

---

Institut Français de Recherche Scientifique  
pour le Développement en Coopération

ORSTOM

Fondation Universitaire Luxembourgeoise

FUL

Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

ISRA

Université de DAKAR Département de Géographie

PROGRAMME CEE - ORSTOM N° TS2 0198-F EDB

Projet EQUÉSEN

ENVIRONNEMENT ET QUALITE DES EAUX DU SENEGAL

Rapport scientifique n°3

Jean Yves GAC

ORSTOM

avec la collaboration de

P. CECCHI, F.X. COGELS, A. KANE, B. MILLET J.L. SAOS

Octobre 1990

---

## INTRODUCTION

Le programme pluridisciplinaire EQUÉSEN sur "l'Environnement et la qualité des eaux du Sénégal" bénéficie d'un appui financier de la CEE (contrat CEE-ORSTOM n° TS2 0198 F EDB). Le projet regroupe différentes équipes de recherches appartenant d'une part à la communauté européenne (ORSTOM et FUL) et hors communauté d'autre part (ISRA et Université de Dakar).

Depuis le second rapport d'avril 1990 des collaborations diverses ont été nouées d'une part avec le Centre de Météorologie Spatiale de Lannion pour l'étude de l'imagerie satellitaire sur le haut bassin versant du fleuve Sénégal et d'autre part, de manière conjoncturelle, avec l'Université du Québec à Montréal. En effet le laboratoire GEOTOP de cette université se propose de mener au niveau de la basse vallée du Sénégal (lac de Guiers et Ferlo) un programme tout à fait complémentaire du projet EQUÉSEN. Leurs objectifs sont de trois ordres:

- la description temporelle du contenu inorganique, bactériologique et physico-chimique de l'écosystème lac de Guiers/bas-Ferlo (le criblage bactériologique concernant les coliformes totaux et/ou fécaux, les bactéries totales et les levures),

- la mesure du taux de sédimentation ou d'ensillement dans un contexte paléoclimatique,

- la mesure des importances respectives des apports alluvionnaires fluviaux et éoliens en vue de mieux comprendre l'évolution passée et le devenir du lac et du Bas Ferlo.

Cette note de synthèse constitue le troisième rapport scientifique établi sur l'état d'avancement du programme au 1 novembre 1990. Il com-porte les premiers résultats des travaux sur les différents thèmes de recherches et surtout un important volet sur la formation avec la sou-tenance de quatre thèses dont 2 au Sénégal (Dakar), 1 en Belgique (Mons) et 1 en France (Strasbourg). La première a été soutenue le 22 mai à Dakar et les trois autres sont fixées au 28 novembre 1990, au 4 et au 20 décembre 1990 (Jean Yves GAC participe aux quatre Jury de thèses).

### 1.- PRESENTATION DES EQUIPES DE RECHERCHES

POUYAUD B. : Responsable Scientifique du projet, Responsable du Département Eaux Continentales de l'ORSTOM, Directeur de Recherche. spécialité: hydrologie.

GAC J-Y. : Directeur de recherche de l'ORSTOM, affecté pour la durée du projet au Sénégal, coordinateur des études hydrogéochimiques sur l'ensemble du fleuve. spécialité: géochimie.

APPAY J-L. : V.S.N. affecté pour une durée de 14 mois au Sénégal. Spécialité: ingénieur hydrologue. Départ prévu le 4 décembre 1990.

CECCHI P. : Allocataire de recherche, détaché à l'ISRA. Spécialité: hydrobiologie. En rédaction de thèse sur la production primaire à Montpellier (France).

COGELS F-X. : Professeur à l'Université d'Arlon en Belgique. Spécialité: hydrobiologie, zoologie.

CORBIN D. : Technicien de la Recherche, détaché à l'ISRA. Spécialité: hydrobiologie

DIAGANA M. : Etudiant, thèse de 3ème cycle, Université de Dakar. Spécialité: Hydrogéologie

DIALLO M. : Etudiant, thèse de 3ème cycle, Université de Dakar. Spécialité: climatologie.

DIAO S.M. : Etudiant, Mémoire de DEA, Université de Dakar. Spécialité : hydrogéologie.

EVORA Noël : Etudiant, thèse de 3ème cycle, Université de Mons (Belgique). Spécialité : hydrologie. Soutenance de thèse le 28 novembre à Mons.

KANE A. : Assistant au Département de Géographie de l'Université de Dakar. Spécialité: géographie physique.

LABROUSSE B. : Chargé de recherche de l'ORSTOM, affecté pour la durée du projet au Sénégal. Spécialité: sédimentologie.

MILLET B. : Chargé de recherche de l'ORSTOM, affecté temporairement au Sénégal et détaché à l'ISRA. Spécialité: hydrodynamique.

SAOS J-L. : Chargé de recherche de l'ORSTOM, affecté pour la durée du projet au Sénégal. Spécialité: hydrogéologie.

### Pour Partie

CARN M. : Ingénieur d'étude de l'ORSTOM détaché au centre de Météorologie Spatiale de Lannion. Spécialité: Télédétection.

GUILLOT B. : Chargé de Recherche de l'ORSTOM détaché au centre de Météorologie Spatiale de Lannion. Spécialité: Télédétection.

OLIVRY J.C. : Directeur de Recherche de l'ORSTOM. Spécialité: hydrologie.

ORANGE D. : Allocataire du projet du 1 avril au 1 octobre 1990. Spécialité : géochimie et paléoclimatologie. Soutenance de thèse le 4 décembre à Strasbourg (France).

### Collaborations diverses

GAYE C.B. : Assistant au Département de géologie de l'Université de Dakar. Spécialité : isotopes. Soutenance de thèse le 4 décembre 1990 à Dakar.

SCHMITT J.P. : Professeur à l'Université du Québec à Montréal. Spécialité : chimiste,

LEGER D. et GHEDIN E. : Etudiantes à l'Université du Québec à Montréal. Spécialité : bactériologistes.

## 2.- MISE EN PLACE DES CREDITS

La date contractuelle du projet a été fixée au 1 avril 1989. La durée est de 3 ans. Nous en sommes aujourd'hui à mi-parcours.

Le premier rapport financier a été établi le 1 avril 1990. Les équipements majeurs sont en place et les différentes équipes bien organisées autour des différents volets du programme.

Les futures délégations de crédit devraient s'effectuer plus rapidement. D'ores et déjà, il serait nécessaire de reconsidérer dans la mesure du possible la répartition dans les différents chapitres.

### 3.- RAPPORT SCIENTIFIQUE

#### 1.- REPARTITION DES TACHES ENTRE LES PARTENAIRES.

a) Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM).

Etudes des flux de matières dissoutes et particulaires, de la qualité des eaux de surface dans l'ensemble du dispositif fluvio-lacustre et des relations nappes/fleuve.

b) Fondation Universitaire Luxembourgeoise (FUL, Belgique)

Etude de la gestion globale des eaux du lac de Guiers et mise au point d'un modèle mathématique pour la valorisation du potentiel agricole du milieu.

c) Université de Dakar (Département de Géographie, Sénégal)

Etude géomorphologique du façonnement des paysages, de l'évolution géomorphologique et sédimentologique de l'estuaire et des transformations dans les zones en voie d'aménagement.

d) Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaroye (CRODT/ISRA, Sénégal)

Etude de la structuration des masses d'eau, de l'hydrodynamique et de la production primaire.

**B.- ETUDE GEOMORPHOLOGIQUE DU FACONNEMENT DES PAYSAGES, DE L'EVOLUTION GEOMORPHOLOGIQUE ET SEDIMENTOLOGIQUE DE L'ESTUAIRE ET DES TRANSFORMATIONS DANS LES ZONES EN VOIE D'AMENAGEMENT.**

*Rapport Scientifique présenté par Alioune KANE  
Responsable de l'action de Recherche du Département de Géographie  
Fac. des Lettres et des Sc. humaines, Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar*

Cette note constitue le troisième rapport scientifique dans le cadre du projet EQUASEN qui bénéficie d'un appui financier de la CEE. La délégation budgétaire n'étant parvenue qu'en février 1990, l'acquisition d'images satellitaires pour l'étude de l'évolution des paysages n'a pu encore se faire. La persistance de la tension sénégal-mauritanienne ne facilite pas les travaux sur le lac de retenue en amont du barrage de Diama (profils topo-bathymétriques). Cette troisième contribution au projet EQUASEN portant essentiellement sur la dynamique des environnements sédimentaires (delta et basse vallée du fleuve Sénégal) est le fruit de la collaboration d'équipes pluridisciplinaires mettant en relation plusieurs chercheurs (géographe, géomorphologue, géologue, sédimentologue et hydrologue) appartenant à des organismes différents.

La synthèse ci-dessous résume les travaux entrepris et les résultats essentiels qui figurent dans la publication jointe au rapport " Evolution de l'estuaire du fleuve Sénégal. Données hydrodynamiques, morphologiques et sédimentologiques" de A. KANE et de B. DIOUF (1990).

Au cours de la période d'avril 1990 à novembre 1990, les travaux de recherches sur le terrain se sont poursuivies dans le cadre du programme CEE - ORSTOM, n° TSE 0198 F (EDB) (Projet EQUESSEN : Environnement et qualité des eaux du Sénégal).

Au total 3 tournées ont été effectuées pour :

- mettre en place un dispositif de mesure de la sédimentation dans les cuvettes de décantation du bas-estuaire.
- prélever des échantillons aussi bien d'eau et de sédiments à la station principale de Diama (saison des hautes eaux : Aout-Septembre jusqu'à la mi-octobre.
- effectuer des mesures de paramètres physico-chimiques (Station de Diama) et les vitesses du courant fluvial (station de Gandiol).

Monsieur Abdoulaye FAYE, étudiant de maîtrise, a effectué plusieurs missions dans le bassin de l'axe Gorom-Lampsar. Son travail d'étude et de recherche sur le thème "eau et milieu physique" sera soutenu dans le courant du mois de décembre.

### RESULTATS PRELIMINAIRES

D'une manière générale, la saison des hautes eaux 1990, s'est caractérisée par :

- d'importants déficits pluviométriques enregistrés dès le début de la saison ; plus de 25 % à la station de Nianga au mois de juillet.
- les lames d'eau écoulées n'ont pas permis un remplissage correct des axes comme le Gorom-Lampsar.
- l'ouverture des vannes du barrage de Diama ne s'est pas réalisée entièrement (palier 24), elle s'est faite irrégulièrement en fonction des disponibilités en eau et de la demande surtout pour l'irrigation.

Les mesures physico-chimiques effectuées in situ ont montré :

- . une eau douce partout dans l'estuaire dès le début du mois d'août ;
- . une profondeur peu importante de disparition du disque de SECCHI (entre 13 cm et 15 cm) ;
- . des conductivités faibles : de 0,07 ms/cm à 0,29 ms/cm ;
- . des températures voisines de 30° C ;
- . un pH neutre ;
- . des valeurs de teneurs en substances dissoutes comprises entre 87,0 mg/l et 34,5 mg/l ;
- . les concentrations de matières en suspension ne sont pas encore déterminées.

Les eaux de la crue annuelle ne subissent de changements remarquables qu'à partir de l'amorce de la décrue.

Si le fonctionnement estuarien paraît normal, avec un équilibre relatif entre les durées d'écoulement du flot et du jusant, les maxima de vitesses sont surtout enregistrées lors du jusant.

Il faut noter que lors de la saison des hautes eaux 1990, les vannes du barrage de Diama, maintenues à des paliers très bas (3 à 4) ont considérablement amoindri la puissance du courant fluvial (maximum de 67 cm/s en surface et de 60 cm/s en profondeur).

Aussi les effets du marnage sont perceptibles à Gandiole, situation nouvelle par rapport à la période d'avant-barrage.

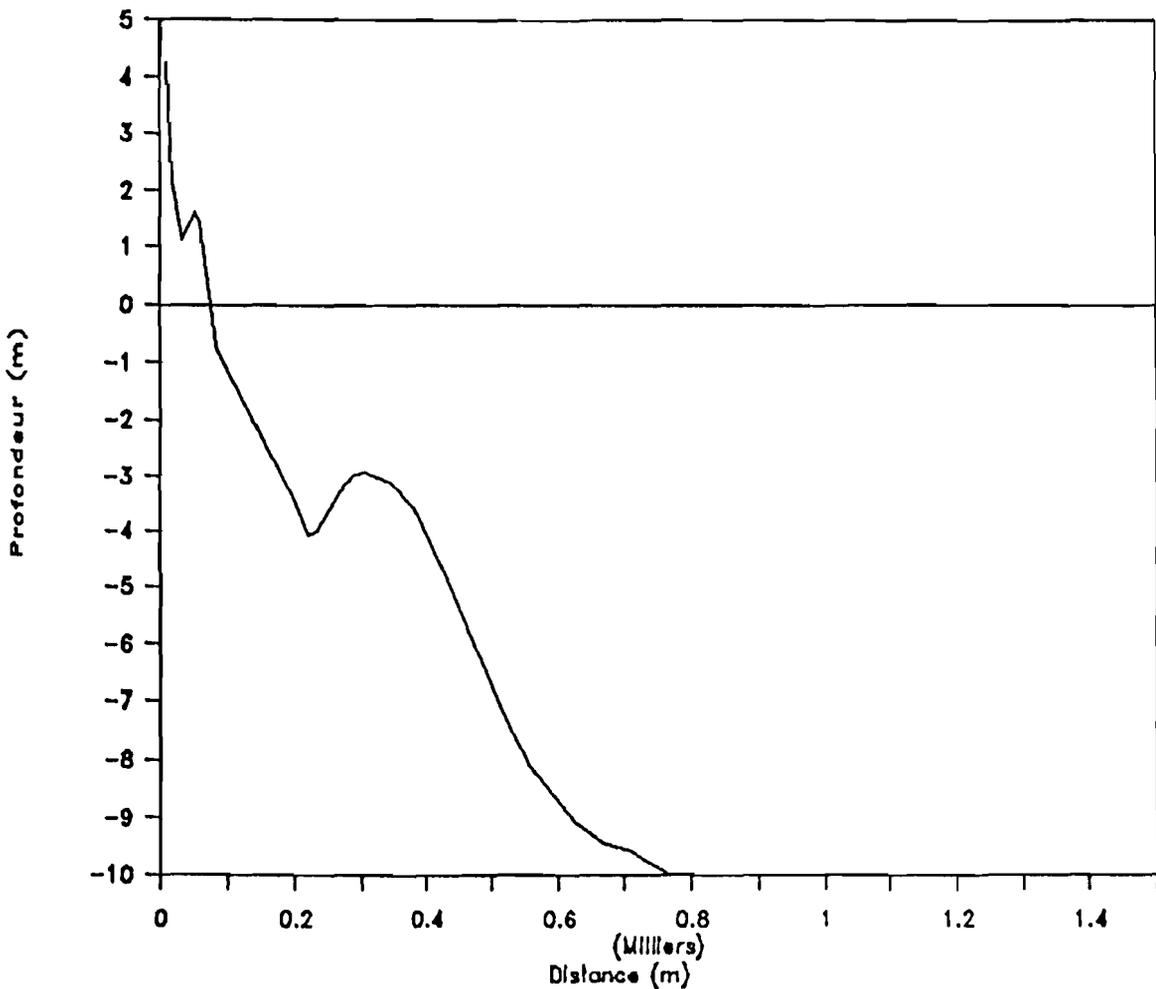
Les profils topo-bathymétriques réalisés dans le chenal fluvial montrent des fonds irréguliers, tapissés d'amas coquilliers qui deviennent

vaseux à sableux au fur et à mesure que l'on se rapproche des berges.

Les premiers résultats des analyses granulométriques montrent une distribution assez homogène du matériel sédimentaire en fonction de la profondeur.

Les résultats des analyses de laboratoires, confrontés aux profils prélevés permettront de mieux saisir l'évolution morphologique du chenal et de l'avant-côte.

### PROFIL TOPOBATHY (BAR 1M) JUIN 90



**C.- ETUDE DU FONCTIONNEMENT DES NAPPES ET RELATIONS  
EAUX DE SURFACE/ EAUX SOUTERRAINES**

*Rapport présenté le 5/11/90 par Jean Luc SAOS  
Chargé de Recherches  
Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement  
en Coopération (ORSTOM)*

Depuis Avril 1990, les travaux se sont poursuivis principalement sur les sites d'étude 1 (Delta) et 2 (Richard-Toll - lac de Guiers). Travaux à partir de la Banque de données de la cellule des eaux souterraines de l'OMVS à St Louis, travaux sur le terrain (mesures in situ, prélèvements pour analyses) saisies et traitements informatiques des données.

**1- Principales actions menées sur le terrain**

1.1) le fleuve Sénégal : étude de l'interface eau/sédiment : 2 nouvelles campagnes de mesures ont été faites dans l'estuaire; l'une en juin, avant la saison des pluies et l'autre en octobre après la "crue". Le but était d'observer, sur de mêmes profils bathymétriques, une évolution éventuelle de la sédimentation. Ces campagnes communes aux différents programmes de projets ont été réalisées avec la logistique du projet EQUÉSEN, de l'EPEEC, et du projet CAMPUS (embarcation, echosondeur, benne, géodimètre laser, conductivimètre, PH mètre, etc..)

1.2) Chronique isotopique du fleuve : Nous avons effectué une première série de prélèvements sur les eaux du fleuve à l'étiage, entre Manantali et Diama. Les analyses isotopiques O 18, Deuterium sont en cours.

**1.3) Les nappes**

1.3.1) Poursuite du suivi mensuel du réseau de piézomètres et puits du site 2 Richard Toll - Dagana - Lac de Guiers - Ferlo.

1.3.2) Campagne de prélèvements pour analyses chimiques et isotopiques dans les puits et piézomètres du réseau avec extension vers la dépression piézométrique du Ferlo, et sur un transect Nord-Sud à partir du fleuve (Dagana).

1.3.3) Premiers essais sur le terrain de la méthode géophysique AMT, tentative de mise au point de l'appareillage (qui s'est avérée très délicate, les températures étant trop excessives au mois de Mai : 46° sous abri). Les campagnes de mesures sont reportées en

période plus fraîche ( de janvier à avril).

## 2 - Les résultats :

2.1) le fleuve : Les 2 campagnes menées dans l'estuaire en juin et octobre (avant et après la "crue") montrent peu d'évolution dans les profils bathymétriques. Les résultats préliminaires des analyses des sédiments semblent confirmer cette stabilité.

Les résultats des analyses isotopiques sur les premiers prélèvements des eaux du fleuve entre Manantali et Diama, envoyés à Vienne (AIEA) ne nous sont pas encore parvenus.

### 2.2) Données hydro-pluviométriques

Pluviométrie : les données des stations de St-Louis, Ross-Béthio, Richard Toll, Dagana, Podor, Louga, Wildou et Linguere nous ont permis de tracer les isohyètes pour les années 87, 88, et 89. L'année 87 s'est distinguée par un fort déficit pluviométrique, spécialement marqué sur le lac de Guiers (Cf. fig. 1). Les années suivantes se rapprochent des années moyennes et les isohyètes 200 mm et 400 mm encadrent la zone Richard Toll - Lac de Guiers (fig. 2 et 3).

