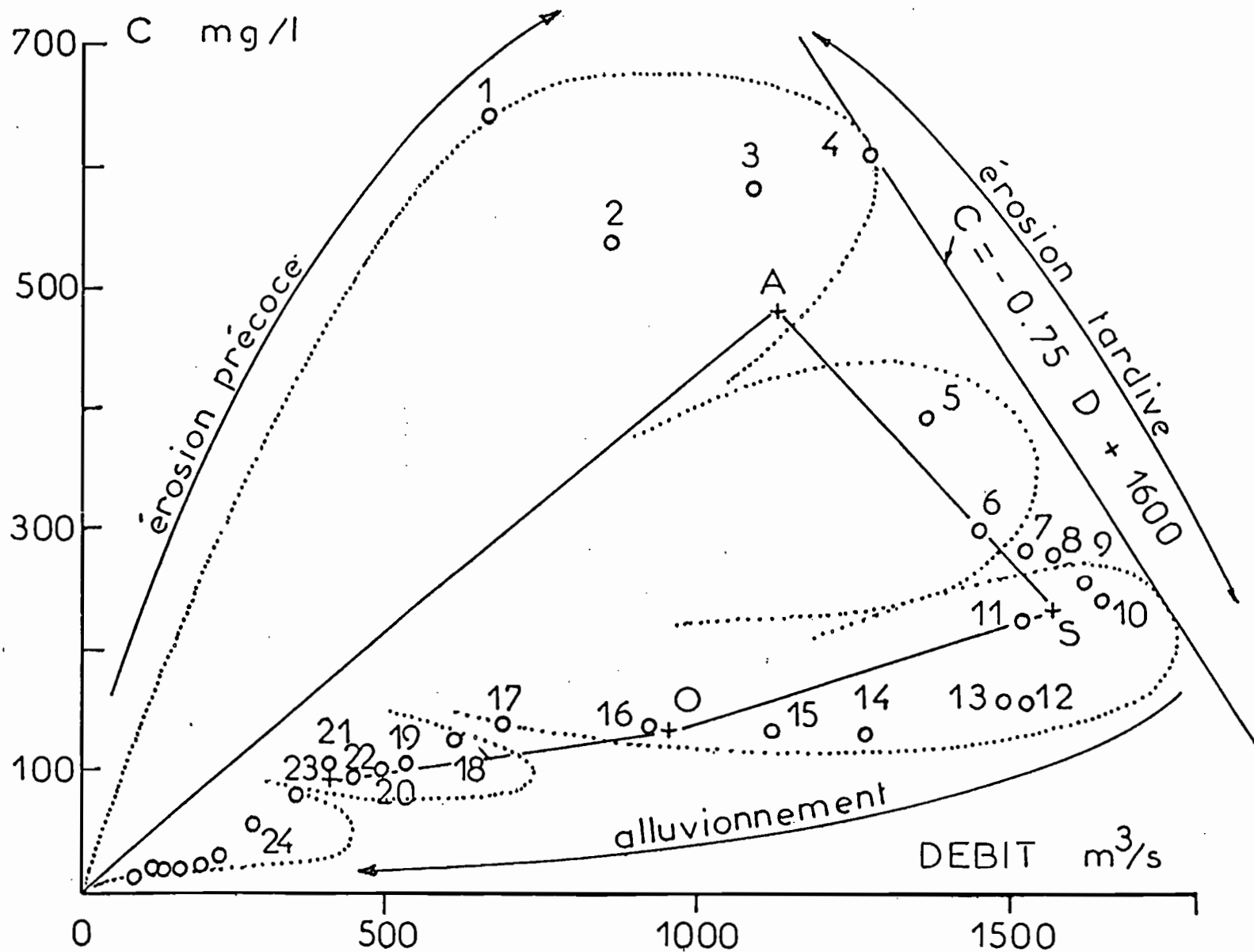
En réalité, comme l'ont souligné à maintes reprises GAC et al. (1985), "les à-coups journaliers dans les concentrations semblent de plus en plus devoir correspondre à des sortes de pulsations en patte d'oie intimement liées aux fluctuations relatives des débits et au laps de temps écoulé depuis le début de la crue." Afin de mieux saisir l'intérêt de cette hypothèse de travail, nous avons reporté sur la figure 29 les valeurs moyennes des concentrations en fonction des débits moyens correspondants. En général, ce genre de courbe que l'on trouve fréquemment dans la littérature est établie à l'échelle mensuelle : ce pas de temps a le désavantage de ne pas tenir compte d'une part de la précocité ou de l'arrivée tardive de la crue et, d'autre part, il masque par sa durée les événements majeurs qui se situent à l'échelle hebdomadaire, voire même journalière. Le choix d'une échelle journalière paraît difficile étant donné les nombreuses causes d'erreur aussi bien sur les débits que sur les concentrations. Aussi, avons-nous adopté un pas de temps de 5 jours, qui nous paraît plus "raisonnable", et être un juste compromis. Les calculs ont été menés à partir des premiers écoulements enregistrés à St Louis (le 1er août en 1981-82, le 20 août en 1982-83).

Les points représentatifs se disposent sur le pourtour d'empilements successifs (courbes en tirets sur les figures). On en dénombre 5 pour le cycle hydrologique 81-82 et 4 pour le cycle 82-83. Ces courbes, assimilables à des sortes de "courbes-enveloppes", sont évidemment très approximatives, mais intuitivement nous pensons qu'elles schématisent assez bien les fluctuations de la charge solide avec les pulsations enregistrées dans les écoulements. La première courbe-enveloppe correspondrait à l'érosion précocée, la seconde et la troisième à l'érosion tardive, la quatrième et la cinquième à la phase d'alluvionnement. L'intervention des plaines d'inondation, qui se situerait dans le temps entre le troisième et le quatrième empilement, n'est pas perceptible ici (les déversements dans les plaines limitrophes ayant été très réduits au cours des deux crues). Il serait évidemment intéressant de comparer ces résultats à ceux obtenus à l'amont à la station de Bakel.

Enfin, sans en connaître le sens réel, nous avons tracé la tangente aux trois courbes-enveloppes caractéristiques, semblent-il, de l'érosion et déterminé son équation pour établir la relation entre concentrations et débits. Par tâtonnements successifs, on trouve :

$$C = -0,75 D + 1600 \quad \text{avec } C : \text{turbidité en mg/l} \\ D : \text{débit en m}^3/\text{s.}$$

Fig. 29 : Valeurs moyennes des concentrations en fonction des débits moyens correspondants.



Pour un débit initial quasiment nul (ce qui revient à considérer les toutes premières étapes du ruissellement superficiel qui enclanchent l'érosion sur les versants), la valeur de la charge en suspension serait de 1 600 mg/l ou 1,6 gr/m³. Inversement, la charge en suspension s'annulerait dans les petits collecteurs de l'amont si, réunis, ils débitaient en fin de saison des pluies plus de 2 200 m³/s (cette éventualité, invraisemblable au premier abord mais que nous livrons à la réflexion du lecteur, suggère que le développement de la végétation serait telle qu'elle freinerait par une grande capacité d'interception toute érosion des sols).

D - LE BILAN DE L'EROSION MECANIQUE. FLUX MENSUEL ET ANNUEL DES MATIERES EN SUSPENSION

Les flux détritiques particuliers d'origine continentale à l'embouchure du Sénégal ont été calculés à partir des bilans journaliers lorsque les mesures de turbidité se faisaient quotidiennement (en général en crue) ou des bilans hebdomadaires lorsque les contrôles de la charge solide ont été réalisés à intervalles plus espacés (cas habituel en basses-eaux). La masse de sédiment est obtenue de manière classique par la formule :

$$M = C_s \times V \times 86\,400$$

C_s : charge solide en mg/l ou gr/m³

V : volume moyen journalier en m³/s.

Tableau 32 : BILAN DES FLUX DE MATIERES EN SUSPENSION A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL

Mois	1981 - 1982			1982 - 1983		
	C (mg/l)	V (10 ⁶ m ³)	Masse (en tonne)	C (mg/l)	V (10 ⁶ m ³)	Masse (en tonne)
Août	476.7	3028.95	1 443 995	186.2	1705.97	317 613
Septembre	237.5	4058.21	963 638	210.3	2875.39	604 644
Octobre	135.7	2598.48	352 731	128.1	1725.25	220 959
Novembre	89.2	1047.25	93 433	47.6	805.91	38 348
Décembre	19.7	383.72	7 561	(10.3)	305.34	(3 130)
Janvier	14.0	162.93	2 282	(7.4)	127.76	(945)
Février	17.0	67.50	1 146	(9.2)	51.53	(474)
Mars	15.0	26.15	391	(7.9)	20.62	(162)
Avril	5.7	7.47	42	(3.3)	5.50	(18)
Mai	5.9	2.45	15	(3.0)	2.01	(6)
Juin	11.1	1.26	11	(13.0)	0.31	(4)
Cycle hydrologique	251.7	11384.37	2 865 245	155.5	7625.59	1 185 903

Le tableau 32 indique l'importance mensuelle et annuelle des flux de matières en suspension à l'embouchure du Sénégal. Les deux cycles hydrologiques donnent des résultats tout à fait différents avec des apports respectifs à l'Océan de 2 850 000 tonnes en 1981-1982 et de seulement 1 185 000 tonnes en 1982-1983. Ces chiffres sont à rapprocher de ceux obtenus à la station amont de Bakel au cours des mêmes périodes (communication orale de J.Y. GAC) : 2 340 000 tonnes (81-82) et 1 420 000 tonnes (82-83). L'afflux de matières en suspension a été deux fois plus important en 81-82 qu'en 82-83. Au cours du premier cycle étudié, la quantité de matériaux enregistrés à l'aval est plus importante que celle fournie par l'amont (globalement le transit dans la vallée se solde par un gain de l'ordre de 500 000 tonnes) ; en revanche, au cours du second cycle, les quantités déversées dans l'Océan ne représentent que 83 % des matériaux livrés par les hauts bassins.

A l'échelle mensuelle, les mois d'août, de septembre, d'octobre et de novembre rassemblent la quasi-totalité (99 %) de la charge solide. Ceci est d'ailleurs très visible sur les images satellites qui traduisent l'opacité de l'Océan créée par le panache turbide des alluvions à l'embouchure. Plus de la moitié des flux annuels sont enregistrés en août pour le cycle 81-82 et en septembre pour le cycle 82-83. La turbidité moyenne annuelle s'est élevée à 252 mg/l en 1981-82 et à 156 mg/l en 1982-83, ce qui classe le Sénégal, selon la terminologie de PARDE, parmi les organismes fluviaux à fortes turbidités. La turbidité du Sénégal est bien plus importante que celle de son homologue gambien : à la station de Gouloumbou située à la limite du bassin amont de la Gambie, les turbidités moyennes en 1974-1975 ont été de 78 g/m³ (LERIQUE, 1975) et de 46 g/m³ en 1983-1984 (LO, 1984). Cet auteur souligne cependant le caractère exceptionnellement sec de ce dernier cycle hydrologique qui "n'est représentatif ni de l'écoulement, ni des transports réels de matières en suspension du fleuve Gambie".

En admettant que l'ensemble du bassin versant du Sénégal réponde de façon homogène aux sollicitations des agents de l'érosion mécanique, la dégradation spécifique a été de l'ordre de 10,6 t/km²/an en 1981-82 et de 4,4 t/km²/an en 1982-83.

En définitive, le transport solide du fleuve Sénégal est relativement faible (en moyenne de l'ordre de 2 millions de tonnes/an). Il s'agit de matériaux fins qui comme le souligne FRECAUT (1981) ont une double origine : "ils proviennent soit directement des plaines alluviales et des lits fluviaux (charge endogène), soit des versants sous l'action de l'érosion pluviale et du ruissellement superficiel

(charge exogène) : la distinction entre les apports propres aux versants et à la plaine alluviale est cependant difficile." GAC (1980), dans son étude sur les fleuves Chari et Logone, a proposé trois méthodes d'estimation de la contribution des plaines alluviales en s'appuyant d'une part sur les variations de la composition minéralogique des suspensions et, d'autre part, sur le temps de propagation de la charge solide entre l'amont et l'aval des bassins versants. Ces résultats nous ont tout naturellement amené à préciser les caractères granulométriques, minéralogiques et chimiques des sédiments recueillis à St Louis pendant les deux campagnes de prélèvement.

E - CARACTÈRES GRANULOMÉTRIQUES, MINÉRALOGIQUES ET CHIMIQUES DES MATIÈRES EN SUSPENSION

La faible variabilité de la nature des matières en suspension observée dans la plupart des cours d'eau de la zone sahélienne nous a amené, au terme de chaque campagne de prélèvement, à procéder à des regroupements afin de limiter les analyses à un nombre restreint d'échantillons. Les regroupements saisonniers (21 au total) ont été réalisés de manière à tenir compte de la chronologie des événements majeurs de l'érosion mécanique (maximum des concentrations, des tonnages exportés et des écoulements) :

Cycle 81-82

Cycle 82-83

N°	Période	% tonnage	N°	Période	% tonnage
SLO 1 :	du 05 au 10/08/81.....	13,34 %	SLO 11 :	du 02 au 23/08/82.....	9,68 %
SLO 2 :	du 11 au 16/08/81.....	11,91 %	SLO 12 :	du 24 au 27/08/82.....	6,41 %
SLO 3 :	du 17 au 22/08/81.....	13,10 %	SLO 13 :	du 28 au 31/08/82.....	10,69 %
SLO 4 :	du 23 au 28/08/81.....	8,43 %	SLO 14 :	du 01/09 au 05/09/82.....	13,40 %
SLO 5 :	du 29/08 au 06/09/81.....	11,50 %	SLO 15 :	du 06/09 au 10/09/82.....	12,44 %
SLO 6 :	du 07 au 15/09/81.....	11,73 %	SLO 16 :	du 11/09 au 16/09/82.....	10,34 %
SLO 7 :	du 16 au 24/09/81.....	9,66 %	SLO 17 :	du 17/09 au 23/09/82.....	8,17 %
SLO 8 :	du 25/09/ au 07/10/81.....	8,63 %	SLO 18 :	du 24/09 au 19/10/82.....	18,36 %
SLO 9 :	du 08/10 au 18/10/81.....	4,80 %	SLO 19 :	du 20/10 au 31/10/82.....	6,89 %
SLO 10 :	du 19/10 au 01/08/82.....	6,90 %	SLO 20 :	du 01/11 au 06/11/82.....	1,11 %
			SLO 21 :	du 07/11 au 18/07/83.....	2,51 %

1. Caractères granulométriques

L'analyse granulométrique des matières en suspension a été réalisée à l'aide d'un sédigraphe ("Sédiagraph 500"). Cet appareil mesure automatiquement la vitesse de chute des sédiments (application de la loi de STOCKES) grâce à un faisceau de rayons X et donne les résultats sous la forme de courbes de distribution en pourcentages cumulés en fonction des diamètres équivalents.

La fraction argileuse prédomine en toutes saisons (tableau 33) : elle représente de 65 à 93 % des matières en suspension. La fraction restante se partage entre les limons très fins (de 4 à 24 %), les limons fins (de 0,5 à 8 %), les limons moyens (de 0 à 5 %), les limons grossiers (de 0 à 3 %) et les sables (de 0 à 1 %). La distribution granulométrique moyenne des flux particuliers solides à l'embouchure du Sénégal est la suivante : 76 % d'argiles (<2 µ) ; 14,2 % de limons très fins (de 2 à 5 µ) ; 5 % de limons fins (de 5 à 10 µ) ; 2,6 % de limons moyens (de 10 à 20 µ) ; 1,9 % de limons grossiers (de 20 à 50 µ) et 0,3 % de sables (fraction supérieure à 50µ). Les courbes granulométriques cumulées (fig. 30) montrent que la fraction supérieure à 63 microns est négligeable. Cette répartition est analogue à celles observées dans d'autres rivières africaines (tableau 33) telles que le Chari (Tchad), le Bandama (Côte d'Ivoire), les rivières camerounaises, et la Gambie.

Les variations saisonnières restent peu marquées : on remarque simplement que la fraction fine argileuse est toujours plus faible au moment de la pointe de crue. Cette diminution est liée à l'accroissement de la vitesse du courant et sans doute au fait qu'à cette époque l'érosion des versants est relayée par celle des berges qui fournissent des matériaux plus grossiers. On sait en effet que dans le bassin inférieur, le fleuve érode les sables fins et les limons des anciennes levées. L'ampleur de cette érosion latérale prend des proportions plus ou moins grandes selon l'importance des crues : dans les rives concaves, le recul des berges a pu être évalué à 0,80 m/1,00 m par an (SALL, 1982). Pour le Chari, et en supposant que l'érosion affecte toute la hauteur de la berge, GAC (1980) cite le chiffre de 0,36 m/an.

2. Composition minéralogique

Les analyses diffractométriques aux rayons X sur la fraction inférieure à 2 microns et sur l'échantillon brut ont été réalisées au Centre de Sédimentologie de la Surface de Strasbourg.

La reconnaissance des espèces minérales se fait à partir des tests classiques :

- un enregistrement sur pâte non traitée : agrégat orienté Normal (N) ;
- une saturation de l'agrégat orienté à l'aide d'un polyalcol (glycérol ou éthylène-glycol) qui agrandit l'écart interfoliaire des smectites (GL) ;
- un chauffage à 490° C pendant 4 heures de l'agrégat orienté qui détruit la kaolinite et déshydrate de façon irréversible les smectites et les chlorites (Ch) ;

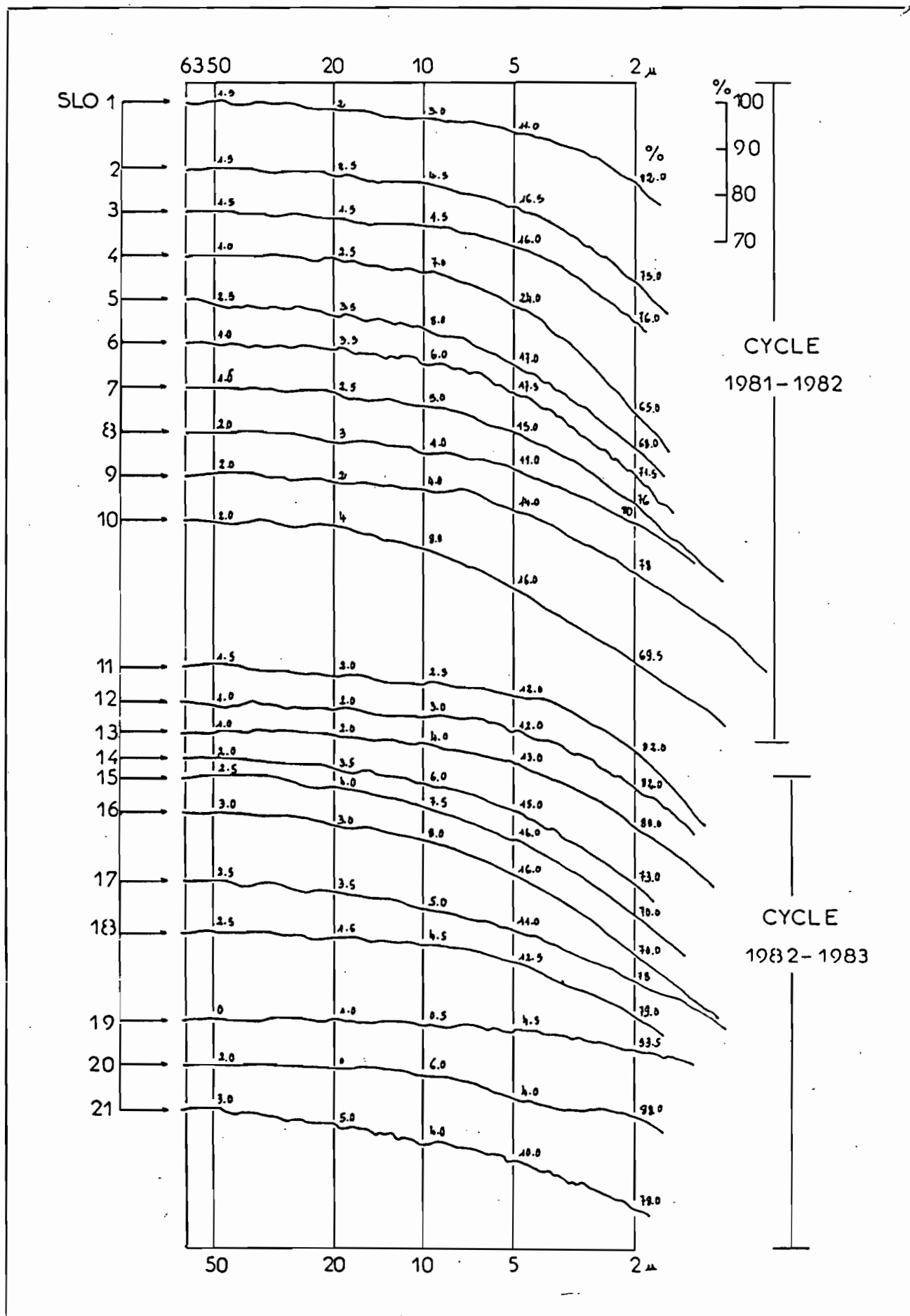


Fig. 30 : Variation de la granulométrie des suspensions à Saint-Louis de 1981 à 1982.

Tableau 33 : GRANULOMETRIE (en %) DES MATIERES EN SUSPENSION
A SAINT LOUIS PENDANT LES CRUES 1981 ET 1982

N° échantillon	Date	Argiles < 2 μ	Limon				Sables > 50 μ
			2-5 μ	5-10 μ	10-20 μ	20-50 μ	
Crue 1981-82							
SLO 1	05/08 - 10/8/81	82.0	11.0	3.0	2.0	1.5	0.5
SLO 2	11/08 - 16/8/81	75.0	16.5	4.5	2.5	1.5	0
SLO 3	17 - 22/8/81	76.0	16.0	4.5	1.5	1.5	0.5
SLO 4	23 - 28/8/81	65.0	24.0	7.0	2.5	1.0	0.5
SLO 5	29/8 - 06/9/81	68.0	17.0	8.0	3.5	2.5	1.0
SLO 6	07/9 - 15/9/81	71.5	17.5	6.0	3.5	1.0	0.5
SLO 7	16/9 - 24/9/81	76.0	15.0	5.0	2.5	1.5	0
SLO 8	25/9 - 07/10/81	80.0	11.0	4.0	3.0	2.0	0
SLO 9	08/10 - 18/10/81	78.0	14.0	4.0	2.0	2.0	0
SLO 10	19/10 - 18/08/82	69.5	16.0	8.0	4.0	2.0	0.5
Crue 1982-83							
SLO 11	19/08 - 23/8/82	82.0	12.0	2.5	2.0	1.5	0
SLO 12	24/08 - 27/8/82	82.0	12.0	3.0	2.0	1.0	0
SLO 13	28/08 - 31/8/82	80.0	13.0	4.0	2.0	1.0	0
SLO 14	01/09 - 05/9/82	73.0	15.0	6.0	3.5	2.0	0.5
SLO 15	06/09 - 10/9/82	70.0	16.0	7.5	4.0	2.5	0
SLO 16	11/09 - 16/9/82	70.0	16.0	8.0	3.0	3.0	0
SLO 17	17/09 - 23/9/82	78.0	11.0	5.0	3.5	2.5	0
SLO 18	24/09 - 19/10/82	79.0	12.5	4.5	1.5	2.5	1.0
SLO 19	20/09 - 31/10/82	93.5	4.5	0.5	1.0	0	0
SLO 20	01/11 - 06/11/82	88.0	4.0	6.0	0	2.0	0
SLO 21	07/11 - 18/07/83	78.0	10.0	4.0	5.0	3.0	0
Moyenne							
1981-1982	-	74.2	15.7	5.3	2.7	1.6	0.5
1982-1983	-	77.8	12.7	4.7	2.5	2.1	0.2
Chari (GAC, 1979)	1970-1974	65.0					12
Bandama (MONNET, 1972)	1967-1970	62.0					13
Cameroun (NOUVELOT, 1969)	1965-1968	82.0					11
Gambie (LO, 1984)	1983-1984	64.0					7

- un traitement à l'hydrazine-monohydraté qui affecte les minéraux de type kaolinite et permet de les distinguer des chlorites (Hyd.).

L'identification des minéraux a été effectuée sur la base des critères définis par LUCAS (1962), BROWN (1963) et HOFFERT (1973).

a) Etude des échantillons bruts sur diagrammes de poudre

Les diffractogrammes de poudres obtenus sur les 21 échantillons sont sensiblement identiques. La figure 31 avec les diagrammes de SLO₁, SLO₅, SLO₁₀ (cycle 81-82), SLO₁₃ et SLO₂₀ (cycle 82-83) révèle la présence constante du quartz, de la kaolinite et d'argiles dont la nature ne peut être précisée que par extraction au préalable de la fraction inférieure à 2 microns.

Ces trois espèces minérales sont prédominantes. Elles sont accompagnées d'illite, de feldspaths (caractérisés par les deux épaulements qui succèdent au pic principal du quartz) et de goethite. La présence d'hématite est probable en petites quantités.

L'analyse des échantillons bruts confirme les résultats granulométriques avec une fraction argileuse nettement dominante. Pour préciser le cortège minéralogique de cette fraction, les échantillons bruts ont d'abord été traités à l'eau oxygénée (élimination de la matière organique), puis remis en suspension dans l'eau : la technique de séparation de la phase argileuse à partir de cette suspension est basée sur la loi de STOCKES.

b) Cortège argileux de la fraction fine des matières en suspension

La reconnaissance des minéraux argileux aux rayons X a été traitée par de nombreux auteurs. Nous emprunterons à HOFFERT (1973) son schéma classique de détermination basé sur la position et le déplacement des réflexions (001) au cours des différents traitements (N, Ch, Gly, Hydr.).

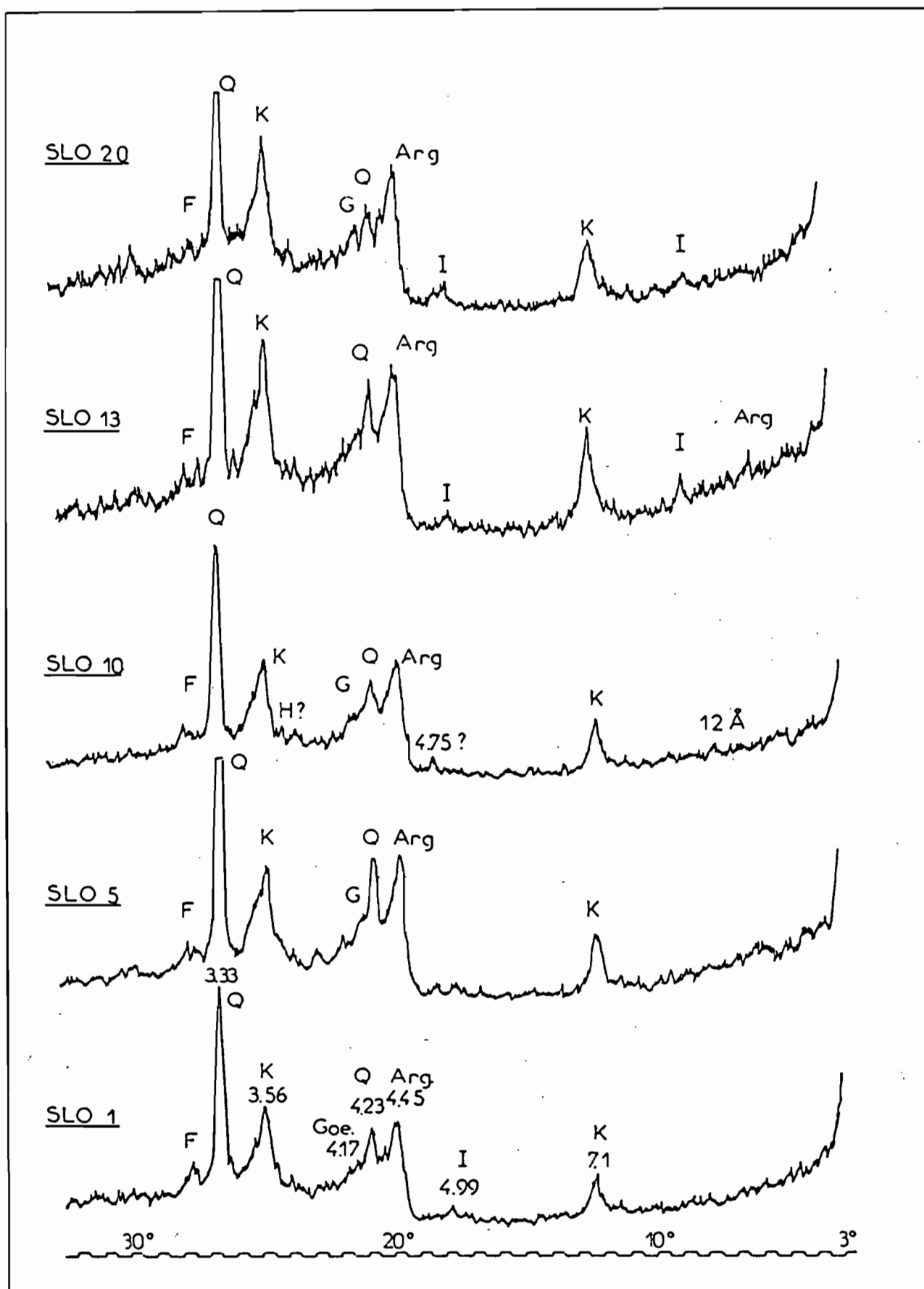
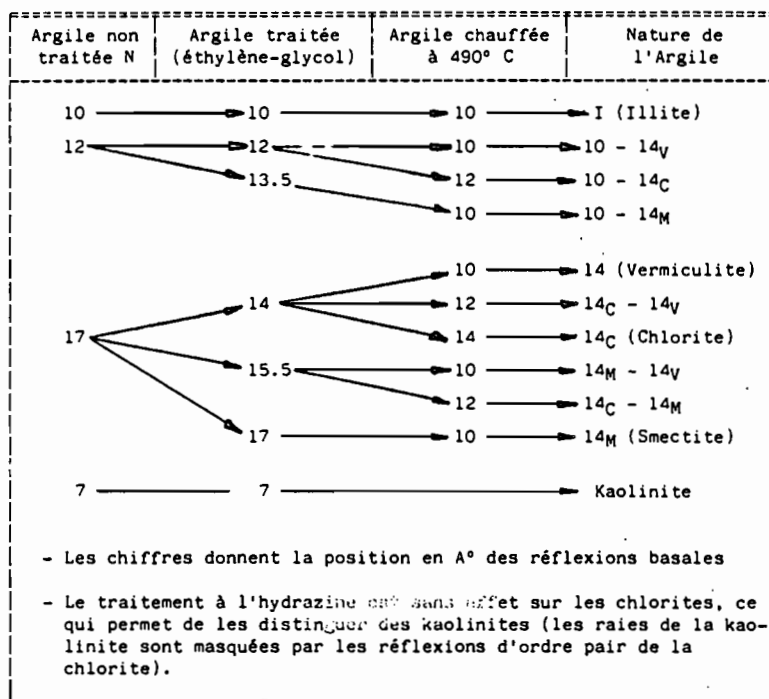


Figure 31 : Diffractogrammes de poudre des échantillons bruts des suspensions des eaux du Sénégal à Saint-Louis.



Il n'y a pas de différences fondamentales entre les deux séries d'échantillons. Les diagrammes (fig. 32) sont comparables et les quelques divergences observées ne tiennent qu'aux variations dans les proportions relatives des quatre types de minéraux phylliteux dominants : kaolinite, smectite, illite et interstratifiés (la nature de ces derniers édifices a été difficile à préciser ; il s'agit comme leur nom l'indique d'empilements réguliers ou désordonnés de deux ou plusieurs types de feuillets ayant la structure de minéraux phylliteux simples).

- la kaolinite constitue, en toutes saisons, le minéral argileux prédominant dans les matières en suspension du Sénégal ; elle ne semble subir aucune transformation depuis son milieu d'origine jusqu'à l'estuaire ;
- la smectite est présente, et abondamment, dans tous les échantillons ; elle représente en moyenne 20 % de la charge solide, mais ce pourcentage est nettement moins élevé en périodes de crue. Son origine est vraisemblablement double (plaine alluviale et versants de l'amont) car elle est déjà très nettement perceptible dans les matières en suspension recueillies à Bakel ;
- l'illite est également présente dans tous les échantillons ; le taux varie peu au cours des saisons ;
- les interstratifiés (types 10-14_M et 14_C-14_M) sont très visibles sur les enregistrements "chauffés", le maintien de raies autour de 12 A° ne pouvant être attribué à aucun autre minéral phylliteux connu.

Les proportions relatives entre ces minéraux les plus abondants sont difficiles à préciser. De nombreuses méthodes semi-quantitatives ont été proposées ; mais l'appréciation reste assez subjective et ne peut être faite qu'avec prudence et après une longue expérience acquise sur de nombreuses déterminations. Avec notre modeste connaissance et en fixant arbitrairement à 100 la somme kaolinite/smectite/illite et interstratifiés, la kaolinite représenterait de 50 à 75 % de la fraction < 2 µ, la smectite de 15 à 35 %, les interstratifiés de 10 à 20 % et l'illite de 5 à 15 %. Cette évaluation sera reprise ultérieurement après l'étude de la composition chimique des matières en suspension.

3. Composition chimique des matières en suspension

Les analyses chimiques des dix échantillons regroupés de la crue 1981-1982 ont été réalisées au Centre de Sédimentologie et de la Géochimie de la surface de Strasbourg à l'aide d'un spectromètre d'arc à lecture directe (majeurs et traces) et d'un spectromètre d'absorption atomique (dosage des alcalins).

L'ensemble des résultats figure dans le tableau 34. Les variations de composition d'un échantillon à l'autre sont très faibles comme le laissait pressentir la similitude des caractères granulométriques et minéralogiques. Exprimées en % d'oxydes, les différentes analyses montrent que les matières en suspension sont essentiellement constituées de silice (50,2 %), d'alumine (24 %), de fer (9,7 %) ; un second groupe moins important réunit le potassium (1,7 %), le magnésium (1,2 %) et le titane (0,9 %). Deux éléments apparaissent en quantité négligeable : le calcium (0,3 %), le sodium (0,2 %). L'importance de l'eau de constitution (11,6 %) est liée à l'abondance des argiles. Parmi les éléments traces dont les teneurs sont aussi relativement stables au cours des saisons, on note par ordre d'abondance :

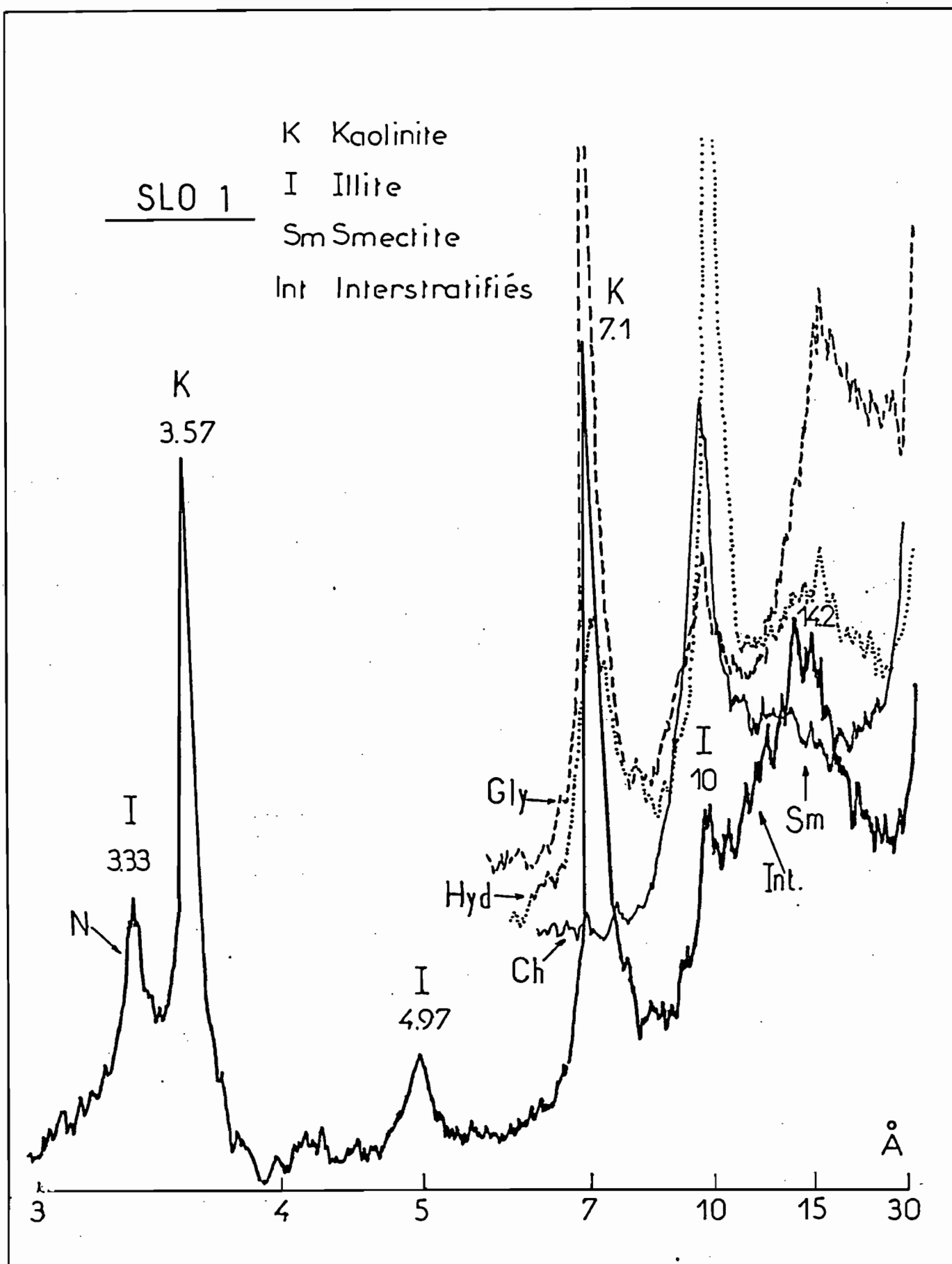


Fig. 32a : Diffractogrammes de rayons X de la fraction $< 2 \mu$ des suspensions des eaux du Sénégal à Saint-Louis.

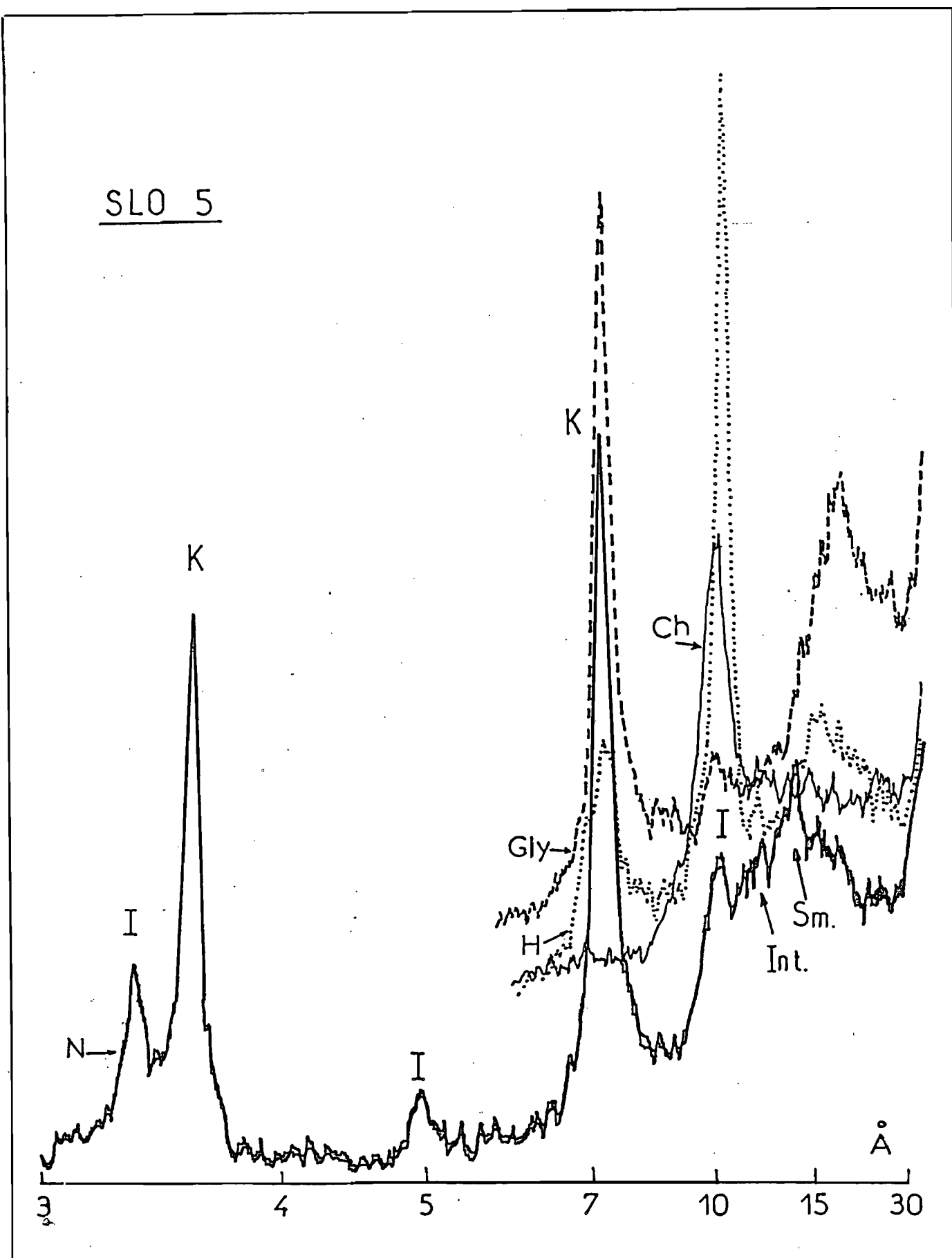


Fig. 32b : Diffractogrammes de rayons X de la fraction $< 2\mu$ des suspensions des eaux du Sénégal à Saint-Louis.

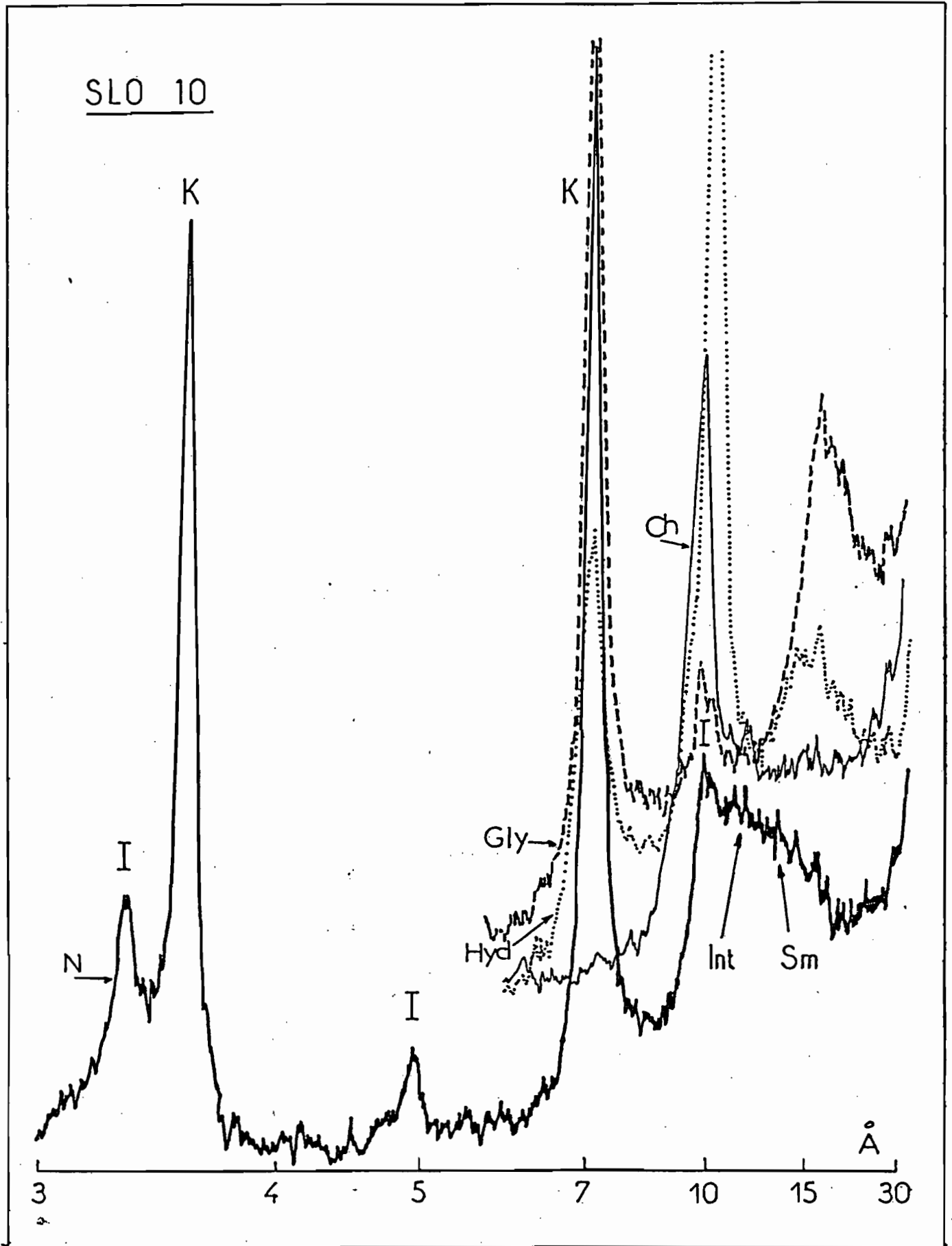


Fig. 32c : Diffractogrammes de rayons X de la fraction $< 2\mu$ des suspensions des eaux du Sénégal à Saint-Louis.

