

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°4

Jean Yves (GAC)

ORSTOM

avec la collaboration de

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

avril 1991

Projet EQUESSEN

Rapport Scientifique n° 4

Sommaire

	Pages
Introduction	1
Présentation des équipes de Recherches	2
Synthèse sur EQUESSEN (volet hydrogéochimie globale) (par J.Y.GAC et D. ORANGE)	5
Etude du phytoplancton et de l'hydrodynamique des masses d'eau dans l'estuaire du fleuve Sénégal (par P. CECCHI)	9
Etude de la gestion globale des eaux du lac de Guiers et mise au point d'un modèle de gestion pour la valo- risation agricole du milieu (par F.X. COGELS et J.Y.GAC)	49
Etude géomorphologique du façonnement des paysages, de l'évolution géomorphologique et sédimentologique du delta du Sénégal et des transformations dans les zones en voie d'aménagement (par A. KANE).	61
Etude des flux de matières dissoutes et particulaires et de la qualité des eaux de surface dans l'ensemble du dis- positif fluvioi-lacustre (par J.Y.GAC).	84
Etude du fonctionnement des nappes et des relations entre eaux de surface/eaux souterraines (par J.L.SAOS).	116
Le volet formation (par J.Y. GAC)	122
Annexes	

Programme CEE-ORSTOM n° TS2 0198-F (EDB)

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 troisième rapport de novembre 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 et le IERC de Cranfield (GB).

Le laboratoire GEOTOP de l'université du Québec mène 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.

L'IERC (International Ecotechnology research Center) de Cranfield développe un programme de recherche sur l'état global de l'environnement dans la basse vallée du Sénégal. Ce projet dirigé par le Professeur Peter ALLEN est financé par la DG VIII de la CEE. Une collaboration avec EQUÉSEN a été envisagée sous deux aspects : un séminaire commun à Dakar en novembre prochain et un montage pour un nouveau projet qui sera présenté en fin d'année à la DG VIII.

Cette note de synthèse constitue le quatrième rapport scientifique établi sur l'état d'avancement du programme au 1 novembre 1990. Il comporte les résultats des travaux sur les différents thèmes de recherches, avec un accent particulier sur la Production Primaire menée par l'ISRA (P. CECCHI) et surtout un important volet sur la formation avec la soutenance de 5 mémoires dont 2 au Sénégal (Dakar), 2 en Belgique

Programme CEE-ORSTOM n° TS2 0198-F (EDB)

(Mons) et 1 en France (Strasbourg). Trois de ces mémoires ont directement bénéficié du soutien financier de la CEE : mémoire de fin d'études de N. EVORA (le 28 novembre 1990 à Mons en Belgique), thèse d'Etat de Didier ORANGE (le 20 décembre 1990 à Strasbourg) et mémoire de maîtrise de A. FAYE (en novembre 90 à l'université de Dakar) : ces trois études sont jointes au présent rapport. Deux autres mémoires soutenus le 28 novembre à Mons (mémoire de fin d'Etudes de Mme Fatou NDIAYE) et le 4 décembre à Dakar (Thèse d'Etat de M.C.B. GAYE) ont reçu l'appui scientifique des participants au projet (J.Y. GAC, F.X. COGELS et Alioune KANE ont fait partie des Jurys de soutenance).

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 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 du Mémoire de fin d'Etudes à l'école Polytechnique de Mons le 28 novembre 1990 (J.Y. GAC et F.X. COGELS membres du jury).

FAYE Abdoulaye : Etudiant au Département de Géographie de

Programme CEE-ORSTOM n° TS2 0198-F (EDB)

l'Université de Dakar : spécialité : géographie physique.
Mémoire de maîtrise soutenu à Dakar (direction de recherches
par M. A. KANE)

KANE A. : Maître- 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.

NDIAYE Fatou : Etudiante. spécialité : hydrogéologie. Souten-
nance du Mémoire de fin d'Etudes à l'école Polytechnique de
Mons le 28 novembre 1990 (J.Y. GAC et F.X. COGELS membres du
jury).

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. : Directeur de Recherches 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 de recherche, du 1/04 au 1/10 1990 et
du 1/01 au 1/10/91. Spécialité : géochimie et paléoclima-
tologie. Soutenance de thèse d'Etat le 20 décembre à Stras-
bourg (J.Y. GAC membre du jury).

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.

SCHMIT J.P. : Professeur à l'Université du Québec à Montréal.
Spécialité : chimie inorganique et bactériologie.
chimiste,

LEGER D. et GHEDIN E. : Etudiantes à l'Université du Québec à
Montréal. Spécialité : bactériologistes. Soutenance du Mémoire
de fin d'Etudes de Mlle LEGER en 1991.

Programme CEE-ORSTOM n° TS2 0198-F (EDB)

2.- MISE EN PLACE DES CREDITS

La date contractuelle du projet a été fixée au 1 avril 1989. La durée initialement prévue était de 3 ans. Une prolongation d'un an a été soumise à l'agrément de la DG XII en mars 1991.

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

Les futures délégations de crédit prendront en compte la nouvelle proposition budgétaire soumise à la CEE en mars 1991 (voir tableau ci-dessous).

Nouveau Tableau Récapitulatif Général (en écus)

	1ère Année				2ème Année				3ème Année			
	Univ.	FUL	ISRA	ORSTOM	Univ.	FUL	ISRA	ORSTOM	Univ.	FUL	ISRA	ORSTOM
Frais personnel	557	1.720	2.506	9.777	573	8.150	2.583	15.000	1.000	9.350	2.661	15.385
" déplacement	1.285	4.899	10.363	18.494	1.323	9.280	10.674	19.048	1.952	12.600	10.993	14.621
Matériel durable Biens d'équipement	26.305	5.587	27.440	34.714	8.545	1.210	18.340	13.504	0	500	0	0
Mat.consomnable	2.141	1.195	2.100	16.341	2.206	2.500	2.163	13.800	2.273	2.500	2.227	17.330
Autres dépenses	1.058	869	1.200	16.966	1.090	4.930	1.236	10.000	2.122	4.100	1.274	19.230
Frais gestion	252	2.141	808	3.079	260	3.912	834	3.171	268	4.358	858	3.270
Total	31.598	16.411	44.417	99.321	13.997	29.982	35.830	74.523	7.615	33.408	18.013	69.836

	Récapitulatif par partenaires					Récapitulatif par années			
	Univ.	FUL	ISRA	ORSTOM	Total	1ère année	2ème année	3ème année	Total
Frais personnel	2.130	19.220	7.750	40.162	69.262	14.560	26.306	28.396	69.262
" déplacement	4.560	26.779	32.030	52.163	115.532	35.041	40.325	40.166	115.532
Matériel durable Biens d'équipement	34.850	7.297	45.780	48.218	136.145	97.046	41.599	500	136.145
Mat.consomnable	6.620	6.195	6.490	47.471	66.776	21.777	20.669	24.330	66.776
Autres dépenses	4.270	9.899	3.710	46.196	64.075	20.093	17.256	26.726	64.075
Frais gestion	780	10.410	2.500	9.520	23.210	6.280	8.177	8.754	23.210
Total	53.210	79.800	98.260	243.730	475.000	191.797	154.332	128.872	475.000

Synthèse sur le projet EQUÉSEN présentée à Strasbourg
(26 mars 1991)

ENVIRONNEMENT ET QUALITE DES EAUX DU FLEUVE SENEGAL

(Volet hydrogéochimie globale)

GAC J. Y.⁽¹⁾ et ORANGE D.⁽²⁾

(1) ORSTOM, Centre de Dakar, B.P. 1386, Dakar (Sénégal)

(2) ORSTOM et Centre de Géochimie de la Surface (CNRS), 1 rue Blessig, 67084 Strasbourg cedex (France)

Le programme EQUÉSEN est un exemple d'étude géochimique d'un bassin versant prenant en compte les différents aspects biogéohydrodynamiques. L'objet principal est d'étudier, dans un contexte géographique donné (le bassin versant du fleuve Sénégal) les phénomènes qui déterminent les écoulements, l'érosion hydrique et la qualité des eaux naturelles. Cette approche débouche sur une connaissance précise du milieu naturel et des interactions entre paramètres du cycle de l'eau, de l'érosion, de l'hydrochimie et des paramètres physiogéographiques des régions étudiées. Ce programme se propose d'établir une dynamique d'évolution de ce bassin fluvial entre l'Avant- Barrages et l'Après- Barrages. Il comporte quatre volets correspondant à des entités géographiques distinctes : le bassin versant amont du Sénégal dont l'exutoire naturel est la ville sahélienne de Bakel, située aux confins de la Mauritanie, du Mali et du Sénégal, la vallée alluviale qui s'étend de Bakel à l'embouchure sur l'océan Atlantique, le lac de Guiers fortement aménagé et la vallée morte du Ferlo, prolongement naturel de la partie sud de ce lac.

L'étude de la géochimie des eaux du bassin versant amont du Sénégal a montré que les eaux de surface du domaine sahélo-soudano-guinéen ont une charge totale dissoute faible variant de 20 à 100 mg/l. Les teneurs en HCO_3^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ sont diluées par le débit quelle que soit la saison, les charges en matières en suspension (MES) dépendent à la fois du débit et de l'état de surface du bassin versant, les teneurs en silice sont réglées par des processus biogéochimiques. Les concentrations en potassium sont relativement stables, et les teneurs en chlorures et sulfates montrent une grande variabilité typique d'un apport essentiellement atmosphérique. La chimie des MES, malgré un enrichissement relatif en alcalins et alcalino-terreux dû notamment à l'influence des poussières atmosphériques, reflète la composition chimique de sols appauvris par un lessivage intense. Les teneurs en carbone organique particulaire (COP) diminuent en fonction des

concentrations en MES et la matière organique représente entre 5 et 10 % de la masse totale en suspensions. Pour le Sénégal amont, la charge en suspension du ruissellement superficiel moyen annuel, estimé à 23 % de l'écoulement total, a été calculé à 1 g/l après correction de l'érosion des berges. Elle est diluée dans le fleuve par les eaux provenant de l'écoulement de nappe, et elle est augmentée par la reprise des laissés-de-crue lors des premiers flots et par l'érosion des berges. L'évolution de la somme des flux solides exportés en fonction de la somme des flux liquides écoulés met en évidence un changement de capacité de réponse du bassin versant à l'érosion entre une phase d'*érosion précoce* dont les expulsions solides consistent surtout en du matériel repris, et une phase d'*érosion et de transport* qui concerne l'érosion effective du bassin. Dans la première phase qui dure un à deux mois, la concentration en suspension est dépendante du cycle hydrologique considéré et aussi de l'intensité de la crue précédente; au contraire, dans la seconde phase se terminant toujours au quatrième mois après le début de la crue quelle que soit la durée de la phase précédente, la charge solide moyenne des eaux fluviales est une constante intrinsèque du bassin versant considéré, de l'ordre de 160 mg/l pour le Sénégal amont.

A l'amont, la dynamique actuelle du Fouta Djallon, vieux paysage latéritique guinéen, a été plus spécialement étudiée. Ce massif où se situent notamment les sources du Sénégal, est assujéti aux processus d'érosion mécanique et d'altération chimique qui contrôlent les flux de matières particulaires et dissoutes transitant vers l'aval. La caractéristique essentielle de ces flux de matières sortant du Fouta Djallon est la faible importance de la charge particulaire (21 mg/l) par rapport à la charge dissoute (35 mg/l) dont 25 % seulement proviennent de l'altération des roches et des sols, le reste provenant des apports atmosphériques. Ces chiffres soulignent la faiblesse de l'altération chimique sévissant actuellement dans ces paysages guinéens souvent cuirassés. Globalement, le Fouta Djallon est actuellement en "*équilibre géochimique*" : l'approfondissement des profils d'altération (4,6 mm /1000 ans) est à peine supérieur à l'ablation des sols (4 mm/1000 ans). Enfin l'étude de l'influence des fluctuations des paramètres hydroclimatiques sur la dynamique du paysage a montré que, dans ces régions tropicales à deux saisons annuelles contrastées, la "*respiration géochimique*" d'un bassin versant peut se lire dans ses variations hydrologiques. Par conséquent, en cas de changement climatique prolongé, pour une lame d'eau écoulee inférieure à 380 mm/an, la formation de sols en profondeur par altération chimique du substratum ne sera plus suffisante pour compenser les pertes par érosion mécanique des sols en surface.

Sur le bassin versant amont du Sénégal, il a été montré tout l'intérêt d'associer l'étude de la géochimie des eaux de surface à l'étude des paramètres hydroclimatiques. Dans la

zone climatique sahélo-soudano-guinéenne, le débit est le seul indicateur hydroclimatique significatif vis à vis de l'altération chimique au contraire de l'érosion mécanique qui est également dépendante de l'état de surface du bassin versant. Le flux de CO₂ atmosphérique consommé par altération chimique dans cette région est un fonction directe de l'écoulement de surface. Cette approche d'Hydroclimatologie et de Géochimie Globale des Continents (HGGC) a mis en évidence que seules les années appartenant au mode climatique "humide-Froid" permettent de distinguer l'influence de la température sur l'intensité des teneurs en bicarbonates en fonction des débits. Ainsi à débit égal, plus la température est élevée, plus la teneur en bicarbonates, et donc le flux de CO₂ atmosphérique consommé par l'altération est importante. Enfin à l'heure où le problème de l'évolution des teneurs en CO₂ dans l'atmosphère est d'actualité, on oublie souvent que l'altération chimique peut jouer un rôle important dans l'évolution de ces teneurs en intervenant, peut-être comme tampon (régulateur ou non ?) entre les différents réservoirs naturels que sont la lithosphère, la biosphère et l'atmosphère. L'HGGC est une démarche indispensable pour préciser et quantifier la consommation de CO₂ par zone climatique. En zone sahélo-soudano-guinéenne, cette consommation moyenne a été évaluée à 18.10^3 mol/km²/an de CO₂ atmosphérique.

A l'aval, le problème sensible est la remontée saline et son contrôle par le barrage de Diama. Les observations minutieuses de cette invasion marine dans la vallée du fleuve Sénégal à la suite des cycles hydrologiques 1981/1982 et 1982/1983 caractérisés par des écoulements très faibles et leur confrontation avec le modèle proposé par Rochette (1974) ont permis de mettre en évidence des divergences importantes dans l'évaluation de l'évolution spatio-temporelle de la salinité. De nouveaux abaques ont été présentés ; ils précisent à tout instant, et en fonction des seuls débits, la position amont du front salé dans la vallée.

Une autre entité importante est le lac de Guiers considéré comme le "poumon" du Sénégal. Les nombreux aménagements actuels et futurs en font un site vital pour le bon équilibre de la région. 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 hydrologique du lac en système ouvert ou fermé, et de l'évolution du plan d'eau.

Enfin, l'inondation récente, en 1989, de la vallée morte du Ferlo constitue un fait nouveau et important dans l'équilibre biogéodynamique de la région. 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 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 est d'une importance capitale dans la perspective du futur canal de Cayor et demande à être confirmé.

Une autre source d'apport terrigène a également été observée : 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. En Afrique de l'Ouest, les poussières atmosphériques constituent désormais un événement climatique majeur au même titre que la saison des pluies. Leurs dépôts sont de l'ordre de 200 g/m²/an en milieu sahélien et de 40 g/m²/an en domaine guinéen ; 40 % de ces poussières déposées sont remobilisées. Leur contribution au bilan de l'érosion mécanique semble négligeable. Mais leur impact est important sur le bilan de l'altération chimique car elles modifient largement la composition chimique des eaux de pluie, qui sont bicarbonatées-calciques et non acides. Par rapport à la moyenne mondiale, elles sont fortement minéralisées (de 10 à 20 mg/l) avec une moyenne annuelle de 13 mg/l. Ces chiffres soulignent l'intérêt que doit susciter l'étude des aérosols désertiques pour mieux comprendre la dynamique actuelle des paysages de l'Ouest africain. D'autre part la sédimentation éolienne représente l'une des composantes essentielles des dépôts qui garnissent le fond de la dépression du lac de Guiers. Ils représentent, dans les carottes lacustres les archives empilées des climats qui s'y sont succédés depuis des millénaires.

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

*Rapport présenté par Philippe CECCHI,
Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaroye
Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA).*

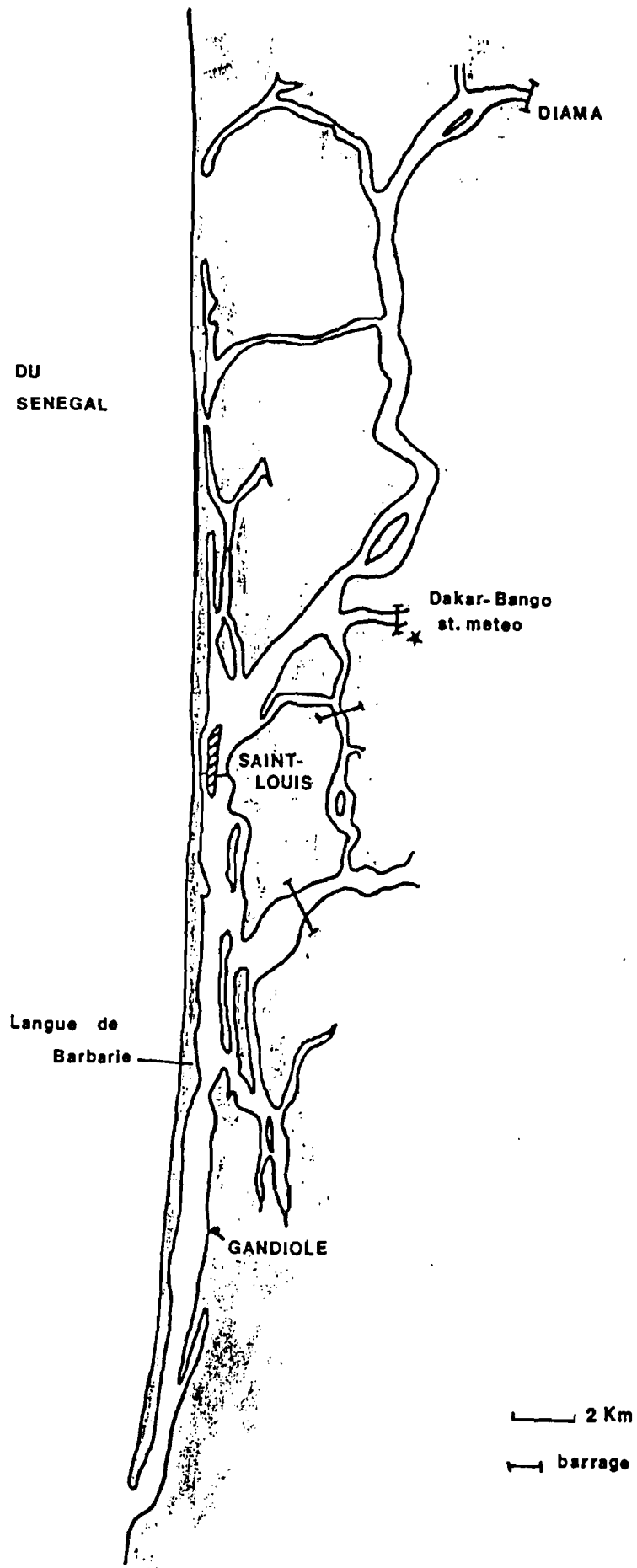
PROLOGUE

Nos investigations, conduites à l'échelle de l'estuaire du Fleuve Sénégal (fig. 1) visent à une approche globale des différents mécanismes qui contrôlent la production et la distribution du phytoplancton dans cet écosystème. Nous avons présenté et justifié à l'occasion des précédents rapports la problématique de cette étude et nous renvoyons en particulier le lecteur au rapport scientifique n°2 (avril 1990) dans lequel figure le calendrier des opérations envisagées. Ce calendrier a été respecté, et la phase d'acquisition des données s'est arrêtée - comme il l'était prévu - en juin 1990. L'ensemble des données recueillies dans le cadre de notre action est actuellement en cours de publication sous forme d'une archive scientifique éditée par le CRODT.

INTRODUCTION

"The physical processes of turbulent mixing are clearly of great importance to the ecology of phytoplankton populations" (Margalef 1978). Cette remarque prend toute son importance en milieu estuarien où les sources d'énergie auxiliaire susceptibles de mobiliser les masses d'eau et d'influer sur leur qualité et leur devenir sont diverses et le plus souvent complexes. Pour le phytoplancton, l'approche traditionnelle met principalement en exergue le rôle combiné de la lumière et des sels nutritifs mis à la disposition des algues sous l'effet des turbulences verticales. L'alternance de stabilisation et de déstabilisation de la colonne d'eau apparaît en effet **comme** un des facteurs clé régissant la dynamique phytoplanctonique (Legendre 1981, Legendre et Demers 1984, Demers et al. 1986). Les algues tendent ainsi à

Fig. 1 : ESTUAIRE DU
FLEUVE SENEGAL



développer des structures horizontales ("patch") qui sont fortement contrôlées par la variabilité temporelle des caractéristiques verticales des masses d'eau (Owen 1989).

Nos travaux s'inscrivent directement dans ce cadre général. Il s'agit en effet **pour nous**, 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,
- puis de se donner les moyens, en relation avec la typologie hydrodynamique, **de proposer une extension et une généralisation de ces mécanismes dans l'espace et dans le temps.**

Notre étude s'est ainsi principalement articulée autour de quatre volets :

- 1 : prélèvements hydrologiques (température, salinité) journaliers en surface à Saint-Louis et Gandiole,
- 2 : suivi hebdomadaire et systématique de trois stations (Diama, Saint-Louis et Gandiole) avec échantillonnage en trois profondeurs à chaque station,
- 3 : bilan sur un cycle de marée en deux occasions des échanges entre le fleuve et le complexe lagunaire en aval de Saint-Louis,
- 4 : suivi d'une station (Saint-Louis) sur trois cycles de marée consécutifs en deux saisons typologiquement distinctes.

Nous nous attacherons dans le présent document à décrire et commenter deux aspects de la variabilité temporelle prévalant dans l'estuaire.

Nous présenterons d'une part les résultats obtenus lors de la première deux campagnes couplées "phytoplancton-hydrodynamique" menées en deux occasions en un point fixe de l'estuaire à Saint-Louis. Il s'agissait là d'estimer, en deux situations typologiquement distinctes, la variabilité à court terme imposées aux algues par les fluctuations périodiques du cycle de marée. Ces résultats sont actuellement en cours d'exploitation.

D'autre part, la seconde partie de notre contribution est constituée d'une note, indépendante, relative à l'analyse des caractéristiques du régime des vents en vigueur sur l'estuaire du fleuve Sénégal durant la saison sèche 1989-1990. Le vent apparaît en effet fréquemment à l'origine de déplacements des masses d'eau et de

leurs hôtes par diffusion turbulente verticale et de transports latéraux par advection horizontale (Bowden 1983). La caractérisation du spectre de variabilité de cette potentielle variable de forçage nous est donc apparue indispensable en préalable à toute évaluation du rôle qu'elle peut jouer. Cette note est en cours d'évaluation pour sa publication sous forme d'un document scientifique édité par le CRODT.

DYNAMIQUE PHYTOPLANCTONIQUE DANS L'ESTUAIRE DU FLEUVE SENEGAL. EFFETS DU CYCLE DE MAREE.

PREAMBULE

Nous tenons ici à remercier chaleureusement toute l'équipe de la capitainerie du port de Saint-Louis, et particulièrement M. Mansour Sarr qui a efficacement veillé au bon déroulement de ces campagnes, et M. Haidar El Ali, plongeur.

I. CADRE GENERAL

L'hydroclimat du fleuve Sénégal se caractérise par la succession de trois phases distinctes :

- une phase de dilution durant laquelle la crue envahit uniformément l'estuaire et ses tributaires,
- une phase de concentration caractérisée par la remontée progressive des eaux océaniques dans l'estuaire,
- une phase d'évaporation durant laquelle l'ensemble de l'estuaire est sous influence marine.

Il apparaît ainsi que, globalement, l'estuaire oscille entre des phases de totale homogénéité et des moments où l'hétérogénéité environnementale y est élevée, principalement sous l'effet antagoniste des flux d'origine marine et continentale (voire notre contribution dans le rapport scientifique n°1 d'octobre 1989).

Les phénomènes géochimiques liés à la remontée d'un biseau salé dans la basse vallée du fleuve Sénégal ont été finement étudiés avant l'édification du barrage de Diama (Rochette 1964, 1974; Kane 1985; Gac et al. 1986a, 1986b). L'incidence de la propagation de l'onde de marée sur les compartiments biologiques n'a cependant jamais été étudiée en détail, à fortiori depuis que le barrage de Diama existe.

En ce sens, le propos de ce chapitre sera donc de décrire et de commenter les observations effectuées à l'occasion de deux suivis à *court terme* de l'hydrodynamique et des caractéristiques du phytoplancton en relation avec la propagation de l'onde de marée. Ces observations s'inscrivent dans le cadre du suivi *hebdomadaire* des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de l'estuaire.

Les objectifs sont les suivants :

- identification de la variabilité temporelle à court terme imposée par le cycle de marée,
- évaluation de la réponse à la perturbation induite par un lâcher d'eau en provenance de Diama,
- calage d'un modèle numérique bidimensionnel vertical de propagation de l'onde de marée et de progression du coin salé.

II. METHODOLOGIE

Les campagnes couplées "hydrodynamique-phytoplancton" ont été conduites en un point fixe à deux reprises correspondant à deux situations typologiquement distinctes :

- en janvier 1990 où la station a été suivie durant une semaine consécutive à un lâcher d'eau en provenance du lac de retenue de Diama,
- en mai 1990 où la même station a été suivie pendant la même durée alors qu'à l'inverse l'estuaire était uniquement sous influence marine.

II.1 Mise en oeuvre

La station de Saint-Louis, sélectionnée pour d'évidentes facilités logistiques, fut échantillonnée en un point fixe positionné au milieu du chenal à l'amont immédiat de la ville. Les prises d'eau eurent lieu toutes les quatre heures pendant trois jours, et en trois profondeurs : à la main pour l'échantillonnage de sub-surface, et à l'aide d'une bouteille Niskin de deux litres pour les collectes effectuées à mi-profondeur et près du fond. Chaque prélèvement est supposé représentatif de la lame d'eau échantillonnée.

Par ailleurs, trois courantomètres Anderaa ont été immergés dans le chenal aux différentes profondeurs échantillonnées. La température, la conductivité, la vitesse et la direction du courant ont été ainsi enregistrées par chaque appareil avec un pas de temps de 10 minutes durant toute la durée des prélèvements. En première analyse, les valeurs horaires instantanées de ces différents paramètres ont été retenues. La salinité a été calculée à partir des températures et conductivités enregistrées suivant les équations préconisées par l'UNESCO (UNESCO 1984).

II.2 Mesures effectuées in-situ

La température et la salinité de chaque échantillon recueilli étaient mesurées à l'aide d'un thermomètre à mercure (précision au dixième) et d'un conductimètre de terrain lors de la campagne de janvier.

En mai, un profil de température et de salinité a été établi toutes les quatre heures au moyen d'un sonde SCTmètre 40330 (Bioblock) ; une lecture était faite tous les 50 cm de la surface au fond du chenal.

La profondeur de disparition d'un disque de Secchi blanc (diamètre de 30 cm) était notée chaque fois que possible.

II.3 Méthodes d'analyse des échantillons recueillis

Lors de chaque prise d'eau, deux fois 250 cm³ du prélèvement étaient immédiatement filtrés sur filtres Whatman GF/C pour le dosage ultérieur de la chlorophylle. Le dosage a été effectué après extraction au méthanol à 95%, puis mesure de la fluorescence de l'extrait au fluorimètre (Turner 111) suivant les recommandations de Holm-Hansen et Riemann (1978). Aucune correction pour les phaeopigments n'a été apportée, et la moyenne des deux dosages a été retenue.

Une troisième filtration de 250 cm³ était faite sur filtre Whatman GF/C préalablement séché à l'étuve (105°C pendant 1 heure), laissé quelques heures au dessiccateur puis pesé. De retour au laboratoire, le filtre était de nouveau déshydraté puis pesé suivant le même protocole dans le but d'estimer la charge en Matières En Suspension (MES).

Le filtrat recueilli était empoisonné au chloroforme et stocké dans des flacons en plastique suivant les recommandations de Golterman et al. (1978). Les techniques classiques d'analyses modifiées par Oudot (com. pers.) ont été utilisées pour le dosage des nitrates, phosphates et silicates à l'aide d'un auto-analyseur Technicon 2^{ème}. génération.

Un échantillon était conservé sans filtration ni ajout de conservateur dans un flacon de verre pour la mesure au laboratoire de la salinité à l'aide d'un salinomètre digital Tsunami Seiki (TSK E202) étalonné avec des ampoules d'eau de mer normale diffusées par Ocean Scientific Ltd., Brook Road, Wormley, Godalming, Surrey GU8 5UB, R.U..

Par ailleurs, une fraction du prélèvement était immédiatement fixée au lugol (iodure d'iode) pour son observation ultérieure au microscope inversé suivant la méthode d'Utermöhl, dans le but d'identifier les différents taxons présents et d'en estimer quantitativement l'importance. Bien que des sous-estimations puissent se produire lors du comptage des nanoflagellés (Reid 1983), cette méthode reste néanmoins efficace du fait de la sédimentation rapide des algues qu'induit l'ajout du conservateur (UNESCO/SCOR 1974).

Lors de la campagne de mai, une fraction du filtrat fut analysé au spectrophotomètre (Bausch & Lomb Spectronic 2000) suivant la méthode proposée par Pagès et Gadel (1990) pour une estimation optique de la teneur en Matières Organiques Dissoutes (MOD).

III RESULTATS

III.1 Cadre général

Cette première campagne s'est déroulée au coeur de la saison sèche : les trois courantomètres ont été mouillés le 22/01/1990 en début de matinée et remontés le 26/01 en début d'après-midi.

Lors de l'immersion de l'Anderaa positionné à mi-hauteur de la colonne d'eau, la dérive du courantomètre est restée bloquée en position verticale rendant inutilisables les enregistrements de la vitesse et de la direction du courant ; nous n'avons donc retenu que la température et la conductivité enregistrées par cet appareil.

Cette campagne s'est déroulée immédiatement après un lâcher d'eau douce en provenance de Diama. Les vannes du barrage sont en effet restées ouvertes à un palier intermédiaire (palier 3) du 21/01 à 19 heures au 22/01 à 8 heures, autorisant ainsi l'évacuation d'environ 12 millions de m³, soit approximativement un flux d'eau continental d'un débit de 250 m³/s pendant 13 heures (Lamagat, com. pers.).

Nous avons représenté sur la figure 2 le marégramme enregistré à Saint-Louis pendant l'ensemble du mois de janvier. La marée fluviale à Saint-Louis est de type semi-diurne avec inégalité diurne. La semaine durant laquelle le suivi a été effectué apparaît clairement en raison de son atypie eu égard à la régularité du signal de marée le reste du temps. L'apparition à Saint-Louis de cette onde de crue artificielle se caractérise principalement par une réduction sévère du marnage imputable à la poussée vers l'aval des eaux marines par le flux continental.

On remarquera d'autre part que cette campagne eut lieu à la fin d'une période de morte eau (liée à la périodicité semi-mensuelle de la marée), avec des amplitudes faibles, un signal très amorti et une diminution de l'inégalité diurne.

III.2 Hydroclimat

III.2.1 Température

La comparaison des températures enregistrées aux différentes profondeurs (fig. 3) appelle plusieurs remarques.

- Les douze premières heures de la série laissent apparaître une évolution identique et synchrone de la température aux différentes profondeurs. L'arrivée de l'onde de crue artificielle se traduit par une légère diminution de la température qui affecte toute la colonne d'eau mais en perturbant son homogénéité.

fig. 2 MARÉGRAPHIE A SAINT-LOUIS - JANVIER 1990

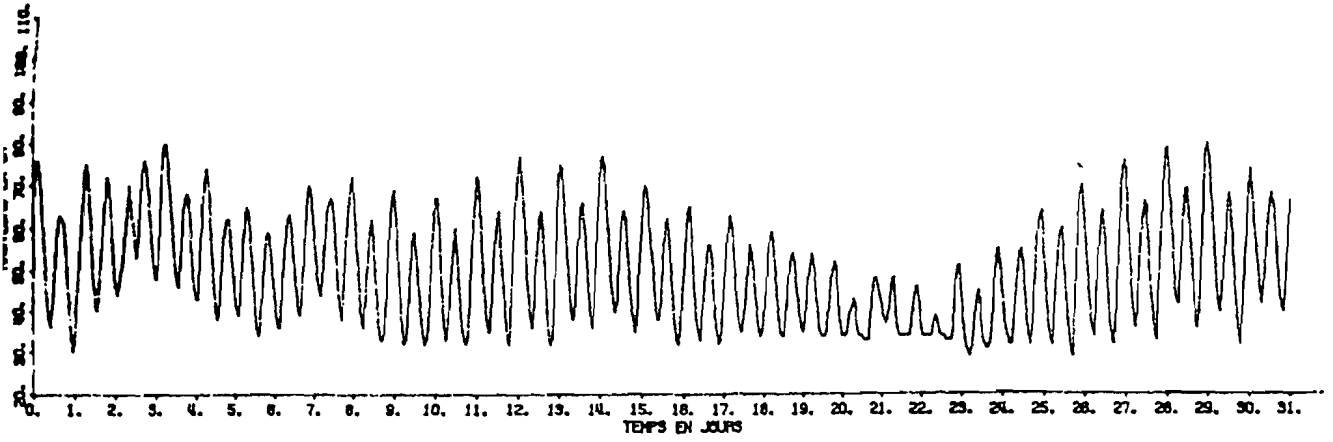
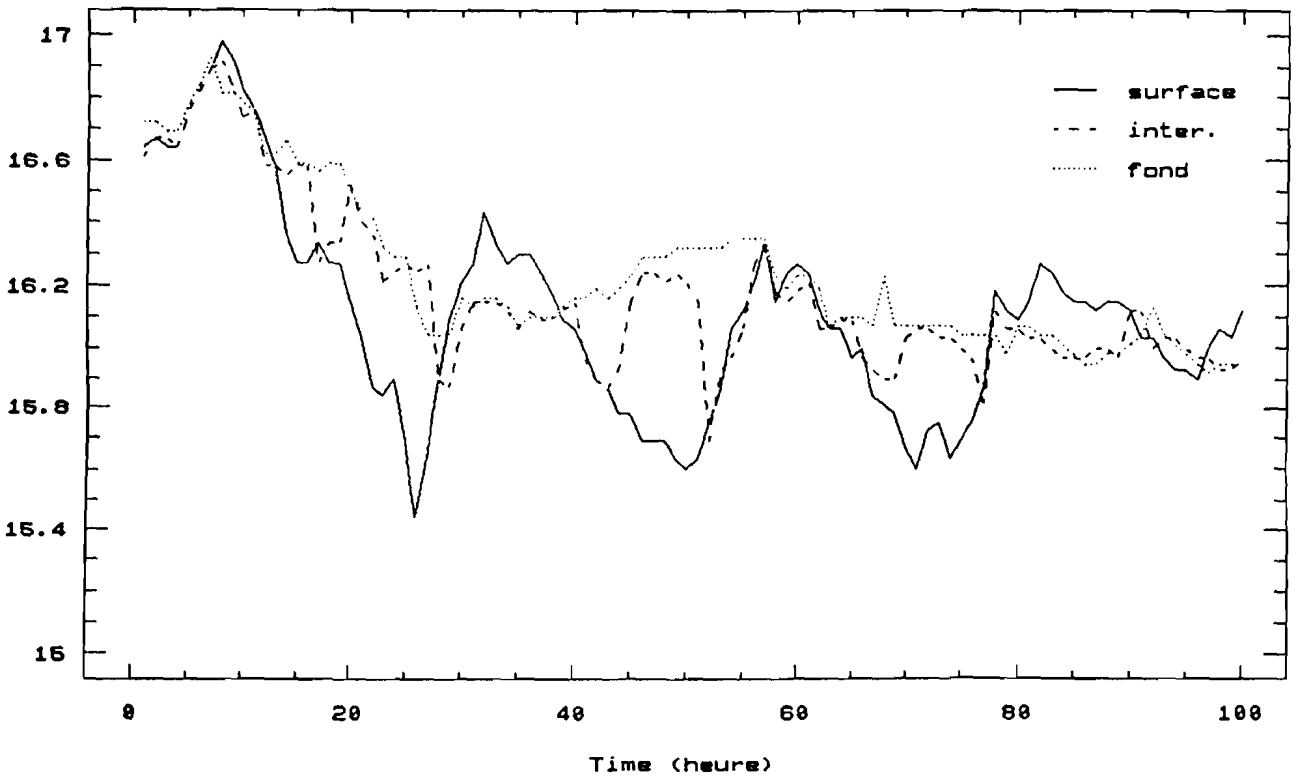


fig. 3 Temperatures enregistrées



- Il existe en effet un cycle remarquable sur la série des températures enregistrées en sub-surface qui n'apparaît pas sur les deux autres enregistrements. Le périodogramme de cette série non stationnarisée et dont on a extrait la moyenne (fig. 4) est marqué par l'émergence de deux pics :

- 1 signal de basse fréquence correspondant à une fréquence de 0,01 cycle/h soit une période virtuelle de 100 heures (longueur de la série). C'est en fait la trace de la variabilité qu'impose l'arrivée de l'onde de crue artificielle dont les eaux dessalées sont très légèrement plus fraîches que les eaux estuariennes.

- 1 pic d'amplitude plus importante et correspondant à une fréquence de 0,04 cycle/h soit une période d'environ 25 heures. Ce pic est attribué à la part de variabilité nycthémérale : la température de surface passe par un minimum journalier avant le lever du soleil et par un maximum en milieu d'après-midi. La variabilité reste néanmoins faible puisque l'écart thermique circadien est de l'ordre de 1°C (minima : 15,4-15,5°C ; maxima 16,3-16,4°C).

- La série des températures enregistrées au bas de la colonne d'eau (qui ne présente pas de tendance nette) est beaucoup moins variable. On constate l'existence d'un très léger gradient vertical de température avec des valeurs d'autant plus élevées que la masse d'eau échantillonnée est profonde. L'évolution indépendante des températures de surface et du fond suggère l'existence de deux masses d'eau superposées dont l'importance relative au sein de la colonne d'eau va évoluer dans le temps comme le montre l'oscillation de la série des températures enregistrées à mi-profondeur.

Comparaison des températures enregistrées et mesurées.

La série des valeurs mesurées en surface montre une tendance identique à la série enregistrées (fig. 5) mais avec des écarts circadiens légèrement plus importants. Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où les prélèvements étaient faits en sub-surface alors que l'enregistreur était immergé à environ 1,5 mètre, baignant donc des eaux plus tamponnées thermiquement.

Les deux autres séries de températures mesurées possèdent un cycle nycthéméral que les enregistrements ne laissent pas apparaître. Ainsi, pour les séries mesurées et enregistrées au fond (fig. 6), les valeurs mesurées sont systématiquement plus faibles le matin (jusqu'à 0,5°C) et systématiquement plus

Fig. 4 Periodogramme des temperatures de surface

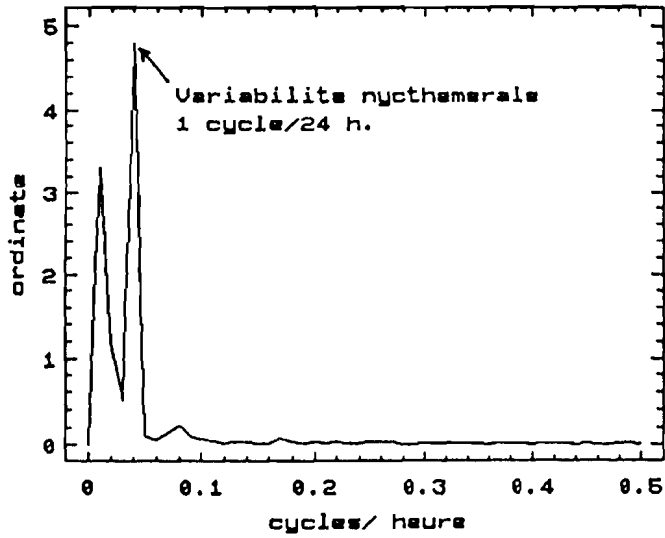


Fig. 5 temperature de surface mesuree et enregistree - Janvier 90.