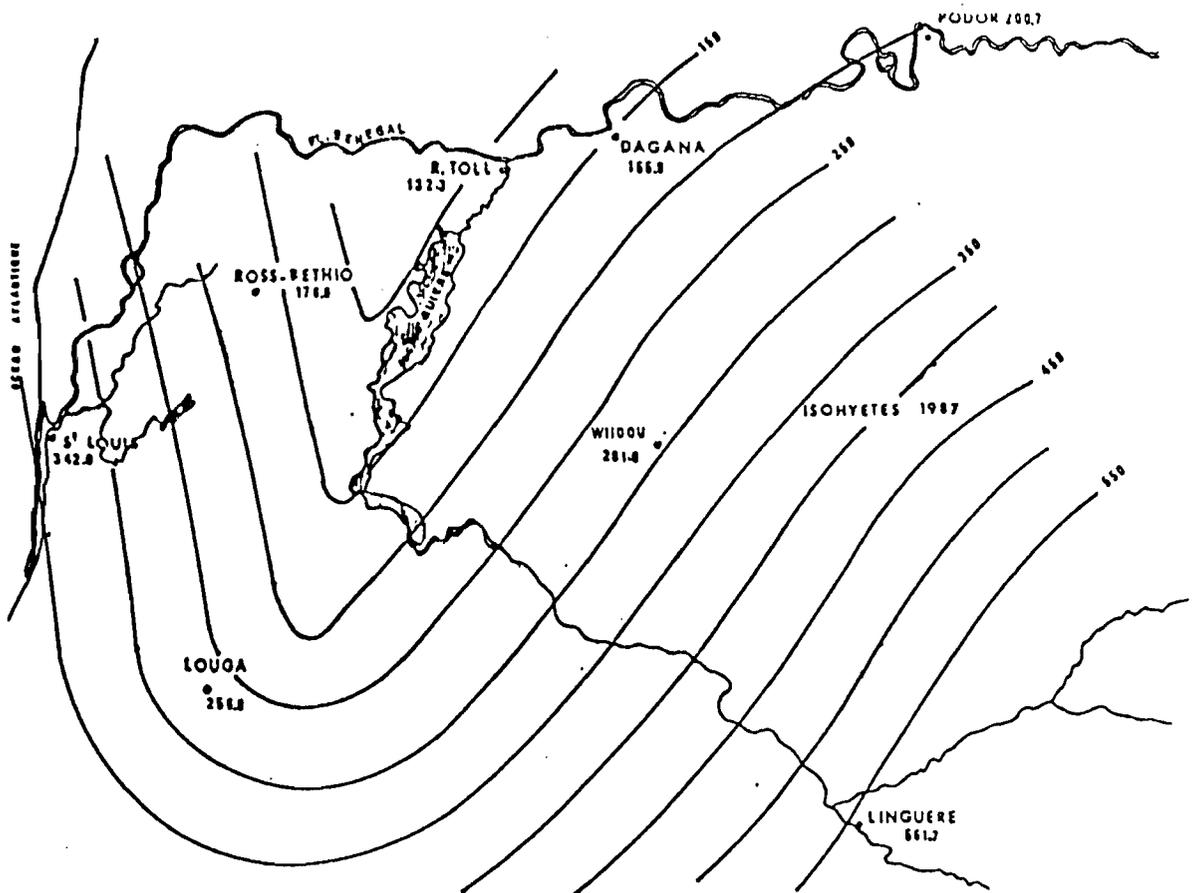


Fig. 1 - Isohyètes pour l'année 19

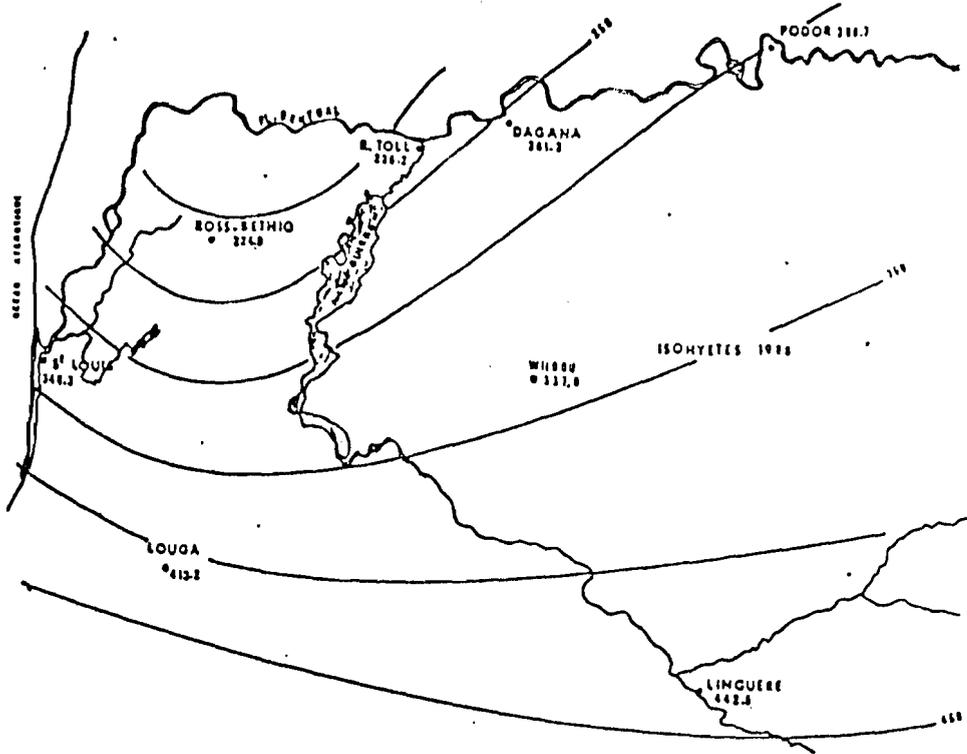


Fig.2 - Isohyètes pour l'année 1988

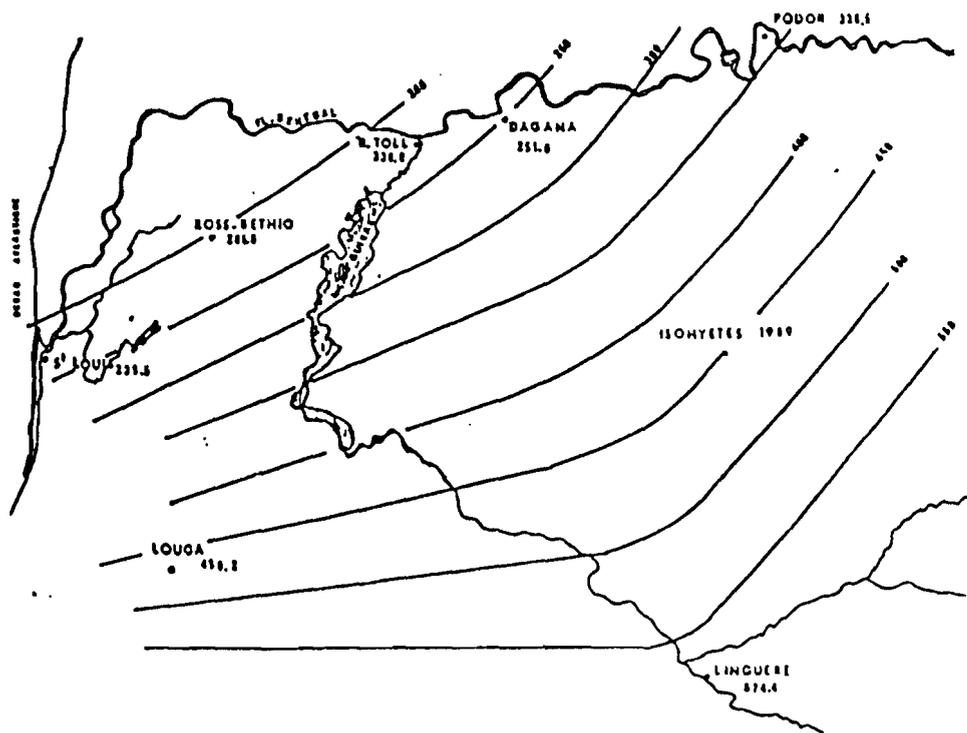


Fig.3 - Isohyètes pour l'année 1989

Variation des plans d'eau : Le remplissage de la retenue de Manantali et les faibles pluies sur le haut bassin ont limité la montée des crues (fig. 4).

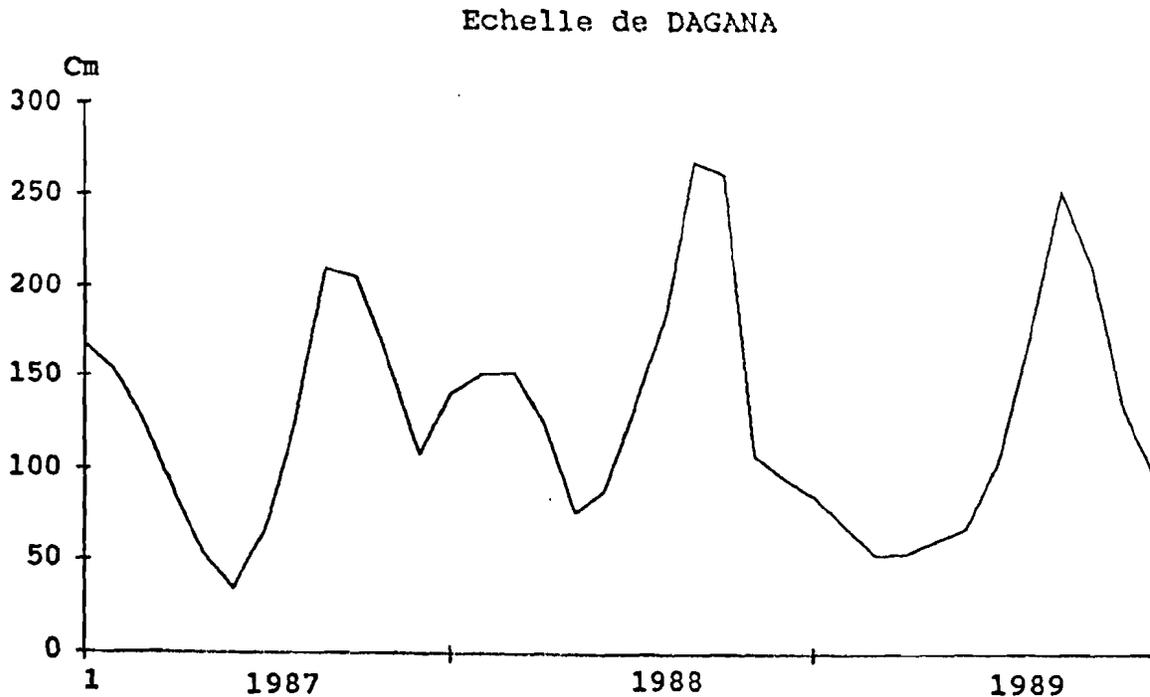


Fig 4 - Evolution de la cote du fleuve Sénégal de 1987 à 1989

Fig 4 - Evolution de la cote du fleuve Sénégal de 1987 à 1989

### 2.3) les nappes :

#### - piézométrie :

Les mesures dans les piézomètres et les puits nous ont permis d'établir des cartes piézométriques en fin de saison sèche et en fin de saison des pluies . La surface piézométrique est généralement irrégulière; dans la zone étudiée, nous rencontrons une succession de dépressions et de dômes piézométriques (Fig.5)

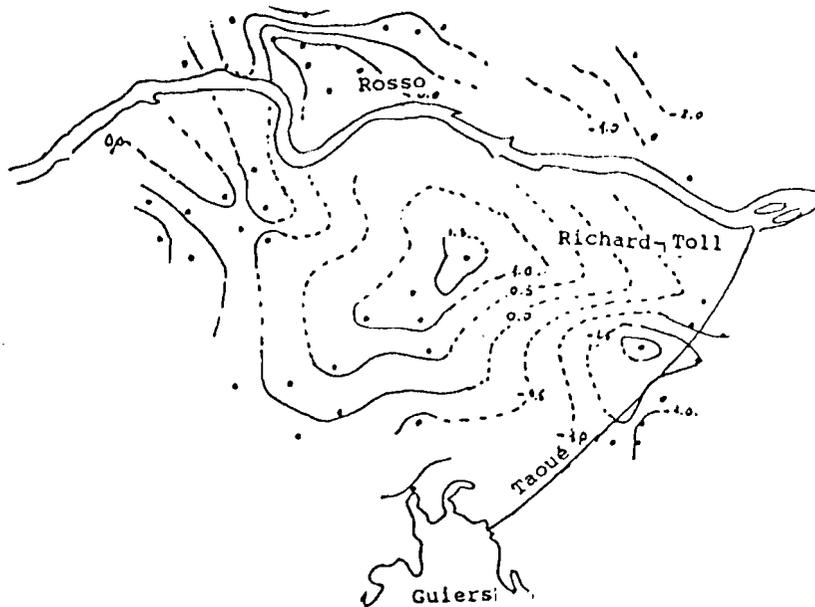


Fig.5: Carte piezométrique de la nappe alluviale en Juin 89

Ces dômes ont un battement saisonnier maximum de la côte IGN 0 m à + 2 m (plaine de M'Pourié, près de Rosso). Les dépressions plus nombreuses varient de la côte + 1 m à - 2 m (plaine de la Taoué) et peuvent atteindre des côtes de - 2,5 m (Garak, NE de Rosso). La forme de la surface piézométrique est en relation avec la morphologie. Elle dépend également de la nature de l'aquifère (sédiments + ou - argileux) et des activités hydro-agricoles (irrigation, drainage, pompage).

- Chimie des eaux :

Les nappes sont très fortement minéralisées surtout de type chlorurées sodiques. Le PH est généralement élevé (7,2 à 7,8).

2.4) Relations nappe / plans d'eau

Les observations qui ont été poursuivies sur les piézomètres situés à proximité du fleuve et du lac confirment le caractère limité des relations entre les eaux du lit mineur du fleuve et du lac et celles de la nappe phréatique.

Ces résultats seront exposés dans un mémoire de DEA de Géologie appliquée option hydrogéologie qui sera soutenu en Décembre 1990.

**D.- ETUDE DE LA GESTION GLOBALE DES EAUX DU LAC DE GUIERS ET  
MISE AU POINT D'UN MODELE DE GESTION POUR LA VALORISATION  
AGRICOLE DU MILIEU**

*Etat d'avancement des travaux*

*Rapport présenté par F. X. COGELS*

*Fondation Universitaire Luxembourgeoise (FUL)*

*Arlon (Belgique)*

**1 - Hydrologie du lac**

**1.1 - Bilan hydrologique et fonctionnement du lac de 1976  
à 1989**

L'étude est achevée et finalisée par le rapport ci-joint réalisé avec la collaboration de Jean Yves Gac.

Elle est axée sur :

- la définition du fonctionnement ancien et actuel du lac,
- la quantification des termes entrées-sorties des bilans hydrologiques annuels : pompages divers, évaporation, transferts au fleuve, apports fluviaux, rejets des zones irriguées et apports pluviométriques.

Ces divers paramètres sont donc maintenant connus et seront pris en considération plus tard dans le cadre de la recherche et de l'application du modèle global de gestion du lac.

**Collaboration :**

Un chercheur Sénégalais a été associé à l'étude (Ing. N. EVORA) dans le cadre d'une thèse de 3<sup>ème</sup> cycle réalisée au Sénégal et qui sera présentée le 28 novembre 1990 à la Faculté Polytechnique de Mons en Belgique (membres du jury MM. COGELS et GAC).

**1.2 - Etude de l'évaporation du lac**

L'évaporation est l'un des termes clé du bilan hydrologique.

L'étude a permis de quantifier l'évaporation et son évolution mensuelle de 1976 à 1989. Elle compare aussi l'évaporation calculée au lac avec celle mesurée en bac aux mêmes périodes puis tente une interprétation de l'évolution du paramètre avec celle des éléments du climat.

L'étude est quasi-terminée. Le rapport est en cours de rédaction et devrait être rendu au 1/1/1991.

## 2 - Qualité des eaux

### 2.1 - Qualité générale des eaux

Les campagnes de mesure se sont poursuivies à un rythme mensuel sur 16 stations réparties sur le lac. Elles concernent les éléments chimiques majeurs. L'étude en est donc encore au stade de l'acquisition de données qui doit d'ailleurs se poursuivre jusqu'à la fin du projet.

Le traitement et l'interprétation de ces données débiteront courant 1991.

#### Collaboration :

Le laboratoire "GEOTOP" de l'Université du Québec à Montréal, dirigé par J.P. SCHMITT a souhaité être associé à l'étude. Il assure maintenant l'analyse des éléments à l'état de traces. Cette contribution est importante dans la mesure où d'une part la panoplie des éléments dosés devient plus importante avec par exemple l'analyse d'éléments tels que l'arsenic, le césium, le dysprosium... et d'autre part par la définition d'une limite de détection des éléments au niveau du  $\mu\text{g/l}$ .

### 2.2 - Choix d'une station de référence

Le but est de pouvoir à l'avenir déterminer la salinité moyenne du lac à partir d'une seule station, ce qui faciliterait évidemment le travail. La station de la Société Nationale d'Exploitation des Eaux de Sénégal (SONEES) est installée sur la rive Ouest du lac et effectue quotidiennement le dosage des chlorures dans le lac.

Toutes les données depuis 76 ont été reprises et encodées.

Nous en avons commencé l'interprétation qui devra être menée de pair avec celle relative à la qualité générale des eaux.

## 3 - Modèle de gestion du lac

Nous en sommes au stade de la définition des critères de gestion future du lac, le modèle lui même devra être mis au point par la suite.

Quatre critères sont pour l'instant à l'étude :

- La politique de gestion future des barrages de Diama et de Manantali sur le fleuve Sénégal.

- La planification des besoins futurs des divers consommateurs autour du lac.

- Les risques de développement de la végétation et ses conséquences sur l'hydraulique du lac et la santé publique

- La valorisation des abords du lac par les cultures de décrue.

D'autres critères viendront peut-être s'ajouter plus tard.

#### Collaboration :

Cette étude en est à ses débuts. Elle s'effectue en collaboration avec l'Institut des Sciences de l'Environnement de la Faculté de Dakar. Un étudiant (B. NDIAYE) y collabore dans le cadre d'un mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle à l'Université de Dakar.

## E.- ETUDE DU PHYTOPLANCTON ET DE L'HYDRODYNAMIQUE DES MASSES D'EAU DANS L'ESTUAIRE DU FLEUVE SENEGAL

*Rapport présenté par Philippe CECCHI et Bertrand MILLET  
Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaroye  
Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA)*

Ce document constitue le troisième rapport d'avancement relatif à notre intervention dans la basse vallée du fleuve Sénégal dans le cadre du programme EQUESSEN. Il reprend in extenso les points principaux évoqués dans le second rapport par suite de la soutenance de thèse de P. CECCHI qui devrait avoir lieu dans les tous premiers mois de 1991.

Les tensions frontalières nous ont contraint à limiter provisoirement nos activités à la partie estuarienne du fleuve en attendant le retour à une situation plus sereine dans sa partie amont.

Le présent document a donc pour objet de présenter, en la justifiant, la problématique scientifique adoptée suite à la restriction de notre zone d'étude.