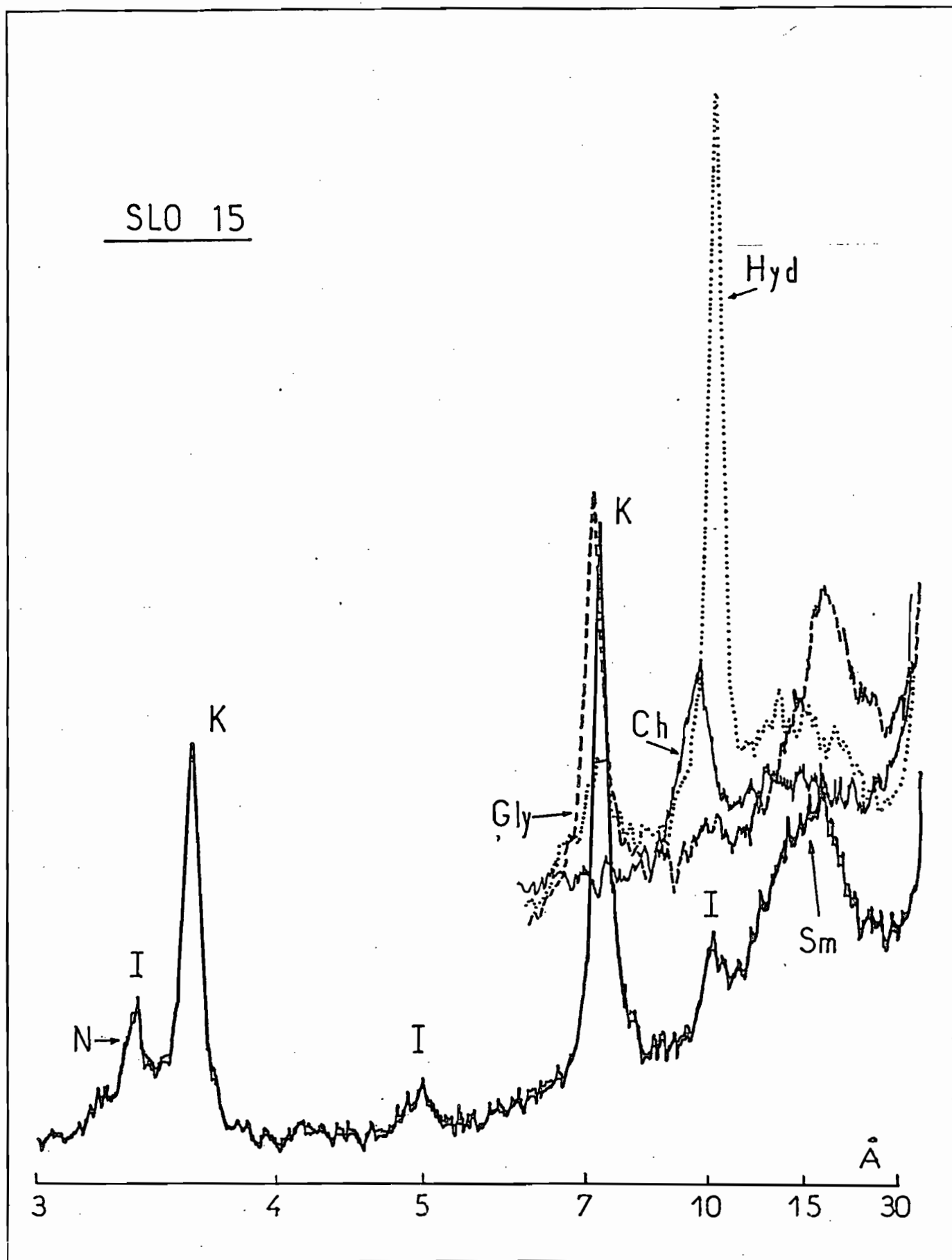


Fig. 32d : Diffractogrammes de rayons X de la fraction $< 2\mu$ des suspensions des eaux du Sénégal à Saint-Louis.

SLO 20

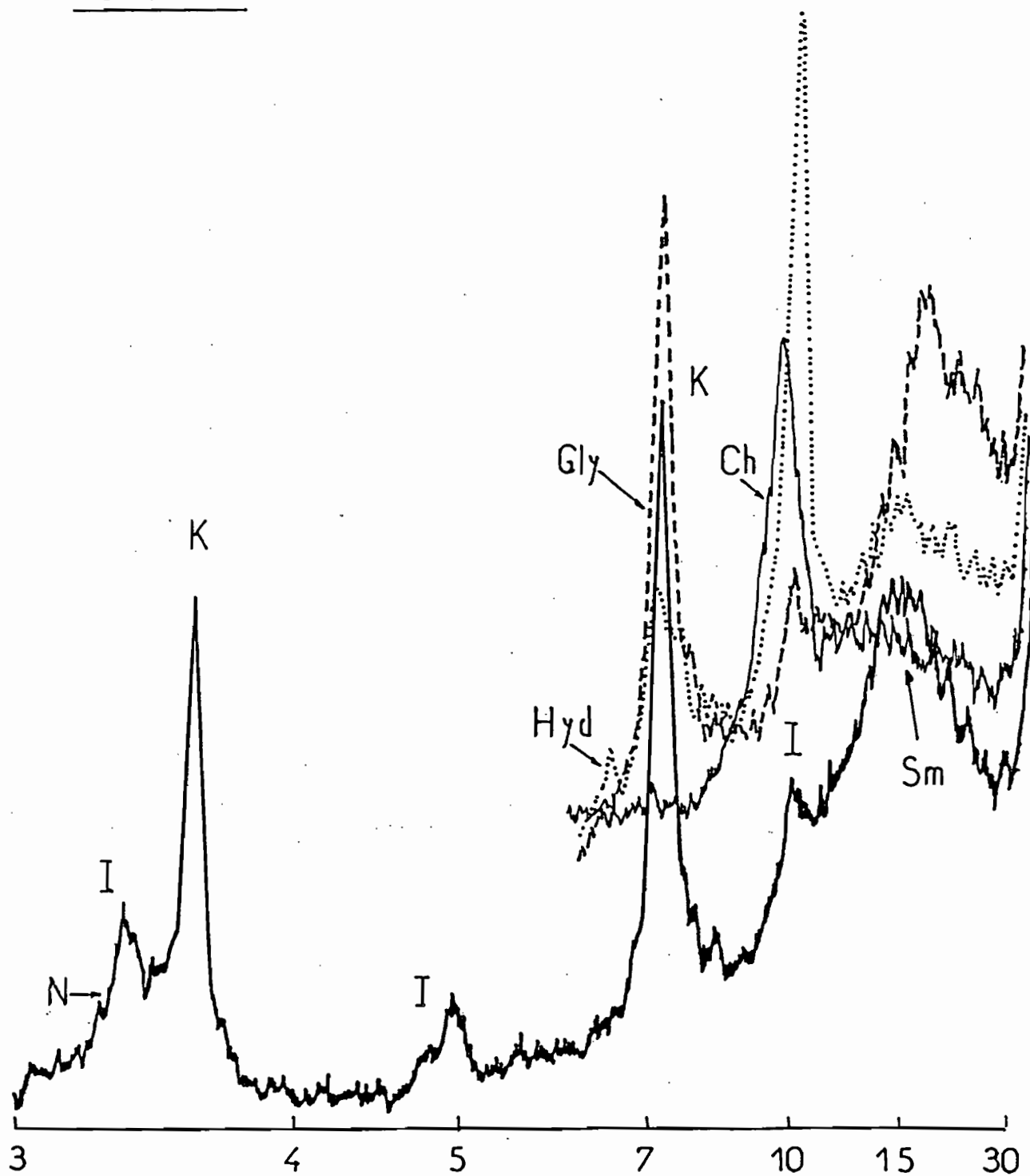


Fig. 32e : Diffractogrammes de rayons X de la fraction $< 2\mu$ des suspensions des eaux du Sénégal à Saint-Louis.

Tableau 34 : COMPOSITION CHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION DU
FLEUVE SENEGAL A ST LOUIS (crue 1981 - 1982)

(Eléments majeurs : les teneurs en oxydes et la perte à 1 000° C
sont mesurées sur l'échantillon préalablement séché à 110° C ;
la perte à 110° C donnée à titre indicatif est exprimée en %
par rapport à l'échantillon brut.

Eléments traces : les teneurs sont exprimées en ppm par rapport
à la roche séchée.)

Echantillons	SL0 ₁	SL0 ₂	SL0 ₃	SL0 ₄	SL0 ₅	SL0 ₆	SL0 ₇	SL0 ₈	SL0 ₉	SL0 ₁₀	Moyenne
Perte à 110° C	5.42	5.17	4.86	5.09	4.65	5.10	5.07	5.08	5.35	5.23	-
Eléments Majeurs											
H ₂ O ⁻	11.64	11.75	11.20	11.71	11.44	11.37	11.31	11.64	12.08	11.96	11.57
SiO ₂	49.31	49.63	51.17	49.61	50.91	50.98	50.64	50.64	48.77	48.80	50.19
Al ₂ O ₃	24.14	23.93	23.80	24.65	23.97	23.51	24.02	23.17	24.84	25.05	24.02
MgO	1.59	1.37	1.16	1.04	1.04	1.13	1.19	1.17	1.14	1.14	1.22
CaO	0.34	0.31	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.51	0.20	0.20	0.25
Fe ₂ O ₃	9.66	9.95	9.50	9.88	9.49	9.83	9.51	9.84	10.16	9.92	9.74
Mn ₃ O ₄	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04
TiO ₂	0.97	0.92	0.96	0.93	0.93	0.90	0.93	0.93	0.82	0.83	0.92
Na ₂ O	0.21	0.20	0.20	0.17	0.20	0.20	0.20	0.19	0.16	0.26	0.20
K ₂ O	1.96	1.75	1.60	1.64	1.65	1.70	1.73	1.73	1.68	1.67	1.72
Somme	99.87	99.86	99.84	99.86	99.87	99.86	99.87	99.87	99.88	99.87	99.87
Eléments Traces											
Sr	67.2	62.8	55.4	47.0	52.9	53.7	55.5	53.1	54.7	51.6	55.4
Ba	423.0	379.0	378.0	319.0	312.0	331.0	331.0	314.0	277.0	298.0	336.2
V	157.0	186.0	179.0	182.0	166.0	168.0	177.0	173.0	169.0	167.0	172.4
Ni	104.0	114.0	108.0	103.0	110.0	113.0	110.0	110.0	101.0	99.0	107.2
Co	19.0	20.2	15.4	12.3	16.4	16.1	17.3	18.8	17.8	14.5	16.8
Cr	204.0	228.0	244.0	234.0	222.0	219.0	212.0	213.0	214.0	219.0	220.9
Zn	94.1	96.7	85.1	89.7	80.9	90.5	85.8	83.5	89.1	87.9	88.3
Cu	51.0	55.4	55.4	51.9	52.1	51.2	49.1	47.8	49.9	47.4	51.1
Sc	26.5	27.5	26.7	28.3	27.5	25.6	24.8	25.8	25.7	26.8	26.5
Y	33.5	32.9	32.7	32.8	32.3	31.3	31.4	31.5	27.6	27.7	31.4
Zr	178.0	171.0	186.0	193.0	179.0	184.0	179.0	190.0	159.0	178.0	178.8
Mo	16.0	10.0	25.0	13.0	13.0	31.0	45.0	22.0	19.0	20.0	21.4
Somme	1373.3	1383.5	1390.7	1306.0	1264.1	1314.4	1317.9	1282.5	1194.8	1236.9	1306.4
%	0.137	0.138	0.139	0.131	0.126	0.131	0.132	0.128	0.119	0.124	0.131
Total	100.007	99.998	99.979	99.991	99.996	99.991	100.002	99.998	99.999	99.994	100.001

le manganèse (Mn), le baryum (Ba), le chrome (Cr), le zirconium (Zr), le vanadium (V) et le nickel (Ni).
Tous les autres constituants (Zn, Sr, Cu, Y, Mo et Co) ont des teneurs inférieures à 100 ppm. Cette composition chimique moyenne est tout à fait analogue à celle des matières en suspension qui, véhiculées par le Chari, accèdent au Lac Tchad (GAC, 1980).

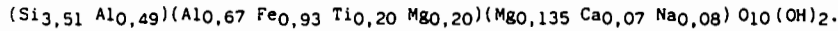
4. Evaluation de la distribution des différentes phases minérales à partir de la composition chimique des M.E.S.

La reconstitution de la distribution des espèces minéralogiques peut être tentée à l'aide de la composition chimique des matières en suspension. De nombreuses approximations sont cependant nécessaires et, comme l'a souligné GAC.(1980), "il ne s'agit là que d'une méthode quantitative sur laquelle pèse évidemment un grand nombre d'incertitudes."

En premier lieu, le dosage des fractions amorphes n'ayant pas été effectué, nous avons adopté les valeurs fournies par GAC (1980) pour le Chari à N'Djaména : Fe₂O₃ (2,4 %), Al₂O₃ (0,7 %) et SiO₂ (0,4 %).

On admet ensuite que tout le potassium présent sert à bâtir une illite du type de celle rencontrée dans les grès des Vosges par MOSSER et al. (1972) et dont la composition moyenne (établie à partir de 104 analyses) est la suivante : SiO₂ (52,6 %), Al₂O₃ (25,2 %), K₂O (8,17 %), Fe₂O₃ (3,5 %), MgO (2,7 %), TiO₂ (0,68 %), CaO (0,50 %), Na₂O (0,16 %), Mn₃O₄ (0,09 %) et H₂O⁻, la perte à 1 000° C (5,82 %).
Au niveau des éléments à l'état de traces, le baryum est l'élément dominant (ce qui explique son abondance dans les matières en suspension). A partir de cette composition moyenne de l'illite et du pourcentage de K₂O dans l'échantillon, on déduit la part des autres oxydes qui revient à ce minéral (par exemple dans SL0₁ avec K₂O = 1,96 %, on attribue à l'illite : 12,62 % de SiO₂ ; 6,05 % de Al₂O₃ ; 0,84 % de Fe₂O₃ ; 0,65 % de MgO, etc.).

L'identification de smectites par les diagrammes de diffraction des rayons X impose ensuite de bâtir une argile gonflante. Nous avons admis que tout le magnésium restant après formation de l'illite entrerait dans le réseau d'une montmorillonite dont la formule structurale est une moyenne entre celles proposées par CARMOUZE (1976) et GAC (1980) pour les matières en suspension du Chari :



Dans cette beidellite, les proportions en oxydes sont les suivantes : SiO_2 (52,84 %), Al_2O_3 (14,82 %), Fe_2O_3 (18,64 %), TiO_2 (4,21 %), MgO (3,38 %), CaO (0,98 %), Na_2O (0,62 %) et H_2O (4,51 %).

Après déduction des fractions d'oxydes liées dans cette argile au magnésium restant (ex de SiO_2 : 1,59 - 0,65 = 0,94 %), les éventuelles quantités de sodium et de calcium non utilisées sont incorporées dans les plagioclases (albite et anorthite) et on attribue le fer restant à la goéthite.

L'excédent d'alumine sert ensuite à calculer le taux de kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$: 46,55 % de SiO_2 ; 39,51 % d' Al_2O_3 et 13,14 % d' H_2O) et, si toute la silice n'a pas été utilisée, on considère que le % restant représente le taux de quartz dans l'échantillon.

Dans toute la série de St Louis (SLO_1 à SLO_{10}), un résidu d'oxydes de 3 à 5 % demeure inexplicé. Il a arbitrairement été considéré comme représentant le % d'interstratifiés. Ces résultats doivent donc être interprétés en tenant compte des réserves émises (la non prise en compte par exemple des feldspaths potassiques visibles sur les diagrammes de poudre incite à la prudence).

Le bilan minéralogique chiffré établi pour la crue 1981-1982 est donné dans le tableau 35. Les pourcentages d'illite et d'interstratifiés sont constants (20 % pour l'illite et 4 % pour les interstratifiés). La proportion de smectites est très variable (de 14 à 28 %) : elles sont très abondantes dans les premiers flots, ce qui suggère leur origine lointaine depuis les provinces distributrices de l'amont. La kaolinite est le minéral argileux prépondérant ; à l'exception de SLO_1 , les pourcentages varient peu autour de 40 %. La fraction de quartz est faible en début de crue et en décrue ; elle est maximale lors de la pointe de crue, c'est-à-dire lorsque les vitesses du courant sont les plus fortes. Avec la réserve émise concernant les feldspaths potassiques, les feldspaths sodiques (albite) et calciques (anorthite) ne sont présents qu'en quantités négligeables. Les pourcentages d'hydroxydes de fer varient peu autour de 3,50 %.

La comparaison de cette reconstitution minéralogique avec les dépouillements granulométriques montre que pour tous les échantillons, la somme kaolinite/smectite/illite/interstratifiés est toujours supérieure à la fraction < 2 μ . Ce résultat suggère qu'un pourcentage non négligeable (de 1 à 15 %) de la phase dite "argileuse" se situe dans les limons très fins dont la taille est comprise entre 2 et 5 microns.

Tableau 35 : RECONSTITUTION (en %) DE LA DISTRIBUTION MINÉRALOGIQUE DANS LES MATIÈRES EN SUSPENSION DU FLEUVE SENEGAL A ST LOUIS (crue 1981-1982). LA FRACTION AMORPHE CONSTANTE (3,5 %) N'A PAS ÉTÉ REPORTÉE.

Minéral N° échant.	Kaolinite (K)	Smectite (Sm)	Illite (I)	Interst. (Int)	Quartz (Q)	Plagioclases		Goéthite (Goe)
						Albite	Anorthite	
						(Ab)	(An)	
						(F)		
SLO_1	33.20	28.65	21.69	4.15	5.31	0	0	3.50
SLO_2	38.16	25.22	19.41	4.04	7.60	0	0	2.07
SLO_3	38.37	18.19	19.28	4.00	12.59	1.08	0	2.99
SLO_4	42.39	14.79	19.43	3.93	10.90	1.09	0	3.97
SLO_5	40.36	15.37	20.07	4.03	12.46	0.67	0	3.54
SLO_6	39.65	16.81	21.51	4.12	10.10	0.59	0	3.72
SLO_7	38.93	18.98	19.87	3.90	11.27	0.49	0.09	2.97
SLO_8	36.17	18.89	20.66	4.41	11.75	0.42	1.09	3.11
SLO_9	41.24	17.40	20.64	4.41	8.76	0.28	0	3.77
SLO_{10}	41.64	17.52	20.01	4.11	8.65	1.07	0	3.50
Moyenne ⁽¹⁾ (Sénégal)	38.60	19.70	20.32	4.08	9.90	0.60	0.10	3.20
Chari (GAC, 1980)								
Amont	58.8	traces	← 18.5 →		13.48	← 0.34 →		5.20
Aval	48.5	10.5	← 17.5 →		11.70	← 5.20 →		3.10

(1) : Les pourcentages moyens ont été calculés en tenant compte du tonnage représenté par chaque échantillon dans le flux détritique annuel.

F - LES FLUX PARTICULAIRES QUANTITATIFS ET QUALITATIFS A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL

Avant de présenter le bilan quantitatif et qualitatif des flux de particules solides à l'embouchure du Sénégal, deux aspects de cette décharge annuelle de "troubles" vers l'Océan méritent d'être évoqués : le charriage de fond et la matière organique.

Le charriage de fond des matériaux grossiers qui se déplacent par roulage et saltation épisodique dans le lit du fleuve n'a pas été étudié. Mal connu et peu important dans le domaine tropical, il demeure un phénomène limité dans le delta du Sénégal. MICHEL (1967) a souligné sur le Doué le déplacement annuel d'un lambeau d'une basse terrasse sur moins de 500 mètres. A la hauteur de Kayes, SENEGAL-CONSULT (1972) a évalué qu'en année moyenne, le charriage de fond mobilise de l'ordre de 100 000 tonnes de matériaux grossiers, ce qui représente moins de 5 % de la charge solide annuelle en suspension. Ces résultats confirment les observations de CARRE (1972) qui mentionne leurs faibles contributions (de 5 à 10 %) aux flux détritiques, de POLAKOV (1938) pour la Volga (3 %), de SPRONCK (1941) pour le Congo (7 %), de ROUKHINE (1965) pour les fleuves de plaine (10 %), de GIBBS (1967) pour l'Amazonie (de 2 à 10 %) et de MATHIEU (1973) pour le Bandama (de 5 à 10 %). Dans le cas du Sénégal, ce charriage de fond concerne essentiellement le quartz (de 75 à 95 %) et les minéraux lourds tels que l'andalousite, la hornblende et l'épidote.

Le dosage de la matière organique a été réalisé sur les regroupements d'échantillons des deux crues (21 analyses). Le taux de M.O. dans les matières en suspension du Sénégal est faible (de 1,2 à 2,4 % sur l'ensemble des deux cycles) et bien inférieur, en tous cas, aux pourcentages relevés sur la Gambie : LO (1984) y fait état de plus de 10 % de matière organique dans les matières en suspension de ce fleuve à la station amont de Goulombou. Au cours des cycles 1981-1982 et 1982-1983, on évalue à environ 45 000 tonnes et 23 000 tonnes "l'expulsion" annuelle de matière organique à l'embouchure du Sénégal, ce qui représente 1,56 % et 1,93 % des quantités de matières en suspension. Les tonnages respectifs de matière inorganique s'établissent alors à 2 820 565 tonnes (en 81-82) et à 1 163 067 tonnes (en 82-83), et les bilans granulométrique, minéralogique et chimique sont les suivants :

* bilan granulométrique :

1981-1982	(	< 2 μ	(argiles) :	2 092 860	tonnes
	(	2 - 5 μ	(limons très fins) :	442 830	"
	(	5 - 10 μ	(limons fins) :	149 490	"
	oo(	10 - 20 μ	(limons moyens) :	76 155	"
	(	20 - 50 μ	(limons grossiers) :	41 530	"
	(	< 50 μ	(sables fins) :	14 100	"
				2 820 565	tonnes
1982-1983	(	< 2 μ	(argiles) :	904 870	tonnes
	(	2 - 5 μ	(limons très fins) :	147 710	"
	(	5 - 10 μ	(" fins) :	54 660	"
	oo(	10 - 20 μ	(" moyens) :	29 080	"
	(	20 - 50 μ	(" grossiers) :	24 420	"
	(	< 50 μ	(sables fins) :	2 327	"
				1 163 067	tonnes

* bilan minéralogique :

1981-1982		matière organique :	44 680	tonnes
		matière inorganique :		
	(	- Kaolinite :	1 088 735	tonnes
	(	- Smectite :	555 650	"
	(	- Illite :	573 140	"
	(	- Quartz :	279 240	"
	oo(	- Interstratifiés :	115 080	"
	(	- Amorphes :	98 720	"
	(	- Goëthite :	90 260	"
Feldspaths	oo(	- Albite :	16 920	"
	(	- Plagioclases :	2 820	"
				2 820 565 tonnes

x bilan des éléments chimiques :

1981-1982

a) éléments majeurs :

Si :	661 900	tonnes/an
Al :	358 700	"
Fe :	192 300	"
K :	40 300	"
Mg :	20 800	"
Ti :	15 700	"
Ca :	5 000	"
Na :	4 200	"

b) éléments traces :

Ba :	950	tonnes/an
Mn :	810	"
Cr :	660	"
Zr :	500	"
V :	490	"
Ni :	300	"
Zn :	250	"
Sr :	160	"
Cu :	140	"
Co et Mo :	60	"

A l'heure actuelle, l'érosion mécanique dans le bassin versant du Sénégal, considéré dans son ensemble, draine essentiellement vers l'embouchure du fleuve des particules très fines ($< 2 \mu$) constituées de kaolinite, de smectite et d'illite. En termes de bilan chiffré, les flux particuliers soutirés au domaine continental et déversés dans l'Océan sont surtout formés de silicium, d'aluminium et de fer, à un degré moindre de matière organique, de potassium, de magnésium et de titane. Le calcium et le sodium sont peu abondants dans les matières en suspension, ces deux éléments empruntant de préférence la voie soluble pour rejoindre le domaine marin.

III - LES APPORTS DISSOUS D'ORIGINE CONTINENTALE

À L'EMBOUCHURE DU FLEUVE SÉNÉGAL

Ouvert, par définition, sur le domaine océanique la vallée du fleuve Sénégal est assujettie chaque année à la pénétration saline. Cette intrusion tardive ou précoce et d'une durée variable se surimpose au flot d'eau douce de l'amont et rend difficile l'évaluation des flux dissous d'origine continentale. Pour accéder au bilan réel de l'altération chimique sur le bassin versant du Sénégal, les données de St Louis, de Dagana, de Podor et de Guédi ont été utilisées, chaque station étant tour à tour abandonnée dès perception de l'arrivée de la langue salée. Au cours de nos mesures de 1981 à 1983, les trois premiers sites de contrôle de la minéralisation des eaux du fleuve ont été franchis, de façon plus ou moins durable, par les eaux marines.

Notre étude a essentiellement porté sur les éléments majeurs qui représentent près de 99 % de la matière minérale en solution : silice dissoute (SiO_2), calcium (Ca^{++}), magnésium (Mg^{++}), potassium (K^+) et les anions principaux, carbonates ($\text{CO}_3^{=}$), bicarbonates (HCO_3^-), chlorures (Cl^-) et les sulfates ($\text{SO}_4^{=}$). Aux prises d'échantillons sur le terrain ont été parallèlement associées des mesures du pH, de la conductivité et de la température "in situ".

Toutes les analyses ont été réalisées au laboratoire de chimie du Centre ORSTOM de Dakar-Hann⁽¹⁾ :

- les chlorures sont dosés par colorimétrie en continu ; l'ion Cl^- forme un complexe avec Hg et déplace d'une solution de thiocyanate mercurique l'ion $(\text{SCN})^-$ complexé par le fer ferrique pour donner le ferrithiocyanate rouge sang dosé par colorimétrie ;
- les sulfates sont précipités, en milieu acide, par du baryum en excès (et de titre bien connu), et dosés par gravimétrie ;
- l'alcalinité est déterminée par volumétrie en suivant potentiométriquement leur neutralisation par un acide ;
- les cations sont dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique ou émission de flamme en milieu légèrement acide et en présence de Lanthane ;
- l'acide silicique est dosé par colorimétrie en continu : la silice forme avec le molybdate d'ammonium un complexe réduit par du fer ferreux.

Le contrôle de la minéralisation des eaux du fleuve Sénégal à St Louis a débuté en 1979 avec la mise en place par l'ORSTOM(2) d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux dans les estuaires de Sénégalie. Depuis cette date, les échantillonnages suivants ont été réalisés :

- 1979 : 2 (août et septembre)
- 1980 : 14 (d'août à décembre)
- 1981 : 34 (janvier et de juin à décembre)
- 1982 : 72 (surveillance en continu toute l'année)
- 1983 : 6 (de janvier à avril).

L'ensemble des prélèvements d'eau effectué entre août 1981 et avril 1983 a été reporté sur les figures 26 et 27. Lorsque d'autres stations ont relayé celle de St Louis (quand celle-ci était touchée par la langue salée), les analyses utilisées ont également été indiquées sur les figures précédentes :

Dagana : de D₁₅₃ à D₂₂₇ et de D₂₆₃ à D₃₁₂
Podor : de P₁₀₆ à P₁₅₄ et de P₁₅₆ à P₁₉₄
Guédi : de Gu 158 à Gu 183.

Les événements majeurs à l'embouchure du Sénégal sont naturellement liés au phénomène de la remontée cyclique des eaux marines. Aussi, nous présenterons d'abord à l'aide des mesures de la conductivité l'évolution générale de la salinité au droit de la station de St Louis. Dans une deuxième partie, nous suivrons le comportement des éléments majeurs et les variations de leur concentration dans le milieu estuarien. Enfin, nous tenterons de dissocier eaux marines et eaux douces afin d'évaluer les flux dissous d'origine continentale.

(1) : Nous adressons ici nos plus vifs remerciements à MM. LENELLE et SOLEILHAVOUP, responsables de ce Laboratoire et à l'ensemble de leur personnel.

(2) : Programme dirigé par J.Y. GAC et ses collaborateurs.

A - EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE ET DE LA SALINITE A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL

1. Variation saisonnière de la conductivité

La conductivité ou "conductance spécifique" est une des mesures classiques qui permet le contrôle simple et rapide de la minéralisation des solutions. D'une manière générale, et pour un type d'eau donné, la conductivité augmente lorsque les eaux se concentrent. Elle est exprimée en Siemens par centimètre (S/cm) ou plus couramment en milliSiemens (mS/cm) et en microSiemens (μ S/cm). La conductivité n'est toutefois pas proportionnelle à la masse des éléments en solution ou au total des milliéquivalents présents et la relation conductivité-salinité n'est donc ni linéaire, ni univoque (si l'on s'adresse à des eaux d'origine différente).

A St Louis, les mesures de la conductivité ont été effectuées à chaque prise d'échantillon pour analyse ; des contrôles complémentaires à l'aide du conductivimètre portatif TACUSSEL (CD 9 PN) permettent d'avoir une idée assez précise de l'évolution de la charge soluble de juin 81 à août 83 (période qui couvre les deux cycles étudiés).

La distinction entre eau douce/eau salée à l'embouchure du Sénégal apparaît très nettement sur la figure 33. L'enseignement le plus important est l'extrême réduction dans le temps de la présence d'eau douce et évidemment, en corollaire, le maintien d'eau salée pendant près de 10 mois sur 12. Le "lissage" des courbes donnerait la répartition suivante (marge d'erreur $\pm$ 3 jours) :

- 1981-1982 : eau douce, du 7 août 81 au 25 octobre 81
 eau salée, du 26 octobre 81 au 24 août 82 ;
- 1982-1983 : eau douce, du 25 août 82 au 28 octobre 82
 eau salée, du 29 octobre 82 au 20 août 83.

Soit un temps d'eau douce à St Louis de : 80 jours en 1981, de 65 jours en 1982 et de 59 jours en 1983 (du 21 août au 19 octobre). La comparaison avec les durées moyennes (eau douce : 117 jours ; eau salée : 248 jours), établies depuis 1903 par GAC et al. (1981), souligne l'extrême sévérité des étiages actuels du Sénégal.

L'arrivée de la crue annuelle détermine une décroissance très rapide de la conductivité qui en moins de 3 semaines/1 mois passe de 50 mS/cm à 100 μ S/cm. Après le passage de la crue, la conductivité augmente à nouveau : la croissance est plus lente et procède par à-coups sous l'effet du flux et du reflux des eaux marines dans la vallée.

L'évolution de la conductivité pendant la saison des hautes-eaux (fig. 33 b) montre qu'elle oscille entre 100 et 200 μ S/cm, valeurs qui nous paraissent élevées par rapport à celles observées à l'amont du fleuve (en général de l'ordre de 60 μ S/cm). Ceci semble indiquer que même durant l'installation des eaux dites "douces à St Louis" des incursions marines mineures peuvent se produire. Nous verrons plus loin qu'elles gênent considérablement l'évaluation de l'héritage dissous continental.

2. Variation saisonnière de la salinité

La charge totale en solution évolue parallèlement à la conductivité (fig. 34). Pendant la période des hautes-eaux, la charge en solution dans les eaux du Sénégal à St Louis se stabilise autour de 60-70 mg/l. Elle est bien plus élevée qu'à la station amont de Dagana où les valeurs oscillent entre 35 et 40 mg/l. Au niveau des éléments dissous, on constate qu'à l'exception du chlore et du sodium tous les autres constituants ont des teneurs comparables : ces deux éléments qui se singularisent étant aussi les ions dominants dans l'eau de mer, celle-ci est donc manifestement présente à la hauteur de St Louis même en période de crue.

Dès la mi-octobre, la charge ionique des eaux augmente régulièrement au rythme de la pénétration de la mer dans la vallée du fleuve. A St Louis, la salinité au cours du cycle 1981/1982 a dépassé 10 ‰ début décembre, 20 ‰ vers le 10 janvier, 30 ‰ à la mi-mars et atteint celle de l'eau de mer, 35 ‰, à partir du 15 mai : la salinité maximum a été notée le 7/07/82 avec une charge en solution de 39 gr/litre. En 1982-1983, les dates de franchissement de ces différents taux de salinité sont sensiblement identiques (10 ‰ le 1er décembre, 20 ‰ le 15 janvier et 30 ‰ le 15 mai). Au cours de ce dernier cycle, les investigations analytiques n'ont pas été poussées au-delà du 15 mai 1983, mais le suivi des mesures de conductivité jusqu'à l'arrivée tardive (20 août 1983) de l'onde de crue 1983-1984 permet d'affirmer avec certitude que la salinité a très nettement dépassé le seuil de 35 ‰ dès la fin du mois de mai. Ce résultat a été récemment confirmé par SAOS et al. (1984) qui ont mis en évidence la présence, en juin et juillet 1983, de taux de salinité supérieurs à 35 ‰ jusqu'à 80 km de l'embouchure ; ces auteurs font état du fonctionnement "inverse" de l'estuaire du Sénégal, des charges en solution de 40 gr/litre ayant été mesurées à plus de 50 km de l'embouchure. Il faut souligner que des phénomènes semblables sont fréquents dans les autres estuaires de la Sénégalie (Sine-Saloum, Gambie et Casamance) mais qu'ils demeurent tout à fait exceptionnels et de brève durée au niveau du Sénégal.

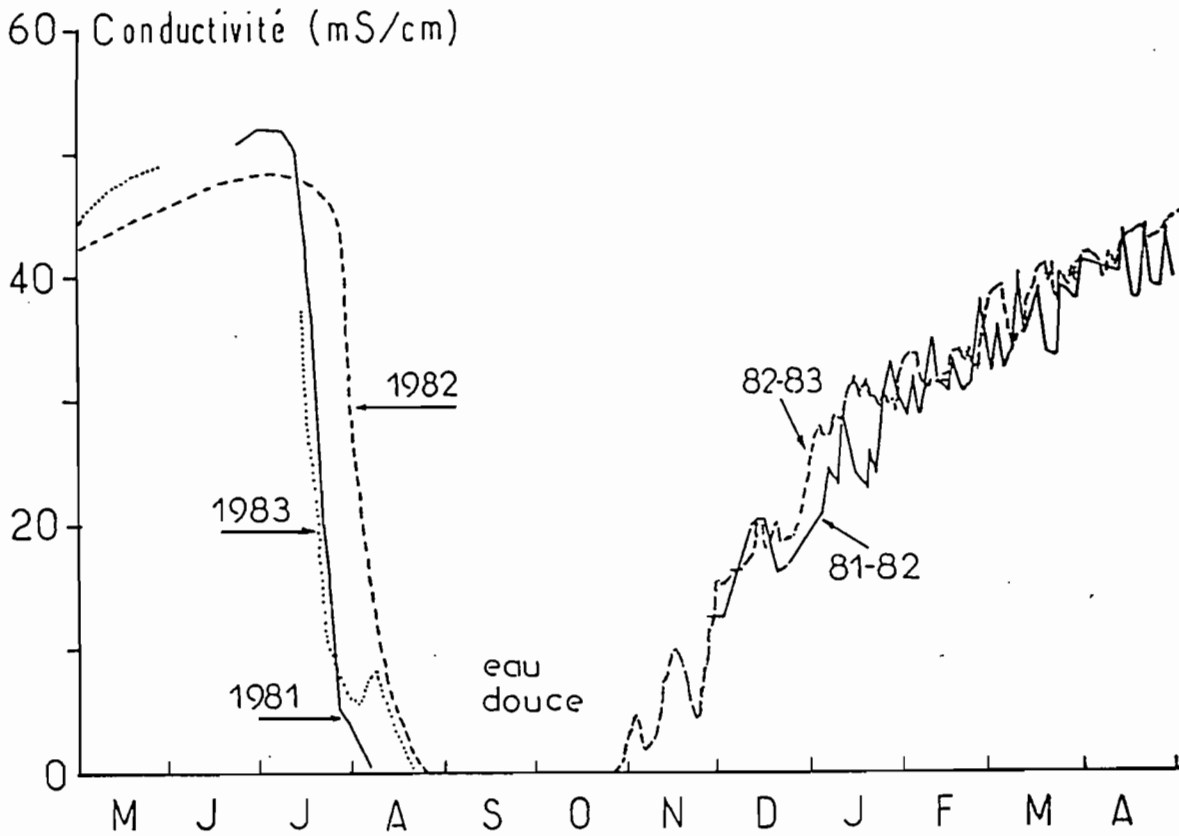


Figure 33a : Variation saisonnière de la salinité.

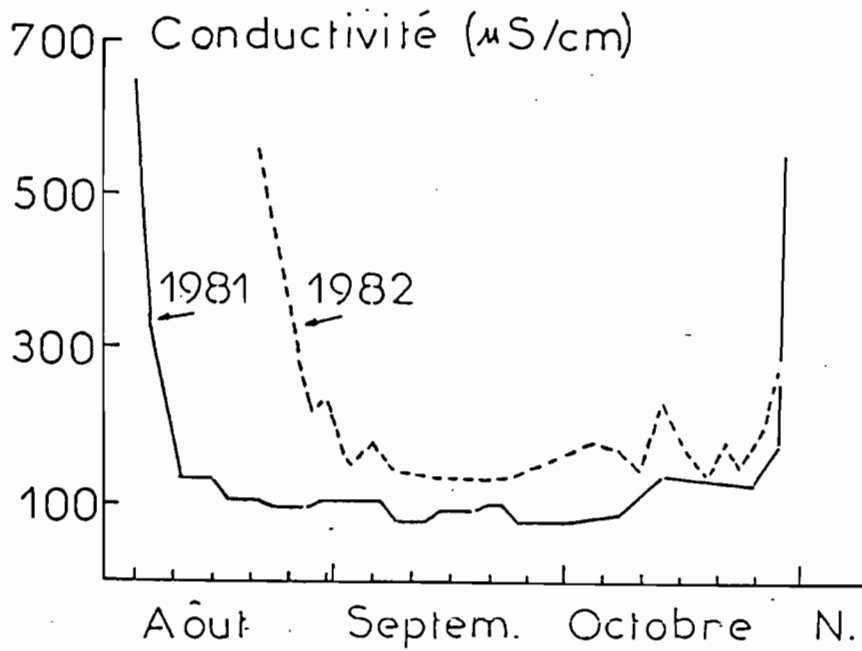


Figure 33b : Variation saisonnière de la salinité.

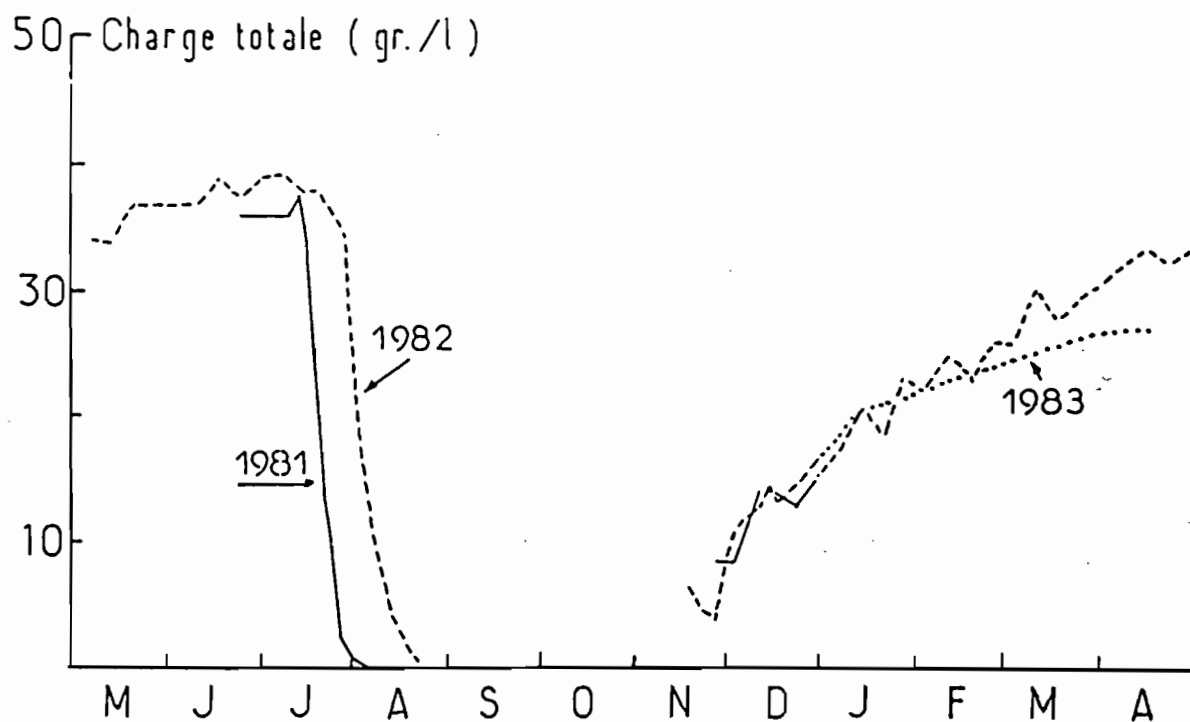


Figure 34a : Variation saisonnière de la salinité (charge totale).

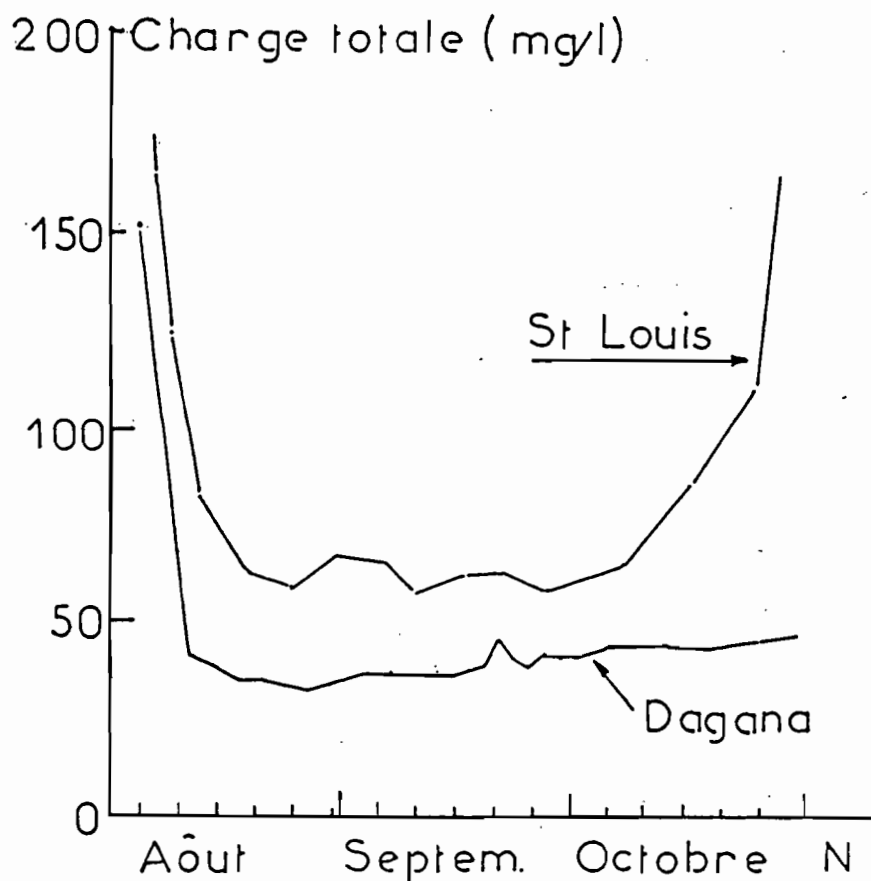


Figure 34b : Variation saisonnière de la salinité (charge totale).

CONDUCTIVITÉ

en $\mu S/cm$

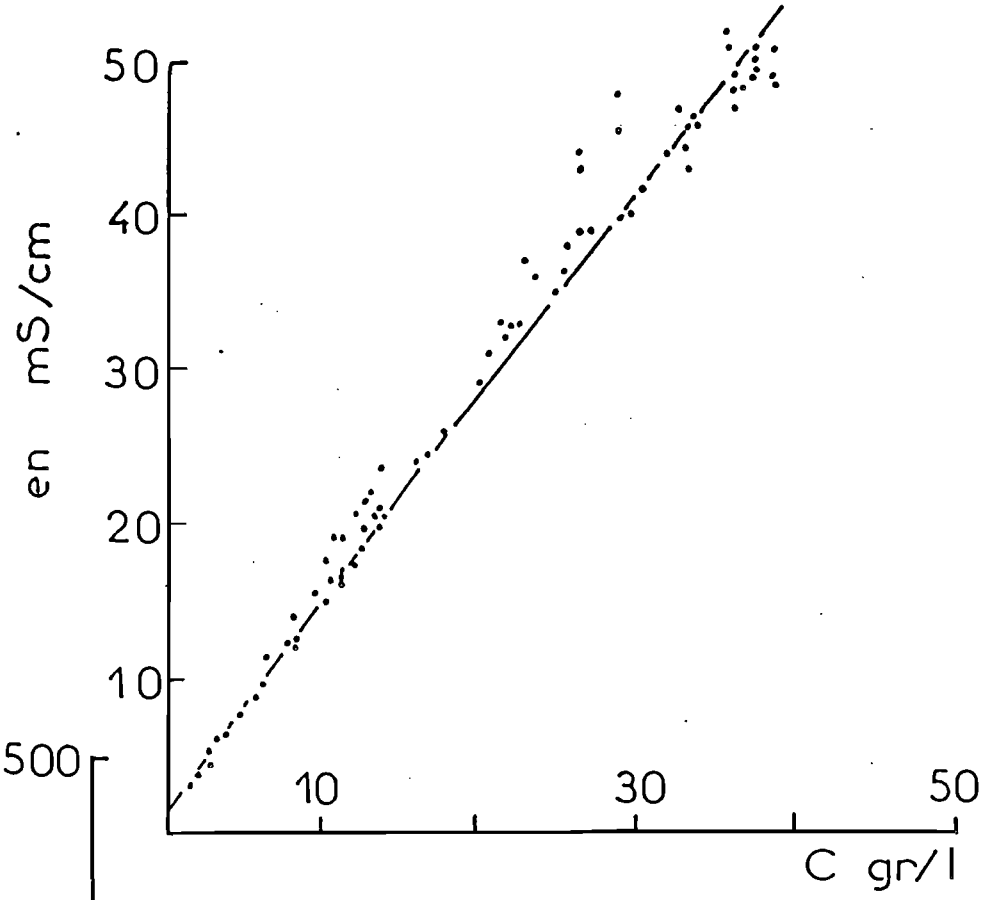
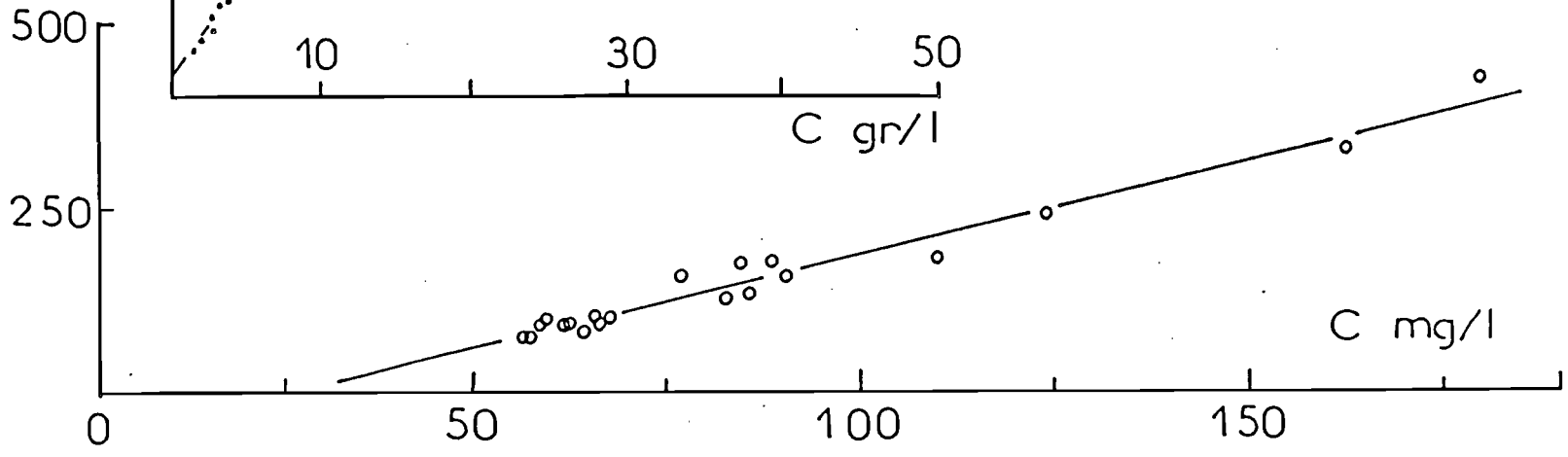


Fig. 35 : Relation conductivité-salinité.

