

**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° TS<sub>2</sub> 0198-F EDB**

**Projet EQUÉSEN**

**ENVIRONNEMENT ET QUALITE DES EAUX DU SENEGAL**

*Rapport scientifique n° 1*

**ORSTOM**

**Octobre 1989**

## INTRODUCTION

Le programme pluridisciplinaire EQUESSEN sur "l'Environnement et la qualité des eaux du Sénégal" vient de recevoir un appui financier de la C.E.E. (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).

Cette note constitue le premier rapport scientifique établi sur l'état d'avancement des travaux de recherches au 1er novembre 1989.

### 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 hydro-géochimiques 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.

CECCHI P. : Allocataire de recherche, détaché à l'ISRA. Spécialité: hydrobiologie.

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

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

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

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 pour la durée du projet 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.

## 2. MISE EN PLACE DES CREDITS

La date contractuelle du projet a été fixée au 1er avril 1989.

Les premières délégations budgétaires au contractant principal (ORSTOM) ont eut lieu le 10 juillet 89 (150.000 FF soit environ 21 500 Ecus) , le 13 octobre 1989 (500 000 FF soit environ 71 500 écus) et le 14 octobre 89 (25.000 FF soit environ 3570 Ecus:achat d'appareillage pour programme B2 ).

Le versement de juillet a permis l'acquisition d'un véhicule tout terrain 4x4 et une première mission sur le fleuve Sénégal en septembre. L'achat de matériel et des équipements scientifiques n'a pu être réalisé par suite de l'arrivée tardive des délégations en octobre.

Les projets de gestion des sous-contrats ORSTOM/FUL, ORSTOM/ISRA et ORSTOM/Université sont en cours. Le sous-contrat ORSTOM/FUL devait être effectif fin octobre 89. Les sous-contrats ORSTOM/ISRA et ORSTOM/Université de Dakar sont prévus pour la fin novembre 1989.

## 3. RAPPORT SCIENTIFIQUE

### A. 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 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.

**B1 - ETUDE DES FLUX DE MATIERES DISSOUTES ET PARTICULAIRES ET DE LA QUALITE DES EAUX DE SURFACE DANS L'ENSEMBLE DU DISPOSITIF FLUVIO-LACUSTRE (Fig. 1 et 2).**

Responsable scientifique : J.Y. GAC (ORSTOM)

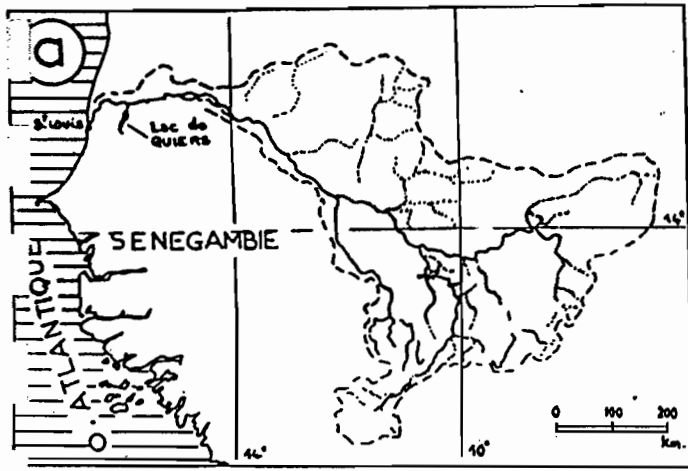
Cette étude concerne les recherches menées par le contractant principal, l'ORSTOM. Au cours de cette première période de 6 mois, les travaux ont pu être réalisés sur les fonds propres délégués par l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le développement en Coopération.

**1. LES FLUX DE MATIERES PARTICULAIRES.**

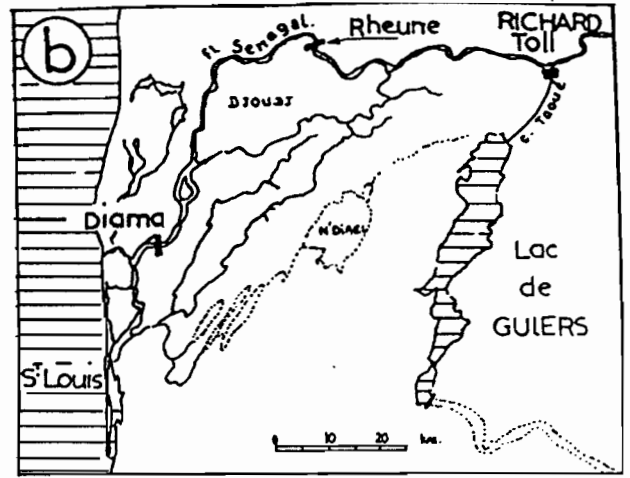
**1.1 Synthèse des études antérieures.**

Elle devrait être achevée en décembre 89 par la diffusion d'un document sur " L'évolution géodynamique d'un vieux paysage latéritique le Fouta-Djalon". Ce massif où se situent les sources du Sénégal est assujéti aux processus d'érosion mécanique et d'altération chimique qui contrôlent les flux de matières dissoutes et particulaires. L'importance de ces deux mécanismes concurrentiels dans l'approfondissement des sols est en cours de quantification pour la période 1980-1988.

Une autre source d'apport terrigène, concernant cette fois-ci non plus le haut bassin du Sénégal mais sa vallée alluviale, est observée depuis 1984: les aérosols désertiques. 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 fluviales. Ces apports sont mesurés

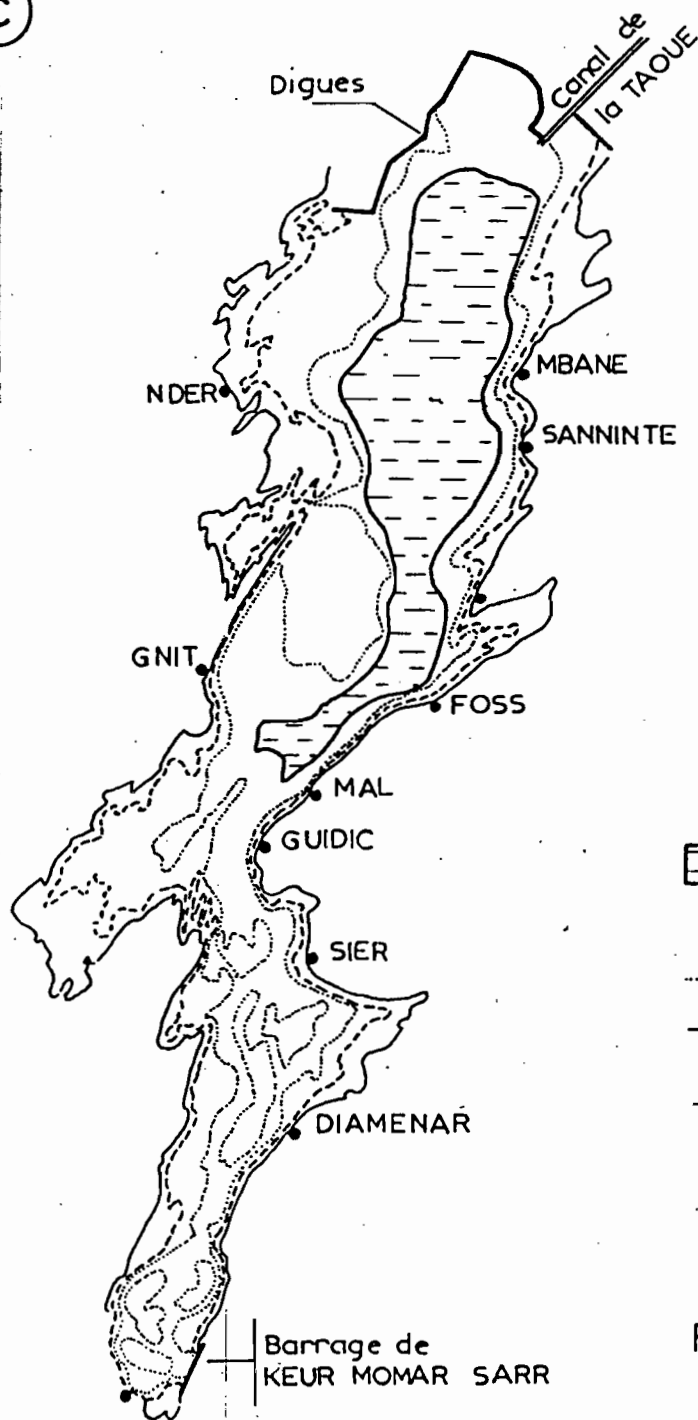


Le bassin versant du fleuve Sénégal



Le lac de Guiers et l'embouchure du fleuve.

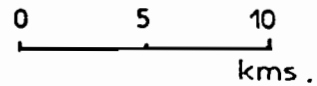
(c)



✦ barrages



● DIAGLE




-  Surface du lac (cote -1,15)
- ..... Niveau 0
- - - - Extension maximale du lac au cours de la dernière décennie (cote +1,8)
- Limite du bassin versant (+4m)

Fig 1 Situation géographique

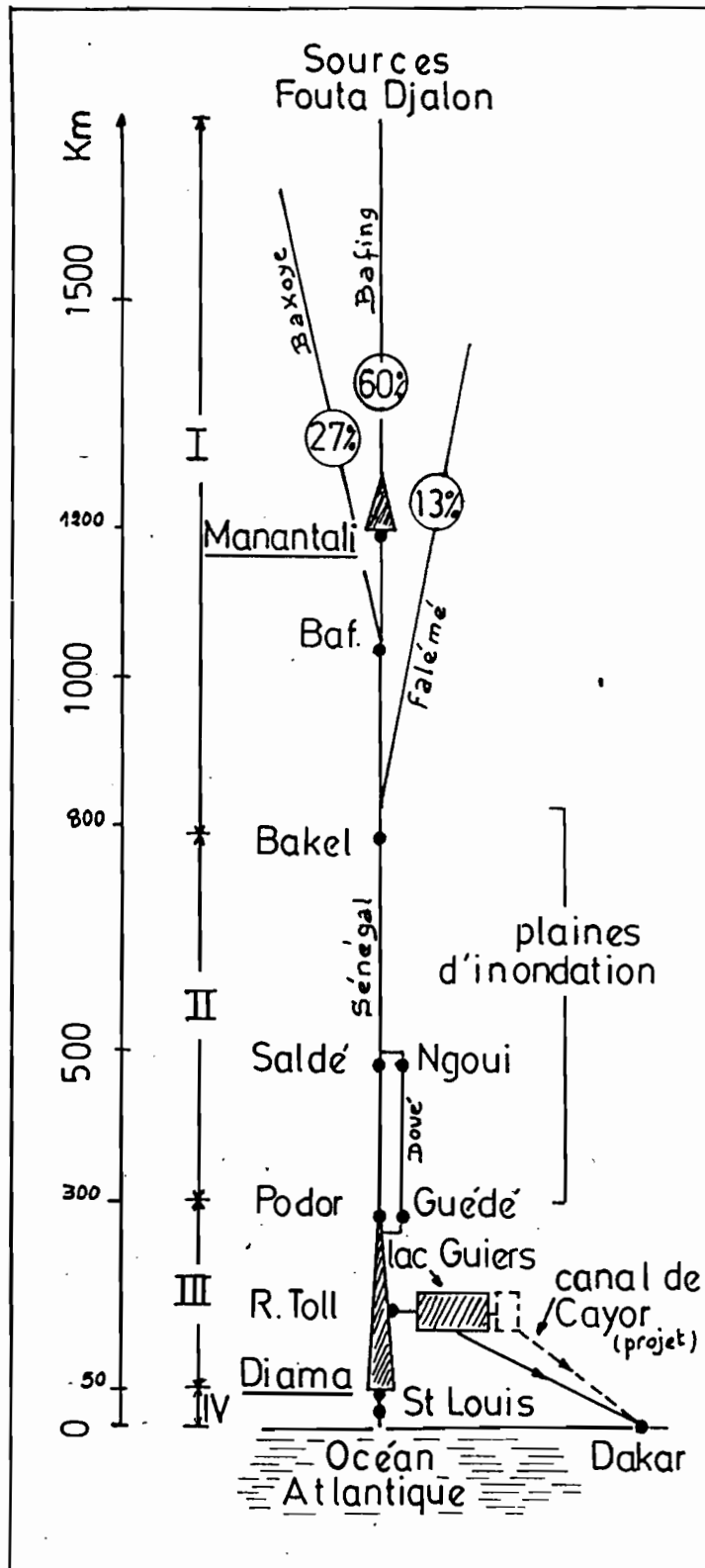


Fig. 2

quotidiennement dans deux sites: le lac de Guiers et la presqu'île du Cap Vert.

### 1.2. Observations sur les transports solides au cours de la crue de 1989 (de juin à octobre).

Elles ont pu être réalisées par la mise en place d'un dispositif lourd de mesures aux deux stations clefs du réseau hydrographique du fleuve Sénégal: Bakel (exutoire amont du bassin amont qui contrôle les apports particuliers des trois branches-mères du Sénégal) et Richard Toll (exutoire aval situé au débouché de la vallée alluviale à 150 km de l'embouchure de fleuve et qui permet aussi de quantifier les flux particuliers vers la dépression du lac de Guiers).

Deux missions de longue durée ont donné lieu à des prélèvements quotidiens de près de 200 litres d'eau : du 22 juin au 11 octobre 1989 à Bakel et du 17 juillet au 19 septembre à Richard Toll.

Par ailleurs, une mission ponctuelle d'une semaine a été réalisée par J.Y. GAC à partir de la France sur le site de Bakel du 29 août au 6 septembre 89, au moment de la pointe maximale de la crue qui s'est produite le 30 août 1989.

Les dépouillements des résultats sont en cours d'exploitation pour la station aval de Richard-Toll. Les mesures partielles obtenues à l'amont au site de Bakel apportent les renseignements suivants :

- le maximum de la crue 1989 se situe le 30 août avec une hauteur d'eau de 8,20 m à l'échelle de crue et un débit de pointe de 3000 m<sup>3</sup>/s. Ces valeurs ne situent naturellement pas l'importance de la crue par suite du stockage réalisé à Manantali dans le réservoir amont. La comparaison avec les crues antérieures nécessite de connaître le plan de gestion du barrage de retenue amont (laches quotidiennes, temps de propagation de la crue entre Manantali et Bakel).

- la crue artificielle au cours du cycle hydrologique 89/90 devrait être de l'ordre de 400 m<sup>3</sup>/s, pour un module moyen interannuel d'environ 700 m<sup>3</sup>/s observé sur 87 ans entre 1903 et 1989.

- la concentration maximale de matières en suspension a été observée le 12 juillet 1989 avec un débit solide de 1,51 kg/m<sup>3</sup>. Elle est du même ordre de grandeur que celles des années précédentes.

- la crue artificielle engendre des modifications sensibles dans la chronologie classique des événements: maximum du transport solide, maximum de la crue, maximum du transport dissous. Ceci sera précisé au moment du calcul du bilan

quantitatif sur les flux particuliers (tonnages exportés) et les phénomènes d'érosion.

Remarque : le dispositif allégé de mesures du transport solide prévu dans les quatre stations secondaires de la vallée à Ngoui, Saldé, Guédé et Podor n'a pu être mis en place. Les événements entre le Sénégal et la Mauritanie sont trop récents: il est probable que les observations y seront possibles avant la crue de 1990.

### 1.3. Observations sur la dynamique éolienne: les poussières sahariennes.

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).

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.

Les mesures effectuées depuis avril 1989 mettent en évidence un très net affaiblissement des apports éoliens comparativement aux années précédentes. A Dakar comme à Ngnith les concentrations moyennes mensuelles oscillent entre 0,2 et 0,8 g/m<sup>2</sup>/jour.