### 1.- SITUATION

L'estuaire du fleuve Sénégal (fig. 1) peut schématiquement être décrit par :

- sa limite amont imposée par le barrage anti-sel de Diama dont le fonctionnement est relativement simple. Les vannes sont largement ouvertes durant la crue autorisant ainsi l'invasion de l'ensemble de l'estuaire par les eaux continentales. Dès la décrue, les vannes sont refermées, normalement jusqu'à l'arrivée de l'onde de crue de la saison hydrologique suivante. Des contraintes diverses obligent cependant les gestionnaires de l'ouvrage à effectuer des lâchures plus ou

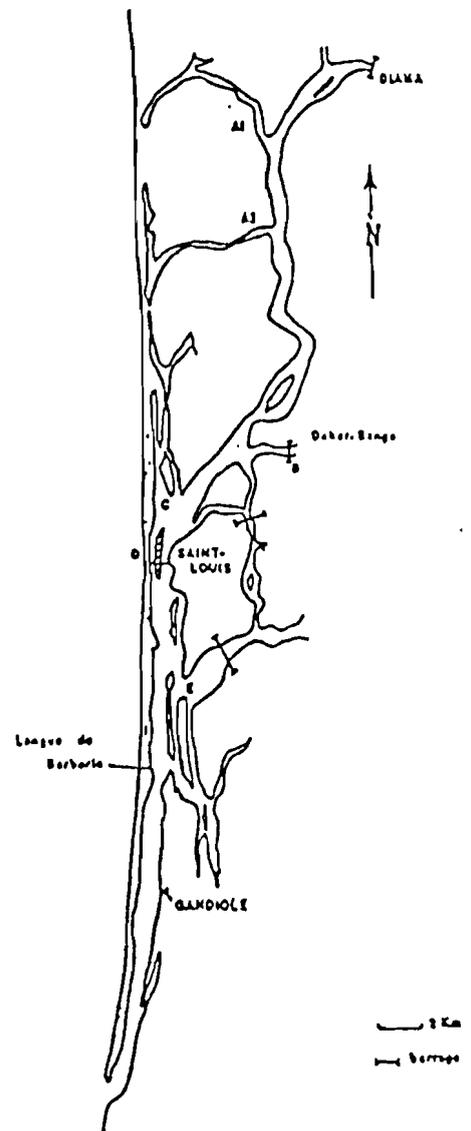


Fig. 1 : Estuaire du fleuve Sénégal

moins importantes (et plus ou moins prévisibles) alors que l'estuaire est réinvesti par les eaux océaniques,

- son embouchure, unique exutoire désormais et par laquelle transitent obligatoirement les eaux marines. La poussée océanique, permanente, varie en intensité suivant l'importance de l'écoulement continental, la dynamique des vents et les cycles propres de l'onde de marée,

- un système de tributaires se développant de l'amont vers l'aval suivant :

- deux marigots notoires en rive droite (A1 et A2) à l'aval immédiat de Diama qui drainent en période de décrue les lagunes situées en territoire mauritanien et qui sont investis par les eaux estuariennes ensuite.

- un affluent (B), le Djeuss, barré au niveau de Dakar-Bango par un pont barrage qui fonctionne analogiquement au barrage de Diama : ouverture durant la crue et fermeture dès la décrue. La partie amont du marigot est pompée pour l'irrigation et l'alimentation en eau de la ville de Saint-Louis. L'aval, largement ouvert sur l'estuaire, est partiellement occupé par une mangrove de modeste superficie.

- un bras de l'estuaire (C) qui s'isole en bordure de la Langue de Barbarie au nord de Saint-Louis jusqu'à la frontière mauritanienne.

- le petit bras du fleuve (D) entre la langue de Barbarie (villages de Guet-N'Dar et de N'Dar-Toute) et l'île de Saint-Louis. En communication permanente avec le bras principal, peu profond, il est fréquenté intensément par les pêcheurs.

- le complexe lagunaire (E) en rive gauche situé entre Saint-Louis et Gandiole et limité vers l'est par un réseau de diguettes et/ou canalisations n'assurant l'extension des plans d'eau que lors des hautes-eaux. Les lagunes de secondes et troisièmes lignes, peu profondes et temporairement inondées, sont partiellement bordées de mangroves.

Cette description sommaire fait apparaître la forte anthropisation du système estuarien qui se traduit par une modification majeure des paysages et un bouleversement important de l'hydrologie du cours d'eau : régulation des débits et rôle des tributaires.

## 2.- LES ACQUIS

Nos prospections sur la partie estuarienne du fleuve Sénégal ont jusqu'alors été conduites suivant quatre points :

- a) Suivi journalier de la salinité et de la température de surface de l'océan et du fleuve à Saint-Louis (depuis 1988), et,

depuis 1989, de la salinité de surface du fleuve à Gandiole (journalièrement) et à Diama (hebdomadairement). Cette chronique T/S à Saint-Louis, mise en place au niveau du CRODT depuis mai 1986, permet l'identification d'un cycle annuel marqué (fig. 2). Il apparaît que la salinité des eaux estuariennes de surface tend invariablement vers un maximum de l'ordre de 40 ‰ suivant une dynamique liée aux apports maritimes et à l'évaporation. Durant l'année 1989, cette dynamique fut perturbée par des apports continentaux importants dus à des lâchures de Diama en cours de saison sèche.

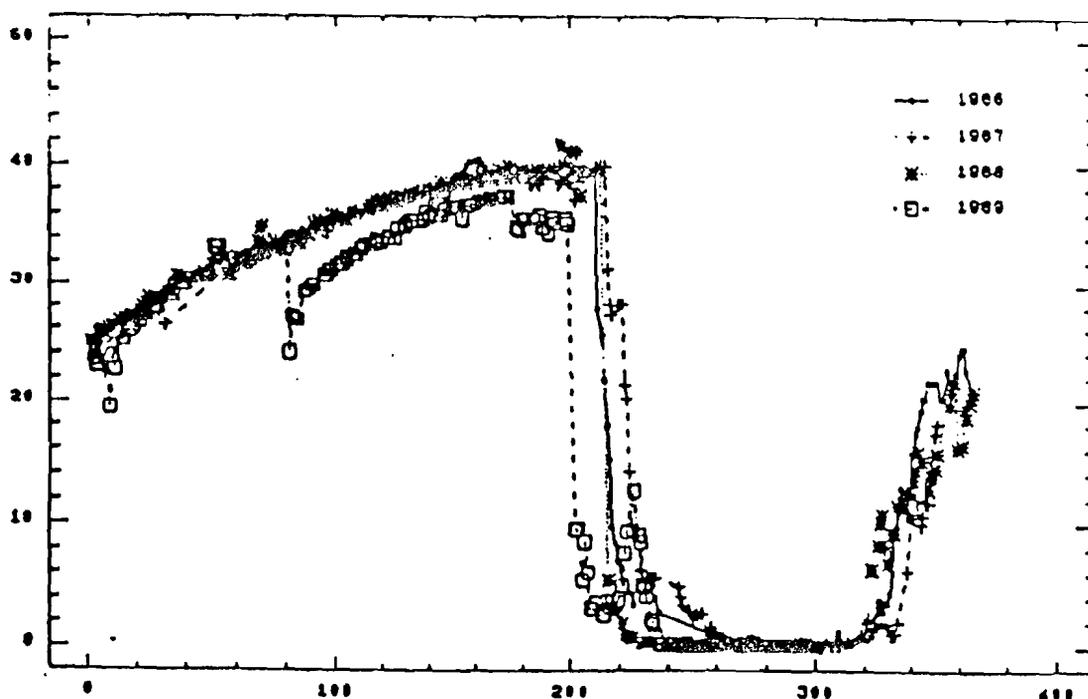


Fig. 2 : Salinités de surface à Saint-Louis

b) Suivi toutes les trois semaines de deux stations (Diama et Saint-Louis) intégré à notre campagne d'échantillonnage sur l'ensemble de la basse vallée du fleuve Sénégal (jusqu'à Podor). 17 campagnes ont été menées depuis avril 1988. Il en ressort pour l'estuaire (fig. 3) une schématisation du cycle saisonnier des principales variables mesurées : chlorophylle (chlo), température (T), conductivité à 25°C (C25), profondeur de disparition du disque de Secchi (dS), nitrates (NO<sub>3</sub>), phosphates (PO<sub>4</sub>), silicates (Si). Il apparaît que le pas de temps adopté est inadapté à l'appréhension des mécanismes responsables de la dynamique phytoplanctonique.

c) Quatre campagnes longitudinales menées du barrage à l'embouchure avec échantillonnage sur la colonne d'eau en une douzaine de stations et présentées dans le précédent rapport. Les situations rencontrées illustrent la variabilité tant spatiale que

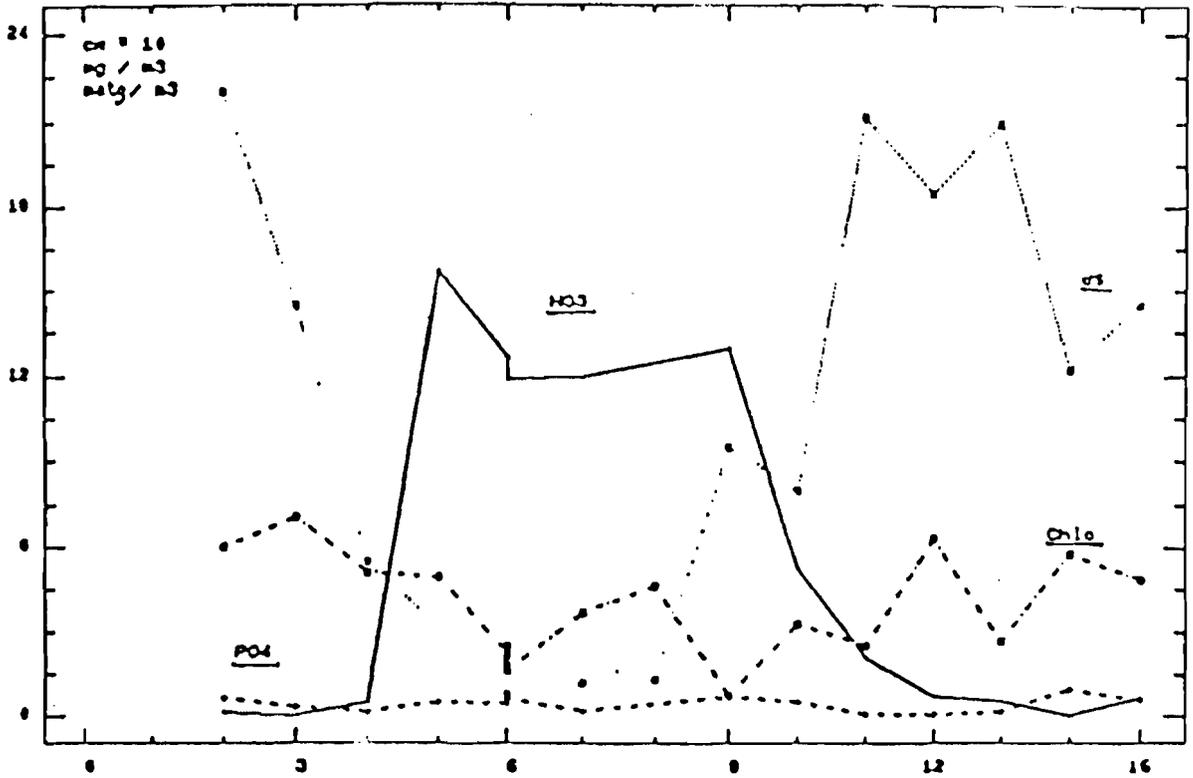
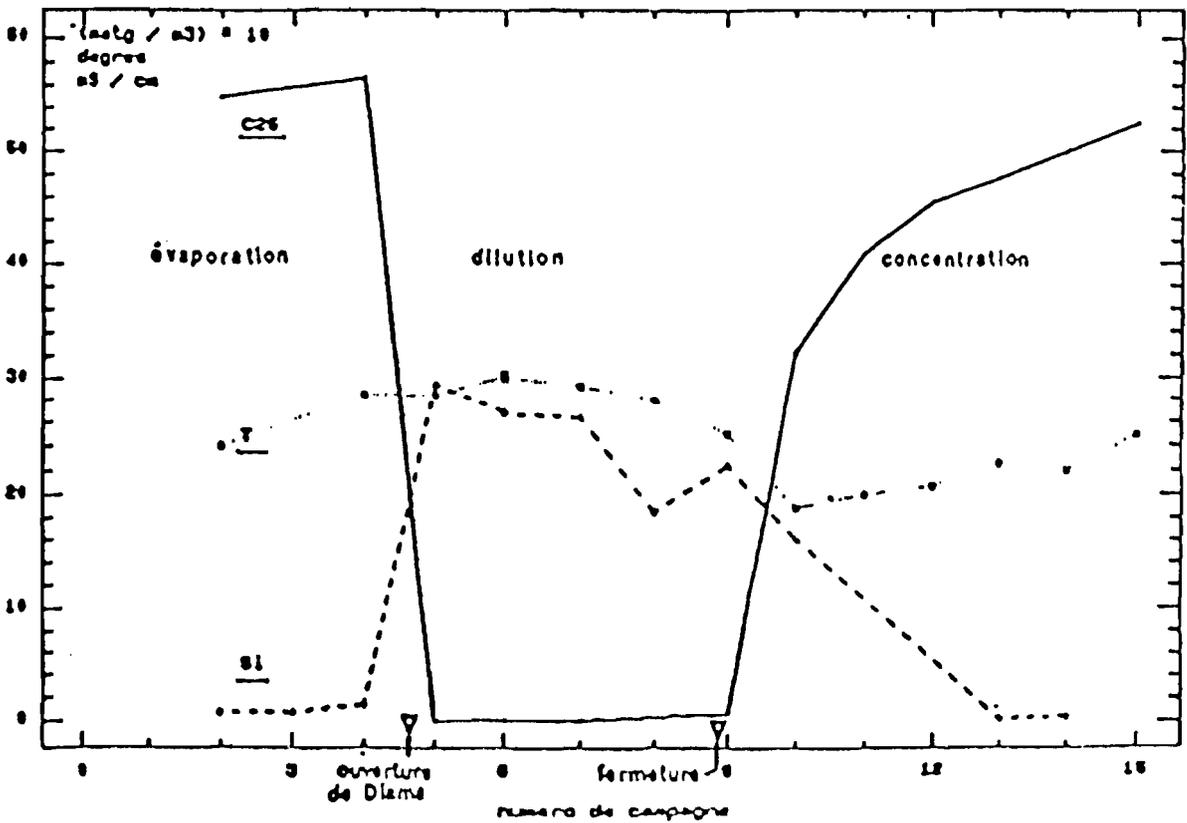


fig.3: variabilité saisonnière de différentes variables à DIAMA AYAL



temporelle de l'hydroclimat estuarien. A l'hétérogénéité physique (T/S) s'associe une hétérogénéité biologique (zone de stimulation et/ou d'accumulation du phytoplancton) sans que pour l'instant on en perçoive un quelconque déterminisme et que ne soit proposé un mécanisme explicatif.

- Une campagne en un point fixe à l'un des exutoire du complexe lagunaire E qui suggère le fonctionnement particulier de ce système et son éventuelle contribution à l'enrichissement de l'estuaire (voir la note jointe à ce rapport de synthèse sur " L'étude préliminaire du phytoplancton dans la lagune de Dielenbab ").

L'ensemble de ces observations, partiellement exploitées, suggère quelques remarques :

- la variabilité liée aux lâchures vient se superposer à la variabilité annuelle,
- l'importance du cycle des marées sur la dynamique estuarienne n'a pas été évaluée,
- il existe une structuration verticale et longitudinale des champs de densité variable dans l'espace et dans le temps. L'hétérogénéité physique s'accompagne d'une hétérogénéité biologique,
- la variabilité transversale (transect) n'a pas été étudiée,
- il existe une inadéquation patente entre le pas de temps adopté jusqu'alors pour l'échantillonnage et les cycles phytoplanctoniques,
- aucun mécanisme n'est pour l'heure proposé pour expliquer l'impact de la perturbation sur la dynamique phytoplanctonique,
- l'unique campagne destinée à évaluer le rôle des tributaires suggère leur potentielle importance,

### 3.- PROGRAMME

#### 3.1 - Le phytoplancton

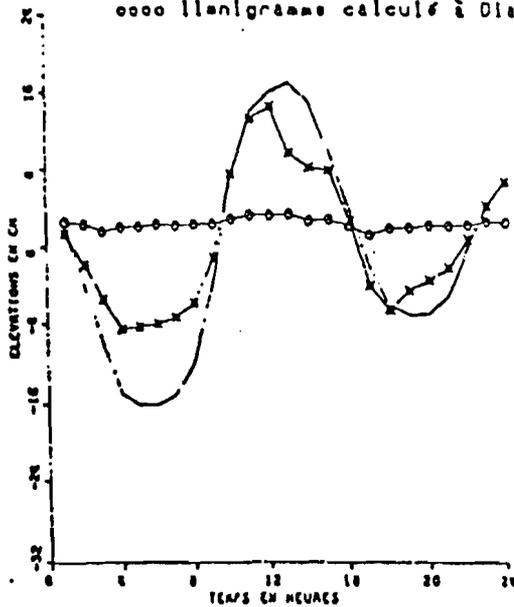
Notre programme a pour objectifs de palier les manquements précédemment signalés et de fournir les données nécessaires à la caractérisation de la dynamique phytoplanctonique estuarienne.

L'étude est réalisée suivant quatre volets :

a) Poursuite des prélèvements hydrologiques journaliers à Saint-Louis et Gandiole par des enquêteurs locaux.

b) Suivi hebdomadaire et systématique de trois stations (Diama, Saint-Louis, Gandiole). En chaque station, un profil vertical de salinité est effectué. Suivant la cline observée, de 2 (surface et fond) à 4 (deux intermédiaires) échantillons sont récoltés sur la

Limnographie du Bas Estuaire du Sénégal  
 Débit à Diama = 100 m<sup>3</sup>/s  
 Vent NE 30° = 5 m/s  
 ——— limnogramme calculé à Gandiole  
 xxx limnogramme calculé à St. Louis  
 oooo limnogramme calculé à Diama



Hydrologie du Bas Estuaire du Sénégal:  
 Débit à Diama = 100 m<sup>3</sup>/s  
 Vent NE 30° = 5 m/s  
 ——— débit calculé à Gandiole  
 xxx débit calculé à St. Louis  
 oooo débit calculé à Dakar-Bangor  
 AAAAA débit calculé à Diama

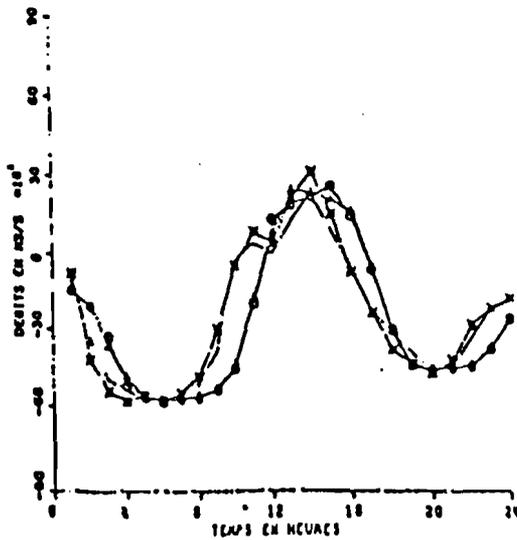


FIGURE 6

BAS ESTUAIRE DU FLEUVE SENEGAL  
 VARIATION COMPARATIVE DES HAUTEURS DE MAREE  
 ET DES DEBITS OSCILLANTS LE LONG DE L'ESTUAIRE  
 D'APRES LES RESULTATS DU MODELE NUMERIQUE

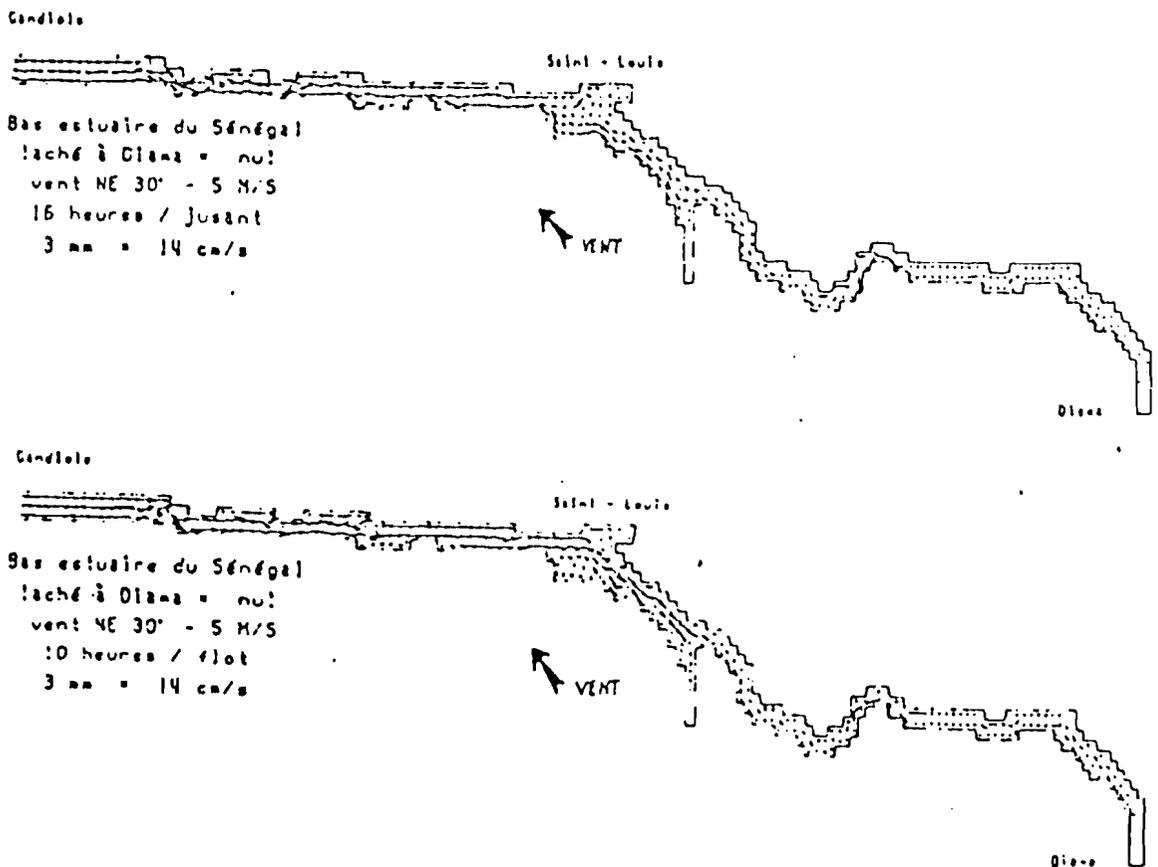


Fig. 4 : Bas estuaire du fleuve Sénégal - champs de courant simulés au flot et au jusant

Un second modèle bidimensionnel vertical de circulation et de dispersion du sel est actuellement en cours d'élaboration sur la même partie du fleuve, afin de juger de la stabilité dans le temps et de l'étendue spatiale des phénomènes de stratification verticale de densité et de circulation qui ont été observés.