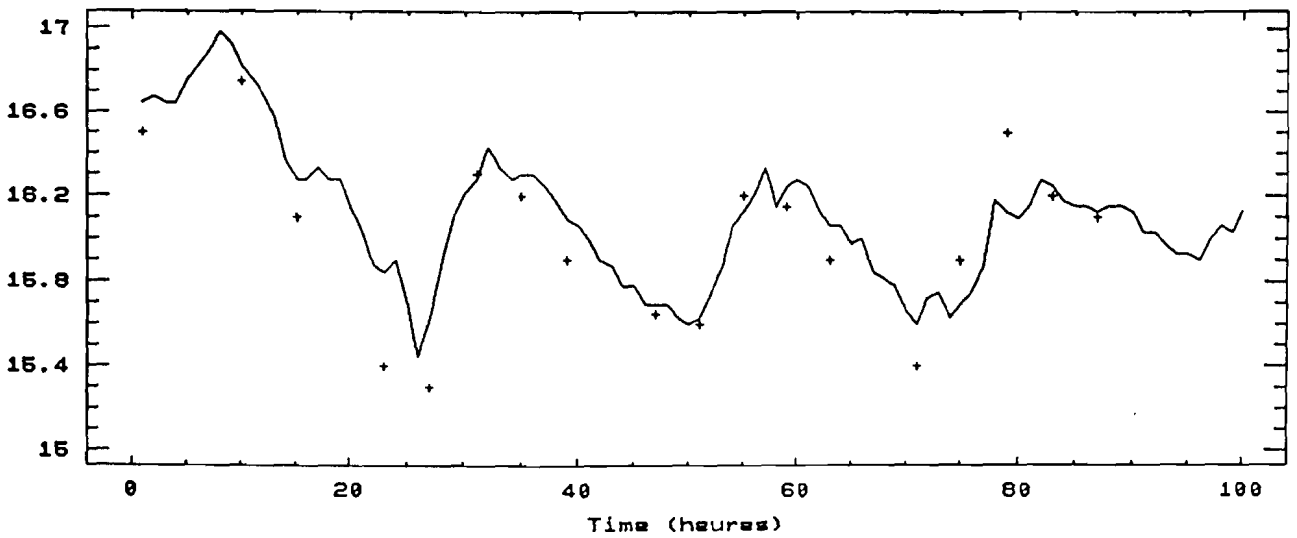
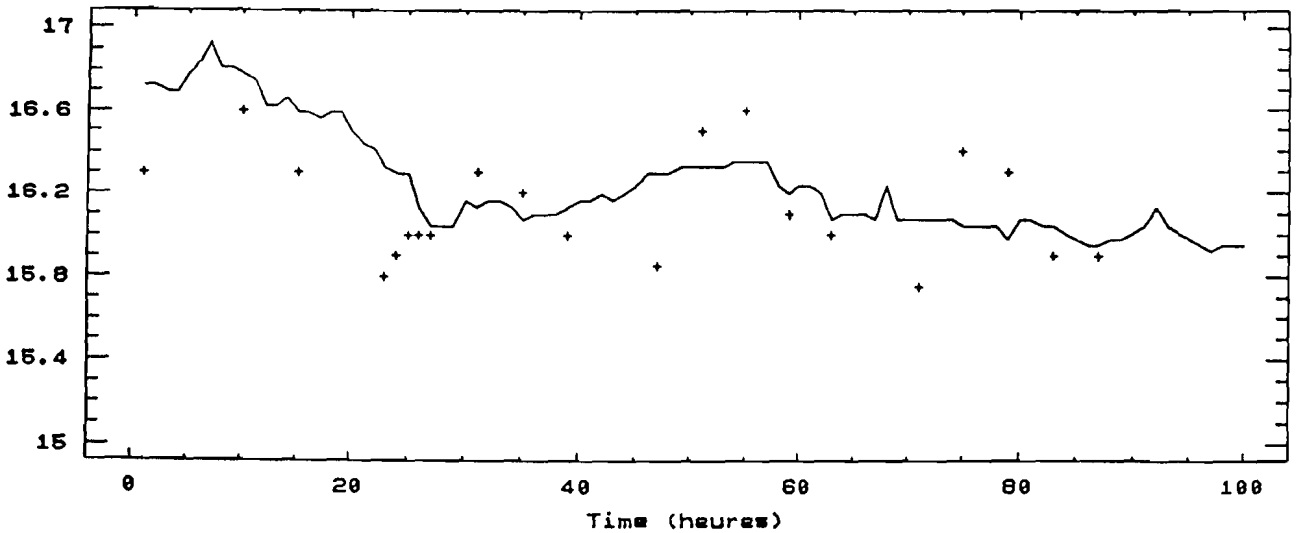


Fig. 6 Temperature au fond mesuree et enregistree - Janvier 90.



fortes l'après-midi (jusqu'à 0,4°C), ce que nous attribuerons au refroidissement ou au réchauffement de l'échantillon par la bouteille Niskin au moment du prélèvement et sur le bateau au moment des mesures. L'artefact sur les mesures est réel, qui indique la présence d'une périodicité là où les enregistrements n'en font paraître aucune.

III.2.2 Salinité

Par ses propriétés conservatives, la salinité est en première approche un bon traceur des masses d'eau en présence et, notamment, de leur origine. En ce sens, l'observation des séries de salinité obtenues à partir des données enregistrées (fig. 7) suscite quelques remarques.

Salinité de surface

Le périodogramme (fig. 8) associé à la série brute des salinités de sub-surface (après extraction de la moyenne) est caractérisé par la présence de 2 pics distincts :

- 1 pic de forte intensité pour une fréquence de 0,01 cycle/heure (période virtuelle de 100 heures) correspondant à la part de variabilité de la série qu'impose l'arrivée de la masse d'eau dessalée à Saint-Louis,

- 1 pic de moindre intensité pour une fréquence de 0,08 cycle/heure (période de 12,5 heures) dont on retrouve un écho sous forme d'épaulement au premier pic pour une fréquence de 0,04 cycle/heure (période de 25 heures). Il s'agit là de la fréquence associée à la périodicité semi-diurne de la marée qui va imposer à l'évolution de la salinité de surface son caractère cyclique.

salinité au fond

On constate que jusqu'à la quarantième heure environ, la masse d'eau profonde dans laquelle baigne l'Anderaa immergé au bas de la colonne d'eau n'est pas affectée par l'arrivée de l'onde de crue artificielle. Par la suite, on observe des "trous" de salinité dont nous verrons par la suite qu'ils sont liés à l'évolution des caractéristiques verticales du signal de marée.

Figure 7. - Salinités enregistrées et mesurées
(janvier 1990)

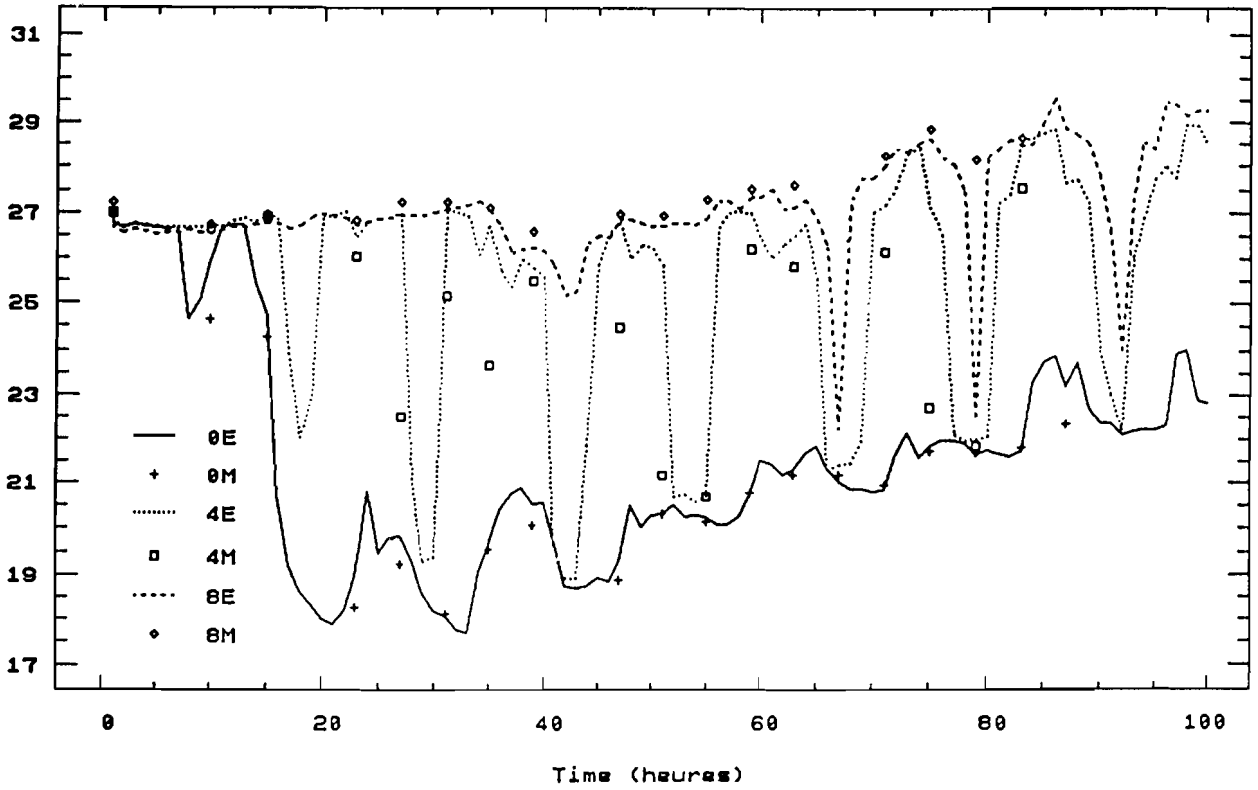
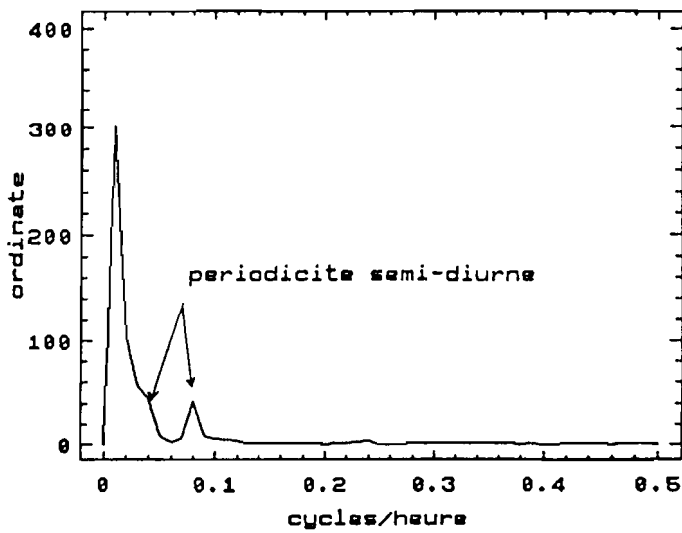


Figure 8.- Périodogramme des salinités de surface



salinité intermédiaire

Les salinités calculées à partir des enregistrements effectués au milieu de la colonne d'eau rendent compte de la présence de deux masses d'eau baignant alternativement l'enregistreur. L'écoulement est en fait constitué d'écoulements horizontaux superposés et indépendants qui présentent chacun des caractéristiques différentes. L'évolution périodique de la salinité à mi-profondeur est ainsi liée aux oscillations qu'impose la poussée océanique à la propagation du coin salé et à la masse d'eau dessalée qui sera tantôt repoussée vers l'amont (salinité intermédiaire élevée), et tantôt étirée vers l'aval (salinité intermédiaire faible).

comparaison des salinités mesurées et enregistrées

La comparaison (fig. 7) des séries de salinité mesurées (0M, 4M et 8M sur la figure) et calculées à partir des enregistrements (0E, 4E et 8E sur la figure) est utile pour localiser précisément l'origine des échantillons, notamment pour les prélèvements effectués à mi-profondeur.

- En surface : On peut ajuster une régression linéaire du type $S_{\text{mesurée}} = 0,96 * S_{\text{enregistrée}} - 0,62$ ($R^2 = 97,01$). La pente n'est pas significativement différente de 1 ($p = 0,005$), validant ainsi la qualité de l'échantillonnage. Les salinités mesurées sont statistiquement plus faibles que les salinités enregistrées du fait de la profondeur plus faible des prélèvements par rapport à l'immersion de l'Anderaa.

- Au fond : Suivant le même type d'ajustement mais après avoir ôté le couple de valeurs obtenues le 24/01 à 15h30, on obtient la relation $S_{\text{mesurée}} = 0,96 * S_{\text{enregistrée}} + 1,43$ ($R^2 = 96,01$) dont la pente n'est pas significativement différente de 1 ($p = 0,005$). Les salinités mesurées sont statistiquement plus élevées que les salinités calculées du fait de la moindre profondeur d'immersion de l'Anderaa par rapport à celle des prélèvements. La valeur écartée de la régression montre qu'à ce moment, le prélèvement a été fait dans la masse d'eau estuarienne salée du fond, alors que l'Anderaa était baigné par des eaux

"mélangées", et donc moins salées. Les deux autres "trous" de salinité observés dans la série des salinités calculées à partir des enregistrements n'ont pas de valeur mesurée homologue.

- A mi-hauteur : La simple observation des deux séries montre le synchronisme de leur variabilité temporelle. La salinité mesurée est cependant en moyenne inférieure à la salinité enregistrée et la masse d'eau échantillonnée possède parfois les caractéristiques des eaux superficielles dessalées, et parfois les caractéristiques des eaux estuariennes profondes salées. La salinité des prélèvements sera utilisée ultérieurement pour identifier l'origine de la masse d'eau échantillonnée à cette profondeur.

III.2.3 Densité

L'image de l'évolution temporelle de la densité calculée à partir des enregistrements obtenus aux différentes profondeurs (fig. 9) permet de rendre compte de l'alternance des masses d'eau en présence. L'arrivée de l'onde de crue artificielle provoque une **stratification** de la colonne d'eau avec une pycnocline qui va osciller de part et d'autre du courantomètre immergé à mi-profondeur. Le marégramme simultanément enregistré à Saint-Louis (fig. 10) montre que l'oscillation de la pycnocline est en phase avec la périodicité du cycle de marée. Nous avons reproduit sur la figure 11 les corrélations croisées entre les séries horaires brutes des hauteurs à Saint-Louis et de la densité à mi-profondeur. Les deux séries évoluent identiquement, mais avec un décalage d'une heure environ : la densité est minimale une heure avant l'étape de marée basse.

Les trois derniers cycles (après la 60^{ème} heure) sont caractérisés par de courtes périodes durant lesquelles le gradient vertical de densité passe par des minimums, cette situation ne survenant que lors des phases d'étape de marée basse lors de cycles de fortes amplitudes.

Ces observations indiquent que les périodes transitoires durant lesquelles la colonne d'eau tend à être homogène ne sont pas la simple conséquence d'un mélange qui détruirait la stratification. A l'inverse, on observe la succession périodique de deux masses d'eau superposées longitudinalement et verticalement, indépendantes, et dont l'importance relative le long d'une verticale semble intimement liée à l'amplitude du marnage, soit à l'importance des volumes déplacés dans

Figure 9. - Evolution de la densité aux différentes profondeurs

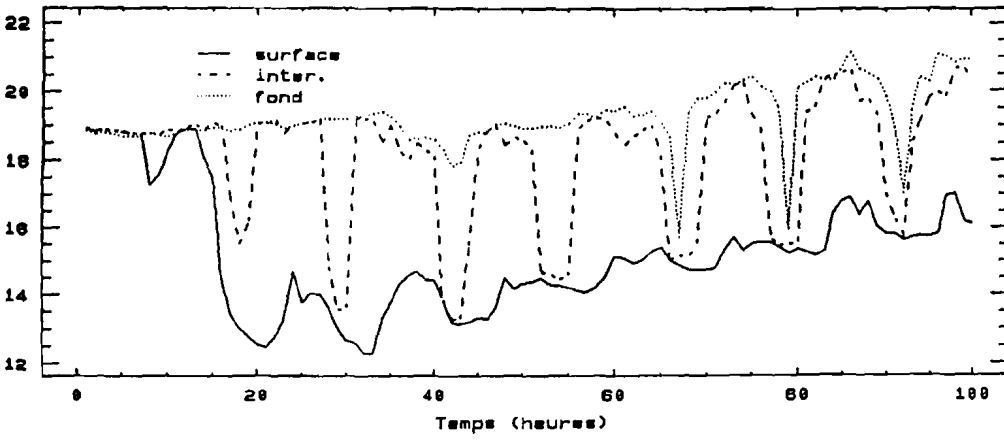


Figure 10. - Marégramme à Saint Louis

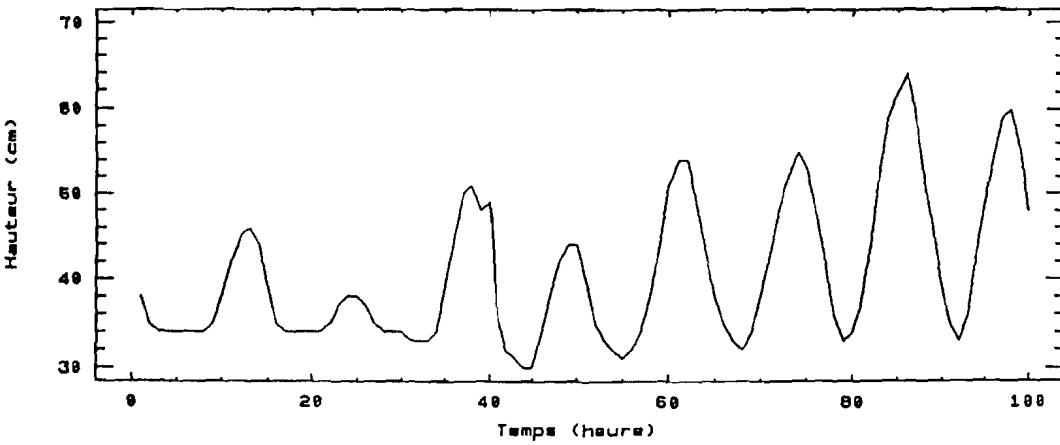
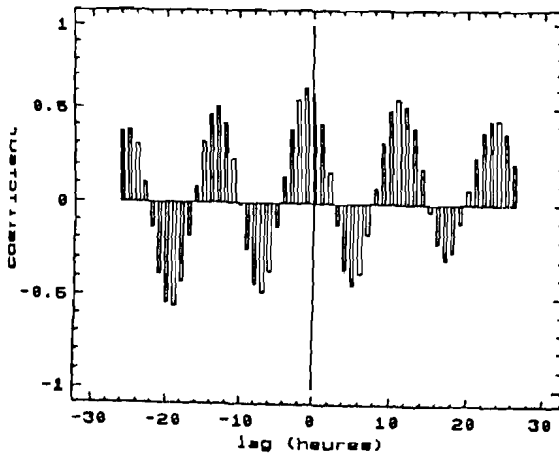


Figure 11.- Corrélation croisée entre le marégramme et la densité intermédiaire



l'estuaire. Cette succession semble liée au terme semi-mensuel du cycle de marée, la série temporelle débutant en morte-eau et se terminant en vive-eau. L'occurrence de la lentille dessalée à Saint-Louis paraît en effet être associée à la période de morte-eau du cycle de marée, c'est à dire aux amplitudes quotidiennes minimum du niveau d'eau.

Nous détaillerons au paragraphe III.3 l'évolution des caractéristiques physiques de la colonne d'eau par le biais du calcul d'un indice de stratification synthétique.

III.2.4 Vitesses et directions des courants

La vitesse du courant pour chaque masse d'eau a été décomposée en deux composantes orthogonales à partir des données enregistrées :

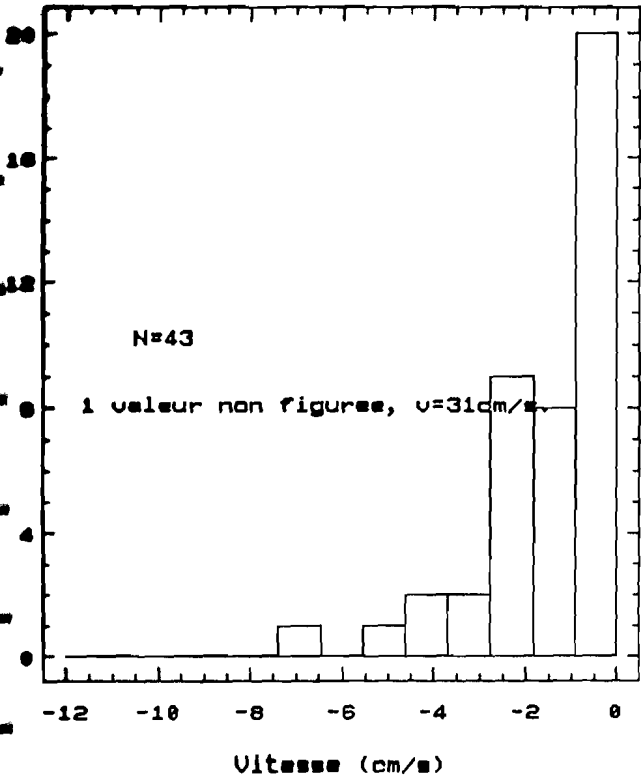
- une composante Est-Ouest qui rend compte des transports latéraux,
- une composante Nord-Sud qui rend compte des écoulements longitudinaux (dans l'axe principal de l'estuaire).

De la composante transversale ...

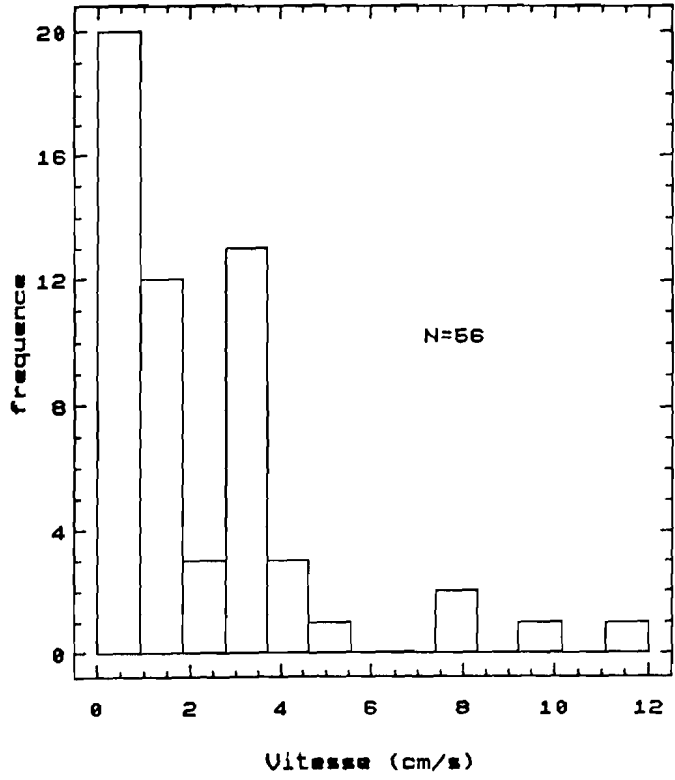
Nous avons représenté sur la figure 12 les histogrammes de fréquence des composantes Est et Ouest des courants de surface et de fond. Les vitesses moyennes sont faibles, légèrement supérieures en surface, généralement orientées vers l'est en surface et vers l'ouest au fond. Aucune tendance ou périodicité n'apparaît pour ces séries et les transports horizontaux qui leur sont associés seront vraisemblablement de faible importance.

Il n'apparaît qu'un seul événement remarquable à la 92^{ème} heure avec un courant de surface significatif (31 cm/s) orienté vers l'ouest, mais éphémère, et dont on ne retrouve pas la trace dans la série des courants enregistrés au fond. L'observation de la série des vents tri-horaires instantanés simultanément mesurés à Saint-Louis (non figurée) n'apporte aucun élément significatif susceptible d'éclairer l'origine de cette advection superficielle.

Courant de surface oriente vers l'OUEST

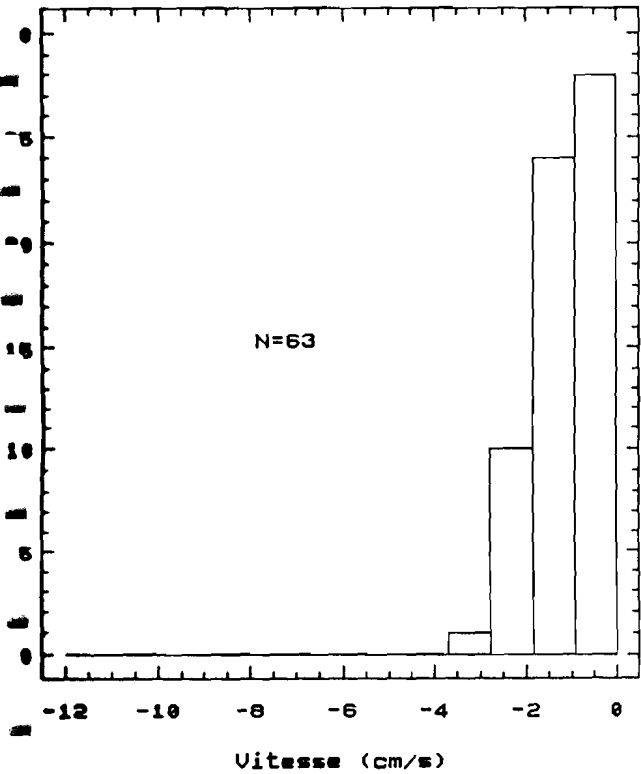


Courant de surface oriente vers l'EST

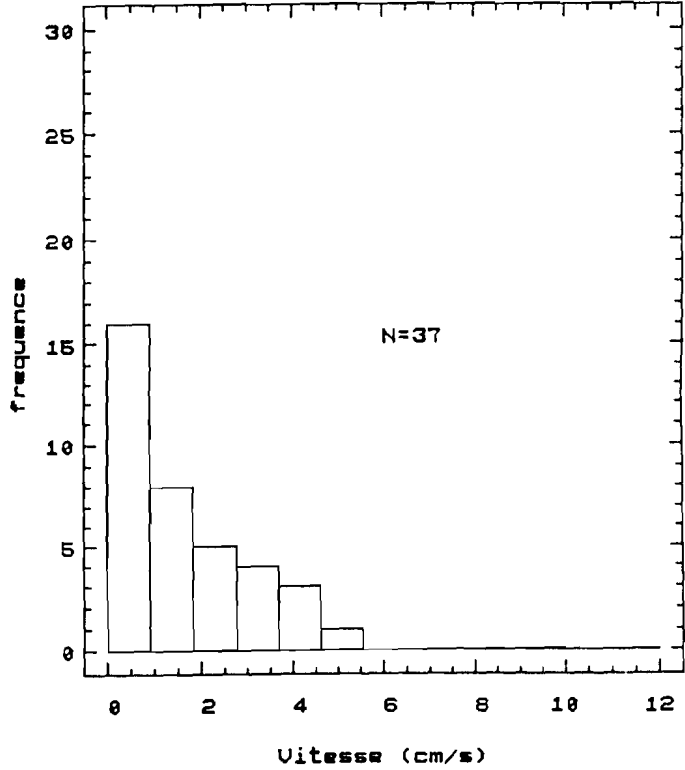


- fig. 12

Courant de fond oriente vers l'OUEST



Courant de fond oriente vers l'EST



De la composante longitudinale ...

Nous avons reproduit (fig. 13) l'évolution temporelle des composantes longitudinales de la vitesse des courants de surface et de fond. Les courants de jusant (orientés vers le sud) sont comptés négativement et les courants de flot (orientés vers le nord) positivement.

La vitesse enregistrée en sub-surface est caractéristique d'un signal de marée semi-diurne à inégalité diurne, avec le deuxième cycle de chaque jour marqué par une amplitude plus faible. Cette série apparaît non stationnaire puisque l'amplitude de ses variations augmente au cours du temps, notamment pour les courants de flot. On observe au début de la série un léger déphasage (1 heure environ) entre le cycle de vitesse de la masse d'eau superficielle et le cycle de marée. Après la 50^{ième} heure, la série des vitesses est remarquablement périodique et régulière, et parfaitement en phase avec le marégramme : les vitesses sont maximales lorsque l'élévation est maximale et elles sont minimales quand l'élévation est minimale.

Les courants associés au jusant sont très réguliers, d'intensité peu variable, statistiquement moins forts que les courants de flot (comparaison des moyennes, $p=0,005$) mais de durée plus importante.

Le signal enregistré au fond apparaît très perturbé. La première moitié de la série est caractérisée par un déficit constant des courants de flot et un déphasage de plusieurs heures par rapport au marégramme. A l'inverse, les trois derniers cycles de la série sont beaucoup plus réguliers, mais avec cependant un léger décalage par rapport au marégramme.

Les courants associés au jusant sont statistiquement plus faibles que les courants de flot (comparaison des moyennes, $p=0,0025$) et de durée moins importante. On n'observe pas d'inégalité diurne.

Les courants de surface sont en moyenne plus forts que les courants de fond, parfois déphasés, voire même opposés. Nous avons reproduit sur la figure 14 l'évolution temporelle de l'écart des composantes nord des vitesses enregistrées en surface et au fond en regard du marégramme. Ces deux signaux évoluent presque en phase et de façon synchrone, et les écarts de vitesse sont maxima à proximité des étales de marée haute et de marée basse. On observe toutefois une irrégularité croissante au cours du temps de l'écart entre les vitesses; en particulier lors des

Figure 13. - Composante Nord des courants enregistrés en surface et au fond

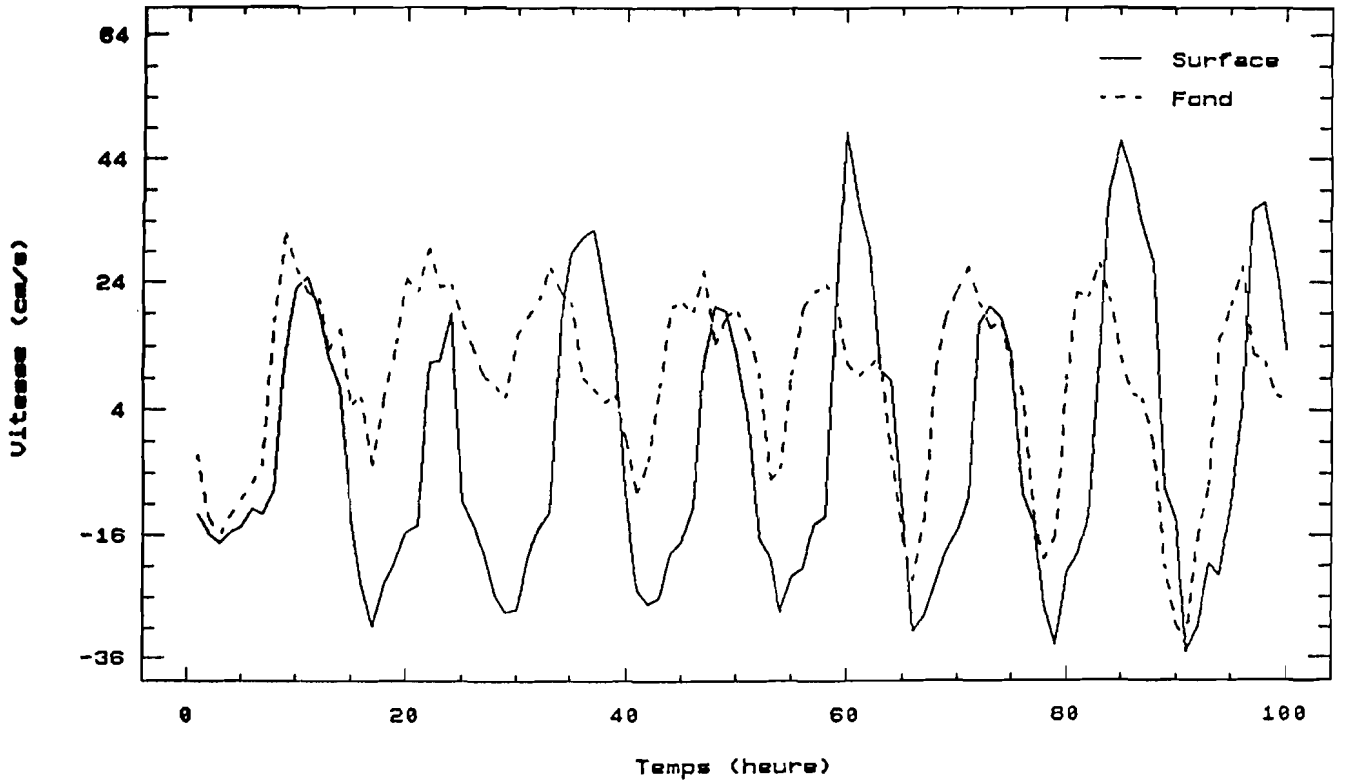
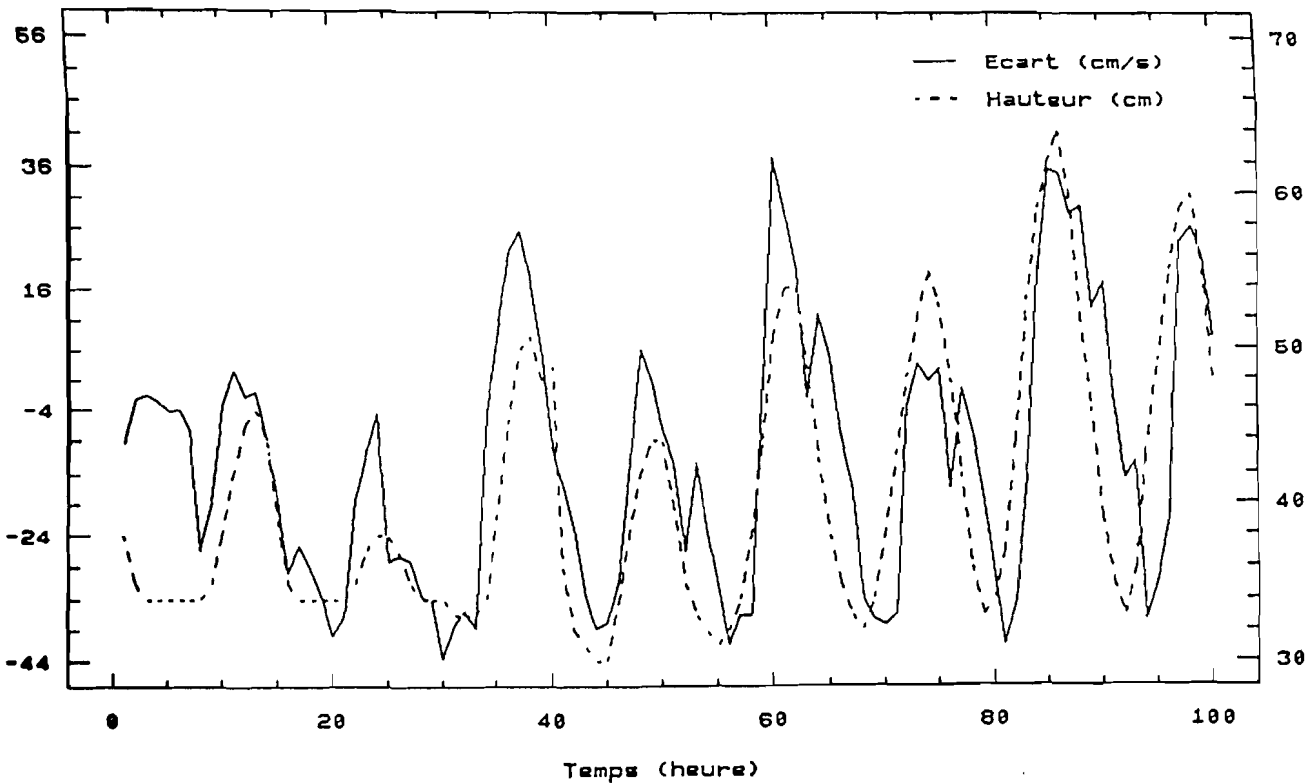


Figure 14.- Ecart des composantes Nord des vitesses de surface et de fond et marégramme



phases de flot ($\Delta v > 0$) avec deux pics par maximum décalés de quatre heures environ. Les écoulements de ces masses d'eau superposées et indépendantes apparaissent ainsi tous deux intimement liés au cycle de marée. Leur antagonisme est générateur de courants de cisaillement ("shear flow") violents et périodiques qui vont significativement influencer sur la stabilité de la colonne d'eau.

III.3 Calcul d'un indice de stratification

Le niveau de stratification de la colonne d'eau est une donnée cruciale du fait de son importance dans le contrôle de l'intensité des mélanges verticaux, et donc des flux verticaux et des échanges de propriétés entre masses d'eau (chaleur, sel, moment, organismes, nutriments ...). En bloquant les déplacements verticaux, la stratification influe également sur le degré d'exposition des algues à la lumière (durée et position du séjour dans la couche euphotique).

Dans un fluide stratifié et en mouvement, la mesure directe du mélange vertical doit tenir compte de l'effet stabilisateur des gradients de densité et des turbulences générées mécaniquement par les marées et par le vent. Ce concept, développé en météorologie par Richardson, a été introduit en océanographie estuarienne par Bowden (1963), et sa formulation physique, le nombre de Richardson, a été ensuite utilisé avec succès par Ganf (1974), pour expliquer les variations journalières de la distribution du phytoplancton dans un lac équatorial peu profond.

Le nombre de Richardson (Ri) a donc été calculé à partir des données enregistrées en sub-surface et au fond selon :

$$Ri = \frac{\frac{g}{\rho} \cdot \frac{\delta\rho}{\delta z}}{\frac{(\delta V)^2}{(\delta z)^2}}$$

avec g : accélération de la pesanteur,
 ρ : densité de l'eau,
 $(\delta\rho/\delta z)$: gradient vertical de densité,
 $(\delta V/\delta z)$: gradient vertical de vitesse du courant.

L'expression çï-dessus a été formulée, selon Fortier et Legendre (1979), de façon à tenir compte du degré de stratification du fluide imposé par le gradient de densité, et de l'importance de la turbulence générée à l'interface des couches se déplaçant à des vitesses et/ou suivant des orientations différentes. Soit :

$$Ri_C = \frac{\frac{g}{\rho_m} \cdot \frac{\Delta\rho}{\Delta z}}{\frac{(\Delta u)^2}{(\Delta z)^2} + \frac{(\Delta v)^2}{(\Delta z)^2}}$$

avec g : accélération de la pesanteur (981 cm.s^{-2}),
 ρ_m : densité moyenne de la colonne d'eau,
 $\Delta\rho$: différence de densité entre les deux profondeurs,
 Δz : différence de profondeur (500 cm),
 Δu : différence entre les composantes Est-Ouest des vitesses aux deux profondeurs (cm.s^{-1}),
 Δv : différence entre les composantes Nord-Sud des vitesses aux deux profondeurs (cm.s^{-1}).

Une augmentation de Ri_C correspond à une augmentation de la stabilité alors que des valeurs faibles signifient un accroissement potentiel du mélange vertical.

Nous avons reproduit (fig. 15) l'évolution temporelle du nombre de Richardson ainsi calculé. Ri_C oscille entre une série de valeurs négatives au début de la campagne qui traduisent une densité supérieure de la lame d'eau superficielle par rapport aux eaux du fond du chenal, et des valeurs supérieures à 100 qui expriment une très forte tendance à la stratification. L'histogramme de distribution des valeurs prises par Ri_C (fig. 16) montre toutefois qu'en moyenne la colonne d'eau est soumise à des conditions de mélange intense, avec l'apparition d'éphémères phases durant lesquelles la colonne d'eau apparaît temporairement stratifiée.

Tel que nous l'avons calculé, Ri_C représente le rapport entre le travail de flottabilité (fonction du gradient vertical de densité), que tend à réduire le brassage vertical, et le travail de cisaillement ("shear" ; fonction du gradient vertical de vitesse), qui tend au contraire à augmenter le brassage vertical.

Une analyse simple des différents termes qui interviennent dans le calcul de Ri_C montre que :

- 1. $A = g/\rho_m$: ce facteur évolue peu au cours de la campagne (962,5-966,5), et peut être considéré comme constant.

- 2. $B = \Delta\rho/\Delta z$: l'histogramme de distribution de cette variable (fig. 17) fait apparaître deux modes distincts :

- un groupe de 18 valeurs pour $B < 6.10^{-6}$, soit $\Delta\rho < 0,003$. Ce mode est constitué des 15 premiers points de la série qui ont été enregistrés avant que l'onde de crue artificielle n'atteigne Saint-Louis : la station était alors sous l'unique influence de l'onde de marée. Le maintien de densités supérieures en surface par rapport au fond suggère toutefois la rémanence d'une certaine stabilité de la colonne d'eau. Les 3 autres points de ce premier mode correspondent aux "trous" de salinité observés sur la série de salinité calculée à partir des valeurs enregistrées au fond. L'écart de densité est alors minimum du fait de l'occupation de toute la colonne d'eau par la masse d'eau déssalée d'origine continentale lors des phases d'étale de marée basse à la reprise des marées de vive-eau.

Le second mode est constitué de l'ensemble des points enregistrés lors de l'occurrence simultanée des deux masses d'eau à Saint-Louis.

Nous verrons çï-dessous que la distinction de ces deux modes permet l'identification de mécanismes différents dans le contrôle de la stabilité de la colonne d'eau.

- 3. $C = (\Delta u)^2 + (\Delta v)^2 / (\Delta z)^2$: cette variable est la véritable variable de forçage du nombre de Richardson, en particulier quand le gradient de densité est fort. L'influence de cette variable a été estimée au moyen de régressions linéaires du type $Ri_C = a + b(1/C)$ en considérant différents regroupements (d'effectifs "n") parmi les points enregistrés.

$n = 100$; $R^2 = 79,42$ (ensemble des valeurs) : forçage de la régression par une valeur très élevée de Ri_C ($Ri_C = 3259,6$ à la 74^{ième} heure).

$n = 99$; $R^2 = 8,12$ ($Ri_C < 3000$) : forte dispersion des points avec deux tendances distinctes apparentes sur le graphique (non figuré).