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.



## 2. LES FLUX DE MATIERES DISSOUTES . QUALITE CHIMIQUE DES EAUX DE SURFACE.

### 2.1. 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 en cours et devraient être achevés pour la remise du second rapport scientifique en avril 90.

Pour la zone aval comprenant les données sur la qualité chimique des eaux du Sénégal aux quatres 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 figure 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 est également prévu de revoir dans leur ensemble l'intégralité des données physico-chimiques sur le lac de Guiers entre 1979 et 1982 (voir programme C du projet).

### 2.2. Observations sur les transports dissous et la qualité physico-chimique des eaux du Sénégal au cours de la crue 1989.

#### 2.2.1. *Qualité chimique des eaux du Sénégal.*

Les stations d'observation n'ont pu être mises en place depuis le début du projet (financement trop tardif et différend frontalier entre le Sénégal et la Mauritanie). Elles pourraient être fonctionnelles dès le premier trimestre de 1990. 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.

#### 2.2.2. *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 (Fig.3).

##### 2.2.2.1. *Formulation nouvelle d'abaques reliant la surface et le volume du lac à la hauteur d'eau.*

Les cotes du lac de Guiers sont observées quotidiennement à la station de Ngnith. Le zéro de l'échelle limnimétrique correspond au zéro IGN. Les anciens abaques avaient été établis

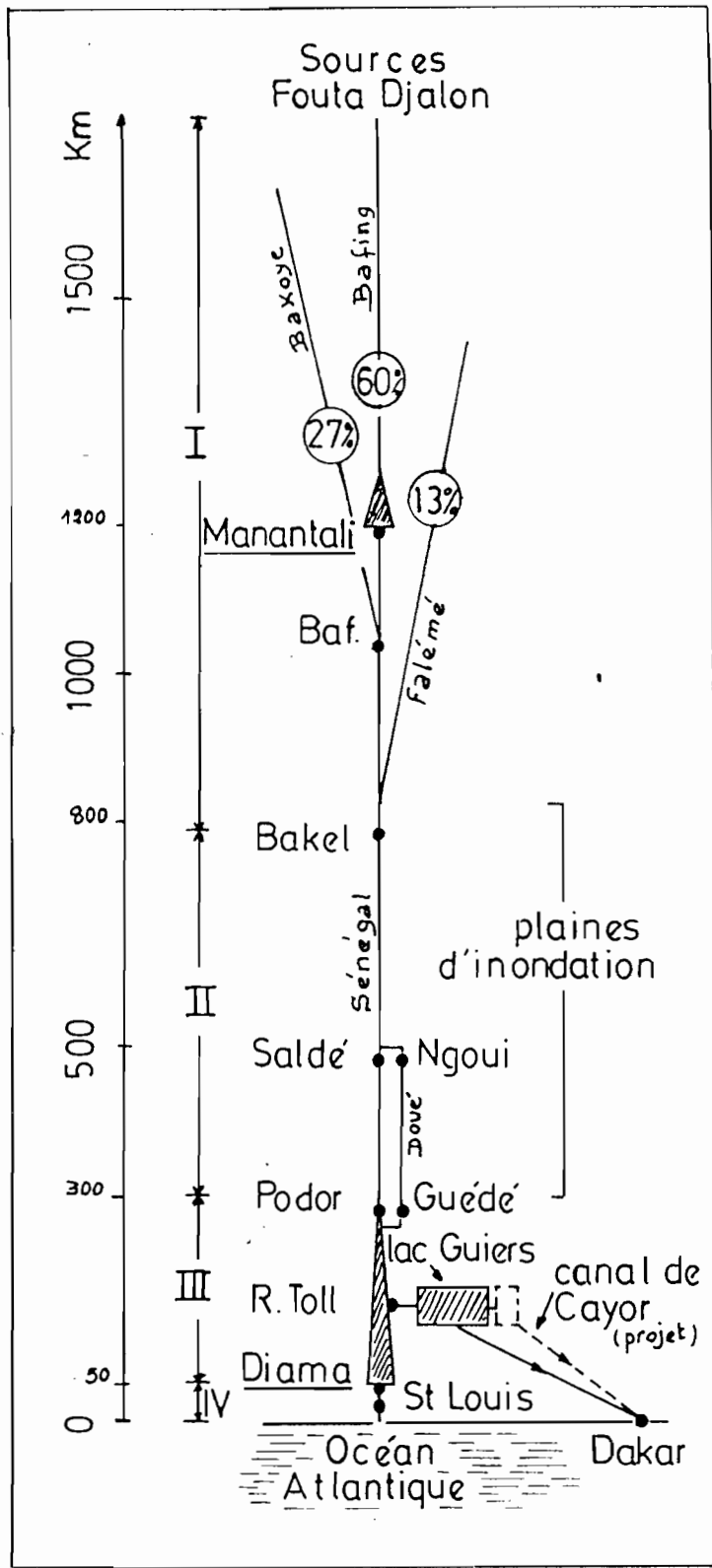


Fig. 2

Fig. 3

▨ H: - 1,00

▩ H: - 1,50

■ H: -1,75

H = -0,50

H = 0

H = 1

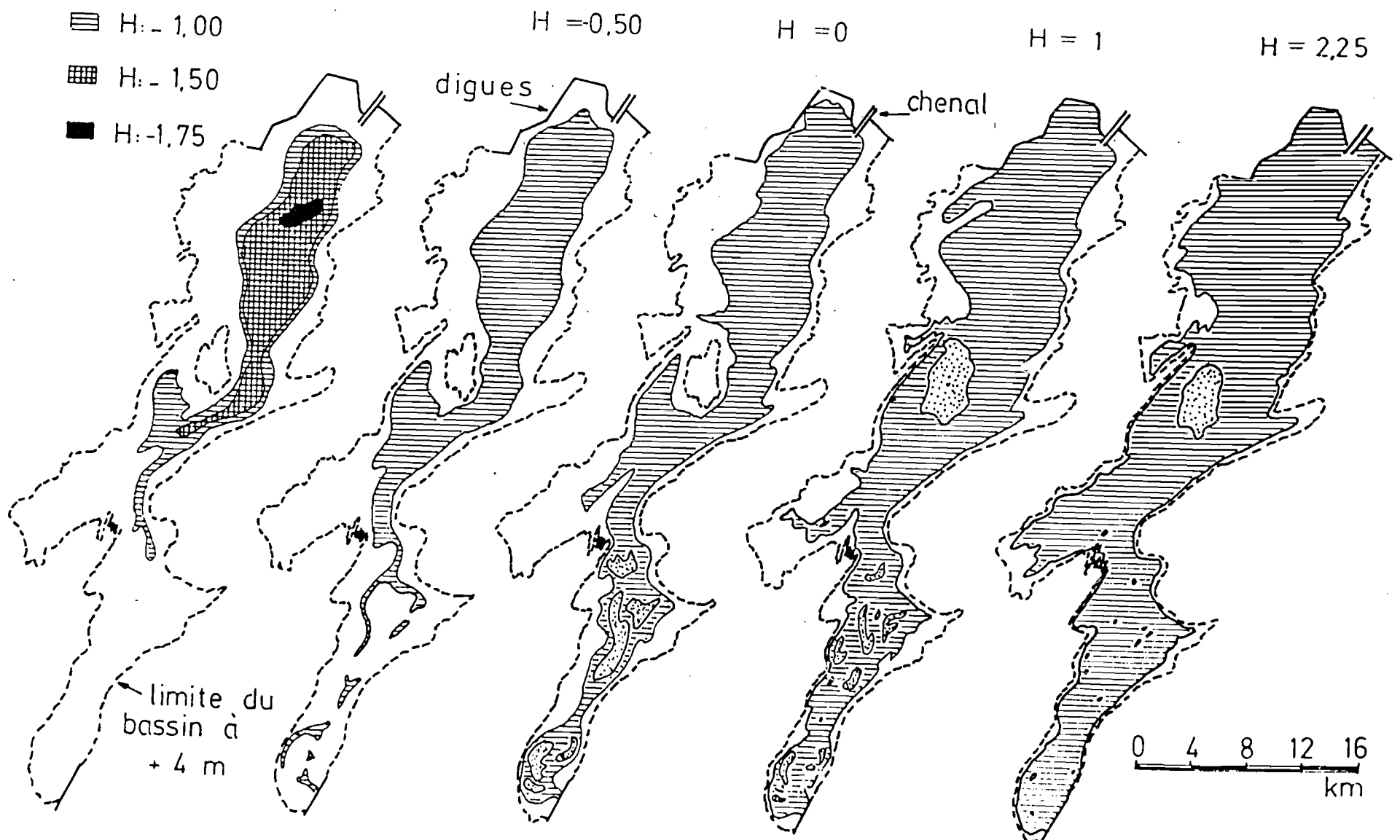
H = 2,25

digues

chenal

limite du  
bassin à  
+ 4 m

0 4 8 12 16  
km



pour le lac de Guiers. Il a été tenu compte du réaménagement du bouchon de Keur Momar Sarr dans la partie sud du lac en la repoussant au point de départ prévu pour le futur canal de Cayor. Le lac s'allonge ainsi de quelques 15 km dans la boucle du Ferlo à la hauteur du village de Lambaye (ou Diatmel).

Cote H (m)	Surface S (km <sup>2</sup> )
de -1,75 à -1,51	$S = 121,255 + 85,194 \ln (H + 2)$
de -1,50 à -0,51	$S = 98,399 (H + 2) 0,662$
de -0,50 à +4,00	$S = 40,92 + 204,46 \ln (H + 2)$

Cote H (m)	Volume V (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
de -1,75 à -1,51	$V = 84,089 (H + 2) 3,197$
de -1,50 à -1,41	$V = 72,383 (H + 2) 2,981$
de -1,40 à -1,31	$V = 56,350 (H + 2) 2,491$
de -1,30 à -1,01	$V = 49,499 (H + 2) 2,136$
de -1,00 à -0,81	$V = 49,684 (H + 2) 1,931$
de -0,80 à +1,99	$V = 49,100 (H + 2) 1,916$
de +2,00 à +4,00	$V = 64,000 (H + 2) 1,730$

#### 2.2.2.2. Campagnes d'échantillonnages des eaux du lac de Guiers

Depuis le début de l'année 1989, 11 campagnes de prélèvements des eaux du lac de Guiers ont été réalisées entre les mois de janvier et d'août. Les sites choisis (15) sont 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).

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 (Fig. 1).

On dispose à l'heure actuelle de 98 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) et 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; +0,67 m).

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).

Les faits marquants sont les suivants :

- la minéralisation des eaux du lac de Guiers entre janvier et juillet 89 a varié de 100 mg/l à 4 g/l.
- il existe un gradient de salinité croissant entre la zone nord et la partie sud du lac.
- les eaux de la station de Ngnith semblent être représentative de la composition chimique moyenne des eaux du lac.
- les éléments majeurs suivent au cours de la phase de concentration des itinéraires chimiques divergents: les chlorures, les sulfates, le potassium et le sodium suivent des voies parallèles et ne participent à aucune précipitation chimique; les bicarbonates, le calcium, le magnésium et la silice s'organisent dans la néoformation de calcite et de silicates magnésiens.
- les eaux du lac de Guiers restent basiques toute l'année.

Ces premiers résultats mettent en évidence un fait particulier: les campagnes de prélèvements ne peuvent être programmées à échéances régulières comme cela avait été prévu. Elles le seront encore moins dans l'avenir lorsque fermeture et ouverture des barrages se succéderont à un rythme imprévisible.

### *2.2.3. 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

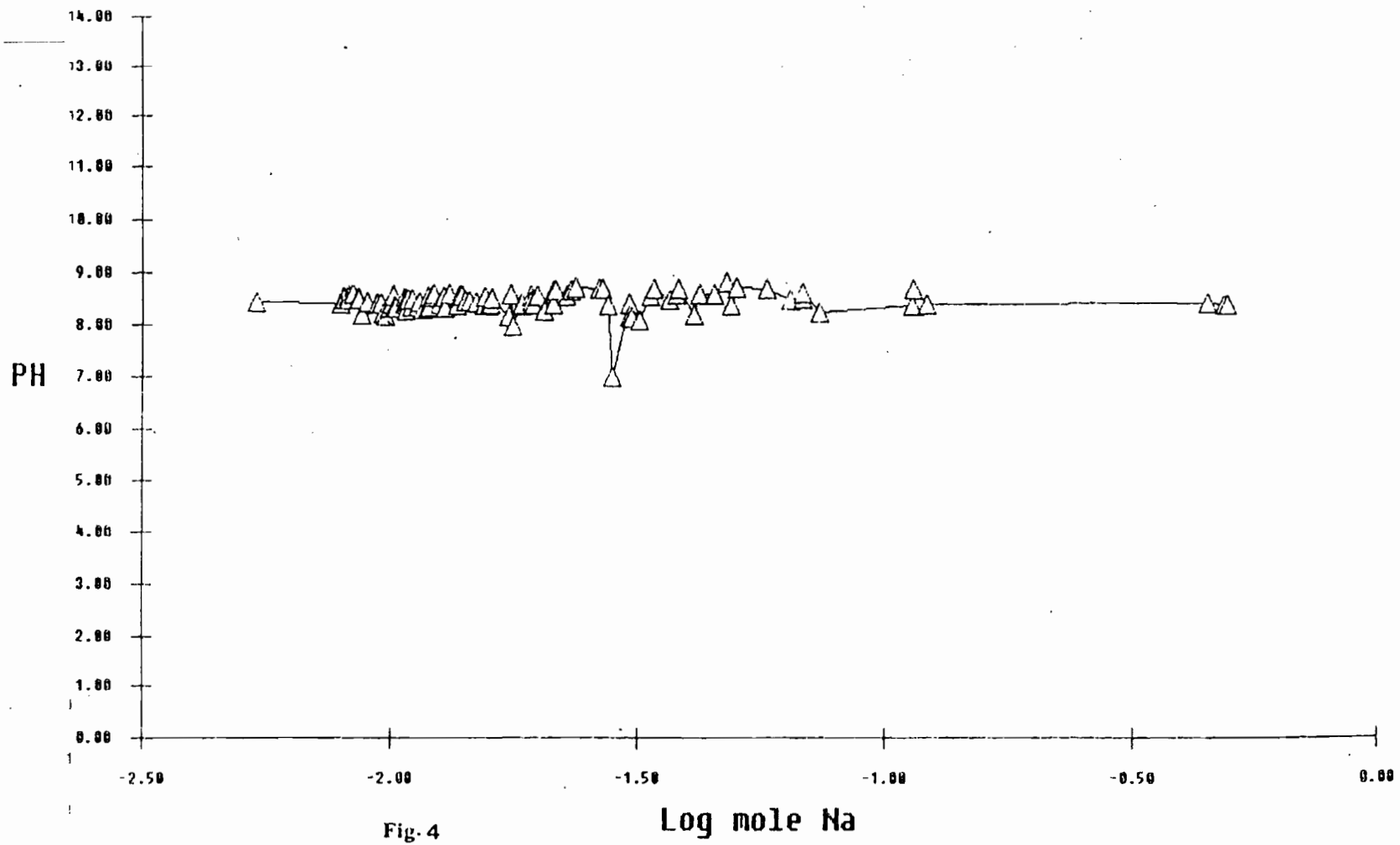


Fig. 4

à 5 lors de la phase ultime de retrait fin juillet 1989.

Bien que la totalité des résultats analytiques ne nous soit pas encore parvenue, plusieurs faits marquants peuvent être signalés:

- les eaux du Ferlo sont plus fortement minéralisées que celles du lac de Guiers. La salinité a oscillé entre 0,5 et 15 g/l.

