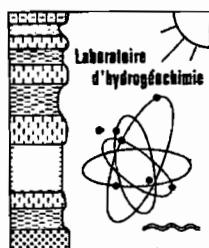


**ETUDE PRELIMINAIRE DE LA
PHYSICOCHIMIE DES EAUX
INTERSTITIELLES DES SEDIMENTS
DU LAC DE GUIERS (SENEGAL)**

**J. Y. GAC
M. CARN
J. VILLENEUVE
S. B. BAMBA
Y. TRAVI
P. P. VINCKE
M. DIOP
J. Y. LE BRUSQ
D. GOULEAU
F. X. COGELS**



FEVRIER 1985

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE

POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION

— CENTRE DE DAKAR-HANN —



ETUDE PRELIMINAIRE DE LA PHYSICOCHEMIE
DES EAUX INTERSTITIELLES DES SEDIMENTS
DU LAC DE GUIERS (SENEGAL)

PAR

J.Y. GAC¹, M. CARN¹, J.E. VILLENEUVE¹, S.B. BAMBA², Y. TRAVI²,
P.P. VINCKE³, M. DIOP⁴, J.Y. LE BRUSQ¹, D. GOULEAU⁵, F.X. GOGELS⁶

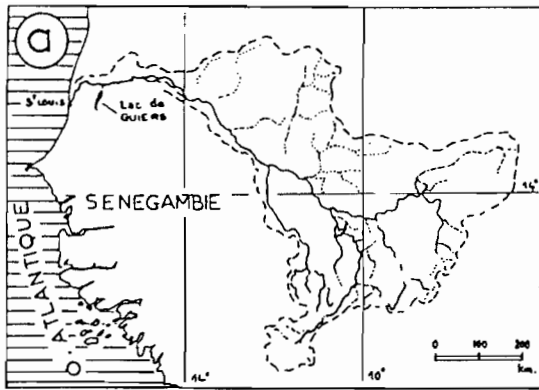
-
- (1) ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération), Hann, B.P. 1386, Dakar (Sénégal)
(2) Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université de Dakar (Sénégal)
(3) I.S.E. (Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Dakar (Sénégal)
(4) Département de géographie, Faculté des Lettres, Université de Dakar (Sénégal)
(5) Laboratoire de Géologie marine et Appliquée, Université de Nantes (France)
(6) F.U.L.(Fondation Universitaire Luxembourgeoise), Arlon (Belgique)

INTRODUCTION

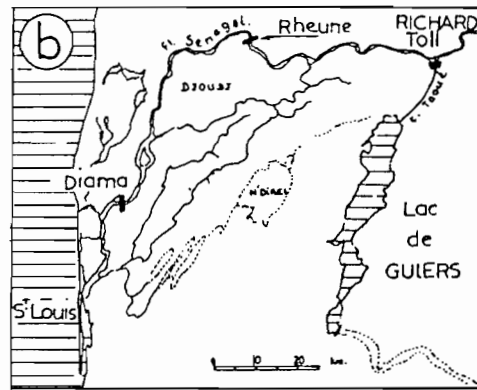
De nombreuses études ont été entreprises ces dernières années sur le dispositif fluvio-lacustre constitué par le fleuve Sénégal et le lac de Guiers. Dans le domaine de l'eau, dont l'abondance et la qualité conditionnent la survie des populations riveraines et le développement harmonieux autour de la dépression, une attention particulière a été portée aux eaux de surface. Elle a débouché sur une meilleure compréhension du fonctionnement hydro-géochimique de l'écosystème et sur la proposition finale d'un modèle de gestion qui identifie les scénarios possibles dans l'éventualité d'une exploitation concertée de cette grande réserve d'eau douce permanente.

En réalité, les alternatives envisagées qu'elles soient d'actualité ou des projections sur l'après-barrage, perdent un peu de leur crédibilité par la méconnaissance de l'un des termes fondamentaux du bilan hydrique: les échanges réciproques et les transferts entre les eaux libres de surface et celles piégées dans les nappes qui imprègnent les sédiments ou les formations géologiques situées sur le pourtour de la dépression.

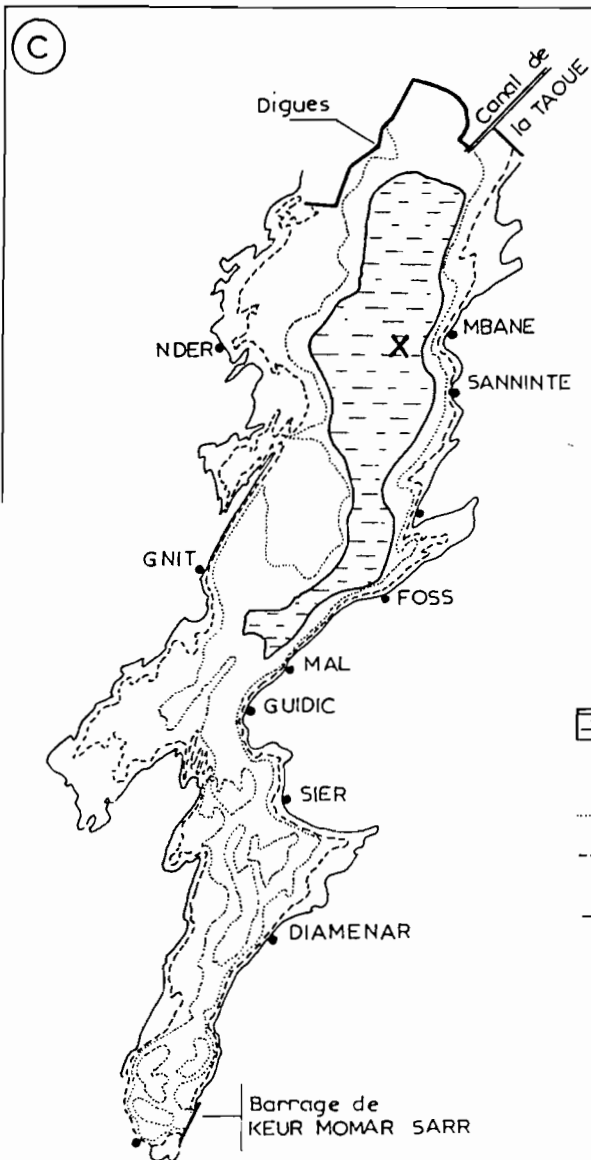
L'étude présentée ici constitue une première approche de la physicochimie des eaux sous-lacustres rendues accessibles, en juin 1983, par le retrait progressif des eaux de surface vers le nord du lac et l'exondation des sédiments dans les régions méridionales et centrales. Des résultats partiels ont été récemment présentés (BAMBA, 1985).



Le bassin versant du fleuve Sénégal



Le lac de Guiers et l'embouchure du fleuve.



✕ barrages

● DIAGLE






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

Fig. 1 : Situation géographique du lac de Guiers (le lieu de prélèvement indiqué correspond à la prise d'eau effectuée pour simuler expérimentalement en laboratoire l'évaporation des eaux du lac de Guiers).

I.- CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES ET GEOLOGIQUES. LES ELEMENTS DU CLIMAT ET LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU LAC DE GUIERS.

A.-SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le lac de Guiers occupe en rive gauche du fleuve Sénégal une dépression allongée orientée Nord-Sud. Dans sa configuration actuelle, imposée par l'endiguement des exutoires naturels, il s'étend entre 15°55' et 16°22' de latitude nord et 15°46' et 15°58' de longitude Ouest (Fig 1). Peu profond (de 2 à 4 m.), situé en dessous du niveau de la mer (-2m. IGN), il constitue actuellement le plan d'eau douce permanent le plus septentrional de toute la frange sahélienne de l'Afrique. A son plus haut niveau (+2,25 m. IGN), il se déploie sur une longueur de 50 km., une largeur de 7 km. et une superficie d'environ 320 km². Tributaire essentiellement de la crue du Sénégal pour son alimentation annuelle, il constitue un milieu très instable dont les contours évoluent sans cesse au cours des saisons. (Fig.2). La région du lac de Guiers présente peu d'affleurements. Le substratum est souvent dissimulé par les alignements de dunes rouges: les calcaires et les argiles feuilletées de l'Yprésien apparaissent en rive Ouest (Mbrar et Nder); les marnes à huîtres, les grès et les calcaires du Lutétien inférieur mentionnés par SAINTON (1957) bordent l'extrémité Sud du lac (Keur Momar Sarr); quelques lambeaux de la cuirasse ferrugineuse du Continental Terminal affleurent en rive Est (Mbane, Saninthe, Sier et Diaménar).

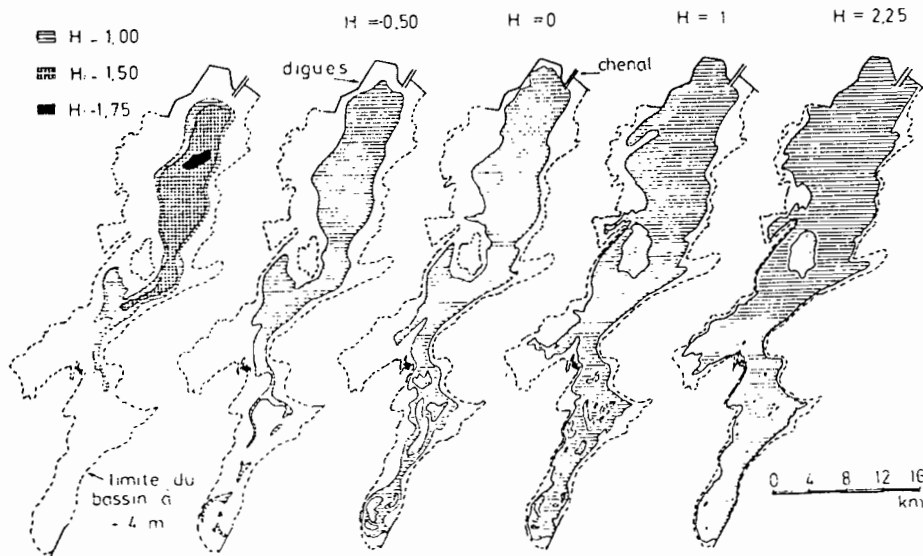


fig.2 - Evolution saisonnière des contours de la nappe d'eau libre.

L'évolution paléogéographique au Quaternaire récent a été précisée par TRICART (1954), MICHEL (1973), PINSON-MOUILLOT (1980), MONTEILLET et al. (1981) et DIOP (1984). Les différentes étapes reconnues sont résumées dans le Tableau 1 extrait de l'étude de DIOP (1984) sur la géomorphologie du delta sous-lacustre du Guiers.

1.-L'aride Ogolien et la mise en place des ensembles dunaires vers 20000. 9000 ans B.P.:

Le développement des calottes glaciaires de 20000 à 18000 ans B.P. provoque un abaissement de 120 à 132 m. du niveau de la mer et le renforcement des alizés continentaux qui déterminent l'accumulation de vastes ensembles dunaires du Trarza au Sine Saloum et les placages éoliens jusqu'aux régions montagneuses du Sud (Fig.3).

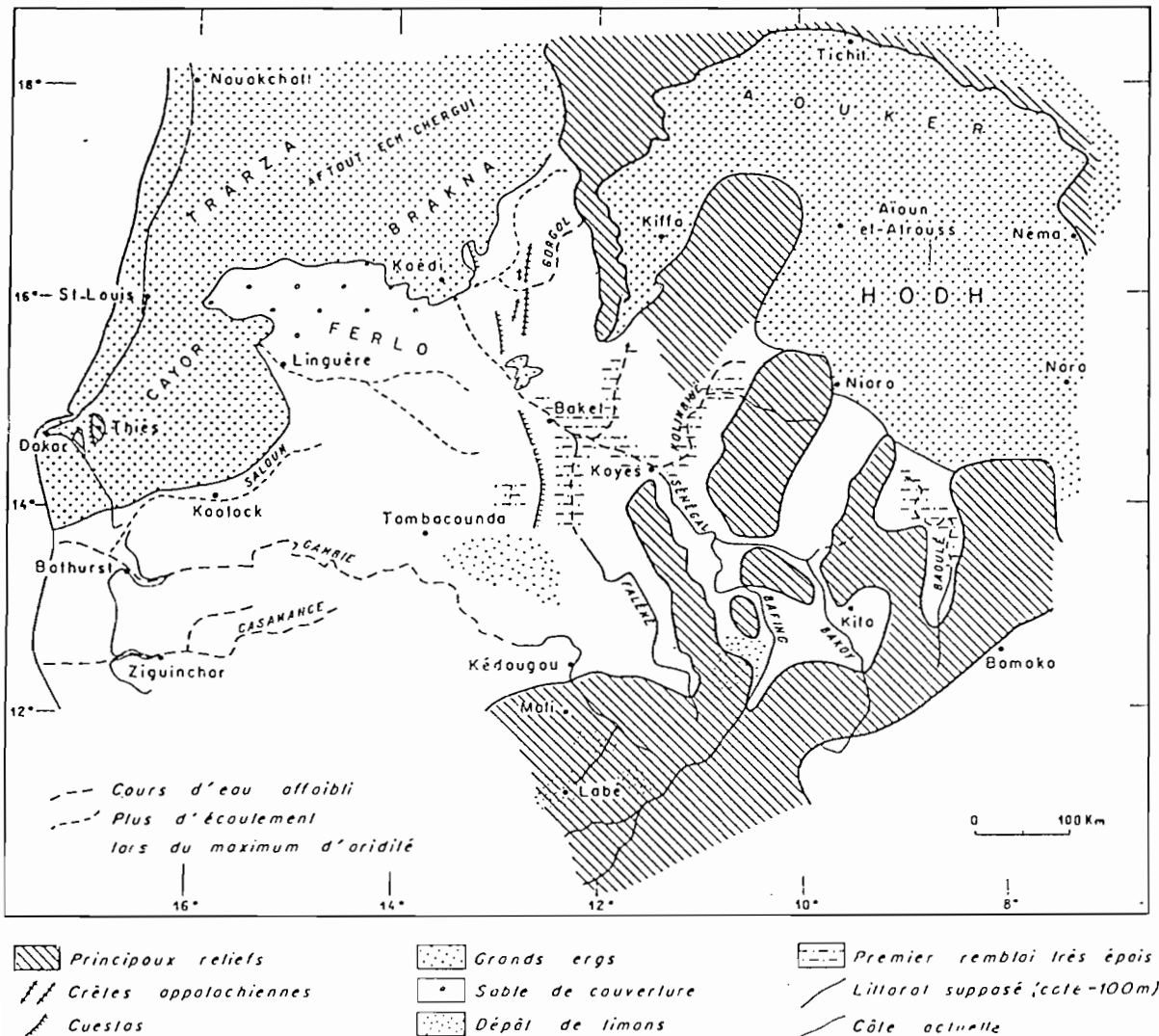


fig.3 - Réseau hydrographique et dépôts lors de la grande phase aride Ogolienne.

Tableau I : Evènements paléogéographiques et paléoclimatiques majeurs de l'Ogolien à l'Actuel dans la région du Lac de Guiers (DIOP, 1984)

Etage	Ogolien	Tchadien	Petite phase sèche	Nouakchottien	Tafolien	Dakarrien	Subactuel et Actuel
Age (B.P.)	22 000-1 3000	13 000-8 000	8 000-6 500	6 500-4 500	4 500-2 000	2 000-1 900	-
Niveau marin par rapport au 0 actuel	Régression - 132 m	Transgression	Régression (?)	Transgression + 2,25 m	Régression	Transgression (?)	0 actuel
Caractères du climat	aride	humide	sec	humide	sec	humide	type sahélien P < 500 mm Ev > 10 mm/j T° fortes
Evènements majeurs et formes engendrées.	Mise en place des systèmes dunaires et début d'écoulement du Ferlo.	Rubéfaction des dunes ogoliennes, entaille du barrage dunaire du Ferlo.	Remaniement des dunes rouges. Bourrelets éoliens	Terrasse marine et delta miniature du Ferlo.	Arrêt écoulement du Ferlo et Milieu lacustre.	Invasion saline du Ferlo.	Actions éoliennes, aménagement élaboré.
Agent morphogénétiques principaux	Vents et précipitations	Ferlo	Vents	Mer et Ferlo	eaux lacustres	Mer	Vents et eaux lacustres
Nature des dépôts	sable	sable	sable	sable, pelites, sel et dépôt coquilliers	vase	sable argileux (coquillier)	Vase au Nord, sable au Sud.