Figure 15. - Indice de stratification. Nombre de Richardson

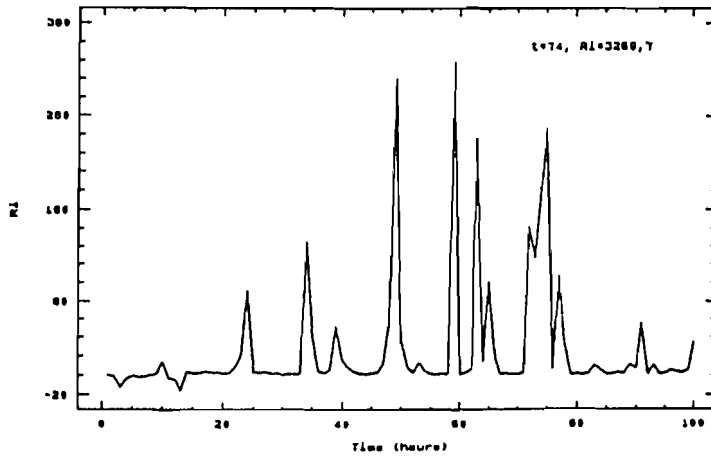


Figure 16.- Histogramme de fréquence de distribution du nombre de Richardson

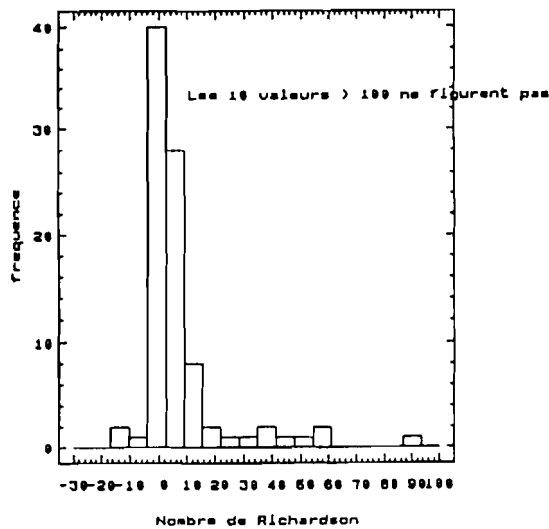
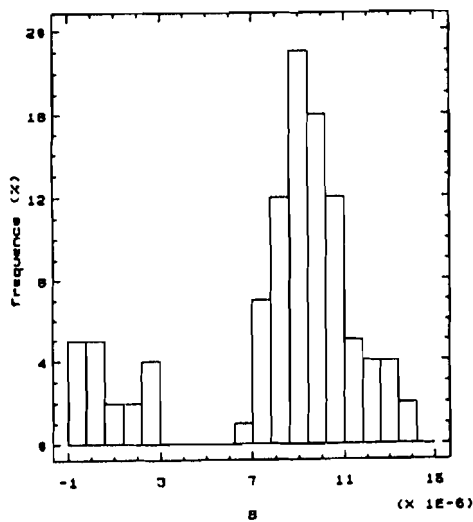


Figure 17.- Histogramme de distribution des valeurs de la variable B



$n=82$; $R^2=99,95$ ($B > 6.10^{-6}$) : on ne considère là que les situations pour lesquelles le gradient de densité est "élevé". L'évolution de la stabilité de la colonne d'eau n'est liée qu'au gradient vertical de vitesse.

$n=72$; $R^2=96,99$ ($B > 6.10^{-6}, Ri_C < 100$) : même résultat que précédemment. Cette régression traduit bien l'influence physique significative qu'exerce le gradient de vitesse, en s'affranchissant des biais que pourraient causer les fortes valeurs de Ri_C .

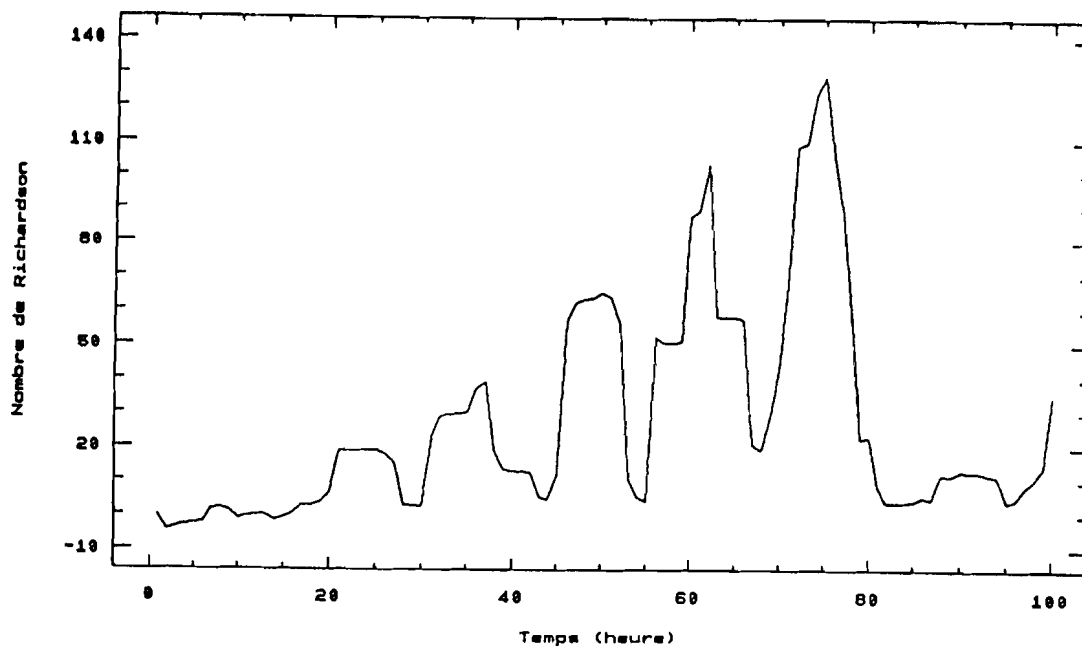
$n=18$; $R^2=54,28$ ($B > 6.10^{-6}$) : quand le gradient de densité est faible, on voit que Ri_C n'est expliqué qu'à environ 50% par le gradient de vitesse, et donc aussi à environ 50% par le gradient de densité.

Cette analyse sommaire permet de mettre en exergue les bases d'une typologie pour la description des caractéristiques physiques de la colonne d'eau. En effet, le front généré par la superposition de masses d'eau de qualité et d'origine différentes perturbe la dynamique estuarienne en jouant principalement sur les caractéristiques de leurs écoulements. Le synchronisme ou le déphasage entre l'onde de marée et l'onde de crue fluviale, en générant des gradients de vitesses de forte intensité, sera ainsi le principal moteur de la stabilité verticale. A l'inverse, lorsque le gradient de densité est faible, et quelle que soit l'origine de la masse d'eau en présence, le gradient de vitesse et le gradient de densité interviendront de façon antagoniste, mais simultanée, sur les valeurs de Ri_C .

Dans les conditions de la campagne que nous décrivons ici, l'occurrence simultanée des deux masses d'eau à la station de Saint-Louis est liée à l'importance des volumes déplacés sous l'effet des oscillations de la marée. En particulier, en période de vive-eau, la station sera successivement et plus ou moins homogènement investie par des eaux de qualité très différentes. On peut donc s'attendre à retrouver dans la série des valeurs de Ri_C une périodicité compatible avec celle du rythme d'alternance de ces masses d'eau.

Nous avons reproduit sur la figure 18, l'évolution de Ri_C après lissage de la série à l'aide d'une moyenne mobile à 7 termes (moyenne calculée pour chaque point en faisant intervenir les trois points immédiatement précédents et immédiatement suivants), ce qui permet de masquer la variabilité à très court terme de cette variable. La périodicité de cette variable imposée par le cycle de marée est ainsi clairement

Figure 18. - Evolution temporelle du nombre de Richardson après lissage (moyenne mobile à 7 termes)



décrite, et l'on constate que ce signal est synchrone à l'évolution du signal marégraphique.

Le périodogramme associé (fig. 19) est en ce sens révélateur avec :

- un pic de très basse fréquence (0,01 cycle/heure) imposé par la non-stationnarité de la série,

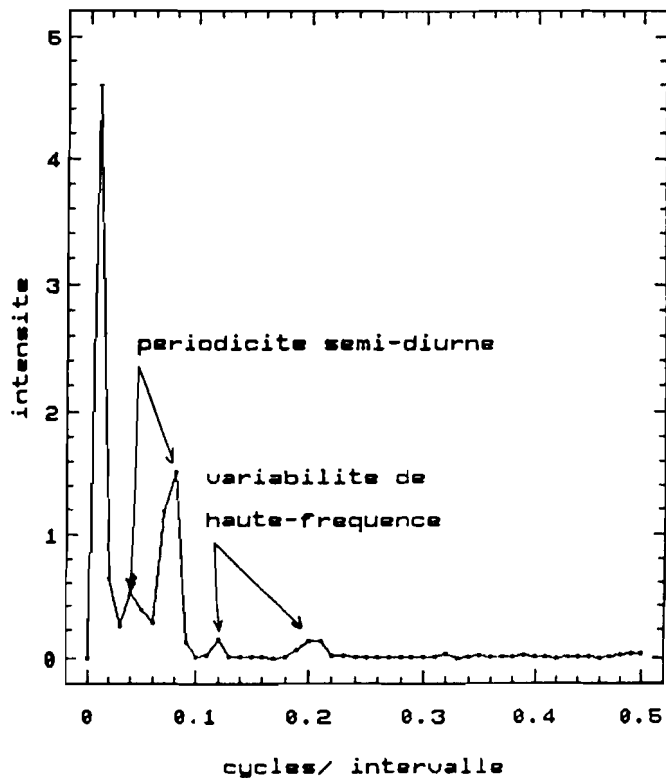
- un pic de forte intensité pour une fréquence de 0,08 cycle/heure (période de 12,5 heure), dont on retrouve un écho sous forme d'un pic moins important à la fréquence 0,04 (période = 25 heures). Il s'agit bien là de la variabilité associée à la périodicité semi-diurne du cycle de marée.

- un pic de faible intensité pour une fréquence de 0,12 cycle/heure, soit une période d'environ 8,3 heure, que nous attribuerons aux irrégularités, notamment lors des phases de flot, observées dans l'évolution de Ri_C et qui ne sont que partiellement masquées par le lissage.

Cette analyse de l'évolution du nombre de Richardson montre que la stabilité de la colonne d'eau est sous l'étroite dépendance du cycle de marée, et principalement forcée par l'antagonisme des écoulements des masses d'eau en présence lors de cette campagne. Le lissage effectué permet en effet de mettre en évidence la synchronicité de la série de Ri_C et du marégramme.

Figure 19. - Périodogramme associé à la série N de Richardson après lissage
(7 termes)

(X 10000)



On observe toutefois :

- d'une part, une variabilité à court terme dans l'évolution des valeurs de Ri_C qui se superpose à la périodicité semi-diurne et qui est forcée par le déphasage qui existe entre les écoulements des deux masses d'eau, notamment lors du flot,

- d'autre part, un changement dans la périodicité de Ri_C en fin de la série, qui se produit simultanément à la reprise d'une phase de marées de vive-eau. Il faudra donc vraisemblablement s'attendre à retrouver lors de l'analyse à plus long terme des caractéristiques physiques de la colonne d'eau, l'émergence d'une variabilité liée à la périodicité semi-mensuelle du signal de marée, ce que Rochette (1964) avait déjà signalé à propos de l'évolution temporelle de l'intrusion saline dans l'estuaire avant l'édification du barrage de Diama.

Notons enfin que ces observations, effectuées consécutivement à l'arrivée d'un flux d'origine continental à Saint-Louis, ne permettent aucunement d'appréhender la dynamique temporelle de la stratification de la colonne d'eau lorsque l'estuaire est sous l'unique influence marine.

III.4. Conditions de milieu

Nous décrivons dans ce paragraphe les traits généraux des variables du milieu (sels nutritifs et turbidité) dont l'influence sur la dynamique phytoplanctonique est classiquement reconnue.

III.4.1. Sels nutritifs

Lors de chaque prise d'eau (voire paragraphe II), des filtrations ont été faites pour le dosage ultérieur de la chlorophylle, et une partie du filtrat a été recueillie et conservée pour le dosage des nutriments. Les phosphates réactifs dissous, les silicates réactifs dissous ainsi que les nitrates ont ainsi été dosés pour chaque échantillon.

III.4.1.1 Phosphates

Aucune des analyses effectuées n'a mis en évidence de concentration significative de cet élément. Les résultats obtenus étaient invariablement inférieurs à la précision analytique de la méthode utilisée. La concentration en phosphates réactifs dissous est ainsi restée durant toute la durée de la campagne, et quelle que soit la profondeur d'origine de l'échantillon analysé, inférieure à $0,2 \mu\text{atg/l}$ de P-PO_4 .

III.4.1.2 Silicates

Nous avons représenté sur les figures 20 et 21, l'évolution des silicates dosés et de la salinité mesurée lors de chaque prélèvement aux différentes profondeurs. On observe que la concentration en silicates dans les eaux de surface décroît au rythme de la salinisation de cette masse d'eau, alors que la concentration en silicates reste constante au fond. La concentration de cet élément dans les échantillons provenant

Figure 20. - Evolution temporelle des silicates

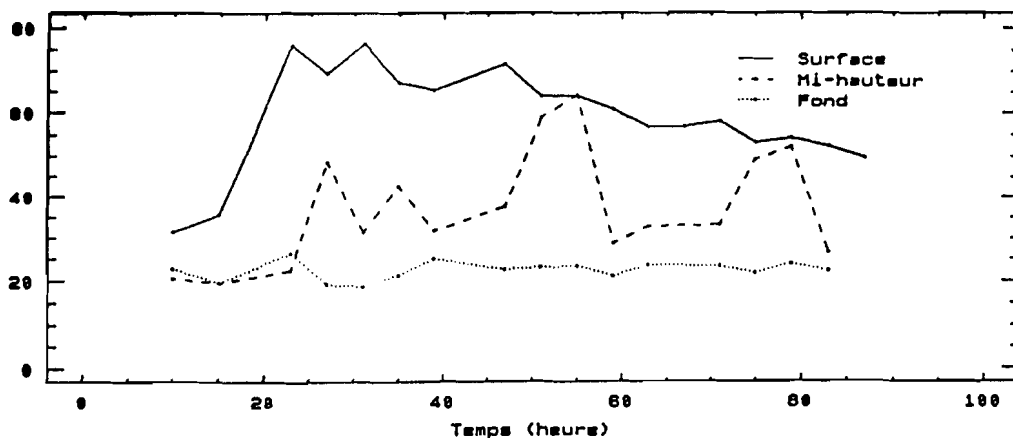
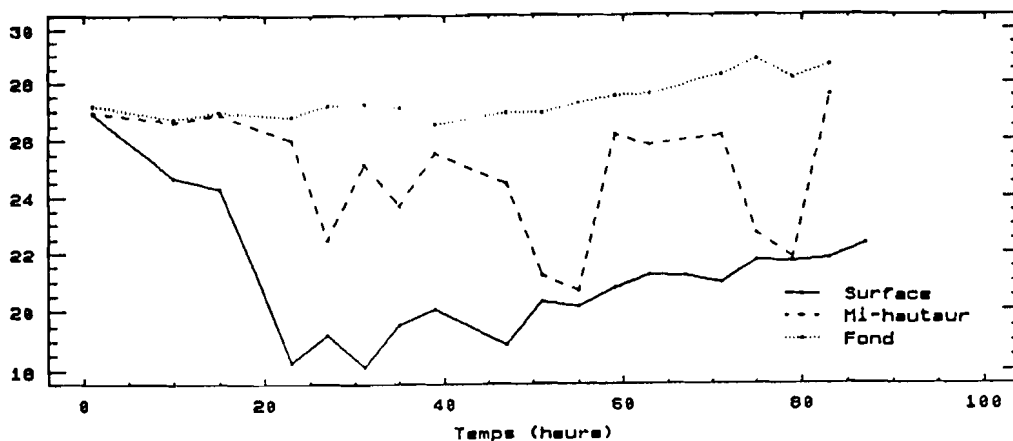


Figure 21. Salinités mesurées



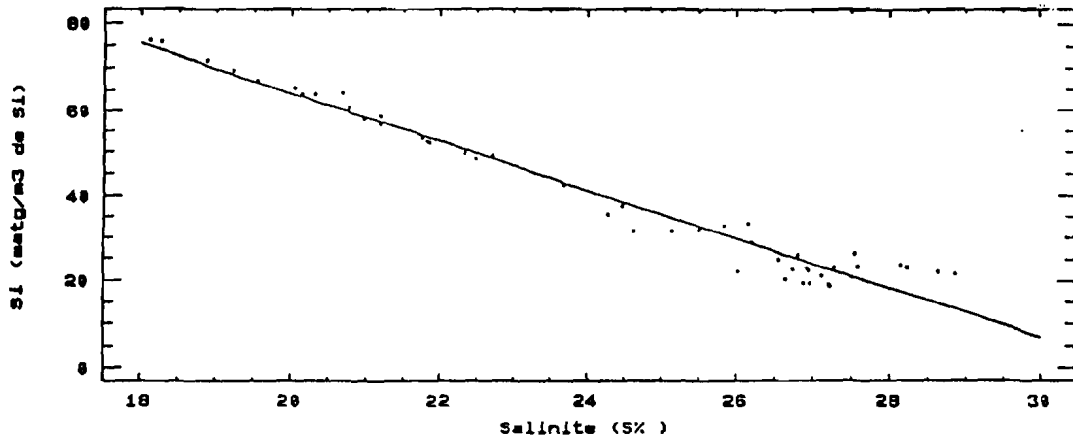
du milieu de la colonne d'eau évolue entre les concentrations observées en surface et au fond au rythme de l'évolution de la salinité, traçant ainsi "chimiquement" la succession des masses d'eau à cette station.

Une régression linéaire hautement significative entre la concentration en silicates et la salinité mesurée a été établie (fig. 22) telle que :

$$\text{Si } (\mu\text{atg.l}^{-1} \text{ de Si}) = 178,3 - 5,72 \cdot S (\%),$$

$$R^2 = 96,67.$$

Figure 22. - Régression (Si vs Salinité mesurée)



Notons qu'une telle relation entre Si et les salinités enregistrées seraient beaucoup plus confuse, en raison des hiatus observés entre les séries des salinités mesurées et enregistrées aux différentes profondeurs.

On remarque toutefois que les concentrations en silicates, les plus faibles rencontrées sont de l'ordre de $20 \mu\text{atg.l}^{-1}$ de Si, ce qui tend à suggérer que cet élément n'était pas limitant pour la croissance du phytoplancton.

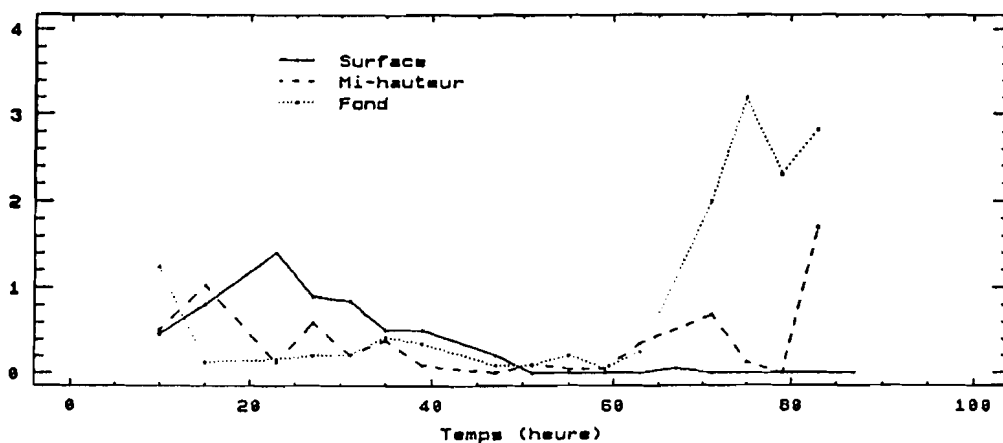
III.4.1.3 Nitrates

Nous avons reproduit (fig. 23) l'évolution temporelle de la concentration en nitrates aux différentes profondeurs.

L'effet de l'arrivée de l'onde de crue artificielle à Saint-Louis se traduit par une augmentation de cette concentration dans les eaux superficielles. Ensuite, la teneur en nitrates diminue régulièrement au gré de la salinisation de cette masse d'eau jusqu'à la 50^{ième} heure, à partir de laquelle les résultats des dosages étaient inférieurs à la précision analytique ($< 0,1 \mu\text{atg.l}^{-1}$ de N-NO_3).

La situation est plus complexe pour les concentrations mesurées au bas de la colonne d'eau. Après une légère diminution observée au tout début de la campagne, les valeurs demeurent faibles et peu variables durant les deux premiers tiers du suivi,

Figure 23. - Evolution des teneurs en nitrates



puis l'on observe une brusque et significative augmentation de la teneur en nitrates à partir de la 60^{ième} heure. Rappelons que la fin de cette campagne est caractérisée par la reprise de courants de jusant significatifs pour la masse d'eau profonde, liés à l'entrée dans une phase de marée de vive-eau. Nous admettrons en première approximation que cette augmentation de la concentration en sels azotés dans la masse d'eau profonde est une conséquence directe de l'augmentation d'intensité de ces courants violents qui seront à même de remanier significativement les dépôts sédimentaires du fond du chenal, et de générer ainsi des relarguages de sels nutritifs dans la masse d'eau.

Les concentrations mesurées dans les échantillons prélevés au milieu de la colonne d'eau sont intermédiaires entre les concentrations observées en surface et au fond, ce qui traduit l'existence de phénomènes de diffusion des sels azotés entre les masses d'eau en présence. Une analyse de ces échanges s'avère toutefois délicate à partir des données décrites ici du fait de l'imprécision relative à la localisation de la pycnocline et au positionnement du point d'échantillonnage par rapport à cette pycnocline.

III.4.2 Turbidité

La turbidité a été mesurée au moyen de l'estimation de la charge particulaire en suspension, et de la mesure de la profondeur de disparition d'un disque de Secchi. Nous ne présenterons pas de résultats relatifs à cette dernière mesure du fait du faible nombre de valeurs obtenu qui rend hasardeuse toute interprétation .

Nous retiendrons cependant que cette profondeur de disparition varie entre 1,7 et 2,2 mètres. Si l'on admet une relation du type $K_d = 1,44/Z_{DS}$ (Holmes 1970), avec K_d : coefficient d'atténuation verticale de la lumière descendante dans la gamme 400-700 nm, et

Z_{DS} : profondeur de disparition du disque de Secchi, alors, l'épaisseur de la couche euphotique (tranche d'eau dont l'éclairement varie de 100 à 1% de la lumière incidente descendante), qui est calculée selon $Z_{EU} = -\ln(0,01)/K_d$, varie entre 5,4 et 7 mètres.

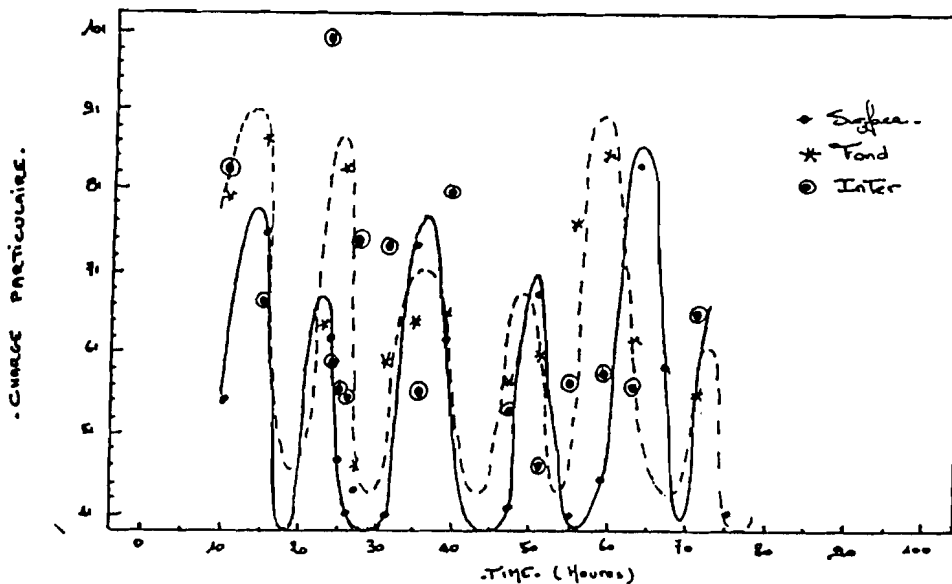
On voit donc qu'entre 50 et 70% de la colonne d'eau sont soumis à un éclairement potentiellement utilisable par les algues. Cela signifie :

- d'une part, que lorsque la colonne d'eau est fortement stratifiée, les cellules phytoplanctoniques piégées dans la masse d'eau profonde ne sont pas dans des conditions d'éclairement leur permettant de se développer convenablement,

- et d'autre part, que lorsque la colonne d'eau est soumise à une forte turbulence susceptible de transporter verticalement le phytoplancton à travers toute la colonne d'eau, les algues sont soumises à un régime lumineux périodique. Le temps de séjour relatif des algues respectivement au dessus et au dessous de cette profondeur critique qu'est la limite inférieure de la zone euphotique conditionnera alors leur réussite.

Les résultats relatifs à la charge particulaire en suspension sont présentés sur la figure 24. L'ajustement des cycles qui y figurent a été fait empiriquement, sous couvert de l'hypothèse que la variabilité de la teneur en MES est contrôlée par une fonction périodique liée au cycle de marée.

Figure 24. - Evolution de la charge particulaire en MES.
(en mg/l)



Les résultats obtenus en surface tendent ainsi à suggérer que la quantité de matière en suspension augmente lors des phases de flot, de la même façon que nous l'avions déjà observé pour la salinité. Cette augmentation est une illustration de l'échanges des propriétés entre les masses d'eau en présence, et peut être attribuée soit à une réelle importation de MES depuis la masse d'eau profonde jusqu'à la lentille déssalée superficielle, soit à des phénomènes de floculation au sein de cette masse d'eau superficielle sous l'effet de sa progressive -et cyclique -salinisation. On observe une inégalité diurne caractéristique qui légitime l'hypothèse du contrôle de la teneur en MES par des processus hydrodynamiques liés directement à l'amplitude du cycle de marée.

Les résultats provenant des échantillons récoltés au bas de la colonne d'eau sont de nature analogue, avec une périodicité du même type superposable aux données. L'inégalité diurne observée en surface n'apparaît cependant pas. Les valeurs observées au fond sont en moyenne plus forte qu'en surface, ce qui tend à suggérer que les MES ne sont pas d'origine continentale, mais plutôt originaires du fond.

Aucune périodicité n'apparaît pour la série des MES mesurées sur les échantillons provenant du milieu de la colonne d'eau. La situation y est confuse, et il est fréquent que la charge particulaire au milieu de la colonne d'eau soit plus élevée qu'en surface et au fond, ce qui tend à suggérer que ces MES se forment -ou se concentrent - sur le front généré à l'interface des deux masses d'eau.

III.5 Biomasse phytoplanctonique

Nous avons reproduit sur la figure 25 l'évolution temporelle de la biomasse phytoplanctonique mesurée par le dosage de la teneur en chlorophylle (non corrigée des phaéopigments) aux différentes profondeurs.

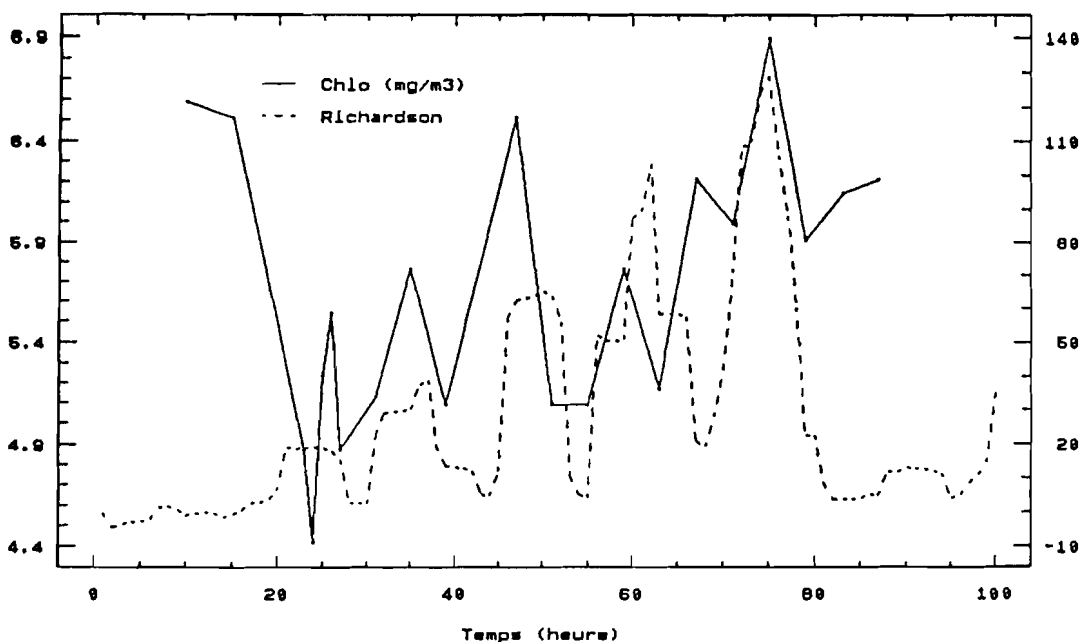
On constate que les valeurs les plus élevées ont été obtenues à partir des échantillons récoltés au bas de la colonne d'eau, où l'on observe une évolution non monotone mais croissante de la biomasse phytoplanctonique. En sub-surface, la concentration en chlorophylle demeure faible et peu variable sans qu'aucune tendance nette n'apparaîsse. Les concentrations mesurées dans les échantillons qui provenaient du milieu de la colonne d'eau oscillent, semble-t-il périodiquement, entre les valeurs obtenues simultanément au fond et en surface, tout en étant cependant occasionnellement supérieures aux valeurs du fond. De telles situations tendent à suggérer que les algues situées à proximité de l'interface entre les deux masses d'eau superposées peuvent bénéficier d'une part d'un éclaircissement suffisant puisqu'elles se trouvent toujours dans la zone euphotique, et d'autre part des flux de sels nutritifs (azotés notamment) en provenance du bas de la colonne d'eau.

L'ajustement d'une régression linéaire sur l'ensemble des valeurs entre la concentration en chlorophylle et la salinité mesurée au moment de la récolte de chacun des échantillons dosés (non figurée) montre que plus de 75% de la variance de la teneur en pigments chlorophylliens peut ainsi être expliquée. Ceci ne signifie pas que la salinité est forcément la variable la plus pertinente pour expliquer les variations de la biomasse chlorophyllienne ; cela signifie tout au plus que les biomasses les plus élevées se rencontrent dans les eaux les plus salées, et inversement.

Ceci est illustré sur les figures 26 et 27 où nous avons représenté l'évolution simultanée de la chlorophylle dosée et de la salinité mesurée pour les échantillons provenant du bas et du milieu de la colonne d'eau. La covariation entre les deux variables est manifeste, notamment pour les prélèvements intermédiaires, ce qui montre bien que la salinité n'explique pas la teneur en chlorophylle mais identifie l'origine de la masse d'eau échantillonnée. Ces figures ne représentent pas une évolution sensu-stricto, mais elles témoignent "biologiquement" de la succession des masses d'eau en présence dans l'estuaire et dont l'importance relative le long d'une verticale évolue au rythme des oscillations du plan d'eau.

L'analyse des résultats obtenus à partir des échantillons collectés en sub-surface est plus confuse. Les variations de salinité expliquent moins de 40% de la

Figure 28. - Evolution temporelle de la chlorophylle en surface.
et du nombre de Richardson lissé.



augmentation de la biomasse présente sous l'effet d'une stimulation provoquée par l'apport de nutriments originaires du fond lors des phases de mélange, soit d'une advection verticale de cellules phytoplanctoniques normalement piégées au bas de la colonne d'eau. Les résultats relatifs à la dynamique des peuplements de phytoplancton, non présentés ici, permettront de répondre à cette question.

La relative variabilité dans l'analogie du comportement de ces variables est due pour partie au pas (temporel) adopté pour le prélèvement des échantillons. En effet, un échantillon fut collecté toutes les quatre heures, alors que l'alternance des stabilisations et déstabilisations de la colonne d'eau intervient à plus court pas de temps (la confrontation des teneurs en chlorophylle et de la série brute de Ri n'est que peu explicative). Il faut d'autre part remarquer que, malgré l'aspect transitoire de la variabilité de la stabilité verticale de la colonne d'eau, on observe une réponse du phytoplancton à ce type de stimulation, ce qui est signe d'une certaine vigueur adaptative.

Nous ne présentons pas ici d'argument statistique pour la justification de la dépendance de la biomasse phytoplanctonique à l'alternance périodique de phases de stabilité et d'instabilité de la colonne d'eau, ces résultats sont en effet à l'heure actuelle en cours d'exploitation. Les premières observations indiquent cependant la nécessité d'une analyse poussée des réponses du phytoplancton à ce type de perturbation qui intervient à haute fréquence.

Figure 25. - Evolution temporelle de la teneur en chlorophylle.

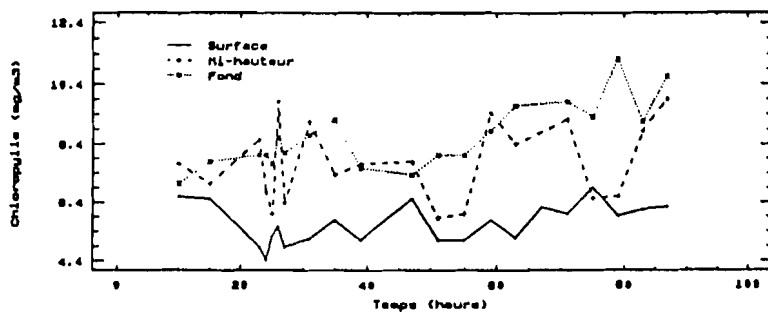


Figure 26. - Chlorophylle et salinité mesurées (échantillons de fond)

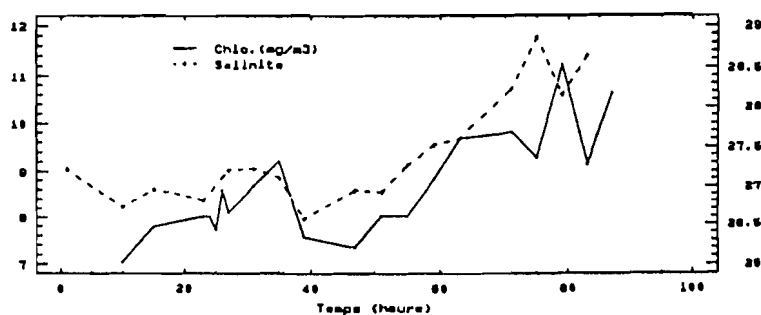
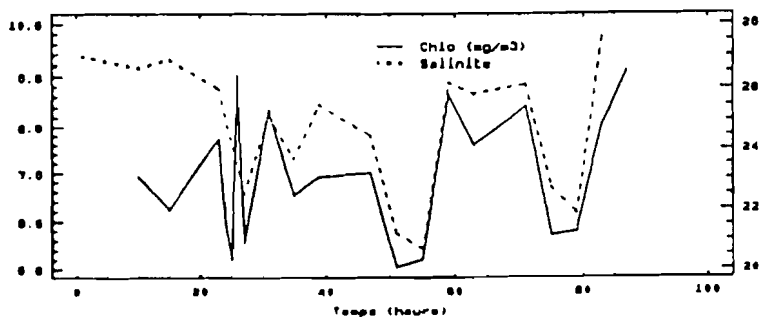


Figure 27. - Chlorophylle et salinités mesurées à mi-profondeur



variance de la teneur en chlorophylle, ce qui est logique dans la mesure où c'est toujours la même masse d'eau qui fut échantillonnée. Nous avons superposé aux variations de la chlorophylle, la série lissée (moyenne mobile à 7 termes) du nombre de Richardson précédemment décrit (fig. 28). Il apparaît une certaine analogie dans l'évolution de ces variables avec des "pics" de chlorophylle plus ou moins simultanés aux pics de Ri_C , soit une augmentation de la biomasse chlorophyllienne lors des phases de stratification de la colonne d'eau consécutives à des phases d'intenses turbulences verticales. Cette augmentation peut être la conséquence soit d'une

CONCLUSION

Ce document décrit les premiers résultats issus de l'exploitation des informations acquises lors de la première des deux campagnes couplées "hydrodynamique-phytoplancton". Rappelons que l'objectif en est l'appréhension de la variabilité à court terme des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques en vigueur dans l'estuaire du fleuve Sénégal, sous l'influence du cycle de marée d'une part, et sous l'influence d'un flux d'eau continental d'autre part.

Ces résultats préliminaires mettent en exergue une importante variabilité à court pas de temps (variabilité semi-diurne) imputable directement à la stabilité de la colonne d'eau. L'alternance de stratification et de déstratification de la colonne d'eau apparaît fortement contrôlée par le gradient vertical des composantes Nord des vitesses des écoulements. Ce gradient est lui même fonction de la nature des masses d'eau en présence, et, en ce sens, l'occurrence simultanée d'eau estuarienne (salée) profonde, et d'eau continentale (désalée) en surface va fortement perturber l'évolution temporelle de ce gradient. L'importance relative le long d'une verticale des diverses masses d'eau étant fonction des volumes déplacés dans l'estuaire, il faudra donc s'attendre à l'occurrence d'une forte variabilité semi-mensuelle liée à l'évolution périodique suivant cette fréquence de l'amplitude du signal de marée.

Notons enfin que ces divers résultats ne préjugent en rien de la dynamique temporelle à court terme de l'hydro-bio-climat lorsque l'estuaire est sous l'unique influence marine.

BIBLIOGRAPHIE

- Bowden K.F., (1963). - The mixing processes in a tidal estuary. *Int. J. Air Water Pollut.*, 7: 343-356.
- Bowden K.F., (1983). - Physical oceanography of coastal waters. Ellis Horwood series in Marine Science, Ellis Horwood.
- Demers S., L. Legendre, & J.C. Therriault, (1986). - Phytoplankton responses to vertical tidal mixing, p. 1-40. In M.J. Bowman, C.M. Yentsch & W.T. Peterson [Eds.], Tidal mixing and Plankton dynamics. *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*, 17. Springer-Verlag.
- Fortier L, & L. Legendre, (1979). - Le contrôle de la variabilité à court terme du phytoplancton estuarien : stabilité verticale et profondeur critique. *J. Fish. Res. Board Can.*, 36: 1325-1335.
- Gac J.Y., M. Carn, & J.L. Saos, (1986a). - L'invasion marine dans la Basse Vallées du Fleuve Sénégal : I. - période 1903-1980. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 19(1): 3-17.
- Gac J.Y., M. Carn, & J.L. Saos, (1986b). - L'invasion marine dans la Basse Vallées du Fleuve Sénégal : I. - période 1980-1983, proposition d'un nouveau modèle d'intrusion des eaux océaniques. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 19(2): 93-108.
- Ganf G.G., (1974). - Diurnal mixing and the vertical distribution of phytoplankton in a shallow aquatorial lake (Lake George, Uganda). *J. Ecol.*, 62: 611-629.
- Golterman H.L., R.S. Clymo, & M.A.M. Ohnstad, (1978). - Methods for physical and chemical analysis of fresh waters (Second edition). *IBP Handbook n° 8*. Blackwell Scientific Publications. 213 p.
- Holm-Hansen O., & B. Riemann, (1978). - Chlorophyll a determination : improvements in methodology. *Oikos*, 30: 438-447.
- Holmes R.W., (1970). - The Secchi disk in turbid coastal waters. *Limnol. Oceanogr.*, 15: 688-694.

- Kane A., (1985). - Le bassin du fleuve Sénégal à l'embouchure. Flux continentaux dissous et particulaires. Invasion marine. Thèse de doctorat de géographie physique, Nancy, 205 p.
- Legendre L., (1981). - Hydrodynamic control of marine phytoplankton production : the paradox of stability. p. 191-207. *In* : J.C.J. Nihoul [Ed.], *Ecohydrodynamics*. Elsevier.
- Legendre L., & S. Demers, (1984). - Towards dynamic biological oceanography and limnology. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 41: 2-19.
- Margalef R., (1978). - Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanologica acta*, 1: 493-509.
- Owen R.W., (1989). - Microscale and finescale variations of small plankton in coastal and pelagic environment. *J. Mar. Res.*, 47: 197-240.
- Pagès J., & F. Gadel, (1990). - Dissolved organic matter and UV absorption in a hyperhaline estuary. *The science of the total environment*, 99: 173-204.
- Reid F.M.H., (1983). - Biomass estimation of components of the marine nanoplankton and picoplankton by the Uthermöhl settling technique. *J. Plankton Res.*, 5(2): 235-252.
- Rochette C., (1964). - Remontée des eaux marines dans le fleuve Sénégal. *Rapport multigr.* ORSTOM, Dakar, 81p.
- Rochette C., (1974). - Le bassin du fleuve Sénégal. *Monogr. Hydrologique de l'ORSTOM*, Paris, n°1, 391p.
- UNESCO/SCOR, (1974). - A review of methods used for quantitative phytoplankton studies. Final report of SCOR working group 33. UNESCO technical papers in marine science, 18, 27 p.
- UNESCO, (1984). - L'échelle de salinité pratique de 1978 et l'équation internationale d'état de l'eau de mer de 1980. UNESCO technical papers in marine science, 36, 21 p.