- le caractère basique est demeuré une constante remarquable autour d'une valeur moyenne du pH de 8,5 toutes eaux confondues dans le temps et dans l'espace (Fig.4 ). Contrairement aux prévisions, il n'y a pas eu d'échanges réciproques entre les eaux de surface et les eaux souterraines pourtant situées à faibles profondeurs (entre -1 m et -2 m). La présence, en particulier, d'une mangrove fossile en rive Ouest, (contenant des eaux fortement acides à pH 2 et 3) n'a en rien modifié le caractère basique des eaux de surface. Ce résultat nouveau, d'une importance capitale dans la perspective du futur canal du Cayor, demande à être confirmé par l'étude d'une seconde lame de submersion. En effet les déversements du lac et l'inondation du Ferlo sont de nouveau d'actualité: les vannes de la digue de Keur Momar Sarr ont été pour la seconde fois ouvertes entre le 25 août et le 20 octobre 1989. L'inondation est bien plus importante que celle de 1988: elle s'étend sur près de 80 km.

- la détermination des activités des différents constituants en solution et le calcul des états d'équilibre réalisés sur quelques eaux du Ferlo montrent que les solutions sont saturées vis à vis de la calcite, du gypse, du talc, de la magnésite et de l'halite dans les ultimes phases de concentration.

- la séquence de sels précipités sera précisée lors du suivi de la qualité des eaux des mares résiduelles et éphémères de la seconde submersion ( entre août 89 et juillet 90 ).

## B.2 - .RELATIONS EAUX DE SURFACE- EAUX SOUTERRAINES.

Responsable Scientifique: J.L. SAOS (ORSTOM)

### 1. DESCRIPTION DES TRAVAUX.

#### 1.1. Principales actions.

Afin de définir les principaux paramètres et de recueillir les principales données nécessaires à cette étude, un certain nombre d'actions sont entreprises sur le fleuve, les aquifères superficiels, les échanges fleuve- nappes, les échanges avec les aquifères profonds. Ces actions sont menées le plus souvent

en étroite collaboration avec les autres programmes du projet EQUESEN ou d'autres études.

#### 1.1.1. *Le fleuve Sénégal*

- Régime, variation du plan d'eau (OMVS, JP. Lamagat).
- Qualité des eaux (programme B1).
- Chronique isotopique (AIEA, JF Aranyosy).
- Interface eau/sédiments, colmatages, eaux interstitielles (Université de Dakar: projet CAMPUS).

#### 1.1.2. *Les aquifères superficiels.*

- Caractéristiques: nature, transmissivité, emmagasinement.
- Géométrie, structure, limites (ORSTOM/TOA: M. Ritz).
- Qualité des eaux (Université de Dakar).

#### 1.1.3. *Les échanges fleuve- nappes alluviales.*

- Suivi des variations spatio-temporelles: piézométrie (OMVS/USAID, chimie, isotopes (AIEA)).
- Influence de la crue, étude de la diffusivité (Université).
- Les zones inondées, leur influence qualitative et quantitative sur la recharge des nappes (CAMPUS et Laboratoire de Télédétection).

OMVS : Organisation de la Mise en valeur du Fleuve Sénégal.

AIEA : Agence Internationale de l'Energie Atomique.

DEH : Direction des Etudes Hydrauliques.

#### 1.1.4. *Relation avec les aquifères profonds.*

- Structure et position du toit des aquifères profonds (ORSTOM, géophysique).
- Etude chimique et isotopique (DEH et AIEA).

#### 1.2. *Méthodologie.*

Parallèlement à l'approche hydrogéologique classique, la définition des aquifères sera réalisée au cours de campagnes de prospection géophysique par audio-magnétotellurie et la distinction des échanges et l'évaluation des transits par analyse isotopique.



### 1.2.1. Géophysique

#### 1.2.1.1. Produits attendus.

Détermination de la nature et de la géométrie des aquifères (composition, épaisseur, extension latérale, volumes, réserves, etc...), épaisseur de la zone saturée, distinction et positions de l'interface eau douce-eau saumâtre, reconnaissance des aquifères multicouches et des zones de communications possibles.

#### 1.2.1.2. Méthode

L'investigation géophysique des zones superficielles est maintenant possible par l'utilisation de la méthode MT dans la gamme audio-fréquence (1- 5000 Hz). Le but de la technique audio-magnétotellurique (AMT) est de mesurer, à une station donnée, le champ électromagnétique naturel en surface ce qui permet de préciser à la verticale de cette station et en fonction de la fréquence utilisée, la résistivité électrique apparente du sous-sol. La répartition de ces résistivités sur un profil donné permet d'obtenir un modèle géoélectrique sous forme de coupes qui aboutissent à l'interprétation géologique.

La résistivité des roches dépend de plusieurs facteurs. Dans un bassin sédimentaire par exemple, la perméabilité et la porosité des séquences sédimentaires ainsi que la résistivité des fluides ( eau le plus souvent) qu'elles contiennent, sont les facteurs qui déterminent le plus largement les résistivités apparentes mesurées par la méthode AMT. Ainsi la résistivité décroît avec l'augmentation de la porosité et de la fracturation de la roche, ou, pour un même volume des vides de l'encaissant, avec l'augmentation de la teneur en sel des fluides qu'il renferme, et pour une même minéralisation de ces fluides avec l'accroissement de la température.

La technique AMT permet en outre de déterminer des directions d'anisotropie du sous-sol qui peuvent être liées à des facteurs structuraux ou tectoniques ( fracturation ). La connaissance de ces facteurs peut s'avérer primordiale. Par exemple, celle de la fracturation pour la détermination des directions préférentielles d'écoulement de l'aquifère dans un réservoir carbonaté ou gréseux fissuré.

#### 1.2.1.3. Moyens.

L'équipe de géophysique du département TOA affectée à l'ORSTOM de Dakar va disposer dès janvier 1990 d' un appareillage de prospection AMT. Celui-ci est partiellement financé par le projet CEE a hauteur de 25 000 FF (soit environ 3500 écus).

1.2.1.4. Programme d'exécution.

Etude d'une zone test. Corrélation avec les forages et les puits, carottages à la tarière (janvier 90).

Etude de l'extension des nappes salées dans le delta du Sénégal (février/ mars 90).

Campagnes de mesures dans le secteur lac de Guiers-Ferlo et recherche des fractures. Etude de la paléo-vallée alluviale du Ferlo (d'avril à juin 1990).

Campagnes de mesures dans la zone de recharge possible des aquifères profonds (secteur de Matam de janvier à mars 1991).

Etudes complémentaires sur les sites étudiés (fin 1991).

1.2.2. Etude isotopique.

1.2.2.1. Produits attendus.

Mise en évidence des mécanismes de recharge naturelle des nappes alluviales de la vallée et des aquifères sédimentaires qui les jouxtent.

Estimation des conséquences de la régularisation du débit du fleuve sur la recharge des nappes.

Malgré le peu de données préliminaires sur les autres composants du système, on peut à partir d'études régionales voisines ( fleuve Niger au Mali et à Niamey ) espérer mettre en évidence les phénomènes suivants:

- variation isotopique saisonnière des eaux fluviales,
  - évolution spatiale de la teneur isotopique,
- et aboutir à l'interprétation et à la reconnaissance:

- du mode et de la période privilégié d'alimentation des nappes alluviales,
- des zones d'alimentation préférentielles,
- des secteurs d'alimentation directe fleuve-nappes sédimentaires,
- des régions de drainage nappes alluviales-nappes sédimentaires.

1.2.2.2. Méthode

L'étude est basée sur la détermination des caractères isotopiques ( Oxygène 18, Deutérium, Tritium et Carbone 14) des divers composants du système hydrologique local.

#### 1.2.2.3. Moyens

L'étude est menée avec la participation de l'AIEA dans le cadre du programme régional RAF 8/012. Elle s'appuie sur l'importante infrastructure mises en place par l'OMVS (cellule eaux souterraines OMVS/USAID) et sur les installations hydrologiques de l'ORSTOM le long du fleuve.

L'échantillonnage des ouvrages des aquifères régionaux se fait avec le concours de la DEH et de l'Université de Dakar.

Les analyses sont effectuées au laboratoire de l'AIEA de Vienne, prises en charge par l'agence (50 %) et par le projet EQUENSEN (50 %).

#### 1.2.2.4. Programme d'exécution

Il comprendra:

- Profil longitudinal isotopique de Manantali à Diama soit environ sur un parcours de 1200 km. Prélèvement des eaux de surface pendant l'étiage pour analyse O 18 et deutérium en 15 stations ( Manantali, Bafoulabé, Kayes, Kidira, Bakel, Matam, Kaédi, Saldé, Bogué, Guédé, Podor, Dagana, Lac de Guiers, Rosso et Diama).

- Chronique isotopique: prélèvements mensuels en 3 stations (Bakel, Kaédi et Richard- Toll) pendant un cycle annuel et des prises plus fréquentes pendant les crues. Analyses de O<sub>18</sub> et Deutérium.

- Relations fleuve-nappes: Prélèvement sur 2 sections transversales dans les piézomètres et puits placés dans les formations alluvionnaires et sédimentaires avec 10 analyses Deutérium, O<sub>18</sub> et éventuellement 5 Tritium.

- Cartographie isotopique: échantillonnage dans les sites choisis pour une cartographie isotopique avec 60 échantillons prélevés dans les puits et piézomètres; analyse O<sub>18</sub> et Deutérium. Complément d'études avec 20 analyses de Tritium et 10 analyses de Carbone 13 et 14.

### 1.3. Calendrier d'exécution

	1989	1990	1991	1992
	AMJJASOND	JFMAMJJASOND	JFMAMJJASOND	JFMAMJJASOND
A	-----			
B	-----			
C		-----		
D		-----	-----	---
E	-	--	--	
F		-----	-----	
G	-	--	-----	-
H	-	-	--	----

A. Bibliographie, compilation des données antérieures, synthèse des acquis.

B. Choix des sites d'étude après consultation de la banque des données de la cellule des eaux souterraines (OMVS/USAID) et reconnaissance sur le terrain.

C. Sélection des piézomètres et puits qui constitueront le réseau de mesures dans les zones étudiées ( choix en fonction des données antérieures, de leur position et de leur état). Pose de piézomètres complémentaires et installation de limnigraphes et de pluviographes.

D. Suivi de la piézométrie, mesures de conductivité, température, pH, Potentiel rédox, prélèvements pour analyses chimiques et isotopiques. Suivi de la pluviométrie et des écoulements (tournées mensuelles, présence d'un technicien pendant la saison des pluies, observateurs).

E. Etude des caractéristiques de l'aquifère superficiel. Géomorphologie, Sédimentologie. Etude d'échantillons prélevés à la tarière et des cuttings de forage (cellule des eaux souterraines). Appui de la télédétection (laboratoire UTIS). Essais de pompages.

F. Prospection géophysique: méthode AMT

G. Etude isotopique

H. Rapport et synthèse finale.

### 2. ETAT D'AVANCEMENT AU 1er NOVEMBRE 1989

La lenteur de la mise en place des crédits ( délégation en octobre 1989) et les difficultés liées au différend frontalier sénégal-mauritanien ont retardé certains travaux. Le suivi précis du comportement des nappes pendant la crue n'a pu se

faire en 89, mais le matériel nécessaire, en cours de commande, sera installé et opérationnel pour la crue 90. Les tournées d'échantillonnage dans le lit majeur du fleuve (interface eau/sédiments) ont été reportées.

Nous avons cependant pu travailler sur les données antérieures en particulier grâce à la banque de données de la cellule des eaux souterraines de l'OMVS de St-Louis et collecter les mesures mensuelles effectuées sur le réseau de piézomètres implanté par le projet OMVS/USAID.

#### TOURNEES ET MISSIONS

Mars-Avril 1989

- St-Louis : prise de contact avec la cellule des eaux souterraines. Etude de la banque de données, J.L. SAOS.
- Diama - embouchure : tournée de prélèvements dans le lit du fleuve (sédiments). J.L. SAOS, A. KANE (Université).
- Campagne de mesure et de prélèvement pour analyses isotopiques dans les nappes souterraines du secteur Dagana/Ferlo/ Lac de Guiers. J.L. SAOS, M. FALL (Université), J.F. ARANYOSSY (AIEA).

Mai 1989

- St-Louis : Réunion de travail à la cellule des eaux souterraines. J.L. SAOS.

Juin 1989

- St-Louis : compilation des données. J.L. SAOS.

Juillet 1989

- Richard Toll, Lac de Guiers, St-Louis : mesures sur le terrain. Choix des points de mesures sur le site d'étude n°1.

Octobre 1989

- Réunion de travail avec cellule des eaux souterraines de l'OMVS St-Louis.

#### RESULTATS :

Les données recueillies sont encore trop fragmentaires pour en tirer des résultats significatifs. Les premières observations font cependant apparaître le caractère dépressif des nappes, les niveaux piézométriques sont presque toujours négatifs, malgré une légère fluctuation au voisinage du fleuve. Ils sont la conséquence de la longue période de sécheresse qui a marqué profondément cette région du sahel.

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

Responsable scientifique : F.X. COGELS (FUL).

Ce premier rapport est destiné à faire le point de la situation actuelle du lac de Guiers et définit les grandes lignes du programme de recherche mené à la FUL. Ce programme est, rappelons-le, complémentaire des travaux menés par ailleurs sur la qualité des eaux de surface (Projet B1).

Ne disposant pas encore de moyens financiers, il n'a guère été possible d'effectuer de missions sur le terrain et d'acquérir le matériel informatique. Cette première tranche a été consacrée à rassembler les données existantes, à en faire le tri et une première compilation.

## 1. RAPPEL

### 1.1. Présentation succincte de la problématique de gestion fleuve Sénégal - lac de Guiers.

Le lac de Guiers fait partie du bassin du fleuve Sénégal dont il dépend hydrologiquement ( Fig. 5 et 6 ). Long de 50 km et large de 7 km au maximum, il est alimenté par les eaux du fleuve retenues plus en aval dans le déversoir de Diama. Un canal de 17 km relie le fleuve au lac; un double barrage situé à la hauteur de Richard Toll permet l'établissement ou non de la jonction fleuve-lac. La permanence de l'eau dans le réservoir de Diama (barrage anti-sel de l'aval), permet maintenant d'alimenter le lac à volonté, voire même de l'ouvrir dans la partie sud (ce qui est un fait nouveau depuis le début du projet) et submerger l'ancienne vallée morte du Ferlo. Seule la hauteur d'eau dans la réserve et son évolution annuelle fixe des limites à la régulation hydrologique du Guiers. L'évolution de la cote de la réserve de Diama dépend, outre les contraintes naturelles, de plusieurs facteurs : l'importance des prélèvements hydro-agricoles autour de la réserve et dans la vallée du fleuve, la politique de gestion hydrologique du réservoir de Manantali à l'amont. La gestion de cet ouvrage, variable chaque année, destiné à régulariser l'hydrologie fluviale doit et devra de plus en plus tenir compte de nombreux intérêts pas toujours des plus conciliables : production d'électricité, navigabilité du fleuve Sénégal, approvisionnement des cultures, alimentation en eau potable etc...