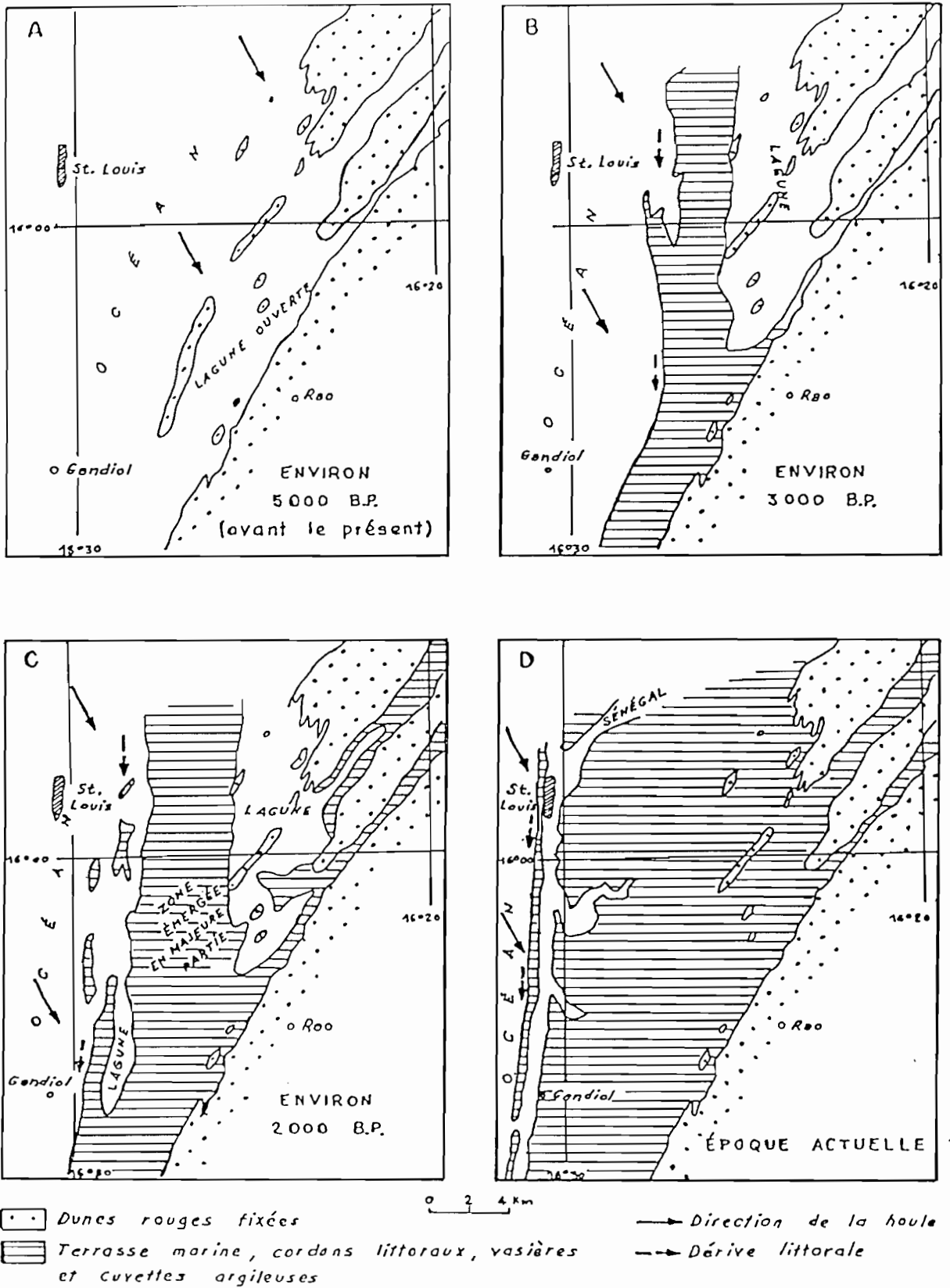


Fig 4 : Evolution de la basse vallée du Sénégal depuis la dernière transgression (in P.Michel , 1973)

2.-Le pluvial post-Ogolien (Tchadien) de 13000 à 8000 ans B.P.:

L'installation d'un couvert végétal relativement dense sous l'influence d'une pulsation plus humide entraîne la fixation des massifs dunaires qui acquièrent leur coloration rouge par précipitation des oxydes de fer; au Sud, le Ferlo fortement alimenté en taille le barrage dunaire et ses eaux ravinent les cuirasses et les calcaires du Paléocène. C'est à cette époque que les systèmes lacustres de l'Afrique de l'Ouest connaissent leur extension maximum.

3.-La petite phase sèche post Tchadienne de 8000 à 6500 ans B.P.:

Cet épisode est essentiellement marqué par le remaniement des ensembles dunaires sous la recrudescence des agents éoliens (SALL et al., 1978).

4.-La transgression du Nouakchottien de 6500 à 4500 ans B.P.:

Elle atteint son maximum vers 5500 ans B.P.; le niveau de la mer remonte progressivement et s'établit à la cote +2,25 m. Les eaux océaniques submergent les basses vallées de la Sénégambie, le chenal de la Taoué et s'engouffrent dans la dépression du lac de Guiers et le Ferlo (MONTEILLET et al., 1981). Une puissante ria se développe dans le cours inférieur du fleuve Sénégal, la sédimentation devient lagunaire dans le lac de Guiers (Fig.4a). Au sud, le Ferlo qui connaît son potentiel hydraulique maximum édifie le delta sous-lacustre (DIOP, 1984).

5.- Le Tafolien et le milieu lacustre de 4500 à 2000 ans B.P.:

Le fleuve Sénégal durant cette période post-Nouakchottienne a construit son delta (Fig.4b); celui-ci avançait progressivement vers l'Ouest en prenant une forme très allongée. Au fur et à mesure de l'empilement des flux détritiques, issus de l'amont, le delta sous-marin a émergé colmatant peu à peu la lagune. Le lac de Guiers s'est constitué à la suite du barrage de la dépression qu'il occupe par les dépôts deltaïques du Sénégal. Cet épisode marqué par une diminution de l'écoulement du Ferlo a été suivi d'une remontée du niveau marin vers 2000 ans B.P..

6.- Le Dakarien et l'invasion saline du Ferlo de 2000 à 1900 ans BP:

Cette transgression a été caractérisée par une remontée rapide du niveau marin. Les eaux océaniques auraient dépassé le village de Yang-Yang situé à 150 Km de la limite actuelle de la vallée du Ferlo (MONTEILLET et al., 1981). Ces auteurs soulignent "que cette intrusion d'eau salée n'implique pas nécessairement une légère élévation du niveau de la mer si l'on tient compte du colmatage qui, depuis le début de l'ère chrétienne, a rehaussé le fond de la vallée": l'avancée de la langue salée pourrait aussi être due à une importante réduction des précipitations sur les bassins versants du Ferlo et du Sénégal (GAC et al., 1981).

7.- les changements subactuels et actuels:

Le climat est devenu humide au cours de cette période de sédimentation fluviatile. Des dunes littorales ont progressivement fermé les anciennes embouchures du Sénégal qui a été dévié vers le sud pour se terminer par un estuaire très étroit. Au Moyen-Age, les dunes auraient été partiellement fixées par la végétation au cours d'une dernière pulsation humide (Fig. 4c).

La période historique aurait connu selon AUDIBERT (1966), de nombreuses incursions salines en direction du Ferlo. Cependant d'après TROCHAIN (1940), il s'agirait d'un phénomène récent qui daterait de 1890-1900 et qui serait lié au défoncement du seuil rocheux de Faff situé sur le fleuve Sénégal en aval de Richard-Toll. Plusieurs épisodes marins dus à l'affaiblissement des écoulements du fleuve auraient ainsi marqué le lac de Guiers jusqu'en 1947, année où fût édifié le pont-barrage de Richard-Toll. Nous essaierons, dans le chapitre consacré à la minéralisation des solutions, d'en préciser "les effets reliques" sur la composition chimique des eaux sous-lacustres.

B.- LES CONTRAINTES CLIMATIQUES DE LA REGION DU LAC DE GUIERS

La région du lac de Guiers se situe en domaine sahélien, zone de transition entre le régime saharien au nord et le régime soudanien au sud. Ses limites correspondent aux isohyètes 250 mm et 700 mm avec une saison pluvieuse très courte étalée essentiellement sur 3 mois (juillet, août et septembre). Nous verrons que la persistance de la sécheresse et la progression vers les zones tropicales du front de désertification a profondément bouleversé les équilibres bio-climatiques de cette région affectée de plus en plus par une tendance prononcée vers un régime sahélo-saharien.

La majeure partie des données climatiques dont nous avons pu disposer provient de la station de Richard-Toll située au nord du lac par 16°27' de latitude Nord et 15°42' de longitude Ouest. D'implantation récente (1975), cette station regroupe l'ensemble des informations recueillies sur toute une série de postes dispersés dans la zone d'exploitation de la C.S.S. (Compagnie Sucrière Sénégalaise). Les observations bi-quotidiennes sur la température de l'air et de l'eau, la direction et la vitesse des vents, l'humidité relative, la durée d'insolation et l'énergie de radiation solaire, l'évaporation et la pluviométrie sont rassemblées, critiquées et diffusées sous la forme de moyennes décadaires et mensuelles. Une analyse approfondie de ces différents paramètres climatiques a été récemment réalisée par COGELS (1984).

1.- La température de l'air et de l'eau du lac

a) La température de l'air

Le Tableau II précise les valeurs des températures (en °C) moyennes maximales et minimales de 1977 à 1982.

Tableau II : Températures mensuelles de l'air à Richard-Toll

Mois	Moy.	Max.	Min.	Mois	Moy.	Max.	Min.
Janvier	22.6	30.6	14.6	Juillet	29.9	35.8	24.0
Février	24.4	33.4	15.3	Août	29.4	34.5	24.2
Mars	26.7	35.9	17.5	Septembre	29.9	35.3	24.2
Avril	28.7	38.1	19.3	Octobre	29.9	37.4	22.4
Mai	29.8	39.0	20.6	Novembre	26.5	34.9	18.1
Juin	30.5	38.1	22.8	Décembre	23.1	31.1	15.0

La température moyenne de l'air est de 27°6 (maximum:35°3, minimum:19°9). Décembre - janvier et février sont les mois les plus froids;avril-mai et juin qui précèdent la saison des pluies sont les mois les plus chauds. Les records absolus depuis l'origine des observations ont été de 45°8 et de 7°3.

b)La température de l'eau du lac

Sur l'ensemble de la période d'observation (1973-1981), la température moyenne des eaux de surface du lac de Guiers est de 23°9 et remarquablement constante d'une année sur l'autre (Tableau III).

Tableau III: Températures moyennes mensuelles des eaux de surface du lac de Guiers (°C).

Mois	Température.moy.mensuelle (1973-1981)
janvier	19.1
fevrier	20.2
mars	21.5
avril	22.9
mai	23.4
juin	25.2
juillet	26.3
aout	28.0
septembre	28.7
octobre	27.2
novembre	23.5
décembre	20.5

Les valeurs extrêmes enregistrées à la station de Ngnith ont été de 16° et de 30°; des mesures ponctuelles réalisées en différents endroits du lac ont cependant permis de noter des températures maximales de 34°5.

2.-L'humidité relative

L'humidité relative moyenne annuelle calculée à partir des données quotidiennes enregistrées à 6h, 12h et 18h s'élève à 61%. Elle est minimum en février-mars (47%) et maximum pendant la saison des pluies de juillet à septembre (75 à 80%). Les valeurs extrêmes vont de 7% à 100% .

3.-La durée d'insolation et l'énergie de radiation

La station climatique de la C.S.S. mesure la durée quotidienne de l'énergie de radiation solaire supérieure ou égale à 60 W/m (limite de photosynthèse). La moyenne annuelle est de 9,4 heures/jour. En général, la valeur maximale se présente en avril (10,6 h/jour) et la plus faible en décembre (8,2 h/jour).

4.-La direction et la vitesse des vents

Toutes directions confondues, la vitesse moyenne des vents qui soufflent sur le paysage lacustre est de l'ordre de 2,5 m/s. Les vents dominants sont de secteurs N-NE et W-NW. L'influence de la mousson se marque de juin à septembre, celle des alizés maritimes, de janvier à mars; les périodes de calme relatif de novembre à décembre.

5.-L'évaporation

L'évaporation a été mesurée de façon très précise, étant donnée son importance dans le bilan hydrologique du lac et son rôle fondamental dans la minéralisation des eaux qu'elles soient de surface ou de sub-surface. L'estimation de son importance quotidienne sur la surface d'eau libre constituée par le lac de Guiers lorsque celui-ci évolue en système fermé (période de fermeture des barrages) a fait l'objet des travaux de COGELS et GAC (1982,1983,1984). Pendant la période d'alimentation par le fleuve Sénégal, ces auteurs ont évalué les pertes par évaporation en utilisant la relation entre les mesures effectuées en bac "classe A " et les estimations de l'évaporation en dehors de la période de remplissage.

De 1976 à 1982, les pertes moyennes par évaporation du lac de Guiers se sont élevées à 2,21 m/an. De janvier à avril-mai, la progression de l'évaporation est constante. Le maximum est atteint en avril avec des valeurs de l'ordre de 7,6 mm/jour. Le taux journalier d'évaporation diminue sensiblement en saison des pluies (5,5 mm/jour), mais les valeurs minimales (4,27 mm/jour) apparaissent pendant les mois frais en décembre et janvier (Fig.5 et Tableau IV). Le rapport moyen annuel $E(\text{lac})/E(\text{bac})$ est de 0.60.

Tableau IV.- Evaporation moyenne mensuelle du lac(El) de Guiers et en bac "classe A" en mm/jour, de 1976 à 1982. Evolution du rapport El/Eb.

Mois	Elac	Ebac	El/Eb	Mois	Elac	Ebac	El/Eb
janv.	4.45	8.26	0.54	juil.	5.56	10.29	0.55
fev.	5.26	10.38	0.51	août.	5.29	8.28	0.64
mars	6.07	12.20	0.50	sept.	5.39	7.46	0.72
avr.	7.68	13.78	0.56	oct.	7.36	9.07	0.81
mai	7.55	13.65	0.55	nov.	6.02	8.81	0.68
juin	7.52	15.85	0.63	déc.	4.27	7.64	0.56

Année moyenne : E lac = 6.04 mm/jour
 E bac = 10.14 mm/jour et El/Eb = 0.60

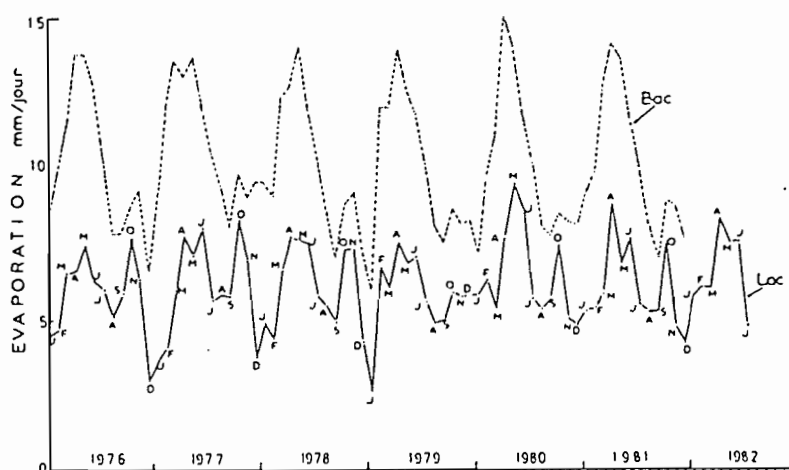


Fig 5: Comparaison entre l'évaporation moyenne mensuelle du bac et celle du lac de Guiers de 1976 à 1982 (mm/jour)

6.-Les précipitations sous formes dissoutes

a)Evolution des précipitations sous formes dissoutes

L'examen des données pluviométriques a été réalisé à partir des observations disponibles en 5 stations: St Louis qui dispose de la série la plus longue (de 1899 à 1982), Dagana (1919-1983) et les trois postes de Richard-Toll, Diaglè et Keur Momar Sarr d'installation récente (1962) mais les plus représentatives des précipitations sur le lac de Guiers.

Les précipitations moyennes annuelles aux différentes stations sont les suivantes:

Saint-Louis	:	357.8 mm (1899-1982)
Dagana	:	338.9 mm (1919-1983)
Richard-Toll	:	236.5 mm (1962-1980)
Diaglé	:	280.4 mm (1962-1980)
Keur Momar Sarr	:	339.9 mm (1962-1980)

A partir de ces pluies moyennes (P), nous avons déterminé pour chaque station, l'évolution du rapport $P_i - P/P$, P_i indiquant la valeur annuelle des précipitations de l'année i . La Figure 6, illustre sur des périodes plus ou moins longues les variations de ce rapport à chaque station. Celles de Dagana et de St Louis donnent des résultats plus significatifs du fait du nombre élevé d'observations: on remarque que les précipitations dans la région du delta ont été très variables depuis le début du siècle avec une succession de périodes sèches et humides. Pour les deux dernières décades qui nous intéressent plus particulièrement, marquées depuis 1968 par une sécheresse sans précédent de mémoire d'homme, l'évolution du rapport est très significative: toutes les valeurs sont négatives et soulignent le caractère persistant et accentué de l'aridité.

b) Evaluation des précipitations sur le lac de Guiers

Les relevés des trois stations situées à la périphérie du lac ont été utilisés pour évaluer de 1962 à 1980, les moyennes annuelles sur la dépression: un "poids" pluviométrique différent a été donné à chacune des stations (50% Diaglé et 25% pour les deux autres) suivant leur position géographique. Il est vraisemblable que l'emploi d'une méthode plus précise (triangulation de Thiessen) donnerait des résultats comparables.

Tableau V : Précipitations annuelles (mm) aux trois stations de Diaglé, R.Toll, et Keur-Momar Sarr, de 1962 à 1980.