3. Relation Conductivité/Salinité

La relation entre la conductivité et la salinité a été établie en distinguant la période courte des hautes-eaux et celle plus longue où se fait sentir l'influence marine. Ceci revient globalement à dissocier les eaux à partir d'un seuil de conductivité de 500 μS .

Dans les deux cas, les droites de régression et les coefficients de corrélation linéaire ont été calculés à partir de l'ensemble des prélèvements effectués à St Louis (de 1979 à 1983). Pour les eaux fortement minéralisées, on remarque (fig. 35) une légère dispersion des points représentatifs au-delà d'une charge totale dissoute de 30 gr/l ; la conductivité, sur toute la gamme d'étude, est cependant étroitement corrélée à la salinité ($r = 0,98$). Dans les eaux diluées de la crue, le coefficient de corrélation r est de 0,99. Les deux droites de régression représentées sur la figure 35 ont respectivement les équations suivantes :

- Cond. > 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$

$$\text{Cond.} = 1,31 \text{ Charge} + 2,135$$

(la conductivité est exprimée en milliSiemens/cm et la charge ionique en gr/l).

- Cond. < 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$

$$\text{Cond.} = 2,56 \text{ Charge} - 61,167$$

(la conductivité est exprimée en microSiemens/cm et la charge ionique en mgr/l).

B - EVOLUTION DE LA TEMPERATURE ET DU PH DES EAUX DU SENEGAL

1. Variation saisonnière de la température

La température des eaux du Sénégal à proximité de son embouchure est très variable (fig. 36). De juin 1981 à avril 1983, les mesures "in situ" révèlent des températures extrêmes de 18,0° C et de 33,6° C, la valeur moyenne s'établissant à 26,5° C. Cette amplitude (15° C) dans les variations de température est importante et tient à la position géographique de la station d'observation située à l'interface fleuve/Océan.

Les températures maximales sont enregistrées au moment des écoulements continentaux, c'est-à-dire de la saison des hautes-eaux. Pendant toute cette période (d'août à octobre), les températures se maintiennent entre 28° C et 33° C. C'est aussi à cette époque que les températures de l'air ambiant sont les plus élevées.

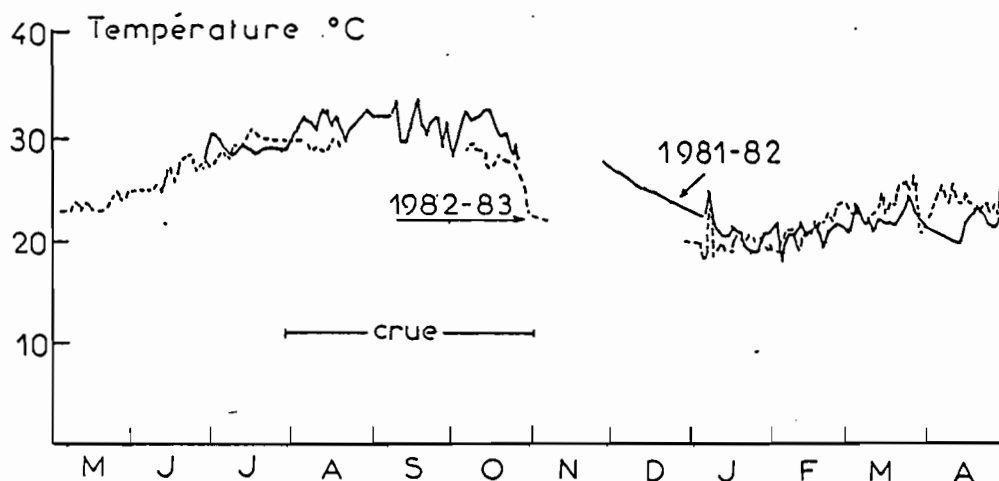


Figure 36 : Variation saisonnière de la température des eaux du Sénégal à Saint-Louis.

A partir de la seconde quinzaine d'octobre, la décrue s'amorce, les eaux marines entament leur remontée dans la vallée du Sénégal, les températures décroissent rapidement.

En saison froide, de novembre à mai, les eaux du fleuve sont "froides" ; les températures oscillent autour de 20° C. C'est l'époque où sur le littoral se manifeste les effets d'un "up Welling" côtier qui provoque la remontée des eaux froides de profondeur. Ces effets se surimposent au refroidissement de l'atmosphère ambiant et déterminent les basses températures dans le fleuve.

La comparaison avec les données de LO (1984) sur la Gambie à la station purement continentale de Gouloumbou est très significative. A cette station, située à l'amont de toute influence océanique, les températures restent pratiquement constantes toute l'année.

2. Variation saisonnière du pH

Dans l'ensemble, les eaux du Sénégal sont des eaux neutres à légèrement basiques. Les pH oscillent autour d'une valeur moyenne de 7,5 (fig. 37).

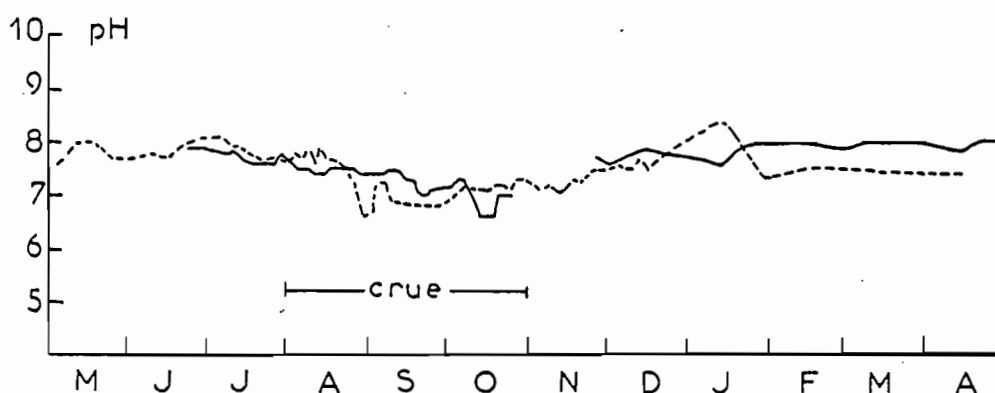


Figure 37 : Variation saisonnière du pH.

En "hivernage", lors de la saison des pluies, les eaux continentales sont faiblement acides (pH de 6,5 à 7,3). En décrue et en étiage, le pH varie très peu autour de 7,8 - 7,9, témoignant ainsi de la pénétration de l'eau de mer dans la vallée.

Cette évolution du pH dans les eaux du Sénégal à son embouchure est très peu différente de celle des eaux de la Gambie. LO (1984) souligne leur relative stabilité entre 7,0 et 7,9.

C - EVOLUTION DE LA CONCENTRATION DES ELEMENTS MAJEURS DANS LES EAUX DU SENEGAL A ST LOUIS

Nous évoquerons brièvement les variations saisonnières des différents anions (chlorure, sulfate et bicarbonate) et des cations (sodium, calcium, magnésium et potassium) avant de présenter plus longuement le cas particulier de la silice dont le comportement à l'interface fleuve/Océan est assez singulier.

1. Les Anions (fig. 38)

Les teneurs en bicarbonates (HCO_3^-) atteignent les concentrations de cet élément dans l'eau de mer (140 ppm, selon GOLDBERG, 1957) dès le mois d'avril ; l'eau de mer pure s'installe dès lors entre l'embouchure et la ville de St Louis. En période de crue, d'août à octobre, les eaux du fleuve transitent à la station avec des teneurs en bicarbonates comprises entre 15 et 25 mg/l (les carbonates CO_3^{2-} ne sont présents qu'en quantités très négligeables, le pH des eaux se maintenant en dessous de 8,3).

Les concentrations en sulfates sont nulles dans les eaux de crue ; cet élément est d'origine marine et n'intervient pas dans le bilan des flux dissous hérités de l'amont.

Figure 38 : Evolution de la concentration des anions.

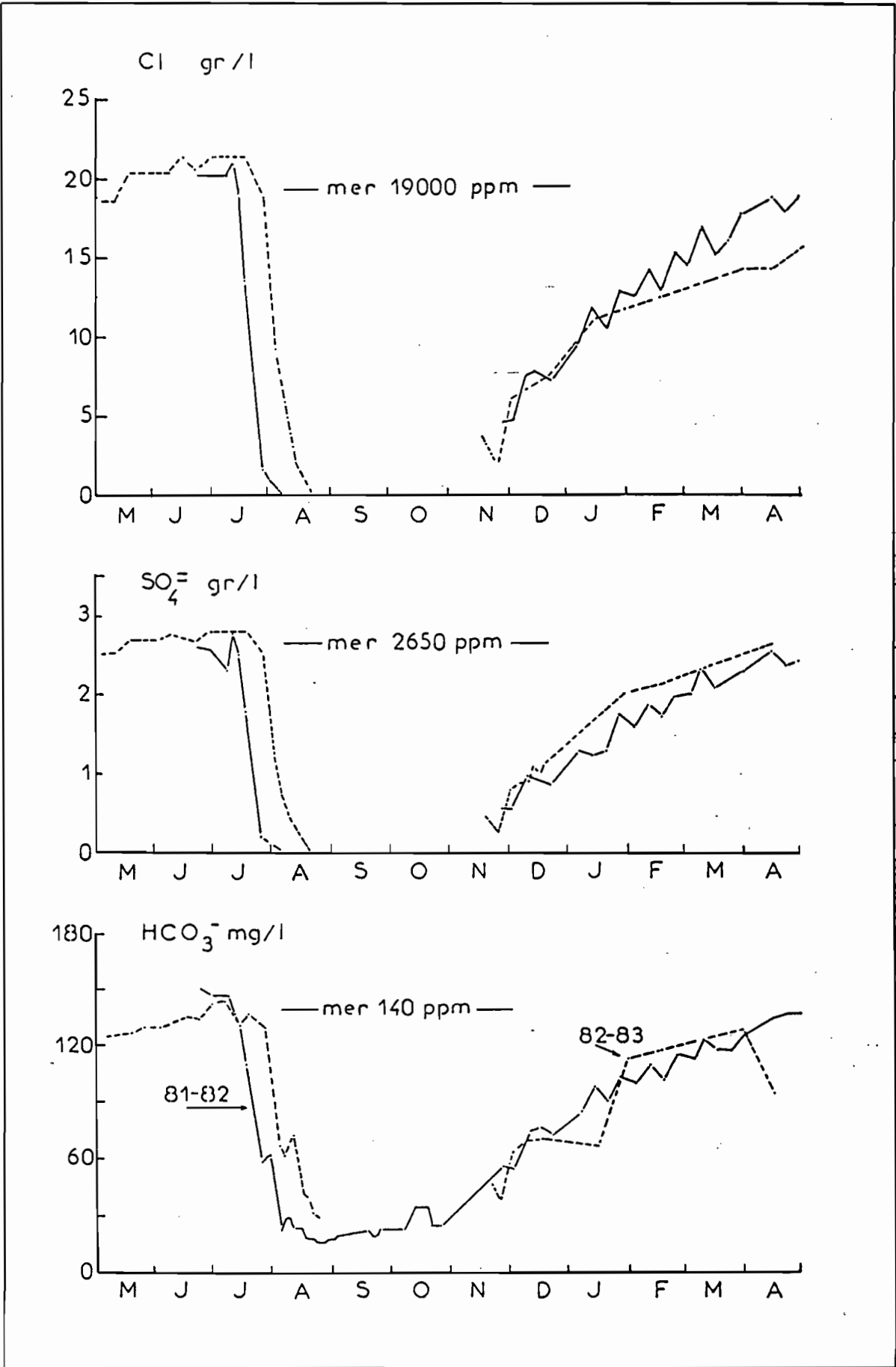
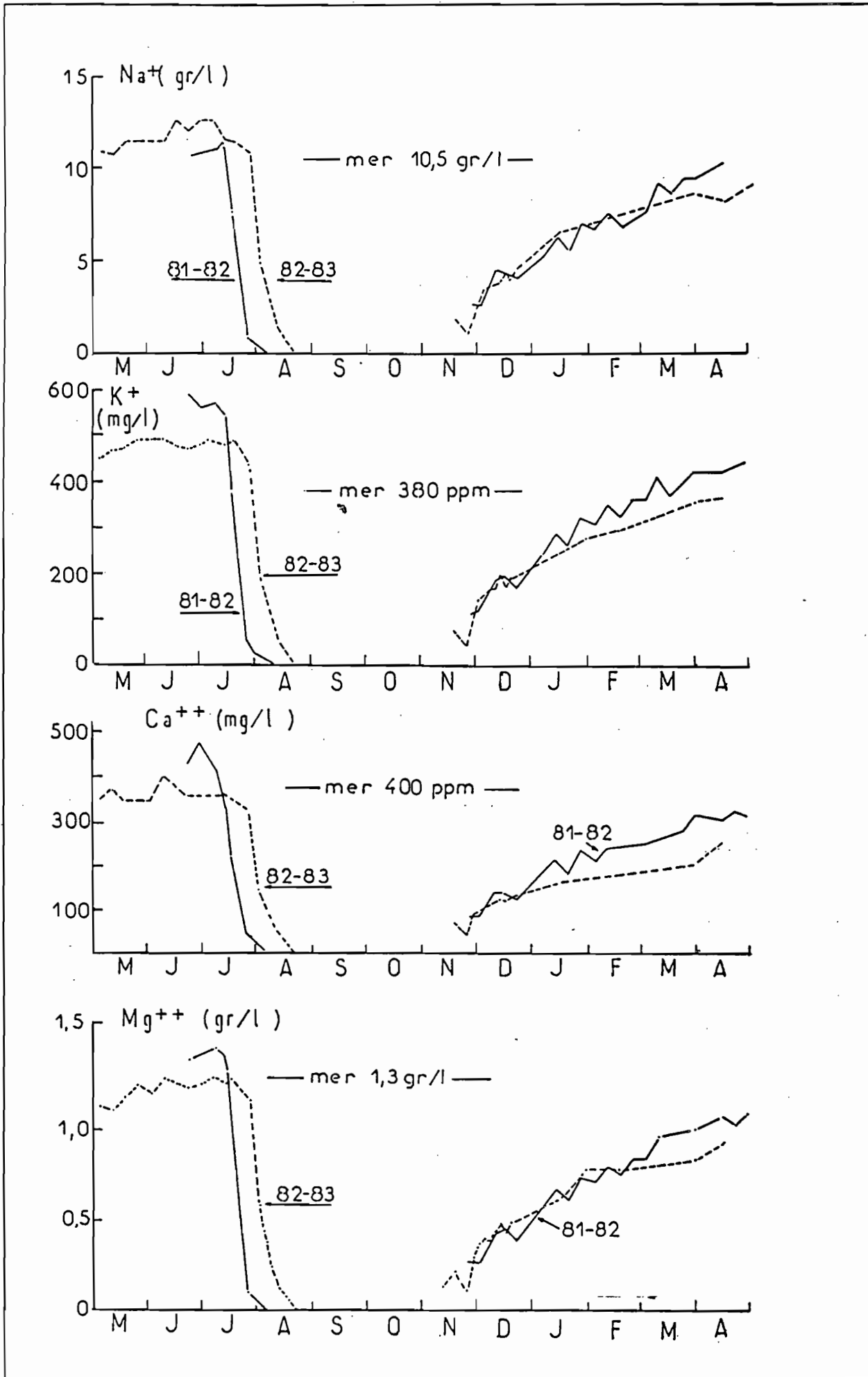


Figure 39 : Evolution de la concentration des cations majeurs.



Les chlorures évoluent parallèlement aux bicarbonates et aux sulfates. Les concentrations excèdent celles de l'eau de mer au maximum de l'intrusion saline dans la vallée du fleuve ; la valeur la plus élevée atteint 21 gr/l. Dès l'installation de la crue à la hauteur de St Louis, les teneurs en chlore se stabilisent autour de 10 à 15 mg/l.

L'évolution saisonnière de la charge anionique permet de préciser, pour les deux cycles hydrologiques étudiés, la date du maximum de la salure (donc aussi de l'arrivée des premiers flots de la nouvelle onde de crue), la durée de la phase de retrait du sel et le moment où l'eau douce règne sur tout le bassin du fleuve depuis les hauteurs du Fouta Djallon jusqu'à l'embouchure. Les salinités maximum ont eu lieu le 12 juillet 1981 et le 19 juillet 1982 ; le retrait total du sel s'est produit le 7 août 1981 et le 25 août 1982. Les deux phases de désalinisation du fleuve ont duré 27 jours en 1981, et 38 jours en 1982.

2. Les cations majeurs (fig. 39)

Le comportement des alcalins (Na, K) et des alcalino-terreux (Ca et Mg) mime celui des anions. Toutes les concentrations augmentent dès que les eaux de l'Océan se mélangent aux eaux fluviales. Au niveau des alcalins, et au maximum de la pénétration saline, les concentrations sont supérieures à celle de l'eau de mer. En revanche, on remarque que ceci n'est qu'exceptionnel pour le calcium et le magnésium : pendant le cycle 82-83 les concentrations en alcalino-terreux restent inférieures aux teneurs dans l'eau de mer. Ces éléments seraient donc "sollicités" dans des cycles biogéochimiques du fait du fonctionnement en estuaire "inverse" : ils seraient partiellement piégés (12 %) dans les petites cuvettes où l'eau de mer, concentrée par évaporation, y effectue de fréquents allers et retours.

Au moment de la crue, la concentration de tous les cations décroît brutalement. Les teneurs sont peu variables pendant cette courte période de 2 à 3 mois : 10 mg/l (Na), 4 mg/l (Ca), de 2 à 3 mg/l pour le K et le Mg.

3. Le rapport Chlore/Sodium

Le rapport chlore/sodium varie très peu pendant 9 à 10 mois de l'année autour de sa valeur moyenne dans l'eau de mer ($\text{Na/Cl} = 1,81$, concentrations en mg/l).

La figure 40 illustre les variations de ce rapport au cours des deux cycles hydrologiques étudiés. Il décroît dès que l'apport d'eau douce se ressent à la hauteur de la ville de St Louis, traduisant ainsi la présence négligeable du chlore dans les apports fluviaux.

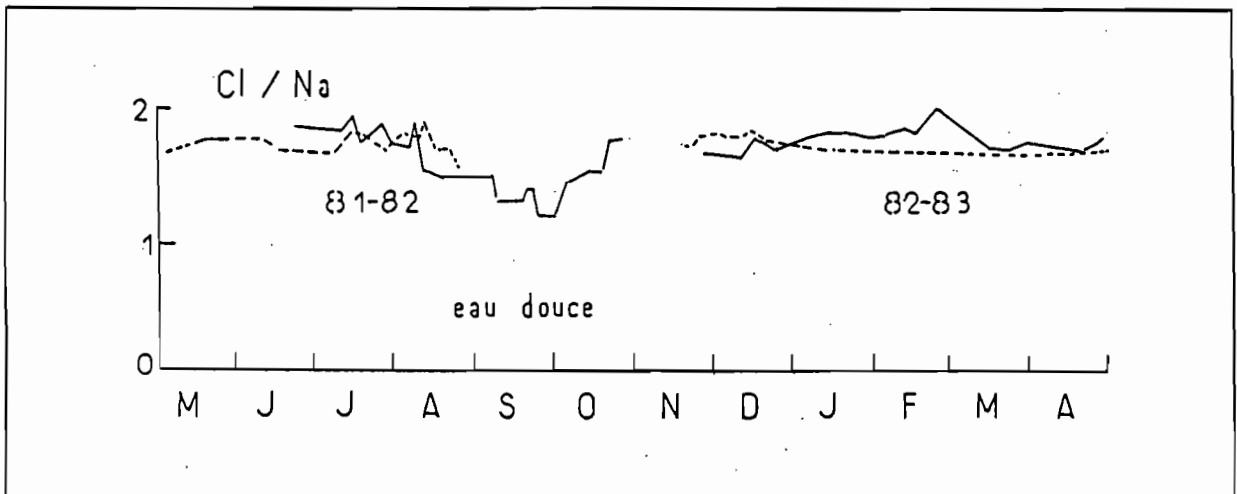


Figure 40 : Variation du rapport Chlore/Sodium.

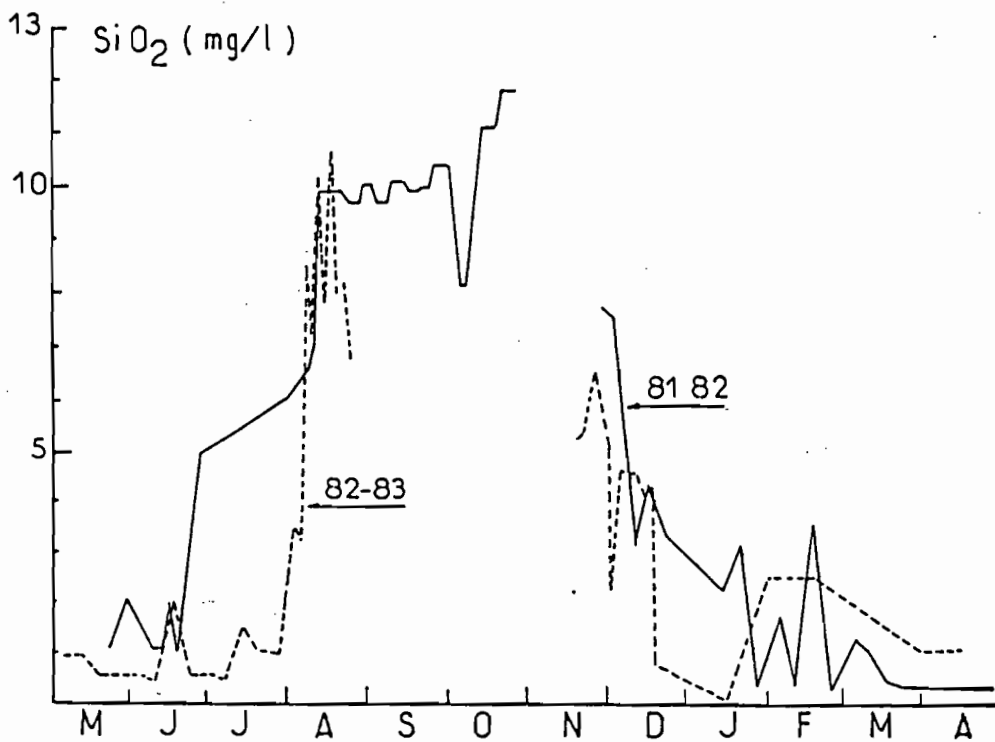
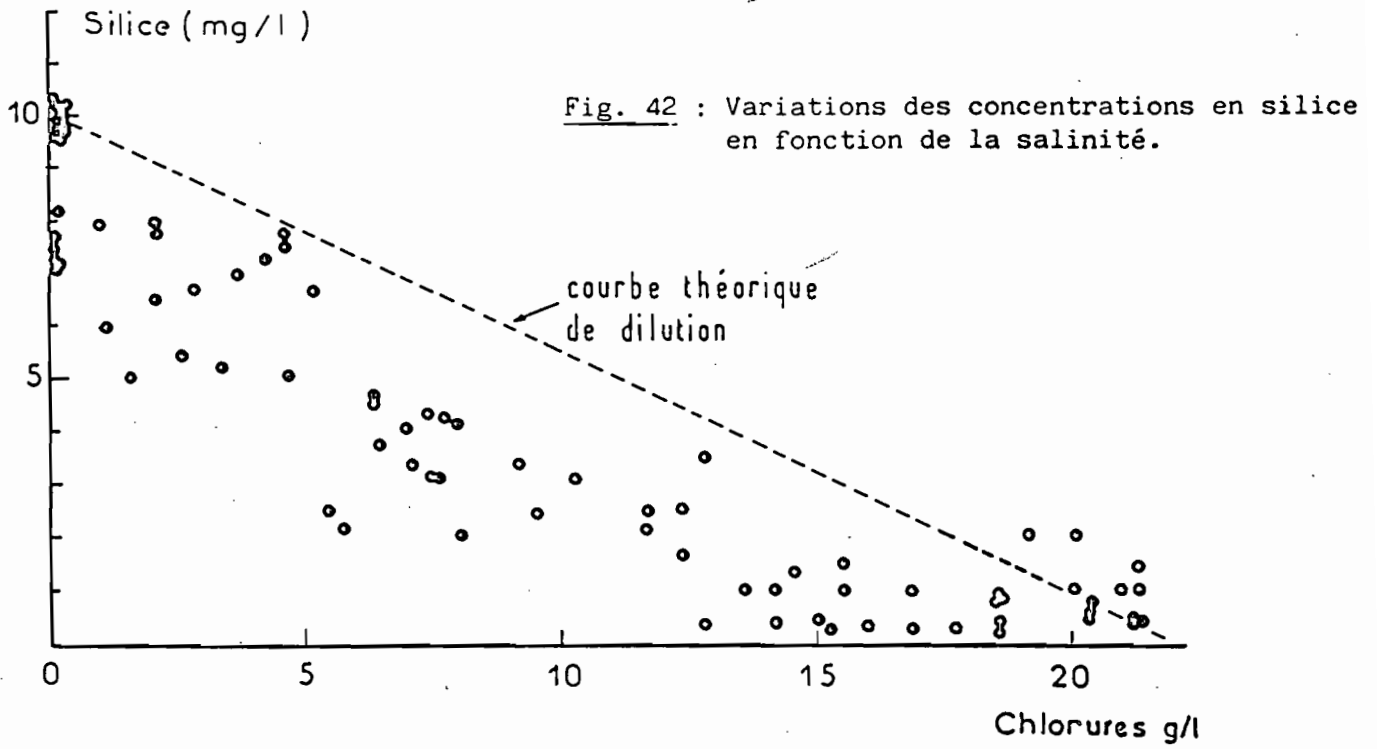


Figure 41 : Evolution des concentrations en silice.

4. La Silice

L'évolution des concentrations en silice mérite que l'on s'y attarde un peu plus longuement. En effet, à l'inverse de tous les autres éléments dissous, la teneur en silice augmente dès que la crue annuelle atteint l'embouchure (fig. 41). Cette particularité du comportement de la silice dissoute à l'interface fleuve/océan dans les milieux estuariens est bien connue et beaucoup d'études y ont été consacrées aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire : MAEDA (1952, 1953), BIEN et al. (1958), SCHINK (1967), MONNET (1972), LISS et POINTON (1973), WOLLAST (1974), SHOLKOVITZ (1976), ASTON (1978, 1983). Que ce soit au laboratoire ou "in situ", les résultats sont assez contradictoires et les opinions très divergentes sur le caractère conservatif ou non conservatif de la silice dans les eaux saumâtres des estuaires.

La figure 42 illustre les variations des teneurs en silice en fonction de la salinité (exprimée par les chlorures). Dans l'ensemble, dès que la salinité augmente, les concentrations en silice diminuent, mais cette décroissance de la silice dissoute s'écarte fortement de la courbe théorique de dilution établie par BIEN et al. (1958). Le mélange eau douce/eau de mer ne correspond donc pas pour la silice à un simple phénomène de dilution ; d'autres facteurs interviennent pour introduire des pertes en silice qui peuvent atteindre de 20 à 30 % lorsque les proportions d'eau de mer et d'eau fluviale sont semblables. Ces pertes sont du même ordre de grandeur que les estimations de LISS et POINTON (1973) dans l'estuaire de l'Alde (Grande Bretagne), de BIEN et al. (1958) dans l'estuaire du Mississippi, mais sont en total désaccord avec d'autres études entreprises sur les estuaires japonais, chinois et sur l'Orénoque où la relation entre la silice et la salinité est linéaire.

D - EVALUATION DES FLUX DE PARTICULES DISSOUTES A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL

L'invasion marine annuelle de la basse vallée du Sénégal rend impossible l'évaluation de l'apport continental en éléments dissous à partir des données analytiques de la ville de St Louis. Nous venons de voir que même pendant l'écoulement de la crue les effets secondaires de la langue salée qui l'a précédé sont ressentis à cette station. Force a donc été de prendre comme référence les données obtenues plus à l'amont au poste de Dagana (à 170 Km de l'embouchure). Lorsque ce site était lui-même atteint par le biseau salé (du 1er mai au 5 août 81 et du 5 mars au 30 avril 82 pour le cycle 1981-1982 ; du 1er mai au 4 août 82 et du 17 février au 30 avril 83 pour le cycle 82-83) (fig. 43), les stations de Podor et/ou de Guédi ont été prises en compte. Le bilan 1981-1982 a ainsi pu être établi à partir de 208 analyses de l'ensemble des éléments majeurs.

1. Le bilan de l'altération chimique. Flux mensuels et annuel en éléments dissous

En 1981-1982, les flux dissous, d'origine continentale, qui ont transité à l'embouchure du fleuve Sénégal se sont élevés à 500 000 tonnes (tableau 36). Ces apports véhiculés par des écoulements de $11,784 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ correspondent à une charge dissoute moyenne annuelle de 42,3 mg/l. Le taux d'érosion chimique annuel pour l'ensemble du bassin serait de 1,85 t/km²/an, valeur très faible mais du même ordre de grandeur que l'estimation de LO (1984) pour la Gambie (1,0 t/km²/an).

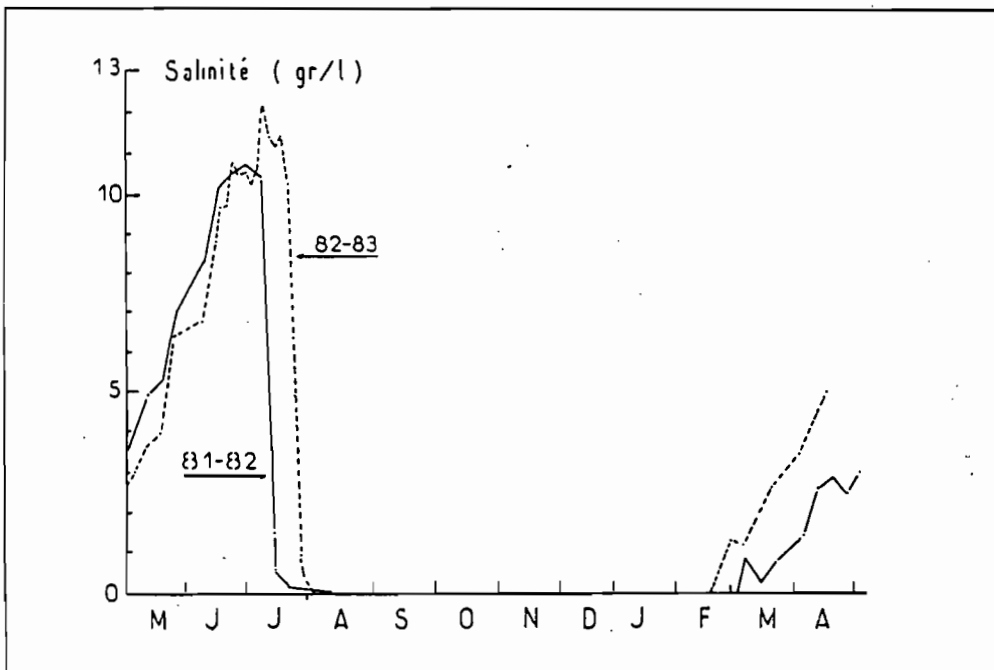


Figure 43 : Evolution de la salinité à Dagana de mai 1981 à avril 1983.

Tableau 36 : EVALUATION DES FLUX DISSOUS CONTINENTAUX A L'EMBOUCHURE
DU SENEGAL (mai 1981 - avril 1982 : en tonnes).
N (nombres d'analyses).

Mois	N	Volume (en 10 ⁶ m ³)	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	K	Na	SiO ₂	Total
Mai	12	1.937	85.23	6.61	2.18	13.35	7.04	3.49	6.59	16.24	140.73
Juin	13	0.778	34.66	4.80	0.41	5.65	3.13	1.40	3.38	5.43	58.86
Juillet	13	401.76	17890.3	1424.2	192.8	2731.9	1612.1	783.4	1478.4	2603.4	28716.5
Août	25	3028.32	65022.2	3396.4	452.0	8627.9	4586.1	5761.8	5190.6	20268.5	113305.5
Septembre	32	4058.18	85151.7	4933.9	0	11887.9	5755.9	6938.6	7225.9	31265.4	153159.3
Octobre	20	2598.47	66555.5	3394.2	1134.3	9317.1	4722.3	4919.4	5254.8	22274.3	117571.9
Novembre	20	1047.24	31453.6	1591.3	0	4519.8	2224.0	2049.3	2155.0	8246.3	52239.2
Décembre	15	383.72	11876.9	486.5	0	1630.8	947.5	561.0	795.2	3228.5	19526.4
Janvier	16	162.93	5244.6	155.0	0	724.5	422.8	201.6	327.0	1277.0	8352.5
Février	18	67.50	2426.0	123.6	0	330.9	215.0	96.8	150.0	578.8	3921.1
Mars	12	26.14	1030.3	33.4	0	141.4	85.1	37.6	53.6	222.0	1603.4
Avril	12	7.46	326.38	8.78	0	47.78	26.12	10.13	18.48	71.57	509.24
Année	208	11.784.10 ⁹	287097.57	15558.69	1781.69	39978.98	20607.09	21364.52	22658.95	90037.44	499104.67

La répartition mensuelle donnée dans le tableau 36 montre que les apports en solution sont largement dépendants des volumes écoulés. Les mois d'août, de septembre, d'octobre et de novembre qui représentent 91 % de l'écoulement annuel totalisent aussi 87 % des flux dissous. Ceci signifie que la minéralisation des eaux varie peu d'une saison à l'autre et d'une année à l'autre. En admettant une charge dissoute moyenne annuelle comparable en 1982-1983 à celle de 1981-1982, on évalue que pour un volume écoulé de 8,01.10⁹ m³, l'apport dissous en 1982-1983 a été de l'ordre de 340 000 tonnes.

La comparaison avec le tableau 32 montre qu'en termes de bilan, l'érosion continentale sous forme particulaire (2 865 000 tonnes) est de 5 à 6 fois supérieure à celle sous forme dissoute. Au niveau du bassin versant du Sénégal, il y a donc à l'heure actuelle un déséquilibre très marqué entre l'érosion mécanique et l'altération chimique.

Les taux d'érosion mécanique et chimique spécifiques réunis (12,45 t/km²/an) restent cependant modestes comparativement à ceux de d'autres rivières africaines (Congo : 22,4 t/km²/an ; Zambèze : 45,9 t/km²/an ; Niger : 33,0 t/km²/an ; Nil : 30 t/km²/an ; l'Orange : 20,2 t/km²/an ; Bandama : 17,3 t/km²/an) et américaines (Amazone : 124 t/km²/an ; Mississippi : 134 t/km²/an).

En pourcentage pondéral, les flux dissous sont essentiellement constitués de bicarbonates (57,5 %) et de silice (18,1 %). A l'exception du calcium (8,0 %), les autres anions sont présents dans des proportions identiques (sodium : 4,5 % ; potassium : 4,3 % et magnésium : 4,1 %). Les chlorures sont relativement abondants (3,1 %) alors que les sulfates sont négligeables (0,4 %).

2. Evolution saisonnière de la charge dissoute

Le tableau 37 donne la composition moyenne des eaux du Sénégal à son embouchure. Rappelons que nous avons fait abstraction de l'intrusion saline et qu'il ne s'agit ici que de la charge en solution acquise par le fleuve sur les bassins versants de l'amont et au cours de son transit dans la portion de la vallée alluviale située en dehors de l'influence marine.

La charge dissoute moyenne est de 42,35 mg/l. Les valeurs extrêmes sont observées en fin d'étiage (76 mg/l en juin) et à la pointe de crue (37 mg/l en août et septembre). Les eaux du Sénégal ont une charge en solution tout à fait comparable (tableau 38) à celle de la Gambie (52 mg/l), du Niger (67 mg/l), du Chari (58 mg/l) et de son affluent l'Ouham (58 mg/l), du Congo (32 mg/l), du Bandama (74 mg/l) et de l'Amazone (52 mg/l).

3. Evolution saisonnière de la charge anionique et cationique

Les variations saisonnières des teneurs en anions et en cations sont essentiellement tributaires de l'importance des écoulements (fig. 44).

a) Les anions

- les teneurs en bicarbonates (HCO₃⁻) varient de 20 mg/l en crue à 45 mg/l en basses-eaux. Ils constituent la composante principale de la charge en solution avec une concentration moyenne de 24 mg/l ;
- les chlorures (Cl⁻) constituent un cas particulier. Les teneurs sont en général de l'ordre de 1,5 mg/l : elles peuvent cependant atteindre de mai à juillet des valeurs supérieures à 4 mg/l.

Tableau 37 : COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DU FLEUVE SENEGAL -
CONCENTRATIONS MOYENNES MENSUELLES (en mg/l)

Mois	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	Σ anions (méq/l)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Σ cations (méq/l)	SiO ₂	Charge Totale
Mai	44.00	3.41	1.12	0.840	6.89	3.63	1.80	3.40	0.838	8.38	72.63
Juin	44.55	6.17	0.53	0.914	7.26	4.02	1.80	4.34	0.929	6.98	75.65
Juillet	44.55	3.54	0.47	0.910	6.80	4.01	1.95	3.68	0.870	6.48	71.48
Août	21.47	1.12	0.15	0.387	2.85	1.51	1.90	1.71	0.386	6.69	37.41
Septembre	20.98	1.23	0	0.383	2.92	1.41	1.70	1.78	0.381	7.70	37.74
Octobre	25.61	1.30	0.43	0.465	3.58	1.81	1.89	2.02	0.462	8.57	45.21
Novembre	30.03	1.51	0	0.534	4.32	2.12	1.95	2.05	0.527	7.87	49.85
Décembre	30.95	1.27	0	0.543	4.25	2.47	1.46	2.07	0.542	8.57	51.04
Janvier	32.97	0.97	0	0.567	4.55	2.65	1.26	2.05	0.565	8.03	52.48
Février	35.93	1.83	0	0.640	4.90	3.18	1.43	2.22	0.638	8.57	58.06
Mars	39.40	1.27	0	0.680	5.40	3.25	1.43	2.05	0.662	8.49	61.29
Avril	43.75	1.18	0	0.750	6.40	3.50	1.36	2.48	0.751	9.59	68.26
Année	24.36	1.32	0.15	0.434	3.39	1.75	1.81	1.92	0.443	7.64	42.35
% de la Charge dissoute	57.5 %	3.1 %	0.4 %	-	8.0 %	4.1 %	4.3 %	4.5 %	-	18.1 %	-

Tableau 38 : COMPARAISON ENTRE LA COMPOSITION CHIMIQUE (mg/l) DES EAUX
DU SENEGAL ET CELLE DE D'AUTRES RIVIERES AFRICAINES ET DU MONDE

	Sénégal	Gambie ⁽¹⁾	Zaïre ⁽²⁾	Niger ⁽³⁾	Bandama ⁽⁴⁾	Ouham ⁽⁵⁾	Chari ⁽⁶⁾		Nil ⁽⁷⁾	Amazone ⁽⁸⁾	Monde ⁽⁹⁾
							amont	aval			
HCO ₃	24.36	24.30	13.0	36.0	35.5	23.7	28.1	32.3	152.5	22.5	57.7
Cl	1.32	0.90	1.3	0.8	2.5	0.5	0.1	0.1	5.7	3.9	5.3
SO ₄	0.15	0.1	2.9	2.3	2.1	0.8	0.1	0.1	12.0	3.0	8.5
Ca	3.39	7.90	1.8	6.1	4.1	2.39	3.5	4.1	29.8	6.5	14.6
Mg	1.75	3.20	1.0	2.2	2.5	1.44	1.8	1.9	4.8	1.0	3.8
K	1.81	1.40	1.3	1.5	2.2	2.00	1.8	1.9	3.6	1.0	1.4
Na	1.92	2.20	0.9	2.7	5.3	2.78	2.8	2.9	13.2	3.1	5.1
SiO ₂	7.64	12.60	9.6	15.4	19.8	21.5	19.8	21.8	15.0	11.2	11.6
Total	42.34	52.50	31.8	67.0	74.0	55.1	57.8	64.9	236.6	52.2	108.0

(1) : LO, 1984 ; (2) : SYMOENS, 1968 ; (3) : MARTINS, 1983 ; (4) : MONNET, 1972 ; (5) : GAC et PINTA, 1972 ; (6) : GAC, 1980 ; (7) : TALLING et RZOSKA, 1972 ; (8) : GIBBS, 1972 ; (9) : MEYBECK, 1983.

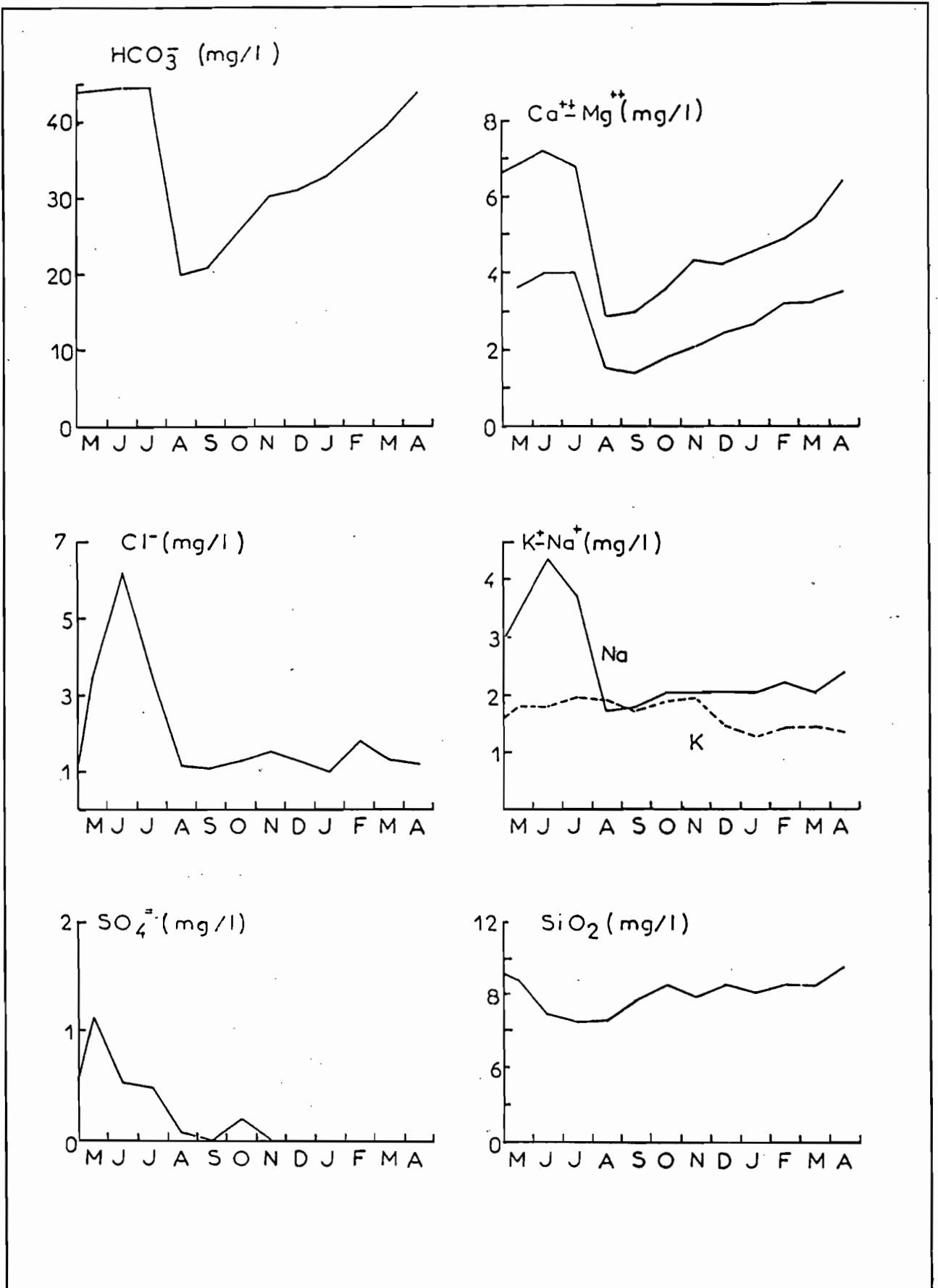


Fig. 44 : Evolution saisonnière de la charge anionique et cationique.

En fin d'été, ces concentrations élevées peuvent résulter de la prise en compte (même très loin en amont) d'eaux atteintes par l'intrusion de la langue salée. En juillet, les teneurs en chlore sont vraisemblablement à porter au crédit des eaux météoriques chargées en chlore et en sodium ;

- les sulfates sont peu abondants dans les eaux du Sénégal. Ils sont essentiellement d'origine marine et les concentrations indiquées dans le tableau 37 sont peu significatives. Les valeurs d'octobre, en particulier, sont vraisemblablement dues à des erreurs analytiques ou à des phénomènes de pollution.

b) Les cations

Tous les cations évoluent parallèlement, à l'exception du potassium (K) dont la concentration est pratiquement constante toute l'année autour d'une valeur moyenne de 1,8 mg/l. Le potassium dissous serait donc totalement indépendant de l'importance des écoulements : autrement dit, quelque soit les chemins empruntés par les eaux (ruissellement, hypodermique ou souterrain) avant de rejoindre le drain principal, il n'y a aucune dilution ou concentration en potassium.

Le sodium et les alcalino-terreux (calcium et magnésium) ont des comportements similaires. Les teneurs diminuent simultanément au passage de la crue puis elles ne cessent d'augmenter progressivement lors de la décrue, des phases de tarissement et d'épuisement.

c) La silice

Les concentrations en silice dissoute varient très peu toute l'année ; elles oscillent autour d'une valeur moyenne de 7,6 mg/l. Cette relative stabilité donne de la "crédibilité" au bilan établi sur les flux dissous d'origine continentale. Nous avons vu en effet qu'à l'interface océan/fleuve, les teneurs en silice diminuaient considérablement.

IV - LES FLUX CONTINENTAUX DE MATIÈRES PARTICULAIRES ET DISSOUTES À L'EMBOUCHURE DU SÉNÉGAL - LE BILAN DE L'ÉROSION MÉCANIQUE ET DE L'ALTÉRATION CHIMIQUE DANS LE BASSIN DU SÉNÉGAL

Le nivellement des bassins continentaux résulte de l'importance relative des deux grands processus de l'érosion continentale : l'ablation mécanique et la dénudation chimique qui s'associent pour exporter vers l'aval les éléments libérés lors de l'altération des roches. Certains éléments choisissent la voie soluble, d'autres la voie particulaire et quelques-uns empruntent les deux itinéraires pour migrer vers les points-bas des bassins versants.