La gestion hydrologique du lac de Guiers est tributaire de celle du fleuve Sénégal. Chaque crue annuelle, dont l'importance est naturellement imprévisible, ajoute à la

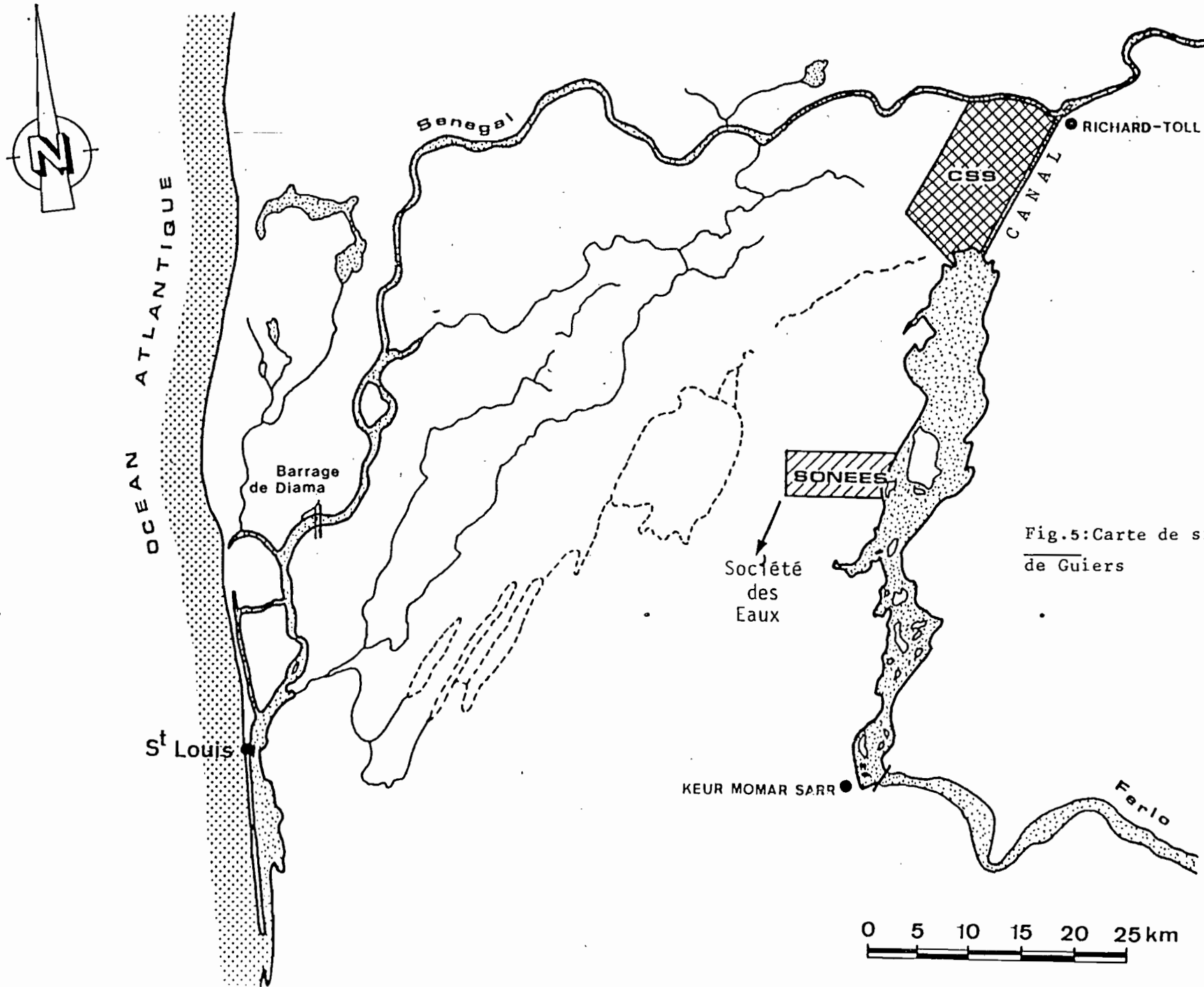


Fig.5: Carte de situation du lac de Guiers

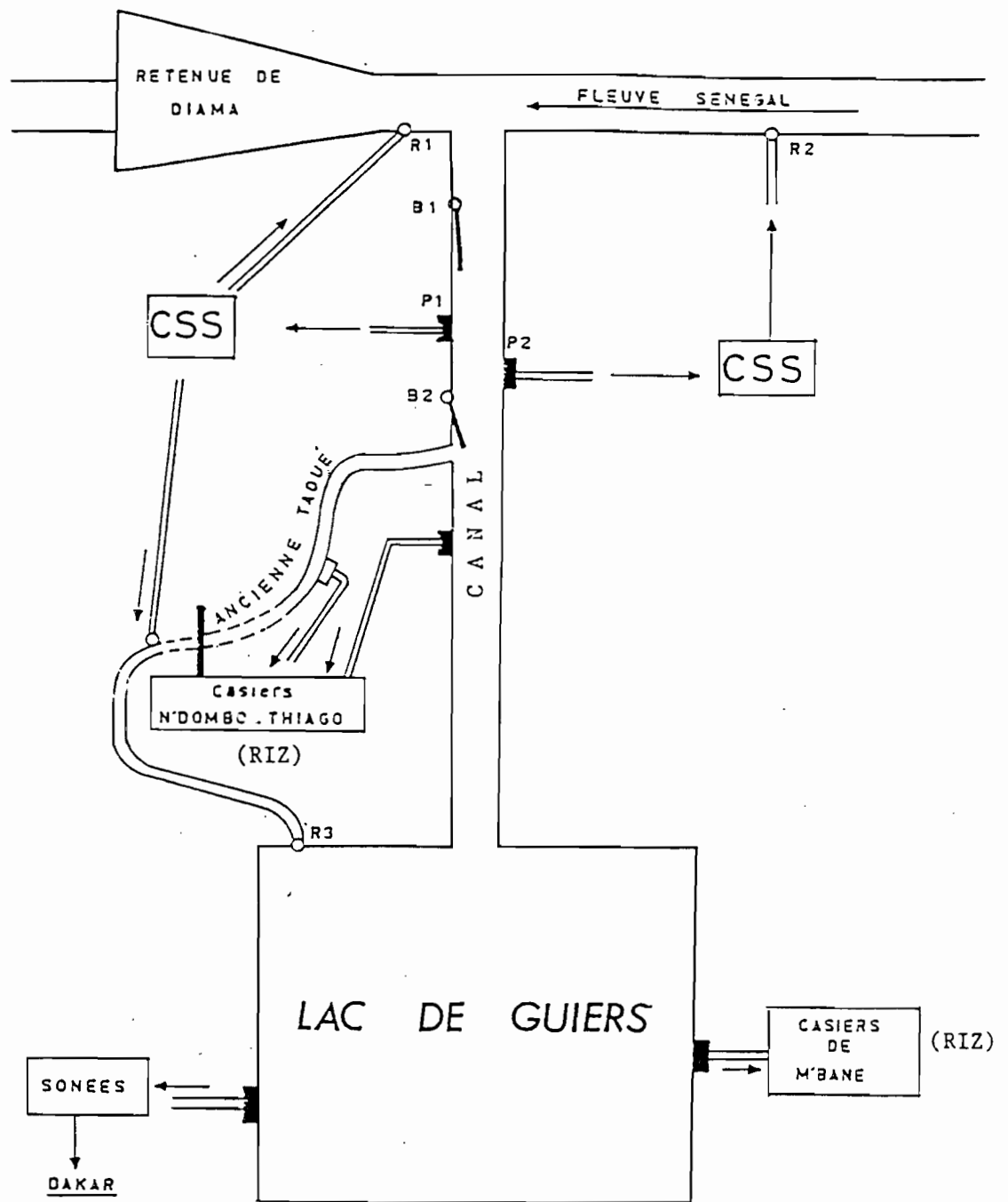


Fig.6:Représentation schématique du lac de Guiers,de la réserve de Diama et des utilisateurs actuels des eaux du lac.

P1 et P2: Stations de pompages (eaux d'irrigation)

R2 et R2: Stations de rejet d'eaux de drainage

B1 et B2: Barrages sur le canal de jonction fleuve-lac



complexité du fonctionnement du système fluvio-lacustre. La double gestion risque de s'avérer complexe et doit être envisagée dans sa globalité en intégrant les divers aspects du développement et l'exploitation des ressources naturelles.

## 1.2. La problématique de la gestion du lac de Guiers.

### 1.2.1. Gestion quantitative des eaux.

La Compagnie Sucrière Sénégalaise (CSS) et la Société Nationale d'Exploitation des Eaux du Sénégal (SONEES) sont aujourd'hui les deux principaux utilisateurs des eaux du lac de Guiers (Fig 6).

- la CSS exploite près de 7 000 ha de cannes à sucre à proximité de la ville de Richard Toll. Ses besoins en eau prélevés au fleuve ou au lac, grâce au jeu des deux barrages situés sur le canal de jonction fleuve-lac sont de l'ordre de 220 millions de m<sup>3</sup>/an.

- la SONEES dont l'usine de traitement se situe à Ngnith en rive Ouest du lac de Guiers traite annuellement près de 20 millions de m<sup>3</sup> d'eau essentiellement destinés à l'alimentation de la ville de Dakar.

Dans les années à venir, d'importants projets hydro-agricoles sont prévus : maraîchage, riziculture et mise en valeur de la vallée du Ferlo (déjà submergée en 1988 et 1989, voir le programme B1)). A ces divers utilisateurs potentiels va s'ajouter le futur principal consommateur des eaux du lac, le canal de Cayor. Ce canal à ciel ouvert, prévu pour la fin du siècle, devra répondre aux besoins en eau potable non seulement de l'agglomération dakaroise mais aussi à ceux de toute la région littorale nord qui regroupe selon les derniers recensements de 1988 *près de 50 % de la population du Sénégal*. Alimenté par les eaux du lac de Guiers après son extension vers le Ferlo, ce canal devrait être en mesure d'assurer une production annuelle de près de 650 millions de m<sup>3</sup> (Fig. 7).

En tenant compte de l'évaporation, qui d'après les dernières estimations soustrait par an 350 millions de m<sup>3</sup> d'eau, les besoins totaux futurs peuvent être évalués entre 1,0 et 1,25 milliards de m<sup>3</sup> par an. Ce volume global représente environ le double de la capacité maximale actuelle du lac de Guiers.

L'énoncé de ces chiffres permet de mesurer l'ampleur de l'enjeu et du rôle capital joué par la gestion concertée des grands barrages édifiés sur le fleuve Sénégal: Diama à l'aval et Manantali à l'amont. La réserve de Diama, qui est aussi l'objet dans le cadre d'EQUESEN d'études sur la production primaire (programme E ci-dessous), devra assurer l'approvisionnement du lac de Guiers soit de manière continue soit de

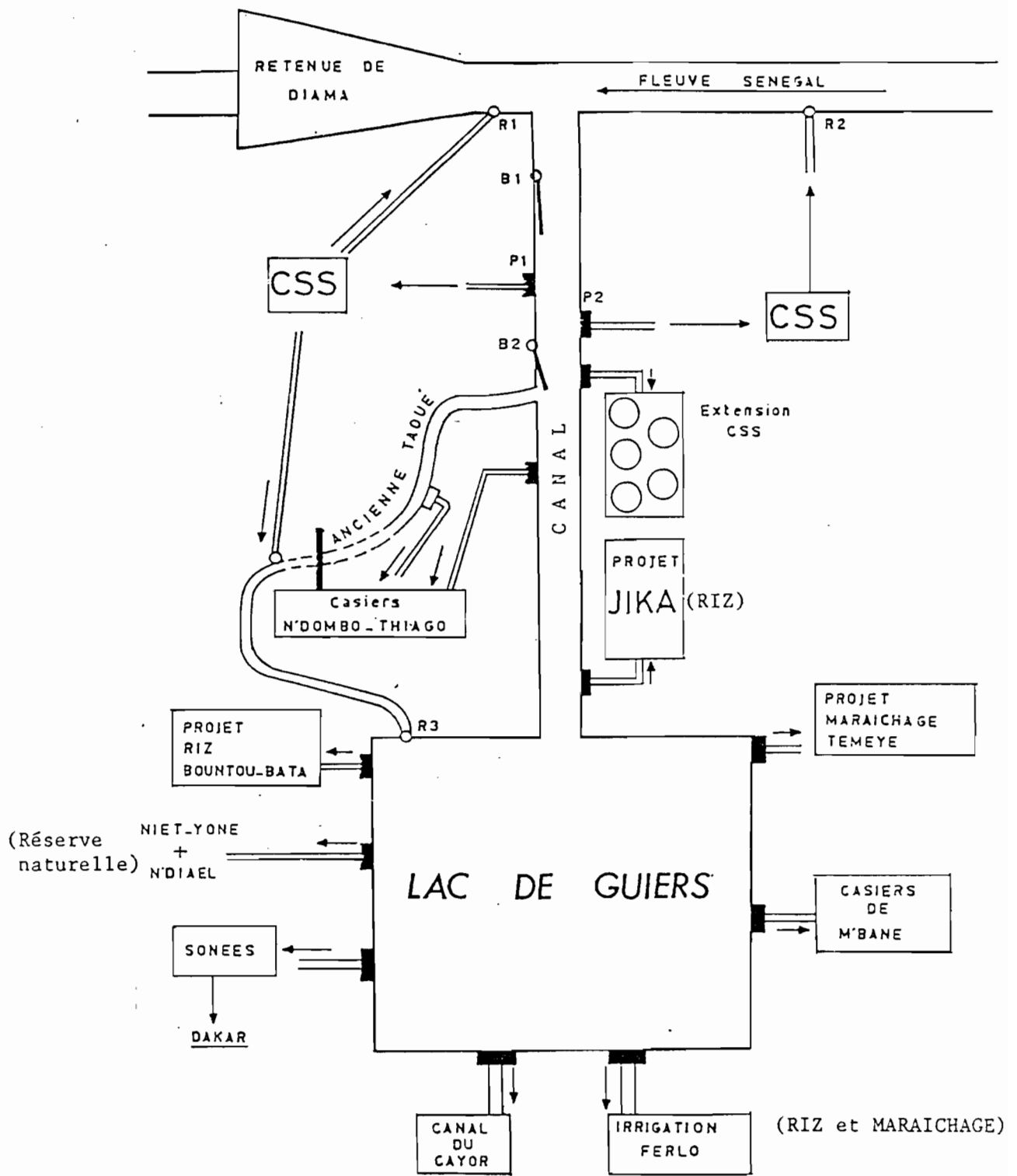


Fig.7: Représentation schématique du lac de Guiers, de la réserve de Diama et des futurs utilisateurs des eaux du lac de Guiers.

façon discontinue par des remplissages successifs pour maintenir le plan d'eau à un niveau suffisant. D'autre part, le modèle de gestion hydrologique adopté ne pourra en aucun cas être figé. Il devra préconiser des alternatives et proposer différents scénarios qui prennent en compte d'autres facteurs humains, écologiques et économiques importants:

- la poursuite ou non de la mise en valeur agricole des zones de décrue à la périphérie de la dépression lacustre; ces cultures traditionnelles se révèlent d'une grande importance alimentaire et économique pour les populations locales,

- les risques de prolifération de la végétation aquatique supérieure dont le développement peut avoir des incidences néfastes sur les plans hydrologiques (entraves à la circulation des eaux), géochimiques (frein au transfert des masses de sels rendus aléatoires), agricoles (refuge de la faune : oiseaux mange-mil), et sanitaires (support aux vecteurs du paludisme) etc...

- la production piscicole naturelle dont le stock et le renouvellement sont assujettis aux évolutions spatio-temporelles du plan d'eau.

- la qualité chimique et les variations annuelles de la minéralisation de l'eau de cette grande réserve d'eau douce.

- l'importance en termes de bilan de l'évaporation.

Cet ensemble de constatations montre la nécessité d'un outil de gestion concertée des eaux lacustres qu'elles y soient en transit ou évolutives chimiquement dans un système fermé et isolé.