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

*Synthèse des travaux de deuxième année
Rapport présenté par F.X COGELS et J.Y. GAC,
Fondation Universitaire Luxembourgeoise (FUL)
Arlon, Belgique*

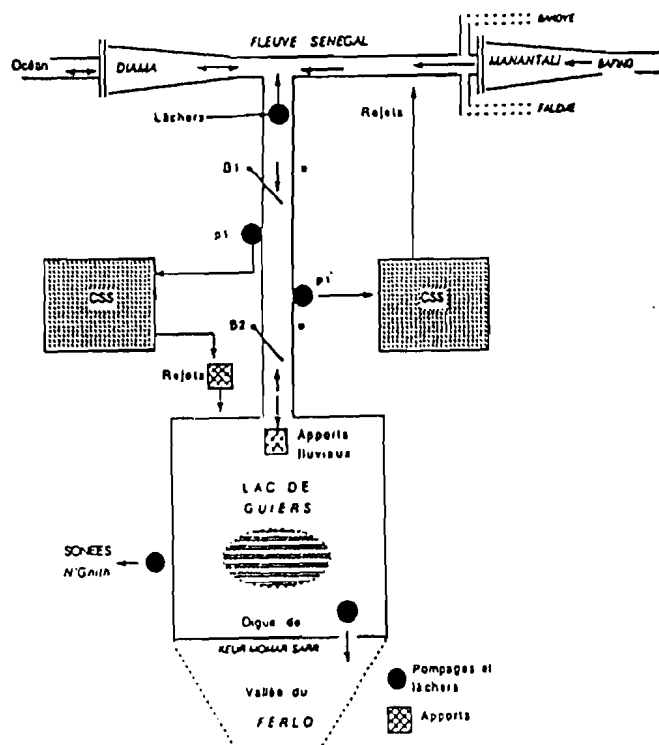


Fig. 1. - Schéma du dispositif fluviolacustre actuel

1.- PRESENTATION GENERALE

La deuxième année du programme de recherche inclut 5 axes principaux à savoir:

- a) - l'étude des bilans hydrologiques du lac, elle même concrétisée par 2 rapports distincts:
 - une première étude récapitulative couvre la période 1976/1989; elle est concrétisée par un rapport.
 - Une seconde étude s'intéresse plus particulièrement à l'année 1990.
- b) - l'étude de l'évaporation du lac, suite logique de celle des bilans; l'étude a fait l'objet d'un rapport.
- c) - l'étude de la qualité des eaux du lac, basée sur 8 campa-

gnes de mesures. Cette étude se complète par celle plus spécifique de l'évolution quotidienne de la salinité des eaux (bilan des chlorures) en un point particulier du lac.

d) - l'étude des critères de gestion future des eaux du lac, basée entre autres sur les risques de développement de la végétation aquatique suite aux nouvelles conditions hydrologiques du lac, et sur les potentialités de valorisation des abords du lac par les cultures de décrue. Ces études sont actuellement en cours et n'ont donc pas fait l'objet de rapport.

e) - la mise au point du futur programme de gestion des eaux du lac. Cette partie en est à ses débuts; un premier programme a été développé mais demande encore à être précisé.

2.- CONTENU DE LA RECHERCHE

21.- Bilans hydrologiques du lac de Guiers.

211.- *Etapas de l'étude*

L'étude couvre la période 1976-1990. Dans un premier temps, toutes les données relatives au fonctionnement du lac ont été recueillies, soit :

- l'évolution quotidienne de la cote du plan d'eau pour les 15 années envisagées; ces données ont été fournies par la station de la SONEES (Société Nationale d'Exploitation des Eaux du Sénégal) à N'Gnith, sur la rive Ouest du lac ; certaines données manquantes ou visiblement erronées ont du être extrapolées de celles existantes.

- le calcul et la formulation mathématique des surfaces et volumes du lac en fonction de sa cote ; une nouvelle formulation, très précise et facile d'emploi a été mise au point.

- la reconstitution de l'historique des liaisons entre le fleuve et le lac, puis entre le lac et la vallée du Ferlo, étape indispensable pour les calculs futurs des bilans hydrologiques ; cet historique s'est avéré compliqué et difficile à établir. Il a parfois fallu recourir à divers recoupements pour s'assurer de l'exactitude des données et informations recueillies. Le type de liaison fleuve-lac est conditionné par le jeu des 2 ponts barrages de la Taoué à Richard-Toll qui détermine l'origine des prélèvements destinés à l'irrigation de la canne à sucre, soit à partir du lac, soit au départ du fleuve.

- le recueil des données climatologiques soit la pluviométrie et l'évaporation en bac, données obtenues à la station climatologique de la Compagnie Sucrière Sénégalaise (CSS) à Richard-Toll.

- le calcul des apports et pertes quotidiens en eau quantifiables directement : pompages divers dans le lac, destinés à l'irrigation et à la production d'eau potable, rejets des eaux de drainage des cultures sucrières et apports pluviométriques directs et indirects au lac

- la mise au point d'un petit logiciel de calcul des bilans, indispensable vu le nombre très important de données à traiter (près de 100.000).

212.- Résultats

Les bilans hydrologiques du lac sont la résultante des entrées et des sorties d'eau durant une période déterminée. L'équation générale du bilan s'écrit:

$$V_2 - V_1 = (V_{po} + V_r + V_F) - (V_E + V_{p2} + V_{p1})$$

- V_1 et V_2 sont les volumes respectifs du lac au temps 1 et 2

- V_{po} constitue l'apport au lac d'origine pluviométrique, calculé sur la base des hauteurs d'eau tombées au jour j multipliées par la surface du lac du même jour. Il est également tenu compte d'un facteur de ruissellement.

- V_r représente les volumes d'eau de drainage issus des champs de canne à sucre, exploités dans le nord du lac, et rejetés dans le plan d'eau.

- V_F représente les apports fluviaux au lac, conditionnés par le jeu des ponts barrages de Richard-Toll et bien sûr par les différences de niveau entre lac et fleuve.

- V_{p1} et V_{p2} sont les volumes d'eau prélevés respectivement par la CSS et par la SONEES.

- D'autres termes dont la fréquence est moindre peuvent venir s'ajouter au bilan, tels les lâchures du lac vers la réserve de Diama, destinées à soutenir le niveau dans le barrage en période d'étiage ou encore les déversements vers la vallée du Ferlo qui permettent d'évacuer vers cette vallée fossile les eaux très minéralisées du sud du lac. Dénommés respectivement VLF et V_{p3} , ces termes ne sont intervenus que très épisodiquement.

La plupart des termes du bilan sont connus et quantifiables directement, d'autres tels l'évaporation ne le sont pas. Ce dernier terme sera déduit du bilan général, comme seul terme inconnu; ceci est valable pour les périodes durant lesquelles lac et fleuve sont isolés l'un de l'autre. Par contre, en période de liaison fleuve-lac, le débit transitant par le canal de la Taoué est inquantifiable directement (par manque d'équipement limnimétrique) et deux termes sont alors simulta-

nément inconnus dans l'équation générale du bilan. L'évaporation sera alors estimée durant les périodes de jonction entre fleuve-lac, sur la base de l'évolution de l'évaporation mesurée en bac aux mêmes périodes et de celle de la relation générale entre l'évaporation du lac et celle du bac.

La figure 2 indique le bilan hydrologique moyen annuel du lac calculé ici pour la période 1976-1989. Les apports fluviaux VF et les pertes par évaporation VE constituent les 2 composantes essentielles du bilan avec respectivement 85,6% des apports et 82,5% des pertes. Les prélèvements de la CSS et ceux de la SONEES ne représentent que 13,3 et 2,4% des pertes. Les transferts du lac vers le fleuve sont négligeables, tout comme ceux dirigés vers la vallée du Ferlo. Les apports pluviométriques totalisent 8,2% et les rejets des zones irriguées 6,2% des apports.

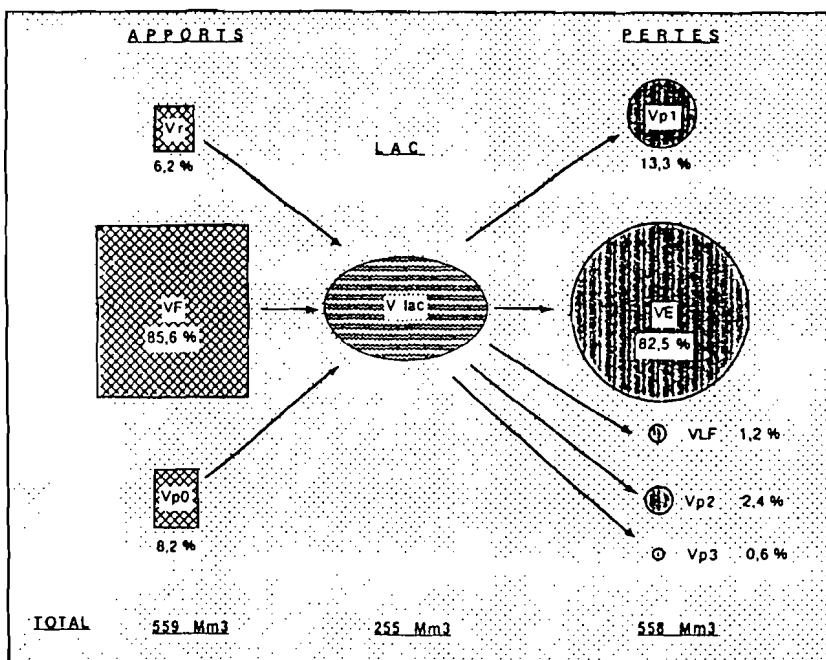


Fig.2 - Bilan hydrologique moyen annuel (en millions de m³)

L'étude des bilans hydrologiques est utile à plusieurs points de vue. La compréhension du fonctionnement du lac n'avait jamais été poussée jusqu'à un point de précision tel celui présenté ici. Cette compréhension sera indispensable à la gestion future du plan d'eau qui sera envisagée plus tard. L'évaporation constitue bien l'élément fondamental du bilan et sa limitation sera l'un des éléments clé des critères de base de la gestion des eaux.

A l'horizon 2000, les bilans hydrologiques du lac risquent d'être encore profondément modifiés, à cause surtout de la

réalisation du canal de Cayor qui devrait relier le sud du lac de Guiers à Dakar. Des études prospectives ont pu évalué que l'**approvisionnement** annuel en eau douce nécessitera alors une **quantité** plus ou moins égale au double du volume du lac.

213. Documents produits dans le cadre de la recherche

- FX COGELS, JY GAC, JL APPAY, N EVORA, B LABROUSSE (1990).- Fonctionnement et bilans hydrologiques du lac de Guiers de 1976 à 1989. 60 p. et annexes

- JY GAC, FX COGELS, N EVORA, B. LABROUSSE (1991).- Bilan hydrologique du lac de Guiers en 1990.

- N EVORA (1990) : Détermination de l'évaporation et bilans hydrologiques du lac de Guiers (Sénégal). Mém.de la Faculté Polytechnique de Mons,Belgique. (Recherche effectuée dans le cadre et avec l'aide financière du projet EQUESSEN).

22.- Evaporation du lac

221.- Etapes de l'étude

Cette étude est une suite logique de celle des bilans hydrologiques du lac. Paramètre fondamental du bilan et par la suite de la gestion du lac, l'étude de l'évaporation méritait d'être développée. Elle s'est articulée sur 4 axes principaux :

- la quantification de l'évaporation mensuelle du lac de 1976 à 1989, basée sur les bilans hydrologiques correspondants. Elle est directe ou estimée selon que l'évaporation constitue le ou l'un des termes inconnus du bilan hydrologique.

-la comparaison de l'évaporation calculée au lac avec celle mesurée en bac aux mêmes périodes.

-l'étude sommaire du mécanisme de l'intervention des paramètres climatiques enregistrés à Richard-Toll sur le processus d'évaporation en bac, puis transposé au lac. Il ne s'agissait là nullement de chercher une nouvelle formulation liant climat et processus d'évaporation mais seulement de tester les possibilités d'estimation de l'évaporation du lac à partir d'éléments du climat mesurés en continu dans la région.

-l'estimation de l'évolution quotidienne du lac à partir des moyennes mensuelles interannuelles. L'intégration du paramètre dans le futur modèle de gestion nécessite en effet un pas de temps à l'échelle journalière.

222.- Résultats

a.- Evaporation du lac et du bac

Le tableau 1 indique l'évaporation moyenne mensuelle cal-

culée du lac et observée en bac de "classe A" pour la période 1976-1989, et précise l'écart type moyen correspondant.

Tableau 1

Evaporation moyenne mensuelle du lac (EL) et du bac (EB).
Ecart-types respectifs (mm/jour) de 1976 à 1989.

	EL EL-mm	EL EL-s	EB EB-mm	EB EB-s
Janvier	5,02	1,15	9,00	1,37
Février	5,81	1,22	10,48	1,38
Mars	6,34	1,04	11,94	0,77
Avril	7,46	0,86	13,13	1,07
Mai	7,91	0,81	13,54	1,12
Juin	7,20	0,67	11,57	0,66
Juillet	5,65	0,60	9,93	0,57
Août	5,55	0,63	8,52	0,83
Septembre	5,76	0,68	7,90	0,97
Octobre	7,63	0,66	9,28	0,61
Novembre	6,22	0,91	8,68	0,63
Décembre	4,86	0,79	8,18	0,81
moyenne	6,28	0,84	10,18	0,90

L'évolution annuelle de l'évaporation illustrée par la figure 3 est typique avec une progressive augmentation de décembre à mai correspondant à l'avancement de la saison sèche. L'évaporation diminue ensuite jusqu'en août/ septembre, présente un pic en octobre, puis régresse jusqu'en décembre.

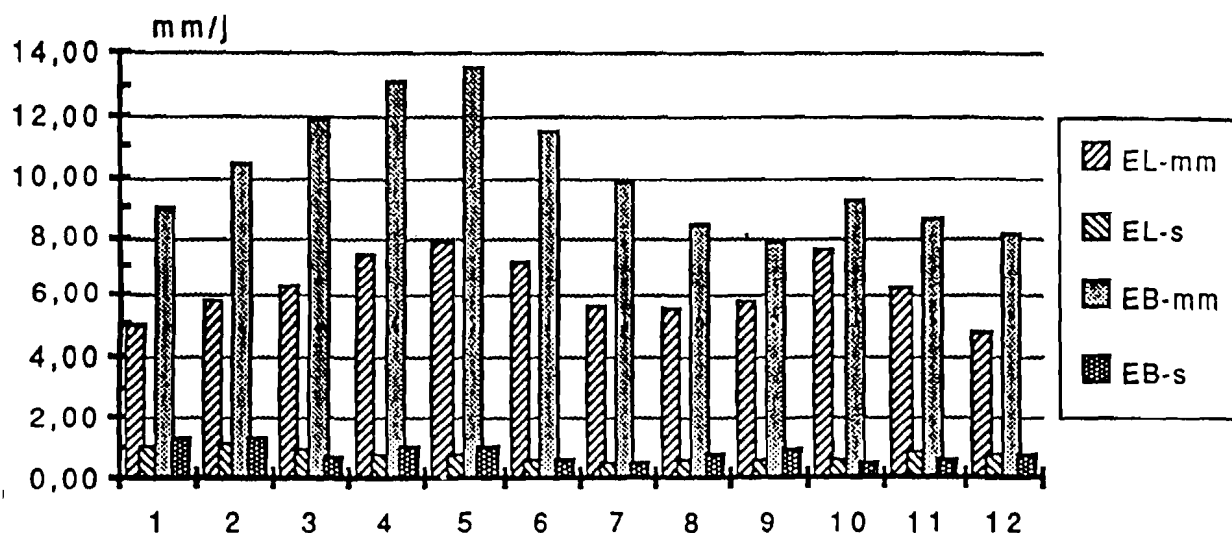


Figure 3. Evaporation moyenne mensuelle du lac EL et du bac EB
Ecart-types respectifs (s) de 1976 à 1989.

L' évolution générale de l'évaporation respectivement calculée au lac et observée en bac est très semblable dans l'ensemble ; l'écart entre les deux varie cependant fortement en cours d'année : l'évaporation du bac reste constamment supérieure à celle du lac mais à des degrés divers eux mêmes conditionnés par l'évolution des paramètres du climat dont l'influence sur le lac et sur le bac ne semble pas s'appliquer dans les mêmes proportions.

On remarque également une forte répétitivité interannuelle de l'évaporation, les écarts types de l'évaporation du lac et du bac restant très faibles; la répétition interannuelle des paramètres climatiques sous climat sahélien est connue et explique cela.

L'évaporation totale annuelle atteint en moyenne 2.29m au lac et 3.71m en bac. Elle représente pour le lac une perte moyenne de l'ordre de 15 m³/sec environ ce qui est important. L'évaporation est bien le paramètre fondamental à prendre en considération dans la recherche d'un modèle de gestion future des eaux du lac.

L'évaporation du Guiers a ensuite été comparée avec celle mesurée dans d'autres lacs sahéliens, tels le Tchad et le lac de Bam au Burkina. Les résultats qui y ont été enregistrés sont quasi identiques à ceux du Guiers tant pour l'évolution du paramètre que pour son total annuel.

La corrélation entre l'évaporation mensuelle du lac et celle du bac s'avère relativement bonne si l'on ne tient pas compte des mois d'août, septembre et octobre, mois durant lesquels le mode d'action des éléments du climat sur le processus d'évaporation du lac et du bac semble très différent. Pour l'ensemble des valeurs mensuelles de la période 1976-89, le coefficient de corrélation entre l'évaporation du lac et celle du bac n'est que de 0.62, et de 0.71 si l'on ne tient pas compte des 3 mois de la saison des pluies. Concrètement l'erreur moyenne, pour une estimation de l'évaporation du lac à partir des données mesurées en bac, avoisine 12 %.

b.- Corrélation entre l'évaporation et les paramètres climatiques

La corrélation entre l'évaporation en bac et les paramètres du climat tels que la température de l'air, le déficit de tension de vapeur de l'air et la vitesse du vent est relativement facile à établir. Pour l'ensemble des 156 mois couvrant l'étude, une corrélation très satisfaisante a pu être trouvée qui combine l'évaporation en bac et l'ensemble des trois paramètres climatiques.

La relation s'écrit:

$$\text{Evap bac} = (0.1227.Ta) + (1.774.U2) + (0.373.de) - 1.599$$

avec Ta (température de l'air), U2 (vitesse du vent) et de (le déficit de tension de vapeur de l'air).

Le coefficient de corrélation est dans ce cas de 0.90.

La transposition des corrélations entre l'évaporation du bac et les différents paramètres du climat sur l'évaporation du lac s'avère plus difficile. Le bac réagit très rapidement aux conditions atmosphériques ce qui est moins le cas du lac dont le volant thermique et la masse d'eau jouent un rôle de frein aux brusques variations des conditions extérieures.

Appliquées aux données moyennes interannuelles, les corrélations proposées peuvent s'avérer intéressantes, telle la relation :

$$\text{Evap lac} = (0.395.U2) + (0.377. de) + (0.254.Tlac) - 4.973$$

(T lac : température des eaux du lac).

Le coefficient de corrélation est ici de 0.955.

A l'échelle mensuelle de la période 1976-89, la corrélation est moins satisfaisante avec un coefficient de 0.65 seulement.

La meilleure corrélation trouvée réunit l'évaporation mensuelle du lac et les données climatiques et inclut aussi l'évaporation du bac. Elle s'écrit :

$$\text{Evap lac} = (0.48.\text{Evap bac}) - (0.46.U2) + 0.145.Tlac + 0.056.de - 1.637$$

Dans ce cas, le coefficient de corrélation est, pour les 156 mois étudiés, de 0.74. L'erreur moyenne attendue pour une estimation de l'évaporation du lac à partir des paramètres proposés dans cette dernière formule est de 10.7%.

c.- Estimation de l'évaporation moyenne quotidienne

Partant des données moyennes mensuelles de l'évaporation du lac pour la période 1976-89, et sachant que le paramètre est reproductible d'année en année, comme le sont les éléments du climat, l'extrapolation de l'évolution intermensuelle et intramensuelle de l'évaporation a été tentée. Ces 366 valeurs types sont présentées dans le rapport traitant de l'évaporation et seront incluses dans le modèle de gestion des eaux.

223.- Documents produits dans le cadre de la recherche

FA COGELS, N.EVORA, JY GAC (1991). L'évaporation du lac de Guiers de 1976 à 1989 - Bilan et essai d'interprétation. 25 p et annexes

23.- Etude de la qualité des eaux du lac

Cette partie comporte 2 axes de recherche, l'un relatif à l'étude de l'évolution de la qualité générale des eaux du lac, l'autre à l'étude d'une station bien précise, à Ngnith, sur la rive ouest du Guiers. L'objectif est de tenter de corrélérer les deux approches de manière à pouvoir, dans l'avenir, disposer d'une seule station de référence sur le lac, qui permettrait un suivi régulier et en même temps facile à réaliser. Reste à établir et à vérifier cette corrélation.

- L'étude de la qualité générale des eaux a fait l'objet de huit campagnes d'analyse durant cette seconde année, et ce sur les 16 stations sélectionnées (1 sur le fleuve, 1 sur le canal de la Taoué et 14 sur le lac). Depuis le début du projet de recherche, 14 séries de mesure ont ainsi été effectuées. Elles portent sur les paramètres chimiques de base, à savoir chlorures, sulfates, bicarbonates, calcium, magnésium, sodium, potassium et silice. Les données analytiques n'ont pas encore été traitées; elles le seront au cours de la troisième année du projet. D'autre part, afin de pouvoir calculer une concentration moyenne des eaux pour les divers paramètres et pour chaque série d'analyse, il est indispensable de fixer, pour chaque station sa zone d'influence où l'on considèrera que la concentration de l'élément x est uniforme. Le lac a donc été découpé en 14 zones pour dont les volumes respectifs peuvent être évalués en fonction de la hauteur des eaux. Ces formulations mathématiques ont été définies.

- L'étude de la qualité des eaux de la station de référence de N'gnith est basée sur l'évolution des teneurs en chlorures. Tous les résultats d'analyses effectuées sur cette station par le laboratoire d'analyse des eaux de la SONEES depuis 1976 ont été répertoriés et entres sur ordinateur. Une première étude des concentrations en Cl et de leur relation avec le volume du lac a été effectuée. L'étape suivante sera leur corrélation éventuelle avec la teneur moyenne en Cl du lac aux périodes correspondantes.

24.- Critères de gestion des eaux

La gestion hydrologique future des eaux du lac, ou du moins les propositions qui seront faites, devront s'appuyer sur des critères réalistes qui pour l'instant sont au nombre de quatre :

- limiter l'évaporation en évitant de donner au lac une surface inutilement grande par rapport aux besoins.

- éviter la prolifération de la végétation aquatique, source de problèmes divers : support aux hôtes vecteurs de maladie, paludisme et bilharziose, refuge et cause indirecte d'une surpopulation ornithologique défavorable aux cultures, obstacle aux mouvements des eaux dans le lac surtout après la mise en fonction du canal de Cayor.

- permettre et favoriser l'exploitation traditionnelle des cultures de décrue qui ceinturent le lac.

- satisfaire la demande des utilisateurs actuels et potentiels : cultures irriguées et maraîchères, production d'eau potable, approvisionnement du canal de Cayor, mise en valeur de la vallée du Ferlo.

Chacun de ces critères fait ou fera l'objet d'une étude particulière. Les études réalisées ou en cours sont:

a. L'étude du taux d'occupation actuel de la végétation aquatique dans la région sud du lac. Une couverture photographique aérienne a été établie en octobre 1990. Une nouvelle couverture doit être effectuée un an plus tard afin d'essayer d'évaluer l'importance du recouvrement végétal et son évolution dans le temps et dans l'espace.

Conjointement, une enquête a été menée pour essayer de dresser l'état du problème du développement de la bilharziose autour du lac, et ce auprès des autorités médicales locales. Aucune donnée n'est disponible pour le lac de Guiers; par contre, le problème "bilharziose" devient inquiétant dans la basse vallée du fleuve où la maladie prolifère à une vitesse tonnante. La bilharziose intestinale, qui ne s'était jamais rencontrée sous de telles latitudes, atteint près de 90% de la population de la ville de Richard-Toll, au nord du lac. Les nouvelles conditions de qualité des eaux dans le fleuve ont entraîné une prolifération des mollusques hôtes vecteurs de la maladie qui a atteint une population qui n'y avait pour la plupart jamais été confrontée, et par conséquent très sensible aux attaques du parasite. Le développement de la maladie vers le lac semble inévitable si ce n'est déjà une réalité. Les conséquences sociales et économiques de cette situation seront très importantes. La réduction de la végétation aquatique supérieure semble pour l'instant le seul moyen pour freiner le développement dans le lac des mollusques vecteurs.

b. L'étude des potentialités des cultures de décrue autour du lac est en cours. Une vaste enquête a été réalisée en mars 1991, qui porte sur :

- l'inventaire des localités et lieux privilégiés où se pratiquent les cultures de décrue.

- les variétés cultivées, leur destination et prix de vente.

- l'estimation des surfaces utilisées, les rendements cultureux et le calendrier cultural idéal pour les différentes spéculations.

25.- Modèle de gestion hydrologique des eaux

Le modèle de gestion des eaux du lac sera mis au point au cours de la troisième année du projet.

Rappelons qu'un tout premier modèle a été développé en 1982 ; il permettait de calculer l'évolution la plus probable de la cote du lac en cours d'année, sur la base des données de prélèvements des eaux, CSS et SONEES essentiellement. L'approvisionnement du lac était à cette époque sous la seule dépendance de la crue fluviale, et il n'était donc pas possible d'ajuster le remplissage du lac en cours d'année comme c'est le cas aujourd'hui grâce à la réserve de Diama. Les conditions hydrologiques d'approvisionnement du lac ont donc radicalement changé par rapport à ce qu'elles étaient hier. Elles pourront encore se modifier d'ici quelques années avec la mise en fonction complète du barrage de Manantali dont la gestion influencera directement celle du lac de Guiers. Les lâchers vers le Ferlo et les transferts de soutien du lac vers la réserve de Diama en cours d'année sont aussi récents et imposent leur prise en compte ultérieure.

Un modèle complètement repensé doit donc être développé. Il doit permettre une gestion optimale du lac sur les bases suivantes:

a. Calcul de l'évolution annuelle de la cote du lac compte tenu des entrées et sorties d'eau diverses.

b. Calcul des besoins en eau du lac, annuels, mensuels et journaliers à partir des données relatives à la consommation des différents utilisateurs, aux rejets des zones irriguées et sur la base de l'évolution de la cote du lac. Cette évolution annuelle devra donc être fixée en début d'année. La variation du niveau du lac en cours d'année doit permettre entre autre la mise en valeur des zones de décrue situées en bordure du plan d'eau. Les résultats doivent s'exprimer soit en unités de volume d'eau à transférer au lac soit en données limnimétriques des échelles du canal de la Taoué qui fait la jonction fleuve-lac. Les apports pluviométriques devront être pris en compte également.

c. Calcul des volumes d'eau disponibles en cours d'année pour des besoins ponctuels : transferts vers Diama par exemple.

d. Calcul des volumes d'eau évaporés par le lac selon l'option

de gestion choisie.

Les consommations d'eau autour du lac seront calculées sous forme de débits pour les utilisateurs tels la CSS, la SONEES, et le canal de Cayor. Les besoins de l'agriculture seront calculés sur la base des besoins à la parcelle des différentes variétés cultivées, de l'efficience de l'irrigation et du calendrier cultural.

Le modèle définitif n'est pas encore réalisé. Une première approche de ce modèle a été testée cependant (fig.4). Elle permet le calcul des besoins en eau du lac à partir du fleuve (Q_c) nécessaires pour assurer une demande globale non constante dans l'année (Q_e) tout en respectant une évolution du niveau des eaux du lac fixée au départ (HL). A titre d'exemple, deux périodes de remplissage ont été prévues ici, l'une couvrant le mois d'avril (phase de remplissage d'appoint complémentaire), l'autre la période habituelle d'août et de septembre correspondant à la crue fluviale. Dans le cas présenté ici, le modèle prend aussi en compte la pluviométrie moyenne annuelle (Q_a). Ces résultats préliminaires seront présentés au VII^{ème} Congrès Mondial des Ressources en eau à Rabat en mai 1991.

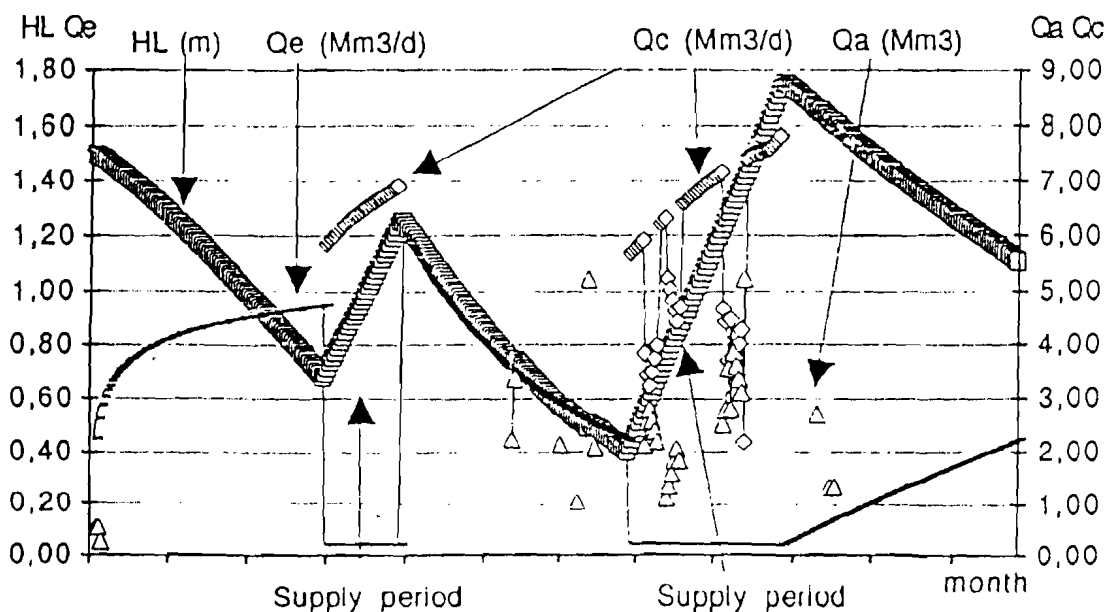


Figure 4.

Annual evolution of the lake's water level (HL) and of its water requirements from Senegal river (Q_c) to assure the total theoretical needs of the users (Q_e). The mean annual rainfall is taken into account (Q_a).

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 dpt de Géographie
Fac. des Lettres et Sc. Humaines, Université C.A.D. Dakar*

LES FLUX CONTINENTAUX PARTICULAIRES DANS LE BAS-ESTUAIRE DU FLEUVE SENEGAL (STATION DE DIAMA)

Novembre 1985 correspond à l'achèvement des travaux du barrage de Diama, édifié à 50 km en amont de l'embouchure. Cette date historique correspond de façon irréversible à l'artificialisation du fleuve Sénégal, le régime hydrologique naturel appartient désormais à un passé à jamais révolu.

Le barrage de Diama est conçu pour :

- arrêter la remontée des eaux marines dans le lit du fleuve pendant la saison des basses eaux (janvier à juillet) ;
- créer un réservoir à l'amont, le niveau du fleuve à la côte 1,50 m permet de constituer une retenue d'eau de 250 millions de m³, qui est également une zone de stockage de la matière en suspension surtout dans le lit mineur.

Il existe un cycle annuel marqué, mais le phénomène hydrologique du fleuve est désormais intimement lié aux "perturbations induites par le mouvement des vannes du barrage de Diama" (CECCHI, MILLET, 1989), c'est un phénomène hydraulique qui gère les eaux du Bas-Sénégal.

Néanmoins l'alternance naturelle des eaux douces de la crue (saison des hautes eaux) et des eaux marines (saison des basses eaux) dans l'estuaire est annuellement respecté.

Pendant la saison des hautes eaux, l'ensemble de l'ESTUAIRE est soumis uniformément aux flots de la crue, le transport des matières en suspension est élevé, cela se traduit par une importante diminution de la profondeur de disparition du disque de SECCHI (moins de 15 cm).

L'amorce de la décrue, puis la fermeture des vannes du barrage s'accompagnent d'un éclaircissement des eaux. En aval de Diama l'intrusion marine reprend sous l'effet de l'onde de marée, l'estuaire sera progressivement envahi par les eaux océaniques. En amont de Diama, les eaux douces se maintiennent, une lente décantation s'opère, les matières en suspension se sédimentent au fond du chenal fluvial.

I. LE BILAN DE L'EAU DANS LE BASSIN DU SENEGAL

Avant la mise en eau des barrages de Manantali dans le haut-bassin et de Diama (50 km de l'embouchure), le Sénégal était parmi les fleuves sahéliens, celui qui disposait de la plus longue série d'observations limnimétrique ; les écoulements sont suivis depuis 1903 aux deux stations-clefs de Bakel à l'amont et de Dagana à l'aval.

Aujourd'hui, il n'existe toujours pas de tentative d'évaluation des écoulements du fleuve Sénégal à son embouchure à partir des seuls enregistrements du marégraphe de St Louis. Il n'est plus nécessaire actuellement de les identifier quotidiennement à ceux de Dagana (située à 192 km de l'embouchure). A Diama, les relevés du plan d'eau fluvial effectués journalièrement depuis 1986, aussi bien à l'amont qu'à l'aval du barrage nous permettent de déterminer les écoulements annuels, les débits moyens mensuels et journaliers.

A. LE REGIME DU FLEUVE SENEGAL

FRECAUT (1981) a classé le Sénégal dans les "régimes pluviaux tropicaux humides" qui suivent le rythme pluviométrique saisonnier en mimant avec un faible décalage la répartition des précipitations sur les zones amont d'alimentation. Le régime du Sénégal se caractérise par deux saisons bien différenciées :

- . une période de hautes eaux de juin-juillet à octobre-novembre, avec une pointe de crue se situant généralement dans la seconde quinzaine de septembre ou dans les tous premiers jours d'octobre ;

- . une période de basses eaux, de novembre-décembre à mai-juin, pendant la saison sèche avec une décroissance régulière des débits.

Du Fouta-Djalori, où le Sénégal prend sa source, à l'embouchure du fleuve, on distingue trois sous-régimes caractéristiques : tropical humide de "transition", tropical "pur" et sahélien.

Le régime tropical humide de "transition" affecte une superficie de 28.000 km² où les pluies annuelles sont supérieures à 1.250 mm. Il concerne les hauts-bassins des trois branches-mères du Sénégal : le Bafing, le Bakoye et la Falémé. Les écoulements y sont soumis à des variations très brutales ; les maximum et les minimum mensuels se présentent à des dates très irrégulières. Les réserves en eau du sol et du sous-sol sont réduites ; les étiages sont très prononcés.

Le régime tropical humide "pur" règne sur une surface de 108.000 km² (45 % du bassin). Les pluies annuelles sont comprises entre 1.250 mm et 750 mm et très souvent inférieures à 1.000 mm. Il s'étend sur les cours inférieurs des trois affluents et sur la totalité du Baoulé. Les hautes eaux, qui durent de trois à quatre mois (maximum en septembre-octobre), se poursuivent par une très longue saison des basses-eaux où persiste un faible écoulement.

Le régime sahélien englobe toute la zone où la pluviométrie est inférieure à 750 mm (134.000 km², 40 % de la superficie totale du bassin) : il s'étend à la totalité du bassin de la Kolombine, du Karakoro, du Gorgol et à la vallée du Serpent pour le Baoulé. Les apports de ces régions sont négligeables, les écoulements devenant de plus en plus sporadiques au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers le nord. En aval de Bakel, le régime reflète les conditions hydrologiques de l'amont avec des modifications mineures introduites par la présence de vastes plaines d'inondation, de nombreux défluent, l'absence d'affluents à écoulements importants et par les processus d'évapotranspiration. Dans toute la basse vallée, le Sénégal se comporte comme "un élément étranger en domaine sahélien où son régime diffère fondamentalement de celui des cours d'eau indigènes" (FRECAUT, 1981).

B. L'ABONDANCE FLUVIALE

1 - Bilan Moyen annuel des écoulements après la mise en eau du Barrage de Diama

Au barrage de Diama (1), les écoulements sont déterminés pendant la période d'ouverture des vannes grâce à l'équation de T. PIEKUTOWSKI (1990) qui "considère généralement que le débit d'une vanne de réglage noyée est assimilable au débit d'un orifice noyé et peut donc être calculé par la formule suivante :

$$Q = CA (\frac{2}{g} \Delta H)^{1/2}$$

où

Q = débit (m³/s)

C = Coefficient de l'orifice (sans dimension)

Δ = Superficie de l'orifice (m²)

g = accélération de la gravité (9,8 m/s²)

H = charge hydraulique = niveau d'eau amont-aval (m)

(1) le barrage de Diama comporte un déversoir avec 7 passes, large chacune de 20 m et hautes de 11,5 m. Des vannes secteurs règlent le débit à travers ces passes et elles ne sont ouvertes que pendant la saison des hautes eaux (mi-juillet à mi-décembre). Les vannes comportent 23 paliers d'ouverture (palier 0 - vannes fermée - palier 23 vannes complètement ouvertes) et sont généralement ouvertes de manière identique.

On dispose aussi d'une série de valeurs complètes depuis 1986, date de la mise en eau du barrage de Diama.

TABLEAU 1 : EVOLUTION DES DEBITS MOYENS MENSUELS (m³/s)
A DIAMA DEPUIS 1986

CYCLE HYDROLOGIQUE	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEV.	MARS	AVRIL	MODULE
1985-1986	-	-	39,8	448,16	1064,4	1145,4	399,6	87,9	-	-	-	-	260
1986-1987	-	-	-	147,05	701,51	745,25	398,48	22,90	-	-	-	-	168,1
1987-1988	-	-	2,18	724,05	1946,9	2184,08	190,5	30,8	-	-	-	-	425,4
1988-1989			216,0	421,8	1239,5	1040,8	326,2	74,6	-	-	-	-	277,46

Selon PIEKUTOWSKI (1990) les volumes moyens annuels au barrage de Diama ont été maximum en 1988 (13,40 milliards de m³), minimum en 1987 (5,31 milliards de m³) et sensiblement au même niveau en 1986 (8,18 milliards de m³) et 1989 (8,75 milliards de m³).

Au cours de cette courte période (le nombre d'années d'observations peu élevé ne permet pas de définir des tendances significatives), le module moyen interannuel s'est élevé à environ 283 m³/s correspondant à un écoulement moyen de 9,0.10⁹ m³/an.

Aux stations de Bakel et Dagana, on dispose d'une série de valeurs complètes de 1903-04 à 1984-85, période d'observation d'avant-barrage de 82 ans. A Bakel le module moyen interannuel s'élève à 708,9 soit un écoulement moyen de 22,3.10⁹ m³ ; à Dagana le module moyen interannuel est de 641 m³/s (sur 81 ans), correspondant à un écoulement moyen de 20,2.10⁹ m³/s. L'évolution des débits moyens mensuels à Bakel, après la mise en eau des barrages est donnée dans le tableau ci-dessous :

TABLEAU 2 : EVOLUTION DES DEBITS MOYENS MENSUELS A BAKEL
(1985-1986 à 1989-1990) (m³/s)

CYCLE HYDROLOGIQUE	MAI	JUIN	JU	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	JANV.	FEV.	MARS	AVRIL	MODULE
1984-1985	0,28	0,05	384	1411	1696	569	149	52,4	20,0	8,82	3,24	1,61	357,95
1986-1987	0,77	0,137	253	686	1919	850	260	80,5	38,0	17,2	6,57	2,87	342,83
1987-1988	1,26	0,556	112	485	938	638	127	56,8	71,6	50,5	47,4	4,04	211,01
1988-1989	56,26	102	329	929	3270,10	700	92,6	21,7	8,12	10,7	34,3	32,73	465,54
1989-1990	38,7	92,27	279	1034	1806	779	246	35,8	25,3	42,4	45,0	27,1	370,88

Au cours des 87 années d'observation (1903-1989), le module interannuel du Sénégal à l'exutoire amont de Bakel a été de 705 m³/s, soit un écoulement moyen annuel de 21,46.109 m³, ainsi les volumes écoulés par le Sénégal n'ont cessé de diminuer, surtout à cause de la péjoration climatique qui a servi dans la zone depuis le début des années 70.

2 - Variabilités interannuelles : mensuelle et journalière

Il est bien connu que l'irrégularité dans les écoulements constitue la caractéristique essentielle du fleuve Sénégal. Actuellement avec le système hydraulique en place, le stockage de l'eau est effectif, les quantités disponibles dans le chenal fluvial sont rigoureusement contrôlées en fonction des besoins pour l'irrigation et l'alimentation des populations. Ainsi les volumes écoulés vers l'embouchure sont considérablement réduits.

En comparaison avec la situation d'avant-barrage, à la station de Dagana, les écoulements maximum ont eu lieu en 1924-1925 avec 30,6.109 m³ et le minimum en 1983-1984 avec 7,1.109 m³. Ainsi il apparaît que les volumes transitant à Diama se rapprochent beaucoup plus de ceux de Dagana pendant la période de sécheresse, sauf pour l'année 1988, "où ils sont sans conteste surestimés" (PIEKUTOWSKI, 1990).

Il peut donc être admis que l'irrégularité dans les écoulements à l'embouchure a disparu, néanmoins les volumes se sont considérablement amoindris.