Année	Keur.M Sarr	Diaglé	R.Toll	Moy. 62-80	Année	Keur.M Sarr	Diaglé	R.Toll	Moy. 62-80
1962	454.0	295.3	181.6	306.6	1972	144.4	94.1	60.6	98.3
1963	474.7	283.5	293.2	333.7	1973	402.4	188.0	117.2	223.9
1964	220.6	181.8	298.2	220.6	1974	388.3	251.0	186.5	269.2
1965	336.5	374.3	327.2	353.0	1975	481.2	377.4	180.2	333.8
1966	447.0	376.4	298.6	374.6	1976	240.6	256.8	326.1	273.0
1967	497.8	239.9	339.1	359.2	1977	140.1	124.7	144.7	133.6
1968	209.7	272.5	147.3	225.4	1978	248.8	229.0	406.7	278.4
1969	539.8	624.7	302.7	523.0	1979	270.9	272.0	324.8	285.0
1970	311.8	308.6	122.2	263.0	1980	298.6	229.3	281.3	259.7
1971	322.1	349.0	155.7	294.0	Moy.	339.9	280.4	236.5	284.6

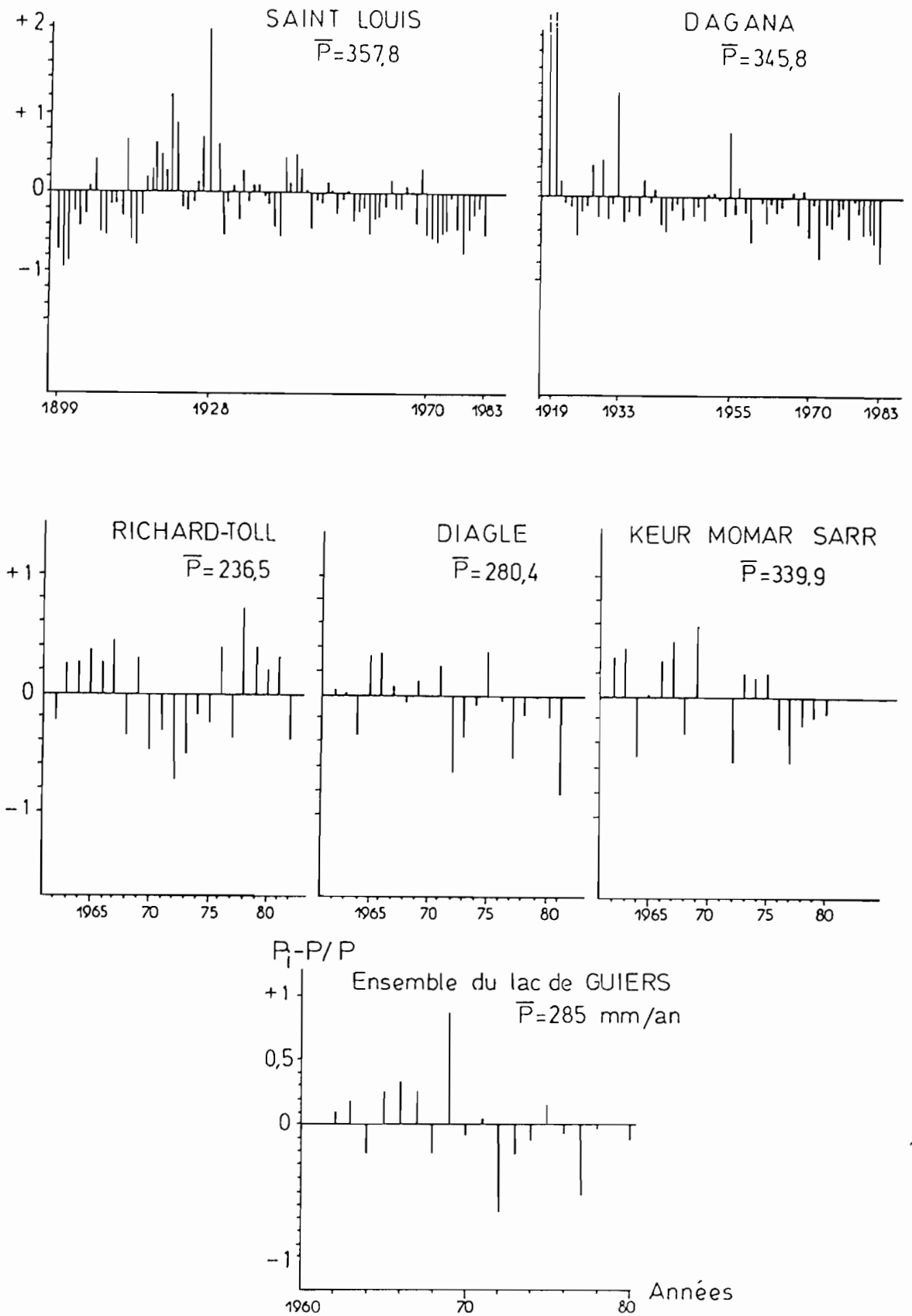


Fig 6: Evolution des précipitations ($p_i - p/p$) aux stations de R.Toll, Diagle, Keur.M-Sarr, Dagana et St.Louis.

En moyenne, sur 19 années d'observation, les précipitations sur le lac de Guiers ont été de 285 mm/an, ce qui représente sur l'ensemble de la dépression un apport météorique annuel de l'ordre de 60.10^6 m^3 , valeur comparable aux estimations de COGELS et GAC (1982,1983) pour la période 1976-1982.

c) Evaluation des apports dissous par les précipitations

Les eaux de pluie ont été collectées à Richard Toll durant les "hivernages" 1982 et 1983. Elles sont faiblement minéralisées (conductivité : $60 \mu \text{ S/cm.}$) et légèrement acides ($\text{pH} = 6,85$). Les pluies sont surtout carbonatées et chlorurées sodiques, ce qui traduit une influence non négligeable des masses d'air d'origine océanique (à noter les très faibles teneurs en silice).

A partir de leur composition moyenne (Tableau VI), et de la charge moyenne en solution (36 mg/l) on évalue à 2000 tonnes environ l'apport annuel d'éléments dissous au lac de Guiers par les précipitations. Ceci représente un apport de 63 Kg/ha/an d'éléments dissous dont 23 Kg. de chlorure de sodium.

Tableau . VI.- Composition chimique moyenne des eaux de pluie collectées à Richard Toll (1981-1982)

Eléments	HCO_3^-	Cl^-	$\text{SO}_4^{=}$	NO_3^-	Na^+	K^+	Mg^{++}	Ca^{++}	SiO_2
m.moles/l	0.199	0.206	0.052	0.01	0.262	0.019	0.023	0.064	0.008
m.eq/l	0.199	0.206	0.104	0.01	0.262	0.019	0.046	0.128	-
mg/l	12.16	7.31	4.94	0.62	6.02	0.74	0.55	2.56	0.48

7.-Les apports terrigènes d'origine éolienne

Depuis quelques années, les phénomènes de brumes sèches, de vents de sable et de sables brassés ont pris une importance rarement observée dans le passé. Naturellement fréquents sur la bordure méridionale du Sahara, ils sont désormais devenus bien plus qu'occasionnels aux basses latitudes de la zone tropicale. Ce développement inhabituel, lié on le pressent à l'accentuation de l'aridité a stimulé les recherches sur ces expulsions de poussières en général d'origine saharienne.

L'ORSTOM de Dakar a, pour sa part, en collaboration avec le Département de Géologie de l'Université de Dakar, mis en place depuis 1982 un réseau d'observations le long du littoral sénégal-Mauritanien avec l'implantation de capteurs à Nouadhibou et Nouakchott (Mauritanie) à Saint-Louis et Dakar (Sénégal). L'importance des poussières atmosphériques au niveau de la dépression lacustre est évidente: du fait de leur abondance, elles sont susceptibles de jouer le rôle de marqueurs paléoclimatiques et, incorporés ensuite avec les flux détritiques fluviaux dans les sédiments

elles peuvent influencer de façon non négligeable les échanges eaux-sédiments.

Les études de GAC et TRAVI (1984) ont permis de quantifier la sédimentation d'origine éolienne: les retombées moyennes journalières lors de la saison sèche 1982-1983 (d'octobre à juin) seraient de l'ordre de $3,7 \text{ gr/m}^2$ à Nouakchott et de $0,5 \text{ gr/m}^2$ à Dakar. Ces auteurs ont évalué à 100.000 tonnes/an l'apport fin actuel (taille des grains de l'ordre de 20 microns), d'origine éolienne dans le lac de Guiers (situé à mi-parcours entre les deux stations). Il serait du même ordre de grandeur que les apports à granulométrie plus grossière, déversés par la crue annuelle du fleuve dans la dépression lacustre lorsque les deux milieux communiquent. Ces poussières éoliennes sont essentiellement siliceuses avec la présence prépondérante de quartz, de plagioclases et de faibles quantités de minéraux phylliteux (kaolinite et illite).

Depuis janvier 1984, et devant l'opacité de plus en plus importante de l'atmosphère occasionnée par une fréquence accrue des phénomènes de brumes sèches, un programme de contrôle journalier a été mis au point en liaison avec l'équipe américaine de l'université de Miami animée par le professeur Prospero. Deux sites ont été retenus: Dakar et les îles Barbades (ce dernier réseau fonctionne sans interruption depuis 1965). La figure 7 résume sommairement les enregistrements 1983 et 1984. Ces résultats seront prochainement plus largement commentés (GAC et al., 1985, sous presse) en mettant l'accent sur le synchronisme avec les observations aux Barbades. De janvier 84 à janvier 85, le maximum enregistré à Dakar a été de $10.6 \text{ gr/m}^2/\text{jour}$ (le 23.05.84).

C.- LE FONCTIONNEMENT HYDROGEOCHIMIQUE DU LAC DE GUIERS

1.-L'évolution des conditions d'alimentation

Les conditions d'alimentation du lac de Guiers, par la crue annuelle du fleuve Sénégal, n'ont pas toujours été ce qu'elles sont aujourd'hui. Elles ont peu à peu été modifiées, et en particulier depuis 1916, par des aménagements de plus en plus élaborés pour une utilisation plus rationnelle de cette grande réserve d'eau douce. Nous évoquerons ici rapidement les changements successifs de la physionomie des contours du lac avant de décrire plus longuement son statut provisoire dû à la construction du barrage de Rheune (novembre 1983) qui préfigure celui de Diama prévu pour 1986.

a)Avant 1916:

Fonctionnement à l'état naturel. La crue annuelle se déversait par l'intermédiaire du chenal de la Taoué dans le lac de Guiers jusqu'à l'équilibre des plans d'eau fluvio-lacustres. A la décrue, les eaux du lac, situées en position haute par rapport à celles du fleuve, revenaient au réseau hydrographique. Selon la sévérité des étiages du fleuve, la remontée de la langue salée pouvait atteindre la hauteur du chenal de la Taoué et du lac. De nombreuses incursions marines de brèves durées se seraient selon HENRY (1918), produites dans le lac de Guiers, en particulier lors

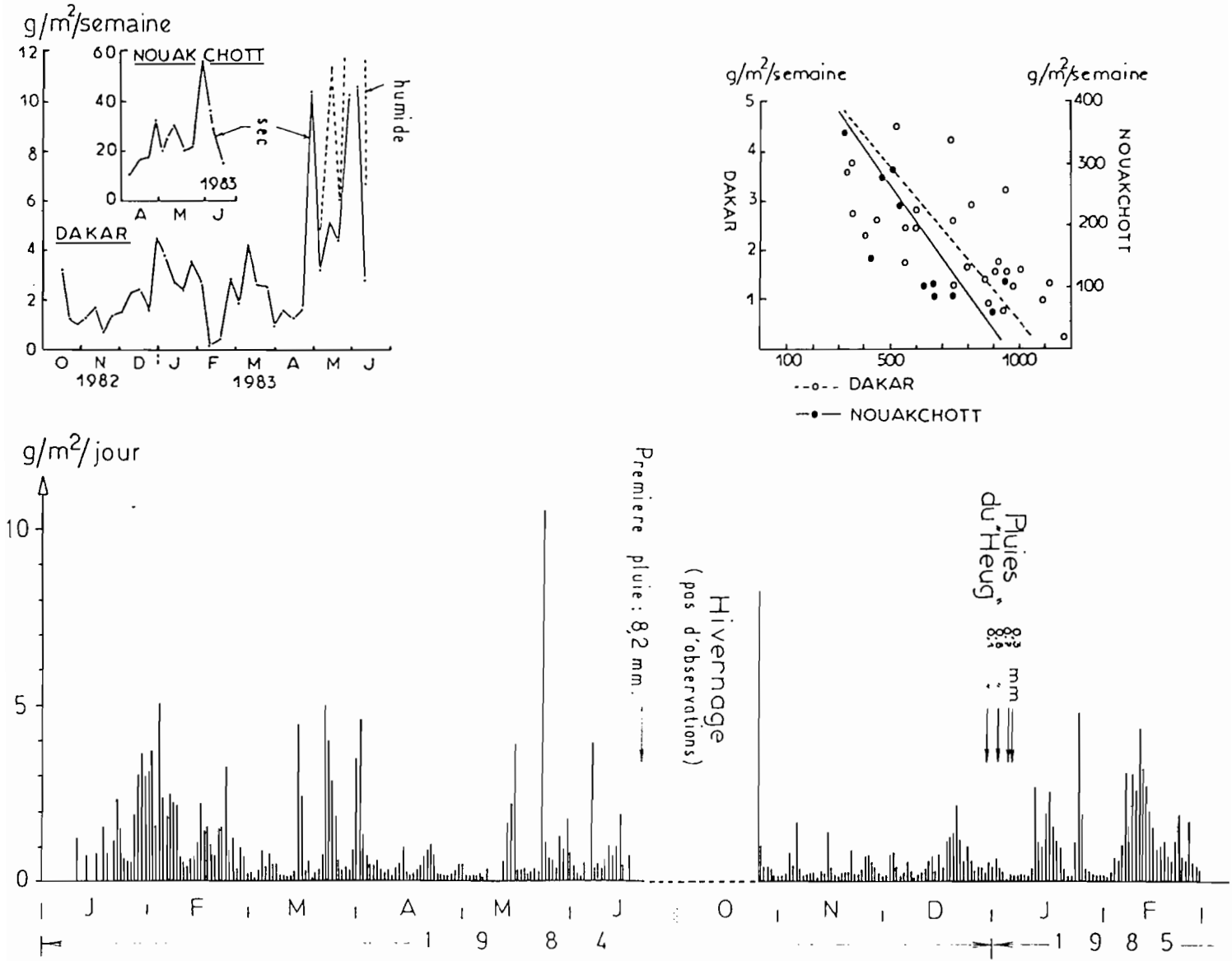


Fig 7 : Phénomènes de brumes sèches en Mauritanie (Nouakchott) et au Sénégal (Dakar)

des épisodes arides de 1913-1914 avec toutes les conséquences prévisibles sur la physicochimie des eaux sub-affleurantes dans les sédiments.

b) De 1916 au 26 novembre 1983:

La figure 8 indique la série des aménagements successifs autour du lac de Guiers depuis l'édification annuelle d'un barrage en terre par les populations riveraines (1916-1946) jusqu'à notre époque avec la construction d'ouvrages plus élaborés. Les variations introduites dans l'alimentation du lac par le fleuve ont été décrites dans le détail par COGELS et GAC (1982, 1983, 1984). Nous invitons le lecteur à se reporter à ces travaux. Le fait le plus important à noter pour notre étude est la rupture définitive de la liaison lac-fleuve lorsque celui-ci subit le phénomène de la remontée marine.

c) De novembre 1983 à nos jours:

Les études de GAC et al. (1981) et d'OLIVRY (1983) sur les causes et les mécanismes de l'intrusion saline dans la basse vallée du Sénégal et leur tentative de modélisation de cette remontée annuelle des eaux océaniques ont fixé au 25 novembre 1983 l'échéance de l'édification du barrage de Rheune. Construit à 115 km de l'embouchure (à 93 km du repère arbitraire: le pont Faidherbe de St Louis) à la suite de conditions météorologiques particulièrement défavorables et d'un déficit sans précédent dans les écoulements du Sénégal, il constitue le premier lien de terre ferme entre le Sénégal et la Mauritanie (fragile et emporté par la faible crue de 1984, il a été rebati le 13 novembre 1984; d'ores et déjà Rheune 3 doit être envisagé). Barrage anti-sel, il permet de se rendre compte des incidences de ce barrage sur l'évolution du plan d'eau du lac de Guiers, maintenu artificiellement à un niveau plus élevé grâce aux déversements des pompages d'appoint prélevés dans le fleuve. (Fig. 9)

2. Bilan hydrologique du lac de Guiers

L'équation du bilan hydrologique au cours d'un cycle complet peut s'écrire:

Etat final - Etat initial = Entrées - Sorties

$$V = V_f - V_i = (V_F + V_{po} + V_{me} + V_n + V_r) - (V_E + V_{pl} + V_{p2} + V_{ms} + V_{inf.})$$

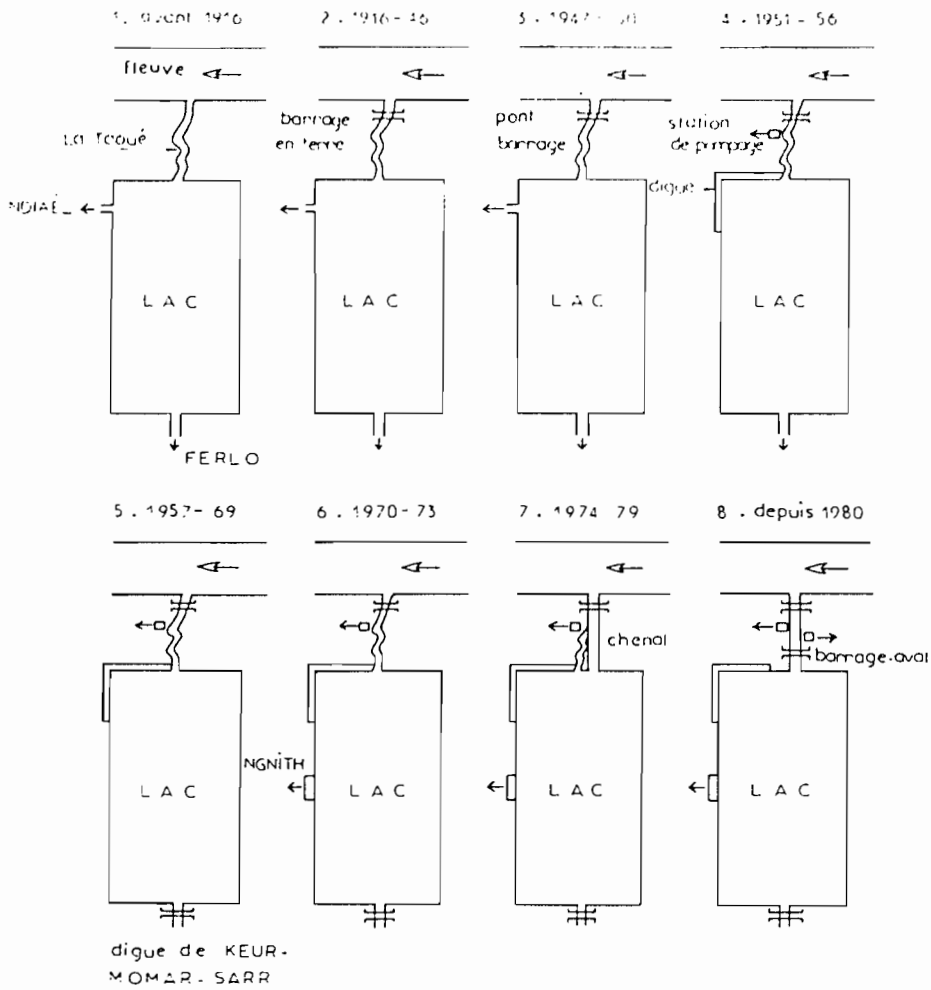


Fig 8 : Représentation schématique des aménagements successifs du lac depuis 1916 . Illustration du fonctionnement du système de barrages sur la Taoué.