#### 1.2.2. *Etude de la qualité des eaux lacustres.*

Il s'agit de suivre l'évolution annuelle de la physico-chimie des eaux du lac de Guiers. Les premières investigations menées entre 1979 et 1982 avaient montré que la salinité des eaux lacustres suivait un cycle annuel de concentration et de dilution, doublé d'un gradient de minéralisation Nord-Sud bien marqué, fonction de l'importance de l'évaporation et des apports d'eau douce d'origine fluviale et pluviale.

Dans le temps, il avait aussi été mis en évidence que les teneurs en chlorures n'avaient cessé de croître. A contenance égale, pour un volume du lac de l'ordre de 100 millions de m<sup>3</sup>, les concentrations en chlorures ont triplé entre 1975 et 1982 (Fig. 8). L'étude devra donc réactualiser ces données en tenant compte des multiples aménagements et des modifications de l'environnement lacustre depuis 7 ans.

Cette étude est en cours grâce au concours des équipes de

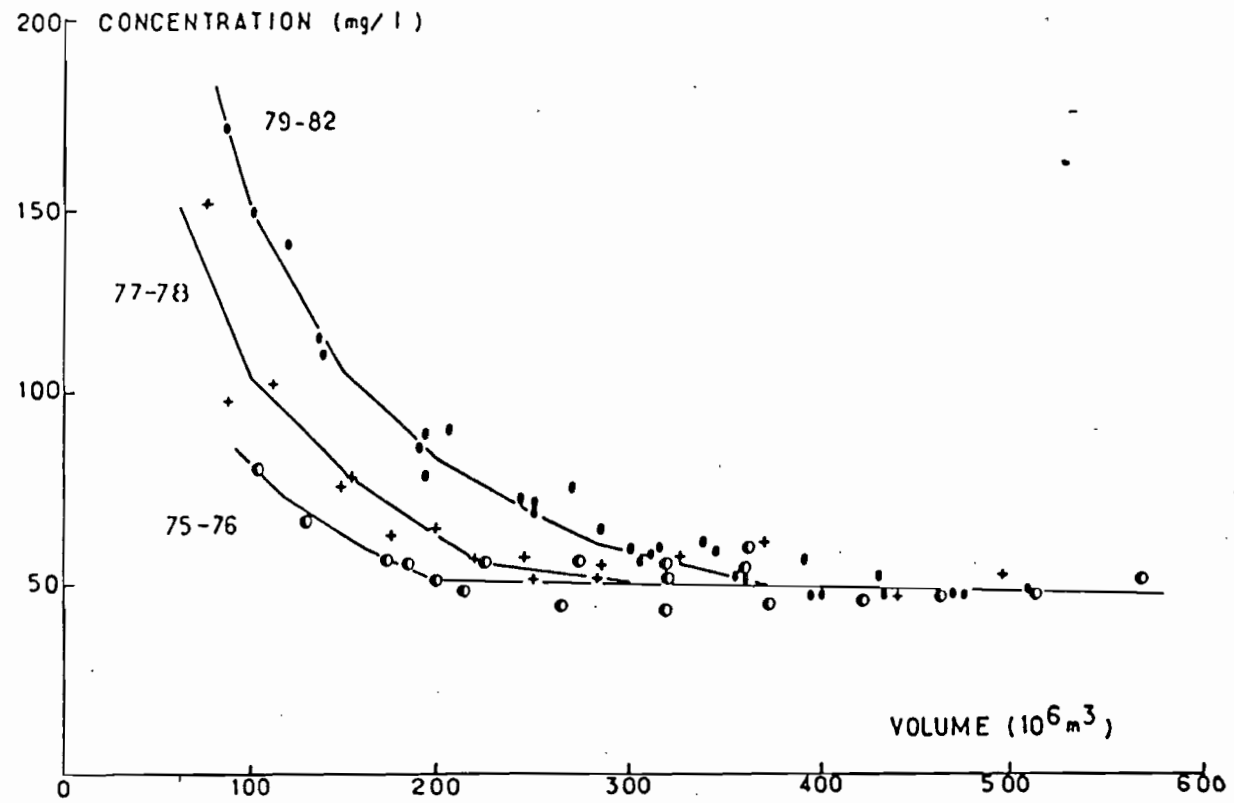


Fig. 8 : Relation entre le volume du lac et la teneur moyenne en chlore dissous.

recherches de l'ORSTOM dirigées par J.Y. GAC (programme B1 ci dessus) qui sur financement propre ont déjà réalisé 11 campagnes d'échantillonnages des eaux du lac entre janvier et octobre 1989. Ces différentes missions ont essentiellement concerné la rive Est du lac et la station témoin de Ngnith en rive Ouest. Elles seront complétées dès novembre 1989 par des mesures ponctuelles à partir d'un bateau et aux mêmes stations étudiées de 1979 à 1982.

Ces futures campagnes sur 15 sites différents répartis géographiquement sur l'ensemble du lac doivent déboucher sur la sélection d'une station de mesure et la mise au point d'un protocole d'échantillonnage. L'objectif étant d'obtenir à tout instant et avec des moyens allégés le suivi simplifié, mais proche de la réalité, de la qualité chimique moyenne des eaux du lac de Guiers.

## 2. CONTENU DU PROGRAMME.

### 2.1. L'hydrologie.

#### 2.1.1. Bilans hydrologiques du lac.

Ils sont en cours d'établissement pour la période 1982/1989. Ils nécessitent au préalable d'avoir une connaissance précise des dates d'ouverture et de fermeture des différents barrages (l'échelle d'observations sera ici un pas de temps quotidien). Autrefois, le fonctionnement du système était simple; l'année était fractionnée en deux périodes: alimentation du lac pendant 2 à 3 mois et évolution en milieu fermé durant 9 à 10 mois. Aujourd'hui avec une gestion partiellement maîtrisée de tout le dispositif fluvio-lacustre et des grands barrages sur le fleuve Sénégal, l'alimentation du lac est tributaire de sollicitations multiples sans concertation préalable. Pour la seule année 1989, la liaison entre le fleuve et le lac a été établie à quatre reprises !.

Les bilans hydrologiques prendront en compte:

- les apports fluviaux: données CSS et Hydraulique,
- les apports pluviométriques: données CSS, extrapolées au lac avec prise en compte d'un coefficient de ruissellement,
- les apports des rejets des zones irriguées : CSS
- les pertes par pompages pour l'irrigation : CSS
- les pertes pour la production d'eau potable: SONEES
- les pertes par évaporation.

#### 2.1.2. L'importance de l'évaporation.

L'évaporation sera calculée sur la base des bilans hydrologiques. Seront également incluses les données:

- de surface et de volume du lac en fonction de sa cote,

- de hauteurs d'eau quotidiennes du lac: SONEES

Les résultats obtenus seront comparés à ceux fournis par le bac d'évaporation (données de la CSS) et si possible à ceux tirés de la formule d'évapotranspiration de PENMAN.

## 2.2. Qualité des eaux.

L'étude a été planifiée de la façon suivante:

- 13 à 15 stations d'échantillonnages des eaux seront choisies au centre du lac en fonction des résultats des études antérieures,

- campagne de prélèvements tous les 2 mois, sauf circonstances exceptionnelles et événements imprévus qui auraient pour conséquence de modifier profondément une évolution dans l'ensemble bien connue,

- les paramètres analysés seront: pH, Conductivité, Ca, Mg, Na, K, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub> et la silice.

- les données quotidiennes de température, d'O<sub>2</sub> dissous, de pH et de Chlorures seront répertoriées et analysées depuis l'origine des mesures.

Toutes les données d'analyse des eaux effectuées précédemment seront recensées et intégrées dans l'étude générale. Leur collecte et leur compilation sont en cours dans l'attente de délégation budgétaire pour l'acquisition de moyens informatiques. Les campagnes d'échantillonnage des eaux dépendront de la date de mise à disposition du budget d'analyse des eaux et de la date d'achat des moteurs hors-bord qui devront équiper le bateau déjà en place.

### *Choix d'une station de référence*

Les analyses de qualité des eaux effectuées permettront de calculer la qualité chimique moyenne du lac à chaque campagne. Ceci nécessitera la connaissance des volumes exacts d'eau considérés sous l'influence directe des stations d'analyses retenues. Des essais de corrélation de cette qualité moyenne avec celle enregistrée simultanément sur une seule station, pourront être tentés. Il devrait en découler, à l'avenir, un suivi beaucoup plus simple de la physico-chimie des eaux du lac de Guiers.

## 2.3. Inventaire des ressources naturelles. Etude du développement futur des abords du lac.

Ce volet de l'étude sera destiné d'une part à préciser la programmation prévue par les autorités nationales dans le

développement hydraulique et agricole autour du lac. Il s'agira donc d'enquêtes à effectuer autour du lac de Guiers et chez les diverses instances de gestion déjà en place. Les résultats devront nous permettre par la suite d'ajuster les propositions de gestion des eaux sur des bases réalistes. D'autre part, il sera sans doute nécessaire de procéder à une actualisation dans l'évaluation agricole et économique des cultures de décrue. Cette partie du programme est prévue pour le premier semestre 1990.

#### 2.4. Modèle de gestion des eaux.

Le modèle de gestion devra permettre l'optimisation de l'utilisation des eaux du lac de Guiers: assurer les besoins des divers utilisateurs, tout en permettant de valoriser les potentialités naturelles et en réduisant les impacts négatifs directs et indirects des futurs aménagements. Ce modèle devra, en début d'année hydrologique, simuler rapidement plusieurs possibilités d'évolution du plan d'eau, proposer des alternatives et les ajustements nécessaires selon les choix effectués.

Le modèle ne sera en fait qu'une succession continue de bilans hydrologiques quotidiens, calculant jour après jour, la cote du lac, connaissant les divers prélèvements, l'évaporation et l'apport pluviométrique prévisible ou moyen. Inversement, le modèle pourra aussi calculer les apports nécessaires au lac (apports fluviaux) afin de lui faire suivre une évolution décidée à l'avance (au début de l'année hydrologique). Ceci devrait permettre aux futurs gestionnaires du lac et de la réserve de Diama, d'optimiser la gestion des 2 plans d'eau compte tenu des apports fluviaux annuels et des consommations hydroagricoles multiples.

Le modèle du lac devra au préalable avoir été testé sur plusieurs cycles hydrologiques. Enfin, le modèle devra être simple d'emploi et ne pas nécessiter de moyens informatiques sophistiqués.

#### D.- 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.

Responsable Scientifique: A. KANE (Université de Dakar)

Dans le cadre des études sur l'après-barrages, dans le delta et la vallée du fleuve Sénégal, plusieurs activités scientifiques ont été menées au cours de missions ou d'ateliers de recherches. Ce premier rapport scientifique est constitué essentiellement des comptes-rendus de terrain avec quelques

résultats préliminaires. Plusieurs thèmes ont été abordés au cours des différentes missions; les modifications de la morphodynamique, la dynamique sédimentaire du Bas-Sénégal et les flux continentaux dissous et particulaires à l'embouchure du fleuve (station de Diama).

## 1. LES MODIFICATIONS DE LA MORPHODYNAMIQUE.

Des stations de suivi ( piquets-repères) ont été implantées le long des trains de méandres de Dagana, Podor (Diatar), et Guia sur le Doué, dans les cuvettes de décantation transformées en aires de déflation (exemple de Ross-Béthio) et au niveau de la dune vive de Ndiayene.

L'indisponibilité du géodimètre et les tensions dans la vallée ne nous ont pas permis de réaliser le programme établi: profils bathymétriques par sondeur couplés à des profils terrestres.

## 2. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE DU BAS-SENEGAL.

### 2.1. Mesures de courantométrie

Les mesures de courantométrie effectuées du 27 février au 6 mars 1989 en trois stations fixes (Gandiole, Dakhar-Bango et Diama) semblent indiquer que le fonctionnement de l'estuaire est conforme à celui d'un fleuve barré. L'appareil utilisé est un courantomètre instantané du type DKM 008 Braystoke donnant la vitesse pure par une indication du nombre de tours d'une hélice calibrée et la direction du cap mesuré à 10° près.

La décroissance des vitesses en fonction de la profondeur est la règle générale et ceci quelle que soit la station de mesure. Il apparaît néanmoins une diminution relative des vitesses vers l'amont, de même qu'une grande irrégularité vers une direction dominante.

Pendant la saison des hautes eaux, en Septembre 1989, le courantomètre défectueux ne nous a pas permis d'effectuer des mesures sur un cycle complet de marées.

### 2.2. Campagnes de prélèvements :

Des prélèvements d'échantillons ont été couplés à cette courantométrie. Ainsi, 20 échantillons ont été prélevés à l'aide d'une benne sur des profils transversaux du chenal fluvial, en 5 stations (à l'embouchure, à Gandiole, à Bango et sur 2 sites à Diama : Diama Aval et Diama Amont).

L'étude du matériel récolté devrait permettre après analyse au laboratoire :



- d'apprécier les modifications de l'hydrodynamisme dans l'estuaire, et donc des transits et dépôts sédimentaires,
- d'évaluer les modifications des différents profils bathymétriques du chenal,
- et enfin, de quantifier la sédimentation annuelle.

La même opération a été réalisée au cours de la saison des hautes eaux en Septembre 1989.

### 2.3. Etude de l'estuaire.

Une bornage (19 unités) a été installé (Février/Mars 1989) sur la base centrale de Gandiole pour suivre l'évolution du littoral. Des profils bathymétriques (en mer et dans le fleuve couplés à des profils de la plage aérienne (Langue de Barbarie) ont été réalisés en Juin 1989 (saison des basses eaux) et en Octobre 1989 (saison des hautes eaux, avec un prélèvement de 12 échantillons). Les profils récoltés sont en cours d'exploitation, cependant, il faut noter que l'échantillonnage prévu en mer n'a pu être fait, faute de matériel adéquat.

### 3 - ETUDE DES FLUX CONTINENTAUX DISSOUS ET PARTICULAIRES A DIAMA.

Une campagne de contrôle des flux détritiques d'origine continentale a été effectuée au niveau du barrage de Diama, au cours de cette présente année hydrologique.

Au total, 25 échantillons ont été prélevés : le n° 1 au cours de la saison sèche ou les eaux sont particulièrement turbides en surface (présence supposée de matière organique) et très claires au fond ; le dernier prélèvement a été effectué à l'amorce de la décrue.

Les analyses en cours au laboratoire permettront de quantifier les flux de matière et la comparaison avec les études antérieures d'avant-barrages.

Diverses missions ponctuelles ont été effectuées dans les dépressions du Khant et du Ndiael, dans l'axe Gorom-Lampsar, dans les périmètres de Ross-Bethio, Boundoum. Des recherches bibliographiques sont en cours au CRD de l'OMVS à Saint-Louis du Sénégal. L'acquisition d'images satellitaires nous permettrait d'ores et déjà d'entamer la cartographie de l'inondation annuelle.

## E. - ETUDE DU PHYTOPLANCTON ET DE L' HYDRODYNAMIQUE DES MASSES D'EAU DANS LA ZONE D'INFLUENCE DU BARRAGE ANTI-SEL DE DIAMA.

Responsables Scientifiques: P. CECCHI, B. MILLET (ISRA/CRODT)

### 1. INTRODUCTION

L'édification du barrage anti-sel de Diama (50 Km de l'embouchure) a pour principale conséquence la constitution d'un lac de retenue d'eau douce d'une part, et la limitation spatiale de la zone soumise au balancement des marées, d'autre part (Fig. 9). La contribution du CRODT au projet EQUESSEN a pour objectif d'évaluer les nouvelles conditions hydroclimatiques, en particulier en terme d'hydrodynamique et de circulation des masses d'eau, et d'en étudier les conséquences sur la répartition des peuplements phytoplanctoniques et sur leur productivité.