Trois remarques s'imposent au préalable :

- dans la phase soluble, nous avons mis en évidence l'importance (57 %) des bicarbonates. En réalité "leur présence dans l'artère fluviale ne provient que très peu de la dissolution de roches carbonatées et ne s'explique que par l'intervention du CO_2 atmosphérique amené par les eaux d'infiltration", GAC et PINTA (1972) ;
- aux matières en suspension issues des horizons superficiels des sols de l'amont et des berges de la vallée alluviale ; il faut également ajouter les apports éoliens déterminés par le développement du phénomène des brumes sèches. En effet, ils représentent des quantités non négligeables (près de 200 000 t/an selon GAC et TRAVI, 1984) et ils sont pris en compte bien que pour l'essentiel leurs régions d'origines soient situées en dehors du bassin versant du Sénégal ;
- enfin, il faut garder à l'esprit que les deux cycles hydrologiques étudiés correspondent à des années de très faible hydraulicité. Les eaux du fleuve sont restées cantonnées dans le lit mineur ; les déversements vers les plaines d'inondation ont été insignifiants et n'ont donné lieu qu'à une sédimentation fine très limitée dans le lit majeur. La sédimentation, qu'elle soit à caractère détritique ou chimique, s'est organisée dans deux sites de dépôts : le milieu lacustre représenté par le Lac de Guiers en rive gauche du fleuve Sénégal, et le milieu océanique. Les flux de matières à l'embouchure ne représentent donc pas l'intégralité des apports continentaux : une partie du "capital" acquis à l'amont et dans la vallée est "court-circuitée" vers le Lac de Guiers.

Au cours des deux cycles arides 1981-1982 et 1982-1983, les flux de matières à l'embouchure du Sénégal se sont respectivement élevés à 3 365 000 tonnes et 1 525 000 tonnes. La répartition entre matière minérale et matière organique s'établit de la façon suivante :

	1981 - 1982	1982 - 1983
M. organique :	44 680 (1,33 %)	22 836 (1,50 %)
M. en suspension :	2 820 000 (83,84 %)	1 163 067 (76,26 %)
M. en solution :	499 105 (14,83 %)	339 224 (22,24 %)
(tonnes) :	3 364 350	1 525 127

En moyenne sur les deux cycles, les exportations de matières à l'embouchure du Sénégal sont de l'ordre de 2 445 000 tonnes dont :

- 80,0 % pour les particules fines en suspension,
- 16,8 % pour les substances dissoutes,
- 1,4 % pour la matière organique.

Le tonnage annuel des différents éléments chimiques obtenu en additionnant les poids respectifs migrant en solution et en suspension (cycle 1981-1982) est le suivant (en tonnes) :

Eléments communs :	Suspensions	Dissous	Total
Si :	661 900	42 100	703 000
K :	40 300	21 400	61 700
Mg :	20 800	20 600	41 400
Ca :	5 000	40 000	45 000
Na :	4 200	22 700	26 900

Eléments différents :	Suspensions	Dissous
Al :	358 900	HCO ₃ ⁻ 287 100
Fe :	192 300	Cl ⁻ 15 600
Ti :	15 700	SO ₄ ⁼ 1 800
Mn :	800	PO ₄ ⁼ < 300

Au niveau de l'ensemble du bassin versant du Sénégal, l'exportation (toutes formes figurées ou dissoutes confondues) relative des éléments est la suivante :

Si > Al > Fe > K > Ca > Mg > Na > Ti > Mn.

Les éléments empruntent cependant des voies différentes pour atteindre l'Océan (fig. 45) :

- l'aluminium, le fer, le titane et le manganèse sont uniquement évacués sous formes figurées avec les matières en suspension ;
- le bicarbonate, le chlore, le sulfate et le phosphate, qui ne sont pas à proprement parler originaires du bassin, migrent vers l'aval avec la phase dissoute ;
- la silice et le potassium accompagnent plutôt la phase en suspension (94 % et 65 %) que la phase soluble (6 % et 35 %). Le potassium quitte le bassin avec les édifices micacés ; la silice demeure le constituant essentiel des matières en suspension ;
- le magnésium se partage de manière sensiblement égale entre les deux phases ;
- enfin le calcium et le sodium sont principalement exportés sous forme dissoute (89 % et 84 %) .

La "roche sédimentaire" qui correspondrait à ces flux dissous et particuliers aurait comme composition chimique (exprimée en % d'oxydes) :

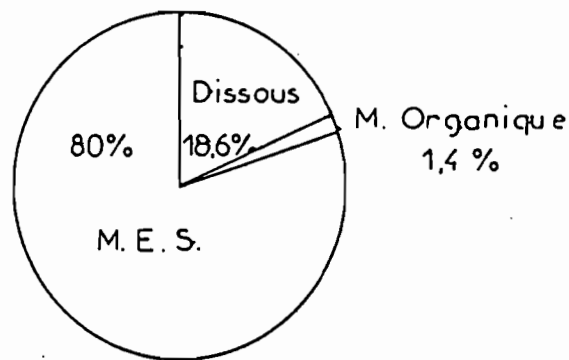
SiO ₂ :	55,14 %	Na ₂ O :	1,35 %
Al ₂ O ₃ :	24,86 %	K ₂ O :	2,72 %
Fe ₂ O ₃ :	10,07 %	MgO :	2,52 %
TiO ₂ :	0,99 %	CaO :	2,31 %
Mn ₃ O ₄ :	0,04 %		

Pendant la période des hautes-eaux, la salinisation des eaux fluviales est bien perceptible. Les ions chlore et sodium dominants dans l'eau de mer sont décelés dans toute l'embouchure du Sénégal (l'eau de mer est bien présente dans le fleuve au cours de la crue).

Dès la deuxième quinzaine du mois d'octobre, la salinisation des eaux augmente rapidement avec la remontée des eaux marines dans le fleuve Sénégal ; ce phénomène a pris des proportions considérables au cours de ces années particulièrement sèches. Les données limnimétriques relevées depuis 1903 nous ont permis de suivre l'évolution de cette invasion marine qui est l'objet de la quatrième partie de notre mémoire.

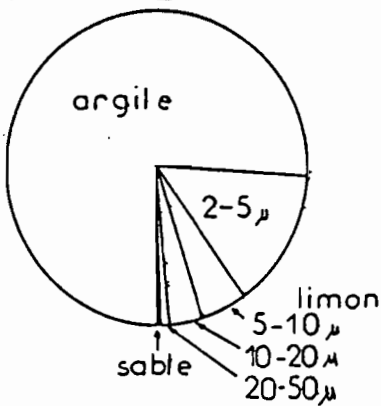
Figure 45 : Flux de matières du fleuve Sénégal.

Fig 45: FLUX DE MATIERES DU FLEUVE SENEGAL

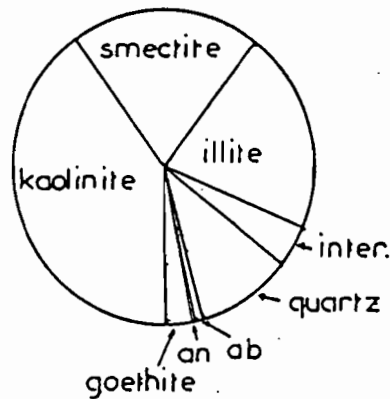


MATIERES EN SUSPENSION

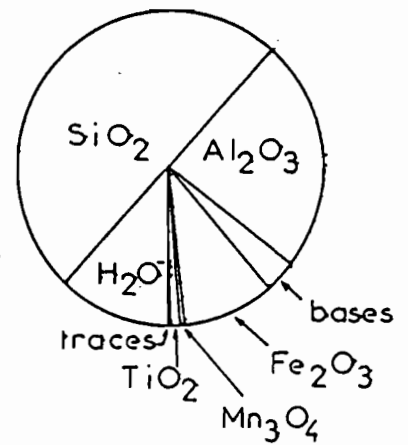
GRANULOMETRIE



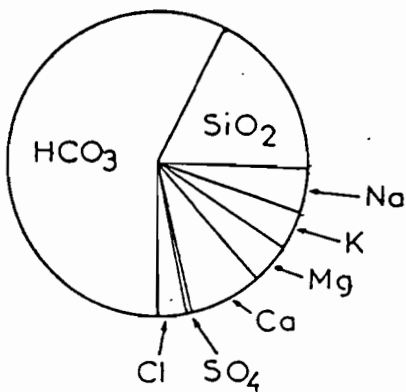
MINERALOGIE



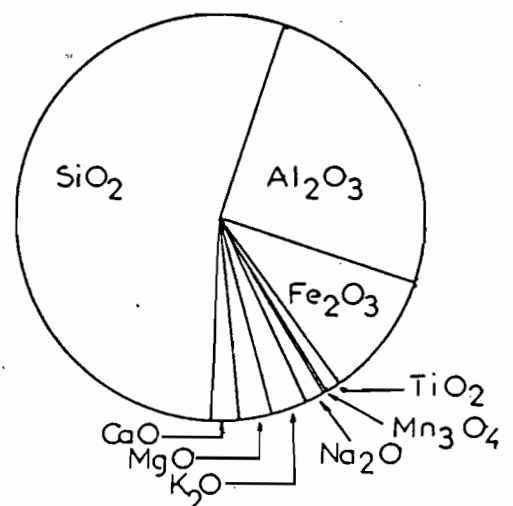
CHIMIE



MATIERES EN SOLUTION



ROCHE SEDIMENTAIRE



CHAPITRE IV

L'INVASION SALINE DANS LA BASSE

VALLÉE DU FLEUVE SÉNÉGAL

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

Cette dernière partie se propose, à la suite des conditions particulières introduites par l'accentuation du phénomène de désertification depuis 1968, de reprendre sur la base d'observations nouvelles le modèle de propagation de la langue salée établie par ROCHETTE (1974). Les mesures de salinité, réalisées au cours des trois dernières années marquées par une sécheresse sans précédent au cours du XXème siècle, ont en effet montré que le modèle proposé aboutissait à une sous-estimation de la durée et de l'ampleur de l'intrusion saline dans la basse vallée du Sénégal.

Après un rappel des études antérieures, les causes et les mécanismes de la remontée saline ont été précisés. L'application des anciennes abaques permettent une évaluation du rythme de progression spatio-temporelle de la salinité depuis le début des observations en 1903 jusqu'à l'époque actuelle. La réalité est ensuite abordée avec l'appui des mesures récentes (de 1979 à 1983) et confrontée avec les données du modèle de ROCHETTE (1974).

I - ANALYSES DES DONNÉES ANTÉRIEURES

A - TEMOIGNAGES ANCIENS

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

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

Les témoignages sont plus précis à partir des années 1800 :

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

- en 1878, TARDIEU note qu' "à Merinaghen, sur les bords du Lac de Guiers, l'eau est douce toute l'année, sauf de mars à juin."

B - LES OBSERVATIONS AU COURS DU XXÈME SIECLE

Il semble que la situation se soit modifiée à partir de 1900. Depuis cette époque, l'eau salée atteint chaque année la ville de Dagana et peut parvenir au-delà de Podor (km 292), lors des années de faibles écoulements. Ce fait a été souligné par HENRY (1918) après les séquences sèches de 1913-1914 et 1915. TROCHAIN (1940) émet l'hypothèse que l'invasion de la basse vallée par l'eau de mer est due à l'affaiblissement de la crue fluviale et non à la remontée du niveau marin. D'une manière générale, les conclusions des travaux menés sur l'estuaire s'accordent pour incriminer l'ensemble des changements morphologiques récents introduits par les aménagements de plus en plus élaborés dans le Bas-Sénégal. Tous les facteurs ayant conduit au dessèchement de la région ont eu une influence plus ou moins importante dans la progression "continentale" de la salinité : diminution des précipitations sur l'ensemble du bassin versant, réduction des débits et des courants fluviaux, divagation de l'embouchure, abaissement de la hauteur d'eau et de la durée de la crue, arasement des seuils rocheux, etc.

L'impact considérable de cette intrusion saline dans une région en plein essor économique a suscité de nombreuses études pour en cerner les causes, en préciser les mécanismes à l'échelle saisonnière et en mesurer les effets sur l'environnement alluvial. On peut citer :

- les travaux de ROCHETTE (1974), qui constituent certainement l'ouvrage le plus complet et dont les tentatives de modélisation de la remontée saline s'appuient sur des mesures précises le long de profils transversaux et longitudinaux réalisées en 1962 et 1963 ;
- les observations épisodiques de la SOGREAH en 1971 et en 1972 ;
- les mesures de salinité réalisées par le PNUD de 1972 à 1973 ;
- les réalisations de l'OMVS (Organisation de la Mise en Valeur du fleuve Sénégal) qui synthétisent, pour l'essentiel, dans son document sur "les éléments de préfaisabilité du barrage de Diama" en 1978, les données de base connues ;
- à l'heure actuelle, des mesures ponctuelles de salinité sont effectuées régulièrement en différents sites par l'OMVS, la SAED (Société d'Aménagement du Delta), le Service Hydrologique de St Louis, la C.S.S. (Compagnie Sucrière Sénégalaise) à la hauteur du Lac de Guiers, et surtout par l'ORSTOM (J.Y. GAC et ses collaborateurs) qui s'appuie sur un dispositif de 56 stations de mesures hebdomadaires situées entre St Louis et la ville de Podor (km 292).

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

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

A - LES CAUSES DE LA REMONTÉE DES EAUX SALINES

Quatre causes principales peuvent être évoquées.

1. La morphologie du lit mineur

Le fleuve Sénégal débouche sur les côtes tropicales basses de l'Afrique de l'Ouest et il présente la particularité d'avoir un lit mineur qui se situe très nettement en contrebas de l'Océan (fig. 2) sur près de 400 km. Malgré la faible importance des marées, cette particularité se traduit chaque année par la remontée d'eau salée vers l'amont du fleuve.

2. Le régime du fleuve

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

3. La puissance de la houle à l'embouchure

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

4. La pente du talus continental

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

Il faut souligner que les paramètres hydrologiques que nous venons d'évoquer (durée de la période des basses-eaux, sévérité des étiages, tarissements précoces) sont intimement liés aux hauteurs annuelles des précipitations et à la répartition des pluies au cours de l'hivernage.

B - LES MECANISMES DE L'INTRUSION SALINE

A la fin de la décrue du fleuve, les eaux marines repoussent les eaux douces, l'onde de marée devient perceptible vers l'amont et précède l'arrivée de la salure. L'invasion marine à l'intérieur du bassin sénégal-mauritanien se décompose en quatre phases (GAC et al., 1983) dont les durées sont variables suivant les nouvelles conditions introduites par la crue annuelle (fig. 46) :

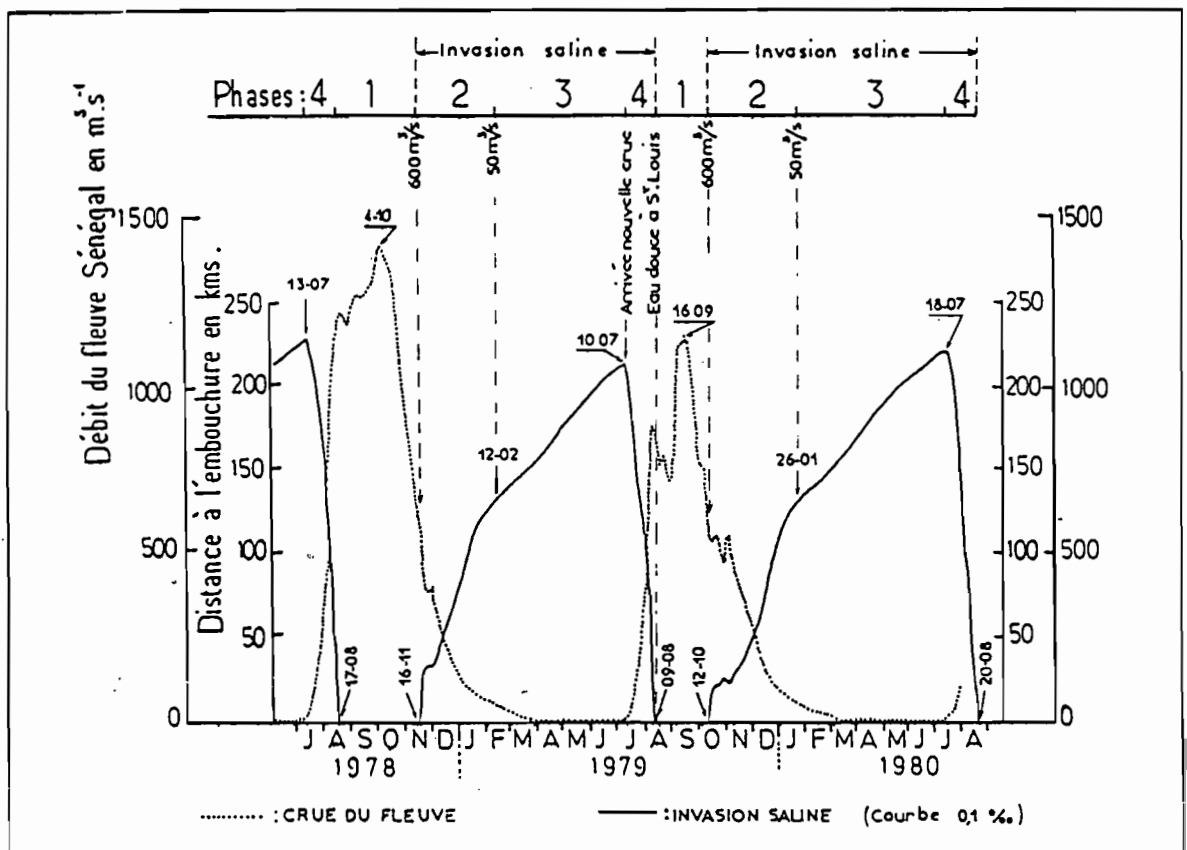


Figure 46 : Les différentes phases de l'invasion marine annuelle (GAC, 1983).

Fig. 46 : Les différentes phases de l'incursion marine annuelle basées sur les données 1978-1980 :
—, position du front salin ; ..., variations des débits du fleuve. Evénements successifs observés en 1978 et 1979 : salinité maximum le 13 Juillet 1978 ; retrait du sel du 13 juillet au 17 août 1978 (phase 4) ; eau douce à l'embouchure du 17 août au 16 novembre 1978 (phase 1) ; début de l'intrusion saline pendant la phase de décrue (débit compris entre 600 m³/s et 50 m³/s) du 16 novembre 1978 au 12 février 1979 (phase 2) ; invasion marine ($D < 50$ m³/s) du 12 février au 10 juillet 1979 (phase 3) ; salinité maximum le 10 juillet 1979 ; retrait de la salinité avec l'arrivée de la nouvelle onde de crue du 10 juillet au 9 août 1979 (phase 4), selon GAC et al. (1983).

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

Phase 2 : Dans une deuxième phase, dont les différents aspects sont illustrés par la figure 47, l'interface eau douce-eau salée entame son déplacement saisonnier vers l'amont. L'intrusion débute par une oscillation du plan d'eau due à l'onde de marée et la progression du coin salé ne va dépendre, dans sa phase initiale, que de la forme du tarissement du fleuve. Selon les estimations de ROCHETTE (1964), GAC et al. (1983), cette phase débute lorsque le débit du fleuve descend en dessous de 600 m³/s. Les quatre exemples de la figure 47 montrent que l'intrusion saline peut être lente (1906-1907), rapide (1977-1978), différée (1979-1980) par une reprise des écoulements, ou même dédoublée (1907-1908) si les pluies tardives sont importantes. Cette phase s'achève lorsque le débit fluvial tombe à 50 m³/s.

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 (CHAUMENEY, 1974 ; ICOLÉ et al., 1982).

Phase 4 : La dernière phase s'amorce avec le nouveau cycle hydrologique et la nouvelle saison des pluies. Elle correspond au retrait de la salure dans toute la vallée. Le taux maximum de salinité et la pénétration maximale vers l'amont du coin salé sont atteints la veille du passage de la nouvelle onde de crue. Cette phase s'achève lorsque les volumes totaux d'eau douce qui transitent à l'embouchure dépassent 900.10^6 m³ (ROCHETTE, 1964).

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

- la plus ou moins grande précocité du tarissement de la crue du fleuve : la remontée saline ne se déclenche que lorsque le débit descend en dessous de 600 m³/s ;
- la durée de la période d'étiage pendant laquelle le débit devient inférieur à 50 m³/s.

Ces deux paramètres sont étroitement liés aux hauteurs des précipitations annuelles et à la distribution des pluies dans l'année.

III - PARAMÈTRES HYDROLOGIQUES ET FACTEURS RÉGULANT L'INVASION MARINE

A - LES MASSES D'EAU ET LEUR SALINISATION

Le littoral sénégalais est sous l'influence de quatre masses d'eau qui font ressentir leurs effets au cours de deux saisons océaniques :

- une saison chaude de juin à octobre,
- une saison froide de novembre à mai.

1. La saison chaude

Pendant la saison chaude, on dissocie :

- les eaux chaudes tropicales sont les eaux du contrecourant équatorial affectées d'un courant de surface orienté N-NE. Les températures sont élevées (de 27 à 28° C) et les eaux sont caractérisées par de très forts taux de salinité (de 36 à 37 ‰). On les observe de juin à août et elles sont limitées au nord par le courant des Canaries, au sud par le courant du Benguela.

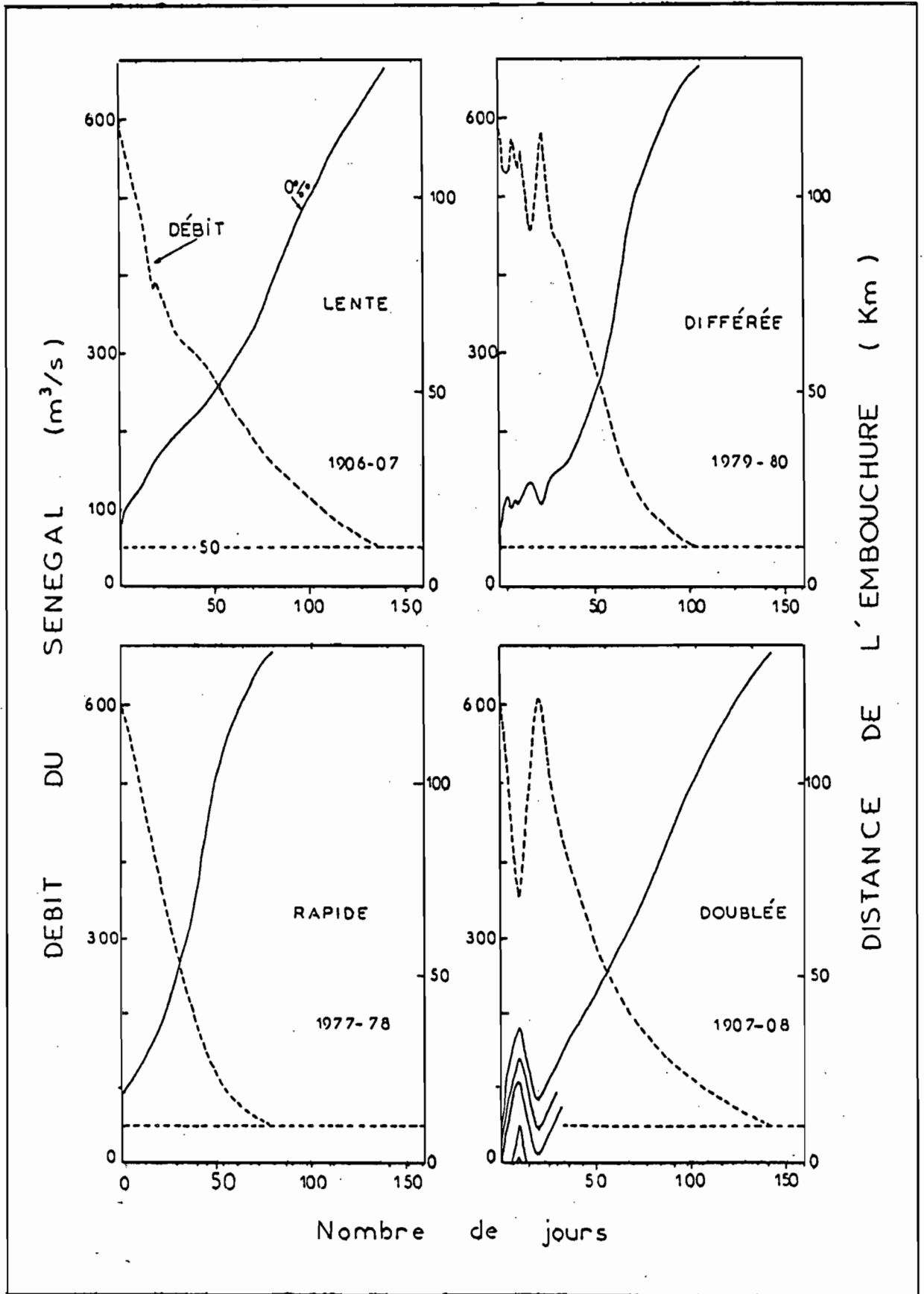


Figure 47 : Différents aspects du tarissement et de l'intrusion marine.

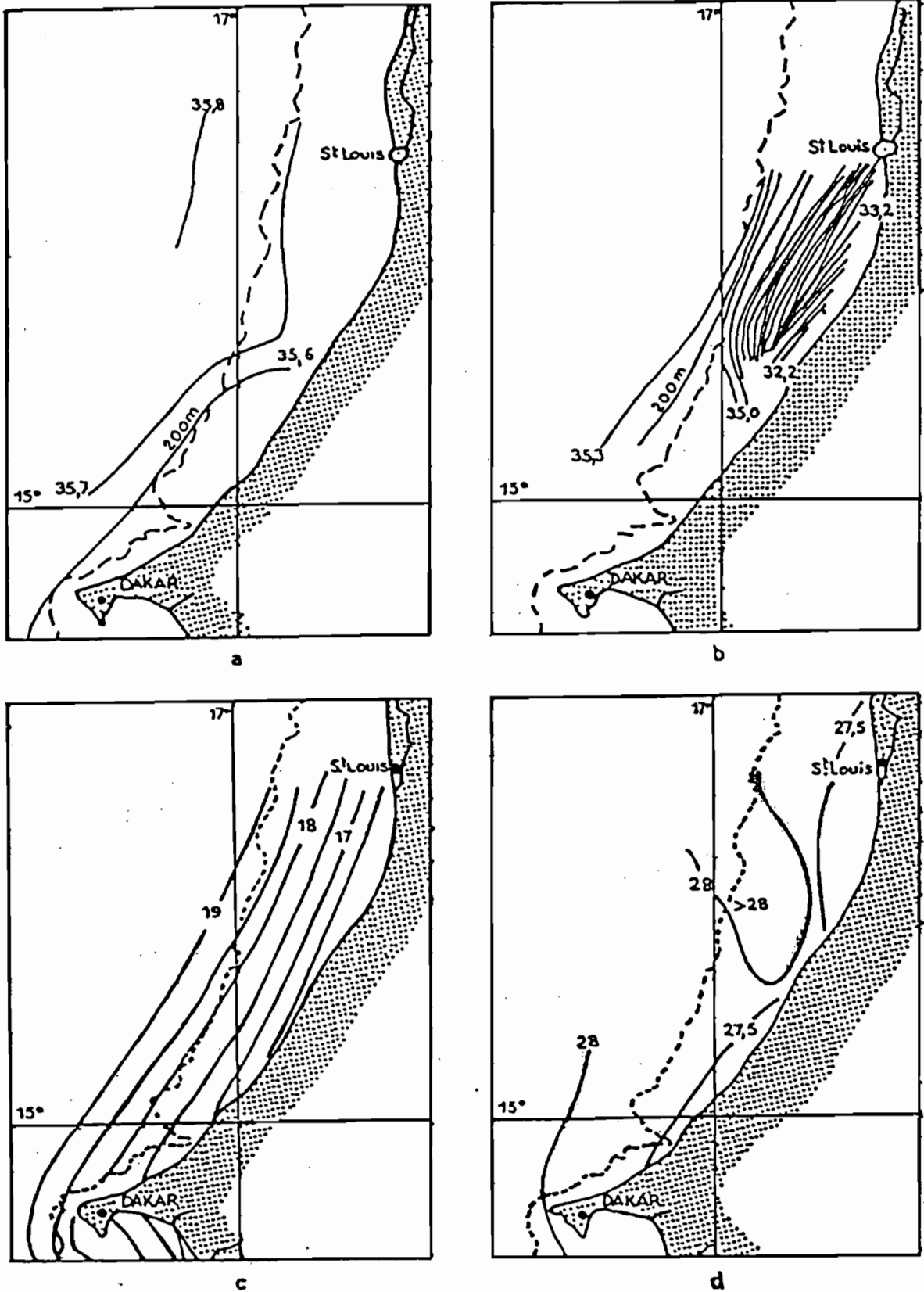
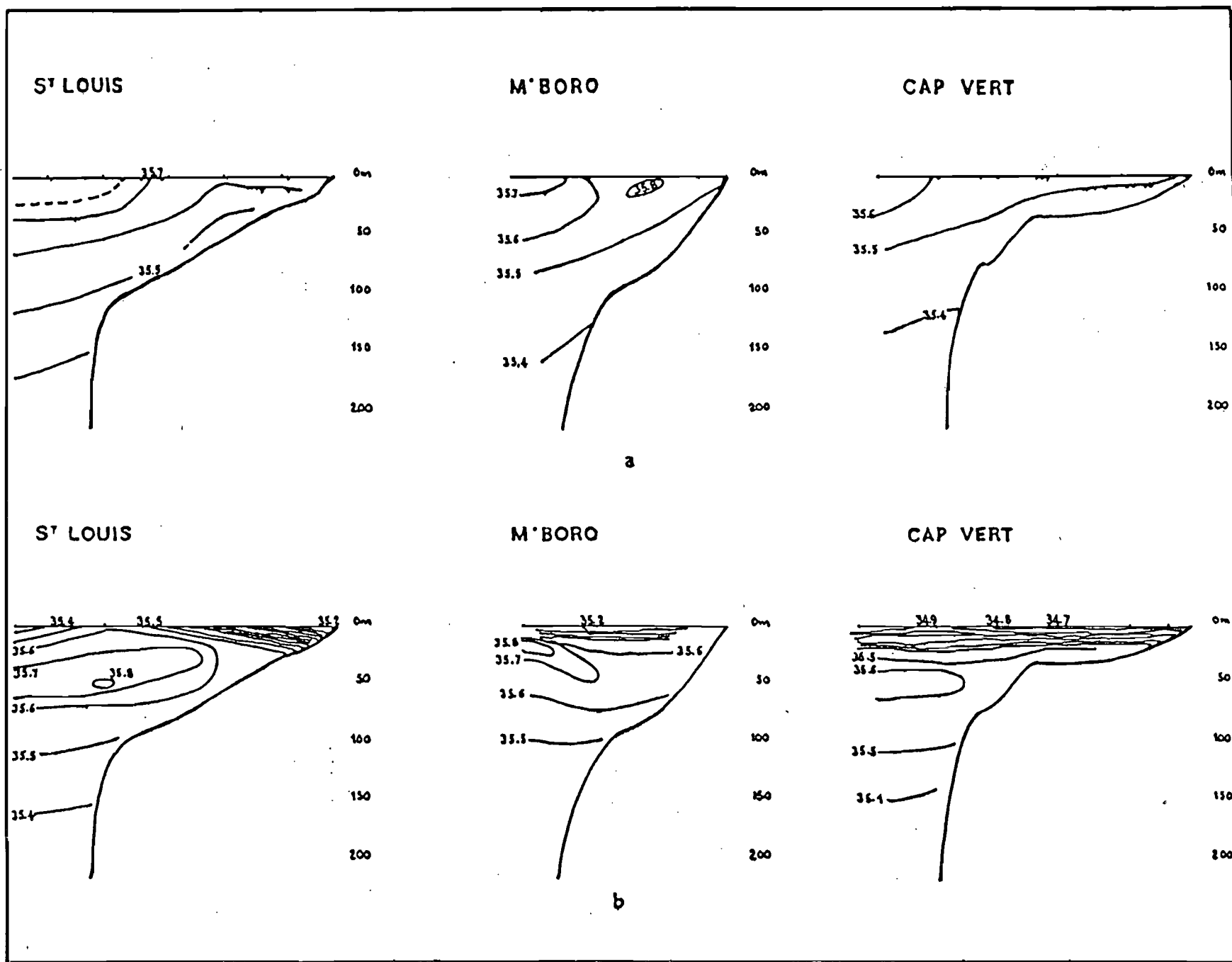


Figure 48 : Variations salines et thermiques saisonnières :
 Salinité de surface : a) saison sèche ; b) saison humide.
 Isothermes de surface : c) saison sèche ; d) saison humide.
 (PINSON - MOUILLOT, 1980).



- les eaux chaudes dessalées guinéennes sont décelables entre août et novembre. Elles sont chaudes (28°C) et leur salinité reste inférieure à 35 ‰. Leur dessalement s'amorce d'abord au niveau de l'équateur sous le double contrôle des eaux des pluies d'hivernage et des flux d'eau douce des fleuves côtiers. Au large de l'embouchure du Sénégal (fig. 48), des taux de salinité de 32 ‰ ont été relevés par PINSON-MOUILLOT (1980) en saison humide au moment du développement du panache turbide engendré par la crue du fleuve.

2. La saison froide

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

- les eaux froides dessalées : leur température est inférieure à 24°C et leur salinité à 35 ‰. Elles n'ont qu'une petite extension géographique et sont le plus souvent disséminées en petites zones ;
- les eaux froides salées résultent de la poussée, exercée par les alizés du N-NW vers le sud, de la tranche superficielle des eaux chaudes tropicales (branche côtière du courant des Canaries) et de la remontée d'eaux froides profondes provoquée par un upwelling côtier. Leur température est inférieure à 20°C et leur salinité supérieure à 35 ‰.

Au cours de cette saison froide (sèche sur le continent), qui correspond à l'intrusion saline dans le lit mineur du fleuve, les salinités sont, selon PINSON-MOUILLOT (1980), maximales en bordure du littoral (fig.49).

8 - LE NIVEAU MARIN MOYEN

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

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

Les variations du niveau marin seraient la conséquence de nombreux phénomènes (PIRAZOLLI, 1977) parmi lesquels on peut noter :

- la tectonique des plaques : le mouvement relatif des plaques tend à modifier le volume d'eau disponible dans les océans ;
- l'isostasie : qui tend à affaisser le fond des bassins océaniques ; des traces d'émersion apparaissent alors sur les côtes ;
- les déplacements sédimentaires : les dépôts sédimentaires, les changements de la morphologie littorale peuvent modifier les amplitudes de marée ;
- les effets des modifications sur le climat : ainsi par exemple le réchauffement climatique qui s'est produit durant ces périodes a provoqué une fusion importante des glaciers ; c'est alors la restitution de l'eau des blocs de glace aux océans, provoquant la montée du niveau marin.

Le schéma des variations du niveau de l'Océan Atlantique (fig. 50) a été établi par les chercheurs quaternaristes (ELOUARD et al., 1977 ; MONTEILLET, 1977).

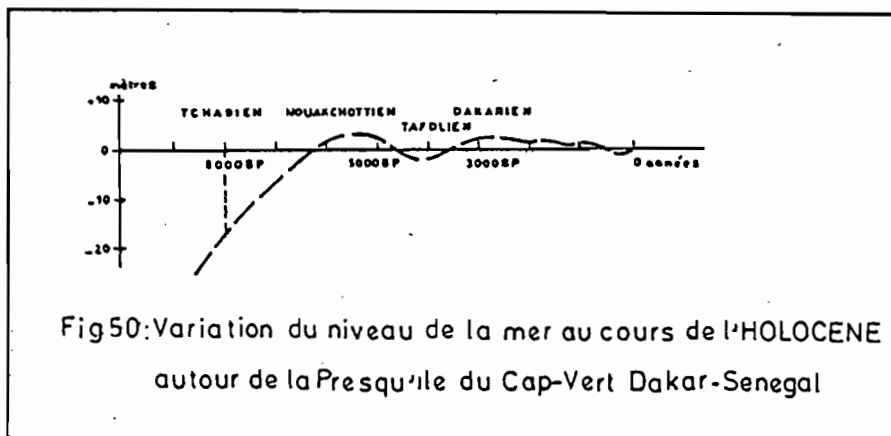


Fig50: Variation du niveau de la mer au cours de l'HOLOCENE
autour de la Presqu'île du Cap-Vert Dakar-Senegal

Ainsi :

- à l'Inchirien moyen (entre 39 000 et 37 500 ans B.P.), un niveau marin relatif proche de l'Actuel a existé pendant une période indéterminée ;
- à l'Inchirien supérieur (entre 31 000 et 32 000 BP), c'est le passage du niveau relatif de la mer à quelques mètres du niveau actuel ;
- la régression post-inchirienne (entre 31 000 et 20 000 BP) : une chute très rapide du niveau de la mer se produit à cette époque (le niveau de la mer tombe de 50 m). L'origine de cette régression mondiale est glacio-eustatique (il y a une grande extension des calottes glaciaires du Würm) ;
- la transgression pré-nouakchottienne (vers 22 000 BP) se caractérise par un niveau marin bas (- 20 m). La plus grande partie du plateau continental est émergée, les dunes éoliennes s'étendent. A partir de cette époque, la chronologie se précise davantage ;
- vers 8 000 ans BP, il y a un bref stationnement du niveau marin au cours du Tchadien ; la ligne de rivage se situe à -20 m ;
- vers 6 000 ans BP, s'effectue une remontée rapide du niveau qui passe au zéro IGN actuel ;
- vers 5 500 BP (Nouakchottien), la ligne de rivage atteint la cote de niveau +3 m. Il y a la formation de nombreux golfes sur le continent inondé ;
- vers 4 000 BP (Tafolien), une légère régression s'installe et le niveau se place à -2 m ;
- vers 3 000 BP (Dakarrien), il y a une légère remontée ; le niveau passe à +2 m et même à + 3 m ;
- entre 1 700 et l'Actuel, de faibles oscillations de l'ordre du mètre sont perceptibles. La courbe de variation s'abaisse pour se raccorder au zéro actuel.

Une légère émergence semble prédominer actuellement (FAURE et ELOUARD, 1967 ; FAURE et al. 1974) ; le niveau de la mer s'élèverait de quelques millimètres/an.

2. Les oscillations annuelles du niveau marin

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

A St-Louis, ROCHETTE (1964), par des mesures effectuées de janvier à juillet 1963, trouve pour le niveau de mi-marées "des maximum compris entre -0,06 m et +0,26 m IGN" tout en soulignant que dans le bief maritime, pendant l'étiage, le niveau du plan d'eau fluvial n'est pas très étroitement lié au niveau moyen en mer. CHENEVERT et al. (1972) donne également des résultats comparables : "le niveau moyen est de 0,27 m au-dessus de la cote IGN, et que 90 % du temps, le niveau fluctue entre -0,21 et +0,81 ; le niveau le plus élevé qu'on ait enregistré est de +1,35 m."

Les variations du niveau moyen sont sensibles sur toute la longueur du bief maritime. Elles sont accentuées au fur et à mesure que l'on remonte plus en amont, se propagent et se superposent à l'écoulement fluvial.

Les fluctuations du niveau marin sur l'évolution de la remontée saline sont donc d'une importance capitale.

3. Influence du niveau moyen sur la salinité

Le niveau moyen à l'embouchure produit, suivant le sens de son évolution, une progression ou un retrait de la salure qui se répercute sur toute la longueur du bief maritime. Selon ROCHETTE (1964), l'influence de cet écoulement qui se superpose à l'écoulement naturel est d'une grande importance, et il note en même temps qu'une variation de 1 cm/jour détermine à l'embouchure un écoulement de 22,3 m³/s, et compte tenu de l'importance de l'étendue de la superficie libre du bief maritime (193 km² à l'embouchure), ce débit supplémentaire est loin d'être négligeable.

Les estimations effectuées, aussi bien par l'ORSTOM que la SOGREAH, montrent que l'influence de la marée joue beaucoup sur la pénétration saline surtout dans les 20 ou 30 premiers km de l'embouchure. Mais au fur et à mesure que la pénétration saline augmente, et pour une invasion supérieure à 100 km, ROCHETTE (1964) aboutit à la conclusion : "pour une pénétration saline supérieure à 100 km environ, la répartition spatiale de la salinité était pratiquement indépendante des conditions de marées" car la poussée des eaux douces du fleuve devient insuffisante à cause de la longueur du bief salé, et il y a un mélange plus ou moins effectif des deux types d'eau.

C - LE MARNAGE

ROCHETTE (1964) signale d'abord : "le caractère cyclique des variations de l'amplitude laisse présumer que l'influence du marnage se traduit par une évolution périodique de la salinité..." Cette influence est variable en fonction des périodes de mortes-eaux et de vives-eaux.

Les effets relatifs au marnage se marquent toujours selon les conclusions de ROCHETTE (1964) "par une augmentation de la salinité en période de morte-eau et par une diminution de la salinité en vive-eau." Avec la distance "au-delà d'une certaine pénétration saline (soit pratiquement en amont de Diawar à 120 km de l'embouchure), les variations du marnage n'ont plus aucune incidence sur la salinité."

D - LE DEBIT FLUVIAL

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

- l'intrusion saline dans le fleuve Sénégal est possible dès que le débit tombe en dessous de 600 m³/s ;
- quand les débits en fin d'étiage franchissent le seuil de 50 m³/s, la propagation des eaux salées vers l'amont ne dépend plus que du temps, variable chaque année, qui va s'écouler jusqu'à l'arrivée de la crue suivante.

Autrement dit, deux crues totalement différentes peuvent se 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

La pénétration saline augmente au fur et à mesure de la réduction des débits du fleuve. En période de basses-eaux, lorsque les écoulements sont compris entre 300 m³/s et 50 m³/s, les prélèvements d'eau douce pour les importants programmes d'aménagement agricole le long de la vallée ont pour effet d'accélérer la remontée de la langue salée.

Il est cependant difficile d'établir une relation précise entre les volumes prélevés dans le fleuve et la nouvelle impulsion qui en résulte réellement pour la progression de la langue salée. CHAUMENEY (1974), en envisageant l'hypothèse la plus défavorable du remplacement instantané du m³ d'eau douce pompé par 1 m³ d'eau de mer, aboutit à la conclusion que "la diminution correspondante du débit pour repousser la langue salée entraînerait une remontée supplémentaire de 7 à 15 Km pour un même débit à Dagana." Lorsque seul le facteur temps conditionne la remontée saline, COGELS et GAC (1981) ont montré que le soutirage d'eau pour les besoins de l'irrigation dans un fleuve déjà "moribond" accélérerait le tarissement du fleuve et la perception de plus en plus précoce de l'onde de marée à la hauteur du Lac de Guiers.

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

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

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

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

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

1. Caractéristiques de l'embouchure

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

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

2. Mécanismes de la migration

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

L'embouchure du Sénégal est caractérisée par sa mobilité. Tout en conservant une largeur assez constante d'ordre kilométrique, la passe subit une translation vers le Sud. Ce déplacement implique une mobilisation et un dépôt de sable sur le bord nord et simultanément une érosion sur le bord sud. Au bout d'une période d'environ 14 ans en moyenne (GAC et al., 1982), durant laquelle l'embouchure progresse vers le sud, une nouvelle brèche se produit dans le cordon littoral à 7-8 km au Nord, l'ancienne embouchure se ferme. Il faut remarquer que l'ouverture d'une nouvelle passe creusée dans le cordon n'entraîne pas la disparition de sa partie aval (fig. 51) : au contraire, celle-ci subsiste et peut se rattacher au continent par son extrémité méridionale. Il se forme alors au sud de la passe une lagune dont l'étendue est peu à peu réduite par la migration de la nouvelle embouchure.

3. Facteurs de la translation

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

- La Langue de Barbarie est une formation marine issue de la dérive littorale, parallèle à la côte et orientée vers le Sud. Ce courant est la résultante du déferlement des houles du nord-ouest qui atteignent la côte avec une incidence de 18°, dans la zone de déferlement.
- La vitesse du courant et donc le transport littoral sont fonction de l'énergie de la houle. Cette puissance de la houle augmente en saison sèche et coïncide avec la progression de l'embouchure vers le sud.
- La partie active du transit littoral est localisée à faible profondeur (de 0 à -250 m IGN) dans la zone des brisants où le courant atteint sa valeur maximale (0,8 m/s).
- Parallèlement à la côte, il existe une ou deux barres sableuses immergées. La première, située à environ 100 m du rivage, est permanente ; la seconde est visible sur les photos aériennes de la saison sèche à près de 400 m de la côte, lorsque la dérive littorale est à son maximum (IVANOV, 1969).

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

4. Déplacements de l'embouchure depuis 1850

Les déplacements de l'embouchure (repérés arbitrairement par rapport à l'île de St Louis) ont été partiellement reconstitués à partir d'anciens documents cartographiques (DELISLE, 1726 ; D'AVEZAC, 1840 ; HUBERT, 1921), d'études sur la Langue de Barbarie (CHUDEAU, 1921 ; JOIRE, 1947 ; GUILCHER et NICOLAS, 1954 ; MICHEL, 1973) ou encore sur l'invasion marine de l'estuaire du fleuve (ROCHETTE, 1974). Les données principales sont indiquées dans le tableau 39 et illustrées par la figure 52.

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

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

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

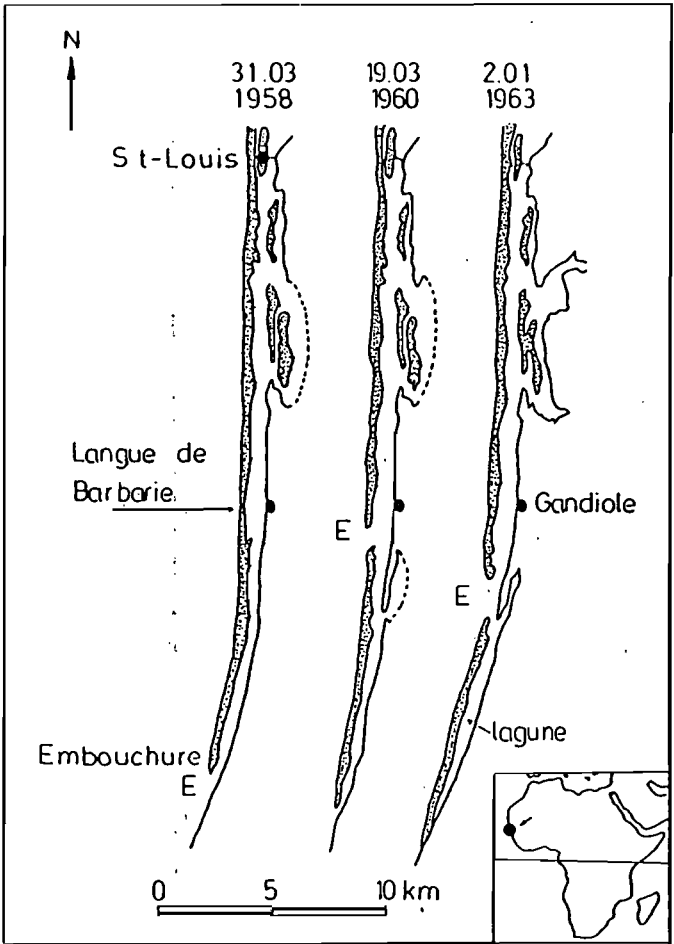


Fig. 51 : Mécanismes de la migration de l'embouchure du Sénégal.