Depuis la fin de l'année 1989, un marégraphe est opérationnel à Gandiolo, à proximité de l'embouchure, et vient ainsi compléter les enregistrements déjà disponibles aux anciens postes de Saint-Louis et de Diama.

Une campagne bathymétrique systématique a été effectuée pour réactualiser les relevés plus anciens du SHOM, dans la partie aval du fleuve.

Enfin, une première campagne courantométrique, synchronisée d'une campagne de prélèvements biologiques et de mesures physico-chimiques a été effectuée à Saint-Louis, avec l'immersion en

continue de trois courantomètres AANDERAA pendant quatre jours à différentes profondeurs. Cette campagne permet d'obtenir une série d'enregistrements disponibles à la fois pour la validation des modèles et la détermination fine des conditions, en temps réel, de circulation et de stratification des eaux, utile pour la compréhension des processus biologiques.

### 3.3 - Produits attendus

Ce programme vise à une approche globale des différents mécanismes qui contrôlent le fonctionnement de l'écosystème estuarien du fleuve Sénégal.

Les questions posées concernent aussi bien le domaine purement physique que les mécanismes de production et leur impact sur la répartition et la productivité des peuplements phytoplanctoniques.

Il s'agira par différentes approches conjointes et interactives:

- de décrire ponctuellement dans l'espace et dans le temps les mécanismes qui régissent la structuration et la productivité du phytoplancton,

- de proposer, en relation avec l'utilisation du modèle numérique vertical de dispersion du coin salé et de propagation de l'onde de marée, une extension dans l'espace des résultats obtenus ponctuellement,

- de se donner les moyens, en relation avec la typologie hydrodynamique de présenter une généralisation de ces mécanismes dans l'espace et dans le temps.

La thèse de P. CECCHI apportera des compléments d'informations sur ces deux programmes. Après la soutenance de l'impétrant les conclusions essentielles sur l'étude du phytoplancton et de l'hydrodynamique des masses d'eau dans l'estuaire du fleuve Sénégal seront diffusées dans le prochain rapport prévu pour le 1 avril 1991.

**D.- ETUDE DES FLUX DE MATIERES DISSOUTES ET PARTICULAIRES ET DE LA QUALITE DES EAUX DE SURFACE DANS L'ENSEMBLE DU DISPOSITIF FLUVIO-LACUSTRE.**

*Rapport scientifique présenté par Jean Yves GAC  
Directeur de Recherches à l'Institut Français de Recherche  
Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM)  
Centre de Dakar (Sénégal)*

**I. LES PUBLICATIONS REALISEES**

Trois publications scientifiques, jointes à ce rapport, concrétisent les résultats obtenus au cours de cette troisième phase du projet. Elles complètent les trois articles du rapport d'avancement n°2 présentés en avril dernier.

**1. Reconnaissance géochimique sur les eaux de la lame de submersion de la vallée du Ferlo (Sénégal) présenté par GAC et al (1990).**

Après 32 années de sécheresse au Sahel, la vallée morte du Ferlo, située en rive gauche du Sénégal, a été inondée par la crue fluviale. A son maximum d'extension, la lame de submersion d'un volume de 48 millions de m<sup>3</sup> s'est étendue sur près de 50 kilomètres.

Cette étude comprend trois parties: une présentation synthétique du milieu naturel, une chronique historique sur d'anciens documents cartographiques et sur le fonctionnement hydrologique du dispositif fleuve Sénégal/ lac de Guiers/ vallée du Ferlo depuis le début du siècle, et enfin une reconnaissance géodynamique spatiotemporelle sur la variabilité de la composition chimique des eaux essentiellement concentrées par évaporation.

Pendant la durée de l'inondation, la minéralisation totale des eaux a varié de 0,7 à 41 g/l et les solutions ont conservé un caractère basique avec de faibles oscillations du pH autour d'une valeur moyenne de 8,45. Les eaux de la lame de submersion, confinées en domaine continental, ont évolué vers une composition chimique d'eau de mer. Cette tendance a été confirmée par l'identification minéralogique de précipitations de chlorure de sodium.

Bien qu'elles aboutissent dans les saumures finales à des degrés de minéralisation différents, les eaux du lac de Guiers et de la vallée du Ferlo convergent vers des solutions à faciès chloruré sodique. Les processus géochimiques et biochimiques qui ordonnent les bilans dynamiques des diverses substances aqueuses sont, dans ces deux environnements évolutifs, d'une remarquable constance.

**2. L'intrusion des eaux océaniques dans la basse vallée du fleuve Sénégal au cours du XX ème siècle présenté par MM. GAC, APPAY, LABROUSSE (1990).**

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

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

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

**3. Bilan limnologique du lac de Guiers avant la mise en fonction du barrage de Diama : hydrologie, qualité et gestion des eaux présenté par MM. COGELS et GAC (1990).**

L'étude limnologique du lac de Guiers a été entreprise entre 1979 et 1982. Initié par la F.U.L. (Fondation Universitaire Luxembourgeoise) et réalisé dans le cadre des accords de coopération avec l'ISE (Institut des Sciences de l'Environnement) de l'Université de Dakar, ce projet de recherche sur un environnement particulièrement vital pour le Sénégal a été mené en collaboration avec l'ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le développement en Coopération) qui venait, à cette époque, de mettre en place un vaste programme géochimique sur l'ensemble du dispositif fluvio-lacustre.

Il s'agissait, dans la perspective des grands projets d'aménagements de la vallée du fleuve Sénégal :

- de définir dans ses grandes lignes le fonctionnement hydrologique du lac de Guiers,
- de préciser, dans le temps et dans l'espace, les caractéristiques physicochimiques des eaux lacustres,
- d'entreprendre une reconnaissance hydrobiologique, une esquisse des peuplements ichtyologiques et une première évaluation de l'importance de la pêche artisanale,
- d'appréhender les effets sur l'écosystème lacustre des aménagements prévus dans la vallée du fleuve Sénégal : en aval l'ouvrage anti-sel de Diama et en amont le barrage régulateur de crue de Manantali,
- et enfin, de définir une politique d'utilisation rationnelle, en mettant au point un premier modèle de gestion prenant en compte sous le double aspect quantitatif et qualitatif les ressources en eau du complexe fluvio-lacustre.

Cette étude a donc été entreprise avant la mise en service des aménagements hydrauliques de la vallée du fleuve Sénégal. A ce titre, elle constitue une base de référence dans le contexte de l'après-barrages, pour d'une part cerner les modifications de l'environnement au cours de la dernière décennie, et d'autre part supputer les transformations sensibles du milieu qui interviendront avant l'aube du XXI ème siècle.

**Remarque :**

Ces trois articles seront présentés par J.Y. GAC et F.X. COGELS au VIIème Congrès Mondial sur les Ressources en eau qui aura lieu du 13 au 18 mai 1991 à Rabat (Maroc) :

- F.X. COGELS et J.Y. GAC (1991).- A quantitative model for the management of a sahelian lake in the Senegal basin : the lake of Guiers.
- J.Y. GAC (1991).- Salt water intrusion in the Senegal river lower valley.
- J.Y. GAC (1991).- Geochemistry of the Ferlo valley waters (Senegal).

4. Fonctionnement et bilan hydrologique du lac de Guiers de 1976 à 1989 présenté par MM. COGELS, GAC, APPAY, LABROUSSE (1990).

*Résumé*

Cette étude sur le bilan hydrologique du lac de Guiers couvre la période transitoire 1976 - 1989. Pendant ces quatorze années marquées par la persistance de la sécheresse au Sahel, les conditions d'alimentation de la dépression lacustre, assujetties aux crues annuelles du Sénégal, ont été profondément modifiées par les changements majeurs intervenus sur l'environnement fluvial. Ces transformations radicales de l'écosystème (ouvrages sur le Sénégal et la Taoué) ont été identifiées, puis répertoriées selon une chronique précise pour permettre de saisir, étape par étape, toutes les variantes du fonctionnement du dispositif aquatique et de quantifier les différentes composantes du bilan hydrologique.

Dans son "état moyen" au cours des quatorze dernières années, le plan d'eau du lac de Guiers s'est situé à la cote + 0,40 m IGN, cote qui correspond à une superficie de 200 km<sup>2</sup> et à un volume de 225 millions de m<sup>3</sup>. Les composantes majeures du bilan hydrologique sont les apports fluviaux (85,6 %) et les pertes par évaporation (82,5 %). Parmi les termes significatifs des sorties et des entrées d'eau figurent les prélèvements pour l'irrigation (13,3 %), les apports par les pluies (8,2 %) et les rejets des terres cultivées (6,2 %). Les retraits les moins importants concernent les prélèvements de la SONEES (2,4 %), les transferts d'appoint du lac vers le fleuve (1,2 %) et les déversements vers la vallée du Ferlo (0,6 %).

Enfin, il est remarquable de constater que les plus fortes crues du fleuve Sénégal, dans un contexte d'écoulements déficitaires, n'ont pas engendré les remplissages les plus importants du lac de Guiers qui demeure un milieu fragile et vulnérable. Les expériences vécues doivent y constituer de sérieuses références dans la conception des modèles futurs de gestion et l'utilisation optimale des ressources en eau du Sénégal.

*Riassunto*

Questo studio sul bilancio idrologico del lago di Guiers copre il periodo transitorio 1976-1989. Durante questi quattordici anni segnati dalla persistenza della siccità nel Sahel, le condizioni d'alimentazione della depressione lacustre, soggette alle piene annue del Senegal, sono state profondamente modificate dai più importanti cambiamenti intervenuti sull'ambiente fluviale. Queste trasformazioni radicali dell'ecosistema (opere sul Senegal e la Taoue) sono state identificate, poi classificate secondo una

cronologia precisa per permettere di cogliere, fase dopo fase, tutte le varianti del funzionamento del dispositivo acquatico e di quantificare le diverse componenti del bilancio idrologico.

In condizioni di "medio situazione" durante gli ultimi quattordici anni, lo specchio d'acqua del lago di Guiers si è posto a quota + 0,40 m IGN, quota che corrisponde ad una superficie di 200 km<sup>2</sup> e ad un volume di 225 milioni di m<sup>3</sup>. Le principali componenti del bilancio idrologico sono gli apporti fluviali (85,6 %) e le perdite per evaporazione (82,5 %). Tra i termini significativi del bilancio idrico figurano i prelievi per l'irrigazione (13,3 %), gli apporti pluviali (8,2 %), e gli effluenti delle terre coltivate (6,2 %). Prelievi meno importanti riguardano quelli della SONEES (2,4 %), gli apporti idrici trasferiti dal lago verso il fiume (1,2 %) e le diversioni d'acqua verso la valle di Ferlo (0,6 %).

Infine, è importante constatare che le piene più forti del fiume Senegal, in un contesto di flusso deficitario, non hanno determinato i riempimenti più importanti del lago di Guiers, che rimane un ambiente fragile e vulnerabile. Le esperienze vissute devono diventare dei seri riferimenti nella concezione dei modelli futuri di gestione e l'utilizzazione ottimale delle risorse d'acqua del Senegal.

### *Resumen*

La investigación sobre el balance hidrológico del lago de Guiers se desarrolló durante el periodo de 1976 hasta 1989. Durante estos catorce años, caracterizados por la sequía persistente en el Sahel, las condiciones de alimentación del lago, sometidas a las crecidas anuales del río Senegal, resultaron profundamente modificadas a causa de las grandes alteraciones del entorno fluvial. Los cambios radicales del ecosistema (pantanos construidos en los rios Senegal y Taoué) han sido identificados y inscritos en un repertorio cronológico con el fin de comprender todas las variantes del funcionamiento lacustre y de cuantificar los diferentes componentes del balance hidrológico.

En su "estado medio" durante los catorce últimos años, el nivel del lago de Guiers se mantuvo a + 0,40 m IGN, cota que corresponde a una superficie de 200 km<sup>2</sup> y a un volumen de 225 millones de m<sup>3</sup>. Los principales componentes del balance hidrológico son los aportes fluviales (85,6 %) y las pérdidas por evaporación (82,5 %). Entre los factores más significativos de entradas y salidas de agua figuran : la toma de agua para el riego (13,3 %), el aporte de las lluvias (8,2 %) y el aporte de agua drenaje de las tierras cultivadas (6,2 %). Los extracciones de agua menos importantes concierne las

tomas de la SONEES (2,4 %), las transferencias adicionales del lago hacia el río (1,2 %) y las salidas hacia el valle de Ferlo (0,6 %).

Resulta relevante constatar que las crecidas más importantes del río Senegal, en un contexto deficitario de su caudal, no han llenado suficientemente el lago de Guiers que sigue siendo un medio frágil y vulnerable. Las experiencias vividas deben constituir serias referencias en la concepción de modelos futuros de gestión y en la utilización óptima de recursos acuáticos del río Senegal.

### *Zusammenfassung*

Die vorliegende hydrologische Studie über den "Lac de Guiers" deckt den Zeitraum zwischen 1976 und 1989 ab. Während dieser 14 Jahre, die durch beständige Trockenheit im Sahel gekennzeichnet waren, wurden die Versorgungsbedingungen des Sees, die den jährlichen Hochwässern des Senegals unterworfen sind, von Grund auf durch Eingriffe in der Umgebung der Flüsse verändert. Diese radikalen Veränderungen am Flusssystem (Arbeiten am Senegal und am Taoué) wurden identifiziert und dann einer präzisen Chronik folgend katalogisiert. Diese Arbeiten wurden gemacht um Schritt für Schritt alle Varianten des Zusammenspiels des Sees und seiner Zuflüsse feststellen und die verschiedenen Bestandteile der Wasserbilanz quantifizieren zu können.

Während seines "mittleren Zustandes" der letzten 14 Jahre lag der Wasserspiegel des Lac de Guiers bei 0,40 m IGN, was einer Oberfläche von 200 km<sup>2</sup> und einem Volumen von 225 Millionen m<sup>3</sup> entspricht. Die Hauptbestandteile der Wasserbilanz stellen die Zufuhr von Wasser durch die Zuflüsse (85,6 %) und der Verlust von Wasser durch Evaporation (82,5 %) dar. Zu den signifikanten Wasserein-und-ausgängen zählen die Entnahmen für die Bewässerung (13,3 %), die Zufuhr durch Regenfälle (8,2 %) und die Abflüsse von kultivierter Erde (6,2 %). Zu den unwichtigsten Wasserentnahmen zählen die Entnahmen der SONESS (2,4 %), die Ausgleichsübertragungen des Sees zum Fluss (1,2 %) und die Abläufe in Richtung des Ferlo Tales (0,6 %).

Letzlich ist es interessant festzuhalten, dass die stärksten Hochwässer des Flusses Senegal nicht zu Höchstwasserständen des "Lac de Guiers" geführt haben. Dieser bleibt ein verwundbares und empfindliches Milieu. Die Erfahrungen der letzten Jahre müssen als ernsthafte Referenzen für ein künftiges Modell zur optimalen Nutzung der Wasserreserven im Senegal herangezogen werden.

## **Summary**

This study on the water balance of the " lac de Guiers" covers the 1976-1989 transitional period. During this fourteen years of persistent drought in Sahel, the filling conditions of the lake depression, affected by the annual floods of the Senegal river, have been drastically modified by the major changes on the river environment. These radical changes of the ecosystems (headworks built on the Senegal and Taoué Rivers) have been identified, and itemized according to a precise chronicle likely to allow for a gradual understanding of all the alternatives of the aquatic system and to quantify the different components of the water balance.

In its "medium state", in the course of the past fourteen years, the water table of "lac de Guiers" stood at an average elevation of + 0,40 m IGN mark, which corresponds to an area of 200 square kilometers and a volume of 225 million cubic meters. The major components of the water balance are the inflows from tributaries (85,6 %) and losses through evaporation (82,5 %). Among the significant terms of inflows and outflows are pumping for irrigation (13,3 %), rain inflows (8,2 %) and brackish water pumped from cultivated lands (6,2 %). The less important pumpings concern the offtakes by SONEES (2,4 %), the periodic transfers from the lake into the river (1,2 %) and the spillovers to the Ferlo valley (0,6 %).

Finally, it is to be noted, in a context of deficitary runoffs, that the highest floods of the Senegal river have not given rise to the most important fillings of the lake which remains a fragile and vulnerable environment. In this connexion, past experiences should constitute serious references in the design of future models for the management and optimum utilization of the Senegal water resources.

## **CONCLUSIONS GENERALES**

Situé en rive gauche du fleuve Sénégal, le lac de Guiers ne représente par ses dimensions modestes qu'une petite entité géographique. Son importance découle de son rôle majeur dans le développement de toute la basse vallée du Sénégal et du choix de ce réservoir lacustre comme un maillon essentiel dans la politique globale de gestion des ressources en eau d'un pays sahélien, marqué depuis deux décennies par la sécheresse et la désertification.

Cette étude qui couvre la période 1976/1979 s'est donc attachée, dans un premier temps, à définir de manière aussi exhaustive que possible toutes les transformations subies au cours des quatorze dernières années par l'environnement fluvio-lacustre.

Ces changements identifiés et bien clarifiés dans une chronique précise d'évènements majeurs, il a été possible d'appréhender, étape par étape, toutes les variantes successives du fonctionnement du dispositif aquatique et de quantifier les différentes composantes du bilan hydrologique.