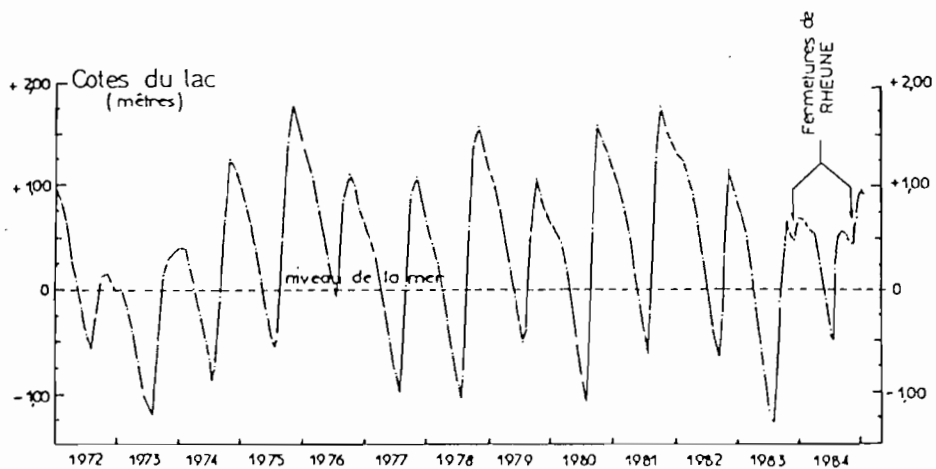


Fig. 9 Evolutions saisonnières et annuelles de la cote du plan d'eau du lac de Guiers à N'gnith entre 1972 et 1985 (d'après Cogels -Gac)

V_F :apports du fleuve	V_E :volumes évaporés
V_{po} : " des pluies	V_{pl} :pompages de la C.S.S.
V_{me} : " marins(1)	V_{p2} : " de la S.O.N.E.E.S
V_r : " des rejets des zones irriguées et des pompages	V_{ms} :retour des eaux marines(1)
	V_{inf} :infiltrations souterraines

V_n :apports souterrains (2)

(1) avant 1916,intervention des flux et des reflux (V_{me} et V_{ms}) des eaux salées

(2) les échanges réciproques entre les nappes (sous-lacustres ou périphériques) et le lac (V_n et V_{inf}) ont été très peu étudiées. Avec COGELS (1984), on admet des valeurs sensiblement identiques pour ces deux termes du bilan hydrique qui devient:

$$V = V_f - V_i = (V_F + V_{po} + V_r) - (V_E + V_{pl} + V_{p2})$$

Au cours des six dernières années, le volume moyen du lac a été de 280 millions de m³, sa surface de 210 km² et sa profondeur de 1.33 m. Le bilan moyen annuel du lac, de 1976 à 1982 peut être résumé par le schéma suivant(COGELS et GAC, 1983):

$V_{po} = 60$		$V_{pl} = 107$
	V_{lac}	
$V_F = 447$	280	$V_E = 440$
$V_r = 40$		$V_{p2} = 11$

Entrées: 547.10^6 m^3

Sorties: 558.10^6 m^3

De ces études, il ressort que le lac est essentiellement alimenté par la crue du Sénégal qui représente 81 % de l'apport total, les eaux météoriques apportant 11 % et les eaux de drainage des zones exploitées par la Compagnie Sucrière Sénégalaise (C.S.S.) 8 % . Les pertes en eau proviennent des pompages conjugués de la C.S.S. (19 %) de l'usine de traitement des eaux de la Société Nationale d'Exploitation des Eaux du Sénégal (SONEES, 2 %) implantée à Ngnith et sont surtout dues à l'intense évaporation

(79 %). L'écart de 11 millions de m^3 (soit 2 % de l'ensemble des masses d'eau) mesuré dans le bilan global (différence entre les entrées et les sorties), pourrait correspondre au volant d'eau mis en jeu par l'intervention des nappes, ou plus simplement à la marge d'erreur tout à fait normale pour un tel bilan dont la plupart des termes ne sont qu'estimés.

La réalité des échanges éventuels entre eaux de surface et eaux souterraines a été évoquée à maintes reprises (HENRY, 1918; PLAUD, 1966; LEULIER, 1983). Dans son étude limnologique COGELS (1984) a tenté de quantifier l'importance des transferts de sels vers les nappes souterraines en considérant un état moyen du lac à la côte +0.50 m. IGN. Le calcul élément par élément fournit des valeurs extrêmes de $58,5.10^6 m^3$ (cas des sulfates) et de $14,5.10^6 m^3$ dans le sens d'une alimentation des nappes souterraines. L'écart n'est pas trop important avec le résultat précédent mais, suffisant, pour montrer tout l'intérêt d'une étude approfondie de la physicochimie des eaux souterraines au niveau du lac et de ses bordures. Dans l'état actuel de nos connaissances, le bilan des pertes par infiltration représenterait 11 % du volume moyen du lac, valeur tout à fait comparable aux estimations de ROCHE (1973) et de CARMOUZE (1976) pour la cuvette Tchadienne.

D.- LES ECOULEMENTS DU FLEUVE SENEGAL ET L'INTRUSION SALINE DANS LA BASSE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

1. Le régime du fleuve Sénégal

Le fleuve Sénégal est issu de la jonction du Bakoye, du Bafing et de la Falémé qui prennent leurs sources sur le haut plateau Mandingue et dans le massif du Fouta-Djalou. Après la réunion des trois branches-mères, en amont de Bakel, le fleuve s'engage en domaine sahélien en décrivant de nombreux méandres dans une large vallée alluviale. Il parvient à la hauteur du lac de Guiers après un parcours de 1700 kms., peu avant d'aborder son delta et d'atteindre l'embouchure.

Les observations hydrométriques sur le fleuve Sénégal datent de 1903. Aux deux stations clefs du réseau (Bakel et Dagana) les modules moyens interannuels pour la période 1903-1984 s'élèvent respectivement à $715,1 m^3/s$. et $641,3 m^3/s$. Les valeurs extrêmes ont été observées en 1924. (B: $1247 m^3/s$.; D: $969 m^3/s$.) et en 1983 (B: $220 m^3/s$; D: $226 m^3/s$). Depuis le début du siècle on peut globalement distinguer trois épisodes humides (avant 1910, 1919-1940, 1950-1967) et trois séquences sèches (1911-1918, 1940-1949, depuis 1968). La sécheresse actuelle apparaît en durée et en intensité, bien plus importante que celles des années 1913 et 1941-1942. Elle s'est traduite par une intrusion précoce de la mer, le transit d'eaux fortement salées à la hauteur du lac de Guiers et a déterminé l'implantation du barrage de Rheune.

2. La remontée saline

Le lit mineur du fleuve Sénégal se situe en contrebas de l'océan sur une longueur de 450 km. En faisant abstraction d'une éventuelle variation du niveau moyen de la mer, quatre causes principales sont à l'origine de la remontée d'eau salée vers l'amont du fleuve: la morphologie du lit, le régime du fleuve, la puissance de la houle à l'embouchure et la pente du talus continental.

Le même mécanisme se répète chaque année. Après le passage des eaux de la crue, l'intrusion saline débute par une première phase d'oscillation du plan d'eau du fleuve sous l'influence des marées (le mascaret semble peu important). Lorsque la décrue est mieux amorcée (écoulement inférieur à $600 \text{ m}^3/\text{s}$), les eaux marines franchissent l'embouchure. L'importance de la remontée saline va alors dépendre de deux paramètres étroitement liés aux hauteurs et à la distribution des précipitations sur le bassin (ROCHETTE, 1974; GAC et al. 1981; ICOLE et al. 1982):

- la plus ou moins grande précocité du tarissement de la crue du fleuve,
- la durée de la période d'étiage pendant laquelle, le débit se maintient en dessous de $50 \text{ m}^3/\text{s}$.

En général, une crue faible engendre une intrusion rapide du biseau salé, une crue forte un temps de séjour moins long des eaux marines dans le lit du fleuve. La figure 10 illustre les positions respectives des isohalines au cours d'une succession de cycles hydrologiques très humides (1953-1958) ou très secs (1974-1979). On remarque que:

- en période humide, le front salé se stabilise vers le km 150, soit quelques kilomètres seulement en amont de la ville de Richard-Toll. La salinité reste inférieure à 2.5 ‰ pendant les deux mois où le sel réside à la hauteur du lac de Guiers.

- en période aride, la mer se déploie largement et en profondeur vers l'amont (km 250). Les taux de salinité se maintiennent entre 10 et 15 ‰ pendant près de trois mois au niveau du chenal de la Taoué.

La relation, dans le temps, entre le débit du fleuve Sénégal et la remontée saline, est fondamentale car elle a permis d'évaluer le remplissage du lac de Guiers et de préciser jusqu'en 1947 l'historique des invasions d'eaux salées. La nature physicochimique des eaux des sédiments est intimement liée à cette histoire.

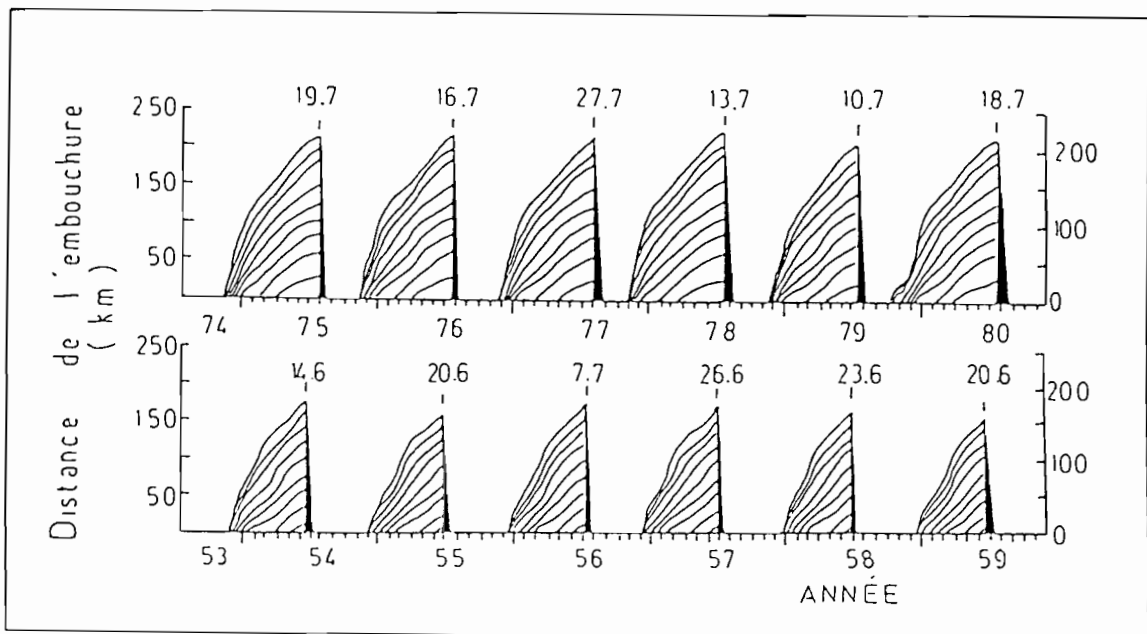
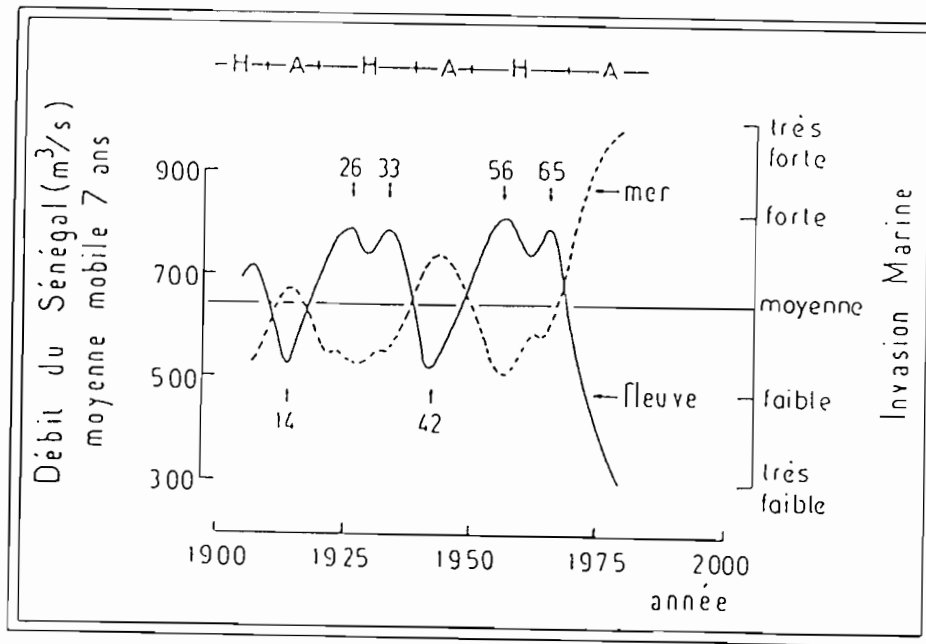


Fig 10 : Relation entre les débits du Sénégal et l'importance de la remontée saline.

E -Conclusion: On s'aperçoit à travers cette brève description géologique, géographique, climatique et hydrologique de l'environnement du lac de Guiers, de l'extrême instabilité dans le temps et dans l'espace de ce milieu fragile assujéti à des variations climatiques d'une grande amplitude avec des séquences sèches particulièrement prononcées ces dernières années.

I.-CARACTERISTIQUES SEDIMENTOLOGIQUES DES FONDS LACUSTRES. NATURE ET EVOLUTION PHYSICOCHIMIQUE DES EAUX DE SURFACE DU LAC DE GUIERS

A.- LES SEDIMENTS LACUSTRES

Ce sont des sédiments dont l'étude a été entreprise par MICHEL(1973), SAOS et al. (1981) et plus récemment en 1983 par une équipe multidisciplinaire animée par l'ORSTOM de Dakar dans le cadre d'un vaste programme "Paléoclimat". L'analyse fine de ces derniers sondages est en cours

1.- origine des sédiments superficiels récents et actuels

L'origine des sédiments est d'une part éolienne et, d'autre part, fluviatile (crue du Sénégal et du Ferlo), et cette double origine a déterminé une sédimentation désordonnée. Depuis l'isolement de la vallée du Ferlo par le barrage de Keur Momar Sarr, la sédimentation revet un double caractère. Etant donné, la faible épaisseur de la lame d'eau, l'intensité et la direction des vents dominants qui soufflent selon le grand axe du lac, elle est essentiellement détritique dans les zones nord et centrale, détritique et chimique dans la zone sud lors des phases de précipitations qui accompagnent la minéralisation des solutions concentrées par évaporation (COGELS, 1984).

2.-Les séquences lithologiques

Les deux premiers sondages effectués en 1981 (SAOS et al.) se situent à 500 m. des rives Est et Ouest, le premier (S) dans la zone nord (16°14'N, 15°51'W), et le second (S) dans la région centrale du lac au sud de Foss (16°08'N, 15°53' W). La coupe suivante a pu être établie à partir du sondage S₁:

- 0.17 à 0.30 m.: vase gris brun foncée très fine,
- 0.30 à 0.44 m.: vase vert olive très fine et assez liquide; présence de quelques petites lentilles de sable et rares débris de coquilles.
- 0.44 à 0.51 m.: vase gris vert foncé,
- 0.51 à 0.66 m.: formation noire d'aspect grumeleux; vase sablo-argileuse avec de nombreux débris végétaux.
- 0.66 à 0.76 m.: niveaux plus argileux, compacts, gris foncé
- 0.76 à 0.85 m.: horizon très compact, gris foncé
- 0.85 à 0.95 m.: base de la colonne très compacte, gris vert présentant des tâches brunes d'oxydation.

Les études palynologiques et la connaissance des associations de diatomées dans les 6 unités sédimentaires permettent d'affirmer que des variations importantes sont intervenues dans l'environnement lacustre au cours de l'Holocène. La présence de pollens de Rhizophora (3.5 %) dans le niveau inférieur semble indiquer que la formation rencontrée correspond à l'invasion saline reconnue par MONTEILLET et al. (1981) dans la vallée du Ferlo et datée de 1900-2000 ans B.P.

Les six niveaux sont différenciables dans le second sondage (S₂). Une étude au microscope optique a permis de montrer que tout le long de la coupe on retrouve des grains de quartz, des débris végétaux, des spicules de spongiaires, des phytolites, des pollens et de nombreuses diatomées dans des proportions variables.

Deux autres sondages réalisées en 1983, plus profonds que les deux précédents atteignent 7,40 m. pour le sondage (S'₂) et 6,35 m. pour le sondage (S'₃). Le sondage (S'₂) a donné la séquence lithologique suivante:

- 0.00 à 0.45 m.: vide
- 0.45 à 0.70 m.: argile bleu-vert, présence de racines, tâches rouilles, ocres et verdâtres,
- 0.70 à 1.13 m.: argile, très humide avec des litages inclinés, verts, débris organiques,
- 1.13 à 1.17 m.: passé sableux sub-horizontale, vert clair
- 1.17 à 1.25 m.: argile grisâtre à structure polyédrique marquée
- 1.25 à 1.45 m.: vide
- 1.45 à 2.28 m.: horizon très homogène d'argile gris bleu avec tâches, structure polyédrique
- 2.28 à 2.45 m.: vide
- 2.45 à 3.23 m.: niveau argileux entrecoupé de petits niveaux sableux avec des fragments de végétaux
- 3.23 à 3.45 m.: vide
- 3.45 à 7.40 m.: niveau uniformément sableux avec:
 - concrétions noires (3.57-3.66 m.)
 - coquilles d'huitres (4.12-5.25 m.) datées à 6 000 ans B.P.
 - matière organique (3.45-5.70 m.)

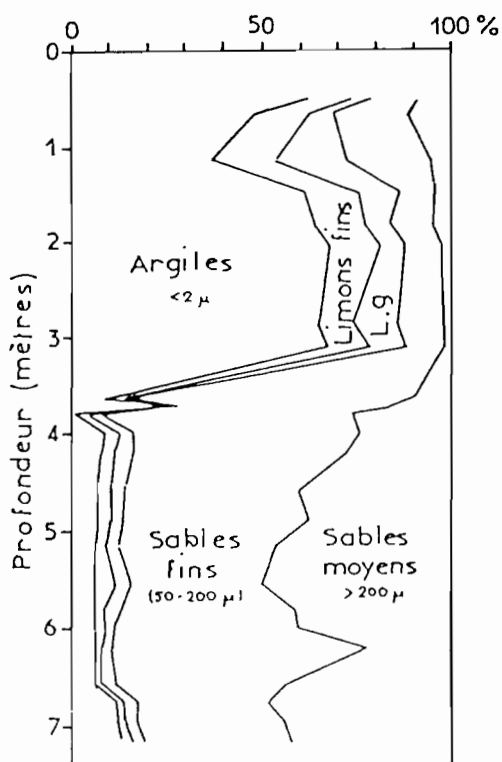


Fig.11: Distribution granulométrique schématique des sédiments en fonction de la profondeur. Sondage S2, sud de la station de N'GNITH.