Fig. 52 : Evolution de la position de l'embouchure, de mars 1958 à janvier 1963. (MONTEILLET et al., 1980).

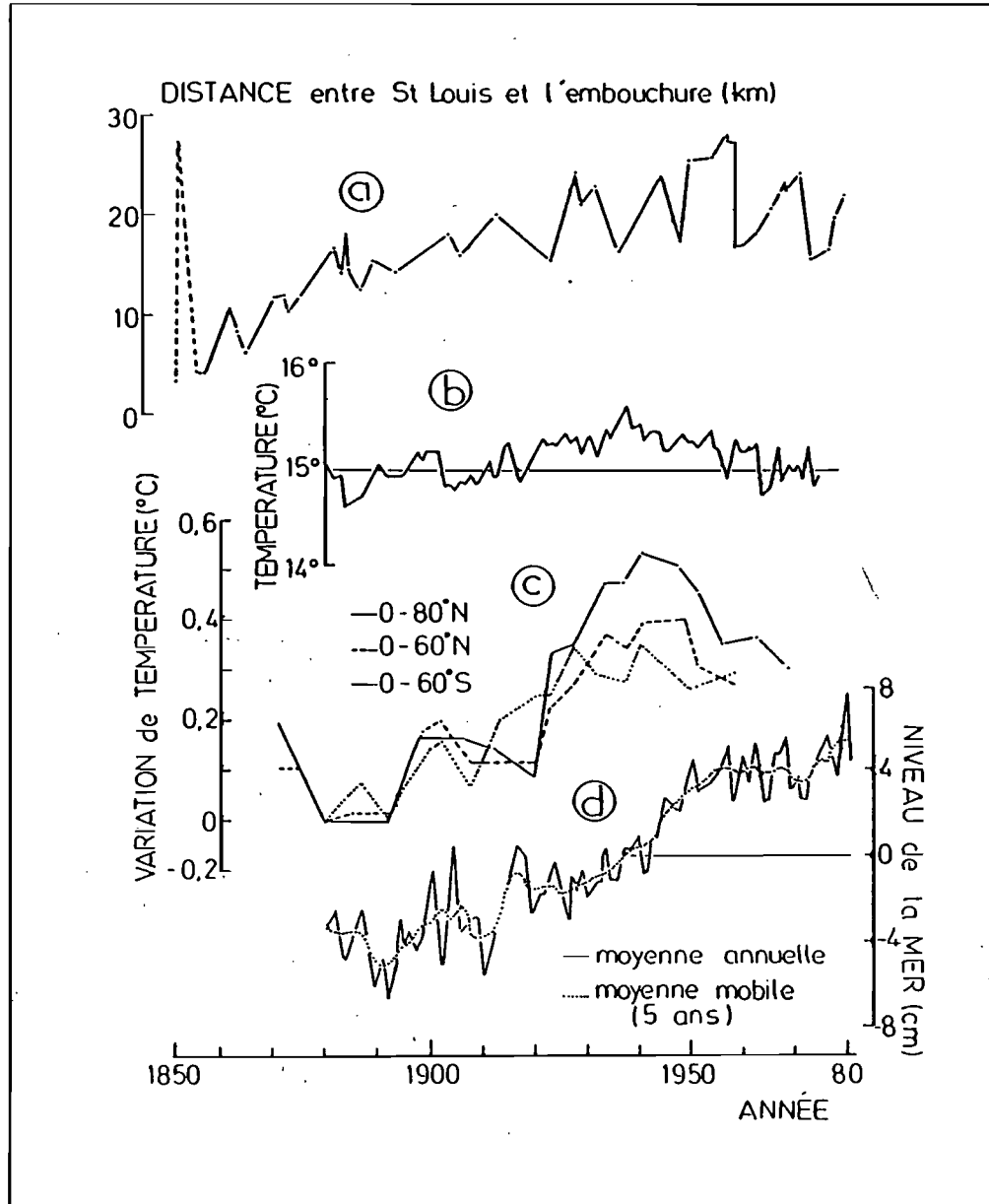


Figure 52 :

Tableau 39 : EXTENSION DE LA LANGUE DE BARBARIE ET POSITION DE L'EMBOUCHURE DU SENEGAL DEPUIS 1658
(exprimées en km par rapport à l'île de St Louis)

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

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

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

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

Depuis un siècle, les variations de la position de l'embouchure suivent celles des températures de l'air dans l'hémisphère nord (fig. 52 a, b). Les deux courbes se décomposent en trois périodes sensiblement identiques :

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

qui confirment le lien étroit entre les températures de l'hémisphère nord, les déplacements de l'embouchure et le régime des alizés. La relation avec les variations de la température moyenne annuelle de l'atmosphère (fig. 52 c) est moins marquée de 1920 à 1950 où l'on observe un brusque réchauffement de la terre sous toutes les latitudes, suivi d'une phase plus atténuée de refroidissement. Enfin, l'évolution du niveau moyen des mers (fig. 52 d) suit dans l'ensemble et plus ou moins fidèlement celle des migrations de l'embouchure qui pourrait, si ceci était confirmé, constituer une sorte de marégraphe mondial.

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

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

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

A - LES PRINCIPES METHODOLOGIQUES DE ROCHETTE (1964)

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

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

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

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

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

2. Evolution de la salure au cours de la décrue

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

- le niveau moyen à l'embouchure qui produit, suivant le sens de son évolution, une progression ou un retrait de la salure n'a pas d'incidence significative sur les variations de salinité.
- Au début de l'intrusion saline, l'influence relative du marnage se traduit par une augmentation de la salinité en période de morte-eau et par une diminution de la salinité en période de vive-eau. Lorsque la pénétration saline devient importante, la stratification disparaît et les effets du marnage ne se font plus ressentir sur la salinité.
- Enfin résultat capital pour la compréhension du phénomène, il précise le rôle fondamental joué par l'importance du débit fluvial. Il existe, souligne ROCHETTE (1964), "une valeur du débit fluvial en dessous de laquelle l'évolution de la salinité ne sera pratiquement plus conditionnée par le débit mais dépendra alors essentiellement du temps." "Cette valeur", poursuit l'auteur, "est délicate à déterminer. Nous l'avons fixée arbitrairement à 50 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. 53 et 54), dans lesquels les résultats sont mis sous une forme directement exploitable qui permette de déterminer la salinité en fonction du débit ($D > 50$ m³/s), et en fonction du temps pour $D < 50$ m³/s."

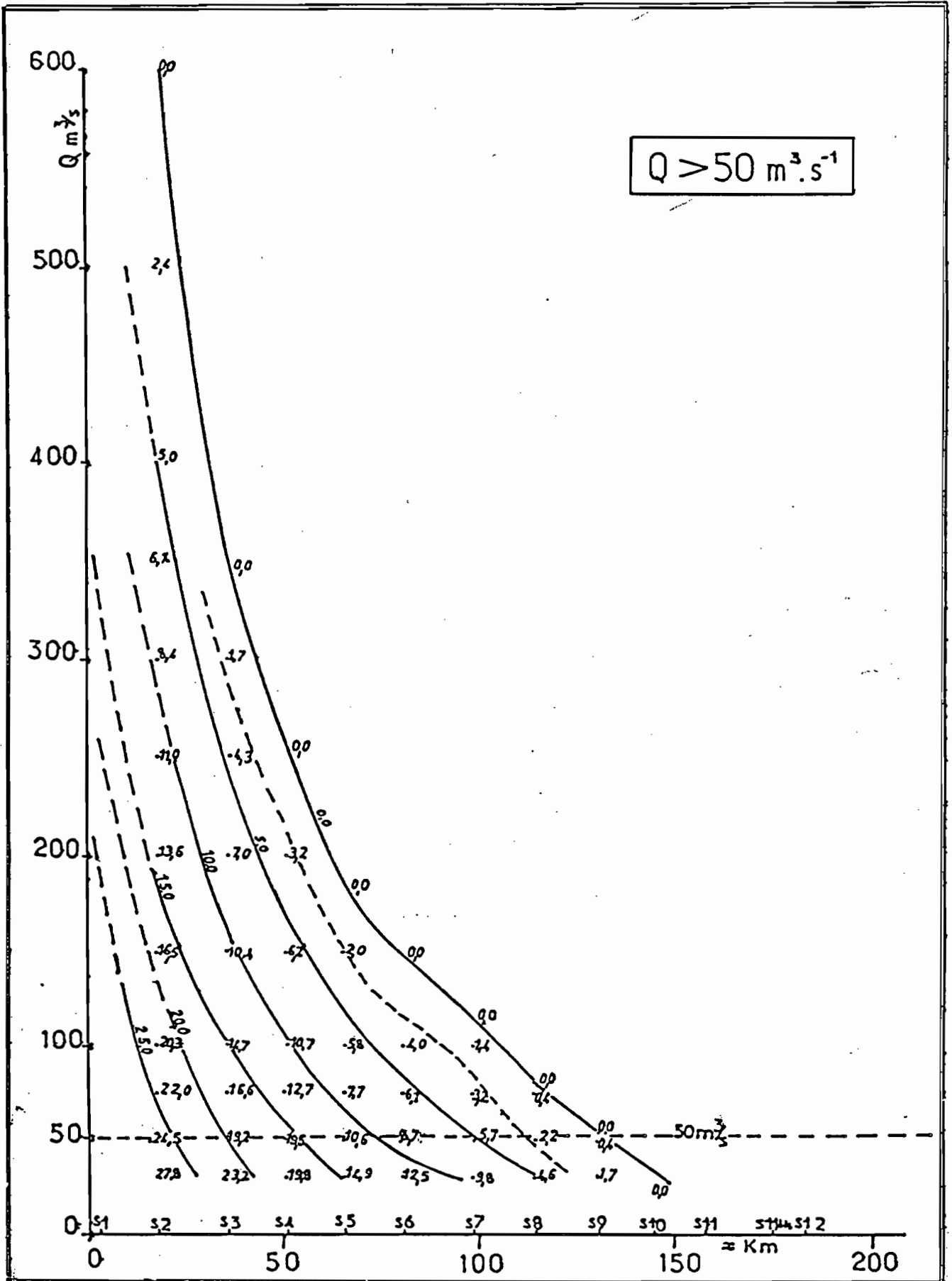


Figure 53 : Relation débit/salinité moyenne de base ($Q > 50 \text{ m}^3/\text{s}$). (ROCHETTE, 1964).

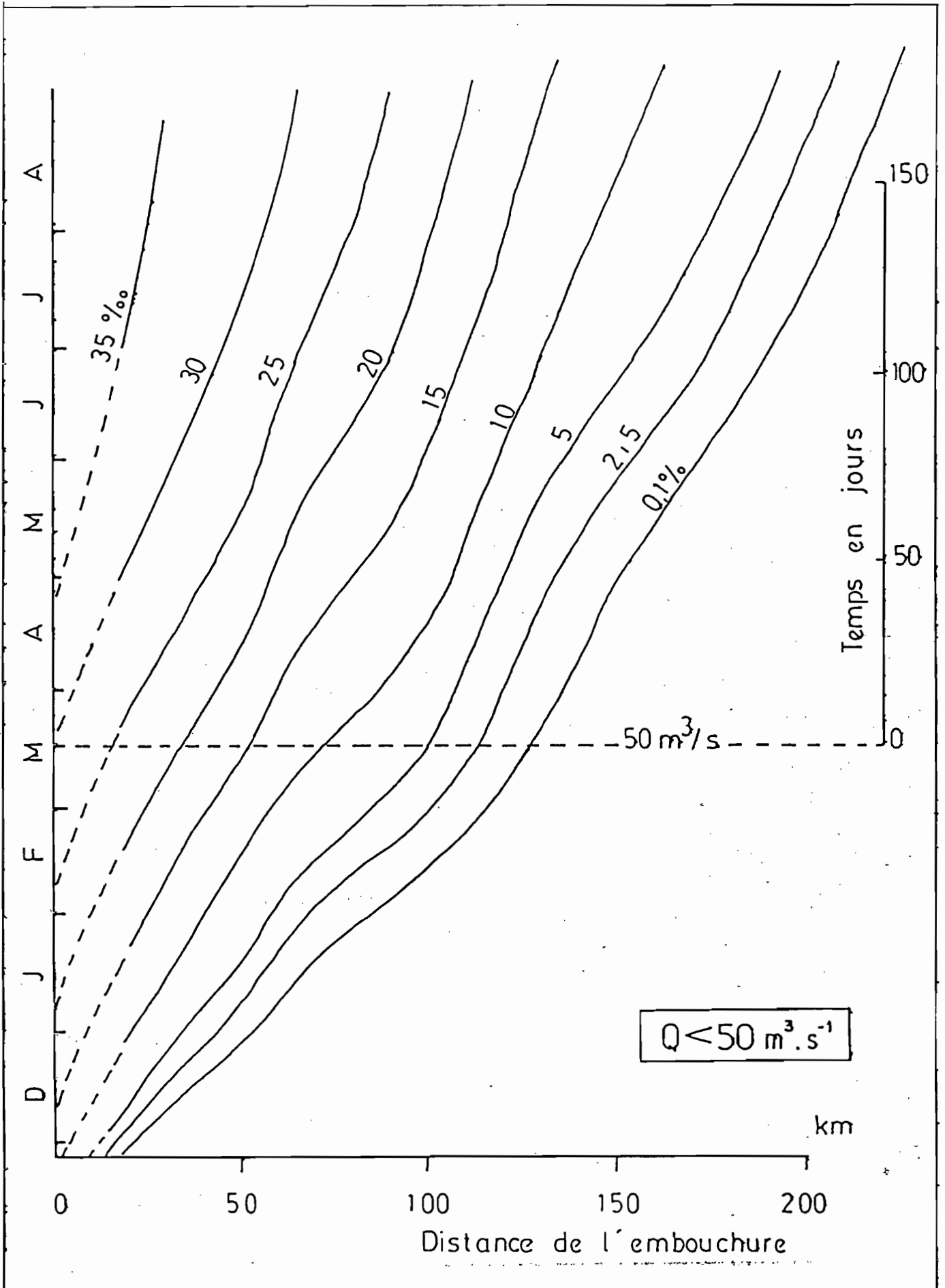


Figure 54 : Relation temps/salinité moyenne de base ($Q < 50 \text{ m}^3/\text{s}$) (ROCHETTE, 1964).

- 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.

3. Le retrait des eaux saumâtres

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

"A la condition généralement réalisée, d'un débit constamment supérieur au débit juste nécessaire pour provoquer la régression de la salure, l'évolution de la salinité pendant le retrait dépendra essentiellement du volume écoulé depuis l'arrivée de l'onde de crue, et la forme d'écoulement du débit n'interviendra pratiquement pas." Par des approches successives, il estime à 900 millions de m³ le volume nécessaire (de la nouvelle onde de crue) pour que la salure soit entièrement retirée à l'embouchure.

B. LES DIFFICULTES D'APPLICATION

Comme nous venons de le préciser, trois seuils dans les écoulements du fleuve doivent être connus avant de pouvoir suivre l'évolution saisonnière de la salinité. Ces trois valeurs (50 m³/s, 600 m³/s et 900.10⁶ m³) sont indéterminables directement à l'embouchure : elles doivent être évaluées à partir des données recueillies plus à l'amont.

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 de 600 m³/s. On ne relève sur l'ensemble de cette période que 6 lacunes mineures (1903-1904 ; 1912-1913 ; 1915-1916 ; 1925-1926 ; 1932-1933 ; 1947-1948). Dans ces six cas, l'estimation des débits par les hydrologues de l'ORSTOM s'arrête en général à une valeur proche de 600 m³/s ; deux années seulement font exception à la règle : 1903-1904 (800 m³/s le 11/11/1903) et 1915-1916 (700 m³/s le 12/11/1915). La formule de propagation entre bief amont et bief aval a alors été utilisée pour situer le passage à 600 m³/s.

Pour les années récentes (de 1964 à 1983), les difficultés les plus importantes concernent les années 1964-1965 (2 680 m³/s le 2 novembre 1964), 1967-1968 (2 100 m³/s le 30 novembre 1967), 1969-1970 (1 560 m³/s le 30 novembre 1969). Pour ces trois années, nous n'avions pas d'autres possibilités que d'utiliser à nouveau la formule de propagation des eaux dans la vallée proposée par ROCHETTE (1974). Les résultats sont évidemment très approximatifs et doivent être considérés sous toute réserve.

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

2. Le seuil de 50 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 (postes de Bakel, Matam, Kaédi) ou pas (Podor, Dagana) relevées.

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

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

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

$$Q_{D_1} = - 0,2 Q_{B_1} + 0,28 Q_{B_0} + 0,92 Q_{D_0}$$

Rappelons que Q_{B_0} et Q_{D_0} représentent les débits respectifs à Bakel et Dagana le jour j , Q_{D_1} et Q_{B_1} 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.

Nous avons alors deux possibilités :

- connaissant tous les débits journaliers durant les basses-eaux à Bakel et la date où à Dagana le seuil de 600 m³/s est franchi, évaluer jour après jour les débits à Dagana jusqu'au seuil de 50 m³/s ;
- admettre que la substitution du paramètre débit par le paramètre temps est effective le jour où à Bakel le débit est de 45 m³/s.

La seconde possibilité consiste en réalité à entreprendre les calculs en sens inverse. On admet que $Q_{D1} = 50$ m³/s, $Q_{B1} = 45$ m³/s et on remonte chronologiquement dans le temps à l'aide des débits de Bakel ; les débits à Dagana sont obtenus par : $Q_{D0} = (50 + 0,20.45 - 0,28 Q_{B0})/0,92$. Les calculs menés sur quelques phases de tarissement montrent que l'on aboutit à chaque fois à une "impasse", le terme soustractif $(0,28 Q_{B0})$ devenant au bout de quelques jours plus important que le gain dQ à $Q_{D1}/0,92$.

Pour les 80 années, l'application de la formule de propagation donne des résultats sensiblement identiques ; le seuil de 50 m³/s à Dagana se présente en général avec un retard de 8 à 10 jours par rapport à l'enregistrement du débit de 45 m³/s à Bakel. En moyenne, la valeur de 50 m³/s est observée à l'aval, quant à l'amont, les débits sont de l'ordre de 37 m³/s.

3. Le seuil des 900.10^6 m³ et la relation temporelle entre les volumes écoulés à Bakel et à Dagana au début de la crue

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

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

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

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

A - CARACTERISTIQUES 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 40.

- dans la colonne 1 figure la date à partir de laquelle l'eau est douce dans toute la vallée ;
- dans la colonne 2, la date indiquée correspond au jour où l'intrusion saline débute à l'embouchure, c'est-à-dire le moment où le débit devient inférieur à 600 m³/s ;
- dans la colonne 3, apparaît la date où le paramètre "temps" se substitue au paramètre "débit" ($D \leq 50$ m³/s) ;

Tableau 40 : OCCURRENCE DES DIFFERENTES PHASES DE LA PENETRATION SALINE

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	15.08.69	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)			

- le maximum de la salinité et donc l'abscisse maximale de l'invasion marine sont atteints le jour figurant dans la colonne 4 ;
- enfin, la colonne 5 donne la date du retrait définitif des eaux salées (la nouvelle onde de crue a fait transiter à l'embouchure 900.10^6 m³). Le lendemain, l'eau est de nouveau douce dans toute la vallée du fleuve.

Le tableau 41 récapitule en jours la durée des différentes phases ainsi que la répartition dans l'année entre eau douce et eau saumâtre à l'embouchure.

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

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

2. Le début de l'intrusion saline ($D < 600$ m³/s)

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

3. Interdépendance avec le paramètre débit (50 m³/s $< D < 600$ m³/s)

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

4. Interdépendance avec le paramètre temps ($D < 50$ m³/s)

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

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

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

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

La figure 55 et le tableau 41 illustrent les variations annuelles de la durée des différentes phases, la durée de l'intrusion à la suite de chaque cycle hydrologique et l'abscisse maximale atteinte chaque année par la salure. On constate d'abord que la durée de l'intrusion saline varie de façon considérable d'une année sur l'autre : 215 jours en 1928-1929 et 313 jours en 1979-1980. On remarque ensuite que les remontées minimales ne succèdent pas systématiquement aux crues les plus fortes ; de même, les plus longues intrusions ne suivent pas nécessairement les crues les plus faibles. Les deux exemples précédents en sont la plus belle illustration : la crue de 1928-1929 (avec un module moyen annuel de 818 m³/s) n'occupe en abondance que le 17^{ème} rang ; de même, la crue 1979-1980 (avec un module moyen annuel de 269 m³/s) se situe au 4^{ème} rang des plus faibles écoulements enregistrés depuis 1903. On aboutit aux mêmes conclusions que COGELS et GAC (1983) : "En général, une crue faible engendre une intrusion rapide du biseau salé, une crue forte, un temps de séjour moins long des eaux saumâtres dans la vallée du fleuve. Deux crues d'importance très inégale peuvent cependant introduire des remontées salines tout à fait identiques, selon le caractère tardif ou précoce des ondes de crue suivantes."

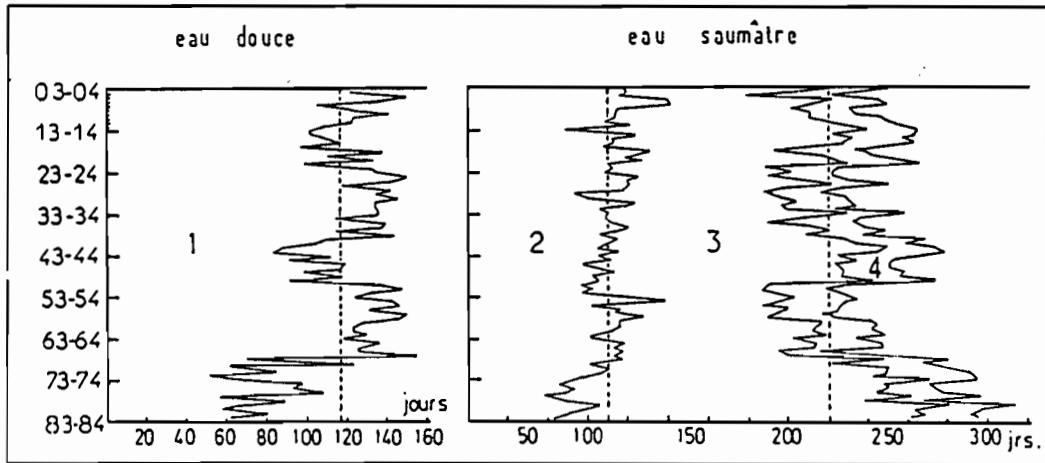


Figure 55 : Variations interannuelles des différentes phases de l'intrusion saline.

VARIATIONS ANNUELLES DE LA DUREE DES DIFFERENTES PHASES ET DE L'INTRUSION (jours) -

Tableau 41

ABSCISSE MAXIMALE ATTEINTE PAR LA SALURE (km)

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						
30-31	134	123	81	26	230	172	58-59	145	127	62	32	221	162	Rheune en novembre 83						
														et reconstruction en novembre 84						

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

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

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

La figure 56 permet de visualiser la relation entre le temps de séjour des eaux saumâtres dans la vallée et le débit moyen annuel enregistré à Dagana au cours du cycle hydrologique précédent.

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

2. Relation entre le module et l'abscisse maximale

La dispersion des points représentatifs est comparable au cas précédent (coeff. de corrélation : -0,74). On retrouve les abscisses maximales à la suite des faibles crues et les invasions restreintes lors des crues importantes (fig. 57).

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

C - EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DE LA SALINITE DEPUIS 1903

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

a) Début de l'intrusion saline

Après le passage de la crue 1980-1981, dont le maximum s'est présenté le 20 septembre 1980 (débit : 1 565 m³/s), le fleuve amorce sa décrue puis entre dans sa phase de tarissement. Le débit à l'embouchure (en réalité prise en compte des écoulements observés à Dagana) décroît et le seuil de 600 m³/s est franchi entre le 16 octobre 1980 (660 m³/s) et le 17 octobre 1980 (585 m³/s). On admet que le phénomène de la remontée débute le 17 octobre.

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

A partir de l'abaque établi par ROCHETTE (fig. 53), on évalue la position respective des différentes isohalines (0,1 ‰ ; 2,5 ‰ ; 5 ‰ ; 10 ‰ ; 15 ‰ ; 20 ‰ ; 25 ‰ ; 30 ‰ et 35 ‰) au fur et à mesure de la décroissance des débits entre 585 m³/s et 50 m³/s (les débits journaliers successifs sont, rappelons-le, calculés à l'aide de la formule de propagation entre Bakel et Dagana).

Le déplacement des isohalines a été évalué jour après jour ; dans un souci de simplification, le tableau 42 résume les résultats obtenus tous les 5-6 jours.

Le seuil de 50 m³/s est atteint le 19 janvier 1981 (le décalage avec le débit de 45 m³/s observé à Bakel le 7 janvier est de 12 jours). Au 19 janvier 1981, les taux de salinité à l'embouchure sont compris entre 25 ‰ et 30 ‰, et le "coin salé" est décelable à 133 km en amont.

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

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

Le cycle hydrologique 1981-1982 débute à Bakel le 8 juin 1981, mais ces premiers écoulements sont éphémères et réduits. Ils n'ont vraisemblablement pas d'incidence à l'aval. La véritable onde de crue se présente à Bakel le 27 juin. D'après les analyses chimiques (D₁₄₈), la salinité maximale aurait été atteinte à Dagana entre le 1er et le 8 juillet 1981, et la charge en matières en suspension croît brutalement à partir du 8 juillet. La crue atteint Saldé entre le 3 et le 10 juillet, Podor entre le 5 et le 12 juillet. Nous avons donc admis comme date probable de la salinité maximale le 5 juillet 1981.

Dans cette hypothèse, la phase de tarissement (débit < 50 m³/s) se prolonge du 20 janvier 1981 au 5 juillet 1981, soit pendant 167 jours. L'application de la seconde abaque de ROCHETTE (fig. 54) permet alors de suivre la nouvelle progression des différentes isohalines.

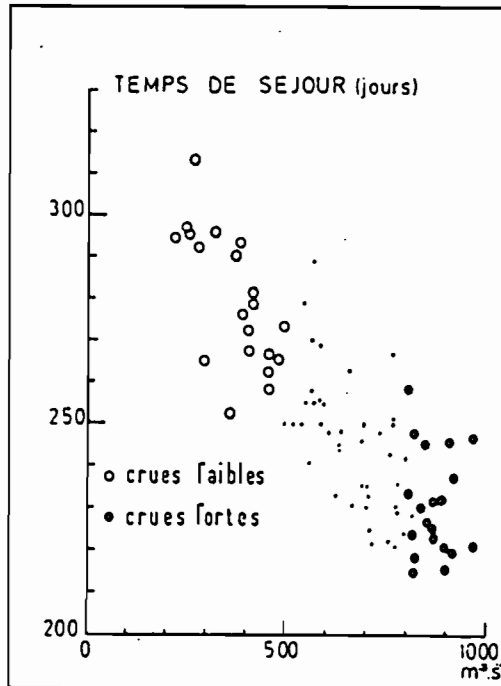


Figure 56 : Relation entre le débit moyen annuel et le temps de séjour des eaux saumâtres.

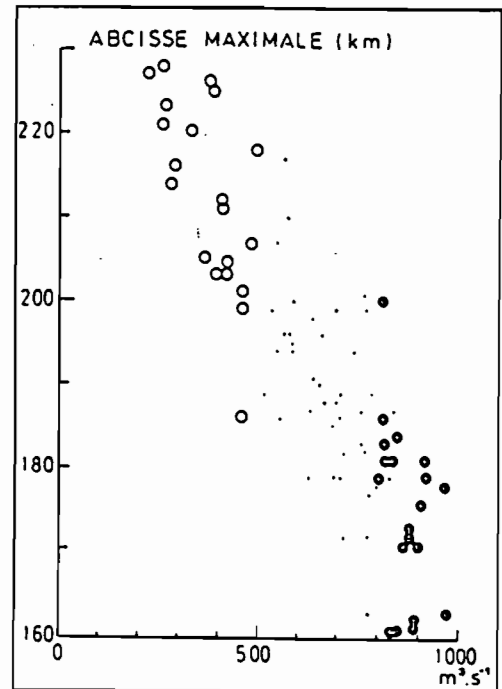


Figure 57 : Relation entre le module et l'abscisse maximale atteinte par le front salé.

Tableau 42 : POSITIONS SUCCESSIVES DES DIFFERENTES ISOHALINES (exprimées en km par rapport à l'embouchure) DANS L'INTERVALLE DE TEMPS OU LE DEBIT DECROIT DE 600 A 50 m³/s.

Date	Débit (m3/s)	Position (en km) des différentes isohalines								
		0 %	2,5 %	5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %
(1980)										
16/10	660	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17/10	585	19	11	4	0	0	0	0	0	0
22/10	485	25	18	11.5	0	0	0	0	0	0
27/10 ⁽¹⁾	540	21	15	7	0	0	0	0	0	0
02/11	367	34	26	21	9	2	0	0	0	0
07/11	331	39	30	24	13	3	0	0	0	0
14/11	276	47	38	31	19	7.5	1	0	0	0
21/11	231	56	47	38	25	12	6	1	0	0
26/11	200	62	54	44	29	16	10	2	0	0
03/12	170	71	61	51	34	20	13	5.5	0	0
08/12	150	80	66	56	38	24	15.5	7	0	0
12/12	135	88	71	60	42	27	18	8.5	0	0
19/12	111	101	84	68	49	33	21.5	11.0	0	0
22/12	102	105	89	72	52	35	23.5	12.0	0	0
26/12	90.5	110	96	77	55	39	26	14	0	0
31/12	79.3	115	101	83	59	43	28	16	0	0
(1981)										
05/01	69.8	121	104	88	63	46	30	17	0	0
11/01	60.0	127	109	94	69	50	33	19	0	0
19/01	50.0	133	113	100	75	54	36	20	0	0

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

Le tableau 43 donne leurs déplacements successifs tous les dix jours. L'abscisse maximale au cours de cette intrusion saline est de 220 km (soit approximativement le confluent du Sénégal et du Ngalanka). La ville de Richard-Toll a été "touchée" par des taux de salinité de 10 ‰, et les eaux marines à 35 ‰ (eau de mer pure) sont remontées de 30 km vers l'amont du fleuve.

Tableau 43 : POSITIONS SUCCESSIVES DES DIFFERENTES ISOHALINES (exprimées en km par rapport à l'embouchure) PENDANT LA PERIODE D'ETIAGE CONSECUTIVE A LA CRUE 80-81

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

d) Le retrait de la salure

La phase de retrait commence le 6 juillet 1981 ; sa durée va dépendre du flot de la nouvelle onde de crue. Nos observations sur les flux détritiques dissous et particuliers, en particulier la mesure des teneurs en chlorures et sodium et de la charge solide, permettent d'estimer que le retrait total du sel dans la vallée a eu lieu entre le 6 et le 13 août 1981. Le calcul des volumes totaux écoulés depuis le début des premiers écoulements indique que 894.10^6 de m³ ont franchi l'embouchure le 8 août 1981. On estime que le 9 août 1981, l'eau est de nouveau douce dans toute la vallée du Sénégal. Le recul progressif des différentes isohalines est précisé dans le tableau 44.

Tableau 44 : POSITIONS SUCCESSIVES DES DIFFERENTES ISOHALINES AU COURS DE LA PHASE DE RETRAIT (km)

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

En résumé, l'intrusion saline en 1980-1981, illustrée par la figure 58, a présenté les caractéristiques suivantes :

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

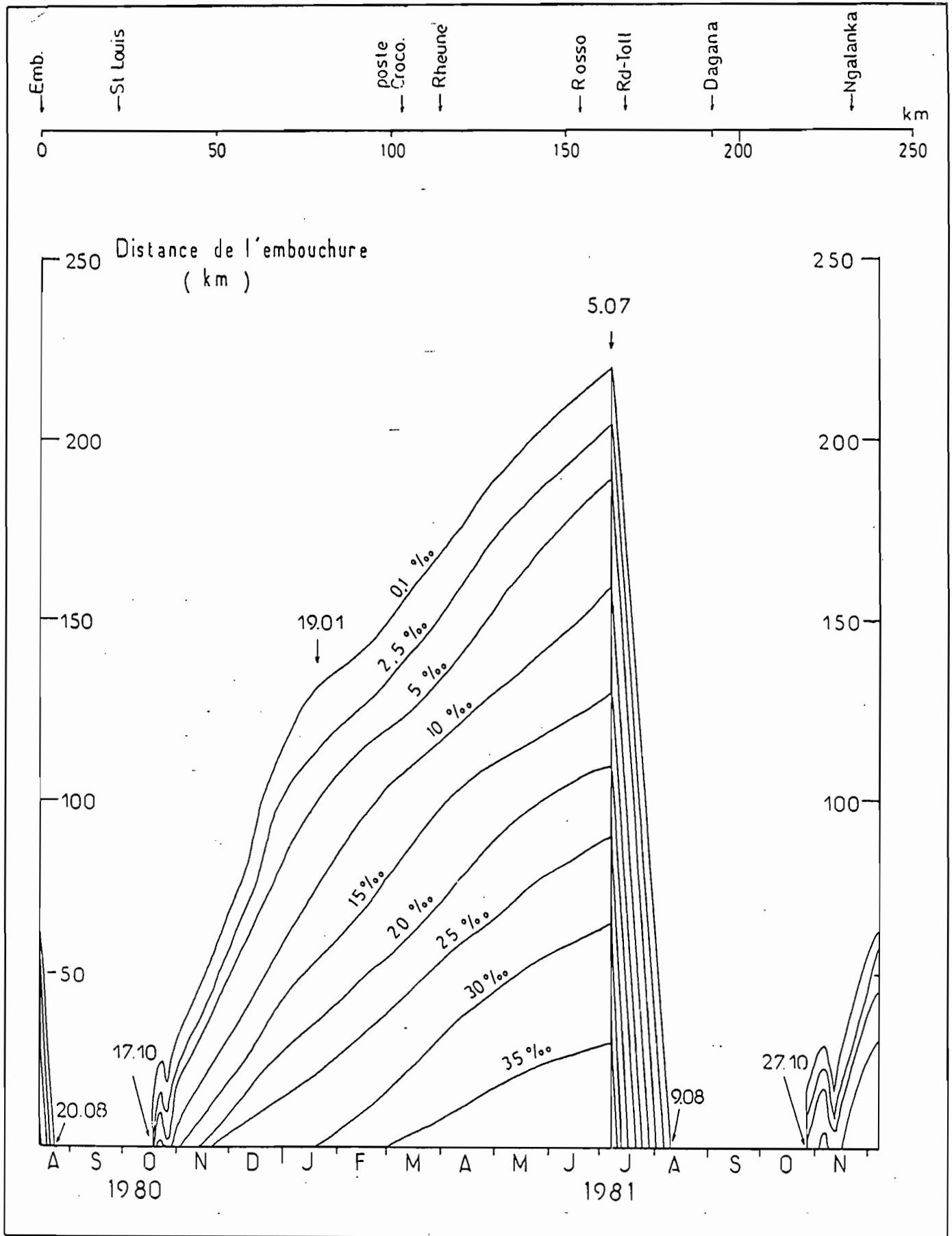
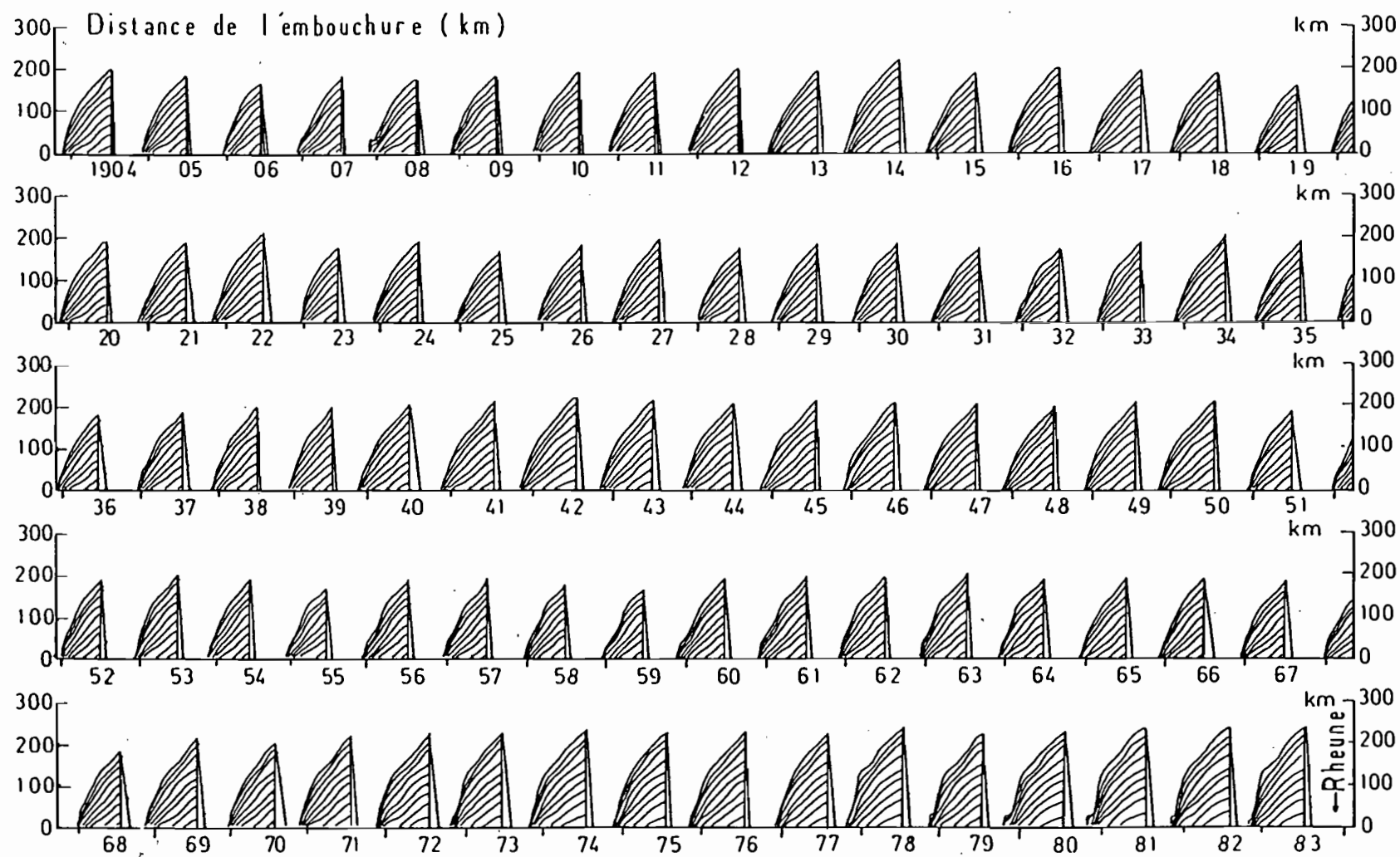


Figure 58 : L'invasion marine en 1980-1981.



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

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

Les déplacements interannuels des différentes isohalines sont représentés sur la figure 59. Les variations observées sont très importantes, et la comparaison entre période aride et période humide est évidemment très significative. Nous avons choisi comme exemples de séquence humide la période 1953-1959 et comme séquence aride la série 1974-1980 déjà présentés par GAC et al. (1983). Les déplacements des isohalines sont illustrés par la figure 60 et leurs abscisses maximales données dans le tableau 45.

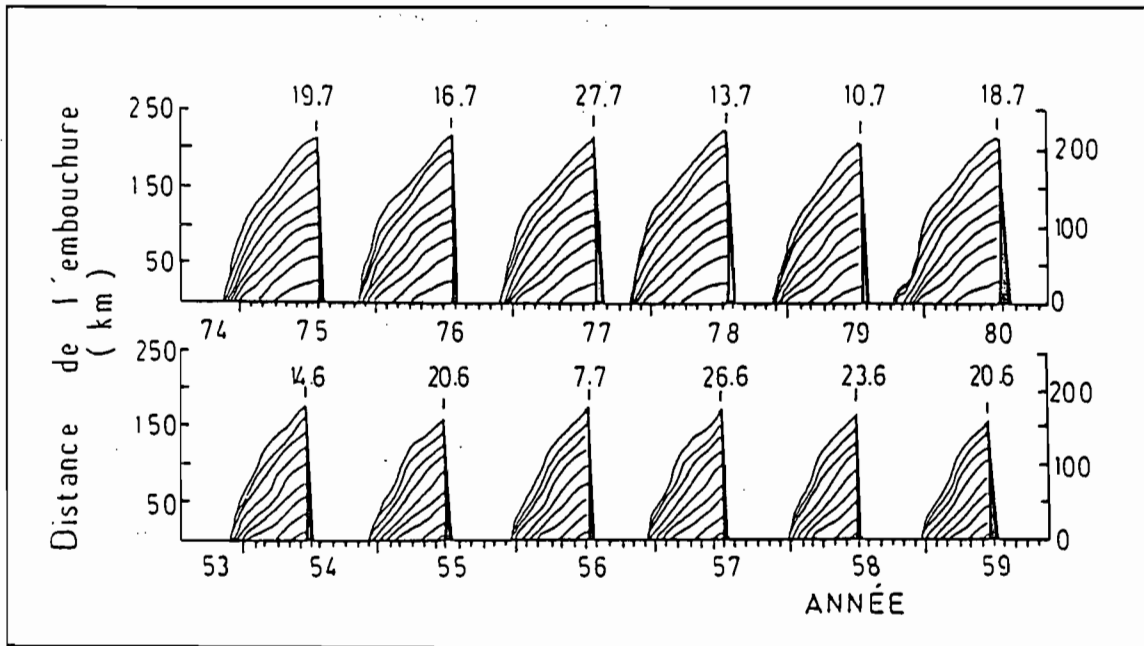


Figure 60 : Remontées salines en période sèche (1974-1980) et en période humide (1953-1959).

Tableau 45 : PENETRATION MAXIMALE MOYENNE (en km) DES DIFFERENTES
ISOHALINES LORS DES SEQUENCES SECHES ET HUMIDES.
POSITIONS AMONT EXTREMES OBSERVEES 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

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

3. Les incidences paléo-climatiques

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

Nous avons retenu deux sites pour leur importance paléogéographique (lacs de Rkiz et de Guiers) et deux sections pour leur impact actuel et futur sur l'environnement (Rheune et Dama). Pour permettre une ouverture vers les études paléogéographiques et paléo-climatiques, nous y avons associé les sections du fleuve séparées les unes des autres par une distance de 25 km. Les conditions de salinité, propres à chaque site (durée et taux), sont résumées dans le tableau 46.

Tableau 46 : TAUX DE SALINITE ET TEMPS DE PRESENCE (en jours) DES EAUX SAUMATRES EN DIFFERENTS SITES DE LA VALLEE DU SENEGAL

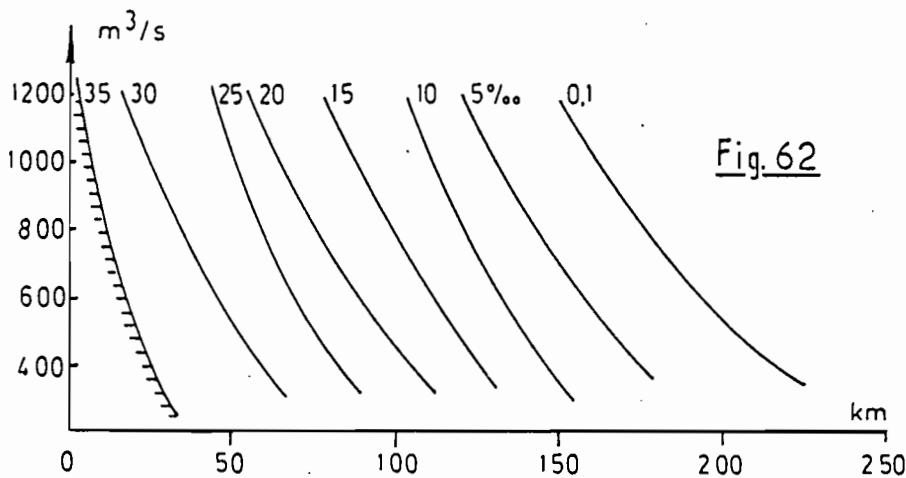
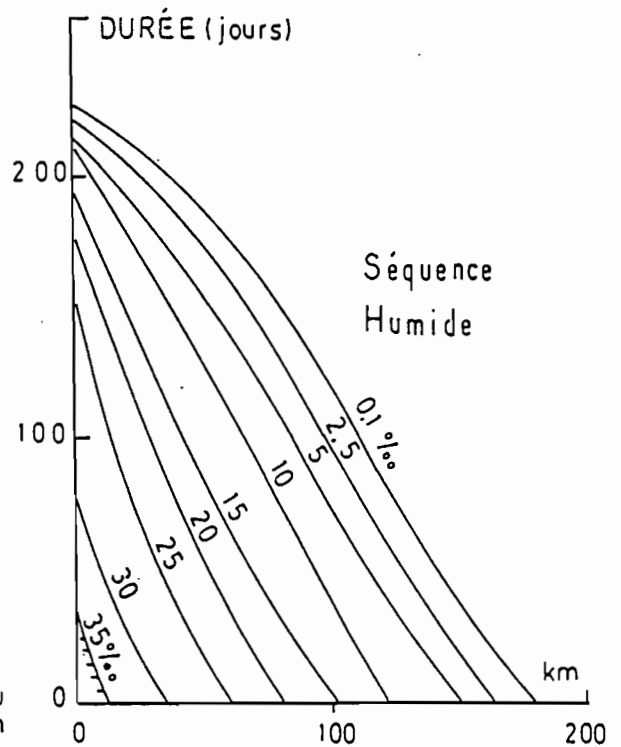
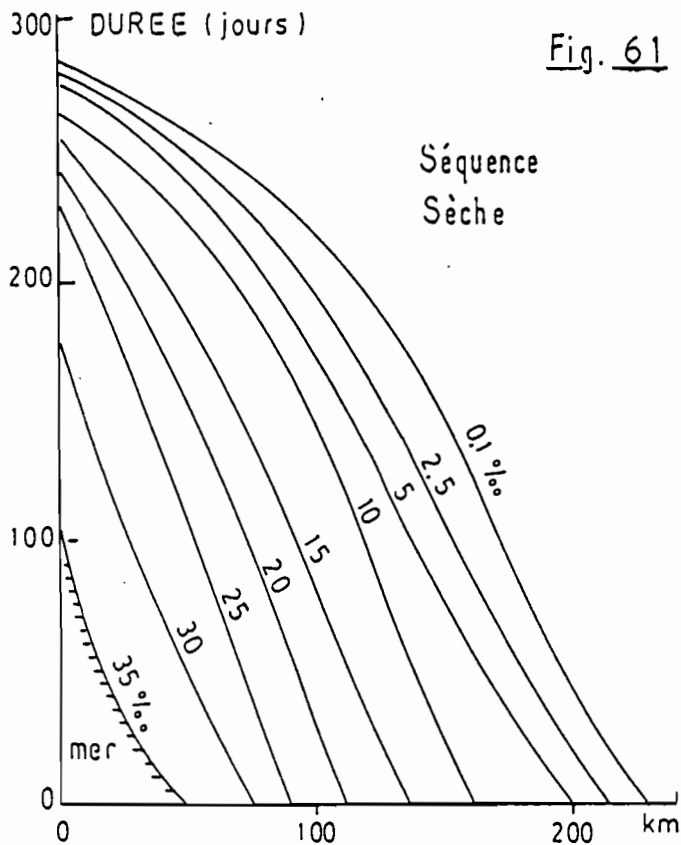
Sites (km)		Séquence sèche Temps de présence (en jours)										Séquence humide Temps de présence (en jours)									
		0,1 %	2,5 %	5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %	0,1 %	2,5 %	5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %		
225		2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
210	(Rkiz)	26	tr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0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

Les graphiques établis pour des séquences sèches et humides (fig. 61) peuvent être utilisés comme des abaques pour l'estimation des paléosalinités en fonction de la distance à la mer d'une faune fossile. On utilise ensuite les abaques débit/salinité et pluviométrie/débit (fig. 62 et 63) fournis par GAC *et al.* (1983) pour préciser la durée maximale et minimale des paléodébits et enfin l'allure des paléoprécipitations.