De 1976 à 1989, la région a été le théâtre de bouleversements profonds. Ils ont essentiellement été la conséquence directe des contraintes imposées par une sécheresse persistante pour gérer au mieux des ressources en eau qui s'amenuisaient au fil des années. En l'espace de quatorze ans, les aménagements conçus sur le fleuve ou le lac se sont traduits par cinq transformations radicales du milieu. Certes les choix des solutions provisoires n'ont pas toujours été pertinents, et il était exclu qu'ils puissent l'être, tant la nature ne laissait d'autre alternative que de s'adapter rapidement à des situations inattendues et imprévisibles, à l'amont comme à l'aval de l'écosystème fluvio-lacustre. Parmi ces aménagements de plus en plus élaborés, citons dans l'ordre chronologique : le premier pont-barrage de Richard-Toll sur le marigot de la Taoué, le second barrage de Ndombo sur le canal rectifié de la Taoué, la digue en terre de Rheune sur le Sénégal qui fût le premier lien de terre ferme entre le Sénégal et la Mauritanie, le barrage aval anti-sel de Diama, et enfin l'ouvrage amont de Manantali destiné à contenir les eaux du Bafing et à régulariser les crues du Sénégal. Le statut définitif, prévu dans un futur proche, comprendra le canal du Cayor qui devrait relier le Sud du lac de Guiers à la métropole dakaroise.

A partir des caractéristiques morphologiques du lac (définition de nouveaux abaques établissant les relations entre la cote du plan d'eau, la surface et le volume du lac), de l'équation générale du bilan hydrologique (qui prend en compte toutes les composantes des entrées et des sorties d'eau), de la succession des différentes phases du fonctionnement de la dépression (liée à la gestion des ouvrages) et de l'observation de l'évolution des hauteurs d'eau, les bilans hydrologiques ont été établis pour chaque crue fluviale et par année civile.

Dans son "état moyen", le Guiers constitue une petite entité lacustre d'une superficie de 200 km<sup>2</sup>, d'une contenance de 225 millions de m<sup>3</sup> et dont le plan d'eau se situe à la cote + 0,40 m IGN.

En moyenne pour les 13 cycles étudiés, les apports fluviaux et les pertes par évaporation constituent les deux composantes essentielles du bilan hydrique du lac de Guiers en totalisant respectivement 85,6 % des entrées et 82,5 % des sorties d'eau. Parmi les termes significatifs figurent, les prélèvements pour l'irrigation

(13,3 %), les apports des pluies (8,2 %) et les rejets des terres cultivées (6,2 %). Enfin les termes les moins importants sont dans l'ordre : les prélèvements de la SONEES (2,4 %), les transferts d'appoints du lac vers le fleuve (1,2 %) et les déversements d'une lame de submersion vers la vallée du Ferlo (0,6 %).

Les bilans par année civile confirment les résultats obtenus par les cycles hydrologiques :

- l'évaporation présente de faibles variations interannuelles. C'est une grandeur constante qui oscille très peu autour d'une valeur moyenne de 2,25 m/an .

- les apports fluviaux sont variables d'une année sur l'autre. Traduits en hauteur d'eau, ils occasionnent une élévation moyenne annuelle du plan d'eau du lac de 2,32 m. La tendance se résume à une importance accrue de ces apports entre 1976 et 1989. Pendant cette période de 14 ans, il est remarquable de constater que les plus fortes crues du fleuve Sénégal n'ont pas toujours engendré les remplissages les plus notables de la cuvette lacustre. Ce résultat souligne que d'importantes études doivent encore être menées pour définir le choix de tel ou tel scénario pour la gestion optimale des ressources en eau.

- les prélèvements réalisés par la CSS pour l'irrigation des casiers sucriers ont évolué d'une manière tout à fait particulière. Sensiblement constants ou en légère hausse de 1976 à 1983, les volumes d'eau soustraits au lac ont ensuite diminué, d'abord progressivement de 1983 à 1987 puis de façon beaucoup plus spectaculaire en 1988 et 1989. Ils sont aujourd'hui du même ordre de grandeur que les prélèvements de la SONEES. Ce fait est important car il amène à reconsidérer tous les mouvements des masses d'eau dans l'écosystème lacustre.

En conclusion, les bilans hydrologiques du lac de Guiers établis pour la période transitoire 1976/1989, font ressortir l'extrême fragilité et vulnérabilité du milieu. Les expériences vécues aussi bien sur l'aspect quantitatif que qualitatif doivent constituer de sérieuses références pour concevoir et bâtir les modèles de gestion de demain.

## Conclusion

The lake of Guiers represents, by its modest dimensions, just a small geographical entity located on the left bank of the Senegal River. Its importance stems from its major role in the development of the whole lower-valley of Senegal and the choice of this reservoir as an essential part of the global policy for water

resource management of a sahelian country which has been stricken for two decades by drought and desertification.

This study which covers the 1976-1979 period has first and foremost tried to exhaustively define all the transformations that have occurred during the last fourteen years in the river-lake environment. These changes, identified and well clarified within a precise chronicle of major events, have made it possible to apprehend gradually, all the successive alternatives of the aquatic structure functioning and to quantify the different components of the water balance.

From 1976 to 1989, the area has been subjected to deep changes. They have mainly been the direct consequence of the constraints imposed by a persistent drought in order to better manage water resources which have been shrinking during the years. Within 14 years, the headworks carried out on the river or the lake have resulted in five drastic transformations of the environment. It is obvious that the choice of provisional solutions have not always been relevant, and they couldn't have been anyway, in so far as the environment didn't give any other alternative than to promptly adapt to unexpected and unpredictable situations both upstream and downstream of the river-lake ecosystem. Among these developments which are more and more elaborated, we can list in a chronological order: the first dam-bridge of Richard-Toll on the Taoue pond, the second dam of NDombo on the Taoue rectified canal, the earth dyke of Rheune on the Senegal river which was the first earth link between Senegal and Mauritania, the Diama antisalt dam, and the Manantali headwork built to collect Bafing waters and to regulate the floods of the Senegal river. The final status, expected in the near future will include the Cayor canal which should connect the south of the lake of Guiers to the capital Dakar.

Water balances for each river flood and each calendar year have been established from the morphological characteristics of the lake (definition of new master curves establishing relations between the watertable mark, the surface and the volume of the lake), the general equation of the water balance (which takes into account all the components of water inflows and outflows), the succession of the different stages of the depression functioning (linked to the management of headworks) and the observation of the evolution of water heights.

In its "medium state" the Guiers constitutes a small entity with a surface of 200 square km, a volume of 225 millions of cubic meters and a water table which is at + 0,40 m IGN mark.

On average, for the 13 cycles considered, inflows from tributaries and losses through evaporation constitute the two main

components of the Guiers water balance totalling 85,6% of water inflows and 82,5% of water outflows. Among the significant terms: pumping for irrigation purposes (13,3%), rain inflows (8,2%) and water pumped from cultivated lands (6,2%). Finally the less important terms are : offtakes carried out by SONEES (2,4%), periodic transfers from the lake into the river (1,2%) and spillovers to the Ferlo valley (0,6%).

Calendar year balances confirm the results obtained by water cycles :

- Evaporation shows insignificant interannual variations. It is a constant magnitude with little fluctuation around an average value of 2,25 m/year.

- Inflows from tributaries vary from one year to another. In water height, they make the watertable of the lake reach an annual average elevation of 2,32 m. The trend comes down to an increasing importance of these inflows between 1976 and 1989. During these 14 years, it is worth noting that the highest floods of the Senegal river have not given rise to the most important fillings of the lake basin. This finding shows that important studies should be carried out in order to determine the choice of one or another scenario for the optimum management of water resources.

- Pumpages carried out by CSS for the irrigation of sugar perimeters have considerably developed. More or less constant or slightly increasing from 1976 to 1983, the volume of water pumped from the lake has dropped, first progressively from 1983 and then more spectacularly in 1988 and 1989. Today they revolve around the same volume as the offtakes carried out by SONEES. This fact is important because it leads to a reconsideration of the movements of masses of water in the ecosystem of the lake.

In conclusion, the Guiers water balances established for the 1976/1989 transitional period bring out the extreme fragility and vulnerability of the environment. Past experiences on the quantitative as well as the qualitative aspect should constitute serious references in the design and implementation of future management models.

5. Le haut bassin versant du fleuve Sénégal présenté par MM. GAC, APPAY, CARN et ORANGE (1990).

Résumé

Cet ouvrage synthétise toutes les données disponibles sur le haut bassin versant du fleuve Sénégal.

Il est essentiellement descriptif dans les chapitres qui traitent de la situation géographique, du cadre physique, du passé géologique, du modelé des paysages, de la nature lithologique du substratum et des formations pédologiques, ensemble de caractéristiques, que l'on peut considérer comme quasi-immuables à notre échelle de temps. Ce support terrestre ou substrat lithosphérique "inerte ou passif" est décrit en détail et avec le souci constant de l'actualité, en donnant à tout instant une place privilégiée aux études les plus récentes.

Les chapitres consacrés au climat et à l'hydrologie du cours supérieur du fleuve Sénégal constituent des chroniques depuis le début du siècle. Elles relancent le débat sur le caractère irréversible ou non de la sécheresse au Sahel et clarifient dans une conception nouvelle les modes climatiques qui modulent et gouvernent "la respiration hydrogéochemique" d'un grand bassin versant de la zone intertropicale.

Summary

This study sums up all the data available on the upper basin of the Senegal river.

The chapters dealing with the geographical location, the physical surrounding, the geological past, the relief of the landscapes, the lithological nature of the substratum and the pedological formations, all characteristics that can be considered as almost unchanging according to our time-scale, are mainly descriptive ones. A detailed description of this terrestrial support or "inert or passive" lithospheric substratum is given, with the constant concern of staying up to date by reserving a special place to the most recent studies.

The chapters dealing with the climate and the hydrology of the upper course of the Senegal river are, in fact, chronicles from the beginning of our century. They revive the debate on the irreversible character of the Sahelian drought and give a new and clear conception of the climatic modes which regulate and govern the "hydrogeochemical breathing" of a large basin in the intertropical zone.

## Zusammenfassung

In diesem Werk sind alle verfügbaren Daten über das obere Wasserinzugsgebiet des flusses Senegal Zusammengefasst.

In den Kapiteln betreffend geographischer Lage, physikalischem Rahmen, geologischer Vergangenheit, Landschaftbild, Lithologie des Substrats und Pedologie ist die Arbeit vor allem beschreibend. Es handelt sich hierbei um Charakteristika, die in unserem Zeitrahmen quasi unveränderlich sind. Dieses inerte oder passive Substrat wurde im Detail beschrieben. Dabei wurde ständig auf Aktualität geachtet und den neuesten Studien ihr angemessener Platz eingeräumt.

Die Kapitel über Klima und Hydrologie des oberen Verlaufs des Flusses Senegal, stellen eine Chronik seit Beginn unseres Jahrhunderts dar. Sie werfen aufs neue die Frage auf, ob die Trockenheit im Sahel irreversibel ist oder nicht. Außerdem verdeutlichen sie mit Hilfe einer neuen Konzeption die Klimatischen Gegebenheiten, die das hydrogeochemische Funktionieren eines großen Wassereinzugsgebiets der intertropischen Zone verändern oder regieren.

## Riassunto

Questa opera sintetizza tutti i dati disponibili sull'alto bacino idrografico del fiume Senegal.

L'opera è essenzialmente descrittiva nei capitoli che riguardano la situazione geografica, gli aspetti fisici, il passato geologico, gli aspetti paesaggistici, la natura litologica del substrato e delle formazioni pedologiche, un insieme di caratteristiche che si possono considerare quasi immutabili alla nostra scala temporale. Questo supporto terrestre o substrato litosferico "inerte o passivo" è descritto in detta glio, aggiornato costantemente, attribuendo in ogni istante una posizione privilegiata agli studi più recenti.

I capitoli dedicati al clima e all'idrologia del corso superiore del fiume Senegal costituiscono delle cronache dall'inizio del secolo. Tali cronache rilanciano il dibattito sul carattere irreversibile o meno della siccità nel Sahel e chiarificano in una nuova concezione i modi climatici che modulano e controllano "la respirazione idrogeochimica" di un grande bacino idrografico della zona intertropicale.

## CONCLUSIONS

C'est au V<sup>ème</sup> siècle avant Jésus-Christ, qu'il est pour la première fois fait état par les Phéniciens, de l'existence d'un grand fleuve sur les côtes de l'Afrique occidentale. Il faudra cependant attendre plus de 2 millénaires pour que le Sénégal soit parfaitement reconnu grâce aux écrits des Anciens, aux récits des voyageurs arabes du Moyen âge, aux témoignages des navigateurs portugais à partir du XV<sup>ème</sup> siècle et enfin aux rapports de mission des explorateurs pendant trois cents ans de mouvance française.

Le Sénégal prend sa source dans le massif du Fouta Djallon à 1465 m d'altitude. Son bassin arpent qui se déploie sur 220.000 km<sup>2</sup> se partage entre les quatre républiques de Guinée, du Mali, de la Mauritanie et du Sénégal. De forme ovoïde, il s'étend de 10°20' à 17° de latitude Nord et de 7° à 12°20' de longitude Ouest. A Bakel, exutoire du haut bassin, le fleuve Sénégal a parcouru 1.000 km. Il est formé de la jonction du Bakoye, du Bafing et de la Falémé.

En contrebas du bourrelet de hautes terres de la dorsale guinéenne, les plateaux et les glacis constituent les traits géomorphologiques dominants. Le modelé des paysages se présente comme une succession en gradins de trois surfaces d'aplanissement cuirassées (d'âges jurassique, éocène et pliocène) dont la topographie plane contraste fortement avec de vastes glacis, étagés en trois niveaux et ordonnés en fonction du réseau hydro-graphique.

Comme dans la plupart des pays de vieilles plates-formes, la morpho-génèse dans le bassin du Sénégal s'étend sur des périodes géologiques extrêmement longues. Le cours supérieur du Sénégal se situe sur la bordure sud-ouest du craton ouest-africain. Ce vaste complexe géologique précambrien, stabilisé à la fin de l'orogénèse éburnéenne vers 1800-1600 millions d'années est ceinturé par des zones mobiles formées ou rajeunies au cours des cycles orogéniques panafricain, hercynien et alpin. L'histoire géologique de la région se résume à huit grands événements correspondants aux huit unités structurales majeures du bassin : les formations birrimiennes du socle, la couverture sédimentaire du Protérozoïque supérieur, la chaîne panafricaine des Bassarides, les sillons molassiques panafricains du Protérozoïque terminal, les formations sédimentaires du Cambrien supérieur au Dévonien, les venues doléritiques permotriasiques, le complexe sédimentaire éocène du bassin sénégalo-mauritanien et les formations latéritiques.

Le substratum du haut bassin est formé de deux grandes familles de roches acides et de roches basiques regroupées en six classes lithologiques principales : granites, grès, schistes, quartzites, dolérites et roches vertes. Les roches acides représentent 87 % de la superficie totale du bassin : (quartzites 42 %, grès 31 %,

granites 7 %, schistes 7%). Les roches basiques sont caractérisées par les dolérites (12 %) et les roches vertes (1%).

Un rapide aperçu des ressources hydrogéologiques est dressé et les interactions géochimiques existant entre les eaux souterraines et leur encaissant rappelées. Le trait majeur est l'absence de nappes généralisées. Les aquifères du haut bassin sont discontinus et hétérogènes. Les eaux des nappes reflètent les transformations au sein des profils d'altération et leurs compositions chimiques varient dans une large gamme. Elles sont tributaires et assujetties au temps de séjour dans les réservoirs terrestres qui, de façon remarquable, peuvent les marquer de leur patrimoine génétique.

Dans cette région tropicale, l'altération profonde des roches du subs-tratum a développé, de l'amont vers l'aval du bassin et selon un déterminisme précis, les successions ordonnées et systématiques de trois grands types de sols à travers différentes zones bioclimatiques : les sols ferrallitiques dans le Fouta Djallon et ses contreforts septentrionaux, les sols ferrugineux tropicaux dans la partie centrale du bassin et les sols sub-arides dans les provinces lointaines, quasi endoréiques, du Nord-Est. Tous ces sols peuvent, en toutes positions topographiques, être recouverts d'un épais manteau de cuirasses latéritiques qui demeurent les témoins, empilés à travers le temps, des climats du passé.

Situé entre les régions tropicales humides et les confins du Sahara, le haut bassin présente une grande diversité climatique entre le domaine guinéen au sud et le domaine sahélien au nord. La pluviosité moyenne annuelle varie de 2.300 mm dans le Fouta Djallon à 300 mm dans les régions désertiques septentrionales. La lame d'eau moyenne précipitée sur la totalité du bassin versant, au cours de la période 1951-1986, s'élève à 810 mm. Le caractère exceptionnel de la sécheresse actuelle est analysé. Le tracé des isohyètes indique un recul quasi uniforme en latitude de près de 200 km vers le Sud : les limites du bassin s'inscrivent actuellement entre les isohyètes 100 et 1900 mm. Les températures oscillent entre 22°C au sud et 30°C au nord. L'évapotranspiration potentielle fluctue entre 1500 mm/an en domaine guinéen et 3.000 mm/an en région sahélienne.

L'inventaire des données hydrologiques disponibles montre que l'irrégularité des écoulements est de règle sur le bassin amont du Sénégal. Les conditions physiques, géomorphologiques, lithologiques, pédologiques et climatiques prédisposent la surface du bassin à un ruissellement important et, en corollaire, à une évacuation rapide des lames d'eau précipitées. Plusieurs documents historiques étayaient l'hypothèse d'un régime d'abondance fluviale

avant 1903. Depuis cette date, le régime du Sénégal correspond à un régime tropical pur, dans la mesure où ses écoulements sont rapportés à la partie réellement active du bassin supérieur. Au cours des 87 années d'observation (1903-1989), le module interannuel du Sénégal à l'exutoire amont de Bakel a été de 705 m<sup>3</sup>/s. Les valeurs extrêmes ont été enregistrées au cours des cycles hydrologiques 1967/68 (1324 m<sup>3</sup>/s) et 1984/85 (216 m<sup>3</sup>/s). Le caractère exceptionnel de la sécheresse des années 80 transparaît également dans les écoulements : parmi les dix années les plus déficitaires du siècle figurent six années consécutives (de 1982 à 1987) de la dernière décennie.

Enfin, les quatre paramètres hydroclimatiques majeurs, en domaine continental, (le débit du fleuve qui intègre toute la surface du bassin versant, les températures de l'air et de l'eau ainsi que les précipitations qui sont des données ponctuelles exprimant l'état climatique à l'exutoire) ont été corrélés. Ils définissent pour la période récente (1979/1986), la chronique des années sèche-froide, humide-froide, sèche-chaude et humide-chaude.

#### **6. La visibilité horizontale au sol à Dakar (1987-1989) présentée par MM. GAC, APPAY et DIALLO (1990).**

Ce répertoire des visibilités horizontales au sol au cours des années 1987, 1988, 1989 constitue une mise à jour des données journalières acquises de 1962 à 1987. On dispose actuellement de près de 250.000 valeurs horaires de la visibilité

L'information actuelle sur les visibilités horaires couvre désormais une période de 28 années de 1962 à 1989. La compilation des observations a été rendue possible grâce à la disponibilité de la Direction de la Météorologie du Sénégal et au soutien financier de la CEE dans le cadre du projet EQUENSEN (TS 2 0 198 F EDB) sur l'Environnement et la Qualité des Eaux du fleuve Sénégal.

L'étude des visibilités constitue l'un des volets importants des recherches entreprises pour mieux identifier les causes, les mécanismes et les effets de la sécheresse qui, depuis deux décennies, affecte les régions du Sahel.