A la station de Bakel, depuis 1968, le module moyen interannuel du fleuve Sénégal n'a cessé de diminuer : de 771 m³/s en 1968, il est successivement passé à 765 m³/s en 1971, à 747 m³/s en 1975, à 737 m³/s en 1977, à 733 m³/s en 1979, pour s'établir à 715 m³/s en 1983 (GAC et KANE, 1985), à 705 m³/s en 1989.

3 - Les maximum de la crue annuelle

a°) Irrégularité et variabilité interannuelle des maximums aux stations-clés de Bakel - Dagana

Les débits et les hauteurs maximums enregistrés depuis la mise en eau du barrage aux stations de Bakel, Podor, Dagana et Diama ont été reportés dans le tableau. Les côtes sont données par rapport aux zéros des échelles limnimétriques situées respectivement à +11,16 m IGN à Bakel, 0,44 m IGN à Podor, 0,44 m IGN à Dagana et m IGN à Diama.

Selon GAC et KANE (1985), les valeurs les plus fortes correspondent aux années 1906 pour Bakel (Q max 9.340 m³/s ; H max : 13,28 m), à Dagana, les plus importants écoulements journaliers et la côte maximale ont été observés en 1936 Q max : 3.570 m³/s et H max : 4,94 m ou 4,50 m IGN).

L'année 1984 correspond à une défaillance sans précédent connu, de la puissance des crues aussi bien à l'amont (Bakel : Q max : 995 m³/s ; H max : 4,38 m) qu'à l'aval du bassin du Sénégal (Q max : 770 m³/s environ et H max : 1,49 m ou 1,05 m IGN). La sévérité de la sécheresse des années 80 est ainsi nettement perceptible dans les écoulements :

- à l'amont comme à l'aval leur réduction est de l'ordre de 32 %
- parmi les 10 (dix) années les plus déficitaires de la période d'observation figurent six années consécutives (de 1982 à 1987) ;
- à Bakel, les débits maximum ont varié dans un rapport de 9,4 et les hauteurs maximum dans un rapport de 3 entre 1903-1904 et 1984-1985.

b°) Les fluctuations du plan d'eau à Diama

A la station de Diama, depuis la mise en eau du barrage, Thomas PIEKUTOWSKI a dressé les hauteurs maximales, moyennes et minimales du plan d'eau en fonction de l'ouverture des vannes.

TABLEAU III : HAUTEURS D'EAU A LA STATION DE DIAMA

ANNEE	Hauteur Aval m IGN		Hauteur réservoir Amon m IGN		Niveau du bord Inférieur des vannes (N° de palier)	Vannes ouvertes	Ouverture nette de la vanne	Ouverture Nette (m)
1986	Min	-0,35	0,57		0	4	0,075	0,117
	Moy	0,46	1,00		5,5	6,5	0,608	2,528
	Max	1,00	1,50		17	7	1,465	8,295
1987	Min	-0,22	0,25		0	6	0,000	0,357
	Moy	0,36	1,19		3,8	6,5	0,836	1,712
	Max	0,85	1,49		23	7	1,410	11,249
1988	Min	-0,17	0,39		0	6	0,000	0,357
	Moy	0,68	0,99		10,4	6,8	0,300	5,184
	Max	1,21	1,44		21	7	0,900	10,467
1989	Min	0,00	0,37		0	6	0,030	0,357
	Moy	0,54	0,85		6,7	7,0	0,307	3,276
	Max	1,10	1,24		14	7	1,185	6,704

Il faut dire que depuis la mise en eau du barrage, les travaux de construction de la digue rive droite du fleuve Sénégal, imposent à l'OMVS de maintenir la retenue de Diama à une cote ne dépassant pas :

- 0,50 m entre le début de novembre et le 15 mars
- 0,30 m entre le 15 mars et le 15 juillet
- pendant la saison des hautes eaux, le niveau de l'eau varie en fonction du jeu d'ouverture des vannes, variable selon les besoins : usages agricoles, remplissage du lac de Guiers et des affluents tributaires du Sénégal.

Si, pendant la saison des hautes eaux, le niveau à Diama atteint la cote 1,44 (1988), "les prélèvements d'eau dans la retenue de Diama et dans le fleuve peuvent provoquer une importante baisse du plan d'eau, en dessous de la cote de 20cm, retenue comme seul minimal" (OMVS, 1989).

La gestion de la retenue de Diama de novembre 1988 à mai 1989 a comporté les épisodes suivants (OMVS, 1989) :

- du 1er novembre au 06 janvier : la cote se maintient à environ 0,50 m, conformément aux contraintes liées à l'endiguement de la rive droite ;

- du 06 janvier au 28 février : la retenue baisse de façon relativement régulière (la baisse est d'environ 0,67 cm/jour) sous l'effet des prélèvements et de l'évaporation ; les débits sont alors au plus bas à Bakel et aucun soutien d'étiage n'est possible à partir du haut-bassin ;

- du 1er mars au 20 mars : la baisse trop importante du plan d'eau à Diama (sa cote est de 0,06 m le 28 février) a conduit à l'ouverture du lac de Guiers.

Pendant cette période, les lachures de soutien d'étiage faites à Manantali et les transferts du lac de Guiers ont permis une remontée moyenne de :

- . 0,99 cm jour du 1er au 12 mars
- . 2,25 cm jour du 12 au 20 mars.

les variations de 15 cm en 4 heures ont été enregistrées à Diama sous l'effet des phénomènes de marées et du vent, ainsi il a été nécessaire d'ouvrir les vannes de Diama et de rejeter à la mer environ 30 millions de m³.

- du 21 mars au 30 avril : la fermeture du lac de Guiers et la diminution des lachures à Manantali provoquent à nouveau la baisse de la côte de Diama qui sera pratiquement nulle durant toute la 2e quinzaine du mois d'avril. La baisse moyenne sera d'environ 1,08 cm/jour, l'ouverture à nouveau du Lac de Guiers permettra de stabiliser le niveau de la retenue entre 0,03 et 0,00 cm.

- du 1er au 31 mai : l'ouverture du lac de Guiers depuis le 20 avril et l'accroissement des lachures de Manantali qui atteindront 100 m³/s le 13 avril permettront de maintenir le plan d'eau à Diama à une côte moyenne de 0,12 m environ.

Ainsi, les lachures de soutien à partir de Manantali et les transferts d'eau à partir du lac de Guiers ont permis de stabiliser le niveau du plan d'eau de Diama, surtout entre Février et Avril où des côtes très faibles ont été atteintes. En tout cas, le lac de Guiers joue un rôle capital dans la gestion intégrée des eaux du delta.

c°) La forme des hydrogrammes

Comme l'ont souligné GAO et KANE (1985), l'étude hydrologique montre que la période des hautes eaux annuelles présente toujours la même configuration avec simplement des variations d'amplitude en fonction des années humides (1924-1925), des années moyennes (1962-1963) ou des années sèches (1983-1984) aux stations de Bakel et Dagana (fig. n° 1) et actuellement en fonction des retenues et des lachures opérées à partir de Manantali.

A la station de Diama, la saison des hautes eaux présente la même configuration (voir fig. 2, Diama 1986 à Diama 1989), mais l'allure de l'hydrogramme est plus irrégulière, en dents de scie.

L'hydrogramme de crue à toutes les stations est monomodal, avec en général un épaulement et une longue courbe de tarissement. Après Bakel, la pente devient faible, la vitesse de propagation ralentit, l'hydrogramme s'aplatit et ce "laminage" s'explique par l'absence d'affluents importants le long de la vallée pour déterminer des pointes secondaires.

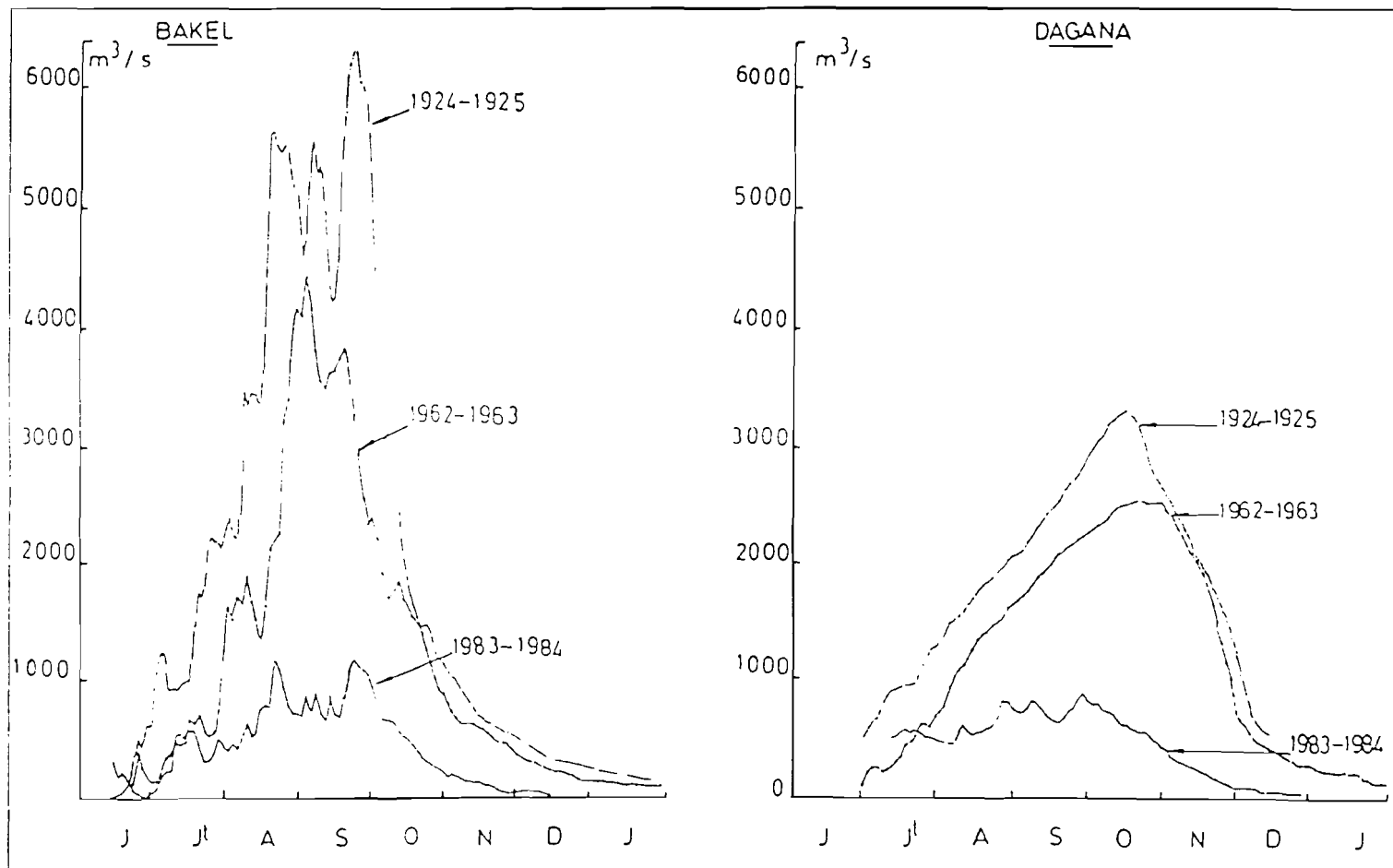
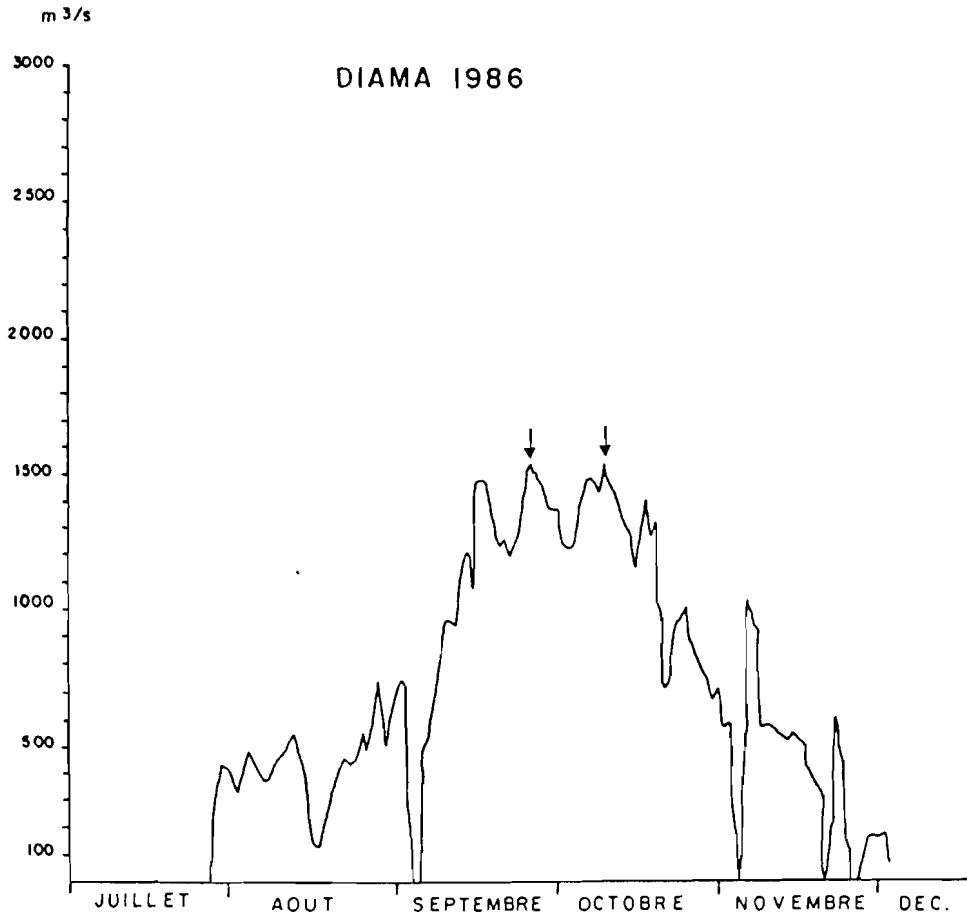
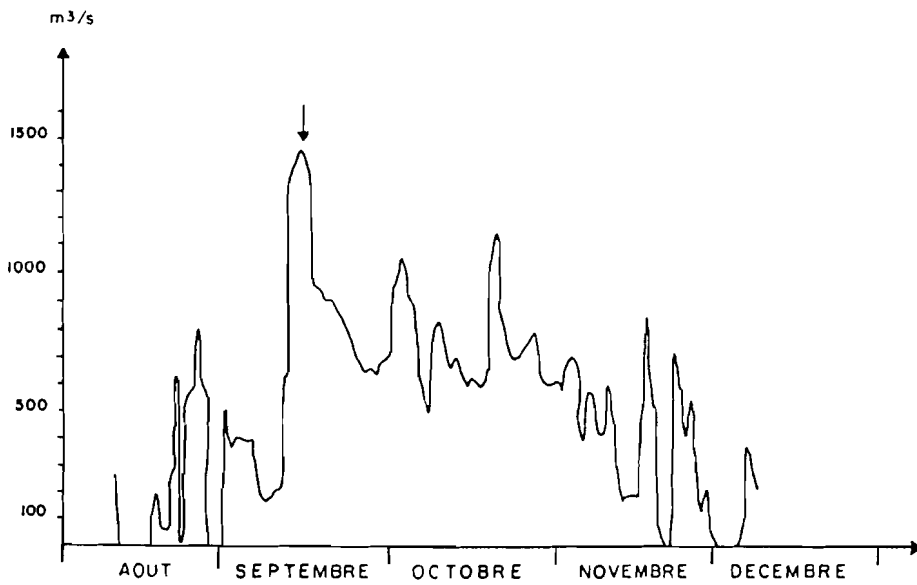


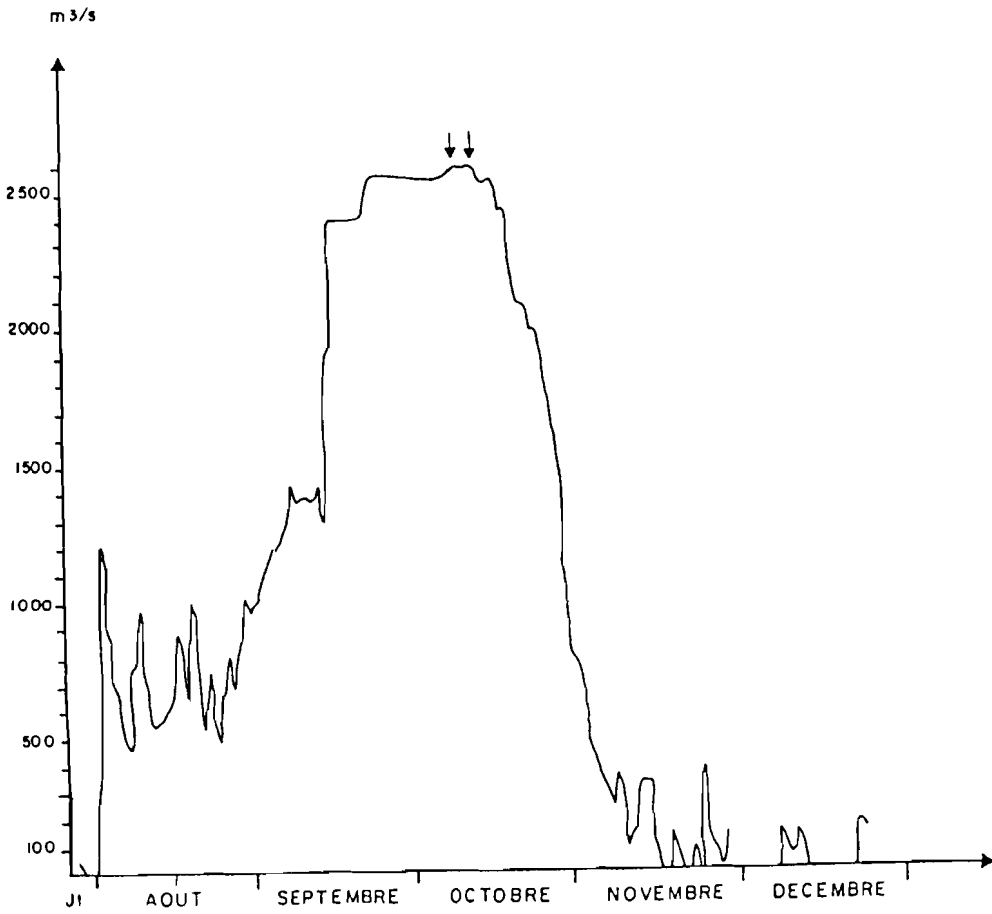
Figure 1 : Allure des hydrogrammes de crue aux deux stations au cours d'une année humide (1924-1925), moyenne (1962-1963) et sèche (1983-1984).



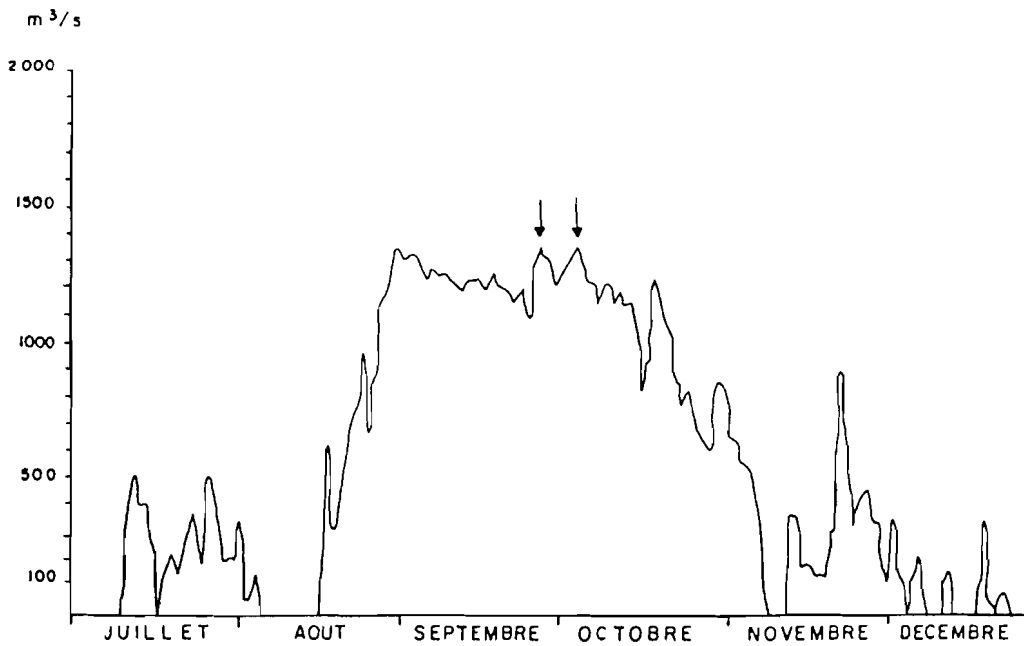
DIAMA 1987



DIAMA 1988



DIAMA 1989



II LES APPORTS FLUVIAUX DE MATIERES EN SUSPENSION A L'EMBOUCHURE DU FLEUVE SENEGAL

A. SYNTHÈSE DES DONNÉES ANTERIEURES

Il existe peu de données sur les débits solides du Sénégal. Les quelques mesures connues avant les années 1980 ne concernaient que quelques stations (Kayes, Bakel, Dagana...) et étaient le plus souvent limitées dans le temps (RIOU, 1936 ; SEGUY, 1955 ; MANDIN, 1957 ; MICHEL, 1973 ; SENEGAL-CONSULT, 1970 ; SURVEYER-NENNIGER-CHENEVERT, 1972). Depuis 1980, l'ORSTOM a mis en chantier un vaste programme de mesures des flux de matières particulaires dans le bassin du Sénégal (GAC, KANE, 1985).

RIOU (1936) signale des mesures faites en différents points du fleuve, en particulier à Bakel et à Saint-Louis au cours des années 1908, 1934-1935 pour évaluer les débits solides du Sénégal. Cet auteur souligne qu'à partir d'un écoulement total de 39 milliards de m³, la quantité de limons transportés par le Sénégal serait de l'ordre de 4 millions de m³ (30 % se déposeraient dans les plaines d'inondation et 70 % seraient jetés à la mer).

SEGUY (1955) et MANDIN (1957) ont effectué des mesures de matières en suspension à Dagana-Bakel et FADOUGOU au cours de la décrue en 1953 et lors des crues fortes en 1955 et 1956. La charge moyenne des matières en suspension en début de crue a été évaluée à 250 mg/l à Dagana et à 170 mg/l à Bakel. A la pointe de la crue, les deux stations ont donné des résultats sensiblement identiques, les concentrations oscillant entre 80 et 90 mg/l. La turbidité ne représentait aucune tendance systématique d'augmentation ou de diminution en fonction de la profondeur, phénomène caractéristique d'un transport de particules très fines.

Ces premières mesures sur la charge solide des eaux du Sénégal et l'observation minutieuse du recul des berges ont conduit MICHEL (1967, 1968), MICHEL et SALL (1984) ont souligné l'importance du façonnement continu de la vallée par la crue annuelle, dans l'apport de matériel fin à l'embouchure du fleuve. En effet, l'érosion latérale par le sapement des berges des rives concaves dans les méandres les plus importants serait de l'ordre de 1 à 1,50 m/an : les fractions grossières restent temporairement piégées aux pieds des rives convexes, les limons et les particules argileuses poursuivent avec le flot leur course vers l'aval. En reprenant les mesures de la M.A.S. (Mission d'Aménagement du Sénégal), à la station de Bakel, MICHEL (1970) a estimé l'apport détritique annuel à 2.800.000 tonnes (crue très forte), à 1.900.000 tonnes (crue moyenne) et à 1.000.000 tonnes (crue très faible).

Des contrôles plus précis à la turbisonde ont été réalisés par SENEGAL-CONSULT (1970) avec un suivi quotidien de la charge solide à Kayes (5 km en amont du confluent de la Kolombine et à environ 900 km de Saint-Louis) lors des crues de 1968 et de 1969. Les deux campagnes de mesure de la turbidité qui se sont déroulées du 2 juillet au 30 septembre ont donné des concentrations moyennes quotidiennes de l'ordre de 100 mg/l avec des pointes pouvant atteindre 300 mg/l. Ainsi, les turbidités sont toujours plus élevées en début de crue pour diminuer ensuite progressivement. En année moyenne, l'exportation de matériaux en suspension serait de l'ordre de 2,3 millions de tonnes (dont 300.000 tonnes de matière organique). Par extrapolation, SENEGAL-CONSULT (1970) évalue à 1,4 et 2,9 millions de tonnes les flux détritiques annuels aux stations de Manantali et Bakel.

Nous avons reporté dans le Tableau IV l'ensemble des mesures sur la charge du fleuve Sénégal à Saint-Louis de 1979 à 1982.

TABLEAU IV : BILAN DES FLUX DE MATIERES EN SUSPENSION A L'EMBOUCHURE DU FLEUVE SENEGAL

Date	C (kg/l)	Date	C (kg/l)	Date	C (kg/l)	Date	C (kg/l)	Date	C (kg/l)
1979		1980		1981		1982		1983	
30/08	212.0	16/09	637.1	23/10	110.0	09/08	10.5	29/09	167.0
29/09	209.0	17/08	638.5	26/10	126.7	11/08	8.8	05/10	151.2
1980		19/08	611.8	27/10	120.7	13/08	7.7	06/10	124.7
27/08	205.2	21/08	439.7	27/11	32.3	16/08	10.0	07/10	119.5
25/08	554.1	22/08	490.8	02/12	28.6	18/08	18.4	10/10	113.4
02/09	358.8	23/08	366.0	11/12	21.3	10/08	315.8	13/10	99.4
08/09	188.4	25/08	316.2	16/12	19.2	21/08	356.8	15/10	89.5
15/09	318.1	27/08	319.7	23/12	19.2	27/08	320.0	16/10	98.1
22/09	289.7	28/08	324.5	1982		23/08	354.0	19/10	85.6
14/10	281.4	29/08	257.0	06/01	13.6	24/08	214.5	21/10	78.4
17/10	91.0	31/08	281.0	13/01	14.5	25/08	208.3	22/10	200.2
29/10	95.3	02/09	275.0	20/01	11.4	26/08	275.6	25/10	212.7
12/11	20.5	03/09	302.2	27/01	17.2	27/08	303.6	27/10	206.2
25/11	15.6	04/09	278.2	03/02	20.0	28/08	352.4	30/10	128.7
02/12	17.2	06/09	283.6	10/02	20.2	29/08	414.9	01/11	40.2
10/12	50.6	08/09	267.1	17/02	15.5	30/08	411.2	05/11	81.5
1981		09/09	295.7	24/02	21.9	31/08	339.2	09/11	88.9
06/01	< 10.0	10/09	249.3	03/03	10.1	01/09	353.8	12/11	40.2
13/01	< 10.0	17/09	246.0	10/03	5.3	02/09	382.5	15/11	38.8
20/01	< 10.0	14/09	273.5	17/03	10.4	03/09	343.7	18/11	41.5
27/01	< 10.0	15/09	303.8	24/03	21.9	04/09	269.0	21/11	21.9
23/06	29.8	16/09	199.8	31/03	8.4	05/09	350.1	25/11	9.9
25/06	32.1	18/09	243.1	14/04	22.2	07/09	299.6	29/11	11.2
30/06	29.2	20/09	248.6	21/04	16.6	08/09	271.9	02/12	20.2
03/07	26.0	21/09	263.4	28/04	30.0	09/09	260.3	05/12	28.4
06/07	38.6	22/09	208.6	05/05	28.4	10/09	238.6	08/12	15.8
09/07	35.1	24/09	201.6	12/05	34.8	11/09	262.3	14/12	12.0
12/07	28.3	26/09	113.5	19/05	24.6	12/09	276.3	14/12	10.4
15/07	29.5	27/09	195.8	26/05	50.3	13/09	190.3	17/12	15.5
18/07	10.3	28/09	150.3	02/06	36.1	15/09	192.6	20/12	24.6
21/07	6.8	30/09	174.4	09/06	37.2	16/09	161.8		
24/07	16.0	05/10	131.4	16/06	40.5	17/09	145.7		
27/07	15.9	07/10	130.4	23/06	57.3	18/09	137.7		
30/07	26.5	10/10	130.4	30/06	31.8	19/09	191.4		
05/08	644.9	13/10	136.4	07/07	58.3	20/09	129.3		
07/08	535.1	15/10	134.7	14/07	71.0	22/09	149.3		
09/08	498.1	17/10	139.0	19/07	52.1	23/09	134.1		
10/08	536.9	18/10	143.6	28/07	22.1	24/09	122.6		
11/08	480.5	19/10	133.2	02/08	11.5	25/09	133.2		
13/08	562.8	21/10	136.3	04/08	14.8	26/09	118.3		
15/08	686.4	23/10	147.0	06/08	10.4	28/09	147.0		

Les plus fortes concentrations journalières observées au cours des deux cycles successifs ont été de 686,4 mg/l (15/08/81) et de 415,8 mg/l (20/08/82). Ces valeurs sont bien plus élevées que celles connues antérieurement et sont vraisemblablement liées au fait qu'en période de sécheresse, l'écoulement du fleuve canalisé dans le lit mineur pendant le passage de la première onde de crue provoque des sapements latéraux plus importants des rives.

B. LE PROTOCOLE DES PRELEVEMENTS DE MATIERES EN SUSPENSION

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

Les prélèvements ont été effectués à Diama, au niveau du barrage qui enjambe le fleuve. Chaque échantillon consistait en une prise d'eau de 64 litres à l'aide d'une bouteille à renversement de 1 litre munie d'un messenger, les prélèvements successifs se faisant sur sept points du profil en travers du fleuve et à différentes profondeurs. Cette technique est évidemment assez rudimentaire, mais elle présente l'avantage d'allier rapidité et simplicité dans le prélèvement. Le traitement "in situ" de l'échantillon prélevé a consisté à déverser les 64 litres dans un fût plastique. L'objectif étant de ramener rapidement à 1 litre le volume à acheminer vers le Laboratoire, nous avons procédé par décantation accélérée ou floculation en additionnant 5 cc d'HCL dans le fût. Au bout de 24 heures, on procède, à l'aide d'un tube recourbé, au siphonnage de l'eau claire surnageante ; le volume restant (un peu moins de 10 litres) est alors transvasé dans une dame-jeanne récipient en verre qui permet de visualiser 24 heures plus tard la dernière opération de siphonnage. En fin d'opération, le litre recueilli est transféré au laboratoire d'hydrogéochimie de l'ORSTOM à Dakar. Le procédé de floculation pouvant entraîner des modifications dans les échantillons, ceux-ci ont été lavés par centrifugation à l'eau distillée (4 lavages successifs sur les résidus obtenus), puis séchés à l'étude à 80° C et pesés.

Ainsi 81 échantillons pour les matières en suspension ont été recueillis (25 en 1989 et 55 en 1990) pour déterminer les principales caractéristiques du transport solide en suspension et évaluer les flux particuliers annuels.

C. EVOLUTION SAISONNIERE DE LA TURBIDITE A LA STATION DE DIAMA AU COURS DU CYCLE HYDROLOGIQUE 1989-1990

Les variations saisonnières de la turbidité des eaux du Sénégal sont très visibles et il est aisé d'en esquisser le schéma général. Pendant la saison des hautes eaux, les eaux sont extrêmement turbides en raison de leur importante charge en limons, leur couleur est alors "jaune salé". Le transport solide est élevé, ce qui se traduit par une diminution importante de la profondeur de disparition du disque de Secchi (entre 13 et 15 cm) et des conductivités faibles. Au cours de cette période, la Basse vallée et le delta du Sénégal sont uniformément soumis aux flots de la crue annuelle du fleuve ; l'ensemble de la zone est homogène.

Dès l'amorce de la décrue, l'éclaircissement des eaux fluviales s'opère mais dans deux domaines distincts :

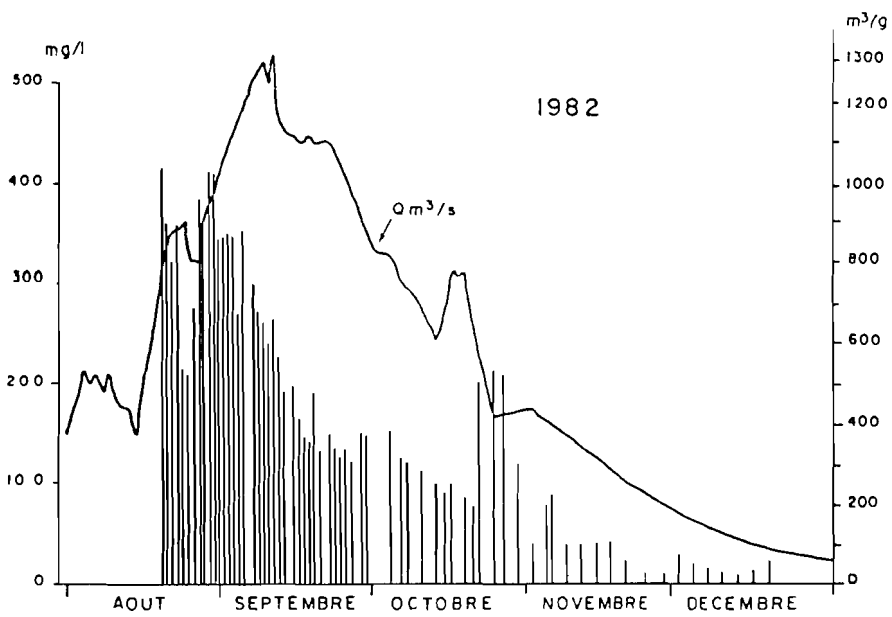
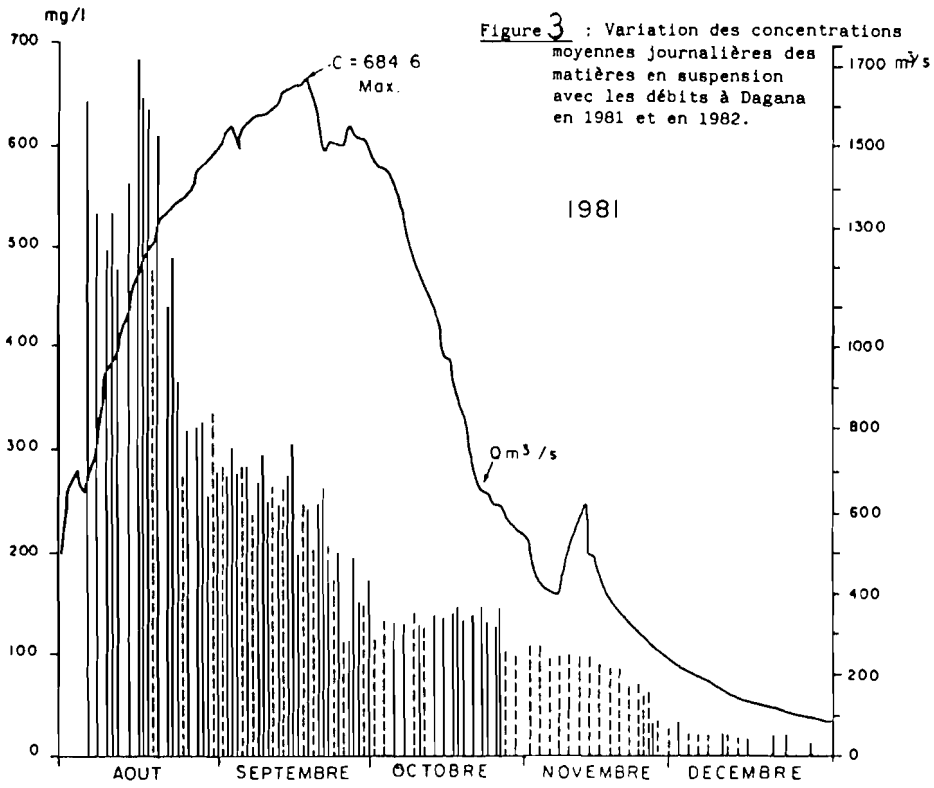
- dans l'estuaire du fleuve Sénégal, dont la limite amont est imposée par le barrage anti-sel de Diama, dès la fermeture des vannes du barrage de Diama, l'intrusion des eaux marines reprend sous l'effet de l'onde de marée. Les eaux douces estuariennes sont progressivement diluées et intégrées aux eaux océaniques et deviennent rapidement "bleu-sombre" ;

- dans la zone de retenue du barrage de Diama (zone de stockage de l'eau et de la matière), s'opère une lente décantation : c'est le site privilégié de l'empilement des alluvions fluviales, cela s'accompagne d'un éclaircissement progressif des eaux, leur couleur est alors "bleue-claire". Il faut souligner, à l'instar de REIZER (1974), que la diminution de la turbidité dès l'amorce de la décrue est vraisemblablement liée au mélange des eaux de ruissellement (issues de la partie du bassin soumise au régime tropical de transition) et des eaux de vidanges des réserves supérieures. On retrouve ici le phénomène classique engendré par la présence de plaines d'inondation qui jouent le rôle de filtres et ne restituent au collecteur que des eaux limpides délestées de leur charge solide (GAC, 1979 ; GAC et TARDY, 1980).

Nous avons reporté dans le tableau V, l'ensemble des mesures sur la charge solide du fleuve Sénégal à la station de Diama-amont.

TABLEAU V : BILAN DES FLUX DE MATIERES EN SUSPENSION A LA STATION DE DIAMA-AMONT

DATE	C mg/l	DATE	C mg/l	DATE	C mg/l
<u>1989</u>		<u>1990</u>			
03.03.89	13,8	03.01.1990	36,8	09.09.1990	289,5
03.08.89	12,3	10.01. "	17,7	12.09. "	271,5
06.08.89	11,5	18.01. "	34,4	14.09. "	124,3
09.08. "	22,1	26.01. "	13,5	17.09. "	91,9
12.08. "	6,7	02.02. "	39,5	21.09. "	137,3
15.08. "	8,9	07.02. "	34,3	23.09. "	162,6
18.08. "	5,9	14.02. "	40,9	25.09. "	79,2
21.08. "	543,4	19.02. "	35,9	26.09. "	111,2
23.08. "	488,1	03.03. "	40,9	02.10. "	76,7
27.08. "	568,1	10.03. "	32,9	04.10. "	75,7
01.09.89	740,6	07.04. "	25,7	17.10. "	18,1
03.09. "	738,8	13.04. "	30,5	23.10. "	36,8
06.09. "	521,4	21.04. "	39,6	06.11. "	19,7
07.09. "	434,3	08.05. "	12,7	16.11. "	24,0
09.09. "	413,9	15.05. "	29,3	19.11. "	20,0
11.09. "	347,9	18.05. "	17,7	30.11. "	41,9
13.09. "	323,8	30.07. "	10,2		
15.09. "	263,2	01.08. "	5,7		
20.09. "	257,0	05.08. "	6,9		
23.09. "	212,8	09.08. "	19,3		
25.09. "	199,6	12.08. "	366,7		
27.09. "	163,2	14.08. "	331,5		
29.09. "	167,3	16.08. "	321,4		
01.10. "	127,7	18.08. "	245,6		
16.10. "	52,0	20.08. "	175,3		
14.11. "	4,0	22.08. "	245,0		
27.11. "	10,8	24.08. "	282,5		
29.11. "	5,9	26.08. "	249,1		
05.12. "	7,2	28.08. "	281,7		
20.12. "	8,8	30.08.90	378,9		
27.12. "	12,3	01.09. "	244,2		
		03.09. "	251,0		
		05.09. "	306,8		



Les plus fortes concentrations journalières observées au cours des deux cycles successifs ont été de 740,6 mg/l (01.09.89) et de 378,9 mg/l (30.08.90). Ces valeurs, bien que relativement tardives sont élevées et comparables à celles enregistrées à Saint-Louis : 686,4 mg/l (15.08.81) et 415,8 mg/l (20.08.82) durant des années de sécheresse. Nous savons qu'en période de déficit hydrique, l'écoulement du fleuve canalisé dans le lit mineur pendant le passage de la première onde de crue provoque des sapements latéraux plus importants des rives. Comme ceci a été déjà souligné pour le Chari (CARDE, 1972 ; CHOURET, 1977), pour la SAGANA (NOUVELOT, 1972), pour le BANDAMA (LENOIR, 1972 ; MONNET, 1972), pour la Gambie (LO, 1984) pour le Sénégal (GAC et KANE, 1985), les turbidités maximales précèdent toujours la pointe de crue (Fig. 3 et 4). Il paraît aussi que l'écoulement fluvial contrôlé, entraînant des débordements moins importants provoque des sapements latéraux intenses dans le chenal ; l'incidence majeure est un décalage des dates d'occurrence des plus fortes concentrations qui s'établissent en fin août-début septembre.

Les variations journalières des concentrations des matières en suspension sont très importantes pendant la saison des hautes eaux et extrêmement faibles la saison sèche. L'évolution saisonnière montre :

- une augmentation rapide des débits solides avec l'arrivée des eaux de la crue, selon GAC (1990) "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".

- les concentrations restent relativement élevées (entre 100 et 200 mg/l) jusqu'en fin septembre-début octobre ;

- dès le mois d'octobre, les charges solides diminuent très rapidement (c'est l'annonce de la décrue). Avec l'achèvement de la saison des pluies, le développement de la végétation atténue le transport des matériaux en suspension ; la dégradation des sols est moindre et les eaux n'assurent plus que l'évacuation des fines particules déjà libérées. Les eaux deviennent limpides ; même avec la restitution progressive au fleuve des eaux d'inondation du lit majeur, des eaux d'infiltration et la vidange des nappes, les concentrations de matières en suspension diminuent fréquemment en dessous de 20 mg/l. Des lâchers d'eau depuis Manantali peuvent néanmoins augmenter les concentrations pendant la saison sèche.