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

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

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

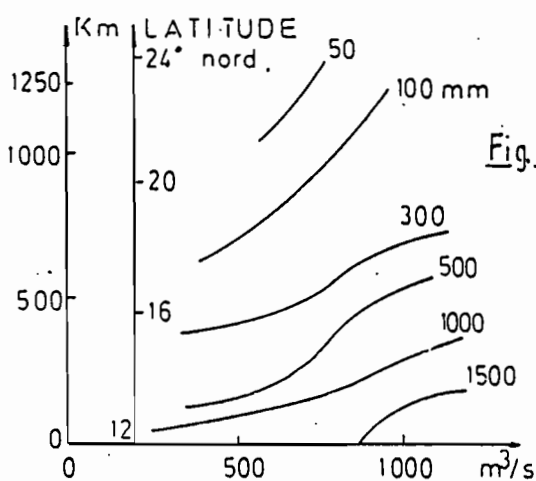


Légende des Figures :

Fig. 61 : Schéma approximatif montrant la relation entre le temps de séjour des différentes isohalines tout le long de la vallée (séquences sèche et humide).

Fig. 62 : Remontée de la langue salée (km) en fonction du débit moyen annuel (m^3/s) du fleuve Sénégal. La position respective des isohalines a été calculée pour une durée de 15 jours (GAC et al., 1983).

Fig. 63 : Schéma approximatif montrant la relation entre le déplacement en latitude des isohyètes annuels (mm) et le module du fleuve Sénégal (m^3/s), in GAC et al. (1983).



Pour reprendre l'exemple de l'intrusion saline de 1980-1981 illustrée par la figure 58, les surfaces respectives (exprimées sous la forme abstraite de km/jour) entre les différentes isohalines s'établissent de la manière suivante :

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

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

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

L'équivalent "eau de mer" pour l'intrusion saline 1980-1981 s'élève à 85,73. Le tableau 47 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 ")	1919 - 1939 (21 ")
1939 - 1950 (11 ")	1950 - 1968 (18 ")
1968 - 1983 (15 ")	

Tableau 47 : EQUIVALENT "EAU DE MER" POUR LES INTRUSIONS SALINES DEPUIS 1903
(Eq. 35 ‰) : (+) ANNEES SUPERIEURES A 56,46 Eq. 35 ‰.

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

La figure 64 traduit l'ampleur de la sécheresse actuelle qui, par sa durée et son intensité, est tout à fait différente de celles des années 15 et 45 qui l'ont précédée au cours du siècle. Cette réduction considérable des écoulements et l'effet cumulatif sur plus de 16 ans se traduisent par une intrusion saline exceptionnelle (COGELS et GAC, 1983).

Enfin, nous avons schématisé sur la figure 65 la relation entre flux d'eau douce et flux d'eau de mer en utilisant pour la représentation graphique la méthode des moyennes mobiles sur 7 ans pour les débits à Dagana et l'invasion marine (exprimée en Eq. à 35 ‰). Les deux courbes sont symétriques de part et d'autre des valeurs moyennes (646 m³/s pour les débits et 56,46 Eq. à 35 ‰ pour l'intrusion saline). En conclusion, il nous paraît difficile d'achever notre étude sur une note optimiste : rien en effet ne permet d'affirmer à court terme un retour à l'humidité.

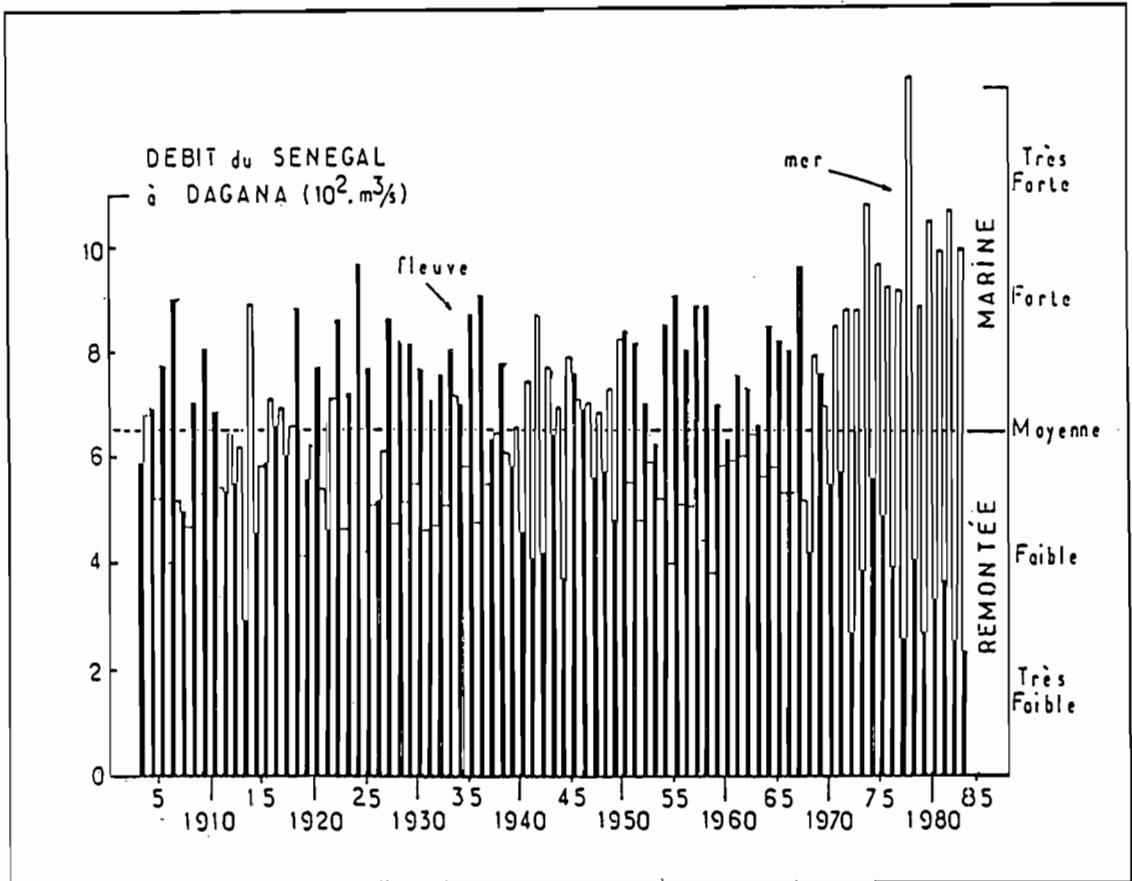


Figure 64 : Comparaison entre les modules interannuels et l'intrusion saline.

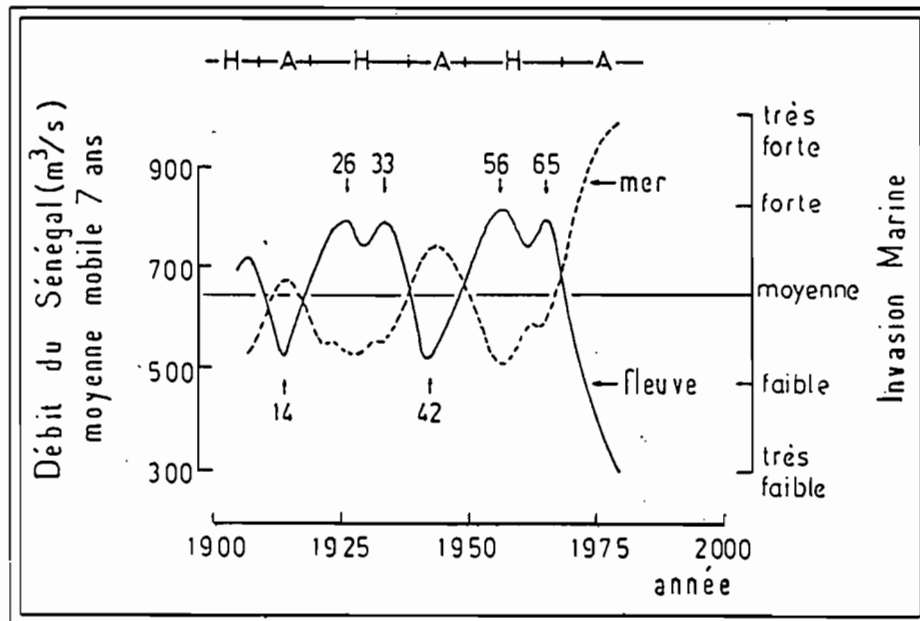


Figure 65 : Antagonisme flux d'eau douce - flux d'eau de mer.

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

L'étude de la remontée saline à la suite des deux cycles hydrologiques 1981-1982 et 1982-1983 a été réalisée pour notre part au niveau du pont FAIDHERBE de St Louis. Elle constituait l'un des maillons d'une entreprise plus vaste menée par l'ORSTOM sur l'ensemble de la basse vallée (depuis l'embouchure jusqu'à la hauteur de la ville de Podor) et qui comprenait :

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

A - LES QUATRE STATIONS-CLEFS DE ST LOUIS, OU OJOU DJ, DE DAGANA ET DE PODOR

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

Toutes les mesures de salinité effectuées à St Louis sont reportées dans le tableau 48 et l'évolution de la salinité en surface est illustrée par la figure 66. Cette évolution a été schématisée en traçant sur les deux graphiques la courbe moyenne qui représente la salinité de base (l'évolution observée en 1962/1963 par ROCHETTE est donnée à titre indicatif).

Les deux remontées salines étudiées présentent les caractéristiques suivantes :

1981-1982 :

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

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

1982-1983 :

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

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

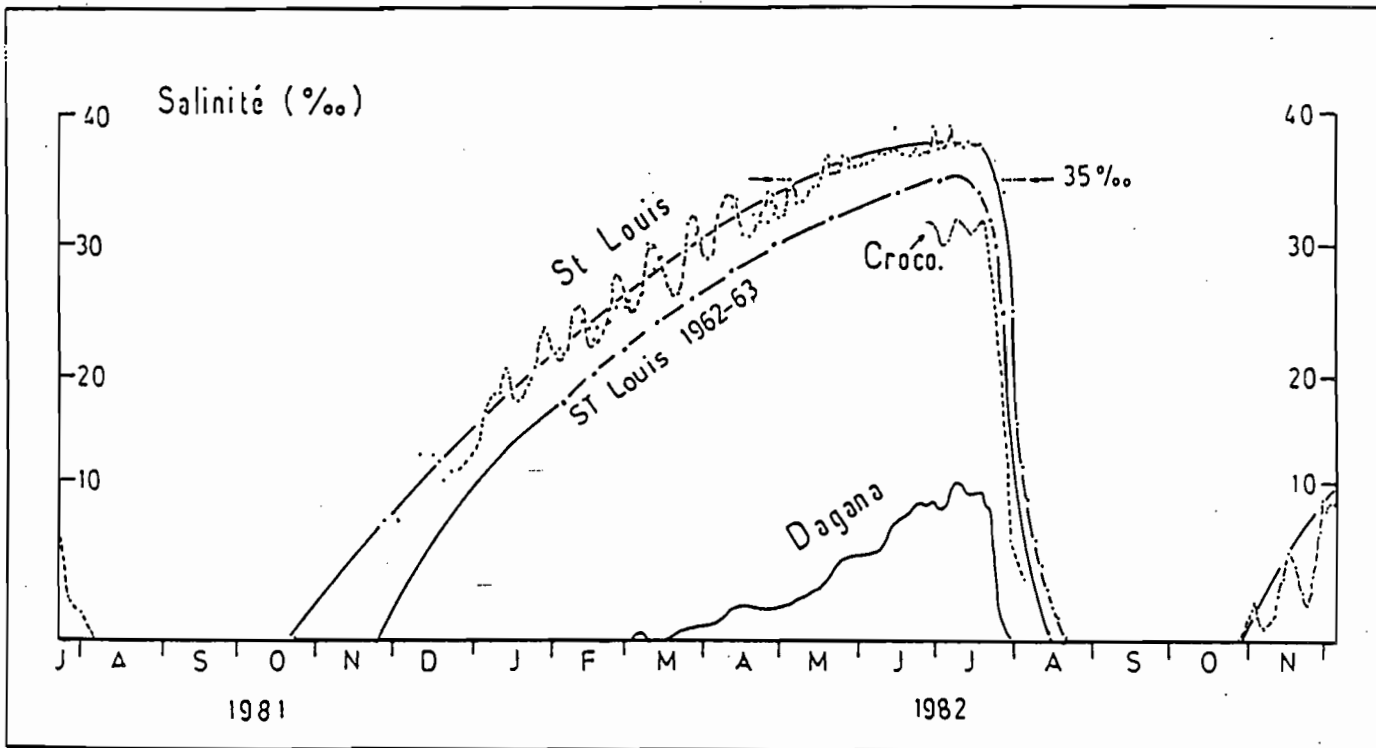


Figure 66a : Variations saisonnières de la salinité à St-Louis, à Dagana et au Djoudj (1981-1982).

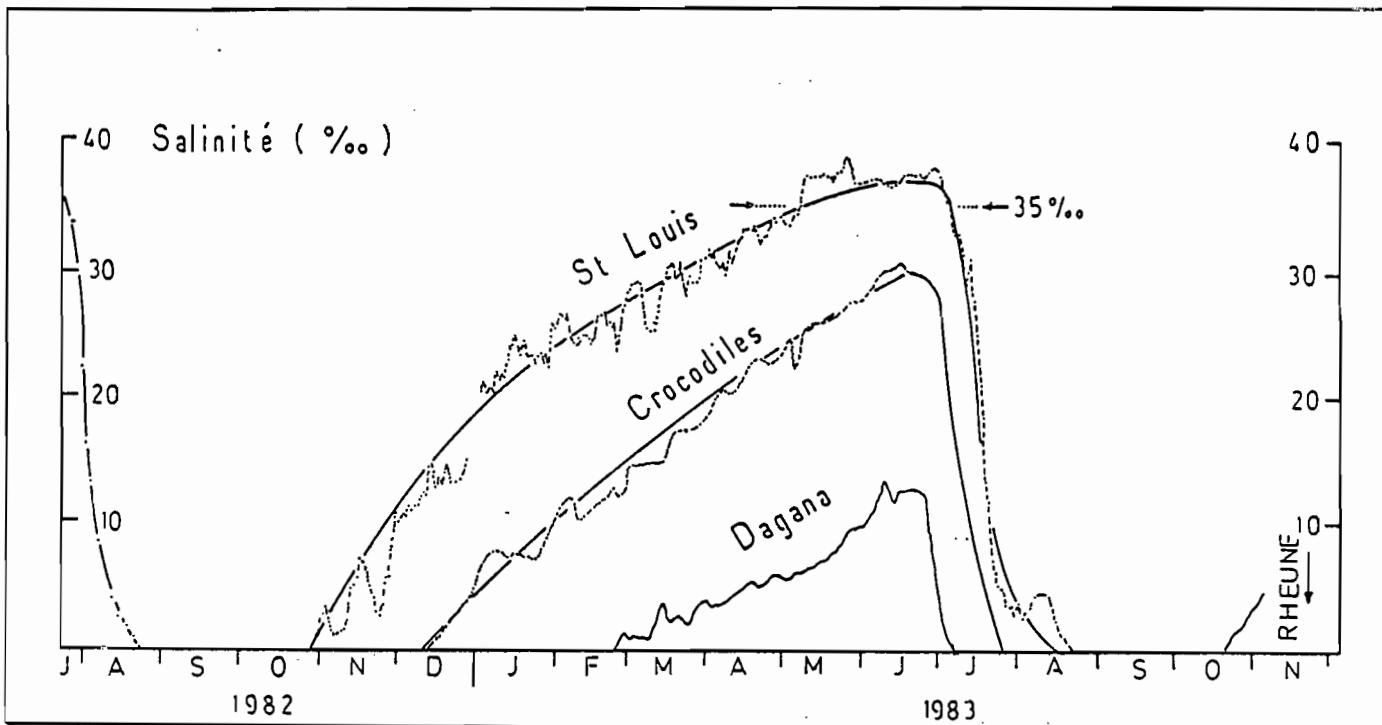


Figure 66b : Variations saisonnières de la salinité à St-Louis, à Dagana et au Djoudj (1982-1983).

Tableau 48 : SALINITE (‰) AU PONT FAIDHERBE DE ST LOUIS DE 1979 A 1983

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

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

Les mesures de la salinité à la limite amont du parc du Djoudj ont été réalisées au poste Crocodiles grâce à l'obligeance de la Direction des Parcs Nationaux du Sénégal⁽¹⁾. Les observations commencées en 1982 se poursuivent aujourd'hui, la station se trouvant à quelques km en aval du barrage provisoire de Rheune (tableau 49).

Tableau 49 : SALINITE (‰) A LA LIMITE AMONT DU PARC DU DJOUDJ (poste Crocodiles)

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

1982-1983 : (fig. 66)

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

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

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

3. Variations saisonnières de la salinité à la hauteur du Lac de Guiers

La Compagnie Sucrière Sénégalaise (C.S.S.), dont les périmètres d'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 la ville de Richard-Toll. Les données sont diffusées sous forme de bulletins mensuels et de tableaux récapitulatifs annuels.

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

4. Variations saisonnières de la salinité à Dagana

La station de Dagana, située à 192 km de l'embouchure du fleuve, constitue la station principale de la basse vallée du Sénégal. Le suivi de la minéralisation des eaux fluviales à la hauteur de cette section a permis d'établir au chapitre précédent les flux dissous d'origine continentale. Le tableau 50 rassemble l'essentiel des informations de 1979 à 1983, et la figure 66 illustre l'évolution de la salinité à Dagana de 1981 à 1983.

Tableau 50 : SALINITE (‰) A DAGANA DE 1979 A 1983

Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰	Dates	‰
<u>1979</u>		<u>1981</u>		<u>1982</u>		<u>1982</u>		<u>1983</u>	
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
<u>1980</u>		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	<u>1982</u>		06/07	10.58	01/04	3.80	13/07	0.35
<u>1981</u>		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	0.64	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	<u>1984</u>	
01/04	0.70	22/03	0.78	24/07	6.31	03/05	5.70	01/03	<0.1
08/04	2.16	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 Dagana entre le 22 mars et le 20 avril. Le retrait a lieu entre le 6 juin et le 21 juillet.

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

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

Les caractéristiques des deux intrusions salines 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.

A Dagana, le temps de séjour des différentes isohalines en 1982 a été le suivant : 0,1 ‰ (155 jours) ; 2,5 ‰ (107 jours) ; 5 ‰ (64 jours) et 10 ‰ (30 jours). Le taux maximum de salinité s'est élevé à 12 ‰.

1982-1983 :

- eau douce à Dagana du 6 août 1982 au 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 des pluies torrentielles du 23 juin dans la région de Matam)
- phase de retrait du 23 juin au 16 juillet 1983
- durée de l'intrusion au niveau de Dagana : 151 jours.

En 1983, le temps de séjour des isohalines à Dagana a été le suivant : 0,1 % (151 jours) ; 2,5 % (112 jours) ; 5 % (76 jours) ; 10 % (29 jours). Le taux maximum de salinité s'est élevé à 13-13,5 %.

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

La charge dissoute des eaux du Sénégal à la station de Podor (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 : 0,13 % le 18 juillet) et du 13 juin au 7 juillet 1983 (salinité : 0,12 % le 19 juin).

8 - 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 67.

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

2. Progressions saisonnières du front salé de 1981 à 1983

Les progressions saisonnières du front salé sont représentées pour les trois épisodes étudiés sur les figures 68 et 69 et les résultats des mesures de salinité aux différentes sections sont donnés dans les tableaux 51 et 52.

1980-1981 :

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

1981-1982 : (fig. 68)

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

La progression du front salé vers l'amont se poursuit ensuite jusqu'en juillet 1982. Le maximum de salinité est atteint à la mi-juillet, les eaux marines atteignant les portes de la ville de Podor à près de 300 km de l'embouchure du fleuve. Des taux de salinité supérieure 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.

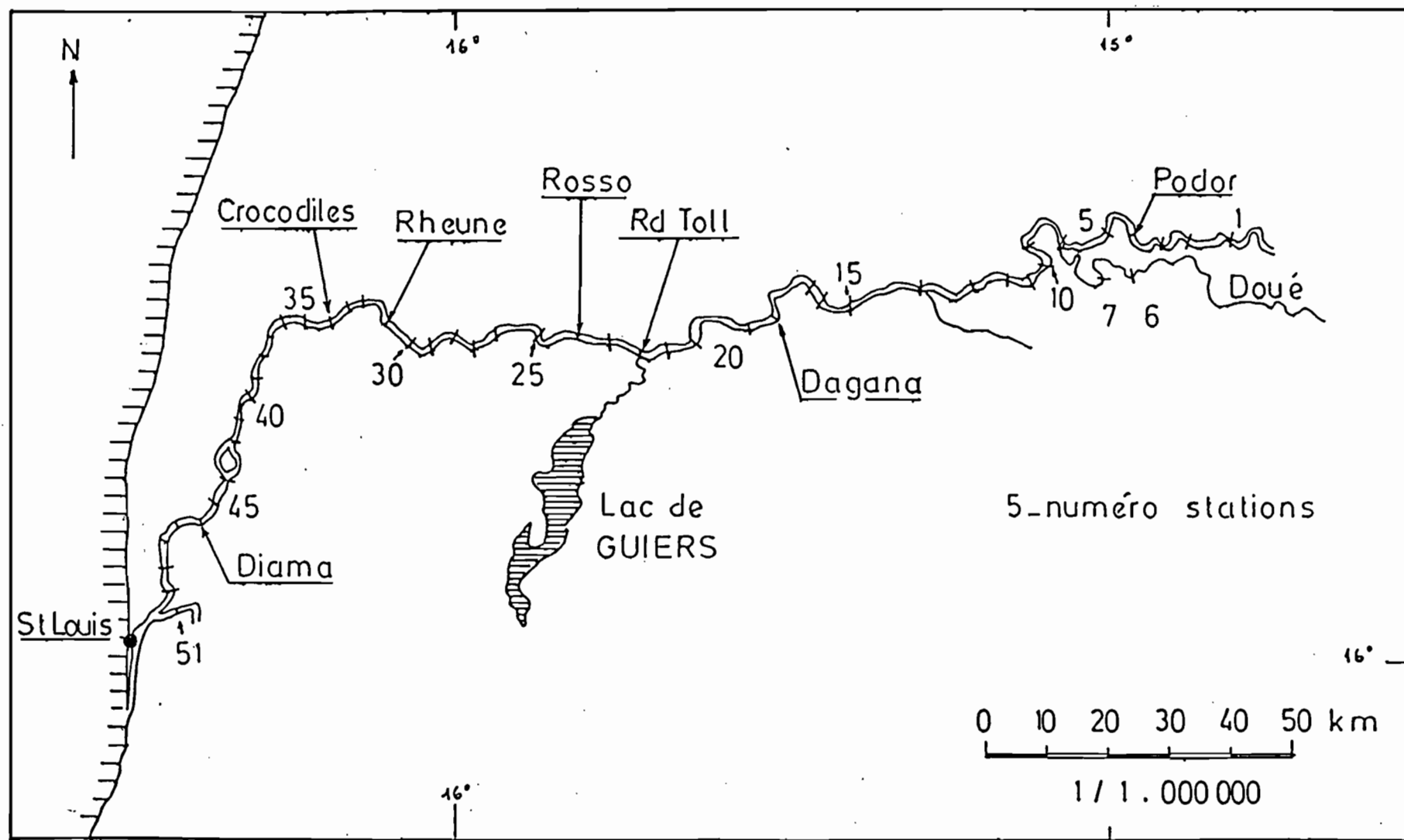


Figure 67 : Situation géographique des stations de contrôle de salinité.

Figure 69 : Evolution de la salinité dans la vallée, d'octobre 1982 à juin 1983.

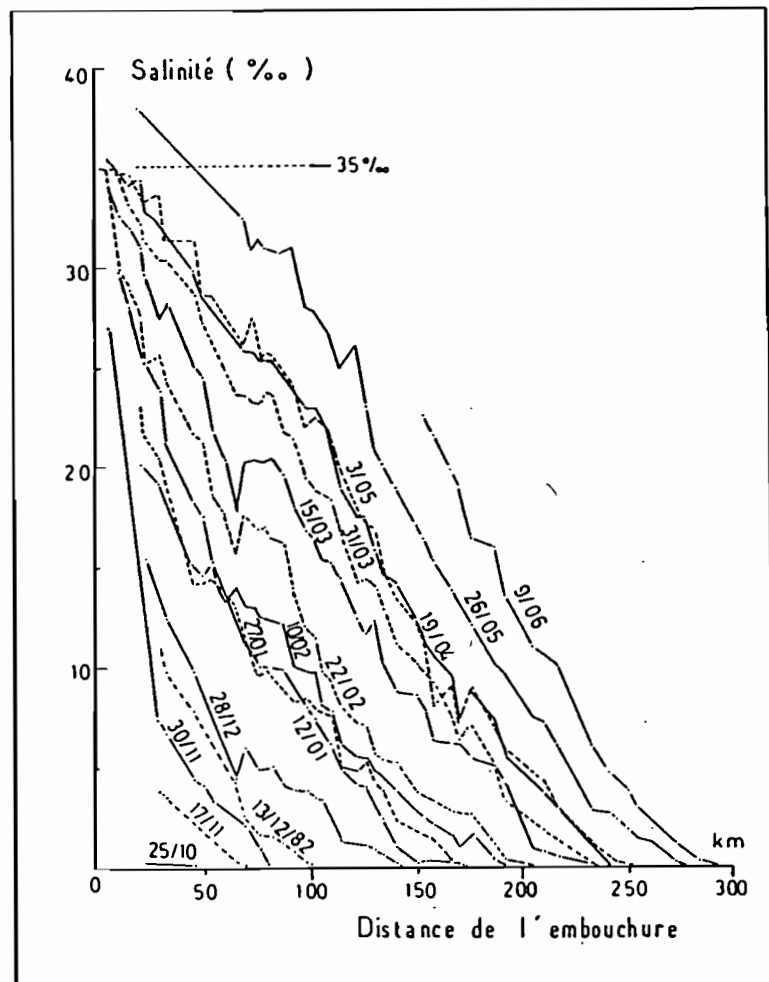


Figure 68 : Evolution de la salinité dans la vallée, d'octobre 1981 à juillet 1982.

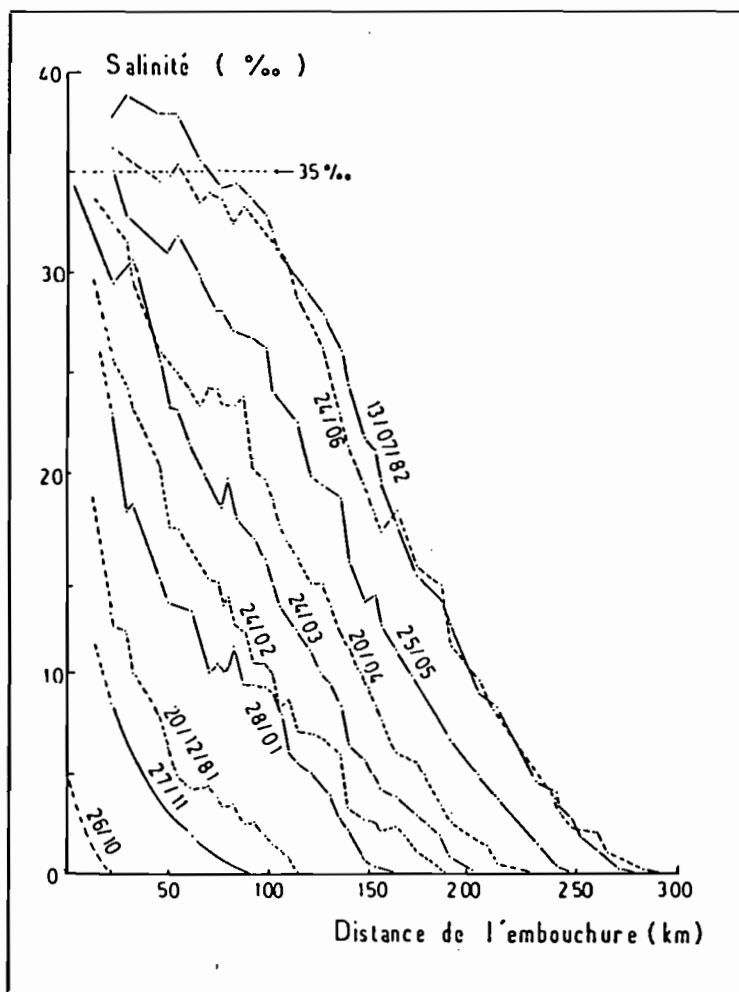


Tableau 51 : EVOLUTION SAISONNIERE DE LA SALINITE (‰) DANS LA BASSE VALLEE DU SENEGAL, DE MAI 1981 A JUILLET 1982
(les stations de Niandane et de Guia sont sur le Doué)

Stations	Point kilométrique et n°		Intrusion 1980-1981 (salinité ‰)			Intrusion 1981 - 1982 (salinité ‰)							
	Km	N°	4/05/81	22/06/81	15/07/81	20/12/81	28/01/82	23/02/82	24/03/82	20/04/82	25/05/82	24/06/82	14/07/82
Gandiole	5	56	-						35.0			35.0	36.8
"	10	55	-						-				36.9
"	15	54	-						-				37.1
"	20	53	-						-		35.0	37.5	37.2
St Louis	22	52	-			13.0		25.6	-		35.0	37.9	36.2
Dkr Bango	29	51	-			12.1	18.1	24.2	26.9	31.5	32.8	38.8	-
"	32	50	-			10.0	18.5	23.2	30.6	29.5	-	-	-
"	36	49	-			-	-	-	-	-	-	-	-
"	40	48	-			-	-	-	-	-	-	-	-
"	45	47	-			8.0	14.8	20.4	25.6	26.1	-	38.0	34.5
Maka	49	46	30.10	36.94		6.3	13.6	17.3	23.2	27.1	30.8	37.9	34.7
"	54	45	-	-		4.8	-	17.3	23.2	25.3	31.8	37.9	35.3
I. Tieng (aval)	60	44	-	-		4.3	13.2	-	21.5	24.2	-	-	-
(amont)	65	43	26.41	36.37		2.6	9.1	-	20.4	23.4	29.9	35.5	33.4
Diar	69	42	-	-		4.40	10.0	14.8	18.8	24.2	28.9	35.1	33.9
"	73	41	-	39.84		3.80	10.5	14.7	18.8	24.2	28.0	-	-
Tiguet	76	40	-	34.76		3.40	10.0	13.4	18.3	23.4	28.0	34.2	33.6
Djoudj	79	39	26.67	33.21		3.50	10.3	13.9	19.8	23.4	-	-	-
"	82	38	26.33	-		3.50	11.4	12.5	17.7	23.4	27.0	34.4	32.3
Débi	87	37	25.54	33.09		2.50	9.3	12.1	17.3	23.8	-	-	33.2
Diamer	92	36	-	32.08		2.60	9.4	10.5	16.8	20.2	26.7	33.7	-
"	98	35	-	31.35		1.90	9.3	10.5	15.8	19.7	26.2	32.8	31.9
Crocodiles	102	34	-	30.72		1.50	9.0	9.9	14.4	18.7	24.0	32.0	31.3
Diakal	105	33	-	30.03	15.11	1.20	8.5	8.3	13.4	17.4	-	30.8	-
"	109	32	-	28.93		0.85	6.0	8.6	-	16.6	-	-	30.4
Rheune	114	31	18.31	27.56	11.81	0.16	5.5	7.1	12.2	15.8	22.5	-	28.7
Diawar	122	30	16.34	25.89		-	5.0	7.0	11.2	14.5	19.8	29.1	-
Ouassoul	126	29	16.59	25.67		-	-	6.8	9.9	14.5	19.5	27.9	26.2
Rong	130	28	14.46	24.71	7.49	-	3.9	6.4	9.5	13.4	-	-	-
Gorom	134	27	13.72	24.19		-	2.8	6.0	8.4	12.1	18.8	26.0	23.0
Rhor	140	26	12.78	22.80		-	2.2	3.3	6.4	11.2	15.6	24.4	21.3
Ntiagar	150	25	10.71	20.40	8.26	<0.1	0.65	2.7	5.7	9.3	13.6	21.8	19.4
Rosso	154	24	10.36	18.89			0.40	2.6	4.8	8.4	13.9	21.2	18.2
Mbagam	158	23	8.91	17.59			0.15	2.2	4.3	7.7	12.4	19.6	17.1
Rd Toll	167	22	8.11	16.33			<0.01	2.4	3.9	6.0	11.2	17.5	18.1
Rhouma	170	21	-	16.15				1.9	-	5.8	-	-	-
Guidakar	176	20	7.55	14.02				1.2	2.5	5.6	-	14.9	15.4
K. Mour	187	19	5.50	12.83				0.23	2.0	3.5	-	13.6	14.4
Dagana	192	18	4.93	11.04				<0.1	0.9	2.6	6.6	12.4	11.5
Gaé	205	17	2.80	9.64					0.1	1.8	-	9.0	9.8
Ndiarème	210	16	2.65	8.54					<0.1	1.4	-	8.7	8.7
Bokoul	217	15	1.45	8.01						0.5	3.8	8.3	8.0
Ngalanka	233	14	0.35	4.55						<0.1	-	4.7	5.4
Ndiayao	241	13	<0.1	3.84							0.44	4.2	3.80
Dar Salam	245	12		2.61		<0.1	<0.1				0.35	3.4	3.10
Bakao	249	11		1.52							0.10	2.8	2.52
L. Peul	254	10		1.39							<0.1	1.95	-
I. Lam Nayo	261	9		1.13				<0.1				1.25	2.09
L. Doué	272	8		0.34								0.31	0.74
Niandane	288	7		0.03					<0.1	<0.1		<0.1	0.1
Guia	304	6	<0.1	<0.1									<0.1
Niaoulé	283	5		0.06									
Podor	292	4		0.03							<0.1		
Diatal	300	3		<0.1								<0.1	<0.1
Danaye	309	2		<0.1									
Mbayo	322	1		<0.1									

Tableau 52 : EVOLUTION SAISONNIERE DE LA SALINITE (‰) DANS LA BASSE VALLEE DU SENEGAL, D'OCTOBRE 1982 A JUIN 1983
(les stations de Niandane et de Guia sont sur le Doué)

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

L'inclinaison des courbes, situant les positions du front salé, se modifie à partir du 24 février 82 : de concaves auparavant, les courbes deviennent convexes ensuite. Cette modification suggère intuitivement l'idée de ROCHETTE (1974) d'une substitution vers cette date du paramètre "débit" par le paramètre "temps". On remarque déjà que cette transition s'effectue pour une valeur du débit à Dagana de l'ordre de 20 m³/s (Débit à Dagana : 19,9 m³/s le 24 février 1982), valeur bien éloignée des 50 m³/s proposés par ROCHETTE (1964).

1982-1983 : (fig. 69)

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

- début de l'intrusion saline vraisemblablement vers la mi-octobre 1982 ;
- taux maximum de salinité vers le 22 juin 1983, le sel ayant probablement dépassé pendant quelques jours la section de Podor (km 292) ;
- présence des mêmes irrégularités sensiblement dans les mêmes secteurs de la vallée (vers les km 70 et 120) ;
- modifications dans l'allure des courbes : le passage d'une forme concave à une forme convexe semblant se situer entre les campagnes du 22 février et du 15 mars 1983, c'est-à-dire à des débits à Dagana de l'ordre, à nouveau, de 20 m³/s.

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

- l'application des abaques proposés par ROCHETTE (1964) nous conduit à sous-estimer l'ampleur de l'intrusion saline ;
- la progression du front salé n'est pas régulière et les à-coups observés sont vraisemblablement imputables à la présence de seuils rocheux dans le lit mineur de la vallée. On remarque en effet que les irrégularités observées se situent approximativement à la hauteur du haut-fond de Faff (km 120) et de la grande dépression topographique signalée peu en amont de Débi, vers le km 70 dans le profil longitudinal du lit du fleuve (fig. 2) ;
- les modifications dans l'allure des courbes traduisent, avec certitude, un changement de rythme dans la progression du front salé vers l'amont.

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

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

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

Les deux figures 70 et 71 montrent les principales divergences dans les positions saisonnières respectives des différentes isohalynes :

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

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

Figure 71 : Comparaison entre les salinités observées et les estimations à l'aide des diagrammes de ROCLETTE (1964) en 1982-1983.

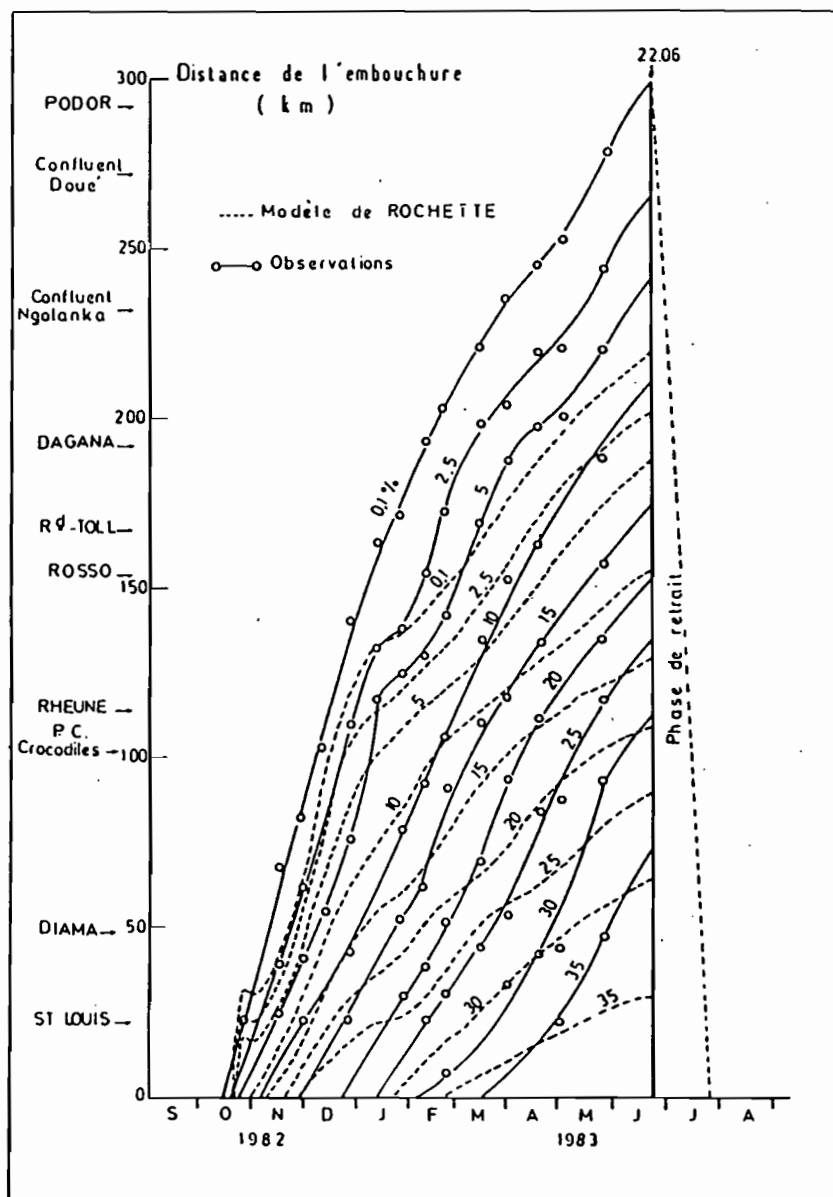
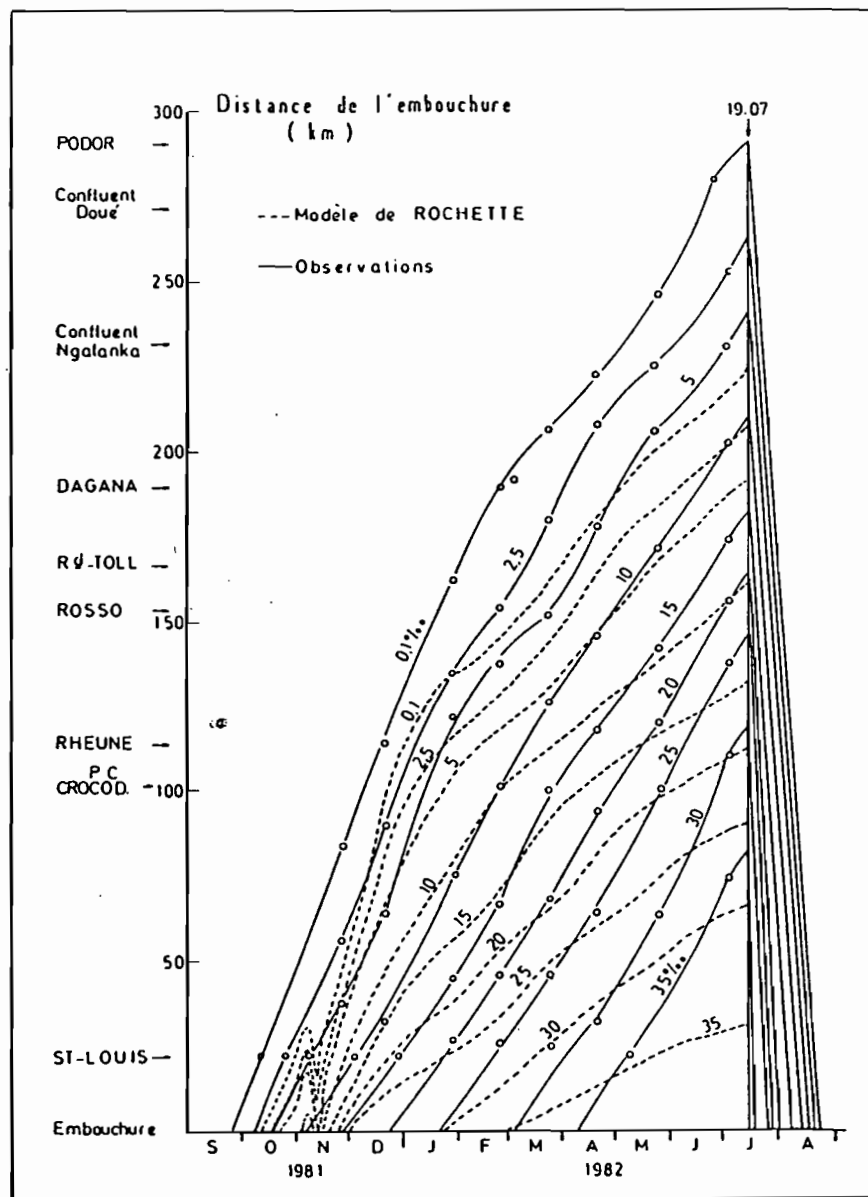


Figure 70 : Comparaison entre les salinités observées et les estimations à l'aide des diagrammes de ROCLETTE (1964) en 1981-1982.



B - LES ALTERNATIVES DE MODIFICATIONS DES DIFFERENTS SEUILS

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

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

2. Le début de l'intrusion saline : le seuil des 600 m³/s

D'après les observations journalières de la salinité à St Louis, l'intrusion saline débiterait avant le franchissement du seuil de 600 m³/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 m³/s (d'après les données de 1981-1982 et 1982-1983).

3. La substitution du paramètre "temps" au paramètre "débit" : les seuils de 50 m³/s, 20 m³/s et 5 m³/s

On peut rappeler à ce sujet les propos de ROCHETTE (1964) : "La valeur limite du débit fluvial est assez délicate à déterminer ; nous l'avons fixée arbitrairement à 50 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 exactement."

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

Cette hypothèse d'un changement de rythme proposée par GAC *et al.* (1985) a conduit ses auteurs à envisager plusieurs valeurs de ce débit critique volontairement choisi trop élevé par ROCHETTE (1964).

GAC *et al.* (1985) se basent sur les campagnes de mesure de salinité menées d'octobre 1981 à juin 1983. Le "lissage" des courbes obtenues sur les figures 68 et 69 permet d'aboutir à la représentation graphique de la figure 72 (les irrégularités introduites vraisemblablement par la présence de seuils rocheux ont été négligées). Les deux intrusions salines consécutives de 1981-1982 et 1982-1983 se caractérisent par un changement dans l'allure des courbes : de concaves, elles deviennent convexes, et sensiblement aux mêmes dates (entre le 24/02 et le 24/03 en 1982 ; entre le 22/02 et le 15/03 en 1983). Ces dates dans les tableaux 28 et 29 correspondent à des débits respectifs à Dagana de 19,9 m³/s et 6,68 m³/s en 1982 et à 17,3 m³/s et 4,9 m³/s en 1983.

Le changement de rythme dans la progression du front salé se situerait donc bien plus tardivement que ne l'admet ROCHETTE (1964) : le seuil de 50 m³/s a en effet été franchi les 23 janvier 1982 et 14 janvier 1983. Les valeurs sensiblement identiques en 1982 et 1983 des débits "critiques" à Dagana amènent à envisager deux possibilités : substitution du paramètre "temps" au paramètre "débit" pour les seuils de 20 m³/s et de 5 m³/s.

La figure 73 montre qu'il n'y a pas de variations significatives dans le déplacement des différentes isohalines en utilisant les débits de 20 m³/s et de 5 m³/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 m³/s la fixe à 226 km). L'isohaline à 35 ‰ franchit la section de Diama : elle atteint le km 56 avec 20 m³/s et le km 58 avec 5 m³/s (les mesures de salinité la positionnent au km 80 et le modèle à 30 km de l'embouchure).