En effet, la persistance de conditions météorologiques défavorables a depuis plusieurs années engendré un développement tout à fait inhabituel du phénomène des brumes sèches vers les basses latitudes tropicales au sud du Sahara. L'occultation du ciel et la réduction de la visibilité par d'importantes quantités d'aérosols désertiques sont devenues si fréquentes que le transit de poussières est considéré désormais comme un événement climatique

Tableau 1

**Dépôts moyens mensuels et annuels (en g/m<sup>2</sup>/jour) de lithométéores  
(stations de Dakar, Mbour, Ngnith, Kédougou et Pété)**

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
SYSTEME	GRAVITAIRE (g/m <sup>2</sup> /j)												
DAKAR													
1984	1,03	1,62	1,11	0,65	1,17	-	-	-	-	-	0,46	0,66	(0,74)
1985	0,88	1,53	0,93	1,10	0,70	0,93	0,29	0,14	0,29	0,38	0,32	0,47	0,66
1986	0,89	0,54	1,16	0,56	0,50	0,52	0,21	0,39	0,21	0,48	0,35	0,40	0,52
1987	0,30	0,52	0,85	0,96	1,18	0,43	0,39	0,29	0,35	0,37	0,18	0,37	0,52
1988	0,93	0,87	0,66	0,42	0,53	0,52	0,22	0,16	0,15	0,18	0,17	0,22	0,50
1989	0,36	0,86	0,60	0,65	0,72	0,80	0,22	0,13	0,16	0,15	0,16	0,25	0,42
Moyenne	0,73	0,99	0,88	0,72	0,80	0,64	0,27	0,22	0,23	0,31	0,27	0,40	0,54
MBOUR													
1986	0,29	0,24	0,35	0,31	0,51	0,52	0,20	0,48	0,20	0,31	0,22	0,26	0,32
1987	0,21	0,33	0,54	0,86	1,72	0,62	0,40	0,27	0,29	0,32	0,11	0,23	0,49
NGNITH													
1987	-	-	-	-	-	-	0,32	0,18	0,18	0,29	0,16	0,35	-
1988	0,67	0,56	0,62	0,38	0,38	0,47	0,30	0,05	0,09	0,15	0,14	0,22	0,34
1989	0,36	0,47	0,43	0,42	0,31	0,47	0,14	0,06	0,10	0,16	0,24	0,30	0,29
KEDOUGOU													
1987	-	-	-	-	-	0,08	0,06	0,06	0,03	0,04	0,06	-	-
PETE													
1987	-	0,40	0,45	0,28	0,49	0,35	0,31	-	-	0,27	0,26	0,64	0,38

( ) : valeur annuelle estimée.

GAC & al. (1986), ORANGE & GAC (1990) en testant cette relation ont cependant précisé qu'elle était variable selon l'éloignement de la station de réception par rapport aux zones sources et en corollaire à la distribution granulométrique des lithométéores.

Une autre difficulté pour tenter une extrapolation aux années antérieures à la collecte des dépôts par gravité réside, dans le fait que les variations enregistrées dans les mesures de la visibilité horizontale ne sont pas seulement imputables aux phénomènes de brumes sèches. Elles peuvent aussi résulter d'évènements locaux de sables brassés ou plus fréquemment encore de manifestations brumeuses humides, nocturnes ou matinales. Les "troubles" dans l'atmosphère sont alors des particules sableuses de plus grande taille ou de fines gouttelettes d'eau.

Les données sur les visibilités ne sont donc pas directement exploitables. Elles constituent une importante information de base qu'il va falloir, avec le support de l'informatique, archiver, dépouiller, analyser et critiquer avant d'aboutir à une quantification des anciennes manifestations de brumes sèches et à une formulation d'un gradient nord-sud. Dans le cadre du projet EQUENSEN ce gradient

établi entre les stations de Dakar et de Ngnith devrait permettre la détermination annuelle de la sédimentation éolienne dans le lac de Guiers et de son importance relative par rapport aux apports d'alluvions de la crue fluviale.

**7. Mesure du dépôt au sol des aérosols désertiques. Une méthode simple de prélèvement : le capteur pyramidal (1990).**

*Measurements of saharan dust deposition. A simple sampling technique : the pyramidal collecting system.*

#### Resumé

Un simple cuve pyramidale de plexiglass permet de mesurer le dépôt d'aérosols à l'échelle régionale. Ce capteur pyramidal donne une meilleure estimation du dépôt de poussières au sol que les dispositifs aspirants classiques souvent colmatés dans ces zones arides, où les concentrations en aérosols peuvent être importantes. La hauteur annuelle des dépôts éoliens sur le Cap-Vert est estimée à 70  $\mu\text{m}/\text{an}$ .

#### Summary

The collecting system is presented, it is a simple pyramidal receptacle which records Saharan dust deposition at regional scales on a daily basis. When common air-filter sampling are usually filled-up due to very high aerosol concentrations, our system is proved to be efficient whatever the conditions. The annual thickness of saharan dust layer over the whole Cape Verde area is estimated at 70  $\mu\text{m}\cdot\text{y}^{-1}$ .

Article proposé par MM. GAC, ORANGE, PROBST et TANRE le 21.05.1990 à l'Académie des Sciences de Paris.

## II. PROPOSITION D'ACTUALISATION DU MODELE DE GESTION DU LAC DE GUIERS

(F.X. COGELS, N. EVORA ET J.Y. GAC)

### 1. Bilan hydrologique et évaporation du lac de Guiers

L'étude de factibilité réalisée en 1988, a présenté le bilan hydrologique du lac pour la période 1976-1982 établi sur la base de la quantification des divers paramètres entrées- sorties. Ce bilan a mis en évidence le rôle capital de l'évaporation (80 % des pertes) dans l'évolution annuelle de la cote du plan d'eau.

Nous proposons l'actualisation de ces bilans pour la période 1982-1990 : cela permettra simultanément d'augmenter la précision des calculs de l'évaporation du lac dont les moyennes seront alors établies sur la base de 15 années d'observations et non plus de 6. L'évaporation est l'un des termes clefs qui sera introduit par la suite dans le modèle mathématique de gestion mis au point.

Cette actualisation des bilans hydrologiques nécessite un travail important dans la mesure où il s'agit de rassembler de multiples données hydrologiques et climatologiques : actualisation des pompages de la CSS et de la SONEES et leur répartition annuelle, dates d'ouverture et de fermeture des vannes de la Taoué, calcul des apports pluviométriques et fluviaux, estimation des lâchures vers la vallée du Ferlo en 1988 et 1989. Elle sera entreprise avec les acquis de 1976 à 1989 présentés dans l'ouvrage joint à ce rapport sur le fonctionnement et les bilans hydrologiques du lac de Guiers de 1976 à 1989.

### 2. Modèle des gestion quantitatif des eaux

Le modèle de gestion proposé dans l'étude de factibilité permet le calcul des besoins quotidiens du lac en eau fluviale issue de la réserve de Diama pour assurer la demande des divers utilisateurs autour du lac tout en imposant au plan d'eau une variation annuelle de son niveau.

A l'aide du modèle disponible, nous proposons de présenter plusieurs scénarios d'exploitation du lac qui tiendront compte des nouvelles données d'évaporation calculées et éventuellement des nouvelles conditions hydrologiques induites par l'endiguement de la rive droite et des lames de submersion dans le Ferlo.

### 3. Qualité des eaux lacustres

La qualité physico-chimique des eaux du lac (pH, Conductivité,

Chlorures, Sulfates, Alcalinité, Sodium, Silice, Potassium, Calcium et Magnésium ), présentée dans l'étude de factibilité se basait sur un échantillonnage complet effectué à un rythme parfois mensuel ou fonction de la cote du plan d'eau en 13 stations (du nord au sud) entre 1979 et 1982.

Depuis lors et particulièrement ces deux dernières années, de fortes modifications qualitatives sont sans doute intervenues suite aux lâchures vers le Ferlo à partir de la digue de Keur Momar Sarr. Comme la région sud du lac était de loin la zone la plus minéralisée ces lâchures ont dû provoquer un adoucissement sensible des eaux lacustres à moins que les échanges réciproques eaux de surface-eaux souterraines sursalées ne l'ait compensé progressivement.

L'actualisation de l'évolution spatio-temporelle de la qualité des eaux lacustres devrait être menée en parallèle avec celle de la lame de submersion du Ferlo pour établir les bilans actuels. Elle devrait aussi permettre de s'assurer des possibilités d'utilisation des données recueillies à la station de la SONEES à Ngnith considérée comme représentative de la qualité moyenne des eaux du lac en vérifiant la formule de correspondance proposée dans l'étude de factibilité.

Ces études sont menées en collaboration étroite avec GEOTOP (dont le responsable est J.P. SCHMITT), de l'Université de Québec à Montréal (analyses des éléments à l'état de traces). Ce laboratoire analyse à des doses infimes ( $\mu\text{g/l}$ ) des éléments comme l'aluminium, l'arsenic, le bore, le baryum, le césium, le cobalt, le chrome, le cuivre, le dysprosium, le fer, le gallium, le germanium, le lithium, le manganèse, le néodyme, le rubidium, le scandium, le samarium, le strontium, le titane, le vanadium, l'yttrium et le zinc, sans parler des éléments majeurs comme le sodium, le calcium, le magnésium, le potassium et la silice. Nous disposons actuellement de 12 campagnes complètes de résultats sur les eaux du lac de Guiers et de la lame de submersion du Ferlo. Il devrait en émerger un spectre chimique d'une étonnante originalité dans ce contexte fluvio-lacustre : une grande première sans doute en Afrique.

### III. ETAT D'AVANCEMENT DU PROGRAMME GLOBAL DE GEODYNAMIQUE DE LA SURFACE

mené par l'ORSTOM (J.Y.GAC) et la FUL pro parte (F.X. COGELS)

#### 1. Les flux de matières dissoutes à l'exutoire amont du haut bassin du fleuve Sénégal.

Ces travaux sur financement partiel de la CEE font l'objet de la thèse doctorale de M. Didier ORANGE dont la soutenance est prévue à Strasbourg le 20 décembre 1990. Par courtoisie à l'égard de l'auteur, et bien que Jean Yves GAC fasse partie du jury, nous ne donnerons ici que les conclusions essentielles de ce travail.

Les eaux du fleuve Sénégal se classent dans la catégorie des eaux bi-carbonatées magnésiennes et calciques. Les bicarbonates et la somme Mg-Ca représentent respectivement 88 % des anions et des cations, soit à eux trois 72 % de la charge pondérale totale en solution. La silice représente 12 % des éléments dissous. Les variations de composition chimique peuvent être importantes, la minéralisation totale évoluant dans un rapport de 4 entre 29 et 133 mg/l. Les teneurs en sulfates évoluent de manière aléatoire (160 %) : on trouve ensuite dans l'ordre décroissant les chlorures (80 %), le potassium (64 %), le magnésium (57 %), le sodium (56 %), le bicarbonate (47 %), le calcium (42 %) et la silice.

A l'exception des sulfates, du potassium et de la silice, la meilleure corrélation existe entre le log de la concentration et le log du débit. Ceci signifie que la concentration est toujours une fonction puissance du débit (Tableau II et Fig. 1).

**Tableau II**  
*Relations débit-concentration des différents éléments dissous*

Variables	Relations	r	p	n
TDS	$C = 86,38 \cdot Q^{-1,08}$	-0,84	0,01%	221
HCO <sub>3</sub>	$C = 54,11 \cdot Q^{-1,28}$	-0,83	0,01%	221
Mg	$C = 4,68 \cdot Q^{-1,44}$	-0,83	0,01%	221
Na	$C = 4,43 \cdot Q^{-1,47}$	-0,73	0,01%	221
Ca	$C = 6,53 \cdot Q^{-0,98}$	-0,67	0,01%	221
Cl	$C = 3,35 \cdot Q^{-1,23}$	-0,50	0,01%	221
MES	$C = 27,8 \cdot Q^{-2,76}$	0,46	0,01%	221
K	$C = 3,36 - .22 \text{ Log}Q$	-0,38	0,01%	221
SO <sub>4</sub>	$C = 2,73 - .14 \text{ Log}Q$	-0,36	0,1%	80
SiO <sub>2</sub>	-	0,24	0,04%	221

C en mg/l ; Q en m<sup>3</sup>/s ; r : coefficient de corrélation ;  
p : niveau de signification ; n : nombre d'observations

## 2. Les flux de matières particulières dans le bassin du Sénégal

Ils sont d'origine interne au bassin versant (matières en suspension transitant dans le lit du fleuve : acheminement des alluvions provenant de l'ablation des versants) et d'origine externe atmosphérique (aérosols désertiques : développement des phénomènes de brumes sèches).

### a) les matières en suspension à l'exutoire amont de Bakel

Les variations journalières des MES sont très importantes en période de crue et quasi inexistantes en saison sèche (Fig. 2). Il est fréquent que les concentrations varient d'un facteur 2 en une journée, la variation a été d'un facteur 5 le 22/06/84 (de 2700 mg/l à 500 mg/l en 24h). Aussi les prélèvements ont été faits quotidiennement en période de crue (de juin à octobre) à partir de août 1980. C'est à cette condition seulement que la méthode de calcul stochastique peut donner un résultat proche de la réalité.

Pour tous les cycles étudiés, l'évolution de la charge solide présente la même physionomie : une phase d'érosion précoce qui, en règle générale, s'étend sur 1/12 de l'année, une phase d'érosion tardive qui correspond au passage de la crue pendant 2/12 de l'année, et enfin, une longue période d'alluvionnement (9/12 de l'année) pendant laquelle le fleuve perd de sa compétence et ne véhicule plus que des eaux faiblement turbides.

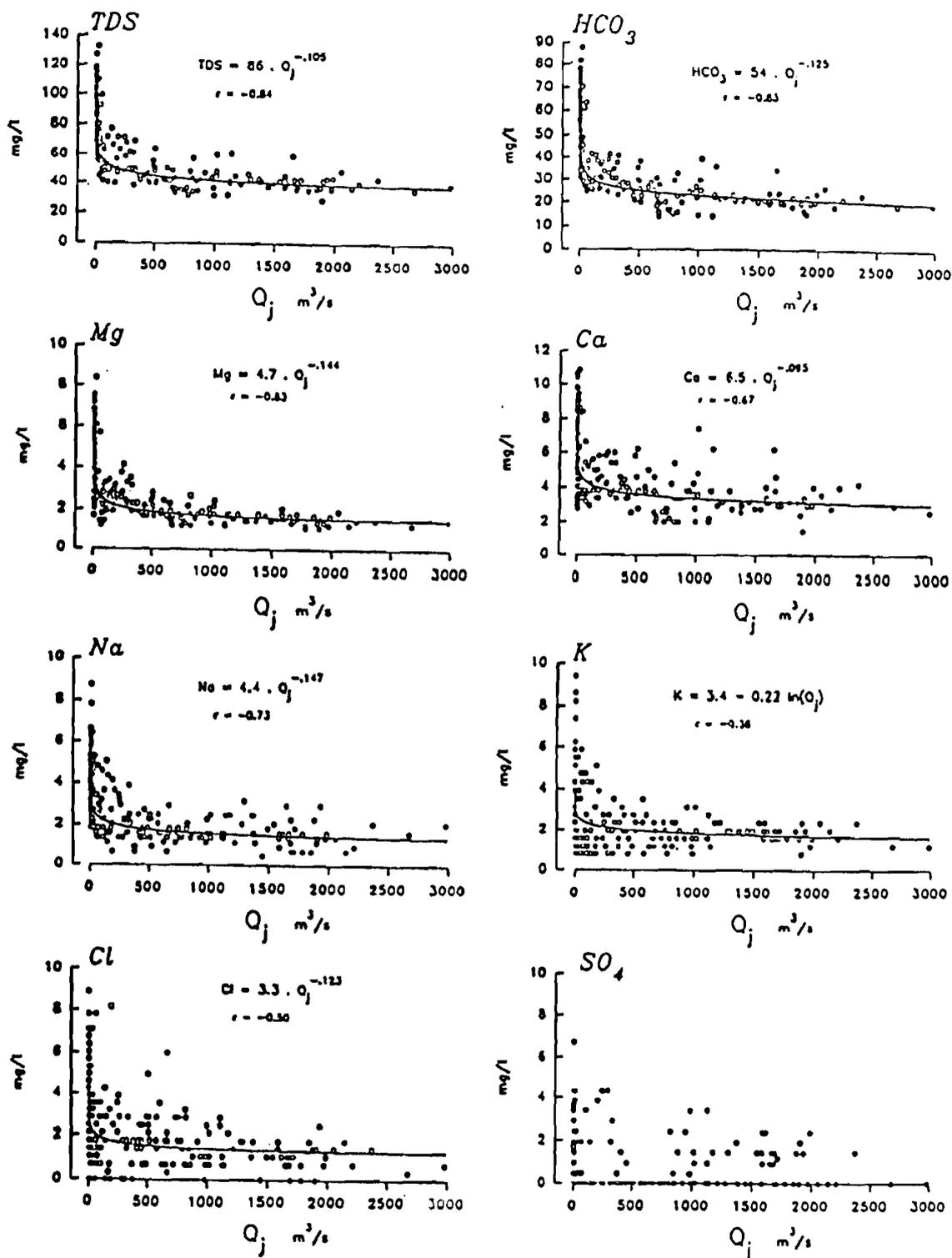


Fig. 1- Relations débit-concentration des différentes espèces aqueuses

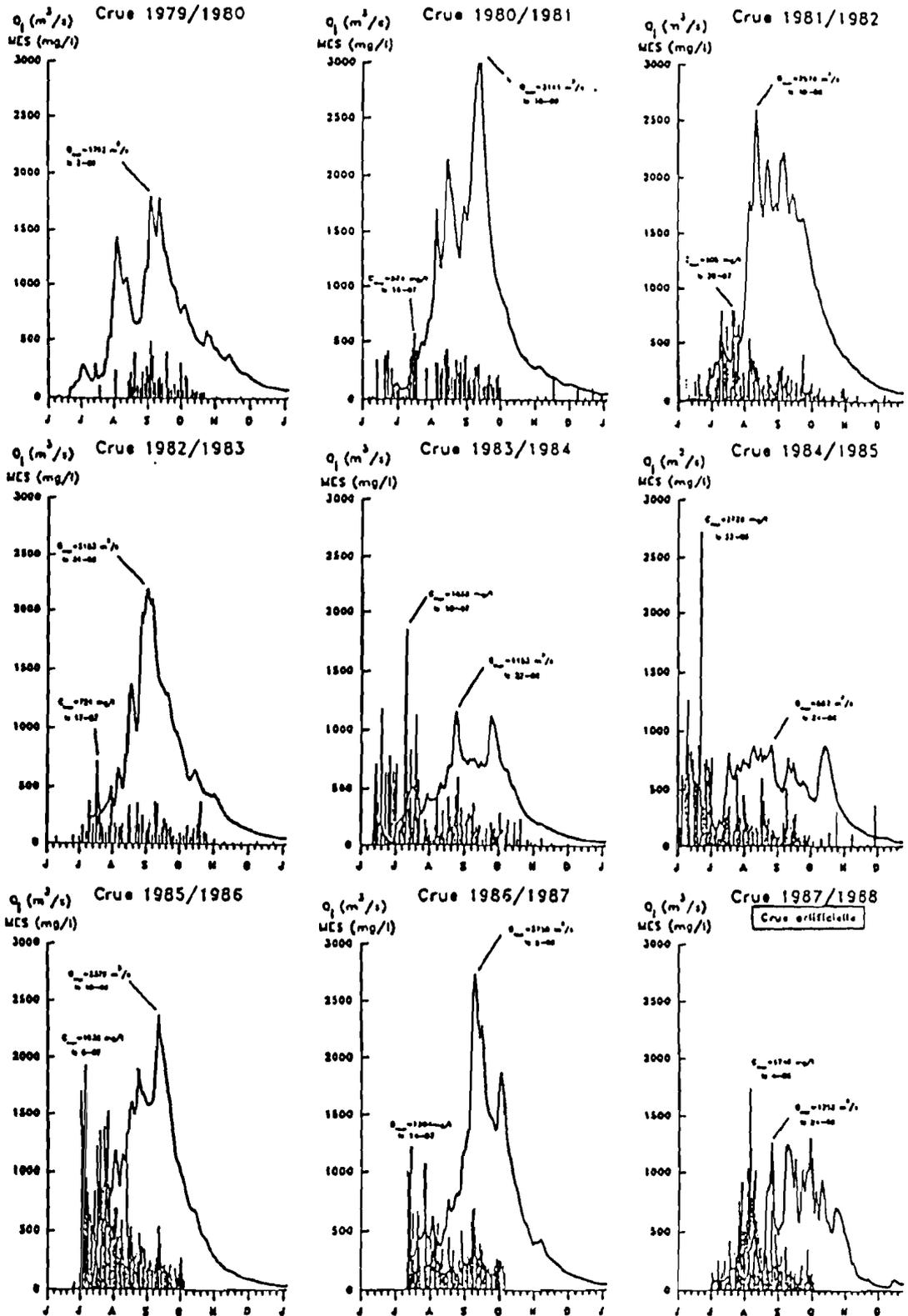


Fig. 2 - Evolution des MES du Sénégal à Bakel de 1979 à 1988

L'observation de la couleur des eaux permet facilement de distinguer ces trois phases dans l'évolution saisonnière de la concentration en MES. Pendant la saison des hautes-eaux, les eaux sont extrêmement turbides en raison de leur importante charge en limons, leur couleur est alors ocre. Elles s'éclaircissent à partir d'octobre et deviennent bleue sombre dès le mois de décembre, à cause du phénomène classique engendré par la présence de plaines d'inondation qui jouent le rôle de filtre et ne restituent au collecteur que des eaux limpides délestées de leur charge solide.