Pour l'heure, du fait des différents travaux d'aménagement de la vallée (construction d'une digue en rive droite sur une centaine de kilomètres à l'amont du barrage, extension des périmètres irrigués, etc), les objectifs d'optimisation de la gestion de l'eau par l'action concertée des barrages de Diama et de Manantali ne sont pas encore atteints. Il apparaît néanmoins que les paramètres explicatifs majeurs qui régissent le fonctionnement de la communauté phytoplanctonique sont identifiables.

### 2. METHODES

#### 2.1. Echantillonnage.

Face à la carence en informations relatives au phytoplancton et aux nouvelles conditions de milieu, tant à l'amont qu'à l'aval du barrage, notre première approche s'est délibérément voulue descriptive. Ainsi, de mai 1988 à juin 1989, 15 campagnes d'échantillonnages (annexe 1) ont été menées en une douzaine de stations réparties depuis Saint-Louis jusqu'à Podor (voir Figure 2) de manière à appréhender les principales caractéristiques des cycles saisonniers de la production phytoplanctonique et les variables explicatives les plus déterminantes. Ces travaux ont été soutenus par un financement propre de l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM).

En ce qui concerne la partie estuarienne du fleuve, un suivi journalier de la salinité de surface dans le fleuve et en mer à Saint-Louis a été mis en place. Cinq campagnes longitudinales ont été menées entre l'embouchure et le barrage de Diama de manière à quantifier le phénomène de salinisation de l'estuaire et son impact sur les peuplements phytoplanctoniques.

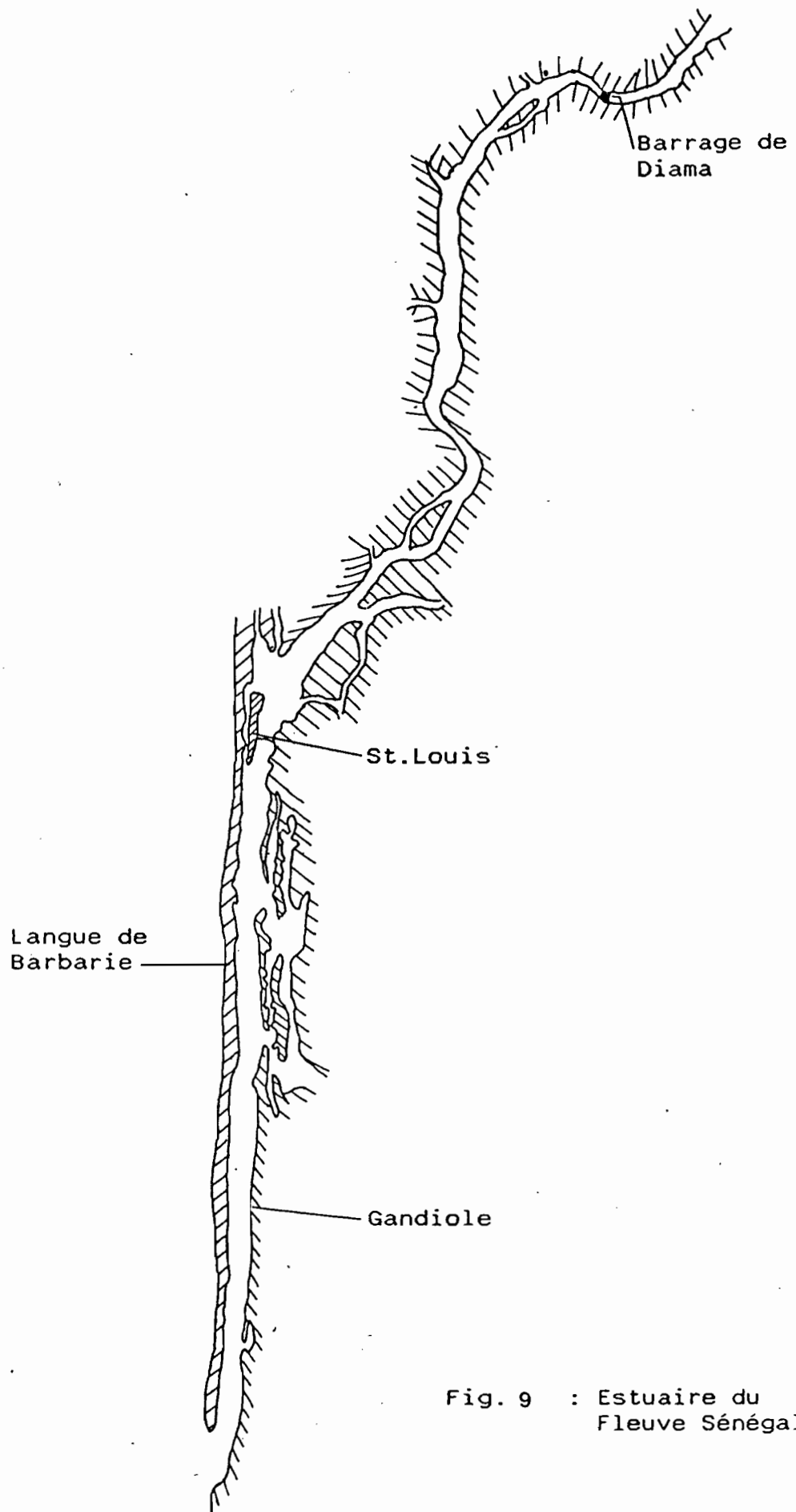


Fig. 9 : Estuaire du  
Fleuve Sénégal.

## 2.2. Protocoles.

En chaque station sont mesurées in situ la température, la conductivité et la profondeur de disparition du disque de Secchi. Un profil d'éclairement est établi à partir de la réponse d'un quantummètre LiCor immergé à différentes profondeurs. L'éclairement descendant et l'éclairement montant sont ainsi mesurés dans le but de déterminer la profondeur de la zone euphotique et d'estimer la qualité optique de l'eau par l'étude des coefficients d'atténuation verticale.

Parallèlement, des échantillons d'eau sont récoltés en différentes profondeurs de la colonne d'eau pour le dosage au spectrophotomètre des sels nutritifs (nitrates, nitrites, phosphates, silicates), la quantification par pesée de la charge en matières en suspension, le dosage au fluorimètre de la chlorophylle totale et l'observation au microscope inversé des peuplements de phytoplancton (détermination et comptages).

A l'aval, en une quinzaine de stations réparties régulièrement entre le barrage et l'embouchure, un profil vertical de température et salinité est effectué, des échantillons pour le dosage des sels nutritifs et de la chlorophylle totale et pour l'observation des algues sont récoltés.

L'étude de l'hydrodynamique estuarienne a débuté par l'installation d'un modèle numérique bidimensionnel horizontal en cours de validation qui permettra, en fonction des apports de l'amont et des contraintes météorologiques, de modéliser la propagation de l'onde de marée et la circulation des masses d'eau. L'installation d'un réseau marégraphique fonctionnel sur l'ensemble de l'estuaire est en cours.

## 3. RESULTATS.

Les premiers dépouillements des données recueillies permettent de dresser un tableau schématique des nouvelles conditions de milieu.

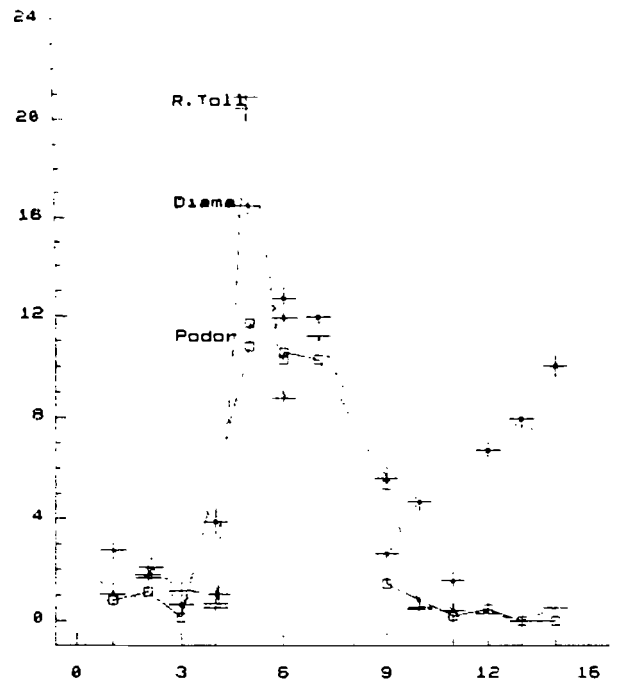
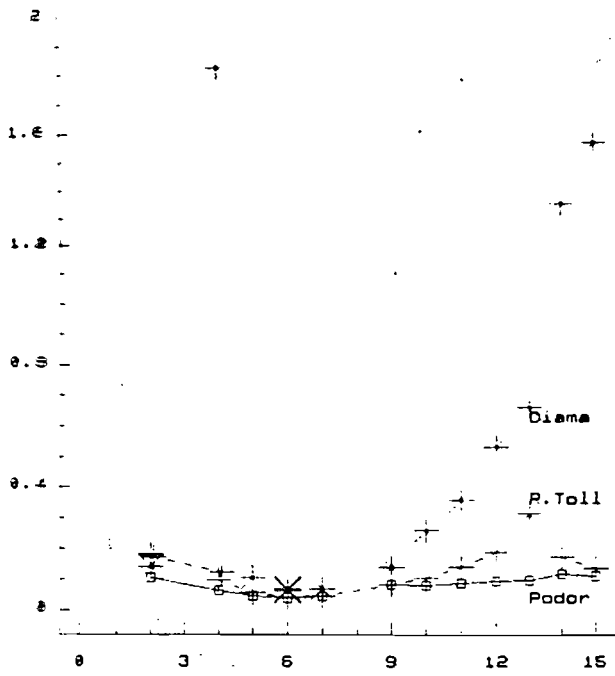
Il en ressort en premier lieu que l'impact du barrage de Diama se traduit diversement suivant les régions considérées.

### 3.1. Lac de retenue.

Nous avons représenté sur la figure 10 les résultats les plus marquants des campagnes effectuées sur le lac de retenue au cours de l'année passée en trois principales stations. Nous n'en feront pas de commentaire détaillé. Il apparaît néanmoins quelques faits marquants.

Conductivite a 25 degres (mS/cm)

nitrate (mg/m3)



chlorophyllie totale (mg/m3)

Profondeur de disperition du disque de Secchi (cm)

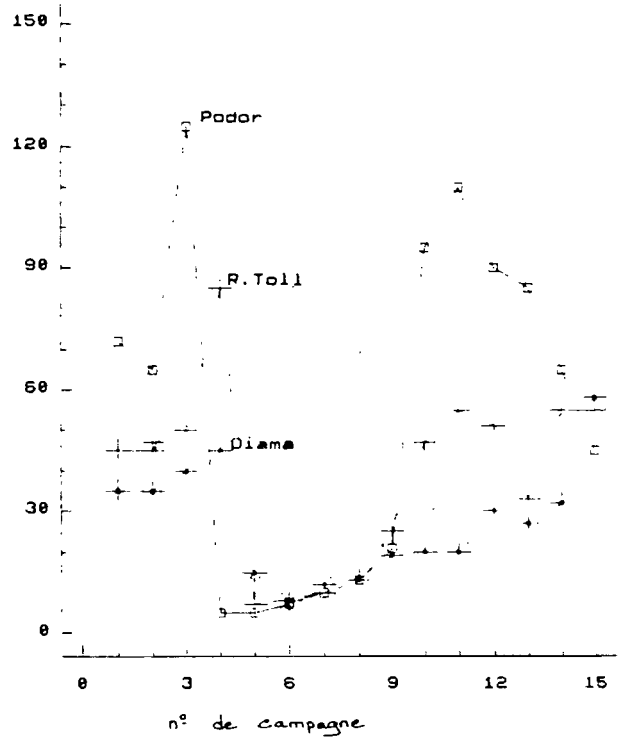
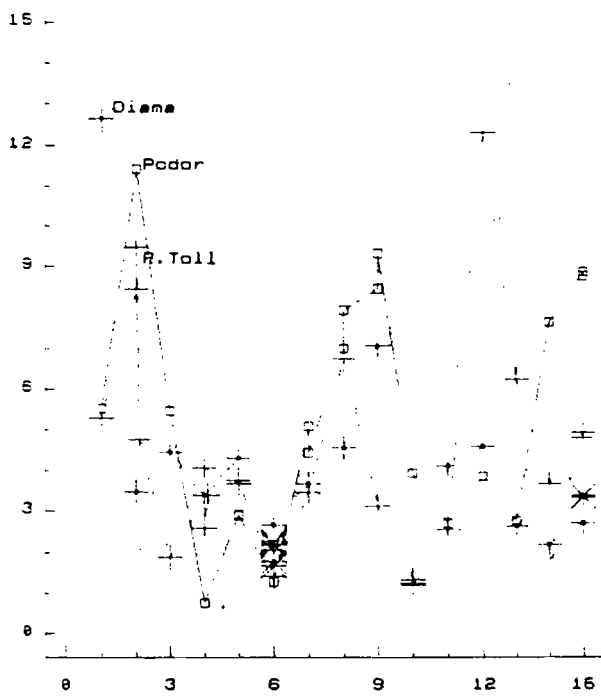


Fig. 10

Il existe un cycle annuel marqué qui est intimement lié au cycle hydrologique du fleuve. Le cycle naturel est en effet caractérisé par trois phases successives : la crue, la décrue, l'étiage qui vont imposer leur dynamique à l'environnement hydroclimatique et dont la disparition du disque de Secchi constitue un bon traceur.

Durant la crue, le transport solide est élevé ce qui se traduit par une diminution drastique de la profondeur de disparition du disque de Secchi et des conductivités faibles. L'ensemble de la zone d'étude est alors homogène. Cette saison est en outre caractérisée par un apport massif de sels nutritifs (nitrates) dont l'origine reste à identifier. L'arrivée de l'onde crue se traduit tout d'abord par un lessivage des populations phytoplanctoniques (biomasses faibles). Par la suite, la teneur en chlorophylle totale va augmenter progressivement, corrélativement à la diminution du taux de nitrates, alors que les conditions lumineuses restent très défavorables. Les biomasses vont devenir relativement importantes, et l'observation microscopique révèle que les algues incriminées sont d'extrême petite taille (1 à 5  $\mu\text{m}$ ), probablement bien adaptées à un régime lumineux sévère. En effet, seule une petite tranche d'eau est éclairée. La propagation de la crue s'accompagne d'un régime de turbulences intense, susceptible de mouvoir verticalement les cellules phytoplanctoniques suffisamment rapidement le long de la colonne d'eau pour que celles-ci, vraisemblablement adaptées à de telles fluctuations, puissent utiliser efficacement leur bref passage dans la couche euphotique.

L'éclaircissement des eaux lors de la décrue s'accompagne d'un nouveau lessivage des populations phytoplanctoniques. Alors qu'au cours de la phase précédente l'ensemble du fleuve était homogène, la turbidité reste toujours beaucoup plus élevée aux stations de l'aval. De plus, la conductivité augmente également fortement, particulièrement au niveau de Diama. Les biomasses phytoplanctoniques restent faibles, sauf au niveau de Richard-Toll, sans que nous soyons en mesure de l'expliquer. L'observation de la communauté phytoplanctonique révèle la mise en place de deux peuplements très différents. Au niveau de Podor, la communauté est structurée et caractérisée par une abondante flore de Desmidiacées et de Cyanophycées filamenteuses accompagnées de diatomées. Cette flore ne se retrouve jamais à Richard-Toll où le peuplement apparaît dominé par des Cryptophycées, des Diatomées et un nanoplancton indéterminé. Ce même peuplement se retrouve jusqu'à Diama.