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

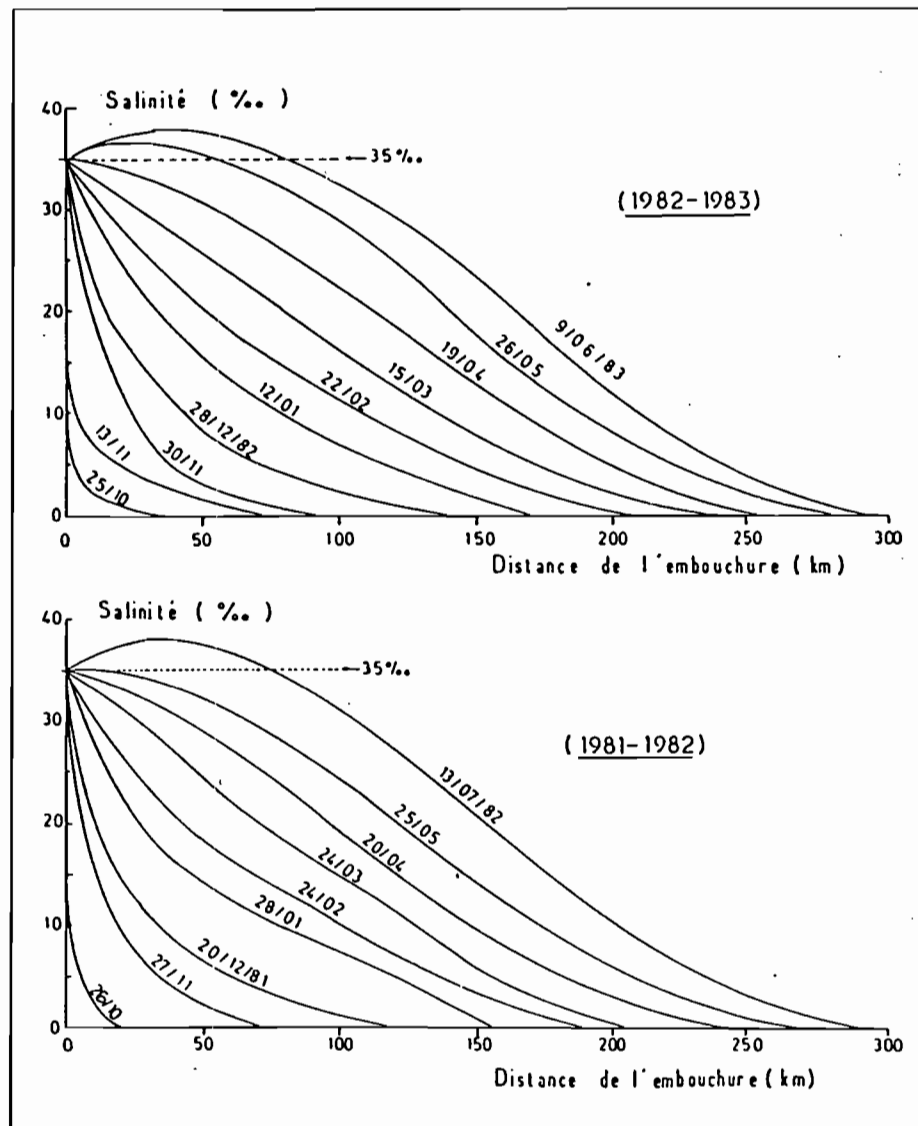


Figure 72 : Représentation schématique de la progression saisonnière du front salé de 1981 à 1983.

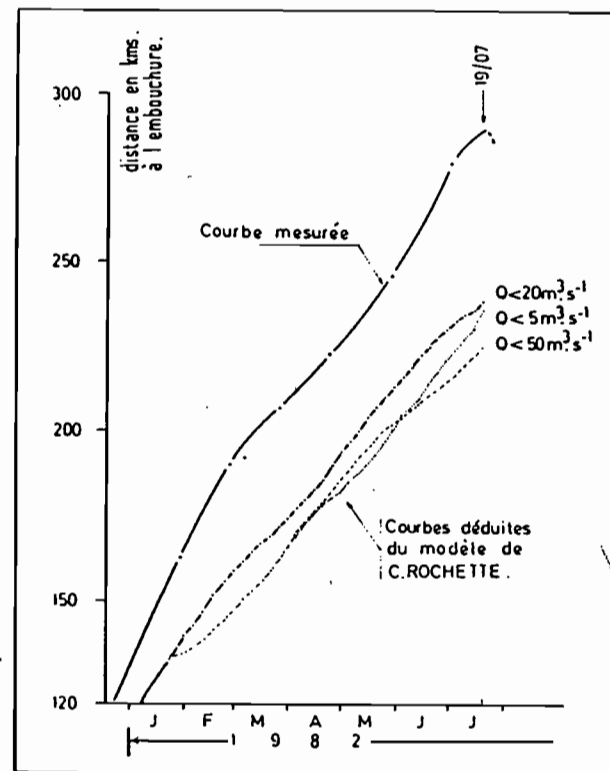


Figure 73 : Les divergences entre l'observation et l'utilisation des diagrammes de ROCHETTE pour différentes valeurs du débit critique (50, 20, 5 m^3/s). Représentation de l'isohaline 0,1 ‰.

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

Les nouveaux diagrammes présentés sur les figures 74 et 75 ont été établis par GAC et al. (1985) à partir de l'ensemble des mesures de salinité réalisées au cours des deux intrusions marines de 1981-1982 et de 1982-1983 dont les caractéristiques sont très semblables. Le seuil de 20 m3/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 m3/s (abaque I), et en fonction du temps (abaque II) pour des débits inférieurs tant que l'étiage du fleuve se poursuit.

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

En distinguant les deux épisodes (débit supérieur ou inférieur à 20 m3/s), on aboutit aux équations suivantes où D indique l'éloignement en km de l'embouchure et Q le débit fluvial en m3/s.

750 m3/s > Q > 20 m3/s

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

Q < 20 m3/s

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

Selon nos estimations, le débit maximum au cours du cycle hydrologique 1983-1984 n'a pas atteint à l'embouchure la valeur de 900 m3/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 1983, les écoulements ont à peine été supérieurs à 600 m3/s et le sel a pu entamer sa remontée vers l'amont du fleuve. La décrue générale a eu lieu dès le début d'octobre, et l'invasion marine a dû s'amorcer vers le 15 octobre. Cette date précoce a, on le sait, été à l'origine de l'édification du barrage en terre de Rheune I.

Ce barrage provisoire, situé à 114 km de l'embouchure, fut achevé en toute hâte le 25 novembre 1983, le sel ayant atteint la hauteur de Rheune quelques jours auparavant. Ces précisions nous ont permis de tester les abaques proposés. Le 25 novembre 1983, pour un débit de 150 m3 environ, abaques et équations positionnent le front salé au niveau du km 108, soit seulement à 6 km en aval de Rheune !

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

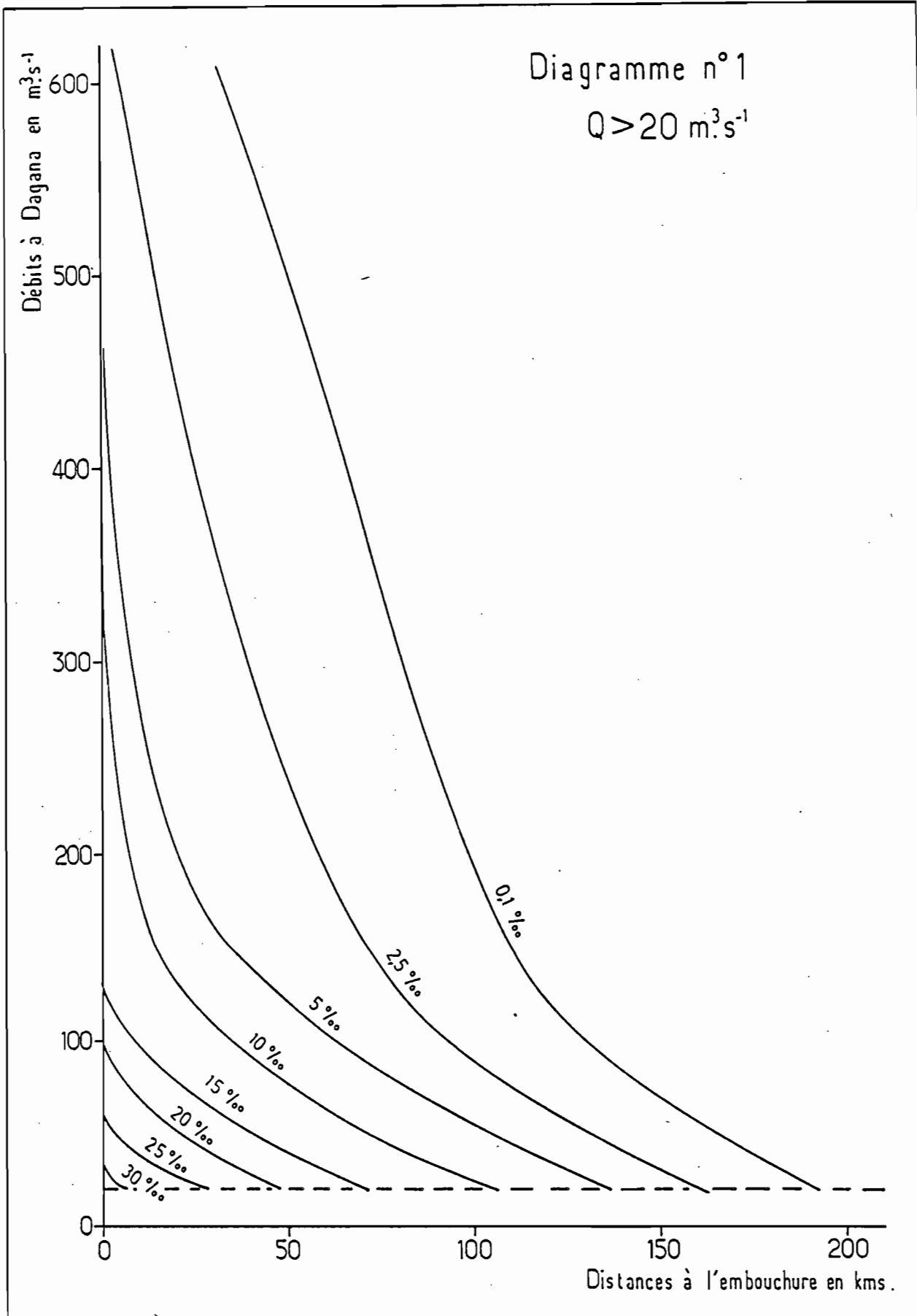


Figure 74 : Relation débit-salinité moyenne de base ($Q > 20 \text{ m}^3/\text{s}$) en période aride.

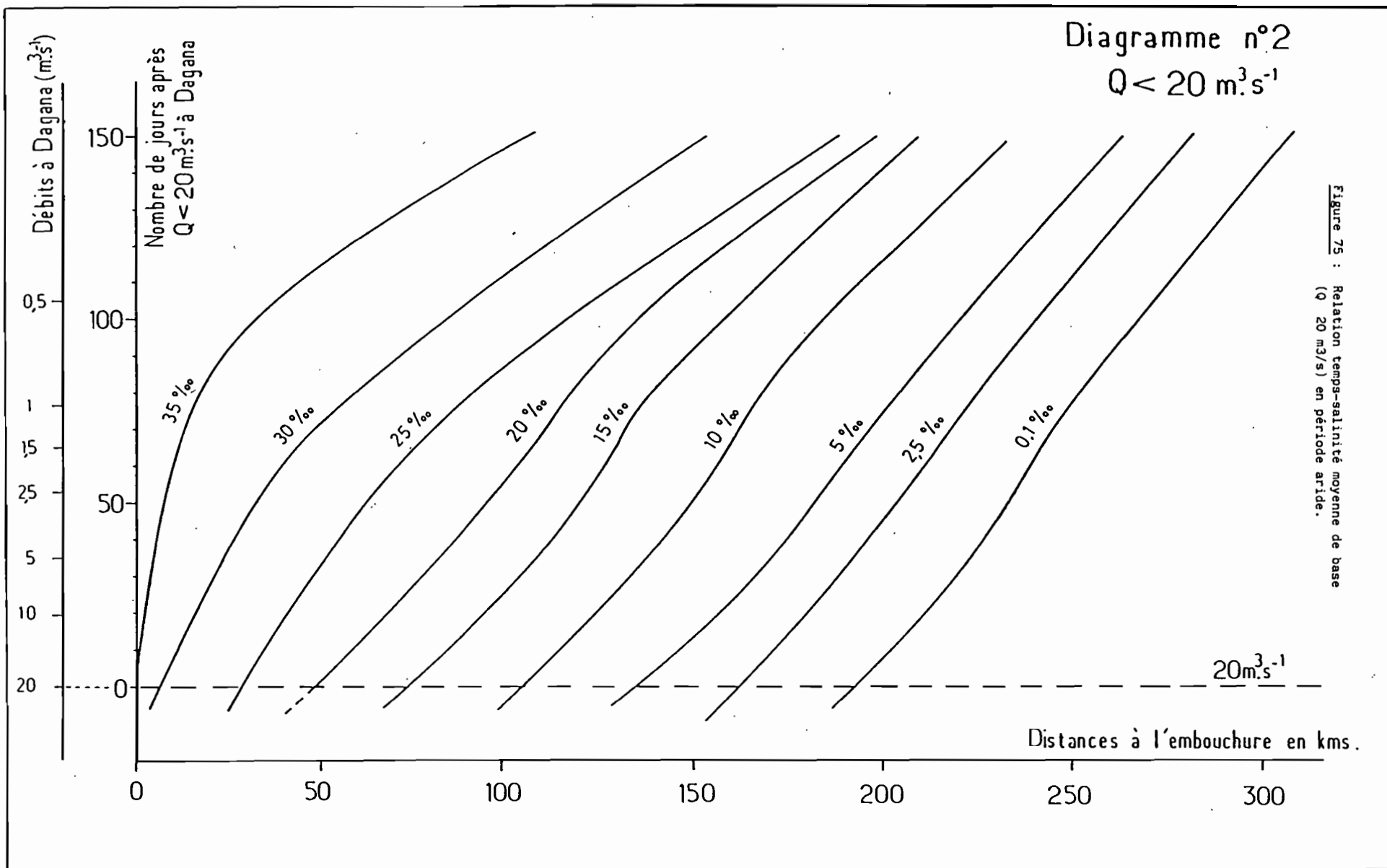


Figure 75 : Relation temps-salinité moyenne de base
($Q < 20 \text{ m}^3/\text{s}$) en période aride.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Au terme de cette étude, qui s'inscrit dans la suite des travaux menés depuis plus de trente ans par l'ORSTOM sur les grands bassins versants de la frange sahélienne, il convient de rassembler les enseignements les plus marquants sur le comportement hydrogéochimique du fleuve Sénégal.

Le bassin du fleuve Sénégal, d'une superficie de 280 000 km², alimenté à partir des régimes "tropical de transition" et "tropical pur", pénètre profondément en domaine sahélien avant d'atteindre l'Océan Atlantique. Dans le delta, le modelé est d'accumulation et le paysage est celui d'une large plaine à très faible pente.

Le régime hydrologique du fleuve Sénégal avant 1903, comme l'attestent les témoignages des documents anciens, était caractérisé par des écoulements importants liés à des précipitations abondantes. Les causes du changement de régime au XX^{ème} siècle (diminution récente des précipitations, accélération de la vitesse des crues, déboisement, défoncement du seuil de Faff, accentuation progressive de l'aridité) ont entraîné des modifications profondes dans le mode d'écoulement du fleuve.

Les conditions climatiques sur l'ensemble du bassin sont sévères ; le bilan de l'eau est partout négatif. La dégradation hydrologique est très marquée sur le fleuve, dont le régime reflète étroitement le déficit pluviométrique de l'amont. Pour la période 1903-1983, le module moyen interannuel du fleuve s'élève à 715 m³/s à Bakel et à 641 m³/s à Dagana, qui correspondent respectivement à des écoulements annuels de 22,55.10⁹ m³ et de 20,22.10⁹ m³. Cependant, l'irrégularité des écoulements constitue l'une des caractéristiques du Sénégal : les écoulements maximum ont eu lieu en 1924-1925 (39,3.10⁹ m³ à Bakel et 30,6.10⁹ m³ à Dagana), et les valeurs minimum ont été observées en 1983-1984 (6,9.10⁹ m³ à Bakel et 7,1.10⁹ m³ à Dagana). Les débits à Bakel ont varié dans un rapport de 1 à 5,7 et de 1 à 4,3 dans le bief aval de Dagana. Le plus fort débit journalier remonte à septembre 1936 à Bakel (9 340 m³/s) et à octobre de la même année à Dagana (3 570 m³/s). Le plus important débit moyen mensuel à l'amont a été enregistré en septembre 1922 (6 746 m³/s), et le plus faible en septembre 1984 (estimé à 600 m³/s) ; à l'aval, le maximum moyen mensuel remonte à octobre 1936 (3 184 m³/s) et la plus faible valeur observée sera vraisemblablement aussi celle d'octobre 1984. Les modules spécifiques sont faibles : 3,3 l/s/km² à Bakel et 2,4 l/s/km² à Dagana.

La sévérité de la sécheresse actuelle (sans interruption depuis 1968) se traduit à l'amont comme à l'aval du bassin par un déficit de près de 40 % dans les écoulements du bassin et par l'absence de phénomène d'inondation vers les dépressions situées en bordure du réseau hydrographique. L'effet de cumul de cette succession d'années à faible écoulement se marque par un tarissement et une phase d'épuisement précoces, une recharge insuffisante des nappes phréatiques et des étiages très prononcés au cours de la saison des basses-eaux (des valeurs nulles ont été observées en 1982 et en 1984).

Le Sénégal est parmi tous les fleuves sahéliens celui qui dispose de la plus longue série d'observation : l'information sur les écoulements est complète depuis 1903. Les cycles hydrologiques 1981-1982 et 1982-1983 qui ont servi de base à notre étude se sont traduits par des modules respectifs de 374 m³/s et de 254 m³/s, ce qui les situe parmi les dix années à plus faible écoulement depuis 81 ans. Cette situation a engendré une remontée précoce des eaux océaniques dans la basse vallée du fleuve : les oscillations cycliques du plan d'eau ont été nettement perceptibles dès le mois de novembre et se sont maintenues bien au-delà du mois de mai. Il en est résulté un temps de séjour prolongé des eaux marines vers l'amont du fleuve qui a considérablement gêné l'évaluation quantitative et qualitative des flux continentaux de matières particulaires et dissoutes à l'embouchure.

Pendant la saison des hautes-eaux, les eaux du fleuve sont fortement turbides en raison de leur importante charge en limons. Les plus fortes concentrations journalières observées au cours des deux cycles successifs ont été de 685 mg/l (15/08/1981) et de 416 mg/l (20/08/1982). Ces valeurs, bien plus élevées que celles estimées antérieurement, sont vraisemblablement liées au fait qu'en période de sécheresse l'écoulement du fleuve, canalisé dans le lit majeur pendant le passage de la première onde de crue, provoque un sapement latéral plus important des rives : la contribution des berges aux flux détritiques issus des provinces de l'amont n'est pas "contrebalancée" ou "équilibrée" par une sédimentation dans les plaines d'inondation. Les charges solides restent supérieures à 200 mg/l jusqu'à l'amorce de la décrue. Dès novembre, le développement de la végétation atténue le transport des matériaux en suspension ; la dégradation des sols est moindre et les eaux n'assurent plus que l'évacuation de fines particules déjà libérées. Pendant la période des basses-eaux, les concentrations de matières en suspension se stabilisent autour d'une valeur moyenne de 10 mg/l. Trois phases ont été mises en évidence dans l'hydrogramme de crue :

- une phase d'érosion précoce qui se traduit par une augmentation rapide de la turbidité et des débits ;
- une phase d'érosion tardive, caractérisée par une diminution de la charge solide et une croissance continue des débits jusqu'à la pointe de crue ;
- une phase d'alluvionnement, marquée par une baisse simultanée de la turbidité et des écoulements. Cette dernière phase pouvant elle-même se décomposer en deux périodes suivant l'importance du phénomène d'inondation.

Le bilan de l'érosion mécanique donne des résultats tout à fait différents sur les deux cycles hydrologiques avec des apports à l'Océan de 2 850 000 tonnes en 1981-1982 et de 1 185 000 tonnes en 1982-1983. La turbidité moyenne s'élève à 252 mg/l en 1981-1982 et à 196 mg/l en 1982-1983. Les dégradations spécifiques ont été respectivement de 10,6 et de 4,4 t/km²/an.

La distribution granulométrique moyenne des flux particulaires solides à l'embouchure du Sénégal montre la prépondérance des minéraux argileux (76 %) devant la fraction limoneuse (23,5 %) et surtout sableuse, présente en quantité négligeable (0,5 %). La composition minéralogique de la fraction fine des matières en suspension révèle la présence dominante, en toutes saisons, de la kaolinite (de 50 à 75 %) et l'abondance des smectites (de 15 à 30 %), des interstratifiés (de 10 à 20 %) et de l'illite (de 5 à 15 %). Les matières en suspension sont essentiellement constituées de silice (50 %), d'alumine (24 %) et de fer (10 %) ; le potassium (1,7 %) et le magnésium (1,2 %) sont relativement abondants en comparaison des quantités négligeables de calcium (0,3 %) et du sodium (0,2 %). Parmi les éléments à l'état de traces, Mn, Ba, Cr, Zr, V et Ni ont des teneurs supérieures à 100 ppm. L'importance de l'eau de constitution (12 %) est liée à l'abondance des argiles.

Au cours des cycles 1981-1982 et 1982-1983, le fleuve Sénégal a respectivement "livré" à l'Océan, 45 000 et 23 000 tonnes de matière organique. Cette "expulsion annuelle" ne représente que 1,6 % et 1,9 % des flux totaux de particules solides qui transitent à l'embouchure du fleuve.

Pour les apports dissous d'origine continentale, l'enseignement le plus important réside dans l'extrême réduction du temps de séjour de l'eau douce à l'embouchure du fleuve. Pendant la période des hautes-eaux de courte durée (de deux à trois mois), la charge dissoute des eaux fluviales se stabilise autour de 60 à 70 mg/l (les teneurs en chlorure et en sodium révèlent la présence d'eau de mer même en crue). L'eau salée se maintient pendant 9 à 10 mois dans le cours du fleuve : à St Louis, la salinité a dépassé 10 ‰ début décembre 81, 20 ‰ vers le 10 janvier 82, 30 ‰ à la mi-mars, et celle de l'eau de mer à partir du 15 mai 1982. La salinité maximale (39 ‰), notée le 7 juillet 1982, témoigne du fonctionnement de l'estuaire du Sénégal en "estuaire inverse". Les deux phases de désalinisation de la vallée du fleuve ont duré 27 jours en 1981 et 38 jours en 1982. L'évaluation quantitative et qualitative des flux dissous a été menée en utilisant l'artifice des mesures réalisées à l'amont du front salé.

Les flux de particules dissoutes ayant transité à l'embouchure du Sénégal se sont élevés à 500 000 tonnes en 1981-1982. Ces apports en solution, véhiculés par $11,784 \cdot 10^9$ m³ d'eau, correspondent à une charge moyenne annuelle de 42,3 mg/l et à une érosion chimique spécifique de 1,85 t/km²/an. En admettant une charge dissoute moyenne comparable en 1982-1983, on évalue que pour un volume écoulé de $8,01 \cdot 10^9$ m³, l'apport dissous a été de l'ordre de 340 000 tonnes.

En pourcentage pondéral, les flux dissous sont essentiellement constitués de bicarbonates (57,5 %) et de silice (18,1 %). A l'exception du calcium (8 %), les autres alcalins et alcalino-terreux sont présents dans des proportions identiques (sodium : 4,5 % ; potassium : 4,3 % ; magnésium : 4,1 %). Les chlorures sont relativement abondants (3,1 %) alors que les sulfates sont négligeables (0,4 %). La silice "d'origine continentale" se caractérise par des teneurs relativement constantes, alors qu'à l'interface fleuve-océan des écarts très importants par rapport à la courbe théorique de dilution sont notés pour les concentrations de cet élément.

En moyenne, sur les deux cycles étudiés, les exportations de matières à l'embouchure du Sénégal sont de l'ordre de 2 445 000 tonnes dont 81 % de particules fines en suspension, 17,5 % de substances dissoutes et 1,5 % de matière organique. Les taux d'érosion mécanique et chimique réunis représentent un soutirage de matière de l'ordre de 12,5 t/km²/an ou encore de 125 kg/ha/an, valeurs qui restent faibles comparativement aux autres rivières africaines. En une année et en se basant sur une densité moyenne de 2,25, les reliefs s'éroderaient de 6 µ environ et il faudrait de l'ordre de 170 000 ans, dans les mêmes conditions d'aridité actuelle, pour provoquer un abaissement général du paysage d'une hauteur de 1 mètre.

Ouverte sur l'Océan, la basse vallée du Sénégal est envahie annuellement par les eaux marines. Cette intrusion saline est devenue par son ampleur et son extension vers l'amont un événement majeur et une réalité annuelle bien contraignante pour les riverains du fleuve.

Quatre causes permanentes principales engendrent 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 année sur l'autre, la propagation du front salé est étroitement liée à la nature des masses d'eaux océaniques qui séjournent temporairement en bordure du littoral, aux oscillations du niveau marin, aux effets différés du marnage et aux constantes variations de la morphologie et de la position de l'embouchure. Elle est aussi assujettie aux caractéristiques annuelles des phases de tarissement et d'épuisement du fleuve, elles mêmes dépendantes de l'importance des prélèvements pour l'irrigation, de l'intervention des nappes superficielles situées en bordure du réseau hydrographique et de l'évaporation.

Le mécanisme de l'incursion marine à l'intérieur du bassin sénégal-mauritanien se décompose en quatre épisodes dont les durées respectives sont déterminées par les conditions d'écoulements propres à chaque crue et donc à l'importance et à la répartition des précipitations sur le bassin versant. La première phase correspond à la présence d'eau douce depuis les sources du fleuve jusqu'à son embouchure, et les trois dernières au séjour des eaux saumâtres et salées dans la vallée. Selon ROCHETTE (1964, 1974), la migration vers l'amont de l'interface eau salée-eau douce se déclenche lorsque le débit du fleuve descend en dessous de 600 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 proposées par ROCHETTE (1964, 1974), les caractéristiques essentielles et la chronologie des différentes phases de l'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal ont été précisées au cours des 80 dernières années (1903-1983). Avec toutes les réserves nécessaires, dues à certaines approximations souvent contestables mais indispensables pour progresser, les principaux enseignements de cette reconstitution sont les suivants :

- en moyenne, l'eau douce se maintient à l'embouchure d'août à novembre, soit pendant une période de 120 jours ; le temps de séjour le plus bref a été de 50 jours (en 1972) et le plus long de 155 jours (en 1967) ;
- l'intrusion saline la plus précoce a été observée en 1979 et en 1983 (le 13 octobre) et la plus tardive estimée pour l'année 1951 (le 28 décembre) ;
- sur la période de 80 ans, les eaux saumâtres ont en moyenne été décelables jusqu'à 200 km de l'embouchure, et leur temps de séjour moyen a pu être évalué à 250 jours ;
- les remontées minimales ne succèdent pas systématiquement aux crues les plus fortes, et les plus importantes ne suivent pas nécessairement les crues les plus faibles ;
- autrement dit, si en général une crue faible engendre une intrusion rapide du biseau salé et une crue forte un temps de séjour moins long des eaux saumâtres dans la vallée, à deux crues d'importance très inégale peuvent aussi succéder deux incursions marines tout à fait comparables selon le caractère tardif ou précoce des ondes de crue suivantes (COGELS et GAC, 1983).

Les observations minutieuses de la remontée saline à la suite des cycles hydrologiques 1981-1982 et 1982-1983 (caractérisés par des écoulements extrêmement faibles) et leur confrontation avec les estimations à l'aide du modèle proposé ont permis de mettre en évidence des divergences importantes dans l'évaluation de l'évolution spatio-temporelle de la salinité. Les propositions anciennes ont été reconsidérées et une nouvelle formulation du phénomène annuel de l'invasion marine établie : elle précise à tout instant par une série d'équation la position respective des différents taux de salinité dans la vallée en fonction des seuls débits exprimés en coordonnées logarithmiques.

Le trait marquant de ces années de sécheresse réside dans la position géographique de l'abscisse maximale atteinte par la remontée saline : nos observations la fixent à la hauteur de Podor, soit entre 50 et 70 km plus à l'amont que le modèle de ROCHETTE (1974), l'isohaline 35 ‰ figurant l'eau de mer "pure" positionnée par cet auteur à quelques km en amont de la ville de St Louis est décelée à près de 70 km de l'embouchure, soit plus de 20 km en amont du futur barrage anti-sel de Diamana.

Le nouveau modèle propose de nouvelles valeurs pour marquer le changement de rythme dans la progression du front salin :

- le début de l'intrusion saline a lieu lorsque le débit devient inférieur à 750 m³/s ;
- la substitution du paramètre "temps" au paramètre "débit" a été évaluée à 20 m³/s au lieu des 50 m³/s, trop élevés pour marquer cette transition.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

-oOo-

- ADANSON.M.(1757)
Histoire naturelle du Sénégal :coquillages.
Relation d'un voyage fait pendant les années 1749,1750,1751
1752,1753
Paris,Ed.Blanche,275p.
- ANCELLE.J.(1887)
Les explorateurs au Sénégal et dans les contrées voisines
depuis l'antiquité jusqu'à nos jours.
Paris,Ed. Maisonneuve et Leclerc, 442 p .
- ANFREVILLE DE LA SALLE.(1909)
Notre vieux Sénégal.Son histoire-son état actuel-ce qu'il
peut devenir.
Paris,Ed. Augustin Challamel,295 p.
- ANFREVILLE DE LA SALLE(1912)
Sur la côte occidentale d'Afrique
Ed.Larose,Paris,318 .
- ANONYME(1973)
Les causes des sécheresses dans la zone sahélienne
Marchés Trop.Med.,29,1429,pp.918-919.
- ANNUAIRES HYDROLOGIQUES D.E.H (SENEGAL)
Années 1978-79;1979-1980;1980-1981;1981-1982
- ASTON S.R (1978)
In "Chemical Oceanography", vol 7, 5p, Riley and -
R.Chester Eds,Academic Press, Londres.
- ASTON S.R (1983)
Silicon geochemistry and biogeochemistry,
Academic Press,Londres,248p.
- ATAMAN.G.(1968)
Géochimie des minéraux argileux dans les bassins
sédimentaires marins.Etudes sur le bassin triassique du Jura.
Mem.Serv.Carte Géol.Als.Lorr.n° 25,237p;STRASBOURG.
- ATLAS NATIONAL DU SENEGAL (1977)
Institut géographique national.147p,carte.
- AUDIBERT.M.(1967)
Etude hydrogéologique du delta du fleuve Sénégal.
Saint.Louis,Sénégal- FAO/OERS-Projet hydro-agricole.

D'AVEZAC (1840).M.

Analyse d'un voyage de MM.CAILLE,HUARD,BESSINIERE,POTIN,
PETTERSON et PAUL HOLLE au lac de PANIEFOUL et au pays
YOLOF en octobre,novembre,décembre 1839.
Bull.Soc.Géogr.,XIV,82,pp.193-217.

BANCAL.P.(1923)

Problème de l'eau au Sénégal.
U.H.E.A.,111p.

BARUSSEAU.J.P.(1980)

Essai d'évaluation des transports littoraux sableux sous
l'action des houles entre St-Louis et Joal (Sénégal)
Bull.ASEQUA,n° 58-59, pp.31-39.

EL BEKRI (1067)

Description de l'Afrique septentrionale.
Traduction Slane (1859)
Paris,Ed.Lib. Impr.,432 p.

BERRIT.GR.(1952)

Esquisse des conditions hydrologiques du plateau continental
du Cap-vert à la Gambie.
Bull.IFAN,XIV,A(3),pp.735-761.

BERTHOIS.L.(1958)

La formation des estuaires et des deltas.
C.R.Acad.Sci.,Paris,247,n° 13,pp.947-949.

BERNUS.E. ET SAVONNET.G.(1973)

Les problèmes de la secheresse dans l'Afrique de l'ouest.
Présence Africaine n° 88,Paris.

BESNUS.Y., LUCAS.J.(1968)

Une méthode de dosage des éléments traces dans les roches
par spectrométrie à lecture directe.
Bull.Serv.Carte géol.Als.lorr.Strasbourg,18,pp.179-189.

BESNUS.Y.,ROUAULT.R.(1973)

Une méthode d'analyse des roches au spectromètre d'arc
à lecture directe par un dispositif d'électrode rotative.
ANALUSIS,2,pp.111-116.

BIEN.G.S,CONTOIS.D.E ET THOMAS W.H.(1958)

The removal of soluble silica from fresh water entering
the sea.Geochem.Cosmochim.Acta,14,pp.35-54.

BILLON.B.(1968)

Mise au point des mesures de debits solides en suspension
(Republique du Tchad)
Cah.ORSTOM,sér.Hydrol,vol n° 2,pp.3-14.

- BILLON.B.(1968)
Mise au point des mesures de debits solides en suspension
(Republique du Tchad)
Cah.ORSTOM,sér.Hydrol,vol n° 2,pp.3-14.
- BORDIER.J(1972)
Remontée des eaux marines dans le Sénégal.Campagne de
prélèvements en amont de R.TOLL
ST.LOUIS,SENEGAL F.A.O/O.M.V.S ; Projet hydroagricole,10p.
- BORIUS.A.(1875)
Recherches sur le climat du Sénégal
Paris,Ed.Gauthier et Villars.
- BOULET.R.,GUICHARD.E.,VIEILLEFON.J.(1966)
Observations pédologiques dans les deltas du Sénégal
Rapp.ORSTOM,Dakar,33 p.
- BRASSEUR.G.(1954)
Le problème de l'eau.
In Etudes Sénégalaises,IFAN.St-Louis,Sénégal.
- BRAOUZEC.J.(1862)
Exploration du cours d'eau du Bounoum .
In Rev.Maritime et Coloniale,6,pp.193-202.
- BRIGAUD.F.(1961)
Etudes Sénégalaises n 9.Connaissance du Sénégal.
Fascicule 2- hydrographie.
St-Louis,Sénégal,IFAN,102 p.
- BRUNET.MORET(1969)
Mesure de salinité dans le fleuve Casamance.
Cah.ORSTOM ,Sér.hydrol,6,n° 1,pp.3-16.
- BRUNET. MORET. (1970)
Etude hydrologique en Casamance.
Rapp.multigr.,ORSTOM,Paris,52p.
- CARMOUZE.J.P.,(1976)
La régulation hydrogéochimique du lac Tchad.Contribution
à l'analyse biodynamique d'un système endoréique en milieu
continental.
Trav.et Doc.ORSTOM,n° 58,418p.
- CARRE.P.(1972)
Quelques aspects du régime des apports fluviaux de
matériaux solides en suspension vers le lac Tchad.
Cah.ORSTOM,Hydrol.,IX,n°1,pp. 19-45.

CHARRE.J.(1977)

A propos de sécheresse.Revue géographie Lyon.
Tome 52,n° 2,pp.215-226.

CHAUMENEY.(1974)

Utilisation des eaux du Sénégal.Etude hydroagricole du
bassin du fleuve Sénégal.
R.A.F. 65/061.Fevr.1974.

CHOURET.A.(1977)

Régime des apports fluviaux de matériaux solides en
suspension vers le lac Tchad.Synthèse des études de
l'ORSTOM en République du TCHAD.
Ann.Géogr.Franc.,pp.126-133.

CHUDEAU.R.(1916)

Le climat de l'Afrique occidentale et équatoriale.
Ann.Géogr.,XXV,p.429.

CITEAU.J.,LAHUEC.J.P,GUILLOT.B.(1984)

Position de la zone intertropicale de convergence,indicateur
des tendances climatiques.
Colloque sur la lutte contre la sécheresse.Dakar,sep.84.
Bull. Veille climatique n°1 à 4.

COGELS.F.X.,GAC.J.Y.(1982)

Le lac de Guiers:fonctionnement,bilans hydriques;
Evolution d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne
Cah.ORSTOM,Sér.Géol.,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 de
zones rurales en Afrique",11-16 avril 1983,Thiès(Sénégal),18p.

COGELS.F.X.et.GAC.J.Y.(1983)

Circulation et salinité des eaux du lac de Guiers:problèmes
de développement et modèle de gestion..
Actes du colloque"Le lac de Guiers: Problématique
régionale d'environnement et de développement sahéliens".
9-11 mai 1983,Dakar,Sénégal,14p.

COGELS.F.X.et.GAC.J.Y.(1983)

La chlorinité des eaux du lac de Guiers: bilan quantitatif,
qualitatif et perspectives futures.
Actes du colloque"Le lac de Guiers: problématique régionale
d'environnement et de développement sahéliens" 9-11mai 1983,
Dakar,Sénégal.

COLEMAN.J.M.and.WRIGHT.L.D.(1975)

Moderns rivers deltas: Variability of processes and sand bodies.In deltas (Ed.M.L.Broussard),pp.99-149
Houston Geological Society.

COLOMBANI.J.(1967)

Contribution à la méthodologie des mesures systématiques des débits solides en suspension;
Cah.ORSTOM,hydrol.,IV,n° 4,pp.4-27.

DEKKER.G.(1963)

Commission économique pour l'Afrique des nations unies.
Rapport sur la navigabilité du fleuve Sénégal et les problèmes connexes.
Addis-Abeba,Comm. Economique pour l'AFRIQUE des NATIONS UNIES,30p.

DUBOIS.J.(1955)

Les sols du delta du Sénégal.
Bull.M.A.S,St-Louis,Sénégal,77p.

DURAND.J.B.L.

Atlas pour servir au voyage du Sénégal
Paris,Ed.Agasse,67p.

DOMAIN.F.(1977)

Description de la sédimentation fine et des formations rocheuses du plateau continental ouest africain de 17 Nord à 12 Nord.Bull.ASEQUA,50,pp.11-22.

DOMAIN.F.(1977)

Carte sédimentologique du plateau Sénagambien, extension à une partie du plateau continental de la Mauritanie et de la Guinée Bissau.
Notice explicative n°68,ORSTOM.Paris,16p.

ELOUARD.P.(1964)

Notions élémentaires d'hydrologie et problèmes de l'eau au Sénégal.
Notes Africaines,n°102,Dakar,IFAN,pp.45-48.

ELOUARD.P.FAURE.M.et.HEBRARD.L.(1977)

Variations du niveau de la mer au cours des 15000 dernières années autour de la presqu'ile du Cap vert,Dakar-Sénégal.
Bull.ASEQUA,50,pp.29-49.

FAURE.H.et.ELOUARD.P.(1967)

Schéma des variations du niveau de l'océan Atlantique sur la côte Ouest de l'Afrique depuis 40 000 ans.
C.R.Acad.Sci.,Paris,265,D,pp.784-787.

- FAURE.H.et.GAC.J.Y.(1981)
Will the sahélian drought end in 1985 ?
Nature,291,pp.475-478.
- FAURE.H.,VIEILLEFON.J.,DIOP.CH.A.(1974)
Evolution de la ligne de rivage holocène en Casamance
(sud du Sénégal).
Bull.ASEQUA,n° 42-43.
- FRECAUT.R.(1981)
Les transports solides fluviaux en suspension dans les
bassins tropicaux humides.
Melanges Ch.P.Peguy,Grenoble,pp.215-225.
- FRECAUT.R.(1982)
Eléments d'hydrologie et de dynamique fluviales.
Tome 1: Hydrologie et dynamique fluviales des régions
chaudes et humides des basses latitudes.
Publications Université de Nancy II,147p.
- GAC.J.Y.(1979)
Géochimie du lac Tchad . Bilan de l'altération de l'érosion
et de la sédimentation.
Thèse Université Louis Pasteur,Strasbourg,249p.
Trav.Doc.ORSTOM,Paris,n° 123,251p.
- GAC.J.Y.et.PINTA.M.(1972)
Bilan de l'érosion et de l'altération en climat tropical
humide.Estimation de la vitesse d'approfondissement des
profils.Etude du bassin de l'Ouham (R.C.A).
Cah.ORSTOM,Sér.Géol,V,n° 1,pp.83-96.
- GAC.J.Y.,KANE.A.,MONTEILLET.J.(1982)
Migrations de l'embouchure du fleuve Sénégal depuis 1850
Cah.ORSTOM,Sér.Géol,XII,n° 1,pp.73-76.
- GAC.J.Y.,MONTEILLET.J.,FAURE.(1983)
Marine shorelines in estuaries as palaeoprecipitation
indicators .Symposium on "Variations in the global water
budget"(Eds A. Street-Perrot,M. Beran and R. Ratcliffe),
Oxford (G.B.)9-15 aout 1981,Eds Reidel Pub. Comp.,1983,
pp.361-370.
- GAC.J.Y.KANE.A.(1985)
Les flux continentaux particuliers et dissous à l'embou-
chure du fleuve Sénégal(Station de ST-Louis).
Rapp.ORSTOM,Dakar,mai 1985,(sous presse).
- GAC.J.Y.,KANE.A.,SAOS.J.L.,CARN.M.,VILLENEUVE.J.E.(1985)
L'invasion marine dans la basse vallée du Sénégal.
Rapp.ORSTOM,Dakar,fevrier 1985,(sous presse).

GIBBS.R.J.(1967)

The geochemistry of the Amazon river system -
Part I: The factors that control the salinity and the
composition and concentration of the suspended solids.
Geol.soc.Amer.Bull., 78, 10, pp.1203-1232.

GIBBS.R.J.(1972)

Water chemistry in the Amazon river.
Geoch.cosmoch.Acta, 36, pp.1061-1066.

GUEYE.P.M.(1980)

L'estuaire du fleuve Sénégal (Région de ST-LOUIS).
Etude de géomorphologie. Rapp. Maîtrise de géographie.
Fac.letr.Sci.Hum.Univ.Dakar, 89p.

GIRAUD ET ROSSIGNOL (1973)

Recherches de cycles dans les pluies annuelles de DAKAR de
1901 à 1972 et du Sénégal de 1924 à 1972.
In colloque sur la désertification, Nouakchott, 17-19 déc.1973
Dakar nouvelles, Ed.Afric.212p.

GROVE.A.T.(1972)

The dissolved and solid load carried by some west African
rivers: Sénégal, Niger, Benue and Chari.
Journ.of.hydrology, 24, n°4, pp.277-300.

GUIGEN.N., LERIQUE.J.(1977)

Note sur l'étalonnage du Sénégal à Bakel à la suite des
campagnes de mesures de 1974 à 1975.
Rapp.ORSTOM, Dakar, 1977.

GUILCHER.A.(1954)

Rapport sur une mission d'étude de la langue de Barbarie
et l'embouchure du Sénégal.
Bull.M.A.S, ST.Louis(Sénégal), n°1.

GUILCHER.A.(1979)

Précis d'hydrologie marine et continentale.
Eds.Masson, Paris, 2^e édition, 344p.

GUILCHER.A., NICOLAS.J.P.(1954)

Observations sur la Langue de Barbarie et les bras du Sénégal
aux environs de St-Louis.
Com.Centr.Océanogr.Et.Côtes Fr., 6, pp.227-243.

HENRY.Y.(1918)

Irrigations et cultures irriguées en Afrique tropicale.
Eds.Larose, Paris, 296p.

- HOFFERT.M.(1973)
Les minéraux argileux dans quatre carottes de l'atlantique nord.Essai d'interprétation sédimentologique.
Thèse,Strasbourg,53p.
- HUBERT.H.(1917)
Le dessèchement dans les régions Sénégalaises.
Ann.Géol,XXVI,p.379.
- HUBERT.H.(1920)
Le dessèchement progressif en Afrique occidentale.
Bull.Com.Et.Hist.et.Sci.de.l'A.O.F ,III,pp.399-467.
- HUBERT.H.(1921)
Eaux superficielles et souterraines au Sénégal.
Eds.Larose,Paris,30p.
- IAWORSKA.M.(1968)
Recherches préliminaires sur la dépendance entre le débit et le contenu entre principaux ions des eaux rivulaires.
Bull.A.I.H.S,78,pp.24-27.
- ICOLE.M.,GAC.J.Y.,MONTEILLET.J.,FAURE.H.(1982)
Marqueurs biogéochimiques d'aridité dans l'estuaire du Sénégal et le Manga Nigérien.
Bull.Assoc.Géogr.Paris,484,pp.62-64.
- IVANOV.V.V.(1969)
Rapport sur les études hydrologiques du fleuve Sénégal.
Mission 1968-1969.Trad.Russe par V.S VOSTRIKOV.
ST-LOUIS Sénégal.O.E.R.S/U.N,161p.
- JOIRE.J.(1947)
Amas de coquillages du littoral Sénégalais dans la banlieue de St-Louis.
Bull.IFAN,9,pp.170-340.
- KANE.A.(1980)
Les sécheresses et les etriages dans les régions tropicales humides et sahéliennes.L'exemple du Sénégal.
Mémoire de D.E.A Lab.Géographie.Phys.Univ.Nancy II.
- LENOIR.F.(1972)
Exportation chimique d'un bassin intertropical (le Bandama Cote d'Ivoire).Influence des conditions hydrologiques.
Thèse sciences,Nice,ORSTOM,402p.

LERIQUE.J.(1975)

Les transports solides en suspension dans la Gambie,
à Kédougou et à Gouloumbou,résultats de la campagne 1974.
Rapp.ORSTOM,Dakar,11p.

LEROUX.M.(1980)

Le climat de l'Afrique tropicale.
Thèse lettre,3 vol,1427p.

LISS.P.S.AND.POINTON.M.J.(1973)

Removal of dissolved boron and silicon during estuarine
mixing of sea and rivers waters.
Geoch.Cosmosch.Acta,37,p.1493.

LO.H.M.(1984)

Le bassin de la Gambie en amont de Gouloumbou;contribution à
l'hydrologie et à la dynamique fluviales en domaine tropical
humide Africain.(Republique de Guinée et du Sénégal).
Thèse de géographie physique,Nancy II,396p.

LOUISE.P.(1917)

Rapport sur la propagation en marée dans le fleuve Sénégal.
ST.LOUIS-M.A.S et comité d'études historiques et
scientifiques de l'A.O.F,17p.

LUCAS.J.(1962)

La transformation des minéraux argileux dans la sédimen-
tation.Etude sur les argiles du trias.
Mem.Serv.Carte Géol.Als.Lorr.Strasbourg,22,202pp.

MARTIN.O.(1983)

Inorganic and organic geochemistry of the Niger during
1980-1981 hydrological year;Dissertation submitted for the
ph.D.Degree in natural sciences,Dept.of géosciences.Univ.of
Hambourg.

MANDIN.R.(1957)

Rapport sur les mesures de débits solides à Dagana-Bakel
et Fadougou.
Rapport.M.A.S,St-Louis(Sénégal),6p.