Au cours de la première phase, les variations de la charge solide sont importantes et rapides. Elles dépendent de la force érosive des averses, de la reprise des laissés de crue, et donc, de l'état du bassin à la suite de la saison des pluies précédente. Par conséquent, la réponse d'un bassin au cours de la phase d'érosion précoce ne dépend pas seulement de la crue annuelle : elle est aussi fonction de l'empreinte de l'année antérieure. La seconde période est plus "calme", l'amplitude des variations s'atténue. Elle traduit les possibilités réelles de la crue qui se déroule. 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. Une forte augmentation des écoulements dilue la charge solide. La période d'alluvionnement se traduit par la 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.

L'étude de l'évolution de la turbidité des eaux du Sénégal au cours des neuf cycles hydrologiques permet de tirer les enseignements suivants :

- la première onde de crue est la plus érosive, les sols après une longue saison sèche sont sans végétation et sont exposés à la battance des premières averses,

- au cours d'un cycle hydrologique, trois grands événements se succèdent dans un ordre chronologique immuable : maximum de la charge solide, maximum des écoulements et maximum de la charge soluble ; il n'existe donc pas de relation simple entre la concentration de matières en suspension et l'abondance des écoulements, comme c'est le cas pour la charge dissoute,

- la troisième remarque concerne la grande variabilité des turbidités au début des écoulements et le temps nécessaire pour qu'elles deviennent significatives ; c'est là que se situe la difficulté majeure pour appréhender les mécanismes qui déterminent l'acquisition de la charge solide par les fleuves des régions tropicales.

Tout ceci fait que les relations entre MES et débit sont complexes. Cependant, les remarques précédentes montrent que l'évolution des concentrations en MES peut être liée à celle du débit, en dehors du début de crue, époque à laquelle les eaux ont une turbidité difficilement prévisible et largement indépendante de celui-ci.

On a alors :

$$\text{MES} = 27,8 \cdot Q^{0,276} \quad (r=0,76 ; p=0,01\% ; n=483)$$

Durant les premiers mois de la crue (juin, juillet et août), les MES sont corrélées au potassium de la manière suivante :

$$\text{MES} = - 114 + 163 \cdot K \quad (r=0,72 ; p=0,01\% ; n=103)$$

Il n'existe donc aucune relation simple liant les MES au débit. Par contre, nous proposons une méthode d'estimation des MES à partir de la connaissance des concentrations en potassium et silice dissoute. L'analyse en composantes principales avait montré que ces trois éléments évoluaient de concert. La relation est :

$$\text{MES} = 363 + 127 \cdot K - 47 \cdot \text{SiO}_2 \quad (\text{concentrations en mg/l})$$

Le niveau de signification est de 0,01% pour 179 observations, le coefficient de régression est de 0,80. Cette approche sous-estime encore certains pics de concentration qui sont apparus juste avant l'arrivée de l'onde de crue (Fig.3).

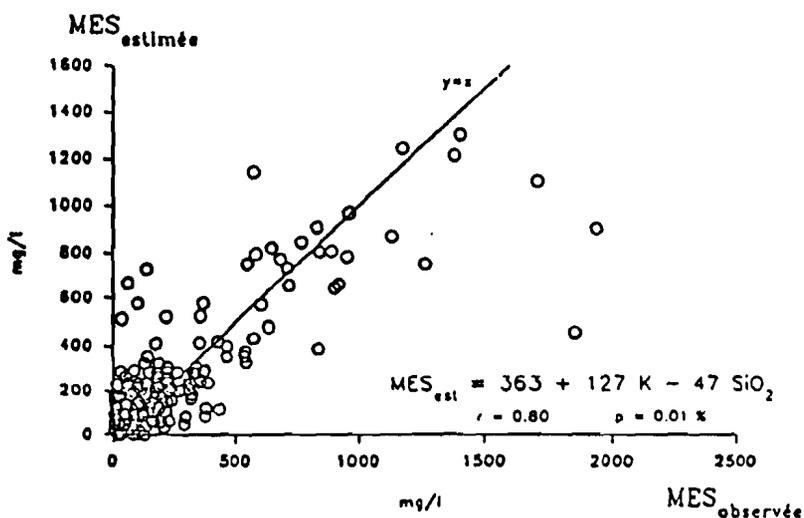


Fig. 3 - Estimation des MES du fleuve Sénégal à Bakel

## b) Les flux de matières fluviales à Bakel

Les flux de chaque espèce chimique dissoute et des MES sont estimés à partir du calcul de la concentration mensuelle. Etant donné que le pas de temps des prélèvements n'est pas régulier (de journalier en août 1980 à hebdomadaire, voire même mensuel en mars 1983 pour les éléments dissous par exemple), la concentration moyenne mensuelle est obtenue en divisant la somme des tonnages journaliers des jours prélevés.

$$C_m = \frac{\sum_j C_j \cdot Q_j}{\sum_j Q_j}$$

avec  $C_m$  la concentration moyenne mensuelle,  $Q_j$  le débit journalier, et  $C_j$  la concentration instantanée mesurée du jour  $j$ .

Certains mois n'ont donné lieu à aucun prélèvement. Ainsi, il a été intéressant de tester une méthode d'estimation des flux de matières des eaux du fleuve Sénégal à partir de la seule connaissance du débit. Cette démarche déterministe est rendue possible par le grand nombre de prélèvements effectués, qui permet de couvrir toutes les gammes de débit. Les relations utilisées pour la charge dissoute totale,  $\text{HCO}_3$ , Mg, Ca, Na, Cl et K sont celles décrites dans le paragraphe précédent ; les MES sont estimées à partir du débit et du potassium, et la silice à partir des MES et de  $1/Q$ .

La comparaison à l'échelle mensuelle des deux méthodes est très satisfaisante pour tous les éléments, y compris les MES, à l'exception des chlorures et de la silice. Finalement, le calcul des flux de matières est fait à partir du modèle déterministe en lui attribuant les valeurs journalières observées des concentrations des différents éléments.

Les concentrations mensuelles interannuelles (tableau III) montrent que mai est le mois où les eaux sont les plus concentrées pour tous les éléments dissous à l'exception du potassium qui est plus concentré en juin en même temps que les MES. C'est en septembre que les eaux du Sénégal à Bakel sont les plus diluées. La charge mensuelle totale dissoute passent de 87 mg/l en mai à 41 mg/l en septembre alors que la charge mensuelle en suspension va de 33 mg/l en fin de saison sèche à 440 mg/l en début de crue. Ce type d'évolution est une constante des eaux des fleuves de la zone tropicale sèche.

Tableau III

Concentrations moyennes interannuelles des eaux du Sénégal à Bakel  
(en mg/l)

	Jn	Jt	At	Se	Oe	Ne	De	Jr	Fr	Ms	Al	Ml	IA
HCO <sub>3</sub>	46,5	26,2	22,7	<u>22,1</u>	24,2	28,0	31,5	34,3	38,2	43,9	49,9	54,7	23,6
Cl	2,9	1,7	1,4	<u>1,4</u>	1,5	1,7	2,0	2,1	2,3	2,7	3,1	3,4	1,5
SO <sub>4</sub>	2,2	1,8	1,6	<u>1,6</u>	1,7	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	1,6
Mg	4,0	2,0	1,7	<u>1,7</u>	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,7	4,3	4,8	1,8
Ca	5,8	3,8	3,4	<u>3,3</u>	3,6	4,0	4,3	4,6	5,0	5,6	6,1	6,6	3,5
Na	3,8	1,9	1,6	<u>1,5</u>	1,7	2,0	2,3	2,6	2,9	3,5	4,0	4,5	1,7
K	3,2	2,7	2,1	<u>1,5</u>	1,3	1,2	1,2	<u>1,2</u>	<u>1,2</u>	2,1	2,4	2,6	1,7
SiO <sub>2</sub>	8,3	<u>7,3</u>	8,1	8,5	8,8	<u>8,9</u>	<u>9,1</u>	<u>9,2</u>	<u>9,2</u>	9,3	9,5	10,1	8,4
TDS	81,4	46,9	41,7	<u>40,8</u>	44,0	49,5	54,7	58,9	64,3	72,4	80,7	87,0	43,0
MES	358	440	283	206	138	110	82	68	60	46	33	<u>33</u>	232

En terme de flux, 88% des flux annuels dissous et 95% des flux annuels en suspension sont exportés entre les mois de juillet et octobre (tableau IV). Le flux annuel de matières exportés s'élève à  $2,68.10^6$  tonnes, dont 418000 t en dissous et  $2,26.10^6$  t en suspension (soit 85% du tonnage total exporté).

Tableau IV

Répartition mensuelle des flux de matières exportées par le Sénégal  
(en %)

	Jn	Jt	At	Se	Oe	Ne	De	Jr	Fr	Ms	Al	Ml
Débit mensuel	0,7	8,9	28,8	<u>36,6</u>	16,0	5,3	2,0	1,0	0,5	0,2	0,1	0
Flux en solution	1,2	9,7	28,0	<u>33,7</u>	16,4	5,9	2,6	1,4	0,6	0,4	0,1	0
Flux en suspension	1,0	17,3	<u>36,1</u>	32,2	9,7	2,5	0,7	0,3	0,1	0,1	0	0

### 3. Les aérosols désertiques

Une autre source d'apport terrigène, concernant (du moins aujourd'hui) cette fois-ci non plus le haut bassin du Sénégal mais sa vallée alluviale, est observée depuis 1984 : les aérosols désertiques. Ils constituent des marqueurs d'aridité Cette dynamique éolienne d'origine externe au bassin du fleuve Sénégal engendre chaque année le transit et le dépôt de poussières sahariennes en quantité non négligeable par rapport aux alluvions

fluviatiles. Ces apports sont mesurés quotidiennement dans deux sites: le lac de Guiers et la presqu'île du Cap Vert.

Ces travaux, sur financement CEE, font l'objet de la thèse de 3<sup>ème</sup> Cycle de Mamadou Issa DIALLO dont la soutenance est prévue pour juin ou octobre 1991. Ils seront plus approfondis par M. CARN, qui avec le secours des images satellitaires, devrait associer au bilan actuel des poussières atmosphériques, les sédiments du lac de Guiers et leurs horizons éoliens récents ainsi que les loess qui tapissent les hauteurs du Fouta Djallon en Guinée. Tout ceci dans une vision paléoclimatique.

L'étude des aérosols désertiques se poursuit sans discontinuité depuis 1984 sur la presqu'île du Cap Vert (station de Dakar) et depuis juillet 1987 sur le lac de Guiers (station de Ngnith) (Tableau V).

Tableau V

Moyennes mensuelles et annuelles des aérosols à Dakar

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept	octo	novem	décem	moy
1984	1.03	1.63	1.11	1.17	0.89	0.80				1.52	0.46	0.66	1.04
1985	0.83	1.53	0.94	1.10	0.70	0.93	0.30	0.13	0.23	0.32	0.32	0.47	0.66
1986	0.82	0.54	1.16	0.56	0.50	0.52	0.21	0.39	0.22	0.48	0.35	0.40	0.52
1987	0.30	0.52	0.85	0.36	1.18	0.43	0.33	0.29	0.22	0.37	0.18	0.37	0.51
1988	0.93	0.87	0.66	0.42	0.53	0.52	0.22	0.16	0.15	0.18	0.17	0.22	0.42
1989	0.36	0.86	0.60	0.65	0.72	0.80	0.22	0.13	0.16	0.15	0.15	0.25	0.42
1990	0.58	0.37	0.71										

Les observations sont quotidiennes à l'aide de capteurs pyramidaux situés à environ 5 m du sol. Les retombées gravitaires de poussières sont exprimées en g/m<sup>2</sup>/jour (Fig.4,5,6).

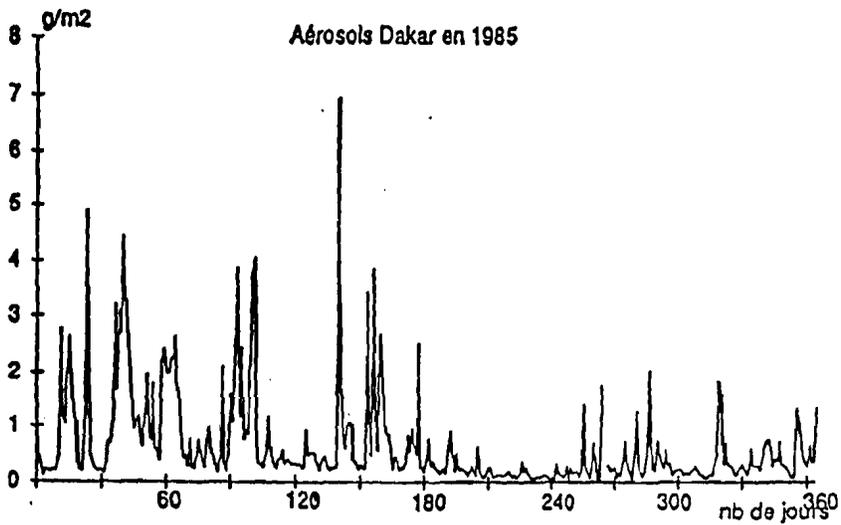
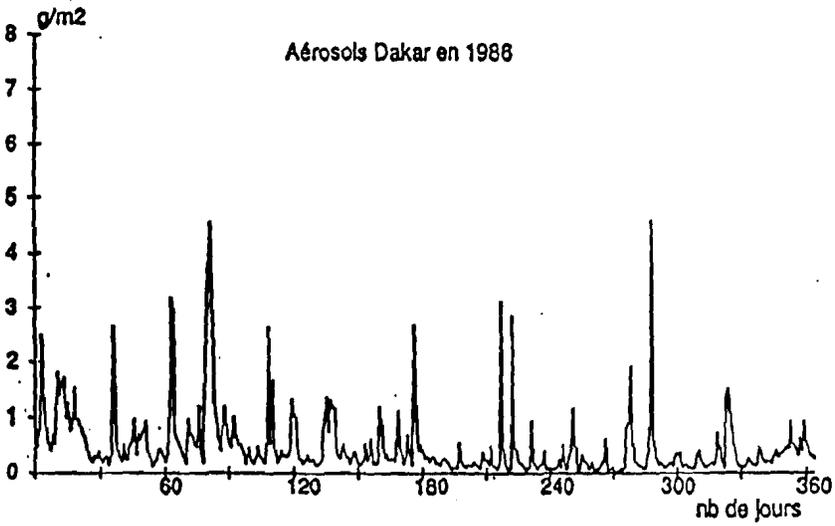
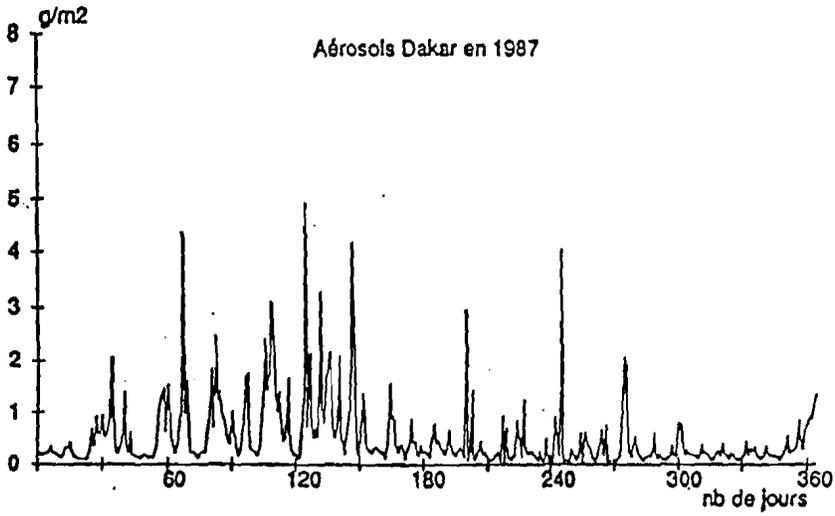
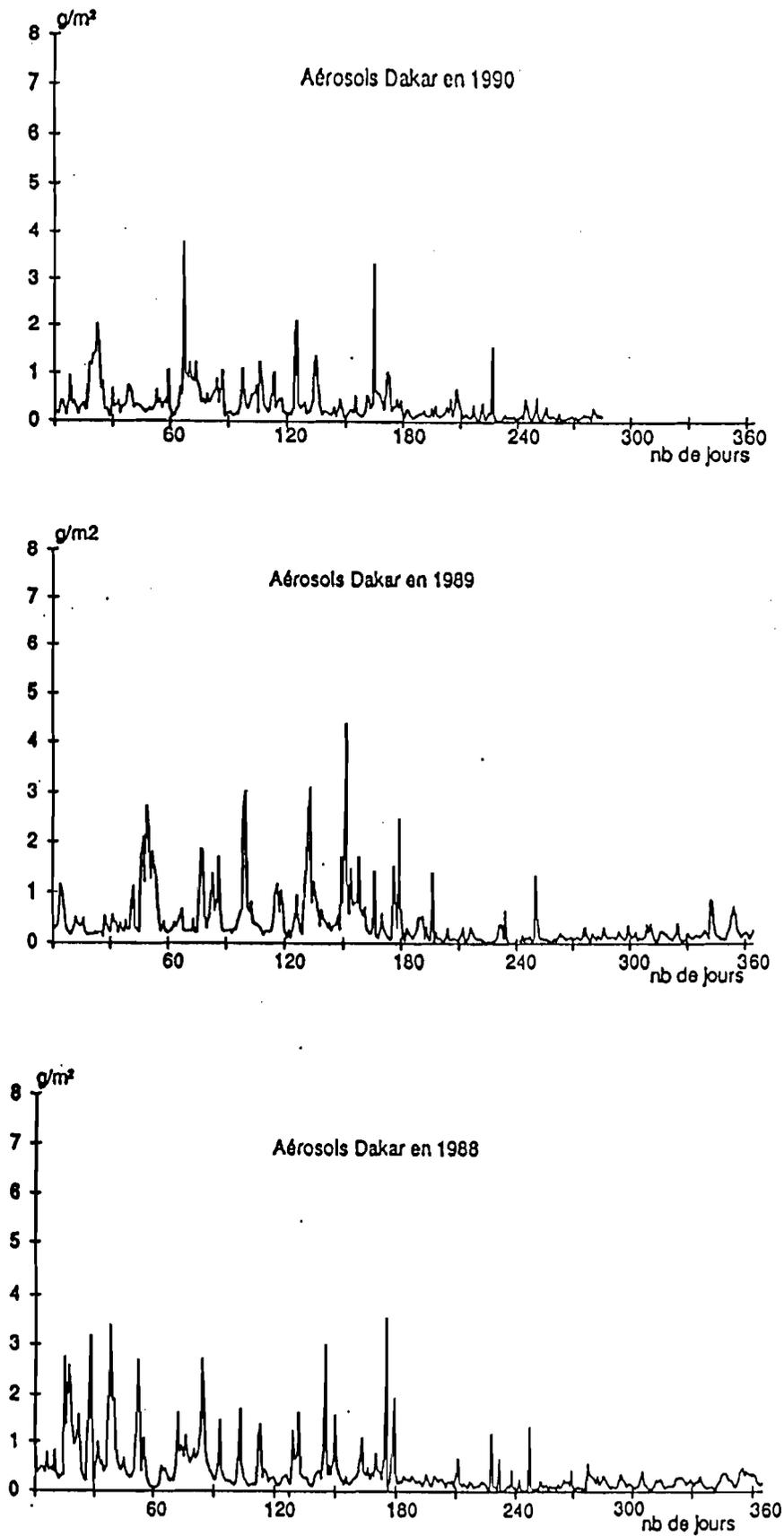