Durant l'étiage, Le peuplement de Podor se développe fortement jusqu'à produire une biomasse comparable à celle observée durant la crue. La présence de cyanophycées filamenteuses nombreuses, fixatrices d'azote, permet de supposer que ce sont elles qui constituent le stock de sels nutritifs indispensable au développement de la communauté. A

l'inverse, de Diama à Richard-Toll, les biomasses restent faibles. Il n'y a pas de véritable production phytoplanctonique. Il existe un facteur limitant, non identifié pour l'heure, qui inhibe le développement des algues.

### 3.2. L'Estuaire.

#### 3.2.1. Cycle annuel.

Les caractéristiques physico-chimiques de l'estuaire sont désormais intimement liées aux "perturbations" induites par le mouvement des vannes du barrage de Diama. Le cycle d'alternance naturelle des eaux douces de la crue et des eaux marines dans l'estuaire est toujours dominant mais les contraintes de gestion du plan d'eau de Diama entraînent l'apparition de lâchers sporadiques, plus ou moins importants, destinés à la régulation de la côte du plan d'eau amont et susceptibles de survenir en toute saison. A terme, cette situation deviendra vraisemblablement dominante dès lors que le barrage de Manantali sera opérationnel pour la production d'énergie hydroélectrique et qu'un débit minimum sera donc disponible toute l'année dans le fleuve.

L'analyse des salinités journalières à Saint-Louis et en surface dans le fleuve permet de définir un cycle annuel de salinisation de l'estuaire avec trois saisons distinctes (Fig. 11).

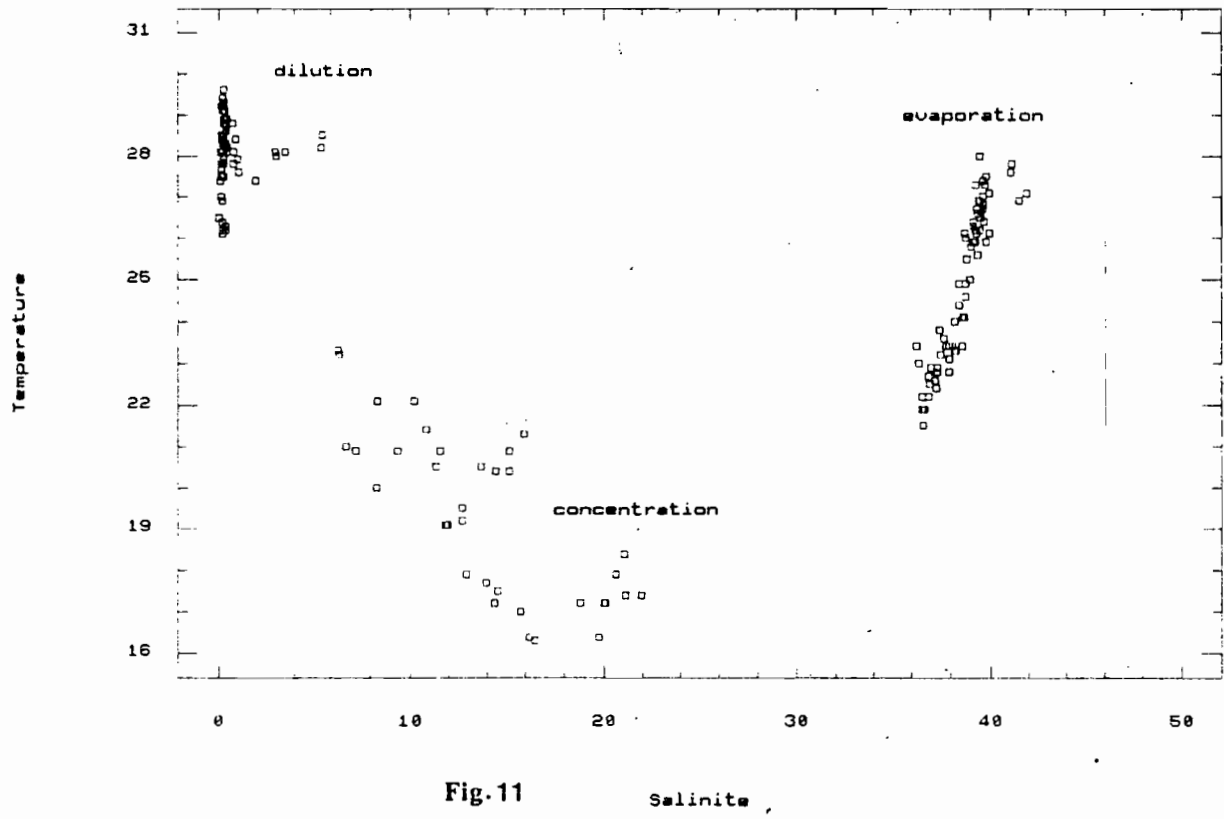
- a) : *phase de dilution*. Durant l'hivernage, l'ensemble de l'estuaire est soumis uniformément aux flots de la crue : phénomène rapide qui survient brutalement et dont la durée est liée uniquement aux besoins en eau dans la vallée puisque cet épisode cesse dès la fermeture des vannes du barrage.

- b) : *phase de concentration*. Dès la fermeture du barrage, l'intrusion marine reprend sous l'effet de l'onde de marée. Les eaux estuariennes vont progressivement se concentrer jusqu'à atteindre une valeur voisine de celle de l'eau de mer. Cette reconcentration est rapide, bien que contrariée par des lâchers tardifs de Diama. Les eaux douces évacuées sont en effet en quantité insuffisante pour diluer durablement l'estuaire et sont au bout de quelques jours intégrées à la masse d'eau saumâtre.

- c) : *phase d'évaporation*. La concentration va ensuite se poursuivre sous l'effet conjugué de la marée et de l'évaporation. La salinité augmente alors exponentiellement jusqu'à l'ouverture des vannes lors de l'arrivée de l'onde de crue de la saison hydrologique suivante. Cette phase est donc directement tributaire de la gestion de la ressource en eau à Diama qui est elle-même asservie aux besoins en eau dans la vallée et à la pluviométrie sur le Haut Bassin.

Diagramme T:S pour le fleuve a St.Louis

en surface, 1988





### 3.2.2 . Variabilité spatiale.

Nous présenterons ci-dessous sans les commenter les observations effectuées lors de trois des cinq campagnes longitudinales menées sur l'estuaire. Les profils en long des champs de salinité et de chlorophylle sont représentés sur les figures 12, 13 et 14. Notons que lors de ces campagnes nous ne nous sommes pas préoccupés du cycle de marée, notre objectif étant de caractériser la variabilité spatiale dans l'estuaire.

Nous ne retiendrons pour l'heure qu'une seule remarque : lorsque la salinité dans l'estuaire est homogène, la répartition de la chlorophylle l'est aussi et les biomasses rencontrées sont relativement faibles (campagne de mai 1989). A l'inverse, les deux autres campagnes furent menées quelques jours après qu'un lâcher ait eu lieu à Diama, ce qui se traduit par un champ de salinité hétérogène, avec des salinités plus élevées vers l'aval et en profondeur. On observe alors une répartition de la chlorophylle hétérogène, avec des biomasses élevées par endroit ce qui suggère des mécanismes de stimulation et/ou d'accumulation du phytoplancton.

## 4. CONCLUSION

### 4.1. Zone amont

Il apparait dans la partie lacustre de notre zone d'étude quelques faits marquants, dont hélas, nous ne pourrions étudier finement les mécanismes du fait de l'instabilité géopolitique locale.

La production phytoplanctonique est stimulée au cours de la crue, malgré un régime lumineux sévère. L'hypothèse d'une forte adaptation du phytoplancton à un régime de fluctuations lumineuses sous l'effet de turbulences verticales importantes est émise.

Il apparait dans notre zone d'étude deux régions caractérisées par des peuplements algaux très différents. D'une part une région que nous dirons fluviale (station de Podor) avec une forte production au cours de l'étiage et des peuplements comparables à ceux rencontrés plus en amont. D'autre part, la région allant de Diama à Richard-Toll où l'on n'observe pas de poussée phytoplanctonique en étiage. Le peuplement y est homogène, très différent de celui de l'amont et peu productif : nous le qualifierons de lacustre. Sa croissance est inhibée par un facteur pour l'heure indéterminé.

### 4.2. Zone aval

L'hydroclimat de l'estuaire se caractérise par la succession de trois phases distinctes. Le temps de résidence, la circulation, le devenir des masses d'eau en présence

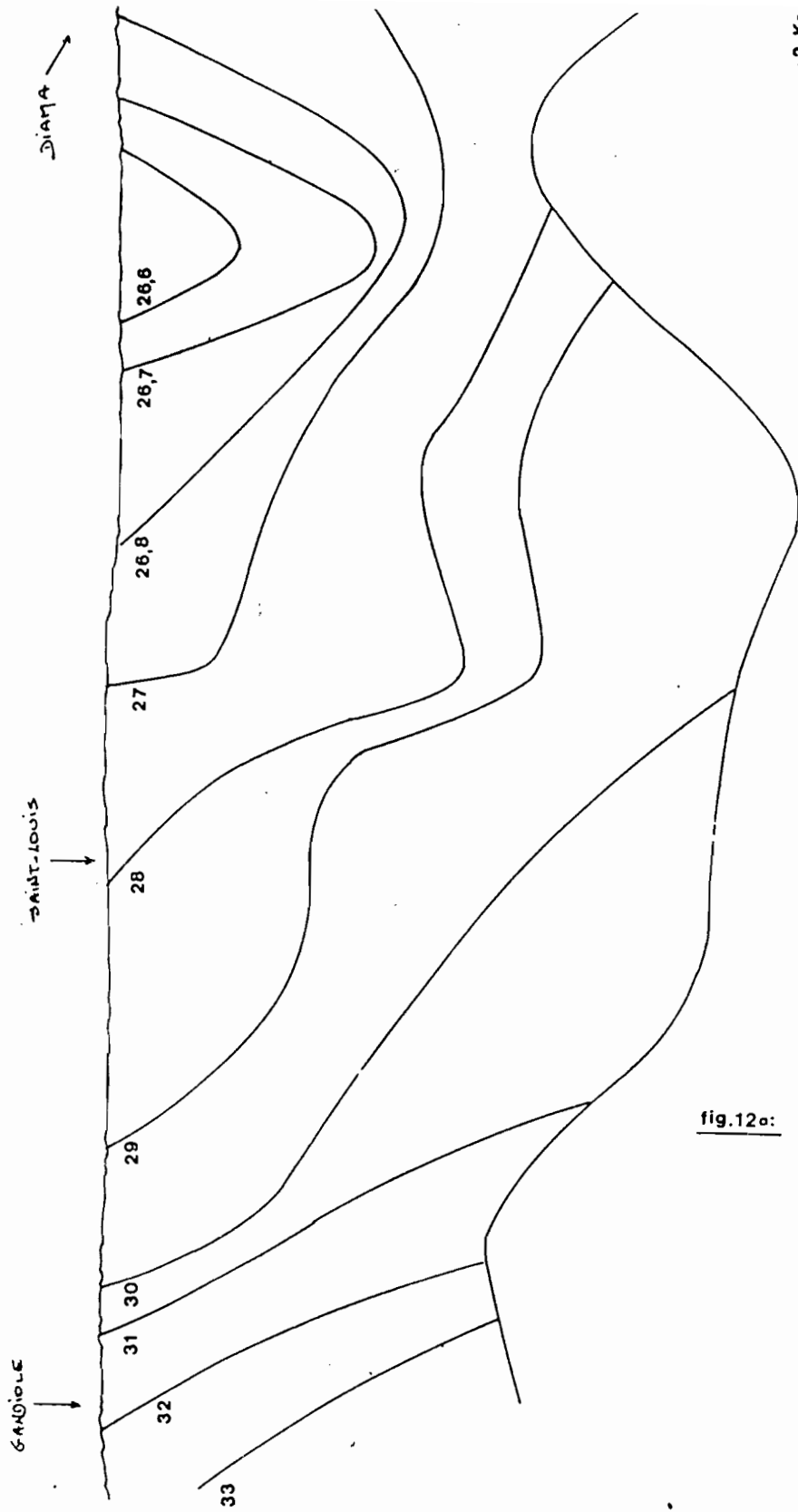
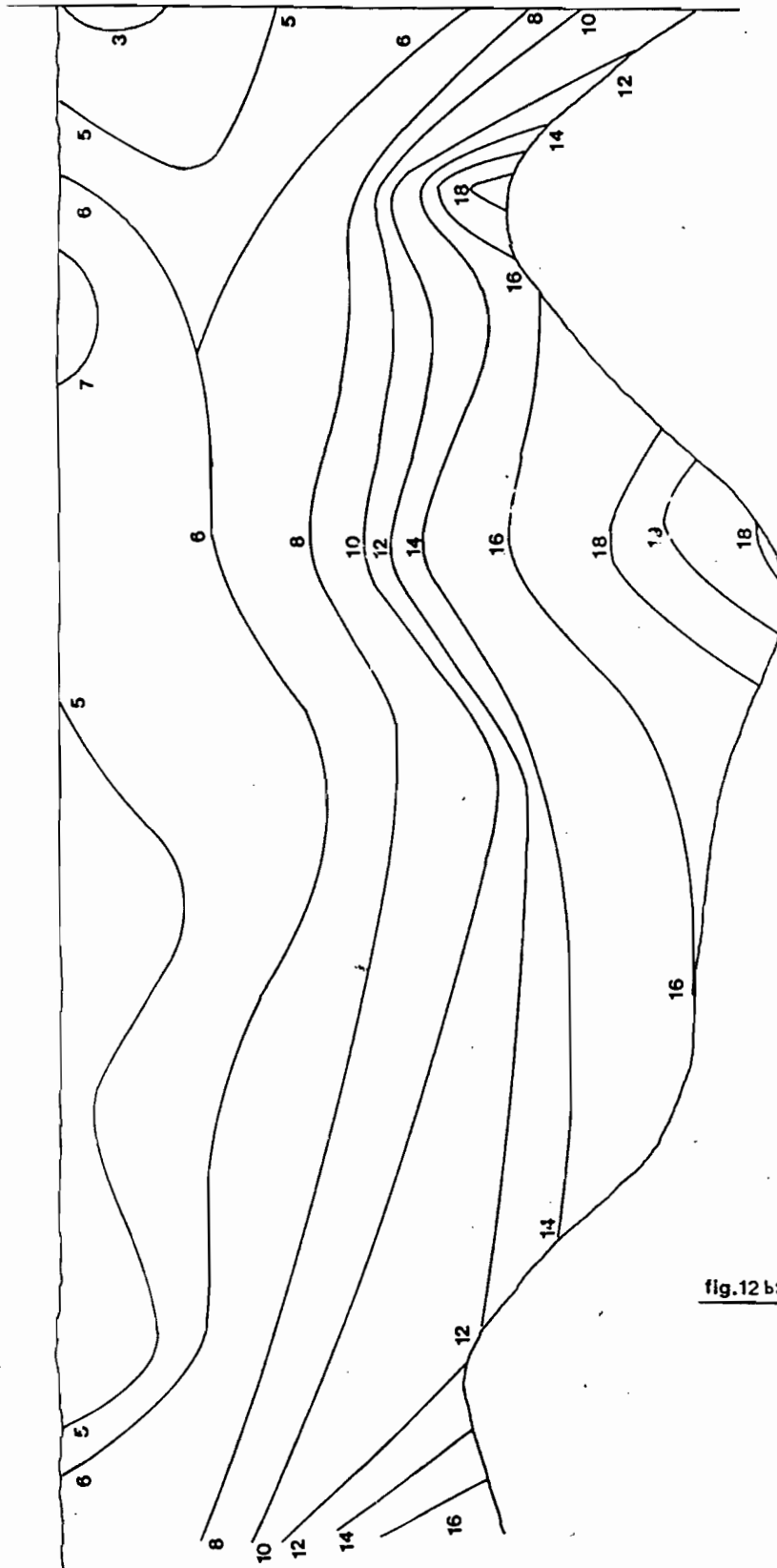