MASSE.J.P.(1968)

Contribution à l'étude des sédiments actuels du plateau
continental de Dakar.Essai d'analyse à la sédimentation
biogène.
Rapp.labo.Géol.Fac.Sci.Univ.Dakar,23,84p.

- MATHIEU.P.(1972)
Apports chimiques par les précipitations en savane et sous forêt. Influence du milieu forestier intertropical sur la migration des ions et sur les transports solides.
Bassin de l'Amitioro (Cote d'Ivoire)
Thèse doctorat, Univ. de Nice, 441p.
- MAYMARD.J.(1975)
Les sols du pseudo delta du Sénégal.
Bull.M.A.S., St-Louis (Sénégal), 5, 55p.
- MEGLISTSKY.A.M.(1970)
Note préliminaire sur les changements des fonds à l'embouchure du fleuve Sénégal.
St-Louis, mars 1970, 7p.
- MEYBECK.M.(1984)
Les fleuves et le cycle géochimique des éléments.
Thèse Doct.D'état sci.Univ Pierre et marie Curie
Paris VI, 558p.
- MICHEL.P.(1957)
Note sur la géomorphologie et les dépôts de coquillages des environs de St-Louis.
Bull.M.A.S.St-Louis (Sénégal), 108, 18p.
- MICHEL.P.(1967)
Les dépôts du quaternaire récent dans la basse vallée.
Bull.IFAN, Sér. A, n° 2, pp.853-860.
- MICHEL.P.(1968)
Le façonnement actuel de la vallée du Sénégal et de ses bordures de Bakel à R.Toll
Comité.Trav.sci.Hist., Paris, Bull.Sect.Géogr., 80, pp.447-484.
- MICHEL.P., ELOUARD.P., FAURE.H.(1968)
Nouvelles recherches sur le quaternaire récent de la région de St-louis (Sénégal).
Bull.IFAN, Sér.A, 1, pp.1-38.
- MICHEL.P.(1969)
Les grandes étapes de la morphogénèse dans les bassins des fleuves Sénégal et Gambie pendant le quaternaire.
Bull.IFAN, 31, Sér.A, 2, pp.293-324.
- MICHEL.P.(1973)
Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie.
Etude géomorphologique.
Mém.ORSTOM, 63, 845p.

MICHEL.P.et.SALL(1984)

Dynamique des paysages et aménagement de la vallée alluviale du Sénégal.

Mém.ORSTOM,106,pp.89-109.

MONNET.C.(1972)

Contribution à l'étude de la dynamique et de la nature des suspensions d'un fleuve intertropical, le Bandama .

Evolution des éléments chimiques de son estuaire.

Thèse.Sci.Nice, ORSTOM,multigr,427p.

MONTEILLET.J.(1977)

Tourbes de l'holocène inférieur(tchadien) dans le nord du delta du Sénégal.

In colloque sur les variations des lignes de rivages à l'holocène.Bull.ASEQUA,50,pp.23-28.

MONTEILLET.J.,FAURE.H.,GAC.J.Y.(1981)

Variations du niveau de la mer ou crues fluviales.

IGCP project 61 / INQUA Meeting,Columbia(South Carolina)

U.S.A.,April 1981:Abstract.

MONTEILLET.J.,FAURE.H.,PIRAZZOLI.P.A,RAVISE.S.A.(1981.b)

L'invasion marine du Ferlo(Sénégal) à l'holocène supérieur (1900 B.P.).

Palaeoecol.Africa,13,pp.205-215.

MONTEILLET.J.,ROSSO.J.C.(1977)

Répartition de la faune testacée actuelle (mollusques et crustacés cirripèdes) dans la basse vallée et le delta du Sénégal.

Bull.IFAN,A 39,pp.788-820.

MOSSER.C.,GALL.J.C.,TARDY.Y.,(1971)

Géochimie des illites du grès à Voltzia du Buntsandstein des Vosges du nord,FRANCE.

Chem.Géology,9,pp.157-177.

NDIAYE .A. (1975)

Le Gandiollais-L'estuaire du Sénégal-La langue de barbarie Etude géomorphologique.

Dakar,Sénégal,Univ.Dept.Géogr.,88p.

NICOLAS.J.P.(1954)

Essai d'interprétation de l'évolution récente et contemporaine de l'embouchure du Sénégal.

St-Louis IFAN/MAS-12p.

NOUVELOT.J.F.(1969)

Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun .

Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., VI, 4, pp. 43-85.

NOUVELOT.J.F.(1972)

Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau au Cameroun de 1969 à 1971.

Cah. ORSTOM, Ser. Hydrol., IX, 1, pp. 44-74.

OLIVRY.J.C.(1982)

Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en sénégalie et aux îles du Cap-vert.

Cah. ORSTOM, Ser. Hydrol., XX, 1, pp. 47-70.

OLIVRY.J.C.(1983)

Contribution de la prévision en hydrologie à l'éventuelle maîtrise des ressources déficitaires du fleuve Sénégal pour la saison 1983-1984.

Rapp. ORSTOM, Dakar, 9p.

O.M.V.S.(1980)

Evaluation des effets sur l'environnement d'aménagements prévus dans le bassin du fleuve Sénégal.

Synthèse-rapport final. Gannet, Fleming, Cordy and Carpenter, Harrisburg, pennsylvania, USA. En association avec ORGATEC Dakar. Sénégal.

O.M.V.S(1980)

Etude socio-économique du bassin du fleuve Sénégal.

Ed. provisoire. Avril 1980.

O.N.U SENEGAL CONSULT (1970)

Etude de préinvestissement pour la régularisation du fleuve Sénégal. Projet d'un système de contrôle des débits dans le bassin du haut Sénégal 3 vol.

PALUTIKOF.J.P., LOUGH.J.H., FARMER.G.(1981)

Sénégal river Runoff

Nature, 293, p. 414.

PAPY.(1951)

La vallée du Sénégal. Agriculture traditionnelle et riziculture mécanisée.

Cahiers d'outre mer . oct. Dec. 1951, 16, pp. 227-234.

Etudes Sénégalaises, 2.

PARDE.M.(1968)

Fleuves et rivières.

Paris , A. COLIN, 3 édition, 243p.

- SALL.M.(1982)
Dynamique et morphogénèse actuelle au Sénégal occidental.
Thèse de doct., Univ. Strasbourg, 604p.
- SAOS.J.L., KANE.A., CARN.M., GAC.J.Y.(1984)
Remontée saline dans le fleuve Sénégal.
10[réunion annuelle des sciences de la terre.
Bordeaux-Talence 2-6 avril 1984.
Soc.Géol.Fr.Edit.Paris.p499.
- SCHEFFER.C.(1945)
Relation des voyages à la cote occidentale d'Afrique d'Alvise
de Cadamosto 1455-1457.
Paris., Eds. Ernest Leroux, 206p.
- SCHINK.D.R.(1967)
Budget for dissolved silica in the Méditerranéan sea.
Géochim.Cosmochim.Acta, 31, pp.987-999.
- SEDAGRI.(1970)
Etude hydroagricole du bassin du fleuve Sénégal.
Etude pédologique. Résumé et conclusions générales.
Paris 1970.
- SEGUI.J.(1955)
Rapport sur les mesures de débits solides du fleuve Sénégal
à Dagana (campagne 1955).
Bull.de la M.A.S , n° 42.
- SECK.A.(1962)
Le heug ou pluie de contre saison au Sénégal.
Extraits des annales de géographie, 385, pp.225-246.
- SECK.S.M.(1981)
Irrigation et aménagement de l'espace dans la moyenne vallée
du Sénégal. Participation paysanne et problèmes de
développement.
Université de St-Etienne, Thèse Doctorat d'Etat és-lettres.
- SHOLKOVITZ.E.R.(1976)
Floculation of dissolved organic matter during the mixing
of river water and sea water.
Géochim.Cosmochimica Acta, 40, pp.831-846.
- SIRCOULON.J.(1976)
Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en
Afrique intertropicale . Comparaison avec les sécheresses
de 1913 et de 1940.
Cahiers ORSTOM , série hydrol, XIII, 2, pp.75-174.

PELTIER.(1945)

Rapport sur le projet d'aménagement agricole de 50.000ha
dans le delta du Sénégal.(Système Guiers-Ndiael)
Bull.M.A.S, St-Louis.Sénégal,68p.

PIRAZZOLI.P.(1977)

les variations des lignes de rivage deouis 2000 ans et leurs
causes possibles.
Ass.Sénégal et Quater.Afr.
Bull.ASEQUA,50,pp.95-105.

PINSON-MOUILLOT.J.(1980)

Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires
du plateau continental Sénégalais.
Thèse Univ.Bordeaux I,106p.

POLIAKOV.B.V.(1938)

Recherches hydrogéologiques sur la basse Volga.
Mat.Projet.rech.Irrig.Bassin Volga,Kamychine,10.

REBERT.J.P.(1977)

Aperçu sur l'hydrologie du plateau continental Ouest-Africain
de la Mauritanie à la Guinée.
Rapport Copace/pace,série 78/10,4p.

REIZER.C.(1971)

Contribution à l'étude hydrologique du bas Sénégal.
Premières recommandations d'aménagements halieutiques.
Nogent sur Marne,France,CTFT,1971,142p.

ROCHE.M.(1973)

Les incidences climatiques et hydrologiques de la sècheresse
Technique et développement.
Bull.IRAT,4-15,10p.

ROCHETTE.C.(1964)

Remontée des eaux marines dans le fleuve Sénégal.
St-Louis.Sénégal,,M.A.S. et ORSTOM ,81p.

ROCHETTE.C.(1974)

Le bassin du fleuve Sénégal.
Paris ,ORSTOM,Monog.Hydrol,1,391p.

RODIER.J.(1975)

Evaluation de l'écoulement annuel dans le sahel tropical
Africain .
Trav.Doc.,ORSTOM,Paris,46,121p.

ROUKHINE.L.B.(1965)

Base de la lithologie.I.Etude des formations sédimentaires.
Ann.cent.Etud.et.Doc.Paleon,9.

- SIRCOULON.J.(1976)
Les sécheresses st les étiages.La récente sécheresse des
régions sahéliennes.
La Houille Blanche,6/7,pp.537-548.
- SOGREAH.SOGETHA. (1960)
Expertise relative aux études d'aménagement du Sénégal.
Première partie.Etude du fleuve Sénégal.Annexes-amélioration
de l'embouchure Sénégal.
Grenoble/Paris.SOGREAH-SOGETHA.
- SPRONCK.R.(1941)
Mesures hydrographiques dans la région divagante de bief
maritime du fleuve CONGO.
Mem.Inst.Roy.Colon.Sect.Sciences.Technol.,3,1,56p.
- SURVEYER,NENNIGER,CHENEVERT.(1972)
Etude de la navigabilité et des ports du fleuve Sénégal.
Etudes portuaires à ST-LOUIS , KAYES et AMBIDEDI.
En collaboration avec chr.OSTENFELD et W.JONSON
Danish-institute of applied hydraulics.
Projet ONU 51/71 ST-LOUIS OMVS.
- SYMOENS.J.J.(1968)
La minéralisation des eaux naturelles.
Hydrobiological survey of lake Bangwelu and Luapala river
basin.
Cercle hydrobiologique de Bruxelles.2.(1):1.59.
- THILO.J.(1910)
Documents scientifiques de la mission Thilo,1906-1919.
Imp-Nat,Paris,II,pp.553-600.
- TRICART.J.(1955)
Aspects sédimentologiques du delta du Sénégal.
In Geologischen rundschau;pp.384-397.
- TRICART.J.(1961)
Notice explicative de la carte géomorphologique du delta du
Sénégal.
Mémoire BRGM ,8,137p.
- TROCHAIN.J.(1940)
Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal.
Paris,Eds.Larose,434p.
- WANE.D.A.(1977)
Monographie climatique d'une station synoptique-ST-LOUIS
(1946-1975).Travail d'études et de recherches.Maitr(Géograph)
Univer.DAKAR,FAC.let.et.Sci.Hum.Juin 1977.

WOLLAST.R.(1974)

"The silica problem" in "the sea", vol.5, (E.D.Goldberg, ed),
Wiley-Interscience-New-York.

-oOo-

LISTE DES FIGURES

-ooo-

	PAGES
1 - SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DU SENEGAL.....	9
2 - PROFIL EN LONG DU FLEUVE SENEGAL DE BAKEL A ST-LOUIS (OMVS,1978).....	11
3 - DIRECTIONS DES VENTS AU SOL A ST-LOUIS (I.CHERET).....	16
4 - NORMALES DES MOYENNES DES TEMPERATURES A ST-LOUIS D'APRES (WANE A.,1977).....	17
5 - BASSIN DU SENEGAL (ISOHYETES,MOYENNES ANNUELLES) D'APRES ROCHETTE (1974).....	19
6 - PLUVIOMETRIE ET MOYENNES MOBILES ANNUELLES A ST-LOUIS (OLIVRY,1983).....	21
7 - CROQUIS STRUCTURAL DES BASSINS VERSANTS DU SENEGAL DE LA GAMBIE ET DE LA CASAMANCE (MICHEL,1973).....	26
8 - SONDAGES A ST-LOUIS (AUDIBERT,1970).....	27
9 - CROQUIS GEOMORPHOLOGIQUE ET GEOLOGIQUE DU DELTA DU SENEGAL (MICHEL,1969).....	29
10 - PRINCIPAUX STADES DE L'EVOLUTION DE L'EXTREMITÉ SUD-OUEST DU DELTA DU SENEGAL SELON MICHEL ET AUDIBERT (1969-1970).....	31
11 - REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA VEGETATION DES ETAGES ADLITTORAL ET PARALITTORAL DES DUNES LITTORALES	38
12 - REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA VEGETATION DANS LE DELTA DU SENEGAL	38
13 - LES COURANTS MARINS (REBERT,1977).....	44
14 - PLANS DE HOULE (GUILCHER,1954).....	45
15 - COURBES DE MAREES (ROCHETTE,1964).....	48
16 - EVOLUTION DES DEBITS MOYENS MENSUELS A DAGANA ET A BAKEL DE 1903 A 1983.....	54
17 - EVOLUTION DES ECOULEMENTS DU SENEGAL (m^3/s) DEPUIS 1903 A BAKEL ET A DAGANA.....	57
18 - VARIATION DES ECARTS A LA NORMALE DEPUIS 1903 A BAKEL ET A DAGANA.....	57

PAGES

19 - COMPARAISON DES ECOULEMENTS DU SENEGAL A BAKEL ET DAGANA.....	59
20 - FORMES DES HYDROGRAMMES A BAKEL ET A DAGANA.....	62
21 - LES CRUES TYPES A BAKEL (SOGREAH, 1972).....	63
22 - POSITION GEOGRAPHIQUE DE DIFFERENTES STATIONS CLIMATOLOGIQUES DU SENEGAL.....	68
23 - VARIATIONS DES MODULES DU FLEUVE SENEGAL A BAKEL DEPUIS 80 ANS	73
24 - COEFFICIENTS MENSUELS DE DEBIT A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL.....	75
25 - VARIATIONS DES HAUTEURS D'EAU JOURNALIERES A DAGANA DE MAI 1981 A AVRIL 1982.....	79
26 - VARIATIONS DES DEBITS JOURNALIERS A DAGANA AU COURS DU CYCLE HYDROLOGIQUE 1981.1982.....	80
27 - VARIATION DES DEBITS JOURNALIERS A DAGANA AU COURS DU CYCLE HYDROLOGIQUE 1982-1983.....	81
28 - VARIATION DES CONCENTRATIONS MOYENNES JOURNALIERES DES MATIERES EN SUSPENSION AVEC LES DEBITS A DAGANA EN 1981 ET EN 1982.....	84
29 - VALEURS MOYENNES DES CONCENTRATIONS EN FONCTION DES DEBITS MOYENS CORRESPONDANTS.....	86
30 - VARIATION DE LA GRANULOMETRIE DES SUSPENSION A ST-LOUIS DE 1981 A 1982.....	89
31 - DIFFRACTOGRAMMES DE POUDRE DES ECHANTILLONS BRUTS DES SUSPENSIONS DES EAUX DU SENEGAL A ST-LOUIS.....	91
32 - DIFFRACTOGRAMMES DE RAYONS X DE LA FRACTION < A 2 μ DES SUSPENSIONS DES EAUX DU SENEGAL A ST-LOUIS.....	93
33 - VARIATION SAISONNIERE DE LA CONDUCTIVITE.....	104
34 - VARIATION SAISONNIERE DE LA SALINITE (CHARGE TOTALE).....	105
35 - RELATION CONDUCTIVITE-SALINITE.....	106
36 - VARIATION SAISONNIERE DE LA TEMPERATURE DES EAUX DU SENEGAL A ST-LOUIS.....	107
37 - VARIATION SAISONNIERE DU Ph.....	108
38 - EVOLUTION DE LA CONCENTRATION DES ANIONS.....	109

39 - EVOLUTION DE LA CONCENTRATION DES CATIONS MAJEURS.....	110
40 - VARIATION DU RAPPORT CHLORE/SODIUM.....	111
41 - EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN SILICE.....	112
42 - VARIATIONS DES CONCENTRATIONS EN SILICE EN FONCTION DE LA SALINITE.....	112
43 - EVOLUTION DE LA SALINITE A DAGANA DE MAI 1981 A AVRIL 1983....	113
44 - EVOLUTION SAISONNIERE DE LA CHARGE ANIONIQUE ET CATIONIQUE....	116
45 - FLUX DE MATIERES DU FLEUVE SENEGAL.....	119
46 - LES DIFFERENTES PHASES DE L'INVASION MARINE ANNUELLE (GAC,1983).....	122
47 - DIFFERENTS ASPECTS DU TARISSEMENT ET DE L'INTRUSION MARINE....	124
48 - VARIATIONS SALINES ET THERMIQUES SAISONNIERES (PINSON-MOUILLOT,1980).....	125
49 - SECTIONS HYDROLOGIQUES DE SALINITE DE ST-LOUIS AU CAP VERT (PINSON-MOUILLOT,1980).....	126
50 - VARIATION DU NIVEAU DE LA MER AU COURS DE L'HOLOCENE AUTOUR DE LA PRESQU'ILE DU CAP VERT (ELOUARD ET al,1977; MONTEILLET,1977).....	127
51 - MECANISMES DE LA MIGRATION DE L'EMBOUCHURE DU SENEGAL. EVOLUTION DE LA POSITION DE L'EMBOUCHURE DE MARS 1958 A JANVIER 1983, (MONTEILLET ET al,1980).....	131
52 - DISTANCE ENTRE ST-LOUIS ET L'EMBOUCHURE (a).TEMPERATURES DE L'AIR DANS L'HEMISPHERE NORD (b).TEMPERATURE DE L'ATMOSPHERE (c) . EVOLUTION DU NIVEAU DE LA MER.....	133
53 - RELATION DEBIT/SALINITE MOYENNE DE BASE ($Q > 50\text{m}^3/\text{s}$) (ROCHETTE,1964).....	134
54 - RELATION TEMPS/SALINITE MOYENNE DE BASE ($Q < 50\text{m}^3/\text{s}$) (ROCHETTE,1964).....	135
55 - VARIATIONS INTERANNUELLES DES DIFFERENTES PHASES DE L'INTRUSION SALINE.....	140
56 - RELATION ENTRE LE DEBIT MOYEN ANNUEL ET LE TEMPS DE SEJOUR DES EAUX SAUMATRES.....	142

PAGES

57 -	RELATION ENTRE LE MODULE ET L'ABCISSE MAXIMALE ATTEINTE PAR LE FRONT SALE.....	142
58 -	L'INVASION MARINE EN 1980-1981.....	144
59 -	EVALUATION DES DIFFERENTES INVASIONS MARINES DEPUIS 1903.....	145
60 -	REMONTEES SALINES EN PERIODE SECHE (1974-1980) ET EN PERIODE HUMIDE (1953-1959).....	146
61 -	SHEMA APPROXIMATIF MONTRANT LA RELATION ENTRE LE TEMPS DE SEJOUR DES DIFFERENTES ISOHALINES ET LEURS POSITIONS RESPECTIVES PAR RAPPORT A L'EMBOUCHURE.....	148
62 -	REMONTEE DE LA LANGUE SALEE EN FONCTION DU DEBIT MOYEN ANNUEL (GAC ET al,1983).....	148
63 -	SHEMA APPROXIMATIF MONTRANT LA RELATION ENTRE LE DEPLACEMENT EN LATITUDE DES ISOHYETES ANNUELS ET LE MODULE DU FLEUVE (GAC ET al,1983).....	148
64 -	COMPARAISON ENTRE LES MODULES INTERANNUELS ET L'INTRUSION SALINE.....	150
65 -	ANTAGONISME FLUX D'EAU DOUCE - FLUX D'EAU DE MER.....	150
66 -	VARIATIONS SAISONNIERES DE LA SALINITE A ST-LOUIS, A DAGANA ET AU DJOUDJ.....	152
67 -	SITUATION GEOGRAPHIQUE DES STATIONS DE CONTROLE DE SALINITE...	157
68 -	EVOLUTION DE LA SALINITE DANS LA VALLEE D'OCTOBRE 1981 A JUILLET 1982.....	158
69 -	EVOLUTION DE LA SALINITE DANS LA VALLEE D'OCTOBRE 1982 A JUIN 1983.....	158
70 -	COMPARAISON ENTRE LES SALINITES OBSERVEES ET LES ESTIMATIONS A L'AIDE DES DIAGRAMMES DE ROCHETTE (1964) EN 1981-1982.....	162
71 -	COMPARAISON ENTRE LES SALINITES OBSERVEES ET LES ESTIMATIONS A L'AIDE DES DIAGRAMMES DE ROCHETTE (1964) EN 1982-1983.....	162
72 -	REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA PROGRESSION SAISONNIERE DU FRONT SALE DE 1981 A 1983.....	164
73 -	LES DIVERGENCES ENTRE L'OBSERVATION ET L'UTILISATION DES DIAGRAMMES DE ROCHETTE POUR DIFFERENTES VALEURS DU DEBIT CRITIQUE (50,20,5 m ³ /s).REPRESENTATION DE L'ISOHALINE 0.1‰.....	164

	PAGES
74 - RELATION DEBIT-SALINITE MOYENNE DE BASE ($Q > 20 \text{ m}^3/\text{s}$) EN PERIODE ARIDE.....	166
75 - RELATION TEMPS-SALINITE MOYENNE DE BASE ($Q < 20 \text{ m}^3/\text{s}$) EN PERIODE ARIDE.....	167

LISTE DES TABLEAUX

-oOo-

	PAGES
1 - PENTES MOYENNES DE LA LIGNE D'EAU.....	12
2 - FONDS MAXIMA ET MINIMA A LA BARRE SELON LES MOIS (A MEGLISTSKY. 1969).....	13
3 - TEMPERATURE MOYENNE A ST-LOUIS EN °C (GUEYE ,1980).....	18
4 - CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS REGIMES THERMIQUES EN °C (OMVS.1980).....	18
5 - PLUVIOMETRIE ANNUELLE A ST-LOUIS (OLIVRY,1983).....	21
6 - PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLES (1949-1978)..	22
7 - INSOLATION , HUMIDITE RELATIVE ET EVAPORATION MOYENNE A ST-LOUIS.....	22
8 - EVAPOTRANSPIRATION, VALEUR MENSUELLE EN mm (SECK.1981).....	23
9 - SUCCESSION DES GRANDES ETAPES DU QUATERNAIRE (MICHEL,1960, 1973,PINSON-MOUILLOT,1980).....	35
10 - AMPLITUDE ET MARNAGE (m) A DAKAR ET ST-LOUIS (LOUISE,1919.).	47
11 - COTES MOYENNES JOURNALIERES DU PLAN D'EAU A ST-LOUIS (SOGREAH,1961).....	49
12 - TEMPS DE PROPAGATION DE LA MAREE DANS LE DELTA DU SENEGAL (ROCHETTE,1974).....	50
13 - DEBITS MOYENS MENSUELS (m^3/s) A BAKEL ET A DAGANA POUR LA PERIODE 1903-1983.....	53
14 - DEBITS MOYENS MENSUELS DU SENEGAL A DAGANA DE 1903-1904 A 1983-1984.....	55
15 - DEBITS MOYENS MENSUELS DU SENEGAL A BAKEL DE 1903-1904 A 1983-1984.....	56
16 - MODULES (m^3/s) ET ECART A LA NORMALE DU FLEUVE SENEGAL A BAKEL ET A DAGANA DEPUIS 1968.....	59
17 - DEBITS ET HAUTEURS MAXIMUMS DU FLEUVE A BAKEL ET A DAGANA....	60
18 - TEMPS DE PROPAGATION DANS LE HAUT BASSIN (ROCHETTE,1974).....	64
19 - TEMPS DE PROPAGATION DU MAXIMUM DE LA CRUE DE BAKEL A MATAM ET DAGANA (ROCHETTE,1974).....	64

	PAGES
20 - TEMPS DE PROPAGATION DU MAXIMUM DE LA CRUE DE BAKEL A MATAM KAEDI, BOGHE, PODOR ET MATAM (ROCHETTE, 1974).....	65
21 - DECRUE A BAKEL (OMVS, 1978).....	66
22 - CARACTERISTIQUES DU TARISSEMENT (ROCHETTE, 1974).....	66
23 - ETIAGES ABSOLUS (m^3/s) DU SENEGAL A BAKEL.....	67
24 - EVOLUTION RECENTE DES HAUTEURS DE PRECIPITATION ANNUELLES (mm) .QUATRE STATIONS DE LA VALLEE DU FLEUVE SENEGAL (OLIVRY, 1983).....	70
25 - LES COEFFICIENTS MENSUELS DE DEBITS A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL.....	75
26 - RELEVES LIMNIMETRIQUES MOYENS JOURNALIERS (cm) DE MAI 1981 A AVRIL 1982 A DAGANA.....	77
27 - RELEVES LIMNIMETRIQUES MOYENS JOURNALIERS (cm) DE MAI 1982 A AVRIL 1983 A DAGANA.....	77
28 - DEBITS MOYENS JOURNALIERS (m^3/s) DE MAI 1981 A AVRIL 1982 A DAGANA.....	78
29 - DEBITS MOYENS JOURNALIERS (m^3/s) DE MAI 1982 A AVRIL 1983 A DAGANA.....	78
30 - TURBIDITE (mg/l) DES EAUX DU SENEGAL A KAYES AU COURS DES CRUES DE 1968 ET DE 1969 (SENEGAL-CONSULT, 1970).....	82
31 - MATIERES EN SUSPENSION (mg/l) DANS LES EAUX DU FLEUVE SENEGAL A SON EMBOUCHURE (STATION DE ST-LOUIS).....	85
32 - BILAN DES FLUX DE MATIERES EN SUSPENSION A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL.....	87
33 - GRANULOMETRIE (en %) DES MATIERES EN SUSPENSION A ST-LOUIS PENDANT LES CRUES 1981 ET 1982.....	90
34 - COMPOSITION CHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION DU FLEUVE SENEGAL, A ST-LOUIS (CRUE 1981-1982).....	98
35 - RECONSTITUTION (en %) DE LA DISTRIBUTION MINERALOGIQUE DANS LES MATIERES EN SUSPENSION DU FLEUVE SENEGAL A ST-LOUIS (CRUE 1981-1982).....	100
36 - EVALUATION DES FLUX DISSOUS CONTINENTAUX A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL (MAI 1981-AVRIL 1982).....	114
37 - COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DU SENEGAL. CONCENTRATIONS MOYENNES MENSUELLES (mg/l).....	115

PAGES

38 - COMPARAISON ENTRE LA COMPOSITION CHIMIQUE (mg/l) DES EAUX DU SENEGAL ET CELLE D'AUTRES RIVIERES AFRICAINES ET DU MONDE...	115
39 - EXTENSION DE LA LANGUE DE BARBARIE ET POSITION DE L'EMBOUCHURE DU SENEGAL DEPUIS 1658.....	132
40 - OCCURENCE DES DIFFERENTES PHASES DE LA PENETRATION SALINE...	138
41 - VARIATIONS ANNUELLES DE LA DUREE DES DIFFERENTES PHASES ET DE L'INTRUSION (jours); ABCISSE MAXIMALE ATTEINTE PAR LA SALURE (Km).....	140
42 - POSITIONS SUCCESSIVES DES DIFFERENTES ISOHALINES DANS L'INTERVALLE DE TEMPS OU LE DEBIT DECROIT DE 600 A 50 m ³ /s...	142
43 - POSITIONS SUCCESSIVES DES DIFFERENTES ISOHALINES PENDANT LA PERIODE D'ETIAGE CONSECUTIVE A LA CRUE 80-81.....	143
44 - POSITIONS SUCCESSIVES DES DIFFERENTES ISOHALINES AU COURS DE LA PHASE DE RETRAIT.....	143
45 - PENETRATION MAXIMALE MOYENNE DES DIFFERENTES ISOHALINES LORS DES SEQUENCES SECHES ET HUMIDES.POSITIONS AMONT EXTREMES OBSERVEES ENTRE 1903 ET 1983.....	146
46 - TAUX DE SALINITE ET TEMPS DE PRESENCE DES EAUX SAUMATRES EN DIFFERENTS SITES DE LA VALLEE.....	147
47 - EQUIVALENT "EAU DE MER" POUR LES INTRUSIONS SALINES DEPUIS 1903.....	149
48 - SALINITE (‰) AU PONT FAIDHERBE DE ST-LOUIS DE 1979 A 1983.	153
49 - SALINITE (‰) A LA LIMITE AMONT DU PARC DU DJOUDJ.....	154
50 - SALINITE (‰) A DAGANA DE 1979 A 1983.....	155
51 - EVOLUTION SAISONNIERE DE LA SALINITE (‰) DANS LA BASSE VALLEE DU SENEGAL DE MAI 1981 A JUILLET 1982.....	159
52 - EVOLUTION SAISONNIERE DE LA SALINITE (‰) DANS LA BASSE VALLEE DU SENEGAL D'OCTOBRE 1982 A JUIN 1983.....	160

TABLE DES MATIERES

	PAGES
SOMMAIRE.....	I-II
AVANT-PROPOS.....	1
INTRODUCTION.....	4
I - LA DECOUVERTE.....	4
A - L'EMBOUCHURE.....	4
B - LA BASSE VALLEE.....	4
C - LA CONNAISSANCE PROGRESSIVE DU BASSIN VERSANT PAR LES NAVIGATEURS PORTUGAIS AU XV SIECLE ET TROIS SIECLES DE MOUVANCE FRANCAISE.....	4
II - LE REGIME HYDROLOGIQUE DU FLEUVE SENEGAL AVANT 1903.....	5
A - UNE CERTITUDE : UN REGIME D'ABONDANCE AVANT 1903.....	5
B - LES CAUSES DU CHANGEMENT DE REGIME AU XX SIECLE.....	6
1 - Une diminution récente des précipitations.....	6
2 - Une accélération de la vitesse des crues	6
3 - Le déboisement.....	6
4 - Le défoncement du seuil de Faff.....	6
5 - L'accentuation progressive de l'aridité.....	6
III - L'OBJECTIF DE L'ETUDE.....	7

CHAPITRE I

CARACTERISTIQUES GENERALES DU BASSIN VERSANT

DU FLEUVE SENEGAL

I - LE CADRE PHYSIQUE.....	8
A - CADRE GEOGRAPHIQUE ET APERCU GENERAL SUR LE DELTA DU SENEGAL.....	8
1 - Le relief.....	8
2 - Le réseau hydrographique.....	8

	PAGES
B - LA FORMATION DU DELTA DU SENEGAL.....	10
C - LES CARACTERES TOPOGRAPHIQUES.....	10
1 - Profils en long.....	10
2 - Profils transversaux.....	12
D - LES PROFONDEURS D'EAU DANS LE FLEUVE SENEGAL.....	12
1 - Profondeurs dans le fleuve.....	12
a - Le grand bras.....	12
b - Le petit bras.....	13
2 - Profondeurs d'eau dans l'embouchure du fleuve.....	13
II - LE CLIMAT.....	13
A - LES FACTEURS DU CLIMAT.....	14
1 - Les centres d'action.....	14
a - L'anticyclone des Açores et les hautes pressions d'Afrique du nord.....	14
b - L'anticyclone de Sainte Helène.....	14
c - La dépression continentale d'origine thermique de l'Afrique de l'ouest.....	14
2 - Masses d'air et discontinuités.....	14
a - Les alizés.....	14
b - La mousson.....	14
c - Le front intertropical (F.I.T).....	15
d - Le front des alizés.....	15
B - LES ELEMENTS DU CLIMAT.....	15
1 - Les vents.....	15
2 - Les températures de l'air.....	15
3 - Les précipitations.....	18
a - Diminution des pluies du sud au nord.....	20
b - Analyse des précipitations à la station de ST-LOUIS.....	20
4 - Les autres éléments du climat.....	22
a - L'insolation.....	23
b - L'humidité relative.....	23
c - L'évaporation.....	23
d - Le bilan de l'eau.....	23
CONCLUSION.....	23

	PAGES
III - GEOLOGIE ET GEOMORPHOLOGIE.....	25
A - LES FORMATIONS DU PALEOZOIQUE.....	25
B - LES DEPOTS DETRITIQUES DU SECONDAIRE ET DU TERTIAIRE....	25
1 - Le secondaire.....	25
2 - Le tertiaire.....	25
C - LE QUATERNAIRE	28
1 - Le quaternaire ancien et moyen.....	28
2 - Le quaternaire récent.....	28
a - L'Ogolien (20-22000 B.P à 13000 B.P).....	28
b - Le Tchadien (10000 B.P à 6800 B.P).....	30
c - Le Nouakchottien (6800 B.P à 4200 B.P).....	30
d - Le Tafolien (4200 B.P à 2000 B.P).....	33
e - Le subactuel (2000 B.P à 400 B.P).....	33
f - L'évolution actuelle.....	34
IV - SOLS ET VEGETATION DU DELTA.....	36
A - ORIGINE DE LA SURSALURE DES SOLS.....	36
B - VEGETATION ET SOLS DES ZONES SAUMATRES ET SALEES.....	36
C - VEGETATION ET SOLS DES ETAGES ADLITTORAL , PARALITTORAL ET SUPRALITTORAL DU DELTA.....	37
1 - Les étages adlittoral et paralittoral.....	37
a - L'étage adlittoral.....	37
b - L'étage paralittoral.....	37
2 - L'étage supralittoral.....	37
a - La mangrove.....	37
b - Les vasières anciennes ou tannes.....	39
c - Les dunes Ogoliennes.....	39
D - SOLS ET VEGETATION DES GRANDES DEPRESSIONS ET DU WALO...	40
1 - Les cuvettes.....	40
a - Les dépressions argileuses de décantation.....	40
b - Les niayes.....	40
2 - Sols et végétation du Walo et de ses bordures	40

CHAPITRE II	PAGES
L'HYDROLOGIE MARINE ET CONTINENTALE	
I - L'HYDROLOGIE MARINE.....	42
A - LE PLATEAU CONTINENTAL.....	42
1 - Les fonds vaseux.....	42
2 - Les fonds de sable.....	42
B - LES ELEMENTS DE LA CIRCULATION OCEANIQUE GENERALE.....	42
1 - Les principaux courants.....	43
a - La saison froide.....	43
b - Les "up wellings".....	43
c - La saison chaude.....	43
2 - La houle.....	43
a - La houle de nord-ouest.....	43
b - Les houles du sud-ouest.....	46
3 - Les vagues.....	46
4 - La dérive littorale.....	46
C - LES MAREES.....	46
1 - Caractéristiques générales.....	46
2 - La marée océanique.....	47
3 - La marée fluviale.....	49
a - La marée fluviale dans la zone estuarienne.....	49
b - Propagation de la marée dans la basse vallée du fleuve.....	50
4 - Les courants fluviaux.....	51
a - En saison sèche.....	51
b - Renversement du courant.....	51
c - En période de crue.....	51
II - L'HYDROLOGIE CONTINENTALE.....	52
A - LE REGIME DU FLEUVE SENEGAL.....	52
1 - Le régime tropical humide de "transition".....	52
2 - Le régime tropical "pur".....	52
3 - Le régime sahélien.....	52

B - L'ABONDANCE FLUVIALE.....	53
1 - Bilan moyen annuel des écoulements.....	53
2 - Variabilité interannuelle, mensuelle et journalière..	58
3 - Etude des écoulements.....	58
a - Modules spécifiques.....	58
b - Modules bruts.....	58
c - Comparaison des écoulements à Bakel et à Dagana.	59
4 - Les maximum de la crue annuelle du Sénégal.....	60
a - Irrégularité et variabilité interannuelle des maximum.....	60
b - Forme de l'hydrogramme.....	61
5 - Propagation des écoulements en période de crue.....	61
a - Etude de la propagation dans le Sénégal inférieur.....	61
b - Temps et vitesse de propagation.....	61
6 - Etude du retrait des eaux.....	65
a - Le tarissement.....	65
b - Coefficient de tarissement.....	66
c - Les étiages très prononcés de la saison des basses eaux au cours de ces années sèches.....	66
C - LES SECHERESSES.....	67
1 - La notion de sécheresse.....	67
a - Problème de définition.....	67
b - Un milieu structurellement sec.....	68
c - Sécheresses conjonctuelles.....	68
2 - La sécheresse des années 1968 - 1984.....	68
a - Le déficit pluviométrique.....	68
b - Comparaison avec les sécheresses des années 1913-1940.....	71
c - Les causes des sécheresses.....	72

CHAPITRE III

LES FLUX CONTINENTAUX DE MATIERE PARTICULAIRE ET DISSOUTE A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL

I - LES CYCLES HYDROLOGIQUES 1981 - 1983 . LEUR ORIGINALITE DANS LE CONTEXTE GENERAL DES ENREGISTREMENTS DEPUIS 1903.....	74
--	----

	PAGES
A - LES MODULES BRUTS OU ABSOLUS.....	74
B - LES REGIMES SAISONNIERS ET LES COEFFICIENTS MENSUELS DE DEBIT.....	75
C - LA FAIBLESSE DES CRUES 1981-1982 et 1982-1983.....	76
II - LES APPORTS FLUVIAUX DE MATIERES EN SUSPENSION A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL.....	76
A - LES DONNEES ANTERIEURES.....	76
B - LE PROTOCOLE DES PRELEVEMENTS DE MATIERES EN SUSPENSION.	82
C - EVOLUTION SAISONNIERE DE LA TURBIDITE AU COURS DES CYCLES HYDROLOGIQUES 1981-1982 et 1982-1983.....	83
D - LE BILAN DE L'EROSION MECANIQUE - FLUX MENSUEL ET ANNUEL DES MATIERES EN SUSPENSION.....	87
E - CARACTERES GRANULOMETRIQUES , MINERALOGIQUES ET CHIMIQUES DES MATIERES EN SUSPENSION.....	88
1 - Caractères granulométriques.....	88
2 - Composition minéralogique.....	88
a - Etude des échantillons bruts sur diagrammes de poudre.....	90
b - Cortège argileux de la fraction fine des matières en suspension.....	90
3 - Composition chimique des matières en suspension.....	92
4 - Evaluation de la distribution des différentes phases à partir de la composition chimique des M.E.S.....	98
F - LES FLUX PARTICULAIRES QUANTITATIFS ET QUALITATIFS A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL.....	99
III - LES APPORTS DISSOUS D'ORIGINE CONTINENTALE A L'EMBOUCHURE DU FLEUVE SENEGAL.....	102
A - L'EVOLUTON DE LA CONDUCTIVITE ET DE LA SALINITE A L'EMBOUCHURE DU FLEUVE SENEGAL.....	103
1 - Variation saisonnière de la conductivité.....	103
2 - Variation saisonnière de la salinité.....	103
3 - Relation conductivité - salinité.....	107
B - EVOLUTION DE LA TEMPERATURE ET DU pH DES EAUX DU SENEGAL	
1 - Variation saisonnière de la température.....	107
2 - Variation saisonnière du pH.....	108

C - EVOLUTION DE LA CONCENTRATION DES ELEMENTS MAJEURS DANS LES EAUX DU SENEGAL A ST-LOUIS.....	108
1 - Les anions.....	108
2 - Les cations majeurs.....	111
3 - Le rapport Cl-Na.....	111
4 - La silice.....	113
D - EVALUATION DES FLUX DISSOUS QUANTITATIFS ET QUALITATIFS A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL.....	113
1 - Le bilan de l'altération chimique. Flux mensuels et annuels en éléments dissous.....	113
2 - Evolution saisonnière de la charge dissoute.....	114
3 - Evolution saisonnière de la charge anionique et cationique.....	114
a - Les anions.....	114
b - Les cations.....	117
c - La silice.....	117
IV - LES FLUX CONTINENTAUX DE MATIERES PARTICULAIRES ET DISSOUTES A L'EMBOUCHURE DU SENEGAL. LE BILAN DE L'EROSION MECANIQUE ET DE L'ALTERATION CHIMIQUE DANS LE BASSIN DU SENEGAL.....	117

CHAPITRE IV

L'INVASION SALINE DANS LA BASSE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

I - LES ANALYSES DES DONNEES ANTERIEURES.....	120
A - TEMOIGNAGES ANCIENS.....	120
B - LES OBSERVATIONS AU COURS DU XX SIECLE.....	121
II - CAUSES ET MECANISMES DE LA REMONTEE DES EAUX OCEANIQUES DANS LA VALLEE DU SENEGAL.....	121
A - LES CAUSES DE LA REMONTEE DES EAUX SALINES.....	121
1 - La morphologie du lit mineur.....	121
2 - Le régime du fleuve.....	122
3 - La puissance de la houle à l'embouchure.....	122
4 - La pente du talus continental.....	122
B - LES MECANISMES DE L'INTRUSION SALINE.....	122

	PAGES
III - PARAMETRES HYDROLOGIQUES ET FACTEURS REGULANT L'INVASION MARINE.....	123
A - LES MASSES D'EAU ET LEUR SALINISATION.....	123
1 - La saison chaude.....	123
2 - La saison froide.....	127
B - LE NIVEAU MARIN MOYEN.....	127
1 - Variations du niveau marin sur les côtes d'Afrique occidentale au cours des derniers millénaires.....	127
2 - Les oscillations annuelles du niveau marin.....	128
3 - Influence du niveau moyen sur la salinité.....	128
C - LE MARNAGE.....	128
D - LE DEBIT FLUVIAL.....	129
F - L'INTERVENTION DES NAPPES ET LE JEU DE L'EVAPORATION....	129
G - VARIATIONS DE LA MORPHOLOGIE ET DE LA POSITION DE L'EMBOUCHURE DU FLEUVE SENEGAL.....	129
1 - Caractéristiques de l'embouchure.....	129
2 - Mecanismes de la migration.....	130
3 - Facteurs de la translation.....	130
4 - Déplacements de l'embouchure depuis 1850.....	130
IV - FORMULATION DES PRINCIPES METHODOLOGIQUES DE ROCHETTE (1964) DIFFICULTES D'APPLICATION.....	133
A - LES PRINCIPES METHODOLOGIQUES DE ROCHETTE (1964).....	133
1 - Evolution de la salure à l'echelle d'une marée.....	133
2 - Evolution de la salure au cours de la décrue.....	133
3 - Le retrait des eaux saumâtres.....	136
B - LES DIFFICULTES D'APPICATION.....	136
1 - Le seuil des 600 m/s = début de l'invasion marine...	136
2 - Le seuil des 50 m/s = substitution du paramètre "temps" au paramètre " débit ".....	136
3 - Le seuil des 900.10 m / s et la relation temporelle entre les volumes écoulés à Bakel et à Dagana au début de la crue.....	137
V - L'INVASION MARINE DANS LA BASSE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL AU COURS DES 80 DERNIERES ANNEES (1903-1983).....	137
A - CARACTERISTIQUES ESSENTIELLES DE LA ZONE D'INTRUSION D'EAU SAUMATRE.CHRONOLOGIE DES DIFFERENTES PHASES.....	137

1 - Présence d'eau douce des sources à l'embouchure.....	139
2 - Le début de l'intrusion saline ,ce qui correspond à un débit inférieur à 600 m/s.....	139
3 - Interdépendance avec le paramètre débit.....	139
4 - Interdépendance avec le paramètre temps.....	139
5 - Le retrait de la salure.....	139
 B - RELATION DEBITS-TEMPS DE SEJOUR ET DEBITS-ABCISSE MAXIMALE.....	 141
1 - Relation entre module et temps de séjour des eaux saumâtres.....	141
2 - Relation entre module et abcisse maximale.....	141
 C - EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DE LA SALINITE DEPUIS 1903..	141
1 - Méthode d'évaluation du déplacement progressif des isohalynes.Représentation graphique de l'intrusion au cours du cycle 1980-1981 ,pris comme exemple.....	141
2 - Reconstitution de l'extension spatio-temporelle de la salinité dans la vallée du fleuve depuis 80 ans..	146
3 - Les incidences paléo-climatiques	147
4 - Relation entre les modules interannuels et l'ampleur de l'intrusion saline.....	147
 VI - ETUDE DE LA REMONTEE SALINE AU COURS DES CYCLES HYDROLOGIQUES 1981-82 et 1982-1983.....	 151
 A - LES QUATRES STATIONS-CLEFS DE ST-LOUIS,DU DJOUDJ,DE DAGANA ET DE PODOR.....	 151
1 - Variations saisonnières de la salinité à St-Louis (Km22).....	152
2 - Variations saisonnières de la salinité à la limite amont du parc national du Djoudj (Km.102).....	154
3 - Variations saisonnières de la salinité à la hauteur du lac de Guiers (Km.167).....	154
4 - Variations saisonnières de la salinité à Dagana (Km 192).....	155
5 - Variations saisonnières de la minéralisation des eaux fluviales à Podor (Km.292).....	156
 B - OBSERVATIONS DE 1981 A 1983 DE L'EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DE LA SALINITE DANS LA BASSE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL.....	 156
1 - Position géographique des stations et les différentes campagnes de contrôle de la salinité.....	156
2 - Progressions saisonnières du front salé de 1981 à 1983.....	156
 VII - PROPOSITIONS NOUVELLES DE MODELISATION DE L'INTRUSION SALINE DANS LA VALLEE DU SENEGAL.....	 161

PAGES

A - CONFRONTATION ENTRE LES ESTIMATIONS DU MODELE DE ROCHETTE ET LA REALITE DES OBSERVATIONS.....	161
B - LES ALTERNATIVES DE MODIFICATIONS DES DIFFERENTS SEUILS.	163
1 - La prise en compte des migrations de l'embouchure et de sa section.....	163
2 - Le debut de l'intrusion saline:le seuil de 600m/s...	163
3 - La substitution du paramètre "temps" au paramètre "débit":les seuils de 50,20 et 5m/s.....	163
C - PROPOSITIONS DE NOUVEAUX DIAGRAMMES FIXANT LA SALINITE MOYENNE A UNE DISTANCE DONNEE DE L'EMBOUCHURE EN EPISODE ARIDE.....	165
CONCLUSIONS GENERALES.....	168
BIBLIOGRAPHIE.....	171
LISTE DES FIGURES.....	188
LISTE DES TABLEAUX.....	193
TABLE DES MATIERES.....	196