Il y a donc une différenciation très nette entre les horizons vaseux et argileux du sommet de la colonne sédimentaire et les niveaux sableux très homogènes à la base (3.50 à 7.40 m.). Cette distinction franche qui témoigne d'un brusque changement dans la sédimentation apparaît très nettement sur la figure 11 qui représente de façon schématique la distribution granulométrique dans le sondage. Dans le niveau supérieur, la fraction dominante est constituée d'argiles; les sables moyens et les sables fins prédominent dans les horizons inférieurs où la fraction argileuse représente moins de 10 % .

3.- Caractéristiques sédimentologiques des fonds lacustres

La teneur en eau, qui permet de différencier les faciès sédimentaire, diminue du sommet à la base. Dans les vases de la surface, elle représente de 200 à 400 % du poids sec, et dans les formations sous-jacentes argilo-sableuses de 50 à 70 % ; elle diminue dans les faciès à sables fins (16 à 35 %). Le taux de matière organique par rapport au résidu varie de 4.6 à 12 % . Elle est surtout abondante dans les horizons supérieurs.

L'analyse par quantométrie et par spectrométrie d'absorption effectuée sur quatre échantillons prélevés en surface à l'aide d'une benne à sédiment a montré la similitude de composition chimique entre les sédiments superficiels et les matières en suspension qui accèdent au lac lors de la crue annuelle du fleuve Sénégal (Tableau VIII).

Les teneurs en silice, aluminium et fer sont en effet très voisines. L'abondance relative du potassium (K) et du magnésium (Mg) indique que ces éléments, composants des smectites et des illites gagnent le lac sous forme particulière, s'opposant ainsi au sodium et au calcium qui empruntent plutôt la voie soluble.

Les différences de composition chimique avec les apports éoliens apparaissent essentiellement au niveau des teneurs en silice, alumine et fer (GAC et al. sous presse). Les sédiments superficiels du lac sont constitués de 38 % de kaolinite, de 26 % de montmorillonite, de 17 % d'illite et d'interstratifiés (dont la nature n'a pas pu être précisée), de 10 % de quartz, de 2 % de goethite et vraisemblablement en faibles proportions d'une phase amorphe et de feldspaths (COGELS et GAC , 1981)

Tableau VIII.- Comparaison entre la composition chimique des matières en suspension du fleuve (M.E.S.), des poussières atmosphériques (éoliens) et des sédiments lacustres superficiels (les teneurs en oxydes et la perte à 1000°C sont données en % de l'échantillon séché à 110°C).

Matériaux	S; O ₂	Al ₂ O	F ₂ O ₃	Ti O ₂	MnO ₄	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Perte H ₂ O. à 1000°C
M.E.S	54.24	22.24	9.54	0.92	0.06	1.03	0.20	0.25	1.46	9.90
Sédiments	51.41	24.17	9.57	0.92	0.05	1.29	0.30	0.32	1.47	10.49
Eoliens	72.51	10.57	3.65	0.72	-	1.81	2.18	1.31	2.3	4.40

B.- EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE SURFACE DU LAC DE GUIERS

La composition chimique des eaux de surface du lac de Guiers varie considérablement dans le temps et dans l'espace. De nombreuses campagnes de prélèvements, et en différents sites, ont permis à COGELS et GAC (1982,1983,1984) de préciser l'itinéraire chimique des solutions au cours des phases successives de dilution et de concentration des eaux.

1.-La composition moyenne des eaux de surface

En tenant compte, de la répartition des volumes liée aux différents sites de prélèvements, il est possible d'évaluer, pour chaque côte du plan d'eau, la composition chimique moyenne à un instant donné. Le Tableau IX résume les résultats obtenus aux cotes -0.50 m., +0.50 m. et +1.50 m. La cote +0.50 m. IGN correspond à la position moyenne du plan d'eau du lac pendant les trois années de mesure (1979 à 1981). En moyenne, les anions dominants sont représentés par les bicarbonates et les chlorures, les cations prédominants étant le sodium et le calcium. La charge moyenne en solution est de 270 mg/l.

Tableau IX : Composition chimique moyenne des eaux du lac de Guiers aux côtes : -0.50 , +0.50 , et 1.50 m IGN.

Eléments	- 0,50 m		Etat moyen + 0,50 m		+ 1,50 m	
	mg/l	méq/l	mg/l	méq/l	mg/l	méq/l
Anions						
Cl ⁻	119.6	3.37	65.9	1.86	45.5	1.28
SO ₄ ⁻	32.8	0.68	17.1	0.36	11.0	0.23
HCO ₃ ⁻	151.2	2.48	109.4	1.79	93.3	1.53
Somme	303.6	6.53	192.4	4.01	149.8	3.04
Cations						
Ca ⁺⁺	25.0	1.25	18.5	0.92	16.0	0.80
Mg ⁺⁺	19.9	1.63	12.6	1.04	9.8	0.81
Na ⁺	80.6	3.50	43.2	1.88	28.8	1.25
K ⁺	9.4	0.24	6.5	0.17	5.3	0.14
Somme	134.9	6.62	80.8	4.01	59.9	3.00

← Concentration →

→ Dilution ←

2.-Itinéraire chimique des solutions concentrées par évaporation

L'évolution des teneurs en solution des différents éléments, au fur et à mesure que les eaux se concentrent par évaporation, est illustrée par la figure 12:

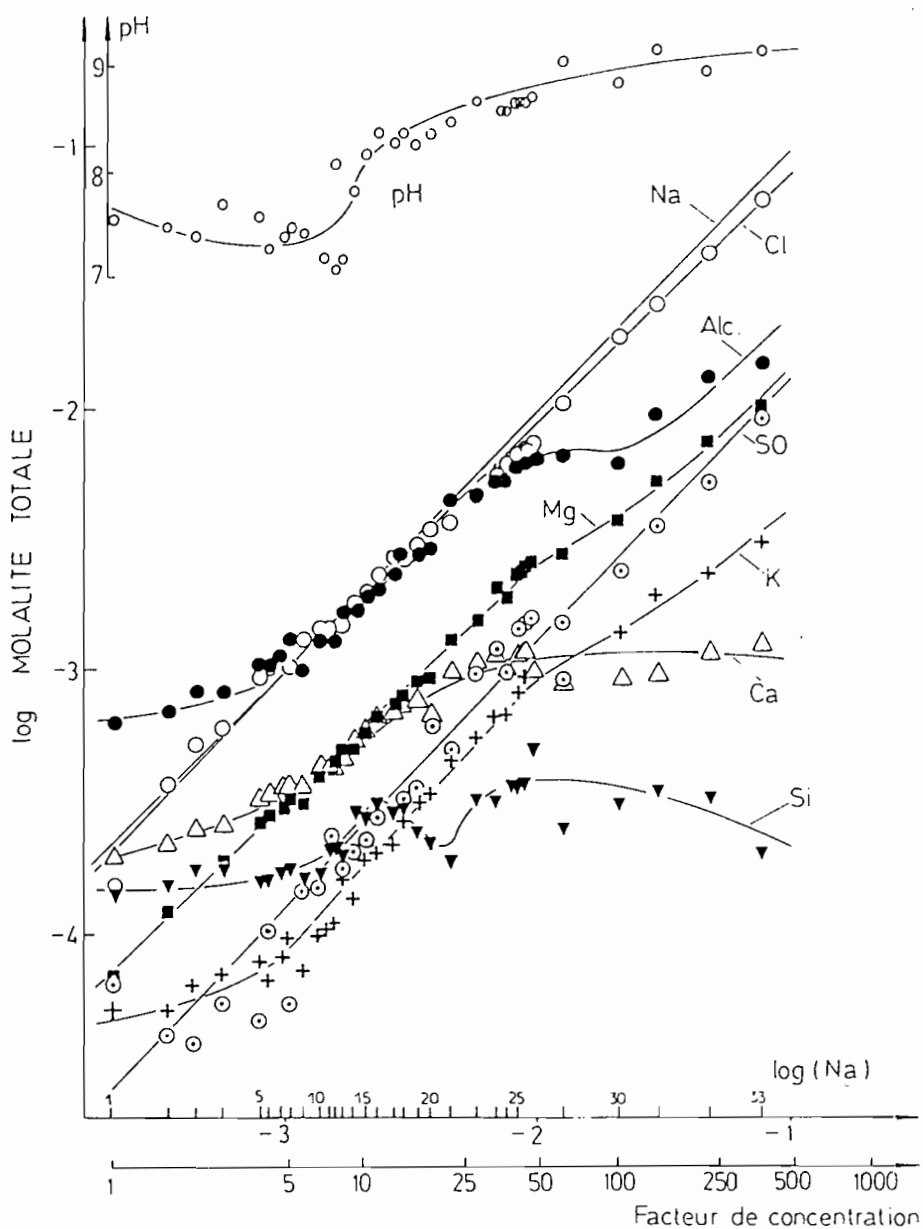


Fig 12 : Evolution spatiotemporelle de la composition chimique des eaux de surface du lac de Guiers.

- le sodium (Na), le chlore (Cl) et les sulfates suivent une évolution identique en augmentant régulièrement avec le facteur de concentration. Ces éléments ne participent donc, en principe, à aucune précipitation chimique.

- Pour les bicarbonates (Alc), le magnésium (Mg), le potassium (K) et le calcium, les courbes présentent de façon plus ou moins marqués des fléchissements à des taux de concentration différents. Ceci montre que la sédimentation chimique touche ces éléments, plus particulièrement les bicarbonates et le calcium (précipitation de la calcite). La courbe représentant l'évolution des teneurs en silice montre que les concentrations restent constantes jusqu'à un taux de concentration égale à 10 ; ensuite la silice augmente puis diminue et s'accroît de nouveau pour atteindre une valeur proche de sa concentration initiale dans les saumures finales. Cette relative stabilité de la silice serait due à l'intervention conjuguée du développement des diatomées et à d'éventuelles précipitations dans les saumures finales de silicates magnésiens. La conductivité varie également dans le temps et dans l'espace. Elle est plus élevée dans la région Sud du lac qu'au Nord. Elle évolue à partir du mois d'octobre pour atteindre son maximum en juin: elle témoigne de l'importance de l'évaporation, de l'intervention probable des nappes voisines ou sous-jacentes et du rôle des rejets au niveau des cultures irriguées.

Les eaux, initialement carbonatées calciques deviennent progressivement chlorurées sodiques. Pour un facteur de concentration de 100, fréquent dans la région Sud, le seuil de potabilité est franchi et les eaux deviennent impropres à la consommation.

C.- CONCLUSIONS

A l'interface eau-sédiment, les interactions entre un support détritique constitué de vases argileuses fluantes et inconsistantes et des solutions à composition très variable sont d'une très grande complexité. Les échanges et les transferts entre ces deux milieux, au fur et à mesure du retrait des eaux (phase de concentration) ou de leur progression vers le Sud lors de la crue "hivernale" (phase de dilution) ne peuvent être décelés que par une meilleure connaissance du comportement géochimique des eaux qui imprègnent les sédiments.

III. LES EAUX " INTERSTITIELLES " ⁽¹⁾ DES SEDIMENTS DU LAC DE GUIERS (SENEGAL).

(1) l'appellation " eaux interstitielles " a été volontairement utilisée bien que le terme ne s'applique pas exactement à ce type de prélèvement effectué rapidement après sondages à la tarière. Il aurait été plus juste de parler des nappes sous-jacentes aux sédiments lacustres.

Les faibles écoulements du fleuve Sénégal, lors du cycle hydrologique 1982-1983 (module de 303 m³/s pour une moyenne 1903-1982 s'établissant à 730 m³/s), en déterminant une liaison fluvio-lacustre de courte durée entre le 5/08 et le 30/09/1982 (57 jours) et en corollaire un remplissage modeste du lac, conjugués aux effets simultanés des pertes par évaporation et par pompages, ont été à l'origine de l'assèchement d'une grande partie de la dépression lacustre.

Ce retrait considérable des eaux, prévisible dès la fin de septembre 1982 au vu de la cote maximale (+1.14 m. atteinte le 30.09.1982), devait conduire à la mise en place de programmes d'études sur les sédiments et les eaux interstitielles. Il faut souligner que cette situation particulière et dramatique pour le lac de Guiers fournissait l'occasion unique de mener à bien de telles recherches.

L'édification des barrages de Rheune en novembre 1983 et 1984 et vraisemblablement fin 1985, l'achèvement du barrage anti-sel de Diama prévu mi-86 permettent en effet d'envisager un retour à des conditions plus favorables pour le lac de Guiers.

A.- SITUATION GEOGRAPHIQUE DES PRELEVEMENTS ET PROTOCOLE DES MESURES "IN SITU"

La figure 13 retrace l'évolution du niveau du plan d'eau du lac de Guiers depuis juin 1982 jusqu'à nos jours. Au moment des prélèvements, l'échelle de mesure de la station de Ngnith était asséchée et la cote était inférieure à -1.00 m. IGN.

1.- Position géographique des prélèvements

La position des différents prélèvements a été reportée sur la figure 14. Rendus possibles par l'assèchement exceptionnel du lac en juin 1983, ils sont disposés sur des profils transversaux qui s'étendent de la rive dunaire jusqu'au plan d'eau libre. Du Nord au Sud et des rives Ouest aux rives Est; 18 profils ont ainsi été réalisés en respectant, dans la mesure du possible, des écarts sensiblement identiques entre les sondages. En les regroupant par région, on distingue:

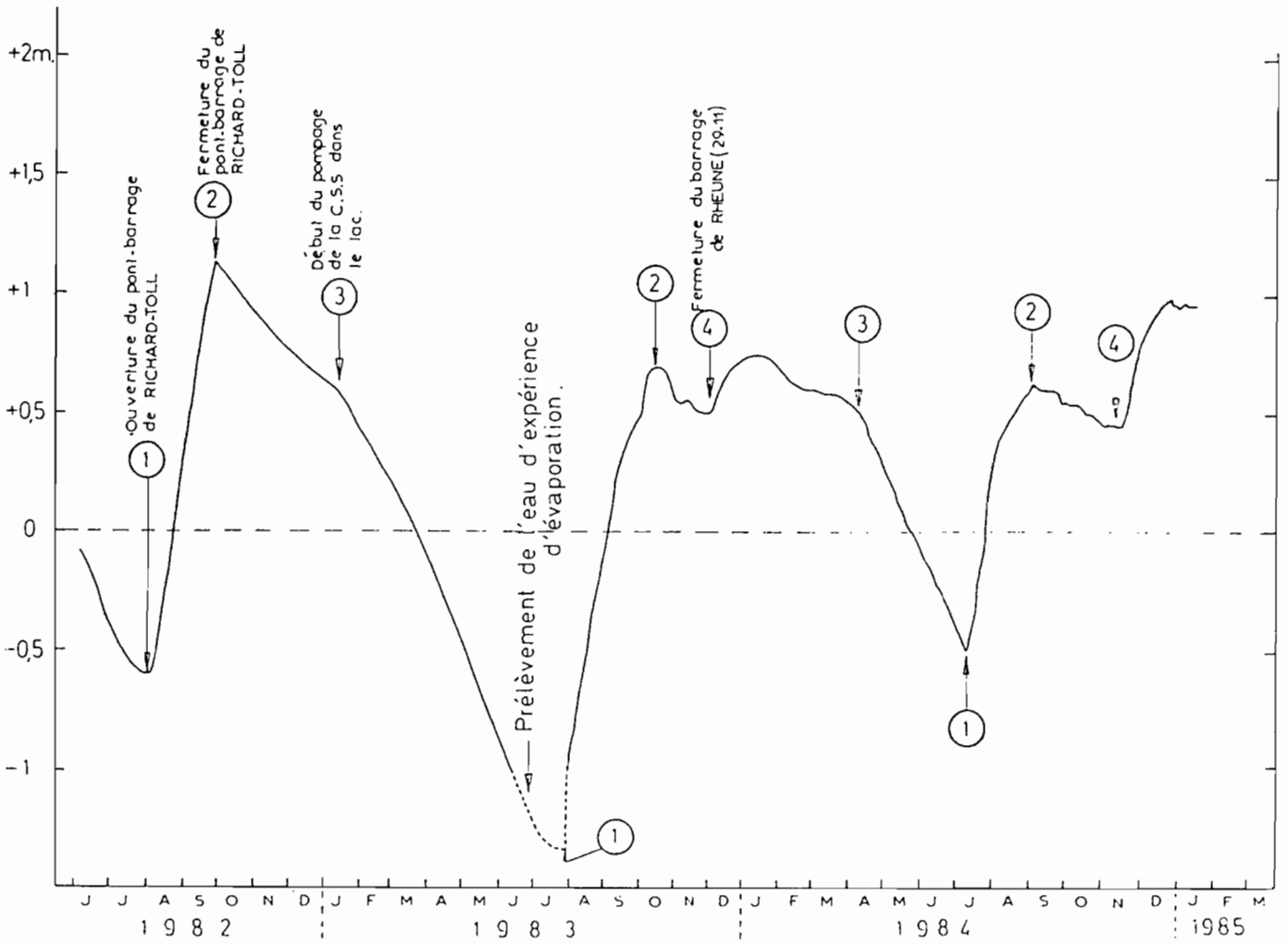
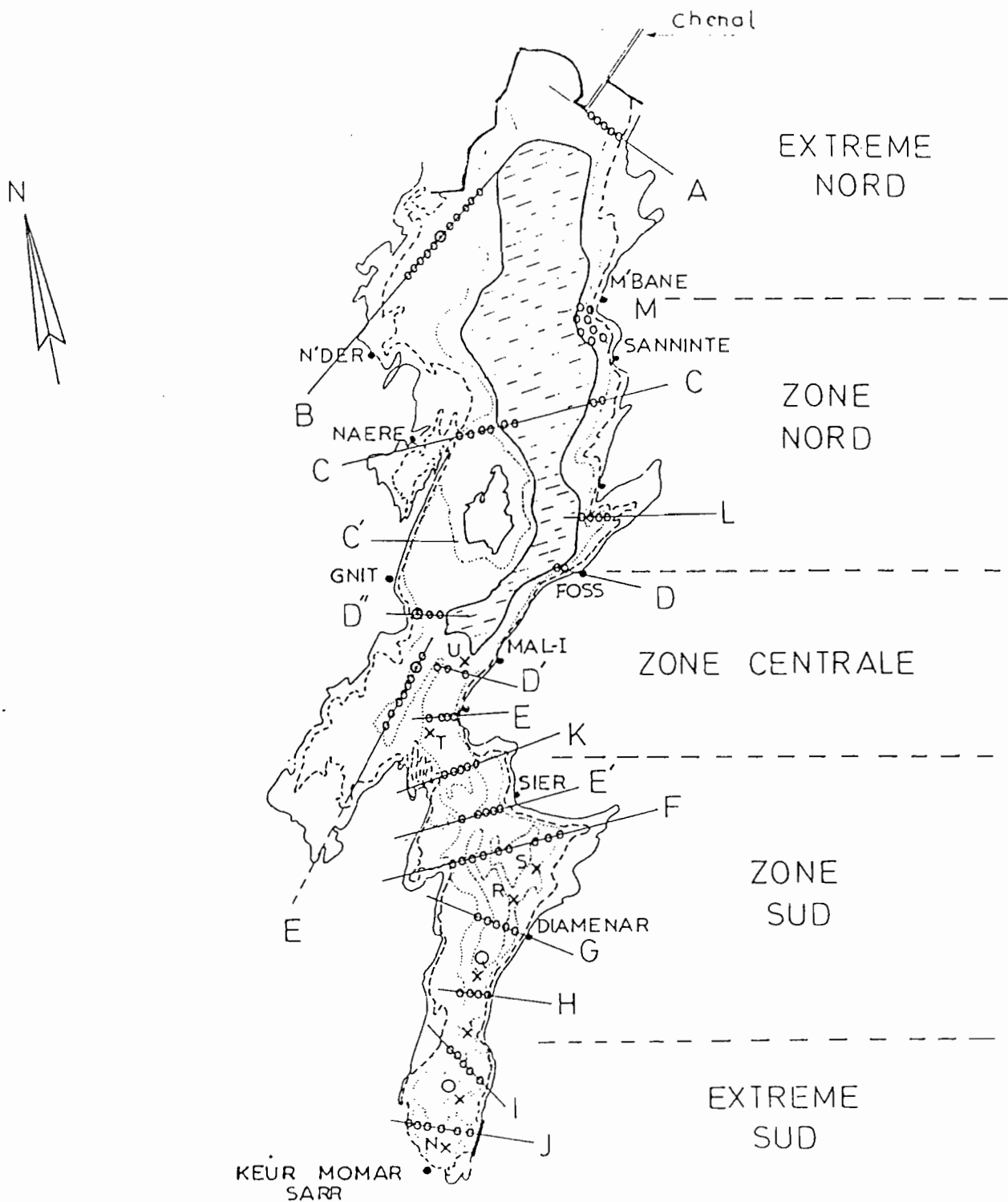
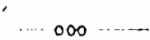