fig.12a: profil de salinite  
estuaire 26-01-89



**fig.12b:** profil de chlorophylle  
estuaire 26-01-89

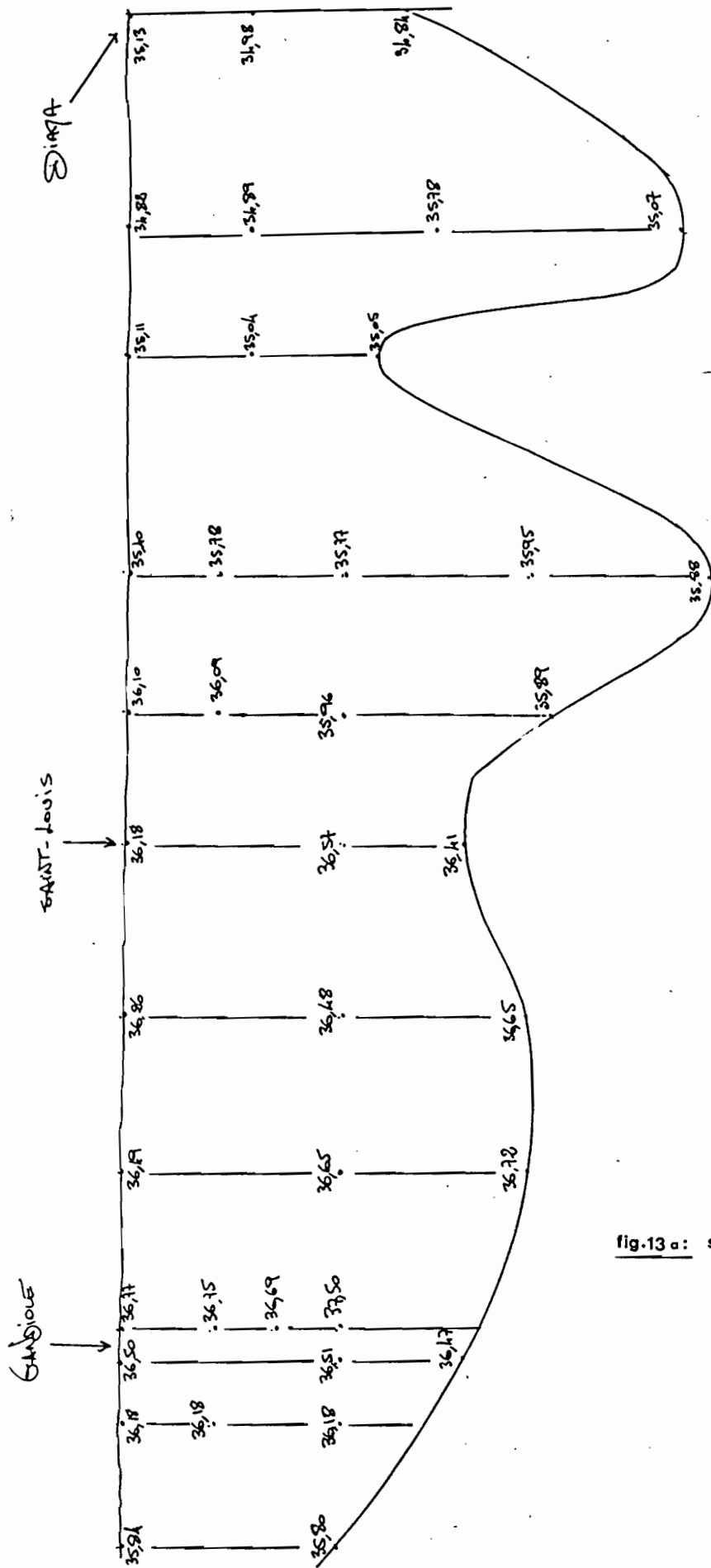


fig.13 a: salinite dans l'estuaire  
le 25-05-89

2 Km

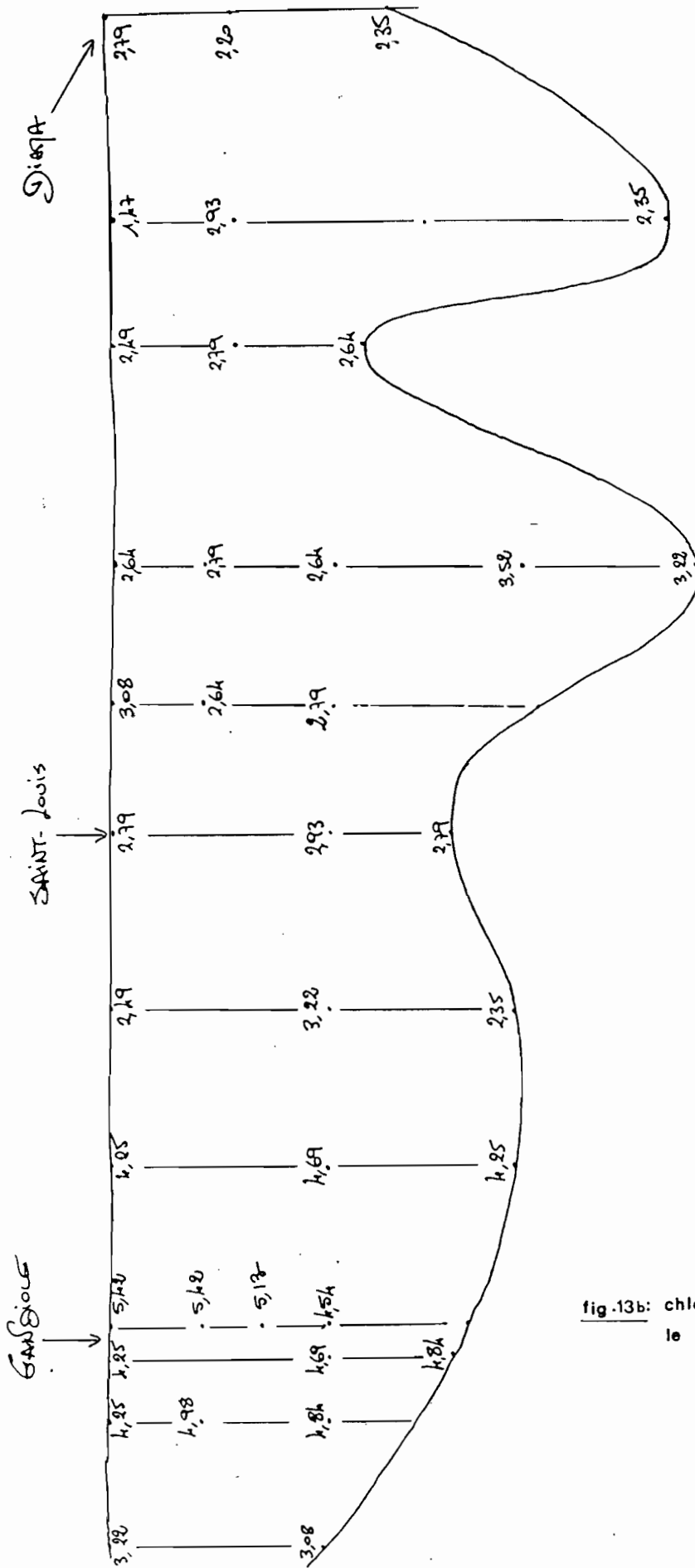
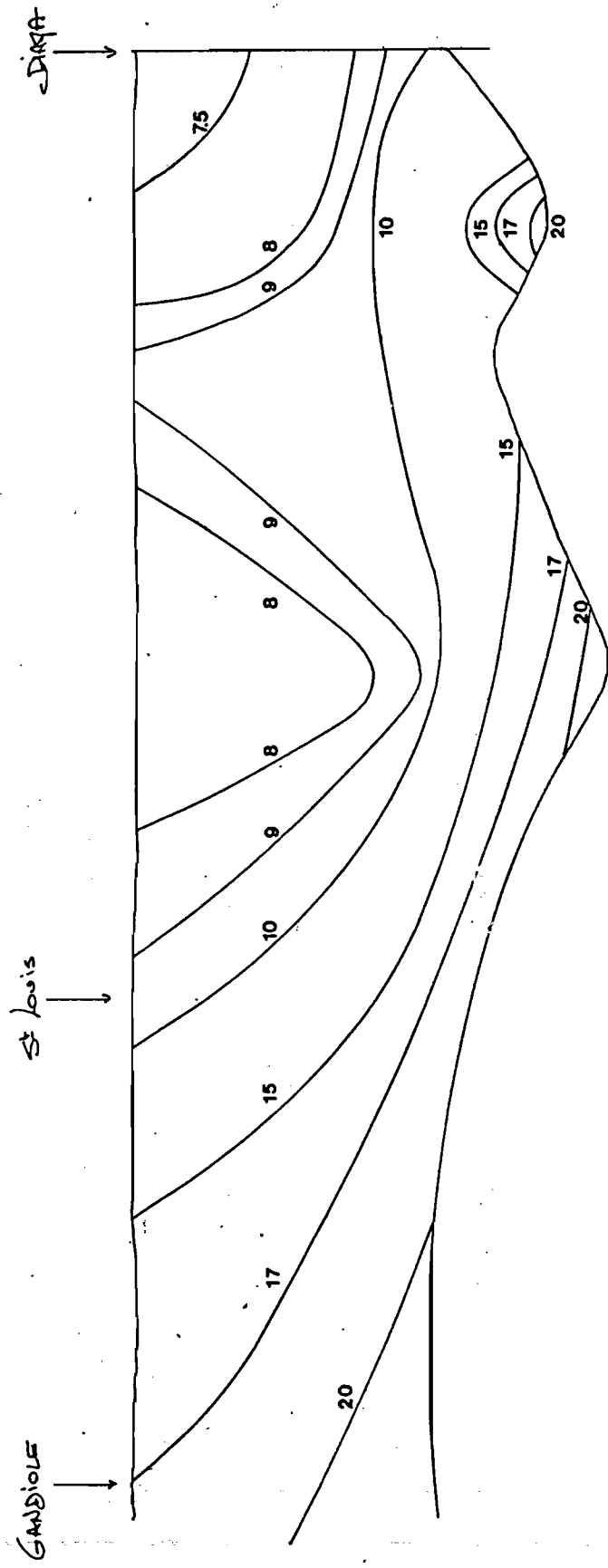


fig.13b: chlorophylle dans l'estuaire  
le 25-05-89



2 Km

fig.14o: profil de salinite  
estuaire 19-07-89

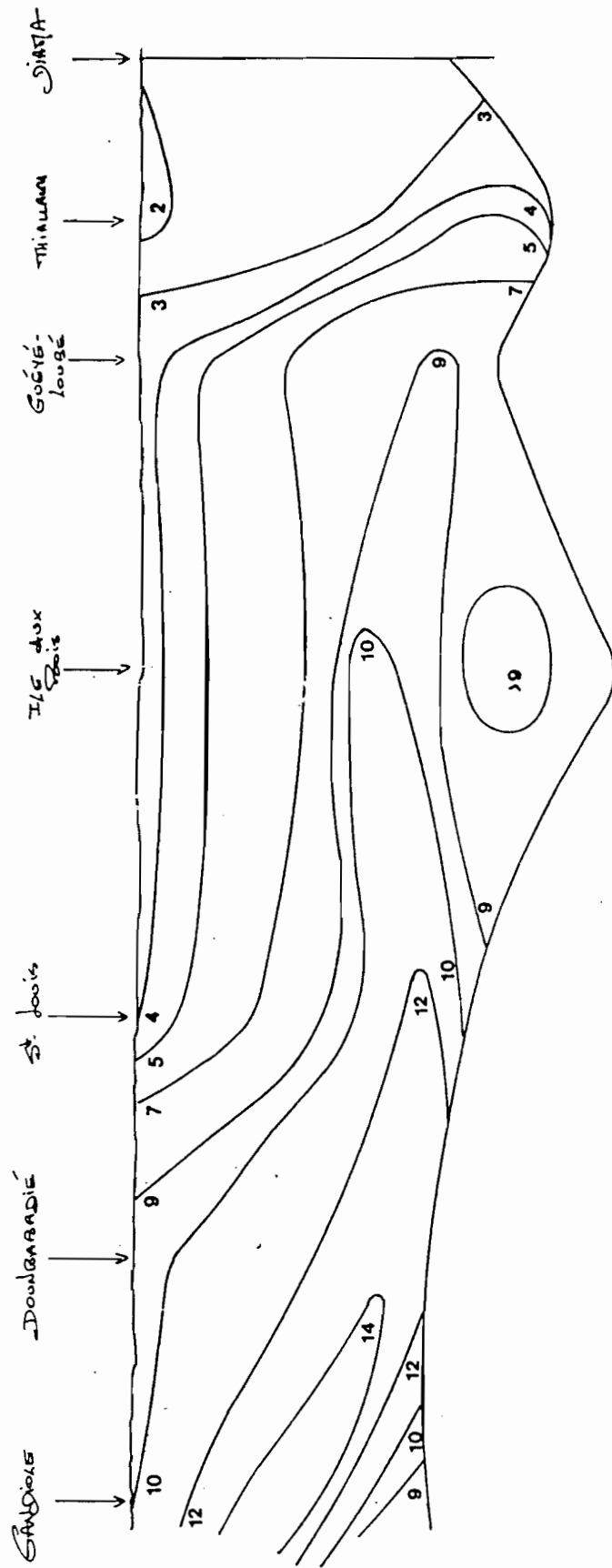


fig.14b: profil de chlorophylle  
estuaire 19-07-89

dépendent de multiples facteurs :

- hydrologiques : crues et lâchers (débits, durée),
- océanologiques : marées (amplitudes),
- météorologiques : vents (direction, intensité),
- physiques : champs de densité.

La salinité, par ses propriétés conservatives est un bon traceur de la qualité des échanges entre masses d'eau. Il ressort de nos premières observations que suivant les saisons et en fonction des perturbations induites par le barrage de Diama, l'estuaire oscillera entre des moments de totale homogénéité et des moments, au contraire, durant lesquels, l'hétérogénéité environnementale sera élevée.

La superposition au cycle naturel d'un régime de perturbations anthropiques a pour principale conséquence d'augmenter la variabilité à court terme des caractéristiques hydroclimatiques tout au long de l'année. La question sera de déterminer s'il existe une adéquation entre l'intensité et la fréquence des perturbations nouvelles et les caractéristiques des populations phytoplanctoniques qui les subissent.



ANNEXE 1

CAMPAGNE			STATION	
numéro	date		numéro	PK
1	30-04-88		1	0
2	17-05-88	:	2	27
3	21-06-88	:	3	27
4	18-07-88	:	4	27
5	10-08-88	:	5	27
6	07-09-88	:	6	27
7	26-09-88	:	7	55
8	18-10-88	:	8	55
9	15-11-88	:	9	63
10	20-12-88	:	10	79
11	..-01-89	:	11	97
12	..-02-89	:	12	107
13	..-03-89	:	13	110
14	..-04-89	:	14	141
15	..-05-89	:	15	267
		:	16	267