DIAMA 1989

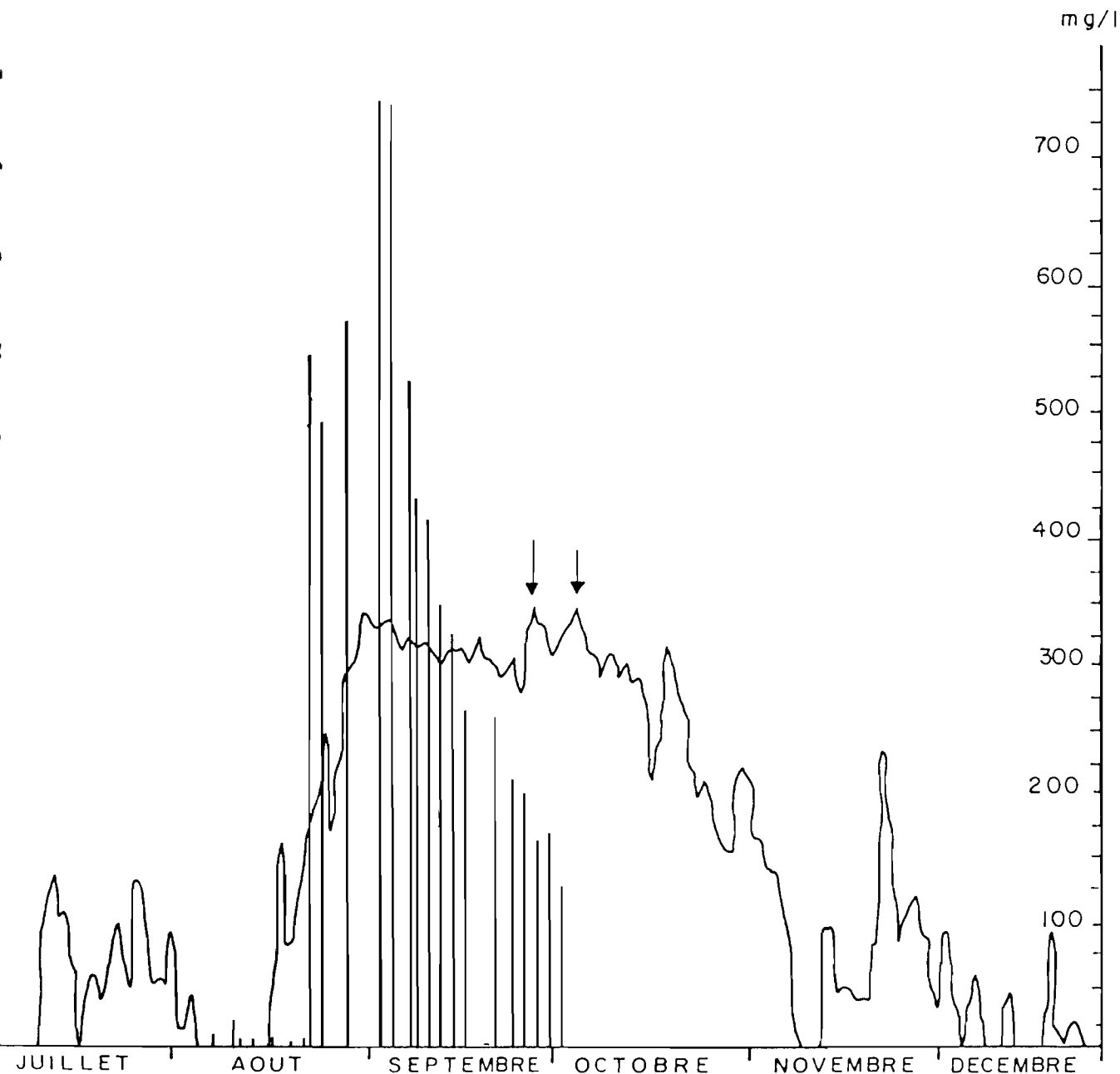


Figure 4 : Variation des concentrations moyennes journalières des matières en suspension avec les débits à Diama en 1989.

Comme l'ont déjà souligné GAC et KANE (1985) "l'acquisition de la charge solide et les mécanismes, qui de l'amont vers l'aval des bassins versants président, règlent et contrôlent les variations brutales des concentrations, restent mal connus. Les nombreuses études menées dans ce domaine ont montré que la charge en suspension est plus dépendante de la période de l'année que du débit".

Ainsi, on a coutume de distinguer trois phases (GAC et KANE, 1985, GAC, 1990) :

- une période d'érosion précoce se traduisant par une augmentation rapide de la turbidité et du débit ;
- une phase d'érosion tardive, de moindre ampleur où la charge en suspension diminue dans le cours d'eau alors que les débits s'accroissent. C'est la fin de l'érosion des versants et surtout du sapement latéral des berges et du creusement du lit mineur de la rivière. La charge solide initiale est fortement diluée par une forte augmentation de la lame d'eau écoulée ;
- enfin une période d'alluvionnement, qui se traduit par une diminution simultanée de la turbidité et des écoulements, c'est la phase de sédimentation des alluvions dans le lit mineur.

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

Les flux détritiques particuliers d'origine continentale à la station de Diama ont été calculés à partir des bilans journaliers lors que les mesures de turbidité se faisaient quotidiennement (en général durant les mois d'août et de septembre) ou des bilans hebdomadaires lorsque les contrôles de la charge solide étaient réalisés à intervalles plus espacés (octobre à la fermeture des vannes du barrage de Diama).

La masse de sédiment est obtenue de manière classique par la formule :

$$M = Cs \times V \times 86.400$$

Cs = charge solide en mg/l ou gr/m³

V = volume moyen journalier en m³/s

Le tableau VI indique l'importance mensuelle et annuelle des flux de matières en suspension transitant par les vannes du barrage de Diama pour le cycle hydrologique 1989-1990.

TABLEAU VI : BILAN DES FLUX DE MATIERES EN SUSPENSION

MOIS	Concentration mg/l	Volume égoulé en m ³	Masse (en tonne)
Juillet		570. 918. 540 6,53 %	
Août	505,6	1. 129. 715. 040 12,95 %	571. 190 29,95 %
Septembre	349,7	3. 207. 751. 080 36,68 %	1. 122. 000 58,77 %
Octobre	72,9	2. 787. 688. 500 31,88 %	203. 480 10,66 %
Novembre	12,4	846. 927. 540 9,68 %	10. 566 0,55 %
Décembre	7,4	199. 851. 420 2,28 %	1. 480,54 0,07 %
Cycle Hydrologique		8. 742 ₉ 912. 120 8,7.10 ⁹	1. 908. 716,54

Le cycle hydrologique 1989-1990 donne un apport de 1.900.000 tonnes qui transitent au barrage de Diama. Cet afflux de matières en suspension est à rapprocher de ceux obtenus à la station de Saint-Louis avec des apports à l'océan de 2.350.000t en 1981-82 et de seulement 1.185.000t en 1982-83. Cependant toute tentative de comparaison des résultats en régime naturel et en situation d'après-barrage paraît prématurée. Quel est le rôle de réservoir de Manantali dans le piégeage des sédiments? Le système hydraulique mis en place en remplacement du fonctionnement hydrologique naturel a-t-il des répercussions sur l'érosion latérale et le sapement des berges ? et.

A l'échelle mensuelle, les mois d'août, de septembre et d'octobre rassemblent la quasi totalité (99 %) de la charge solide. Il faut souligner la diminution drastique du tonnage à partir du mois de novembre (0,55 %), contrairement à la situation d'avant barrage, et le pourcentage insignifiant du mois de décembre (0,07 %). Plus de la moitié annuelle des flux annuels sont enregistrés en septembre (58,77 %) au cours du cycle hydrologique 1989-1990.

En définitive, le transport solide du fleuve Sénégal a été relativement faible au cours de la saison hydrologique 1989-1990 (en moyenne de l'ordre de 2 millions de tonnes). Il s'agit essentiellement de matériaux fins qui, comme le souligne FRECAUT (1981), ont une double origine : "ils proviennent soit directement des plaines alluviales et des lits fluviaux (charge endogène), soit des versants sous l'action de l'érosion fluviale et du ruissellement superficiel (charge exogène) : la distinction entre les apports propres aux versants et à la plaine alluviale est cependant difficile".

BIBLIOGRAPHIE

- BERTHELOT (R), 1956 - Mesures des débits solides sur la Logone. Rapport ORSTOM, Fort-Lamy (Tchad), ser. multigr. 6 p.
- BILLON (B), 1968 - Mise au point des mesures des débits solides en suspension (République du Tchad). Cah. ORSTOM, ser. Hydrol., 2 : 3-14
- CARRE (P), 1967 - Quelques aspects du régime des apports fluviaux de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. Cah. ORSTOM, ser. Hydrol, IX, 1 : 19-45
- COLOMBANI (J), 1967 - Contribution à la méthodologie des mesures systématiques des débits solides en suspension. Cah. ORSTOM, ser. hydrol, IV, 4 : 4-27
- FRECAUT (R), 1982 - Eléments d'hydrologie et de dynamique fluviales. Tome 1 : hydrologie et dynamique fluviales des régions chaudes et humides des basses latitudes. Publication Université Nancy. II, 147 p.
- GAC (J.Y.), 1979 - Géochimie du lac Tchad. Bilan de l'altération de l'érosion et de la sédimentation. Thèse Université Louis Pasteur, Strasbourg, 249 p. Trav. Doc., ORSTOM, Paris, 123, 251 p.
- GAC (J.Y.), KANE (A), 1985 - Les flux continentaux particuliers et dissous à l'embouchure du fleuve Sénégal. Rapport ORSTOM, Dakar, 79 p.
- GAC (J.Y.) et al, 1990 - Rapport scientifique n° 3, Projet EQUÉSEN, Environnement et qualité des eaux du Sénégal. 63 p, octobre 1990.
- GAC (J.Y.) et al, 1990 - Rapport scientifique n° 2. Projet EQUÉSEN, Environnement et qualité des eaux du Sénégal. 54 p, annexes, avril 1990.
- KANE (A), 1985 - Le bassin du Sénégal à l'embouchure. Flux, continentaux dissous et particuliers. Invasion marine dans la basse vallée du fleuve. Contribution à l'hydrologie fluviale et à la dynamique estuarienne en milieu sahélien. Thèse 3^e cycle, Université Nancy II, 205 p.

LO (H.M.), 1984 - Le bassin de la Gambie en amont de Galoumbou ; contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviales en domaine tropical humide africain (République de Guinée et du Sénégal). Thèse de géographie, Nancy II, 396 p.

MANDIN (R), 1957 - Rapport sur les mesures de débits solides à Dagana-Bakel et Fadougou. Rapport M.A.S., Saint-Louis (Sénégal), 6 p.

HEYBECK (M), 1984 - Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. Thèse doct. d'Etat, Sci-Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI, 558 p.

MICHEL (P), SALL (M), 1984 - Dynamique des paysages et aménagement de la vallée alluviale du Sénégal. Mem. ORSTOM, 106 : 89-109.

Ministère de l'hydraulique et du Développement rural - Bulletins hydrologiques mensuels. Direction du Génie Rural et de l'Hydraulique.

nouvelot (J.F.), 1972 - Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau au Cameroun de 1969 à 1971. Cah. ORSTOM, Ser. Hydrol, IX, 1 : 44-74.

OLIVRY (J.C.), 1983 - Contribution de la prévision en hydrologie à l'éventuelle maîtrise des ressources déficitaires du fleuve Sénégal pour la saison, 1983-1984. Rapports ORSTOM, Dakar, 9 p.

OMVS, 1989 - Bilan de gestion du fleuve Sénégal pendant la campagne de saison sèche 1988-1989 (novembre 1988 - mai 1989) OMVS, Haut-Commissariat, Dakar, juin 1989, 14 pages, annexes.

OMVS, - Bulletin d'information sur la gestion de l'eau régularisée du fleuve Sénégal, n° 1 à n° 7.

PIEKUTOWSKI (T), 1990 - Déversements au barrage de Diama, 1986-1989. Rapport établi pour le projet USAID-OMVS de suivi des eaux souterraines, 8 p, annexes, St-Louis, juin 1990.

RIOU (E), 1936 - Rapport général. Proposition pour l'amélioration de la navigabilité du fleuve Sénégal. Aménagement de la vallée et utilisation de ses forces hydrauliques. Rapport MAS, Bull 53, sept 36, Saint-Louis Sénégal, 80 p. Tabl.

ROCHETTE, 1974 - Le bassin du fleuve Sénégal. Paris. ORSTOM, Monog. hydrol. 1, 391 p.

SEGUY (G), 1955 - Rapport sur les mesures de débits solides du fleuve Sénégal à Dagana (campagne 1955). Bull de la M.A.S., 42.

SENEGAL-CONSULT, 1970 -
SURVEYER-NENNINGER-CHENEVERT, 1972

SENEGAL-CONSULT, 1970 - Etude de préinvestissement pour la régularisation du fleuve Sénégal. Projet d'un système de contrôle des débits dans le bassin du haut-Sénégal. Volumes 3A, 3B, Hydrologie textes et annexes, appendices.

SURVEYER, NENNINGER, CHENEVERT, 1972 - Etude de la navigabilité et des ports du fleuve Sénégal. Etudes portuaires à Saint-Louis Kayes et Ambidedi.

En collaboration avec Chr. OSTENFELD et W. JONSON DANISH-Institute of applied Hydraulics. Projet ONU 51/71. St-Louis, OMVS.

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 Recherche à l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, ORSTOM
Centre de Dakar (Sénégal)*

I. L'EROSION MECANIQUE ET LES FLUX PARTICULAIRES DE L'AMONT

Les processus de l'ablation des versants par les eaux de ruissellement sont étudiés à l'exutoire de Bakel qui contrôle l'ensemble du bassin amont du fleuve Sénégal. Les mesures pendant la crue y sont quotidiennes depuis 1979. Nous disposons actuellement de 12 cycles hydrologiques complets dont 8 se sont déroulés avant la mise en service du barrage amont de Manantali et 4 qui correspondent à la gestion artificielle d'environ 60 % des ressources en eau du fleuve Sénégal.

1. Les flux de sédiments issus de l'érosion des sols

Le flux moyen annuel de matières exportées est de l'ordre de 2,3 millions de tonnes (Mt) avec des valeurs extrêmes en 1990 (1,0 Mt) et en 1985 (4,0 Mt). La concentration moyenne journalière interannuelle s'élève à 280 mg/l.

Cycle Hydrologique	Tonnage (10 ⁶ t)	Volume (10 ⁹ m ³)	Concentration (mg/l)
1979/80	1,85	9,56	193
1980/81	2,62	12,24	215
1981/82	2,38	13,37	178
1982/83	1,65	9,62	171
1983/84	1,65	6,89	238
1984/85	1,37	6,78	202
1985/86	4,00	11,20	358
1986/87	3,17	10,82	293
1987/88	1,63	6,94	235
1988/89	3,93	13,50	291
1989/90	2,20	12,36	178
1990/91	1,00	7,10	141

La répartition annuelle de ces flux de matières est à l'image de celle des débits, saisonnière et invariable d'une année sur l'autre du moins avant la construction du barrage de Manantali dont les lachûres successives entraînent des reprises épisodiques dans la charge solide. Globalement cependant c'est au mois d'août que transitent les flux de suspensions les plus abondants (36 % en moyenne de l'apport annuel).

Entre 1979 et 1990, sur l'ensemble du bassin versant amont du Sénégal, l'érosion mécanique spécifique est passée de 6,3 t/km²/an en 1984/85 à 18,4 t/km²/an le cycle suivant, en 1985/86. Ces deux cycles correspondent à des situations hydrologiques particulières : le cycle 84/85 est le cycle le plus sec, en revanche le cycle 85/86 est un cycle relativement humide faisant suite à trois années sèches. Il est remarquable également de constater que l'année la plus humide (81/82) n'a un taux d'érosion mécanique que de 10,9 t/km²/an : ce faible taux est attribuable au fait que ce cycle suit un cycle également humide.

Ainsi l'érosion mécanique n'est pas seulement tributaire de l'hydrologie de la crue considérée mais aussi de celle de l'année précédente et de "l'état du bassin versant" au moment d'une nouvelle phase d'érosion précoce.

2. Mécanismes de l'acquisition de la charge solide par les fleuves des régions tropicales.

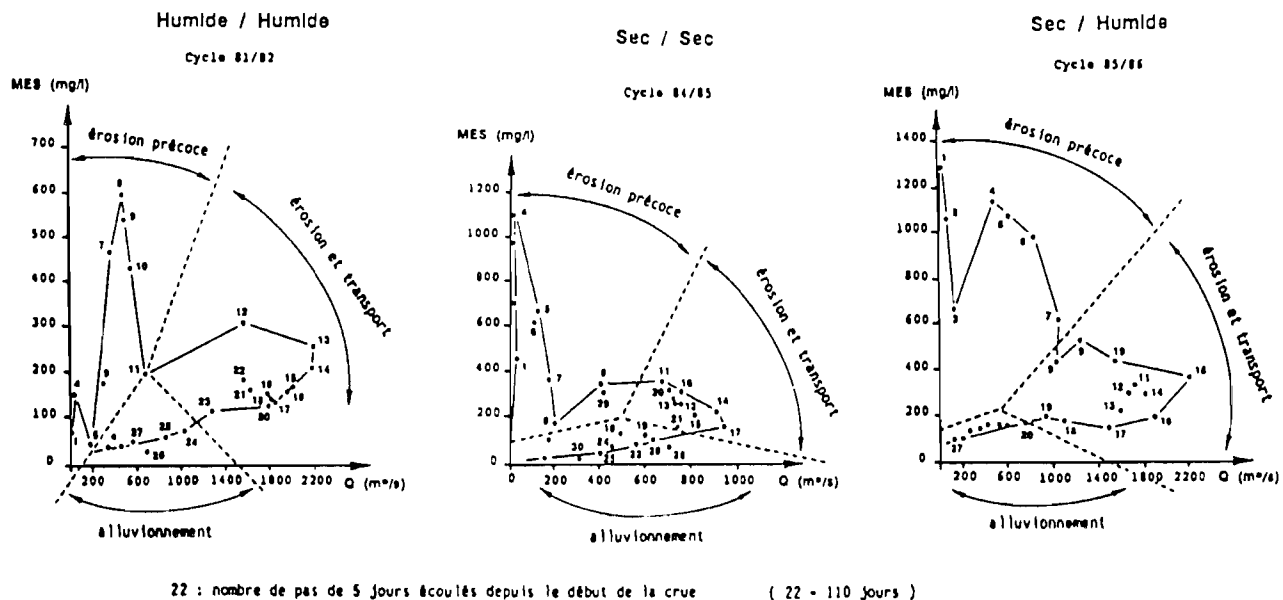
Ils sont extrêmement complexes et de nombreux colloques et séminaires leur sont consacrés depuis de nombreuses années. Leur approche ne peut être le fait de mesures ponctuelles mais découle de longues séries d'observations comme c'est le cas pour le fleuve Sénégal. Nous présentons ici une vision plus globale sur 11 années de mesures quotidiennes.

a) *Les pulsations journalières des concentrations en MES*

Les trois grandes phases déjà décrites dans le rapport scientifique n°2 (érosion précoce, tardive et alluvionnement) correspondent à des à-coups journaliers des concentrations en MES. Afin de mettre en évidence d'une part, la succession dans le temps de ces trois phases et d'autre part, les paramètres qui règlent cette succession, les valeurs moyennes de concentration en MES sur un pas de temps de 5 jours sont représentées en fonction du débit. Ce pas de temps correspond au temps moyen d'une pulsation et, de plus, il est un juste compromis entre une échelle mensuelle qui masque par sa durée les événements majeurs se situant à l'échelle journalière et une échelle journalière difficile à manipuler. Trois cycles hydrologiques correspondant à trois cas de figure différents ont été choisis : le cycle 81/82 est un cycle humide suivant un cycle humide, le cycle 84/85 est un cycle sec suivant un cycle sec, le cycle 85/86 est un cycle humide suivant un cycle sec (Fig.1).

Les figures obtenues décrivent des boucles analogues à des pulsations. Elles sont liées aux variations des débits et au laps de temps écoulé depuis l'amorce de la crue. Pour les deux cycles faisant suite à un cycle sec, les premiers débits sont caractérisés par de fortes concentrations ; par contre en

Fig.1.- Variations journalières des concentrations en MES en fonction des débits du Sénégal au bief de Bakel



81/82, cette première impulsion est réduite car ce cycle suit une année humide. Une deuxième pulsation est enregistrée en 81/82 et 85/86. Elle est absente en 84/85 car c'est un cycle sec : tout se passe comme si la tête de l'hydrogramme avait été rasée, ce qui se traduit ici par l'absence de la deuxième impulsion. Cette seconde boucle de l'érosion précoce est centrée sur les débits de 500 m³/s et traduit la rapidité de la montée des eaux : plus cette montée est rapide et brutale, plus le ruissellement qui en résulte est érosif. La dernière boucle, toujours présente, marque dans un premier temps la période d'érosion tardive puis d'alluvionnement. Elle est caractérisée par des concentrations toujours inférieures à 500 mg/l et les débits les plus importants de la crue considérée. Cette boucle se termine par un pseudo-palier qui traduit la phase d'alluvionnement qui dure tout le reste de l'année jusqu'à la crue suivante. Apparemment, cet alluvionnement commencerait dès que les concentrations deviennent inférieures à 200 mg/l.

La période d'érosion précoce se termine entre le 40^{ème} (en 85/86) et le 55^{ème} (en 81/82) jour. Ensuite la pulsation d'érosion tardive s'étend jusqu'aux environs du 110^{ème} jour. Ainsi, ce qui commande la succession dans le temps des différentes phases d'érosion n'est pas seulement la valeur du débit mais aussi le laps de temps écoulé depuis l'amorce de la crue. Il apparaît également que les caractéristiques annuelles d'une crue sont acquises lors de la phase d'érosion précoce dont la physionomie est fortement dépendante de l'intensité de la crue de l'année précédente et de la répartition des pluies de l'année considérée.

b) Relations entre volumes d'eau écoulés et tonnages solides exportés

Cette importance du laps de temps écoulé depuis l'amorce de la crue a conduit à rechercher la relation existant entre la somme des tonnages solides exportés (ΣT) et la somme des volumes écoulés (ΣV). Les courbes ainsi obtenues matérialisent l'évolution des teneurs en MES dans les eaux du fleuve. Les sept années étudiées (de 1981 à 1987) qui ont précédé la construction du barrage de Manantali ont été reportées sur le même graphique (Fig.2).

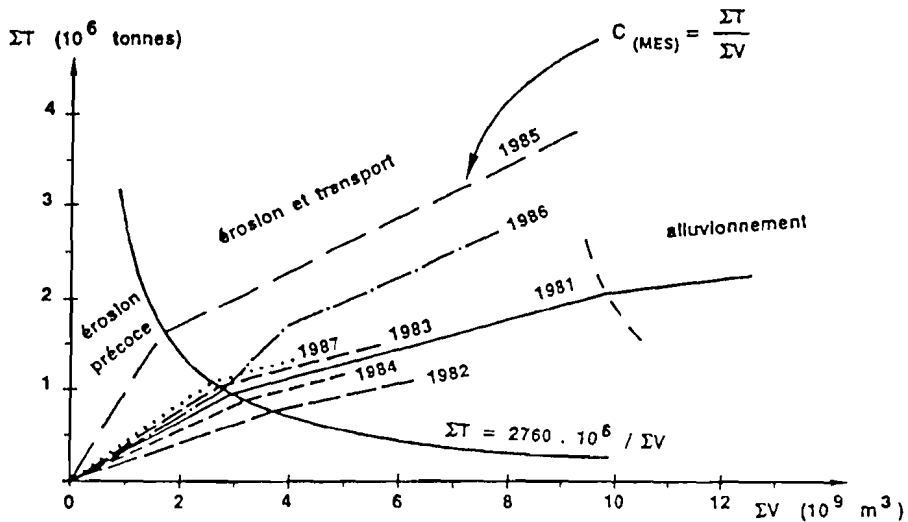


Fig. 2.-Evolution comparée des tonnages en suspension cumulés et des volumes d'eau écoulée cumulés

Chaque courbe est décrite par deux segments de droite; ce changement de pente correspond au changement de la capacité de réponse du bassin versant au cours de la crue. Il est remarquable que ces points de rupture de pente s'alignent sur une courbe fonction de $1/\Sigma V$. Cette courbe particulière caractérise l'aptitude du bassin versant à répondre aux stimulations des pluies. En deçà de cette courbe, les différents cycles étudiés décrivent un éventail caractérisant les modalités de l'année considérée. Au delà du point de rupture de pente, l'évolution d'une année sur l'autre est sensiblement identique ; les courbes décrivent alors une droite, ce qui signifie que la charge est constante durant cette période du cycle. D'autre part, ces droites sont plus ou moins parallèles, ce qui signifie que cette concentration est une constante intrinsèque du bassin versant. Si on avait prolongé les prélèvements journaliers dans l'année, il semble que les courbes montreraient un palier à cause du manque de dispo-

nibilité du matériel à éroder au bout d'un certain laps de temps, ce qui correspondrait à la phase d'alluvionnement. On en devine une amorce lors du cycle 81/82. Enfin, la concentration est toujours plus importante dans la première phase. Pour certaines années particulières, on peut envisager que la concentration observée durant la première phase soit égale à celle de la seconde phase, on aboutirait alors à une droite et on peut supposer que cette concentration est la concentration minimale du bassin versant. Pour le Sénégal cette teneur limite minimale est de l'ordre de 160 mg/l.

Finalement, le cumul des transports solides journaliers et des volumes d'eaux qui les véhiculent fournit une vision nouvelle sur le déterminisme des processus d'érosion. La courbe représentative de l'évolution comparée de $\Sigma T/\Sigma V$ présente une rupture de pente majeure qui manifestement est lié à une modification radicale des capacités érosives des averses. Ce changement de pente indique de manière remarquable le passage d'une phase d'érosion précoce, dont les expulsions solides consistent surtout en du matériel repris, à une phase d'érosion et de transport qui concerne l'érosion effective du bassin. Cette transition est accentuée par l'"explosion" de la végétation dont le développement constitue un frein puissant à l'exportation lointaine des horizons superficiels des sols.

Une nouvelle approche de ces mécanismes d'acquisition de la charge solide est actuellement testée par le suivi de l'évolution de la concentration moyenne cumulée (Fig. 3). L'allure de la courbe n'est pas sans rappeler une certaine forme du tarissement. Cette démarche nouvelle fera l'objet de développement dans le rapport sur l'érosion mécanique qui devrait paraître en mai 1991 (voir ci-dessous).

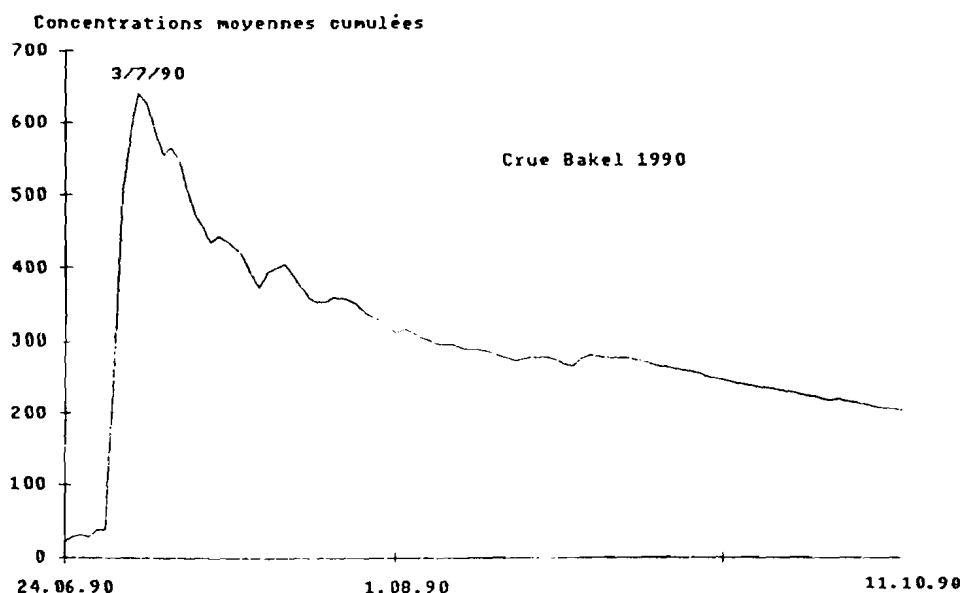


Figure 3. Evolution de la concentration moyenne cumulée (cycle 1990/1991)

Jean-Yves GAC⁽¹⁾ et D. ORANGE⁽²⁾

Projet CEE (EQUESEN) TS 2 0198 F EDB

BILAN DE L'EROSION MECANIQUE
SUR LE BASSIN VERSANT AMONT DU SENEGAL
AU BIEF DE BAKEL

Ci-dessous Bakel terminus de la navigation sur le Sénégal, où parvient la flottille du lieutenant de vaisseau Aube. Le poste [au centre le fort et la Tour Joris à gauche la Tour du Mont-aux-Singes] a été construit en 1819 par le Génie sur un rocher dominant le fleuve Sénégal. De 1853 à 1855, El Hadj Omar n'ose pas attaquer le fort, ce que fera, en vain, Mahmoudou Lamine en 1885. En 1958, Bakel, chef-lieu de cercle, était une ville de 2 300 habitants, dont 4 Européens.



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

(2) ORSTOM, Détaché au Centre de Géochimie de la Surface (CNRS), 1 rue Blessig, 67084 Strasbourg (France)

**BILAN DE L'EROSION MECANIQUE
SUR LE BASSIN VERSANT AMONT DU SENEGAL
AU BIEF DE BAKEL**

**SOMMAIRE
ABSTRACT
INTRODUCTION**

CHAPITRE I : PRESENTATION DES DONNEES

- I.- LES DONNEES ANTERIEURES
 - A. Historique
 - B. Discussion
- II.- LES DONNEES ACTUELLES
 - A. Méthodes de prélèvements
 - B. Calendrier des prélèvements
 - C. Les données in-extenso

CHAPITRE II : LES MATIERES EN SUSPENSION DU FLEUVE SENEGAL SUR LE BASSIN AMONT

- I.- LES FLUX DE MATIERES EN SUSPENSION
 - A. Evolution des matières en suspension
 - 1) Variabilité journalière des concentrations
 - 2) Recherche de corrélations
 - B. Méthodes de calcul des flux de matières
 - C. Tonnages exportés par le Sénégal à Bakel
- II.- QUALITE CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION
 - A. Caractères granulométriques
 - B. Composition chimique des MES
 - C. Le carbone organique particulaire (COP)
 - D. Minéralogie des MES

CHAPITRE III : EROSION MECANIQUE

- I.- LES MECANISMES PRESIDANT A L'ACQUISITION DE LA CHARGE SOLIDE
 - A. Rythme saisonnier des concentrations en MES
 - B. Relations entre volumes d'eau écoulés et tonnages solides exportés
 - C. Evolution des concentrations cumulées
 - D. La charge en suspension annuelle du ruissellement superficiel et l'érosion des berges
- II.- BILAN DE L'EROSION MECANIQUE EN DOMAINE SAHELO-SOUDANO-GUINEEN
 - A. Evolution de l'érosion mécanique de 1979 à 1990
 - B. Erosion mécanique par domaine climatique : le cas particulier du plateau Mandingue.

**CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES
TABLE DES MATIERES
ANNEXES**

3 - Application du modèle de mélange au Sénégal

La charge en suspension d'un fleuve est souvent corrélée à son débit. Mais la composante principale du transport solide fluvial étant le ruissellement superficiel sur les versants, il est intéressant de déterminer les relations entre la charge en suspension du fleuve et le débit du ruissellement superficiel. Le problème est double : d'une part, il s'agit de déterminer le volume d'eau ruisselée et d'autre part, de quantifier la charge en suspension du ruissellement.

Après une averse, l'eau qui n'est pas perdue par évapotranspiration, a la possibilité d'emprunter trois itinéraires différents avant d'atteindre l'exutoire du bassin. Elle peut tout d'abord ruisseler à la surface du sol et gagner le fond des vallées par simple écoulement superficiel. Elle peut s'infiltrer dans les horizons supérieurs des sols et participer dès lors à l'écoulement hypodermique. Elle peut enfin, après un laps de temps variable, atteindre la nappe souterraine dont elle assure la recharge. La détermination de la part, qui revient à chacune de ces trois composantes dans l'écoulement total à l'exutoire, n'est réalisable directement que dans le cas de petits bassins versants équipés d'un réseau piézométrique suffisamment dense pour suivre les variations du niveau de la nappe. Cependant, à l'aide de quelques hypothèses simplificatrices, il est possible d'accéder à une connaissance grossière de ce bilan, soit en analysant la forme de l'hydrogramme de crue, soit en utilisant les données acquises sur les matières dissoutes et les matières en suspension.

A partir du découpage des hydrogrammes de crue du fleuve Sénégal à Bakel de 1979 à 1985, le ruissellement superficiel a été évalué à 14% du volume total écoulé, l'écoulement hypodermique à 20% et la contribution des nappes est prédominante avec 66%. Ce résultat est en accord avec les différentes études hydrologiques réalisées dans cette région sahélo-soudanienne où les coefficients de ruissellement annuels mesurés vont de 10 à 20%.

a) Découpage de l'hydrogramme annuel par analyse spectrale de Fourier

La méthode utilisée ici pour séparer les écoulements est inspirée des travaux de JACKSON (1974), MANGIN (1981) et REJO (1985). Elle consiste à appliquer l'analyse spectrale de Fourier aux séries chronologiques des débits moyens mensuels. L'analyse spectrale est utilisée pour détecter les composantes sinusoïdales d'une série temporelle. Ici, le débit moyen mensuel est assimilé à une somme de signaux $x(t)$ d'amplitudes (A et B) et de fréquences (f) différentes, pouvant se décomposer sous la forme :

$$x(t) = A \sin (f.t) + B \cos (f.t)$$

Le tracé du périodogramme permet de mettre évidence la ou les fréquences ayant la plus forte contribution à la variance du signal testé. Dans le cas des débits moyens mensuels du fleuve Sénégal, le système est simple. Il n'apparaît qu'une seule fréquence de coupure (f_c); elle est de $2\pi/12$ rd, ce qui correspond à une période de 12 mois (Fig.4). Dans ces régions à saison des pluies annuelle unique, il est normal de ne voir apparaître qu'une seule périodicité annuelle dans l'écoulement des eaux fluviales.

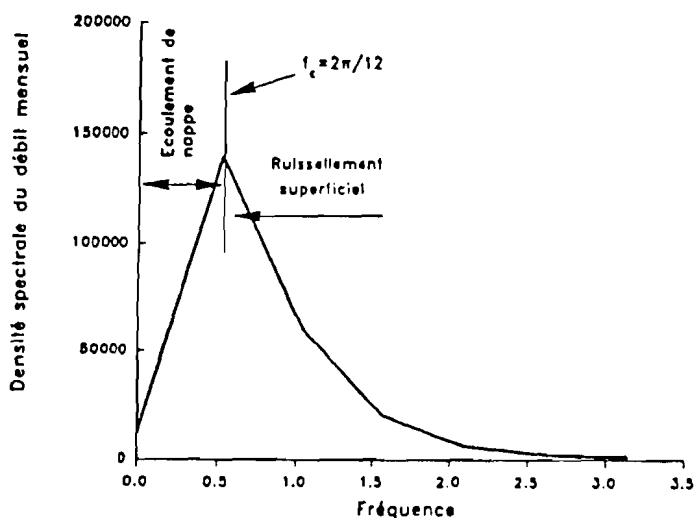


Figure 4.- Périodogramme des fluctuations interannuelles des débits moyens mensuels du fleuve Sénégal.

Cette fréquence de coupure sépare les signaux de basses fréquences, qui correspondent aux événements à fluctuations lentes, des signaux de hautes fréquences associés aux événements à fluctuations rapides. Ils représentent l'écoulement superficiel alors que les basses fréquences matérialisent l'écoulement de nappe.

En reconstituant par une transformée de Fourier le signal dû aux écoulements lents, on détermine, par différence avec le signal réel, la contribution annuelle des eaux de ruissellement superficiel. Le coefficient annuel de ruissellement superficiel K_r obtenu varie de 35 % lors du cycle le plus humide de 1980/81 à 6 % lors du cycle hydrologique le plus sec en 1984/85 (Fig. 5). Sur la période étudiée, il est en moyenne de 23 %.

Par rapport aux résultats de KATTAN (1984), cette méthode surestime légèrement la contribution du ruissellement superficiel à l'exception du cycle sec 83/84. D'autre part, la comparaison des deux méthodes confirme que les événements à fluctuations lentes correspondent à l'écoulement de nappe additionné de l'écoulement hypodermique.

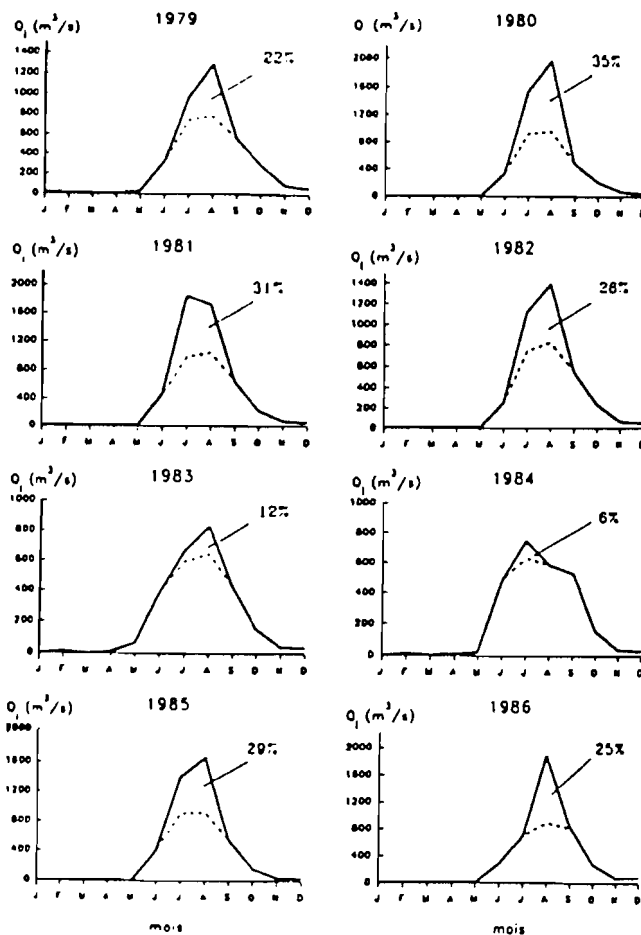


Figure 5.- Découpage par analyse spectrale de Fourier des hydrogrammes de crue du Sénégal de 1979 à 1986.

b) L'érosion des berges et la charge annuelle en suspension du ruissellement superficiel

Si l'on considère que la majorité des sédiments exportés par les fleuves sont produits par l'érosion mécanique et le ruissellement superficiel sur les versants, on peut calculer la charge moyenne en suspension du ruissellement de la manière suivante :

$$C_r = C_{ex} \cdot V_{ex} / V_r$$

où e_x et r désignent respectivement l'exutoire et le ruissellement superficiel, C les concentrations et V les volumes correspondants. Ce modèle ne tient pas compte, en première approximation, du tonnage de sédiments produits par l'érosion des berges.

Le calcul est effectué à partir du volume ruisselé déterminé par l'analyse spectrale. La charge annuelle en suspension du ruissellement varie de 600 mg/l en année humide à 3300 mg/l en année sèche (tableau I). Ce maximum d'érosion

Tableau I

Coefficient annuel de ruissellement superficiel (K_r) et charge en suspension annuelle du ruissellement superficiel (C_r).

Cycle	Q (m ³ /s)	K _r (%)	C _{su} (mg/l)	C _r (mg/l)	KATTAN (1984)		
					E _r (%)	E _n (%)	E _s (%)
1979/80	303	22	193	860	10	12	78
1980/81	387	35	215	610	19	27	54
1981/82	424	31	178	580	11	19	70
1982/83	305	26	171	650	16	26	58
1983/84	218	12	238	1920	13	14	73
1984/85	215	6	202	3270	-	-	-
1985/86	355	29	358	1210	-	-	-
1986/87	343	25	293	1170	-	-	-
Année moyenne	319	23	231	1300	14	20	66

Q module annuel ; C_{su} charge en suspension des eaux du fleuves ; E_r, E_n, E_s contribution des eaux de ruissellement, hypodermiques et de nappe à l'écoulement total

est dû à une montée rapide des eaux de la crue faisant suite à un cycle hydrologique déjà largement déficitaire. En année moyenne, la charge annuelle en suspension est de l'ordre de 1,3 g/l.