Figure 13 : Variations du niveau du plan d'eau du lac de Guiers au cours des années 1982-1983 et 1984.



Nappe d'eau libre



Profils de prélèvements



Sondages

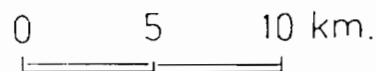


Fig 14 : Position géographique des prélèvements.

- Extrême nord : ** rive Est (série A:5 échantillons)
** rive Ouest (série B:11 échantillons, y compris la prise d'eau dans le carottage S₃ effectué pour l'étude des sédiments)
- .Zone Nord : ** sur les deux rives, la série C (8 échant.)
** rive Est (les séries L et D avec 14 et 3 échantillons)
-9 eaux ont aussi été récoltées (série M) dans le secteur de Mbane pour confirmer la présence d'eaux très acides décelées au cours d'une campagne en 1982.
- .Zone Centrale : ** rive Est (séries D', E et K dans le secteur de Guidic avec 3, 4 et 12 échantillons)
** rive Ouest, au nord et au Sud de l'anse de Ngnith, les séries C (9 échantillons), E (8 échant.) avec l'eau du sondage S₂ et D'' avec 3 prélèvements.
- .Zone Sud : le retrait complet des eaux dans cette région a permis de réaliser des profils transversaux entre les deux rives du lac. Il s'agit des séries E' au niveau du seuil de Sier (5 échant.), F (8 échant.), G à proximité de Diaménar (5 échant.) et H (4 échantillons).
- .Extrême Sud : comme dans le cas précédent, ces sondages ont été réalisés entre les deux rives. La série I comporte 5 échantillons et la J, près de Keur Momar Sarr 6 échantillons.

A l'ensemble de ces prélèvements, un profil a été effectué dans l'axe longitudinal de la dépression lacustre en essayant de respecter approximativement les points-bas du paysage. Cette série comporte 7 échantillons (N, P, Q, R, S, T, U) répartis entre Keur Momar Sarr au Sud et la limite de la nappe d'eau libre restante au Nord qui se situait à cette époque légèrement au nord de Mal. Les points de prélèvement et les analyses d'eau correspondantes que nous avons utilisés dans cette première étude sont indiqués sur la figure 14.

1.-Protocole de prélèvements des mesures in situ

Les sondages dans les différents sites ont été effectués à la tarière. En bordure des rives, sur les flancs du lac assèché, la profondeur de la nappe dépassait rarement 2m.; au fur et à mesure de la progression vers le centre de la dépression, les profondeurs oscillaient entre 1 m. et 0.50 m. En certains points, la nappe était sub-affeurante (moins de 0.25 m.).

Les prises d'eau étaient immédiates avec des mesures in situ de la température (air et eau), de la conductivité, du pH et quelques fois du potentiel Redox Eh. Deux tubes sous vide de 20 cm³

ont été conservés pour des contrôles ultérieurs: analyse isotopique et détermination des nitrates, nitrites et phosphates. Ensuite les échantillons ont été stockés à l'abri de la lumière (sans cependant la possibilité de les conserver à basse température), après filtration ($0,45\mu$) à l'aide d'une pompe manuelle. Après une durée plus ou moins longue variable (de une à 24 heures) on a pu noter la présence systématique dans la quasi-totalité des échantillons de précipités rouge-brun. ils correspondent vraisemblablement à une réoxydation de composés ferreux, au moment du retrait des eaux de leur milieu ambiant, et à la probable précipitation d'oxydes-hydroxydes de fer amorphes (pas de figures de diffraction aux rayons X).

L'ensemble des prélèvements a ensuite été acheminé et analysé dans de courts délais au centre ORSTOM de Hann (Dakar). Les résultats détaillés des analyses chimiques (Na, K, Ca, Mg, SO_4 , HCO_3 , CO_3 et SiO_2), du pH et de la conductivité figurent dans les tableaux présentés en annexe.

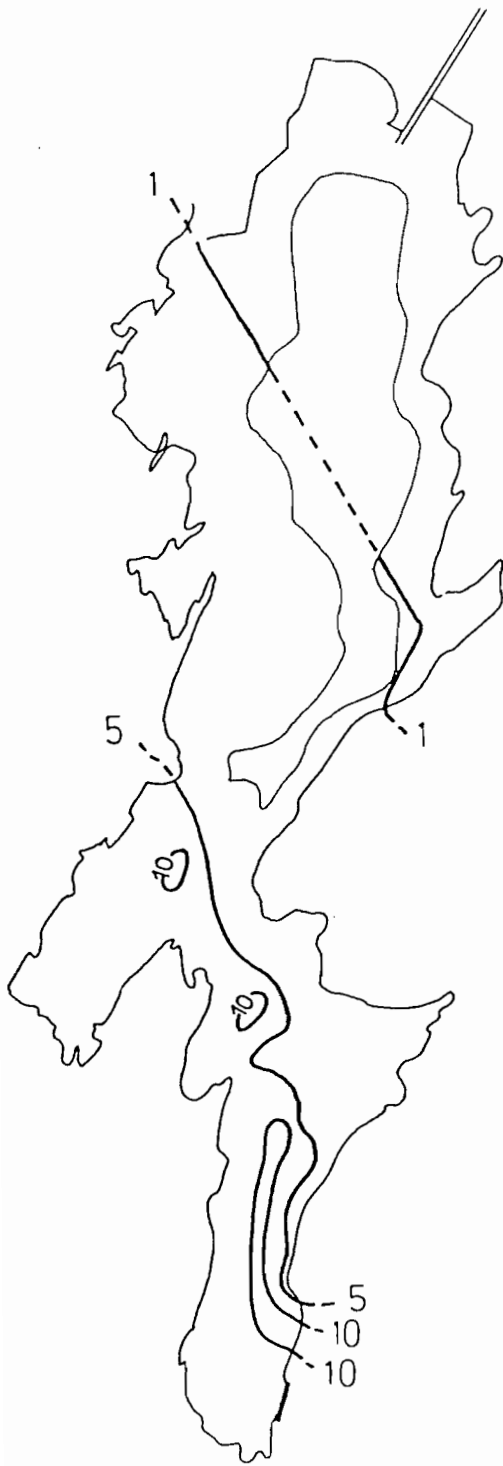
B.-COMPOSITION PHYSICOCHEMIQUE DES EAUX DES SEDIMENTS DU LAC DE GUIERS

Nous traiterons successivement des paramètres physiques (conductivité et pH), de la minéralisation globale des solutions, de l'évolution de la concentration des éléments dissous en la comparant à celle des eaux de surface étudiée par COGELS et GAC (1981, 1982, 1983, 1984), et du rapport Na/Cl. nous aborderons également très succinctement, par quelques diagrammes d'équilibre, l'état de saturation des eaux de certaines zones vis à vis de quelques sels et enfin nous essaierons de dégager des éléments de réflexion sur l'origine et l'évolution des eaux.

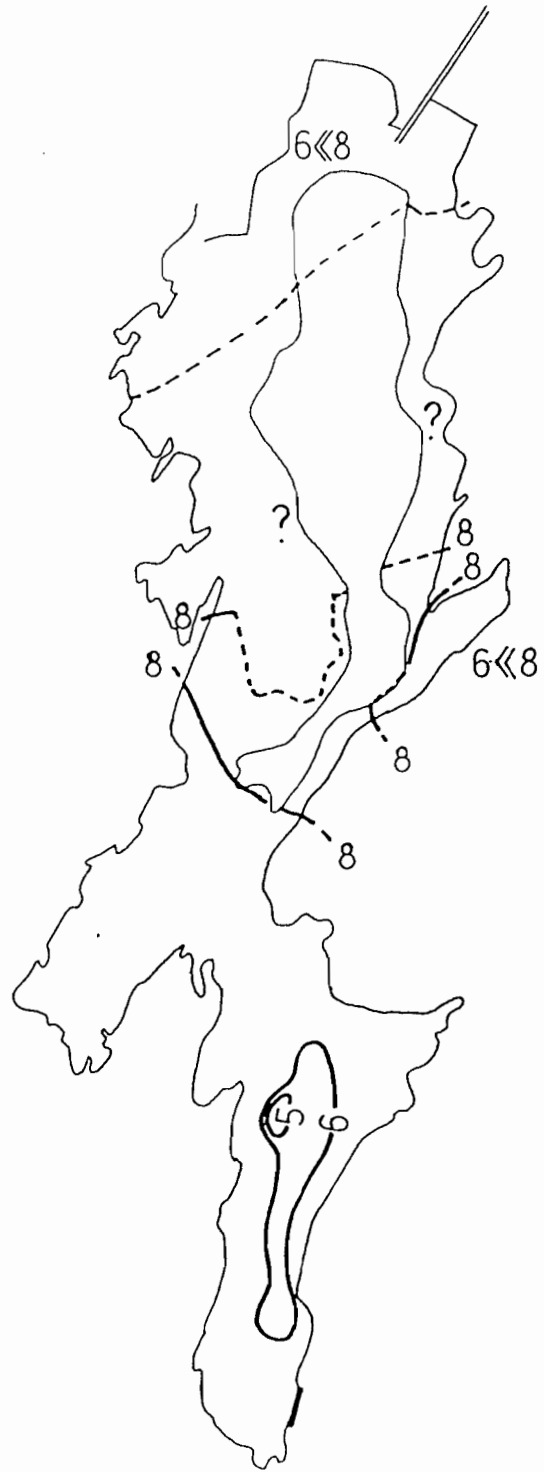
1.-La conductivité

La conductivité est une des mesures classiques permettant un contrôle simple et rapide de la minéralisation des solutions. Rappelons que pour les eaux de surface, la conductivité est croissante durant la période d'isolement du lac; elle oscille entre $80\mu S/cm$ lors de la rupture de la liaison avec le fleuve et $15 mS/cm$ dans les mares terminales résiduelles qui jalonnent le retrait des eaux du lac vers le Nord.

Pour les eaux sous-lacustres (Fig. 15) et dans le cas des sites que nous avons étudiés, la conductivité varie de $0.38 mS/cm$ à $32 mS/cm$, ce qui correspond à des concentrations de $268 mg/l$ et de $25,7 gr./l$; c'est dire que le rapport entre les eaux les plus diluées et les plus concentrées est de l'ordre de 100.



Iso conductivités
(Valeurs exprimées en mS/cm.)



Iso pH

Fig 15 : Cartes des isoconductivités et des iso pH des eaux souterraines.

Le regroupement des eaux par région donne les résultats suivants:

Conductivité(en milliSiemens/cm)

	Minimum	Moyenne	Maximum
Extrême Nord :	0.38	0.20	7.5
Zone Nord :	0.43	0.91	1.4
Zone Centrale :	1.30	5.56	32.0
Zone Sud :	2.60	7.54	25.0
Extrême Sud :	2.46	9.44	21.0

Quatre zones ont été distinguées sur la carte des isoconductivités: <1mS, de 1 à 5 mS, de 5 à 10 mS et supérieur à 10 mS. Les eaux de faibles conductivités se situent dans la zone Nord, en particulier sur la rive Est;les eaux à fortes conductivités concernent les sédiments de l'ensemble de la zone Sud et la rive Ouest de la zone centrale. Les solutions à très fortes conductivités sont regroupées dans trois secteurs:

- dans la zone médiane de l'anse située au sud de Ngnith
- sur le flanc Ouest en face du village de Sier
- au centre de la dépression lacustre, depuis la hauteur de Diaménar jusqu'au sud du lac.

2.-Le pH

Dans les eaux de surface, les variations de pH sont faibles. Les valeurs oscillent entre 7.1 et 9.2. En revanche dans les eaux "interstitielles" des sédiments du lac de Guiers, les variations d'activité des ions H^+ ($pH = -\log [H^+]$) sont très importantes: lors des mesures in situ, le pH a évolué de 4.0 à 8.75 dans un sondage de la zone nord.

Bien que des moyennes de pH sur différents échantillons ne soient pas significatives, nous avons calculé leurs valeurs pour les différentes régions:

	Minimum	Moyenne	Maximum
Extrême Nord :	6.05	6.50	6.72
Zone Nord :	6.59	7.67	8.75
Zone Centrale :	4.0	7.36	8.17
Zone Sud :	4.39	7.18	8.09
Extrême Sud :	5.0	6.44	7.19

Sur la carte des iso-pH (mesures in situ) illustrée par la figure 15, comme dans le cas des conductivités, quatre zones ont été différenciées: $pH < 5$, $5 < pH < 6$, $6 < pH < 7$, $pH > 8$.

-Les eaux fortement acides ($\text{pH} < 5$) sont limitées à une petite zone en rive Ouest face à Diaménar et correspondent à des eaux fortement minéralisées (conductivité $>$ à 10 mS/cm),

-Les eaux basiques ($\text{pH} > 8$) sont toutes localisées dans la zone centrale à proximité de Ngnith en rive Ouest, et du village de Foss en rive Est,

-Les eaux acides ($5 < \text{pH} < 6$) occupent toute la partie centrale de la dépression lacustre, entre le seuil de Sier et de Keur Momar Sarr,

-Les eaux proches de la neutralité (pH voisin de 7) sont les plus fréquentes dans l'extrême nord (layons A et B), sur la bordure des rives dans la poche de Foss (layon L) et couvrent toute la zone centrale et les flancs de la zone Sud.

3.- La minéralisation globale des solutions

La minéralisation des eaux "interstitielles" des sédiments du lac de Guiers varie, comme nous l'avons vu précédemment avec les mesures de conductivité, de façon considérable (de 0,3 g /l à 25,7 g /l). Il existe pour l'ensemble du lac un gradient spatial dans le sens Nord-Sud qui se surimpose à un gradient topographique au niveau de l'ensemble des différents profils transversaux. Les eaux sont en effet de plus en plus concentrées lorsque l'on progresse vers le Sud et que l'on descend des positions hautes (au flanc des alignements dunaires) vers les points-bas (d'après la topographie actuelle). Des anomalies ont cependant été constatées dans la situation des eaux les plus chargées, mais nous n'avons pas eu la possibilité dans le cadre de cet article de les étudier dans le détail; nous nous sommes contentés au cours de cette première approche de présenter une vue d'ensemble région par région sans faire dans un premier temps de distinction entre les deux rives.