Fig. 4 - Les aérosols à Dakar de 1985 à 1987



**Fig. 5 - Les aérosols à Dakar de 1988 à 1990**

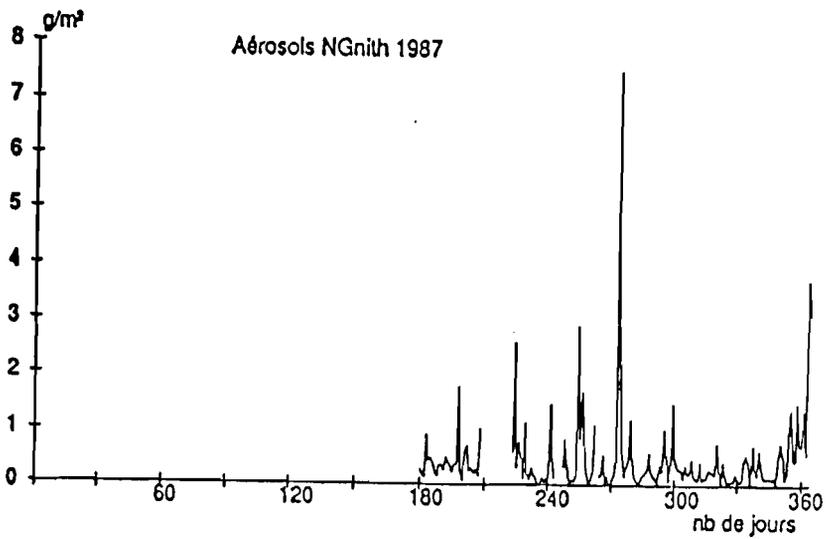
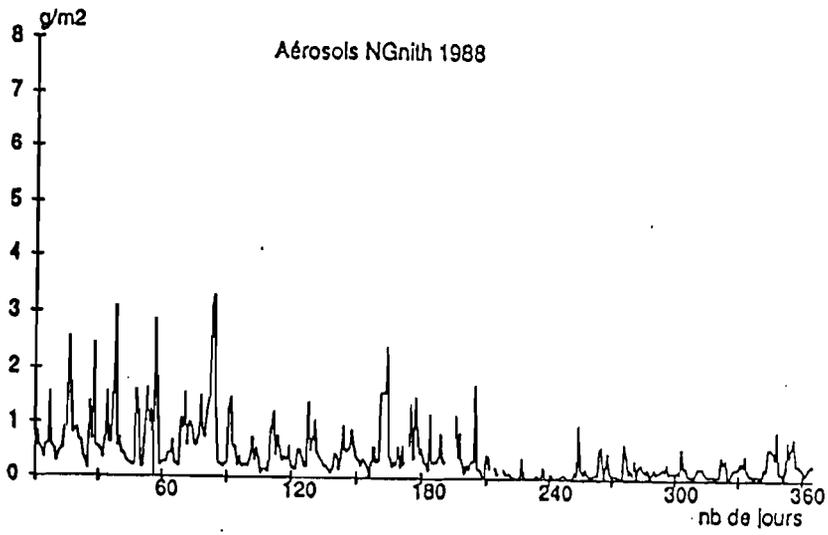
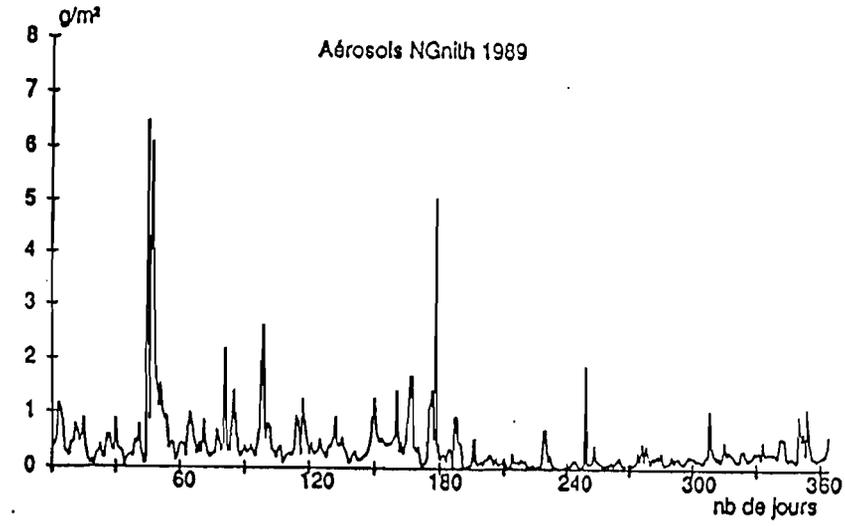


Fig. 6 - Les aérosols à Ngnith de 1987 à 1989

Les mesures effectuées depuis avril 1989 mettent en évidence un très net affaiblissement des apports éoliens comparativement aux années précédentes (Fig.7).

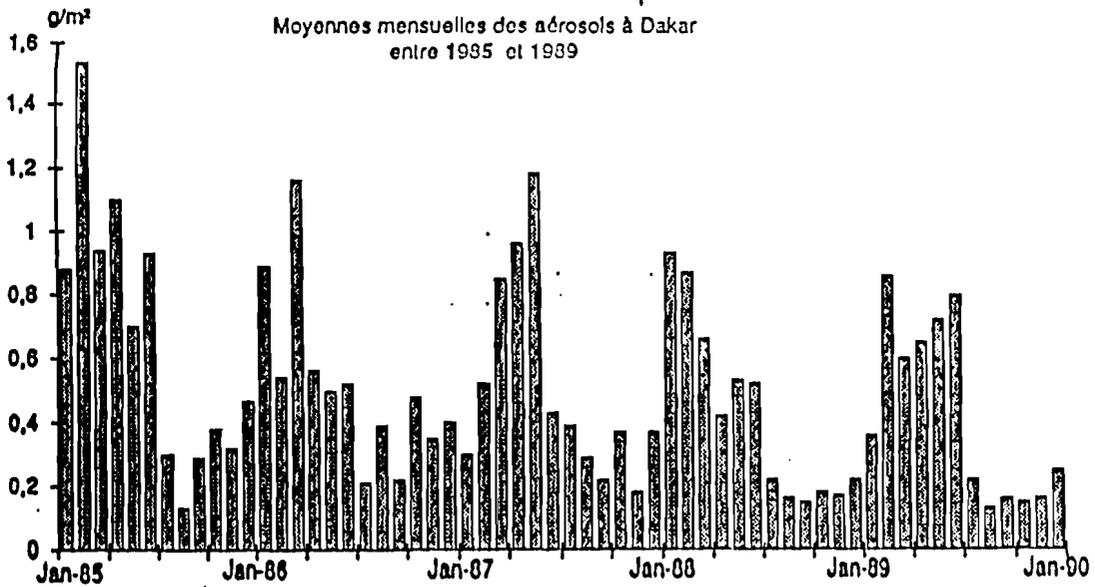


Fig. 7 - Dépôts mensuels d'aérosols à Dakar

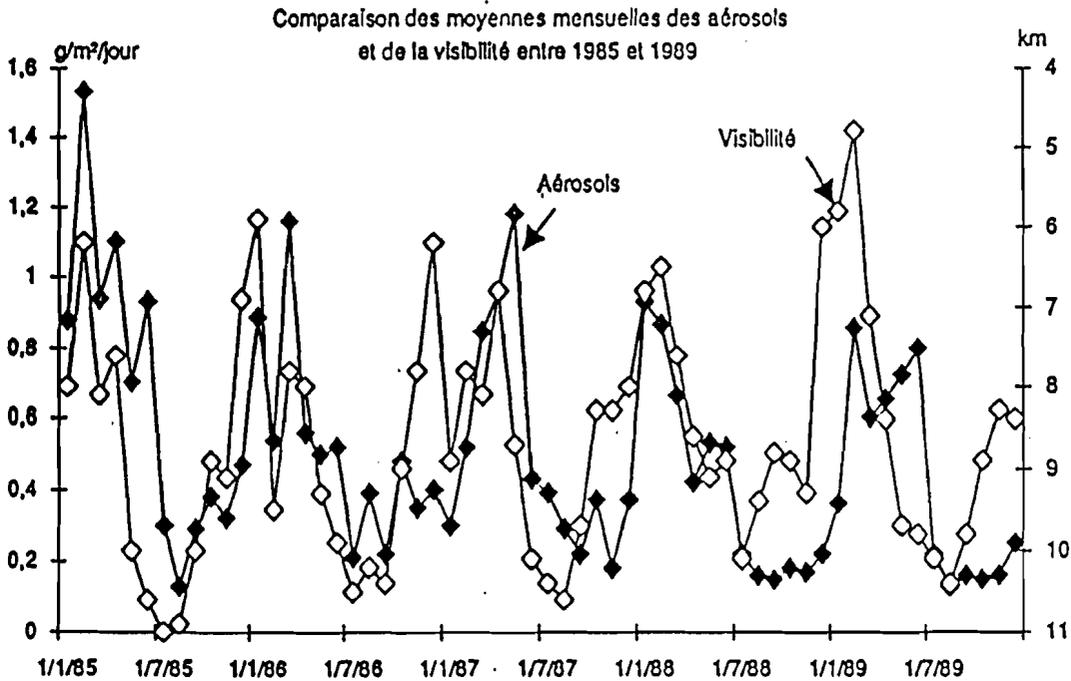


Fig. 8 - Relation visibilité/ quantité de poussières à Dakar.

A Dakar comme à Ngnith les concentrations moyennes mensuelles oscillent entre 0,2 et 0,8 g/m<sup>2</sup>/jour. La comparaison entre les mesures réalisées à Dakar et à Ngnith montre que les meilleures corrélations entre les enregistrements aux 2 stations (distantes d'environ 1°30 en latitude soit approximativement 170 km à vol d'oiseau) sont obtenues avec un décalage de 1 journée.

La sédimentation d'origine éolienne et de source saharienne représente, malgré une nette diminution des phénomènes de brumes sèches, l'une des composantes essentielles des dépôts qui garnissent le fond de la dépression du lac de Guiers. En termes de bilan, les aérosols désertiques sont équivalents aux apports d'alluvions par le fleuve Sénégal au moment où la liaison fleuve-lac est établie (de l'ordre de quelques centaines de milliers de tonnes). Leur étude mérite d'être approfondie car ils constituent dans les carottes lacustres les archives des climats qui se sont succédés depuis des millénaires.

Les relations qui pourront être établies entre les enregistrements horaires de la visibilité au sol et les dépôts d'aérosols sont de nature à permettre éventuellement des interprétations paléoclimatiques et la reconstitution des paléoenvironnements (Fig. 8).

#### 4. Les flux de matières dissoutes. Qualité chimique des eaux de surface.

##### *a) La synthèse des études antérieures.*

En ce qui concerne le bassin amont et les observations au poste de Bakel réalisées pendant quatre années consécutives, les dépouillements des flux de matière dissoute (en solution) sont achevés avec le mémoire de thèse de M. ORANGE.

Pour la zone aval comprenant les données sur la qualité chimique des eaux du Sénégal aux quatre stations secondaires (Saldé, Ngoui, Guédé et Podor), l'échéance est plus lointaine. Plus près de l'embouchure, l'exploitation des observations antérieures à Richard Toll et à Saint Louis est en cours. Dans cette synthèse de l'avant-barrage figurait également la modélisation de l'intrusion saline qui affectait autrefois la vallée du Sénégal à plus de 200 km en amont de son embouchure. Il était également prévu de revoir dans leur ensemble l'intégralité des données physico-chimiques sur le lac de Guiers entre 1979 et 1982 (en cours de traitement).

*b) Observations sur les transports dissous et la qualité physico-chimique des eaux du Sénégal au cours des crues 1989 et 1990.*

**b.1 Qualité chimique des eaux du Sénégal.**

Les stations d'observation n'ont pu être mises en place depuis le début du projet (différend frontalier entre le Sénégal et la Mauritanie). Elles pourraient être fonctionnelles dès le premier trimestre de 1991. Cependant la station de Richard Toll a été l'objet de quelques campagnes ponctuelles lors des échantillonnages réalisés sur le lac de Guiers et la vallée du Ferlo (projet de collaboration avec GEOTOP).

**b.2 Qualité chimique des eaux du lac de Guiers.**

La physico-chimie des eaux du lac de Guiers est évolutive dans l'espace et dans le temps. Les phases de concentration et de dilution des solutions se succèdent au rythme du fonctionnement du lac en système ouvert ou fermé, et de l'évolution du niveau du plan d'eau.

Campagnes d'échantillonnages des eaux du lac de Guiers

Depuis le début de l'année 1989, 27 campagnes de prélèvements des eaux du lac de Guiers ont été réalisées entre les mois de janvier 89 et octobre 90. Les sites choisis (15) ont dans un premier temps été essentiellement répartis sur la rive Est. En rive Ouest, la station de référence de Ngnith est l'objet d'un suivi quotidien pour certains paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, chlorures). Depuis novembre 1989, avec la possibilité offerte par une embarcation, à juste titre baptisée EQUÉSEN, (voir rapport sur la géochimie des eaux du Ferlo) les prélèvements sont mensuellement effectués en 16 stations au centre du lac.

Du nord au sud du lac les prises d'eau successives sont les suivantes: le fleuve Sénégal à Richard Toll, le canal de la Taoué, l'embouchure de la Taoué dans la partie nord du lac, en rive Ouest, la station de Ngnith et en rive Est, les stations de Temeye, Mbane, Sanninte, Ndiaraye, Foss, Mal, Guidic, Sier, Diamenar, Gankette et Keur Momar Sarr. Sur la rive orientale du lac, les stations sont distantes d'environ 5 km.

On dispose à l'heure actuelle de plus de 150 prélèvements qui fournissent à différentes cotes l'évolution spatio-temporelle de la qualité chimique des eaux du lac. Les campagnes successives ont été réalisées pendant une première phase de concentration (baisses successives du niveau: +1,05 m; +0,92 m; +0,87 m; +0,34 m; +0,22 m; -0,02 m; -0,18 m; -0,22 m) , une seconde phase de dilution avec un nouveau remplissage du lac par la crue du fleuve Sénégal (hausses

successives du niveau: +0,05 m; +0,27 m; +0,54 m ; +1,52 m; 1,61 m) et une troisième phase de concentration (+1,50 m; 1,40 m; 1,16 m; 0,73) puis une nouvelle dilution (crue 90/91).

Le dépouillement des résultats analytique est en cours. Les paramètres mesurés sont le pH (acidité des solutions), la conductivité et les éléments majeurs (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub> et la silice). Depuis octobre nous disposons également des résultats sur les éléments traces et des données sur le criblage bactériologique qui doit faire l'objet du mémoire de thèse à Montréal (Canada) de Dominique LEGER (sous la co-direction de J.P. SCHMITT et de J.Y. GAC).

b.3 Qualité chimique des eaux de la lame de submersion de la vallée morte du Ferlo.

L'inondation de la vallée morte du Ferlo, prolongement naturel de la partie sud du lac de Guiers, constitue un fait nouveau qui, s'il était prévisible dans le contexte de l'après-barrages, ne l'était certes pas à si brève échéance. Dans le cadre du projet EQUÉSEN, l'étude de cette éventuelle lame de submersion n'était prévue que pour 1990/1991. La programmation des missions a dû être modifiée et prendre en compte cette importante nappe d'eau qui à son maximum d'extension en janvier 1989 s'étendait sur plus de 50 km. Le 15 juillet 1989, par le jeu de l'évaporation et de l'infiltration la superficie inondée se réduisait à une mare résiduelle de quelques km<sup>2</sup>, au sud de la digue de Keur Momar Sarr.

Le suivi des différentes phases de retrait et de l'évolution concomitante de la physico-chimie des eaux de la lame de submersion a été réalisé au cours des mêmes campagnes de prélèvements sur le lac de Guiers. Au moment de l'extension maximum, en janvier 1989, l'échantillonnage approximativement effectué tous les 2 km comprenait 28 stations; il était réduit à 5 lors de la phase ultime de retrait fin juillet 1989.

L'ensemble des résultats sont interprétés dans la publication jointe au rapport sur la géochimie des eaux de la première lame de submersion de la vallée du Ferlo.

*Les déversements du lac et l'inondation du Ferlo ont été de nouveau d'actualité: les vannes de la digue de Keur Momar Sarr ont été pour la seconde fois ouvertes entre le 29 août et le 18 octobre 1989. L'inondation a été bien plus importante que celle de 1988: elle s'est étendue sur près de 80 km.*

En revanche les circonstances ont voulu qu'elle ne puisse pas se produire en 1990 par suite d'un faible remplissage du lac. C'est une occasion inespérée au cours de ce nouvel assèchement d'étudier les nappes sub-affleurantes dans cette vallée et de tester leurs

liaisons avec les eaux de surface. Cette opération sera menée au début de 1991

#### IV .- LE VOLET FORMATION

Le soutien de la CEE a permis de développer dans le cadre de ce projet un important volet de formation aussi bien de jeunes chercheurs européens qu'africains. Par courtoisie à l'égard de ceux qui doivent soutenir en novembre et décembre 1990, nous ne joignons à ce rapport que les résumés des mémoires de thèses des différents impétrants.

*1. Abdoul Aziz TANDIA : Revue critique des méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Contribution de l'approche géochimique et isotopique. Louga - Nord Sénégal). Thèse de 3ème cycle soutenue au département de Géologie de l'Université de Dakar le 22 mai 1990 (J.Y. GAC, membre du Jury).*

*2. Noël EVORA : Bilan hydrique du lac de Guiers. Importance de l'évapo-ration d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne. Thèse de 3ème cycle dont la soutenance est prévue le 28 novembre 1990 à Mons (Belgique). Membres du Jury (MM. COGELS et GAC).*

*3. Cheikh Becaye GAYE : Etude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies et de décharge évaporatoire des aquifères libres sous climat semi-aride au nord du Sénégal. Thèse de Doctorat d'Etat dont la soutenance est prévue à Dakar le 4 décembre 1990 (Membre du Jury : J.Y. GAC).*

*4. Didier ORANGE : Hydroclimatologie et géodynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique : le Fouta Djallon. Bilans, Mécanismes et Modélisation. Thèse de Doctorat dont la soutenance est prévue le 20 décembre 1990 à l'Université de Strasbourg (membre du Jury : J.Y. GAC).*

#### V .- CONCLUSION

En concluant ce troisième rapport, j'ai un sentiment d'inachevé tant la nature propose, à sa fantaisie, des événements climatiques évidemment imprévisibles. Il en découle une impuissance devant ce que sera la pluie de demain, la crue prochaine, l'évolution du lac de Guiers, l'inondation du Ferlo... Cette ignorance n'autorise pas une gestion concertée de ce vaste écosystème fluvio-lacustre que constituent le fleuve Sénégal et le lac de Guiers. Il faut encourager les recherches dans le domaine de la prévision climatique.