Mais pour comprendre la dynamique de l'érosion, il est nécessaire de faire la part entre ce qui est exporté par ruissellement et ce qui revient à l'érosion des berges, définie comme étant le détachement de sédiment du lit et des rives du cours d'eau causé par les courants. L'évaluation de cette érosion à partir de la charge solide en suspension est délicate du fait que l'érosion des berges dépend de plusieurs facteurs tels que la pente, le débit, la végétation et la taille des particules transportées. On considère que l'érosion des berges du Sénégal à Bakel représente 20% de la masse totale annuelle exportée en suspension. Cette estimation est faite en considérant qu'en dehors des périodes de ruissellement superficiel, les sédiments qui sont transportés par le fleuve sont essentiellement arrachés au lit et aux berges. On obtient alors une charge annuelle en suspension du ruissellement superficiel de 1 g/l. Ce chiffre converge vers l'idée d'un ruissellement à charge solide constante de l'ordre de 1 g/l.

c) Contribution saisonnière des différents écoulements en année moyenne

Comme nous le verrons plus loin, la composition chimique des eaux de surface n'est pas très différente de celle des

eaux de l'écoulement hypodermique. Le bilan des exportations en solution peut donc s'établir à partir d'un modèle à deux réservoirs par :

$$C_{ex}.V_{ex} = C_n.V_n + C_s.V_s \quad \text{et} \quad V_{ex} = V_n + V_s$$

où ex, n et s désignent respectivement l'exutoire, la nappe et les eaux de surface, C les concentrations et V les volumes correspondants. C_{ex} et V_{ex} sont connus, il reste à déterminer C_n , C_s , V_n ou V_s . Dans ce modèle, les eaux de surface englobent les eaux hypodermiques et les eaux ruisselées.

Cette première approche considère les concentrations des eaux de nappe et de surface comme constantes au cours du cycle hydrologique. Par analogie avec la répartition des précipitations, il est logique de penser que l'écoulement de surface est nul pendant les derniers mois de la saison sèche, de février à mai. La concentration C_n est donc donnée par l'écoulement du premier mois où l'écoulement de surface s'annule ; les mois suivants, les eaux sont concentrées par évapotranspiration, d'où les valeurs très élevées en mai. Ainsi C_n est fixée à 60 mg/l. On admet aussi par ailleurs que les eaux de surface ont la concentration des eaux de pluie ($C_s=15$ mg/l), ce qui revient à considérer que l'interface sol/air est une surface chimiquement neutre. Cette valeur de la concentration représente en fait la valeur minimale de la concentration des eaux de surface, on détermine donc par cette méthode la contribution minimale des eaux de nappe à l'écoulement total (tableau II).

Tableau II

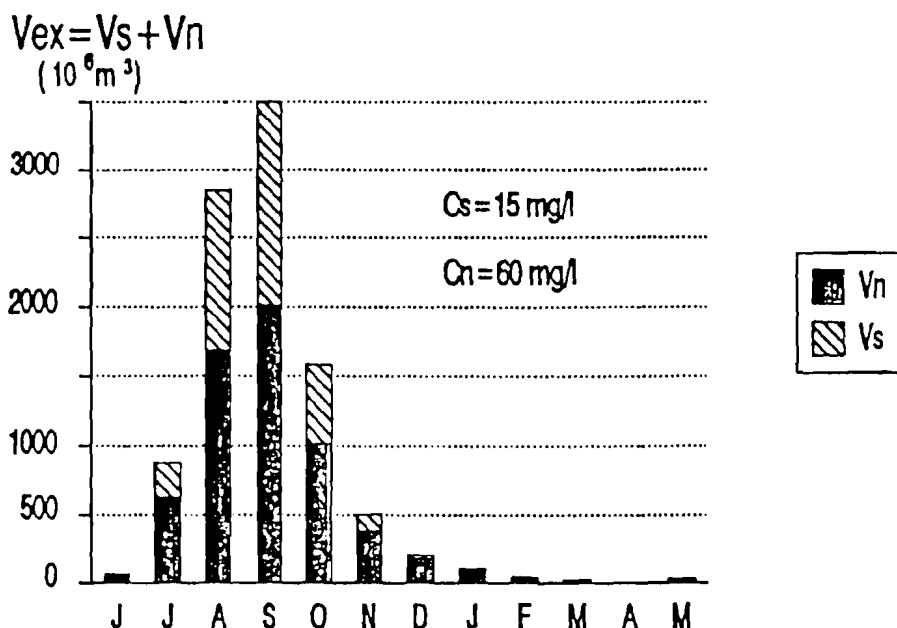
Estimation mensuelle de la contribution minimale des eaux de nappe à l'écoulement total (en année moyenne).

MOIS	C _{ex} (mg/l)	En (%)	VOLUMES (10 ⁶ .m ³)		
			V _{ex}	V _n	V _s
Juin	81,4	100	62,2	62,2	0
Juillet	46,9	71	878,5	623,0	255,5
Août	41,7	59	2849,8	1686,3	1163,5
Sept.	40,8	57	3499,2	2011,1	1488,1
Octobre	44,0	65	1577,6	1017,8	559,8
Nov.	49,5	77	502,8	386,8	116,0
Déc.	54,7	89	200,9	177,8	23,1
Janvier	58,9	97	101,8	98,8	3,0
Février	64,3	100	41,4	41,4	0
Mars	72,4	100	24,1	24,1	0
Avril	80,7	100	5,2	5,2	0
Mai	87,0	100	2,7	2,7	0
Total annuel	-	63	9746,2	6137,2	3609,0

C_{ex} charge totale dissoute des eaux du fleuve ; En contribution des eaux de nappe à l'écoulement de surface ; V_{ex} volume total écoulé à l'exutoire ; V_n , V_s volume des eaux de nappe et de surface s'écoulant à l'exutoire

Finalement, les nappes contribuent au minimum à 63% de l'écoulement total annuel, ce chiffre est à rapprocher des 66% estimés par KATTAN (1984). En septembre et en août, la contribution de l'écoulement de nappe est minimale, respectivement 57% et 59% de l'écoulement total (Fig.6). A l'échelle journalière, ce même calcul montre que les nappes ne participent qu'à 5% des premiers écoulements, ensuite leur contribution ne fait qu'augmenter tout au long de la crue pour s'établir à plus de 90% dès le mois de décembre.

Figure 6.- Contribution saisonnière des différents écoulements à l'exutoire du bassin amont du Sénégal en année moyenne (Vn écoulement de nappe, Vs écoulement de surface, Cn charge dissoute des eaux de nappe, Cs charge dissoute des eaux de surface).



II. FLUX D'ALLUVIONS DANS LA BASSE VALLEE ET A L'EMBOUCHURE

Dans le cadre du projet EQUÉSEN, les alluvions ou sédiments qui transitent dans la basse vallée du Sénégal sont contrôlés d'une part sur le fleuve au barrage de Diama (km 50) et à Richard-Toll (km 170) et, d'autre part sur le canal de la Taoué qui achemine les eaux de la crue fluviale et leur cortège de matières en suspension vers la dépression du lac de Guiers.

1. Flux particuliers au barrage de Diama

Les flux de matières en suspension au barrage de Diama font l'objet des travaux du Département de Géographie de l'Université de Dakar dans le cadre de leur programme sur l'étude géomorphologique et le façonnement des paysages de la basse vallée du Sénégal (références pp. 61/83 de ce rapport).

a) Les débits à Diama de 1986 à 1989

Le barrage anti-sel de Diama a été mis en service le 14 novembre 1985 et les premiers lâchers de crue ont été réalisés le 28 juillet 1986. Entre 1986 et 1989 les ouvertures du barrage de Diama ont été fonction du remplissage du réservoir et de la cote amont. Le seuil adopté pour procéder à des lâchures avait été initialement fixé à + 0,50 m IGN mais les déversements se sont poursuivis jusqu'à + 0,25 m (1987), + 0,39 m (1988) et + 0,37 m (1989). Les hauteurs maximales du plan d'eau ont été de +1,56 m (1986), de +1,49 m (1987), de +1,40 m (1988) et de +1,24 m (1989).

En 1986, le barrage de Diama a été ouvert du 28 juillet au 2 décembre à l'exception du 3/09, du 4-25 et 26/11. En 1987 les déversements de la crue se sont produits du 10 août au 8 décembre (interruption du 11 au 17/8, le 23/8, du 28 au 30/8, du 22 au 23/11 et du 1 au 6/12). En 1988, ouverture du 28 août au 23 décembre (arrêt des écoulements du 29 au 31/8, du 15 au 16/11, du 19 au 20/11, le 22/11, le 28/11/, du 30/11 au 6/12 et du 12 au 21/12). Enfin en 1989, ouverture du barrage entre le 5 juillet et le 24 décembre avec des fermetures momentanées du 8 au 9/07, le 17/07, du 4 au 15/8, du 8 au 10/11, le 4/12, du 8 au 10/12, du 13 au 17/12 et le 21/12. Les débits moyens mensuels sont reportés dans le tableau III (voir en annexe les débits journaliers).

Tableau III

Débits moyens mensuels (m³/s) du Sénégal au barrage de Diama
Volumes écoulés en milliards de m³

Mois	1986	1987	1988	1989
Juillet	39,8	0,0	2,2	216
Août	448,2	147,1	724,5	422
Septembre	1060,4	701,5	1946,9	1240
Octobre	1145,4	745,3	2184,1	1041
Novembre	399,6	398,5	190,5	326
Décembre	8,8	22,9	30,8	75
Total	8,18	5,30	13,42	8,76
Module (en m ³ /s) à Diama et à Bakel				
Diama	259	168	425	278
Bakel	343	220	428	392

En règle générale les débits qui s'écoulent à Diama sont inférieurs à ceux de l'amont. Une exception tout à fait remarquable s'est produite en 1989 où les déversements effectués à Diama vers l'océan sont équivalents aux apports du fleuve à l'exutoire amont de Bakel.

b) Bilan des flux de matières en suspension à Diama

Le flux de matières en suspension a été évalué par A. KANE au cours du cycle hydrologique 89/90 à 1.900 000 tonnes (voir page 80 de ce rapport). Cet apport solide est très proche des estimations sur le bilan mécanique de l'amont chiffré à 2.200.000 tonnes et d'autant plus qu'il n'est pas tenu compte ici du délestage des sédiments vers le lac de Guiers (290.000 tonnes en 1989).

Les volumes écoulés s'élevant à $8,76 \cdot 10^9 \text{ m}^3$, la concentration moyenne annuelle du panache turbide de l'aval est de l'ordre de 217 mg/l (178 mg/l à Bakel), le maximum observé étant de 740 mg/l. Par unité de volume, la charge solide du fleuve Sénégal est plus importante à l'aval qu'à l'amont. Ce résultat remarquable est à corrélérer à l'effet de stockage du barrage qui accumule temporairement les matériaux provenant de l'érosion des sols, de l'érosion des berges de la vallée et aussi les retombées sèches des poussières atmosphériques.

2. Les apports de sédiments vers le lac de Guiers

a) Le bilan quantitatif

De nombreux rapports et articles ont déjà fait état du fonctionnement particulier du lac de Guiers et de son remplissage par la crue annuelle du fleuve sénégal au moment où les eaux sont les plus chargées en suspension.

L'apport terrigène vers la dépression lacustre est quantifiable chaque année par des mesures journalières effectuées sur le second pont barrage de la Taoué. Le protocole de prélèvement consiste en une prise d'eau quotidienne de 50 litres à l'aide d'une bouteille à reversement munie d'un messenger. En fonction de la position du plan d'eau, les échantillons sont collectés à différentes profondeurs sur cinq ou sept profils transversaux. Le traitement, *in situ*, consiste à ramener rapidement à 1 litre le volume représentatif à acheminer vers le laboratoire. On procède à une première décantation des 50 litres recueillis par addition de 5 cm^3 d'acide chlorhydrique, puis le lendemain au siphonnage de l'eau claire surnageante. Le volume résiduel (environ 10 litres) est transvasé dans une dame-jeanne transparente qui permet de visualiser le niveau de décantation et de procéder, 24 heures plus tard, à un nouveau siphonnage pour aboutir à un volume de 1 litre. Au laboratoire les matières en suspension sont recueillies par centrifugation

puis séchées à l'étuve (60° C°) et pesées.

Les apports terrigènes vers le lac de Guiers qui figurent dans le tableau IV ci-dessous sont estimés, les mesures de la charge solide n'ayant pas été toujours réalisées pendant toute les périodes d'ouverture des barrages et de l'apport fluvial. En première approximation on admet que les concentrations moyennes ou turbidités mesurées pendant la période d'observation (qui correspond en moyenne à 75% du temps de remplissage) donnent l'ordre de grandeur de celles qui auraient été obtenues avec des mesures complètes. Ceci est assez vraisemblable du fait que les premières eaux et les derniers écoulements non pris en compte sont d'une part, les plus concentrées et d'autre part, les plus diluées.

Tableau IV

Apports annuels (en tonnes) de sédiments au lac de Guiers
(volumes en millions de m³ et turbidité en mg/l)
Les dates correspondent aux périodes de remplissage

Année	Date	Tonnage	Volume	Turbid.
1980	28/07-2/10	193000	521	370
1981	23/07-2/10	202000	523	386
1982	6/08-28/09	97000	368	263
1983	10/07-25/03		non observé	
1984	30/06-9/01		non observé	
1985	29/07-29/09	240000	548	438
1986	28/07-8/10	184000	536	344
1987	15/07-22/10	248000	464	535
1988	1/06-20/09	210000	492	426
1989	19/06-10/10	288000	606	475
1990	21/06-8/10	154000	500	308

En moyenne le lac de Guiers reçoit annuellement 200.000 tonnes de sédiments véhiculés par un volume moyen de l'ordre de 506 millions de m³ d'eau dont la turbidité moyenne est de 400 mg/l. Cette charge solide est très élevée par rapport à celle du fleuve; elle découle des conditions particulières du remplissage du lac de Guiers en début de crue. En admettant une densité moyenne de 1,5, les apports annuels se chiffrent à près de 300.000 m³ de matières en suspension. Ils représentent un taux de sédimentation de 1,3 mm/an ou encore de 1,3 m par millénaire, ce qui est considérable.

Un autre point important à souligner concerne l'origine même des eaux qui globalement tous les ans se déversent dans la dépression lacustre. A l'état naturel, il avait déjà été mis en évidence que les épaulements assez répétitifs tous les ans dans l'hydrogramme de crue du Sénégal provenaient dans la plupart des cas d'une crue précoce de la Falémé par rapport aux deux autres branches-mères du Sénégal que sont le Bakoye

et le Bafing. La gestion artificielle de la crue du Bafing, qui assurait autrefois près de 60 % des débits du Sénégal, est aujourd'hui menée de telle sorte qu'elle détermine encore plus le remplissage du lac de Guiers par les eaux de ruissellement qui érodent les sols de la Falémé. Autrement dit, ce sont essentiellement les horizons superficiels du bassin versant de la Falémé, dont on connaît la nature ferrifère, qui garnissent et tapissent les fonds lacustres. Ce résultat est important pour les reconstitutions paléoclimatiques à partir de sondages dans les sédiments. Leurs teneurs en fer total peuvent y constituer de précieux marqueurs de l'importance de l'érosion ancienne et donc des climats humides du passé.

b) Le bilan qualitatif

La distribution granulométrique dans les matières en suspension qui transitent dans le canal de la Taoué indique qu'il s'agit essentiellement d'argiles (de 80 à 92 %). Les limons fins (de 2 à 20 μ) sont compris entre 6 et 18 % et les sables entre 1 à 4 %. La matière organique est peu abondante et les teneurs qui oscillent entre 1,5 et 2 % sont relativement constantes.

La composition chimique reflète la nature des sols dont les suspensions sont issues: prédominance de la silice (54 %), abondance de l'aluminium (22 %) et du fer (9,5 %), présence de potassium (1,5 %), de magnésium et de titane (1 %) et faibles quantités de calcium et de sodium (0,3 %).

La nature minéralogique confirme la composition chimique avec l'abondance de kaolinite (36 %), d'illite et d'interstratifiés (21 %), de quartz (18 %), de smectites (17 %) et d'un peu de goethite (3,5 %).

III. LES APPORTS EOLIENS DE POUSSIÈRES ATMOSPHÉRIQUES

1. Les retombées sèches sur la presqu'île du Cap Vert

Les mesures de dépôts de poussières à l'aide d'un capteur pyramidal, mis au point par J.Y. GAC, sont réalisées par l'ORSTOM depuis 1984. Naturellement, la station-puits de Dakar a fait l'objet de la collecte la plus abondante : les relevés y sont journaliers depuis janvier 1984 à l'exception de la période allant de juin à octobre 1984. Par la suite, selon les opportunités de DEA ou de soutenances de thèse des mesures furent réalisées à Mbour (1986/1987) à Pété et à Kédougou (1987). La contribution de la CEE au projet EQUÉSEN sur le fleuve Sénégal et ses dépendances lacustres a permis, depuis 1987, d'implanter une station sur le site de Ngnith en rive ouest du lac de Guiers.

Bien que Dakar ne soit pas une station d'étude idéale, de par sa position en bordure du littoral et de la concentration humaine et industrielle qui caractérise cette métropole régionale, elle a été choisie pour la facilité d'obtention des résultats qu'elle permet et pour l'importance et la fiabilité des données météorologiques dont elle dispose. Les dépôts les plus élevés sont caractéristiques des 6 premiers mois de l'année et les plus faibles sont enregistrés au cours de la saison des pluies de juillet à octobre (Figures 7 et 8).

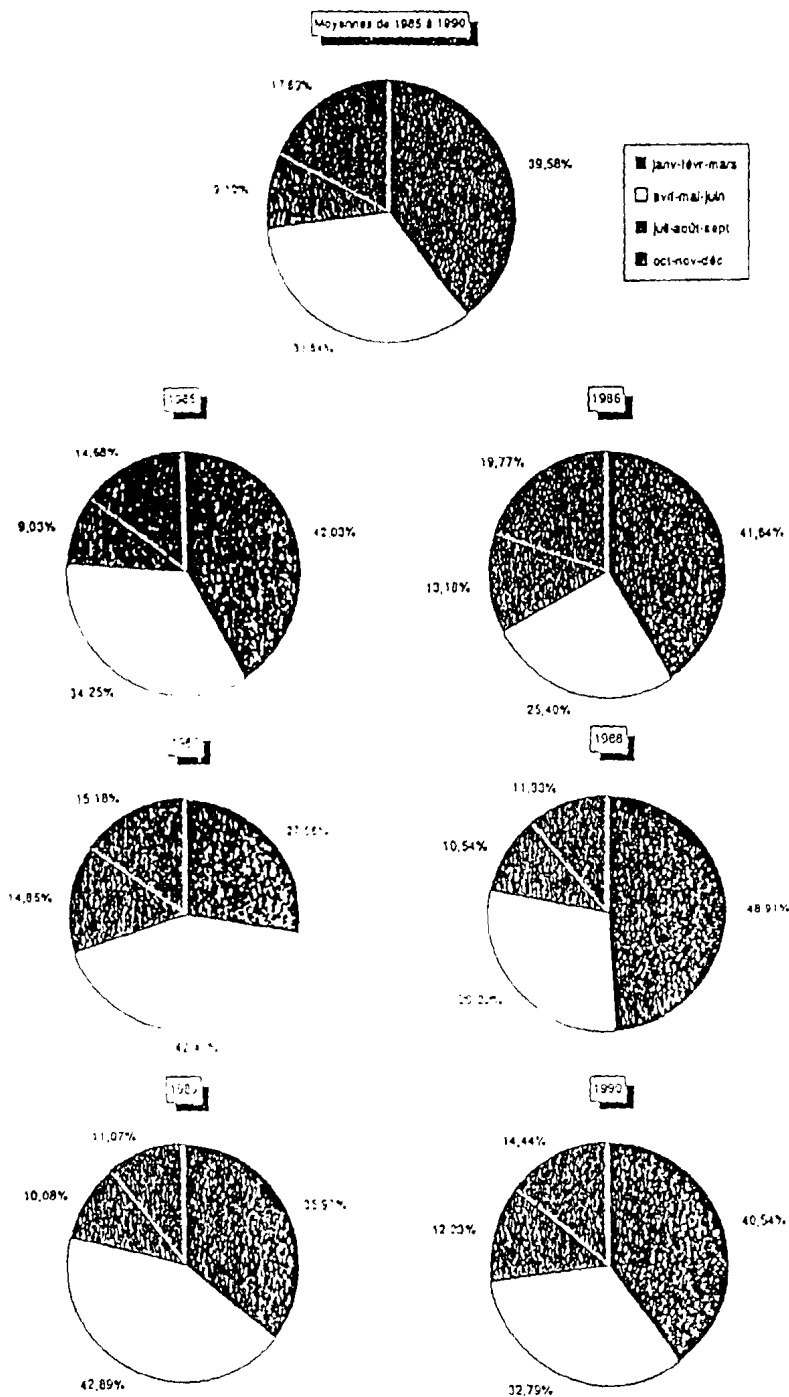


Figure 7. Moyennes mensuelles (en %) des dépôts annuels

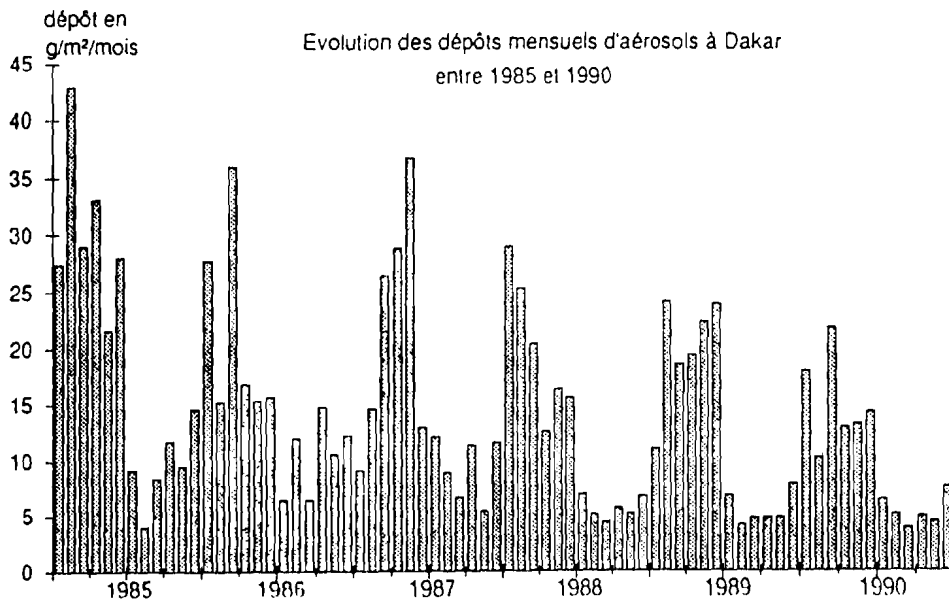


Figure 8. Evolution des dépôts mensuels d'aérosols à Dakar

A Dakar, la moyenne interannuelle journalière pour la période de 1984 à 1990 est de 0,53 g/m²/jour (Tableau V).

Tableau V

Dépôts moyens mensuels et annuels d'aérosols à Dakar (en g/m²/jour).

	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	Moyenne
J	1,03	0,98	0,89	0,30	0,93	0,36	0,58	0,71
F	1,63	1,53	0,54	0,52	0,87	0,86	0,37	0,90
M	1,11	0,94	1,16	0,85	0,66	0,60	0,71	0,86
A	1,17	1,10	0,55	0,96	0,42	0,65	0,43	0,76
M	0,89	0,70	0,50	1,18	0,53	0,72	0,43	0,71
J	0,80	0,93	0,52	0,43	0,52	0,80	0,48	0,64
J	0,26	0,30	0,21	0,39	0,22	0,22	0,21	0,26
A	0,21	0,13	0,39	0,29	0,16	0,13	0,16	0,21
S	0,20	0,29	0,22	0,22	0,15	0,16	0,13	0,20
O	1,58	0,38	0,48	0,37	0,18	0,15	0,16	0,47
N	0,46	0,32	0,35	0,18	0,17	0,16	0,21	0,26
D	0,66	0,47	0,40	0,37	0,22	0,25	0,53	0,41
Année	0,83	0,66	0,52	0,51	0,42	0,42	0,37	0,53

Sur la presqu'île du Cap Vert le dépôt annuel est de l'ordre de 200 g/m²/an. Pendant les six années de mesures effectuées à Dakar, le dépôt journalier maximal a été enregistré le 23 mai 1984 (10,6 g/m²). Les deux cycles hydrologiques (1983 et 1984) les plus déficitaires du fleuve Sénégal au cours de ce siècle ont précédé les deux années les plus productrices en poussières (1984 et 1985). On constate aussi que les phénomènes des brumes sèches et de l'occultation du ciel par des poussières d'origine désertique s'atténuent considérablement depuis 1984 (Fig. 9).

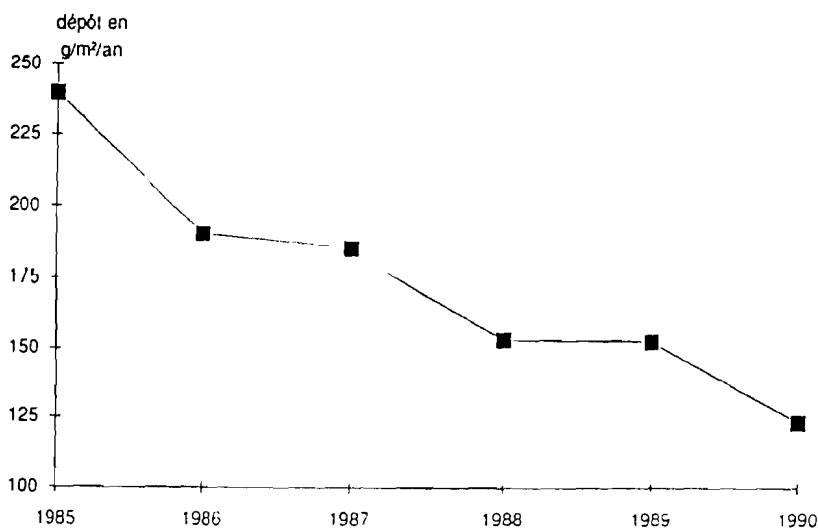


Figure 9.- Dépôts annuels des aérosols à Dakar (1985/1990).

A Dakar, il existe une corrélation hautement significative entre les dépôts de poussières et la visibilité horizontale mesurée au sol. Ces deux paramètres climatiques sont liés par la relation : $D.V^{1,35} = 7,77$ où D est le dépôt de poussières en g/m² et V la visibilité en km (GAC & al., 1986, 1987).

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 visibilitées 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 EQUÉSEN 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.

2. Les apports éoliens au lac de Guiers

Les retombées de poussières atmosphériques d'origine saharienne dans la dépression du lac de Guiers sont mesurées à la station de N'Gnith depuis juillet 1987 (Tableau VI).

Tableau VI

Dépôts moyens mensuels et annuels d'aérosols à Ngnith
(en g/m²/jour)

Mois	1987	1988	1989	1990	1991	Moy.
Janv		0,81	0,45	0,65	0,37	0,57
Fevr		0,88	1,08	0,47	0,54	0,74
Mars		0,84	0,52	0,83		0,73
Avri		0,49	0,57	0,48		0,51
Mai		0,46	0,36	0,46		0,43
Juin		0,65	0,73	0,90		0,76
Juil	0,42	0,43	0,22	0,45		0,38
Août	0,46	0,07	0,12	0,27		0,23
Sept	0,45	0,16	0,16	0,21		0,24
Octo	0,66	0,20	0,18	0,25		0,32
Nove	0,21	0,18	0,27	0,30		0,24
Déce	0,69	0,30	0,35	0,58		0,48
Année		0,45	0,41	0,49		0,45

L'apport moyen journalier de poussières atmosphériques au lac de Guiers est de l'ordre de 0,45 g/m²/jour. Bien que situé plus haut en latitude, donc en principe plus près des zones sources, la dépression lacustre capte moins d'aérosols que la presque île du Cap Vert. Les dépôts y sont annuellement de l'ordre de 165 g/m²/an. Rapportée à la surface moyenne du lac, la sédimentation d'origine éolienne y serait annuellement d'environ 40.000 tonnes. Cette valeur est vraisemblablement en dessous de la réalité par suite des phénomènes de remobi-

lisation qui peuvent être importants dans les capteurs secs. Une étude des relations existant entre la vitesse du vent et le dépôt de poussières au sol en milieu soudano-sahélien a permis d'estimer le taux de remobilisation moyen annuel à 40%. Ces phénomènes de remobilisation sont plus actifs dans la seconde période saison sèche (de janvier/février à mai/juin) alors que la végétation au sol meurt, que l'humidité relative décroît et que les feux de brousse amplifient le processus. En fait on peut évaluer entre 60.000 et 70.000 tonnes l'apport annuel de limons éoliens au lac de Guiers. Comparativement aux flux particuliers qui accompagnent la crue fluviale, les sédiments du lac contiennent de 30 à 35 % de poussières désertiques.

L'analyse granulométrique des échantillons d'aérosols prélevés à Ngnith montre que la taille des poussières atmosphériques oscillent entre 15 et 20 μm . Les résultats des analyses chimiques font ressortir la nature essentiellement siliceuse des lithométéores : la silice est exprimée sous forme de quartz (60 %) ou intégrée aux réseaux argileux (15 à 20 %). Les autres éléments majeurs sont l'aluminium (10,5 %), le fer (3,7%) et le potassium (2,3 %). On note par ailleurs la présence de calcium, de magnésium, de sodium, de titane avec des pourcentages compris entre 1 et 2%.

En définitive, l'étude des constituants des aérosols désertiques souligne leur importance, souvent ignorée, dans le cycle géochimique des éléments naturels. On retiendra ici d'une part, la présence largement dominante de la silice sous forme de quartz mais également de résidus de diatomées et, d'autre part l'abondance relative des minéraux argileux surtout représentés par l'illite, minéral ubiquiste par excellence. En tenant compte de l'importance relative des apports endogènes (alluvions du fleuve) et exogènes (poussières atmosphériques) et de leur composition chimique respective on peut préciser la nature chimique des sédiments lacustres de manière très approximative (Tableau VII).

Tableau VII

Géochimie des alluvions, des aérosols et des sédiments du lac
(en % d'oxydes)

Oxyde	Alluvion	Aérosol	Sédiment
SiO ₂	57,90	72,51	61,30
Al ₂ O ₃	19,30	10,57	17,30
Fe ₂ O ₃	8,00	3,65	7,00
TiO ₂	1,00	0,72	0,94
CaO	0,14	2,18	0,61
MgO	0,94	1,81	1,14
Na ₂ O	0,27	1,31	0,51
K ₂ O	1,60	2,30	1,76
H ₂ O	10,40	4,40	9,02

IV. L'ALTERATION CHIMIQUE. FLUX DE MATIERES DISSOUTES. QUALITE CHIMIQUE DES EAUX DE SURFACE

1. Les eaux de pluie ou les dépôts humides

L'influence des apports atmosphériques sur la composition chimique des eaux de surface n'est plus à démontrer. L'importance relative de ces apports est encore accrue sur les bassins versants à substratum silicatée qui livrent des eaux de surface faiblement minéralisée. Si les études complètes de la chimie des eaux de pluie des pays dits tempérés sont nombreuses, celles concernant les tropiques africains sont rares. Le climat et l'activité biologique de ces basses latitudes y créent pourtant des conditions d'apports atmosphériques fort différentes qui peuvent se présenter sous deux formes: ils peuvent être dissous, ce sont les pluies *sensus stricto* (les dépôts humides) ou particulaires (dépôts secs). Ces derniers ont déjà été évoqués.

Avant de présenter les résultats sur les eaux de pluie, il faut souligner la difficulté d'appréhension de leur composition chimique ; elle résulte de leur caractère d'eaux très peu minéralisées et souvent mal tamponnées. Le tableau VIII récapitule les données chimiques sur les pluies recueillies à Bakel et Kédougou.

Tableau VIII

Composition chimique des eaux de pluie (en µeq/l)

Station	B A K E L				K E D O U G O U				
	JUL	AUG	SEP	OCT	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV
Pp (mm)	75	10	38	12	35	267	183	242	206
Np	1	1	5	3	2	19	17	15	9
Cond (µS/cm)	6,7	6,4	6,7	6,5	6,4	6,7	6,5	6,4	6,4
Ca ²⁺	82	96	178	93	88	82	96	178	93
Cl ⁻	13	14	24	34	83	13	14	24	34
SO ₄ ²⁻	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<40
NO ₃ ⁻	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NO ₂ ⁻	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PO ₄ ³⁻	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg ²⁺	75	57	97	59	98	75	57	97	59
K ⁺	16	12	23	16	20	16	12	23	16
Na ⁺	3	5	14	14	37	3	5	14	14
NH ₄ ⁺	8	13	20	11	20	8	13	20	11
H ₂ SiO ₄ (µmol/l)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SiO ₄ (µmol/l)	8	2	6	5	15	8	2	6	5
Ions	95	110	202	127	171	95	110	202	127
Ecations	102	86	153	101	175	102	86	153	101
b.l. r (%)	8	8	10	8	8	-7	24	50	26
r (%)	3	3	3	2	-3	-7	24	28	23
TDS (mg/l)	52,7	18,9	12,4	16,2	35,1	7,9	8,2	15,3	9,4

Pp : pluie prélevée en mm ; Np : nombre d'événements pluvieux ; Cond : conductivité en µS/cm à 20 °C ; b.l. : balance ionique ; r : taux de balance ionique ; TDS : minéralisation en mg/l.

a) - Description du faciès chimique des pluies collectées

Le pH : le pH a été mesuré au laboratoire et ne présente donc pas une grande signification. Au moment de l'analyse, les eaux sont proches de la neutralité.

La conductivité : La conductivité est donnée à la température de 20°C. Elle varie de 17 à 62 $\mu\text{S/cm}$ à Bakel et de 12 à 26 $\mu\text{S/cm}$ à Kédougou. A Bakel, les pluies de début et de fin de saison humide sont les plus minéralisées : la charge totale atteint 1,1 mmol/l au mois de juin lors des premières pluies et 0,8 mmol/l en octobre lors des dernières averses. A l'exception des ces deux extrêmes, les eaux de pluies sont très peu minéralisées (de 13 à 29 $\mu\text{S/cm}$). Par contre, les prélèvements effectués à Kédougou ne montrent aucune évolution nette. Cette différence de comportement entre les deux stations se retrouve pour toutes les espèces chimiques.

Les anions HCO_3 , Cl et SO_4 : l'anion dominant est en général le bicarbonate ; sa concentration moyenne en milieu de saison des pluies évolue entre 80 et 180 $\mu\text{eq/l}$. De nouveau, on note à Bakel de fortes concentrations en début et fin de saison pluvieuse, contrairement à ce qui est enregistré à Kédougou où le maximum se produit en août. C'est l'ion dont les variations de concentration ont les plus grandes amplitudes. Le chlorure est bien représenté à Bakel où sa concentration peut être supérieure à celle du bicarbonate ; aux deux stations, sa teneur est relativement stable. Le sulfate n'a été déterminé qu'à Bakel car à Kédougou sa teneur est inférieure à 40 $\mu\text{eq/l}$, limite de détection de la méthode d'analyse utilisée. En ce qui concerne la station de Bakel, l'évolution de la concentration en sulfate semble aléatoire ; la faible concentration du mois de juin comparée aux fortes concentrations des autres espèces ioniques de ce mois est remarquable.

Les cations Ca , Mg , K , Na : le calcium est de loin le cation dominant avec des teneurs parfois supérieures à la concentration en bicarbonate ; ses concentrations évoluent de 60 à 250 $\mu\text{eq/l}$ à Bakel, et de 60 à 100 $\mu\text{eq/l}$ à Kédougou. Les teneurs en Mg, K, Na sont du même ordre de grandeur ; elles évoluent entre 10 et 20 $\mu\text{eq/l}$ à Kédougou, et entre 10 et 50 $\mu\text{eq/l}$ à Bakel, exception faite à cette station des concentrations anormalement élevées du mois de juin. Le potassium est généralement le cation le moins abondant.

La silice : la silice est faiblement représentée à l'exception des deux événements remarquables enregistrés à Bakel en début et fin de saison pluvieuse.

Les ions NO_2 , NO_3 et NH_4 : ces ions n'ont été analysés que sur les échantillons de Bakel. Le nitrite n'apparaît que lors des deux mois exceptionnels de début et fin de saison des pluies, le nitrate et l'ammonium sont toujours présents. Les

reconnu en différentes stations des zones tropicales sèche et humide par la mesure du deutérium et de l'oxygène 18 (YURTSEVER & GAT, 1981). TRAVI & al. (1987) rappellent les résultats obtenus à Bamako, station sahélienne du réseau OMM-AIEA, qui confirment que les précipitations sur l'intérieur de la zone sahélienne sont profondément modifiées par l'évaporation. En début et fin d'hivernage où les températures de l'air sont les plus élevées, ce phénomène est plus marqué. Cependant, le calcul des rapports ioniques X_i/Cl (Tableau IX) montre qu'il ne suffit pas à expliquer les fortes teneurs de juin et d'octobre. En effet, il est généralement admis que le chlorure est exclusivement d'origine marine, ainsi les rapports ioniques X_i/Cl permettent de caractériser les différentes sources des masses nuageuses apportant les pluies. Or à Bakel, les différents rapport X_i/Cl du mois de juin sont nettement supérieurs à ceux des autres mois ; le même constat, à un degré moindre, peut être fait pour les mois de juillet et octobre. Ainsi, surtout en début d'hivernage, il existe une autre source d'apports en éléments chimiques attribuable au phénomène de "self-cleaning of the atmosphere" : les premiers événements pluvieux nettoient l'atmosphère de toutes ses impuretés ; en fin de saison des pluies, l'espacement plus long entre les événements pluvieux laisse à l'atmosphère le temps de "se salir" avant qu'une nouvelle pluie vienne le "nettoyer". Cette interprétation est confirmée par les fortes teneurs en silice enregistrées en juin et octobre.

Tableau IX

Rapports mensuels X_i/Cl (exprimés en équivalent) des pluies

Station	B A K E L					K E D O U G O U					(1)
	JUI	JUL	AOÛ	SEP	OCT	JUI	JUL	AOÛ	SEP	OCT	
SO ₄ /Cl	0,34	1,02	0,46	0,52	0,54	-	-	-	-	-	0,354
HCO ₃ /Cl	3,52	1,95	1,31	0,89	1,93	6,31	6,86	7,42	2,73	1,06	0,023
Ca/Cl	2,09	1,56	0,93	1,23	1,79	5,77	4,07	4,04	1,73	1,18	0,134
Mg/Cl	1,64	0,35	0,25	0,31	0,38	1,23	0,86	0,96	0,47	0,24	0,213
K/Cl	0,66	0,19	0,13	0,19	0,33	0,23	0,36	0,58	0,41	0,45	0,032
Na/Cl	1,25	0,24	0,25	0,30	0,40	0,61	0,93	0,83	0,32	0,24	0,910

(1) : rapports X_i/Cl de l'atmosphère issue de l'océan Atlantique (SAVENKO, 1976).

A Kédougou en milieu soudano-guinéen, la saison des pluies est plus longue : elle s'étend de mai à octobre. Les premières averses de mai n'ont pas été collectées, ce qui peut expliquer l'absence d'un premier signal pluie fortement chargé analogue à celui enregistré en juin à Bakel. L'évolution des teneurs des différents éléments chimiques suivent ici un schéma désordonné à l'exception du chlorure qui augmente du début à la fin de l'hivernage. On en déduit que plusieurs zones sources alimentent les masses nuageuses amenant les pluies à Kédougou. Les rapports X_i/Cl confirment cette hypothèse et permettent de distinguer deux périodes : de juin à août et de septembre à octobre. Enfin, des mesures de

deutérium et d'oxygène 18 dosés sur les eaux de pluie de juillet et août 1981 à Tambacounda, station située à 200 km au NW de Kédougou, montrent qu'au coeur de la saison des pluies les précipitations ne subissent pas d'évaporation en cours de chute. Ceci implique qu'à l'échelle mensuelle les variations de la chimie des pluies sont uniquement dûes à des effets de source. Un autre type de perturbation dûe à la couverture végétale peut également intervenir à cette latitude. Kédougou se situe en milieu de savane arbustive, à la limite septentrionale des hauts plateaux du Fouta Djallon d'où viennent les masses nuageuses. Dans cette région, le couvert végétal, réduit en juin, prend vite une grande extension. Les apports chimiques des pluies peuvent donc être fortement influencés par les échanges atmosphère-végétation. D'après ROOSE (1980), les concentrations sous couvert végétal en potassium, magnésium et bicarbonate sont respectivement multipliées de 4 à 10, 1 à 5 et 1,5 à 4, les autres espèces chimiques étant également concentrées mais dans de moindres proportions.

d) Comparaison aux données bibliographiques

L'information disponible sur la qualité chimique des eaux de pluie en Afrique de l'Ouest est restreinte. MEYBECK (1984), dans son remarquable travail de collecte de données mondiales, ne fournit aucune analyse concernant le continent africain. Pour notre part, nous citerons les travaux de MATHIEU (1976), ROOSE (1980), LEWIS (1981) et TRAVI & al. (1987). En 1963, l'ORSTOM a lancé en Côte d'Ivoire un dispositif destiné à l'étude des phénomènes actuels d'érosion, de transport et de sédimentation en milieu intertropical. C'est dans ce cadre que d'abord MATHIEU (1976) puis ROOSE (1980) ont quantifié les apports chimiques par les eaux de pluie en Côte d'Ivoire. LEWIS (1981) compare ses résultats obtenus au Vénézuéla avec ceux de THORNTON (1965) qui a collecté mensuellement les eaux de pluies à trois stations de Gambie en 1963. Pour pouvoir relier nos résultats à ceux de ces auteurs, la composition chimique moyenne des pluies de Kédougou et de Bakel a été calculé en pondérant la composition chimique de chaque mois par la pluviométrie correspondante. Pour la station de Kédougou, les concentrations en sulfate, nitrate et phosphate ont été estimées à partir de celles mesurées à la station analogue de Korhogo (ROOSE, 1980) ; ensuite, la concentration en ammonium a été arbitrairement fixée afin que la balance ionique soit équilibrée (Tableau X).