Les regroupements auxquels nous avons procédé sont ceux indiqués au début de ce chapitre (voir tableaux en annexe):

-Extrême Nord :	14	échantillons	(séries A et B)
-Zone Nord :	16	"	(" D, et " L et)
-Zone Centrale:	29	"	(" D, D, E, K),
-Zone Sud :	22	"	(" F, G, H et E)
-Extrême Sud :	11	"	(" I et J)

soit au total une première exploitation de 92 analyses. Les eaux restent diluées au Nord et sont les plus concentrées dans la partie méridionale de la cuvette:

Minéralisation (g /l)

	Minimum	Moyenne	Maximum
Extrême Nord :	0.26	0.61	0.99
Zone Nord :	0.32	1.43	5.14
Zone Centrale :	0.71	3.86	25.71
Zone Sud :	1.86	6.34	18.87
Extrême Sud :	1.65	6.63	15.69

Bien qu'il existe, comme nous l'avons dit plus haut, des variations importantes entre les eaux des différentes régions tant au point de vue de la minéralisation totale qu'au niveau de la concentration de chaque élément dissous, on peut globalement suivre la minéralisation progressive des eaux "interstitielles" vers le sud du lac. Ce résultat (Tableau X et Fig.16) n'est pas sans rappeler les résultats obtenus par COGELS (1984) sur les eaux de surface (à la seule différence que les eaux superficielles présentent une plus grande homogénéité de composition chimique). Les saumures méridionales sont, comme dans le cas de l'eau de mer, surtout concentrées en Chlore et Sodium, à un degré moindre en Sulfate et Magnésium, diluées en bicarbonate, en calcium, en potassium et en silice.

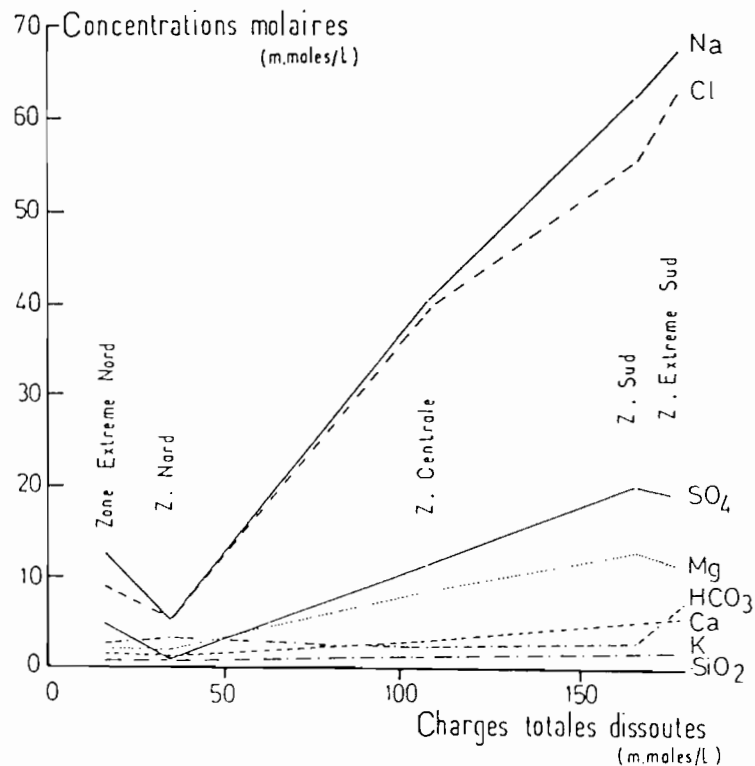


Figure 16 : Minéralisation progressive des eaux interstitielles vers le sud du lac (m.moles/l).

Tableau X : Composition chimique moyenne des eaux des sédiments du Lac de Guiers dans les 5 régions.

Localisation (région)	Ca	Mg	K	Na	Somme Cations	Cl	SO ₄	HCO ₃	CO ₃	Somme Anions	SiO ₂	Minéralisation
még/l												
Extrême Nord	3.50	3.87	0.77	12.88	21.02	8.88	9.28	2.79	0.47	21.42	-	
Zone Nord	1.91	1.83	0.38	4.67	8.79	4.52	1.08	3.09	0.19	8.88	-	
Zone Centrale	6.26	17.53	1.32	36.19	61.3	34.90	24.84	2.63	0.30	62.67	-	
Zone Sud	10.70	26.23	1.93	62.52	101.38	55.68	43.77	2.97	0.26	102.68	-	
Extrême Sud	11.44	23.69	2.12	67.70	104.95	63.18	38.47	5.99	0.59	108.23	-	
m.moles/l												
Extrême Nord	1.75	1.93	0.77	12.88	-	8.88	4.64	2.79	0.235	-	0.63	
Zone Nord	0.95	0.915	0.38	4.67	-	4.52	0.54	3.09	0.095	-	0.35	
Zone Centrale	3.13	8.765	1.32	36.19	-	34.90	12.42	2.63	0.150	-	0.57	
Zone Sud	5.35	13.11	1.93	62.52	-	55.68	21.885	2.97	0.130	-	0.50	
Extrême Sud	5.72	11.84	2.12	67.7	-	63.18	19.23	5.99	0.295	-	0.60	
mg/l												
Extrême Nord	70.1	47.1	30.1	296.1	443.4	314.8	445.7	170.2	14.1	944.8	37.9	1426.1
Zone Nord	38.3	22.3	14.9	107.4	182.9	160.2	51.9	188.6	5.7	406.4	20.8	610.1
Zone Centrale	125.4	213.2	51.6	832.0	1222.2	1237.2	1193.1	160.5	9.0	2599.7	34.0	3855.9
Zone Sud	214.4	319.0	75.5	1437.3	2046.2	1973.8	2102.2	181.2	7.8	4265.0	30.1	6341.3
Extrême Sud	229.3	288.1	82.9	1556.4	2156.7	2239.7	1847.7	365.5	17.7	4470.6	36.0	6663.3
Moyenne (mg/l)												
Eaux Interstitielles	135.5	177.9	51.0	845.8	1210.2	1185.2	1128.1	213.2	10.9	2537.4	31.8	3779.4
Eaux Superficielles (H = +0.50 m)	18.5	12.6	6.5	43.2	80.8	65.9	17.1	109.4	-	273.2	(12.0)	366.0

La figure 17 donne une première esquisse hydrochimique de la nappe des sédiments du lac de Guiers et apporte des éléments de comparaison entre la composition "moyenne" de l'eau de mer et celle des eaux interstitielles et des eaux superficielles. Il ne s'agit évidemment que d'une première approche globale par grandes régions géographiques. Des études ultérieures permettront certainement d'affiner ce premier schéma. D'une manière générale, les eaux des sédiments du lac de Guiers sont essentiellement:

- sulfatées chlorurées sodiques(ext.Nord)
- chlorurées bicarbonatées sodiques(Nord)
- chlorurées sulfatées sodiques(Centre et Sud)

On constate également que la composition des eaux de la zone nord est très semblable à celle des eaux de surface, et que l'eau interstitielle moyenne diffère nettement de celle de l'eau de mer, en particulier par le rapport Na/Cl.

4.-L'évolution de la composition chimique des eaux des sédiments lacustres en fonction du facteur de concentration

Pour suivre le comportement des différents éléments dissous, nous avons tracé sur un graphique (Fig. 18) l'évolution des teneurs (exprimées en log molalité) en fonction du facteur de concentration calculé à partir du sodium. Pour représenter les différentes courbes et devant le nombre élevé d'analyses, nous avons procédé à des regroupements en tenant compte des teneurs voisines en sodium (ce procédé fait donc abstraction de la position topographique et de la situation géographique). On obtient ainsi 23 analyses qui vont des faibles (1,59 mmoles) aux fortes (225 mmoles) teneurs en sodium (Tableau II en annexe).

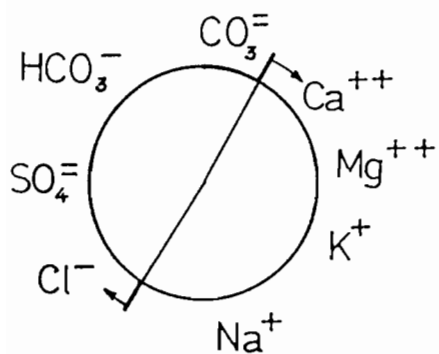
L'évolution de la minéralisation des eaux des sédiments du lac de Guiers ainsi illustrée donne une idée de l'itinéraire chimique suivi par les différents éléments en solution et de leur comportement:

* le chlore et le sodium suivent une évolution tout à fait parallèle en croissant régulièrement et ne participent sans doute pas aux précipitations chimiques,

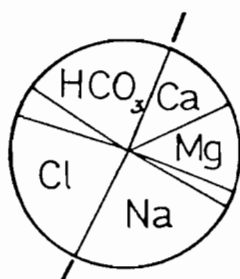
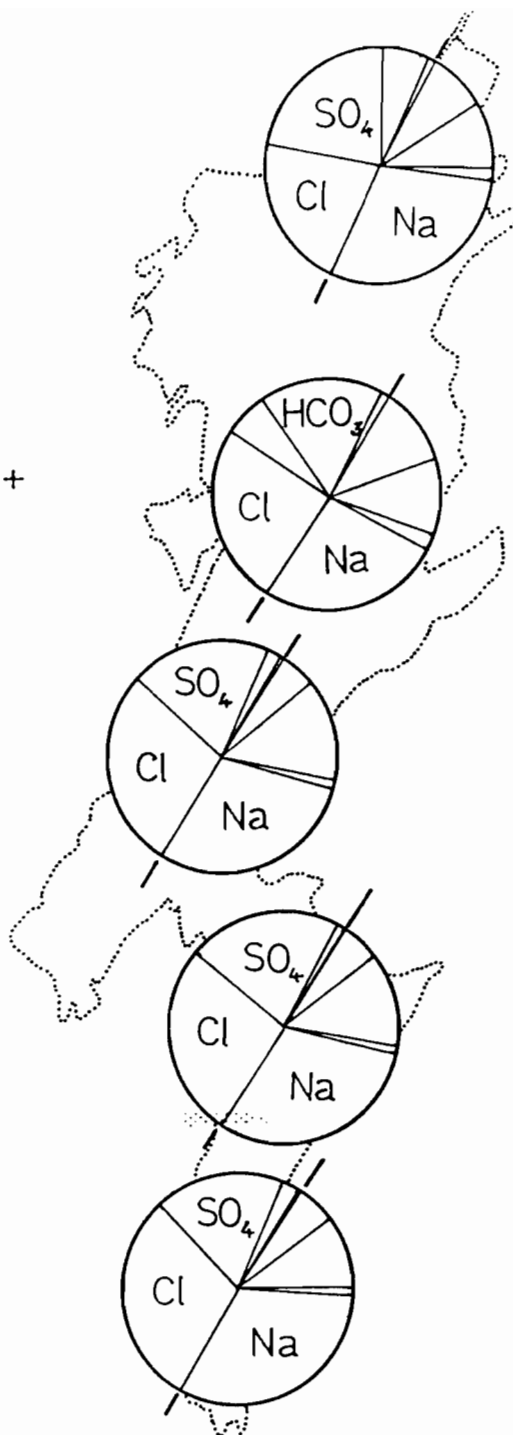
* les autres courbes présentent des fléchissements plus ou moins marqués à des taux de concentration différents: c'est le cas du magnésium, du calcium, du potassium et de la silice mais aussi du pH qui reste stable jusqu'à un facteur de concentration de 30 puis qui décroît ensuite. Le fléchissement observé dans les différentes courbes représentatives traduit un ralentissement dans l'augmentation des teneurs et démontre que les éléments interviennent dans les cycles biogéochimiques.

La comparaison entre les eaux de surface (Fig.12) et les eaux des sédiments (Fig. 18) permet de tirer les enseignements qui suivent:

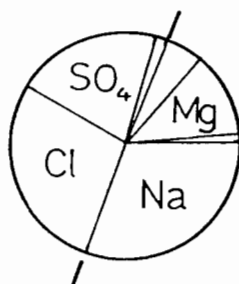
- * les eaux interstitielles sont plus minéralisées que les eaux superficielles,
- * il existe une similitude de comportement entre le



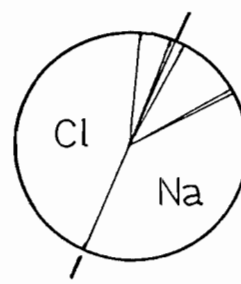
Ordre de
representation des
ions sur les differents
diagrammes.
(en meq/l - %)



Eau de surface
moyenne



Eau interstitielle
moyenne



Eau de mer
moyenne

Figure 18 : Esquisse hydrochimique de la nappe phréatique du lac de Guiers (en méq/l - %).

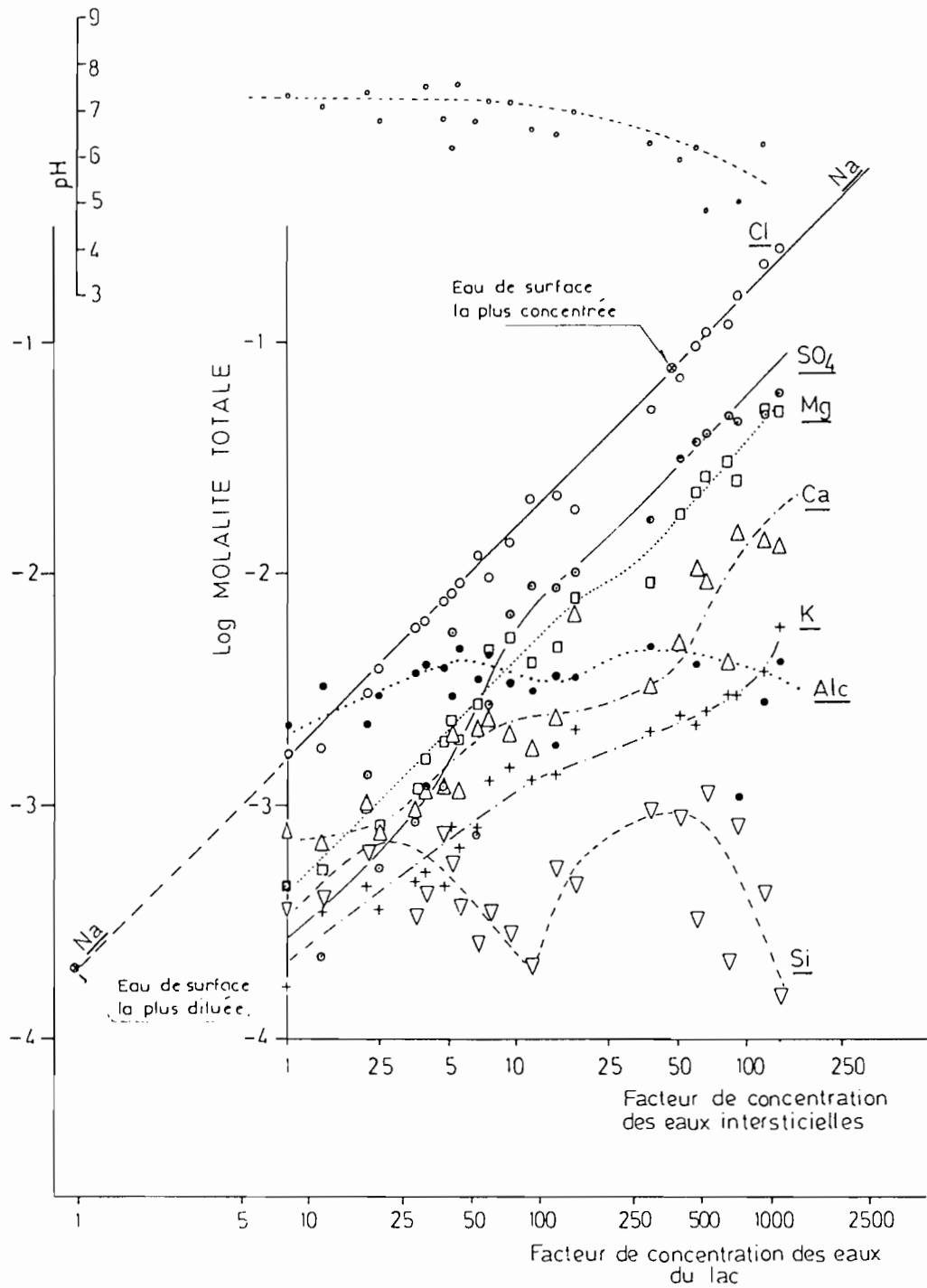


Fig.18 : Evolution de la composition chimique des eaux des sédiments du lac de Guiers en fonction du facteur de concentration (log Na).

chllore et le sodium (qui augmente linéairement) et la silice dont la concentration reste approximativement constante,
* il existe des divergences d'évolution importantes pour le calcium et le pH, et moindres pour le magnésium ainsi que pour les sulfates.

5.-Le rapport Na/Cl

Le rapport Na/Cl (en méq) a été calculé pour l'ensemble des eaux interstitielles des sédiments du lac de Gujers afin de déceler l'éventuelle présence de nappes marines fossiles (il est de 0,85 dans l'eau de mer).

La quasi-totalité des sondages étudiés ont un rapport Na/Cl supérieur à celui de l'eau de mer (la valeur moyenne est très proche de 1:coefficient de régression linéaire de 0.99). Les valeurs les plus élevées ont été observées dans la zone Nord au niveau du layon B (2,37), mais aussi dans la zone Sud, près de Keur Momar Sarr, lorsque les sondages sont situés au flanc des dunes. Quatre secteurs ont un rapport Na/Cl équivalent ou très voisin de celui de l'eau de mer:

- la zone Ouest du layon E, dans l'anse située au sud de Ngnith,
- la partie centrale du seuil de Sier (layon K),
- toute la série au droit du seuil de Diaménar (layon G),
- la rive Est du seuil de Foss et Ndiaraye (layon L).

Curieusement, on voit ainsi ressortir du paysage lacustre avec le simple rapport Na/Cl, les trois principaux seuils de Foss, de Sier et Diaménar sans pouvoir au stade de notre étude, donner une quelconque explication. On peut cependant penser, que les réactions d'échanges sédiment/eaux interstitielles ont joué un rôle important dans la distribution du sodium tandis que les interactions chlorures/sédiment sont limitées (capacité d'échange anionique < capacité d'échange cationique).

6.-Les diagrammes d'équilibre

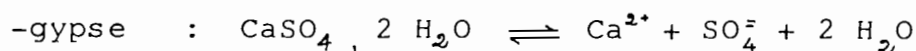
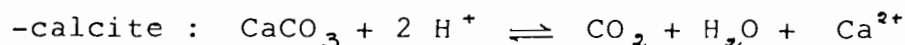
Les ions en solution ne sont pas seulement présents sous forme d'ions simples mais également d'ions complexes. Les ions simples, c'est à dire "libres", entrent seuls en jeu lorsqu'il s'agit de tester l'état de saturation d'une solution vis à vis d'un ou plusieurs minéraux. On parle alors de répartition des espèces dissoutes dont la distribution ne peut être évaluée qu'à l'aide de programmes très complexes et qui exigent l'utilisation d'ordinateur (GARRELS et THOMPSON, 1962).