La charge dissoute totale annuelle est de 22,5 mg/l à Bakel et de 13,5 mg/l à Kédougou. La forte charge annuelle enregistrée à Bakel est dûe aux premières pluies qui sont, comme nous l'avons vu, fortement minéralisées ; en faisant abstraction des ces cas extrêmes, la pluie à Bakel a une charge dissoute totale de 15 mg/l en milieu d'hivernage. Ces résultats sont légèrement inférieurs à ceux publiés par TRAVI & al. (1987) sur les mêmes stations (de 1 à 2 mg/l de différence) avec une répartition identique entre les différentes

espèces chimiques. Nos prélèvements sont moins chargés en bicarbonate et calcium. Par contre, ils sont plus chargés en sulfate, nitrate et surtout en ammonium. Enfin, il existe une bonne concordance avec les résultats obtenus en Côte d'Ivoire et au Burkina Faso, exception faite de l'ammonium dont les teneurs varient considérablement d'un auteur à l'autre. Ceci est lié au fait que cet ion est difficile à conserver dans les eaux.

Tableau XI

Composition chimique des pluies (mg/l) de l'Afrique de l'Ouest

Auteur	ORANGE ¹			TRAVI ²			LEWIS ³	ROOSE ⁴			MATHIEU ⁵		MEYBECK ⁶
Station	BAK	BAK [*]	KED	BAK [*]	KED	TAM	Gambie	ADI	KOR	SAR	LOS	AMI	Monde
D (km)	540	-	380	540	380	520	-	30	480	900	600	80	-
Milieu	sah	-	sou	sah	sou	sou	sou	gui	gui	gui	gui	gui	-
Période	1983	-	1987	1981	1981	1981	1963	71/75	71/75	71/75	63/68	63/68	-
P (mm)	402	-	1107	531	1305	568	500	1700	1200	700	1400	1300	1000
pH	7,0	6,9	6,5	6,5	6,3	6,2	-	6,7	6,0	-	5,0	5,9	-
Cond(μS)	31	23	19	28	22	14	-	20	15	11	6	5	-
Cl ⁻	2,7	2,3	1,2	1,9	1,5	0,7	2,2	2,1	0,3	0,3	1,0	1,1	2,6
SO ₄ ²⁻	2,0	2,0	(1,0)	0,9	0,6	0,7	4,6	1,2	1,0	1,6	0,6	0,8	1,4
HCO ₃ ⁻	9,5	5,6	6,5	8,2	8,3	7,4	(0,6)	(4,3)	(4,8)	(4,3)	-	-	-
NO ₂ ⁻	0,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,005
NO ₃ ⁻	1,0	0,7	(0,5)	-	-	-	1	0,3	0,5	-	-	-	0,175
PO ₄ ³⁻	0,2	0,1	(0,3)	-	-	-	0,1	0,3	0,3	0,8	<0,1	<0,1	0,005
Ca ²⁺	2,2	1,5	1,5	2,9	2,8	1,6	0,5	1,8	1,9	2,1	<1	<1	0,3
Mg ²⁺	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,6	0,4	0,1	0,3	<0,1	<0,1	0,3
K ⁺	0,9	0,4	0,6	0,4	0,5	0,2	0,4	0,3	0,2	0,4	<0,5	<0,5	0,1
Na ⁺	1,0	0,4	0,3	0,9	0,6	0,7	0,4	0,8	0,3	0,1	<0,5	<0,5	1,5
NH ₄ ⁺	1,2	1,4	(1,0)	0,03	0,02	0,04	1,2	0,2	0,3	-	-	-	0,225
SiO ₂	0,7	0,2	0,4	0,7	0,6	1,5	(0,3)	0,7	0,7	0,7	1,5	<1	0,3
TDS	22,5	15,0	13,5	16,2	15,9	13,3	11,9	12,4	10,4	>11	>5	>5	>7

1 : ORANGE et al., 1990 ; 2 : TRAVI et al., 1987 ; 3 : LEWIS, 1981 ; 4 : ROOSE, 1980 ; 5 : MATHIEU, 1976 ; 6 : MEYBECK, 1984.
 Stations du Sénégal : Bakel (BAK, pour BAK* les mois de juin et octobre ne sont pas pris en compte), Kédougou (KED), Tambacounda (TAM) ; Côte d'Ivoire : Adiopodoumé (ADI), Korhogo (KOR), Losériké (LOS), Amiltoro (AMI) ; Burkina Faso : Saria (SAR). D : distance à l'océan ; sah : milieu sahélien à steppe ; sou : milieu soudanien à savane ; gui : milieu guinéen à forêt. Les valeurs entre parenthèses sont estimées.

Il existe donc une signature chimique de la pluie caractéristique du domaine continental sahélo-soudano-guinéen d'Afrique occidentale (Fig.10). Les eaux de pluie y sont faiblement acides à neutres, bicarbonatées, calciques et fortement minéralisées par rapport à la moyenne mondiale. Plus au Sud, en forêt tropicale, le caractère acide des pluies dû aux feux de brousse est très marqué et modifie largement le

bilan géochimique.

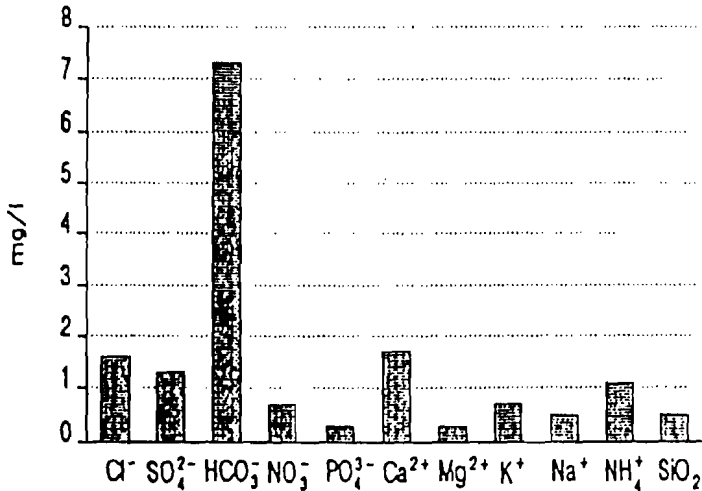


Fig. 10. Faciès géochimique des pluies en domaine continental sahélo-soudano-guinéen d'Afrique occidentale.

2. La composition chimique des eaux du Sénégal amont

Les méthodes statistiques fondées sur l'analyse des corrélations totales ou sur les analyses factorielles fournissent des renseignements importants concernant les relations entre les différentes variables qui contrôlent la composition chimique des eaux et des sédiments. Tous les traitements statistiques ont été effectués par l'intermédiaire du logiciel S.A.S. (SAS Institute Inc., 1985).

a) Relations entre les différentes variables de qualité des eaux

La moyenne arithmétique des 229 analyses effectuées permet de classer les eaux du fleuve Sénégal à Bakel dans la catégorie des eaux bicarbonatées magnésiennes et calciques. Les bicarbonates et la somme Mg-Ca représentent respectivement 88% de la somme des anions Σ^- et 73% de la somme des cations Σ^+ , soit à tous les trois 72% de la charge pondérale totale dissoute. La silice dissoute est également bien représentée, elle constitue 14% de la charge pondérale totale dissoute. Les variations de composition peuvent être importantes (Tableau XII). La minéralisation totale fluctue dans un rapport de 4, entre 29 mg/l et 133 mg/l ; le sulfate a le coefficient de variation le plus important (160%), ensuite dans l'ordre décroissant on trouve le chlorure (80%), le potassium (64%), le magnésium (57%), le sodium (56%), le bicarbonate (47%), le calcium (42%) et la silice (33%). La forte variabilité du sulfate est caractéristique d'un apport par des pollutions domestiques. L'apport exclusivement atmosphérique des chlorures explique leur coefficient de variation également important. Le

pH indiqué a été mesuré au laboratoire et non sur le terrain.

Tableau XII

Composition chimique moyenne des eaux du Sénégal, de la Falémé de la Gambie, du Niger et de ses affluents.

Variables de qualité		SENEGAL n=229		FALEME n=122		GAMBIE n=85		TINKISSO n=21		MILO n=22		NIGER n=21	
		Moy.	STD _M	Moy.	STD _M	Moy.	STD _M	Moy.	STD _M	Moy.	STD _M	Moy.	STD _M
μeq/l	Cl ⁻	64	3	316	87	17	1	14	2	25	2	22	2
	SO ₄ ²⁻	17	2	27	5	0	0	0	0	0	0	6	2
	HCO ₃ ⁻	576	18	1015	105	332	5	462	17	300	14	294	13
	Σ ⁻	657	-	1358	-	349	-	476	-	325	-	322	-
	Ca ²⁺	238	7	399	22	167	3	115	2	103	6	96	4
	Mg ²⁺	241	9	394	40	109	2	225	11	76	3	107	4
	K ⁺	61	3	108	15	24	1	25	1	35	3	36	3
Na ⁺	120	4	477	109	53	1	126	5	117	5	98	6	
Σ ⁻	660	-	1378	-	353	-	491	-	331	-	337	-	
mg/l	SiO ₂	8,6	0,2	8,7	0,3	10,8	0,1	13,6	0,4	13,8	0,4	11,1	0,6
	TOS	59,7	1,6	111,1	12,6	38,5	0,4	51,2	1,6	30,1	1,5	37,0	1,6
EC (μS)		64	2	132	16	35	0	44	1	32	1	33	1
pH _{1.000}		7,4	0	7,6	0	7,3	0	7,6	0	7,3	0	7,2	0

STD_M : déviation standard sur la moyenne ; EC : conductivité en μS/cm à 20°C

b) Analyse factorielle en composantes principales

Le traitement statistique des analyses chimiques (données multivariées par analyses factorielles permet de visualiser les principales associations entre les espèces chimiques (variables de qualité) et, ainsi, d'appréhender les principaux facteurs qui contrôlent la chimie des eaux.

La figure 11 présente les différents paramètres géochimiques testés sur les trois principaux plans factoriels : F1-F2, F2-F3 et F1-F3. Les trois premiers facteurs expliquent 80% de la variance totale. Le facteur F1 représente 51% de la variance totale ; il met en évidence l'influence primordiale du débit sur les concentrations en éléments dissous. Il matérialise la dilution des eaux de nappe très chargées, par les eaux de surface lors des périodes de crue. Plusieurs groupes d'éléments s'individualisent nettement. Bicarbonates, magnésium, calcium, sodium (et donc la charge totale dissoute TDS et la conductivité EC) sont les plus influencés par le débit ; ces quatre espèces chimiques sont celles qui mesurent le mieux l'altération des roches du bassin versant par les eaux d'infiltration, bien que le sodium semble légèrement lié aux chlorures et sulfates, tous deux provenant de l'atmosphère. A l'opposé, les teneurs en matières en suspension ne sont pas

, influencées par le débit ; le potassium, situé entre ces deux pôles, a donc des origines diverses. Enfin, la silice est également indépendante du débit mais corrélée négativement aux MES. Le facteur F2 représente 20% de la variance totale. Il matérialise l'opposition très nette SiO₂-MES et l'association MES-K ; ce facteur souligne la faible importance du débit sur ces trois éléments. Le facteur F3 ne représente que 9% de la variance totale ; il montre le comportement isolé des sulfates et l'opposition SO₄-Cl. Finalement, ce facteur met en évidence les différentes provenances des éléments chimiques des eaux : sulfates provenant exclusivement de pollutions domestiques ponctuelles, chlorures provenant en partie d'apports atmosphériques et les autres variables de qualité testées provenant de l'érosion et de l'altération du substratum rocheux du bassin versant.

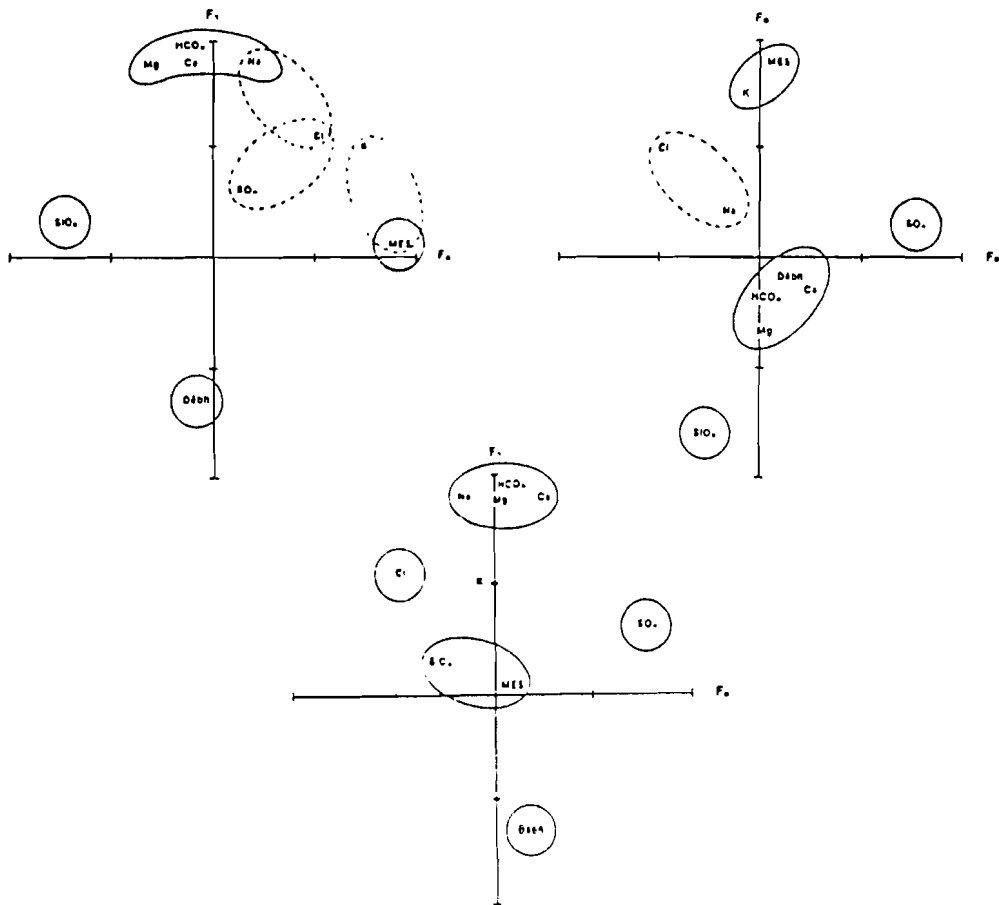


Figure 11.- Analyse en composantes principales des eaux du Sénégal à Bakel de 1979 à 1988 (n=229)

La séparation de l'année hydrologique en trois périodes : *montée des eaux* (juillet-août), *descente des eaux* (septembre-novembre) et *basses-eaux* en saison sèche (décembre-juin)

permet de moduler les comportements des différentes espèces chimiques et des MES selon le débit du fleuve puisqu'il est apparu qu'il est le facteur déterminant des concentrations dans les eaux. Le débit contribue à 83% de la variance totale en début de crue, à 68% en fin de crue et à 80% en période de basses-eaux. Les chlorures et sulfates ne sont associés qu'en début de crue, le reste de l'année les sulfates ont un comportement indépendant du débit. Bicarbonates, magnésium et calcium évoluent toujours ensemble en sens inverse du débit, le sodium y est associé en début de crue alors qu'il est associé aux chlorures en fin de crue. La silice est toujours opposée aux MES, surtout en début de crue. Enfin, les MES sont indépendantes du débit en début de crue puis ces deux facteurs sont parfaitement liés en fin de crue et basses-eaux.

Cette étude permet de mettre en évidence l'origine des éléments chimiques transportés par les eaux de surface et de schématiser leur comportement. Les sulfates proviennent de pollutions domestiques ponctuelles ; les chlorures sont d'origine atmosphérique ; le cortège $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca-Na}$, les MES, le K et la SiO_2 proviennent de l'érosion et de l'altération du bassin. Dans ce dernier ensemble on note que :

- le cortège $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca-Na}$ est dilué par le débit ;
- les MES sont indépendantes du débit en début de crue, puis diluées par celui-ci ;
- le K a un comportement intermédiaire entre MES et les autres espèces dissoutes du cortège $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca-Na}$;
- la silice dissoute, indépendante du débit, semble inversement liée aux MES, ce qui peut justifier une origine biogéochimique.

3. La composition chimique des eaux du Sénégal aval

Les stations d'observation de la qualité des eaux du fleuve Sénégal ont été mises en place tardivement. Le contrôle le plus régulier a été réalisé à Richard-Toll dont les résultats sont en cours de dépouillement.

4. La composition chimique des eaux du lac de Guiers

La qualité physico-chimique des eaux du lac de Guiers présentée dans l' "Etude d'un écosystème aquatique sahélien. Composition chimique élémentaire des eaux du lac de Guiers" jointe à ce rapport ne constitue qu'une première approche de la physico-chimie évolutive des eaux du lac. Une étude plus approfondie est en cours de rédaction sur l'ensemble des constituants majeurs et de leur variation spatio-temporelle.

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.

Depuis le début de l'année 1989, 30 campagnes de prélèvements des eaux du lac de Guiers ont été réalisées entre les mois de janvier 89 et février 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 EQUESSEN, (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 450 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, SO₄, HCO₃, CO₃ et la silice). Depuis octobre 89 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).

ETUDE DU FONCTIONNEMENT DES NAPPES ET RELATIONS EAUX DE SURFACES / EAUX SOUTERRAINES

Rapport présenté par Jean-Luc SAOS
Chargé de Recherches
Institut Français de Recherche Scientifique pour
le Développement en Coopération (ORSTOM)

Les travaux déjà entrepris sur les sites d'étude 1 (Delta) et 2 (Richard-Toll - Lac de Guiers) se sont poursuivis; et l'étude a pu être étendue au site 3 (région de Matam) grâce au renforcement de l'équipe : affectation d'un technicien hydrologue ORSTOM : M. J.P. THIEBAUX, recrutement temporaire d'un hydrogéologue junior local : M. A. DIAGANA.

1 - Principales actions menées sur le terrain :

1.1 Le fleuve Sénégal :

a) Etude de l'interface eau/sédiments : Les campagnes de mesures et prélèvements sédimentologiques faites en Juin et Octobre dernier dans l'estuaire sont maintenant analysés et ils feront prochainement l'objet d'une publication. Ces travaux n'ont malheureusement pas pu se poursuivre plus en amont à cause du conflit frontalier sénégal-mauritanien (impossibilité de faire des transects sur le fleuve).

b) Chronique isotopique du fleuve : deux nouvelles séries de prélèvements ont été effectués sur le fleuve (les analyses O¹⁸ et Deutérium sont en cours) et une mission en Guinée dans le cadre d'un autre projet a permis d'échantillonner le haut bassin du Bafin.

1.2 Les nappes :

- suivi régulier du réseau de piézomètres et puits du site 2 (Richard-Toll - Dagana - Lac de Guiers - Ferlo) et du site 3 (Kanel - Matam - Kaédi) en complément des observations de la cellule des eaux souterraines de l'OMVS.

- campagnes de prélèvements sur des sections transversales pour analyses chimiques et isotopiques, dans les zones 2 et 3.

- mesures et prélèvements dans les piézomètres, canaux et drains sur des périmètres hydro-agricoles (canne à sucre, rizières) et sur des zones-témoins non aménagées.

- mesures du gradient de conductivité et de températures dans les piézomètres des zones 2 et 3, prélèvements pour analyses au droit des crépines.

1.3 Autres données :

- consultation régulière de la Banque de données de la cellule des eaux souterraines de l'OMVS à St Louis, et étude des cuttings qui y sont entreposés.

- collecte des données hydroclimatiques à l'ASECNA (pluviométrie et climatologie), et auprès des aménageurs-exploitants : CSS, SAED, SONEES .. (données hydroclimatiques, pompes, drainages, produits chimiques apportés etc..).

2 - Principaux résultats :

2.1 Lithostratigraphie

Les cuttings échantillonnés (tous les mètres) lors des forages des piézomètres sont stockés à l'OMVS ST-Louis. Ils permettent l'étude stratigraphique des sédiments qui se sont déposés dans la vallée, et de leurs substratum.

Dans les zones 1 et 2, les formations apparaissent très souvent sous forme d'une alternance de dépôts lenticulaires sableux, limoneux ou argileux. Cette anisotropie rend difficile les corrélations entre les différents forages.

Les niveaux supérieurs varient en fonction de la géomorphologie. Ils sont argileux, d'âge actuel dans les cuvettes de décantation : argiles souvent gonflantes, à fentes de retrait profondes constituées d'un mélange de montmorillonite, kaolinite et illite.

Dans les levées actuelles et subactuelles, les limons et sables fins dominent.

Enfin, une alternance de sable fin et d'argile caractérise les dépôts d'âge nouakchottien des anciennes terrasses marines.

Les niveaux inférieurs sont surtout sableux, sables fins devenant de plus en plus grossiers en profondeur, avec des intercalations souvent lenticulaires d'argiles dont la fréquence et l'épaisseur augmente avec la profondeur.

Ces sédiments sablo-argileux ont une puissance de plus de 50 mètres vers l'Ouest et de 20 à 5 mètres sur le bombement anticlinal de Guiers.

Le substratum est constitué de sables, argiles, marnes et calcaires, suivant le découpage tectonique ayant affecté les formations ante-quadernaire (Maestrichtien, Paléogène, Continental terminal).

Le Continental terminal est surtout représenté par des sables moyens à grossiers, contenant des gravillons latéritiques.

Les formations du Paléogène : la distinction entre Paléocène et Eocène n'est pas toujours évidente avec les cuttings. Ce sont surtout des calcaires, des marnes et des argiles.

Le Maestrichtien : il est surtout composé de sables avec des passées argileuses et gréseuses. Il est proche de la

surface entre Guidakhar et Keurmour (-20 m), et beaucoup plus profond dans l'ensemble de la zone (-500 m à l'ouest d'une ligne Rosso - Louga.

2.2 Caractéristiques de l'aquifère :

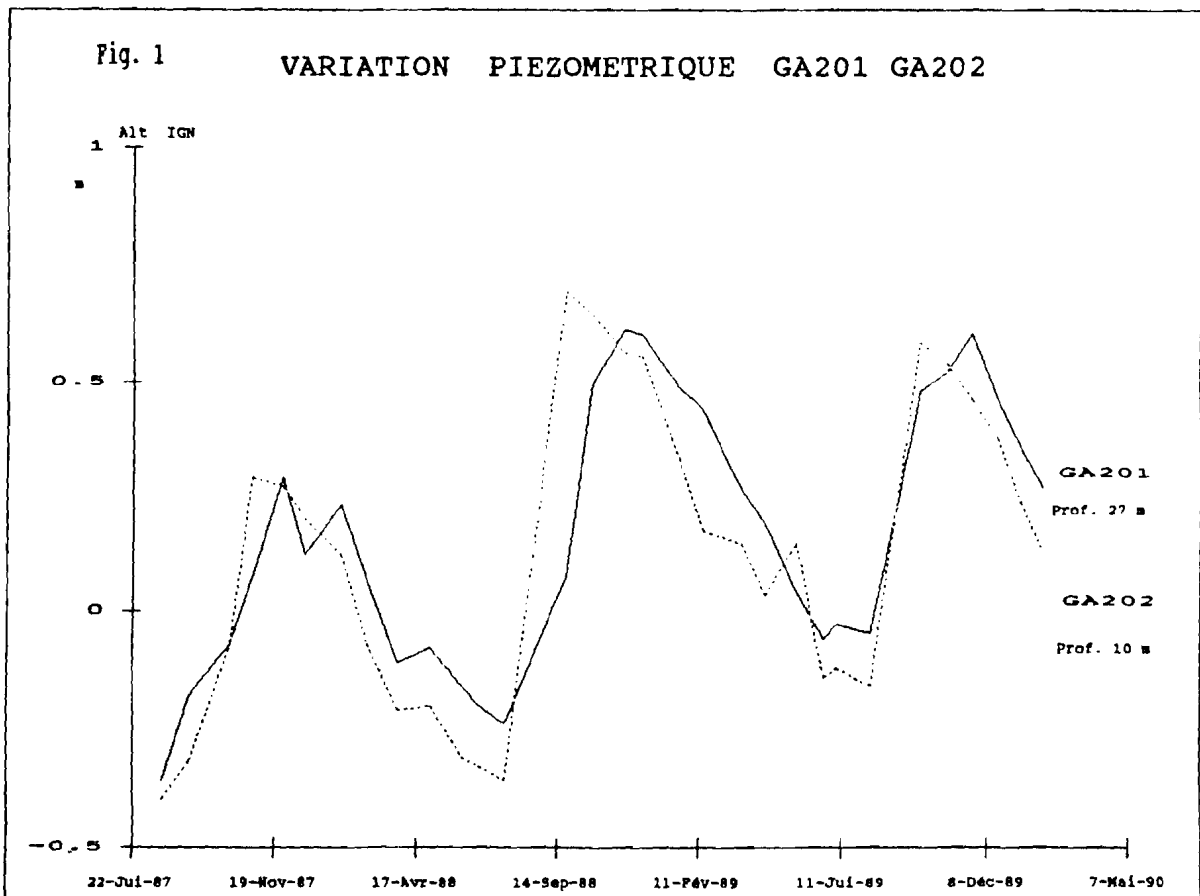
L'aquifère alluvial est hétérogène et anisotrope et des niveaux semi-perméables le subdivisent en compartiments. Ces compartiments peuvent donner des réponses de nappes semi-captives, d'où certains écarts constatés entre le piézomètre "profond" et le piézomètre "superficiel" d'un même site.

Cette hétérogénéité se ressent dans les caractéristiques hydrauliques déterminées par essais de pompages :
Transmissivité variant de $T = 10^{-2}$ à 10^{-4} m²/s, et le coefficient d'emmagasinement de $S = 10^{-1}$ à 10^{-4}

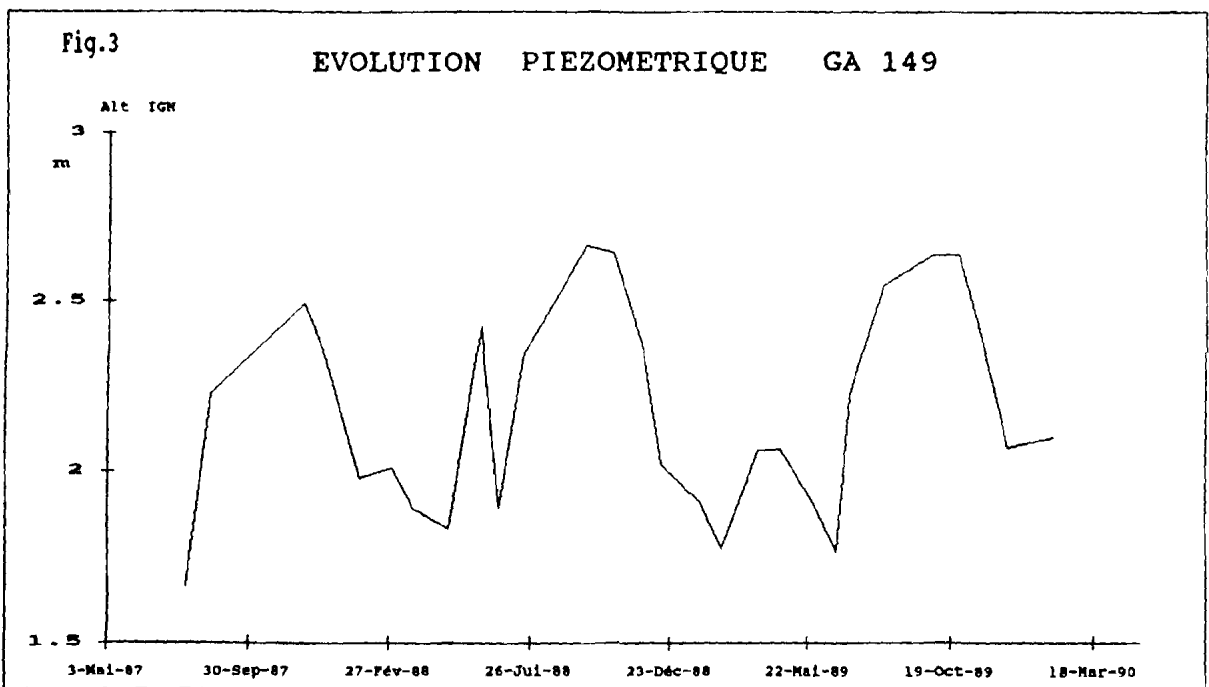
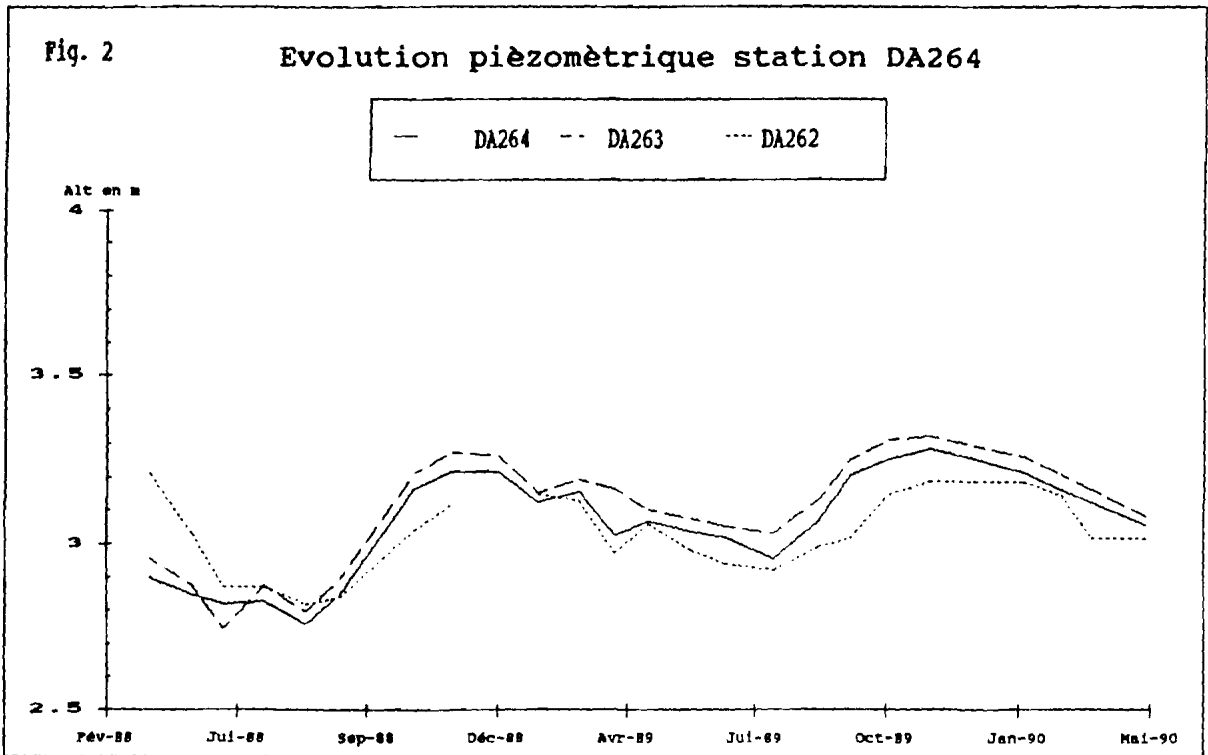
2.3 Variations piézométriques :

Les piézomètres et puits étudiés subissent, dans leur grande majorité, des variations piézométriques saisonnières. La remontée de la nappe a lieu généralement pendant ou juste après l'hivernage, c'est à dire qu'elle est en liaison directe avec les pluies et la crue du fleuve.

On enregistre parfois un décalage dans le temps des variations saisonnières dans les piézomètres de profondeurs différentes. Lorsque ces piézomètres sont situés sur un même site (2 mètres de distance) ce décalage signifie que l'aquifère est multicouche et que les crépines sont dans des compartiments différents, sans relation directe immédiate. (Fig 1)



On observe dans certains piézomètres une remontée anormale du niveau au cours de période sans pluie ni crue. Ces piézomètres sont situés dans ou à proximité immédiate de parcelles hydro-agricoles. On peut donc dire que dans les périmètres aménagés, l'irrigation entraîne une recharge de la nappe, comme le montre les figures 2 et 3 . La remontée piézométrique en février / mars correspond à la mise en eau des parcelles rizicoles (piézo DA 264) ou sucrières (piézo GA 149). Les analyses chimiques en cours devraient nous permettre d'apprécier les effets qualitatifs de cette recharge.

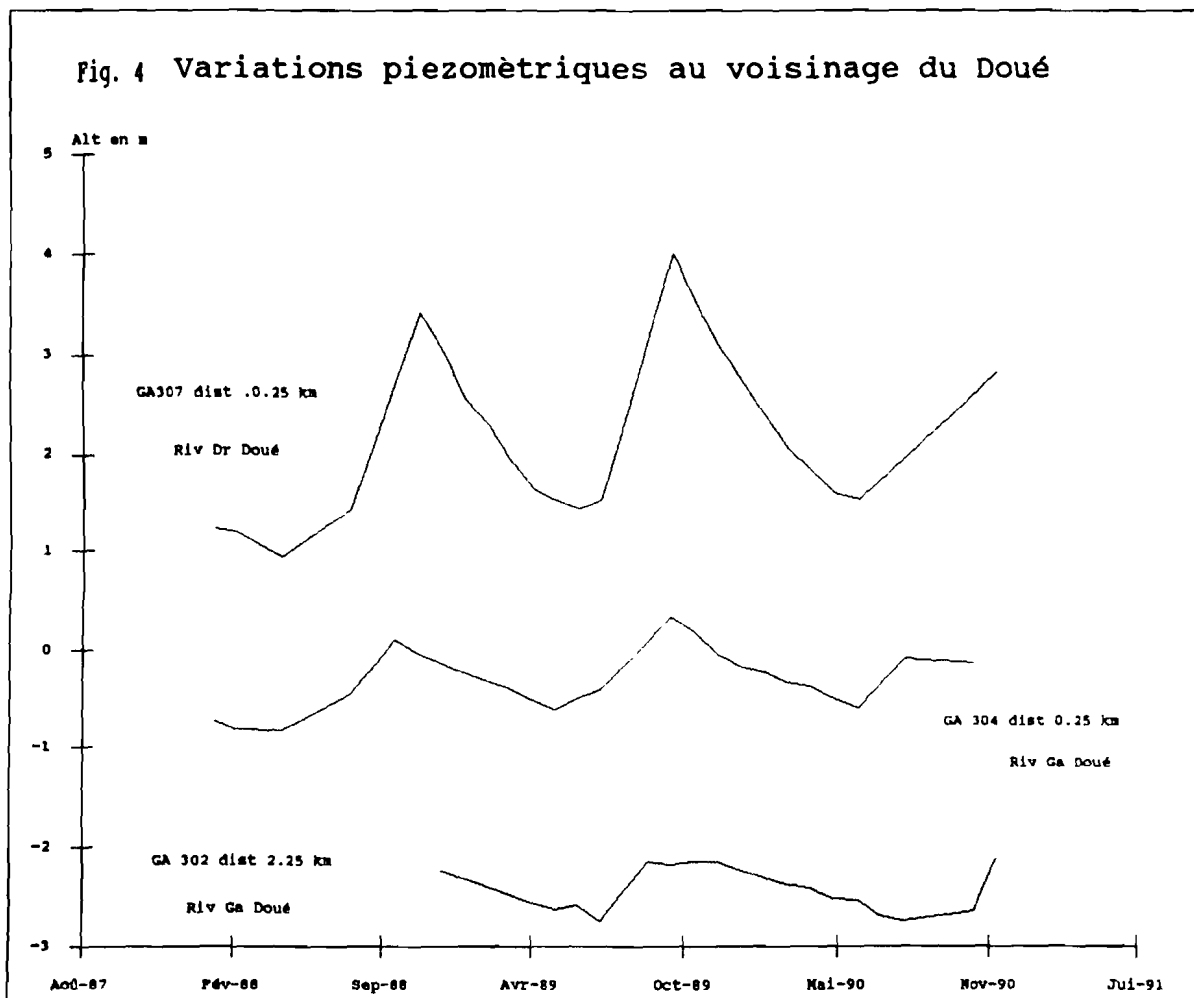


La nette remontée de la nappe sous les casiers hydroagricoles, quand ils sont mis en eau, nous laisse supposer l'importance du rôle joué par les grandes crues dans le mécanisme de recharge de la nappe, lorsque celles-ci inondaient la majeure partie de la vallée.

2.4 Relations fleuve-nappes :

L'étude des principales lignes transverses de piézomètres montre que l'influence des variations limnimétriques du fleuve sur le niveau de la nappe est très limité, cependant le rayon d'influence se prolonge notablement lorsque le fleuve est relayé par une zone inondée (cuvette, bras etc..).

La figure 3 met en évidence l'influence de la proximité d'un plan d'eau (ici, le Doué à Ngoui) sur les variations piézométriques de la nappe. Le piézomètre GA307 est situé à 250m du Doué entre celui-ci et le fleuve Sénégal, le niveau statique oscille entre la côte +1m et +3,5m. Le GA304, à la même distance mais sur la rive gauche du Doué montre un niveau plus bas, avec des oscillations plus faibles (côte 0 à -1m). A 2250m (piézomètre GA302) la côte piézométrique est beaucoup plus basse (-3,5m) et l'amplitude des variations très amortie (0,5m)



3- Conclusion:

Les études entreprises sur les zones 1 (delta) 2 (Richard-Toll / Lac de Guiers) et 3 (Matam) montrent le caractère complexe des aquifères de la vallée du Sénégal .

La mise en service des barrages de Diama et Manantali a modifié considérablement l'équilibre naturel des échanges hydriques. La recharge des eaux souterraines qui se faisait par les inondations annuelles naturelles, se fait maintenant de manière ponctuelle par les périmètres hydroagricoles (où trois récoltes annuelles sont désormais possibles)

les résultats de l'ensemble des travaux de ce programme seront présentés dans un premier temps dans trois mémoires de DEA d'hydrogéologie:

- Etude des relations eaux de surface/ eaux souterraines dans la région du fleuve Sénégal, secteur Richard-Toll - Lac de Guiers (Serigne Malick DIAW) Mai 91

- Impact des aménagements hydroagricoles sur la nappe alluviale (Richard-Toll - Lac de Guiers) (Martine Da Boit) Nov. 91

- Application de la géophysique (méthode A.M.T) à l'étude hydrogéologique de la vallée du fleuve Sénégal (Youssef Koussoube) Dec. 91.

Et une thèse de 3 ème cycle:

-Etude hydrogéologique de la moyenne vallée du fleuve Sénégal: détermination de la recharge des nappes. (Amadou Diagana) Avr. 92.

LE VOLET FORMATION

Le soutien de la CEE a permis dans le cadre d'EQUESEN, objet sur "L'Environnement et la qualité des eaux du Sénégal" développer un important volet de formation aussi bien à l'égard de jeunes chercheurs européens qu'africains. Le mérite revient aux différents responsables des programmes. Il me vient ici de souligner le premier encadrement de mémoire par Alioune Kane du département de Géographie de l'Université Dakar.

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).

Noël DACRUZ EVORA : Détermination de l'évaporation et des flux hydrologiques du lac de Guiers (Sénégal). Thèse de 3ème cycle soutenue le 28 novembre 1990 à l'Ecole Polytechnique de Mons, Belgique (J.Y.GAC et F.X.COGELS membres du jury).

Fatou NDIAYE: Simulation du système paléocène-maestrictien du Fouta Djallon avec un modèle tridimensionnel aux différences finies (Sénégal). Thèse de 3ème cycle soutenue le 28 novembre 1990 à l'Ecole Polytechnique de Mons, Belgique (J.Y. GAC et F.X. COGELS, membres du jury).

Cheikh Becaye GAYE : Etude isotopique et géochimique de la recharge par les pluies et de la décharge évaporatoire des aquifères libres sous climat semi-aride au nord du Sénégal. Thèse de Doctorat d'Etat soutenue le 4 décembre 1990 à l'Université de Dakar (membre du jury : J.Y. GAC).

Didier ORANGE : Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat d'Etat soutenue le 20 décembre 1990 à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg (membre du jury : J.Y. GAC).

Abdoulaye FAYE : Eau et milieu physique dans le bassin de l'axe Gorom-Lampsar (Sénégal). Mémoire de maîtrise soutenu en décembre 1990 à la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de l'Université de Dakar (membre du jury : A.KANE).

noires et Thèses en préparation :

1. Mamadou Issa DIALLO : Les poussières atmosphériques.
1. Serigne Malick DIAW : Relation eaux surface/nappe.
1. Mme Martine Da BOIT : Impact sur la nappe des aménagements.
1. Youssouf KOUSSOUBE: Application de la géophysique à l'étude hydrogéologique de la vallée du fleuve Sénégal.
1. Amadou DIAGANA : Détermination de la recharge des nappes.