Le Tableau XI présente le calcul de distribution des espèces dissoutes pour 6 eaux du lac (C₇: eau de surface prélevée dans la nappe d'eau libre résiduelle en juin 1983; et 5 eaux (A₄, K₁, G₅, H₃ et J₄) interstitielles réparties du nord au sud).

Tableau XI : Distribution (en m.moles/kg H₂O) des espèces dissoutes dans l'eau de mer et dans quelques eaux "interstitielles" des sédiments du Lac de Guiers : () concentrations, autres (activités)

Espèces dissoutes N°	Extrême Sud (J ₄)	Zone Sud (H ₃)	Zone Sud (G ₅)	Zone Centre (K ₁)	Extrême Nord (A ₄)	Eau Surface Zone Centre (C ₇)	Eau de mer
(K ⁺)	(1.550)	(2.190)	(2.66)	(1.300)	(0.300)	(0.570)	(9.875)
K ⁺	1.508	2.105	2.545	1.261	2.999	0.501	9.850
KSO ₄ ⁻	0.042	0.084	0.113	0.038	<< 0.001	-	0.005
K Cl ^o	<< 0.001	<< 0.001	<< 0.001	0.014	<< 0.001	-	0.020
(Na ⁺)	(35.000)	(99.400)	(111.000)	(15.600)	(4,830)	(5.560)	(484.110)
Na ⁺	33.200	92.600	103.000	14.800	4.807	4.867	460.400
Na SO ₄ ⁻	1.532	6.153	7.643	0.745	0.002	-	10.590
Na CO ₃ ⁻	0.108	-	-	-	0.014	-	0.070
Na HCO ₃ ^o	0.085	0.005	-	-	0.004	-	0.190
Na Cl ^o	0.054	0.062	0.746	0.014	<< 0.001	-	12.860
(Ca ²⁺)	(3.365)	(10.650)	(9.400)	(3.375)	(0.560)	(0.625)	(10.401)
Ca ⁺⁺	2.164	7.682	6.640	2.340	0.467	0.330	9.470
Ca SO ₄ ^o	0.802	2.960	2.757	1.032	0.002	-	0.830
Ca CO ₃ ^o	0.272	-	-	-	0.080	-	0.020
Ca HCO ₃ ⁺	0.126	0.009	-	-	0.011	-	0.080
Ca (OH) ⁺	<< 0.001	<< 0.001	<< 0.001	<< 0.001	<< 0.001	-	<< 0.001
(Mg ²⁺)	(5.900)	(22.700)	(28.20)	(5.300)	(0.815)	(0.820)	(53.990)
Mg ⁺⁺	3.688	16.340	19.800	3.758	0.631	0.453	48.720
Mg SO ₄ ^o	1.300	6.350	8.372	1.537	0.002	-	4.760
Mg CO ₃ ^o	0.804	-	-	-	0.175	-	0.260
Mg HCO ₃ ⁺	0.104	<< 0.001	-	-	0.007	-	0.240
Mg (OH) ⁺	0.004	<< 0.001	<< 0.001	<< 0.001	<< 0.001	-	0.010
(SO ₄ ⁼)	(13.400)	(36.55)	(44.700)	12.850	(0.045)	(3.170)	(28.275)
SO ₄ ⁼	9.722	21.00	24.70	9.497	0.039	1.770	12.090
(CO ₃ ⁼)	(1.600)	-	-	-	(1.000)	-	(0.370)
CO ₃ ⁼	0.414	-	-	-	0.230	-	0.040
(HCO ₃ ⁻)	(7.400)	(0.200)	-	(0.280)	(2.000)	-	(2.420)
HCO ₃ ⁻	7.080	0.177	-	0.269	1.977	-	1.910
(Cl ⁻)	(18.200)	(96.50)	(107.0)	(9.800)	(4.800)	(27.000)	(562.882)
Cl ⁻	18.100	95.870	106.0	9.786	4.797	24.020	550.000
HSO ₄ ⁻	<< 0.001	0.004	0.879	<< 0.001	<< 0.001	-	-

En tenant compte de l'activité des ions Na, Cl, SO₄ et du pH, nous avons tenté de tester l'état de saturation des solutions vis-à-vis de l'halite (NaCl), du gypse (CaSO₄, 2H₂O) et de la calcite (CaCO₃). Les réactions d'équilibre entre phase solide et phases aqueuses s'écrivent :



et les produits de solubilité (à 25° C) sont données par les relations suivantes:

$$\log [\text{Ca}^{2+}] + \log [\text{CO}_3^{2-}] = -8.37 \text{ (HELGESON, 1969)}$$

$$\log [\text{Ca}^{2+}] + \log [\text{SO}_4^{2-}] + 2 \log [\text{H}_2\text{O}] = -4.61 \text{ (LATIMER, 1952)}$$

$$\log [\text{Na}^+] + \log [\text{Cl}^-] = 1.58 \text{ (TRUESDELL et JONES, 1974)}$$

Le calcul du produit ionique de la calcite est délicat pour ces eaux car leur pH a en général augmenté de 1 à 1.5 unité entre le terrain et le laboratoire. Ceci s'explique par une pression partielle de CO₂ in situ supérieure à sa pression dans l'atmosphère (10^{-3,5}).

Au contact de l'air, la réaction suivante:



Cependant, l'alcalinité totale de l'eau n'est pas modifiée par cette réaction et on peut donc à partir des mesures au laboratoire de (HCO₃⁻ + 2 CO₃²⁻), estimer sa valeur initiale et donc calculer (Ca)(CO₃) in situ. Ce raisonnement n'est valable que dans la mesure où la calcite n'a pas précipité dans les solutions échantillonnées. Ces éventuels dépôts n'ayant pas été contrôlés, les résultats doivent être interprétés avec prudence. On peut seulement constater que toutes les eaux lacustres dans les sédiments sont sous-saturées vis à vis de la calcite, du gypse et de l'halite.

CONCLUSION:

Cette étude constitue une première approche de la nature physicochimique des eaux des sédiments du lac de Guiers rendues accessibles à la suite d'une longue période sèche dans toute la zone sahélienne.

Elle a permis de mettre en évidence l'extrême vulnérabilité du lac de Guiers dont la physionomie et les contours évoluent sans cesse sous l'effet de pulsations climatiques de très grande amplitude. Le flux et le reflux saisonniers des eaux libres de la surface jouent un rôle fondamental sur la nature chimique des eaux "interstitielles" des sédiments lacustres.

Les différentes approches générales et souvent très partielles que nous venons de réaliser sur la chimie des eaux des sédiments mettent en évidence l'importance primordiale de l'évaporation

- les gradients de concentration Nord-Sud et Est-Ouest peuvent être associés à l'influence de l'évaporation qui agit, parallèlement au retrait progressif des eaux de surface, sur des eaux déjà différenciées,

- l'évolution secteur par secteur de la composition chimique moyenne exprimée en pourcentage sous forme de diagrammes circulaires (Fig. 17) est également assujettie aux phénomènes évaporatoires. Les eaux du secteur nord, prélevées souvent très près des eaux libres résiduelles ont une composition très proche de celle des eaux de surface moyenne avec un pourcentage élevé pour les bicarbonates, équivalent pour Ca, Mg, Na et Cl et faible pour les ions sulfates.

Les teneurs relatives en bicarbonate et calcium décroissent rapidement alors que celles des autres éléments augmentent. Dans les trois secteurs les plus méridionaux (centre, sud et extrême sud) où, avec une répartition géographique hétérogène, les eaux sont soit sulfatées sodiques, soit chlorurées sodiques. Le déséquilibre chlorure-sodium et la valeur élevée en ions sulfates observés dans la zone nord constituent une anomalie due à quelques échantillons du layon B probablement influencés par les rejets des cultures irriguées de la C.S.S. Pour des minéralisations plus élevées, les valeurs du rapport Na/Cl et l'évolution de la composition chimique en fonction du facteur de concentration sont assez semblables à celles des eaux libres de la surface.

Toutes ces observations concrétisent le lien étroit entre les eaux superficielles et les eaux des sédiments, ces dernières continuant à évoluer après l'assèchement du lac. Il faut cependant garder présent à l'esprit que la plupart de ces interprétations sont déduites de valeurs moyennes et que les grandes variations de détail laissent pressentir d'autres influences autres que celle de l'évaporation (invasions marines anciennes, échanges d'ions, processus d'oxydo-réduction ...).

L'hétérogénéité de composition chimique pourrait d'ailleurs

être due en grande partie à la structure même des fonds lacustres composés de sables surmontés par des argiles; ces deux niveaux isolent en effet des eaux "inférieures" légèrement en "charge" et marquées par les invasions marines anciennes ou les nappes voisines et des eaux "supérieures" en contact avec les eaux lacustres.

Ces problèmes pourront être résolus par une étude point par point avec le support des calculs d'équilibre et des analyses isotopiques. En particulier, l'examen comparatif des teneurs en Oxygène 18 et des conductivités sera décisif pour évaluer le rôle de l'évaporation.

BIBLIOGRAPHIE

-oOo-

- AUDIBERT.M.(1966)
Etude hydrogéologique de la nappe profonde du Sénégal.
"Nappe Maestrichienne".Mém.BRGM,41,96p.
- BAMBA.S.B.(1985)
Première approche de la physicochimie des eaux intersti-
tielles des sédiments du lac de Guiers.
Sénégal.Mém.DEA,Dpt géol.,Université de Dakar,48p.
- CARMOUZE.J.P.(1976)
La régulation hydrogéochimique du lac Tchad.Contribution à
l'analyse biodynamique d'un système endoréique en milieu
continental.Trav.et.Doc.de l'ORSTOM,58,418p.
- COGEL.F.X.(1984)
Etude limnologique d'un lac sahélien:le lac de Guiers.
Sénégal.Thèse d'état,Ful,Arlon (Belgique),19 décembre 1984
3 tomes,385p.
- COGELS.F.X.et.GAC.J.Y.(1982)
Le lac de Guiers:Fonctionnement,bilans hydriques.
Evaporation d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne,
(Sénégal).
Cahiers ORSTOM ,série géol.,XII,1,pp40-60.
- COGELS.F.X.et.GAC.J.Y.(1983)
Aménagement et évolution hydrogéochimique du lac de Guiers
depuis 1916.
Coll.de.l'AUPELF.Thiès,Sénégal;et rapport ORSTOM Dakar,18p.
- COGELS.F.X.et.GAC.J.Y.(1984)
Evolution hydrogéochimique du lac de Guiers (Sénégal) au
cours de la sécheresse actuelle au Sahel.
X^e Rast,avril 1984,Bordeaux,editeur Soc.Géol.FR,p.141.
- DIOP.M.(1984)
Le delta sous lacustre du lac de Guiers:Etude géomorphologique
Mémoire de maîtrise.
Dépt.Géogr.,Univ.Dakar ,94p.
- GAC.J.Y.MONTEILLET.J.FAURE.H.(1981)
Marine shorelines in estuaries as a paleoprecipitation
indicator.Proc.of the symp.on"Wariation in the global
water budget"
Oxford (G.B) ,12p.

- GAC.J.Y.et.TRAVI.Y.(1984)
Etude quantitative et qualitative des poussières atmosphériques en provenance du Sahara, entre Dakar et Nouakchott. X^e réunion annuelle des sciences de la terre. Avril 1984 , Bordeaux , p.237.
- GARRELS.R.M.et.THOMPSON.M.E.(1962)
A chemical model for sea water at 25 C and one atmosphere total pressure.Amer.Journ.of science.260,p.57-66.
- HELGESON.H.C.(1969)
Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures .Amer.Journ.Science,267,pp 724-804.
- HENRY.Y.(1918)
Irrigations et cultures irriguées en Afrique tropicale. Edit.Larose,Paris,296p.
- ICOLE.M.,GAC.J.Y.,MONTEILLET.J.,FAURE.H.(1982)
Marqueurs biogéochimiques d'aridité en milieu ouvert et fermé Estuaires du fleuve Sénégal et dépressions interdunaires du bassin du lac Tchad.Séances de l'Ass.Géogr.France;Reims 20 février 1982,4p.
- LATIMER.W.M.(1952)
The oxidation states of the elements and their potentials in aqueous solutions.Prentice-Hall.Inc.Ed.New-york,2nd ed.392p.
- MICHEL.P.(1973)
Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie :Etude géomorphologique. Mém.ORSTOM,Paris,n 63,752p.
- MONTEILLET.J.,FAURE.M.,PIRAZZOLI.P.A.,RAVISE.S.A.(1981)
l'invasion saline du Ferlo (Sénégal)à l'holocène supérieur (1900 B.P).Revue palaeoecologie of Africa,vol.13,pp205-215.
- OLIVRY.J.C.(1983)
Contribution de la prévision en hydrologie à l'éventuelle maîtrise des ressources déficitaires du fleuve Sénégal pour la saison sèche 1983-1984.(Un projet de barrage provisoire et les estimations hydrologiques). Rapport ORSTOM . Dakar,3p.
- PINSON-MOUILLOT.J.(1980)
Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires du plateau continental Sénégalais(Nord de la presqu'ile du Cap-vert).Thèse 3 cycle.Dept.Géol.Bordeaux I,106p.
- ROCHE.M.A.(1973)
Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. Thèse.Doctorat.Univ.Paris VI ,398 p.

- ROCHETTE.C.(1974)
Le bassin du fleuve Sénégal.
Monographie hydrologique de l'ORSTOM ,Paris,1,325p.
- SAINTON.C.(1957)
Etude géologique de la région du lac de Guiers.
Arch.BRGM.Dakar.26p.
- SALL.M.,,DIOP.S.,CISSE.I.,DIAW.A.T.(1978)
Application de quelques méthodes de statistique descriptive
à l'étude des ensembles dunaires du Sénégal occidental.
Ann.Fac.lettres.Sci.Hum,Dakar,8,pp197-217.
- SAOS.J.L.,COGELS.F.X.,CASTA.L.,FABRE.M.,FAURE.H.,GAC.J.Y.(1982)
Etude préliminaire de deux sondages dans les sédiments
holocènes du lac de Guiers (Sénégal).
Cah.ORSTOM.Sér.Géol.,Vol XII,1,pp 61-71.
- TRENOUS.J.Y.(1968)
Rapport de mission dans la région du lac de Guiers,la vallée
du Ferlo,la zone Linguère ,Dahra,Coki,Louga.
Rapport n 28, Fac.Sci.Univ de Dakar.
- TRICART.J.(1954)
Notice de la carte géomorphologique du delta du Sénégal.
Feuille de R.Toll.
Bull.MAS.,II,Fasc.6,15,8 p.
- TROCHAIN.J.(1949)
Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal.
Thèse,Mém,IFAN,2,Ed.Paris,Larose,433 p.
- TRUESDELL.A.H.,JONES.B.F.(1974)
Wateq , a computer program for calculating chemical
equilibria of natural waters.
Amer.Jour.Research U.S.Géol.Survey.,2,2,pp 233-248.

A N N E X E

TABLEAUX

Tableau I

EXTREME NORD

locali- sation	ANIONS m.moles				CATIONS m.moles				SILICE mg/l	SOMME DES ANIONS m.moles	SOMME DES CATIONS m.moles
	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	CO ₃ H ⁻	CO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺			
B1	9.6	19.35	1.0	-	10.9	2.85	1.63	20.1	0.58	29.95	35.48
B2	44.8	16.6	2.8	0.4	1.93	6.25	2.22	60	1.18	64.6	70.4
B3	12.5	.38	9.7	1.2	0.47	0.92	0.75	22.9	1.23	23.78	25.04
B4	2.15	0.0	3.44	.24	0.7	.86	0.65	2.09	0.76	5.83	4.3
B5	10.7	9.6	2.24	-	2.94	3.92	1.15	16.9	0.54	22.54	24.91
B6	17.3	13	0.84	-	2.56	5.95	1.46	24.4	0.64	31.14	34.37
B9	2.94	2.53	0.92	-	1.53	1.09	0.42	3.56	0.34	6.39	6.6
B10	2.15	0.43	1.48	-	0.56	0.38	0.32	2.04	0.26	4.06	3.3
S3B0	3.2	2.01	6.3	0.3	0.71	1.92	0.69	7.6	0.36	11.81	10.92
L1	2.0	1.11	0.19	0.0	0.54	0.62	0.37	1.56	1.05	3.3	3.09
L2	2.7	0.25	2.16	0.0	0.59	0.62	0.21	2.87	0.28	5.11	4.29
L3	1.75	0.0	1.28	0.0	0.33	0.29	0.19	1.62	0.22	3.03	2.43
A1	1.69	0.21	1.32	0.0	0.24	0.37	0.2	1.9	0.61	3.22	2.71
A2	3.8	0.64	2.3	0.16	0.51	0.84	0.33	4.5	0.61	6.9	6.18
A3	3.95	0.0	2.72	0.0	0.41	0.65	0.28	4.03	0.63	6.67	5.37
A4	4.8	0.04	2.0	0.5	0.56	0.81	0.3	4.83	0.49	7.34	6.5
A5	4.8	0.21	2.0	0.5	0.44	0.76	0.32	5.56	0.53	7.51	7.08
TOTAL:	130.83	66.36	42.69	3.3	25.92	29.1	11.49	186.46		243.18	252.97
% :	26.36	13.37	8.6	0.6	5.22	5.86	2.31	37.58		TOTAL: 496.15	

Tableau I

ZONE NORD

locali- sation	ANIONS m.moles				CATIONS m.moles				SILICE mg/l	SOMME DES ANIONS m.moles	SOMME DES CATIONS m.moles
	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	CO ₃ H ⁻	CO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺			
M1	9.0	(5.51)	0.64	0.0	2.5	1.92	0.53	10.2	0.64	15.15	15.15
M2	3.42	0.89	2.0	0.3	1.37	0.57	0.27	3.06	0.41	6.61	5.27
M3	6.95	2.73	1.9	0.1	1.65	1.32	0.49	7.34	0.28	11.68	10.3
M4	4.1	0.72	2.4	0.0	1.5	0.6	0.29	3.75	0.14	7.22	6.14
M5	(10)	(0.27)	3.65	0.6	0.65	1.25	0.52	12.1	0.33	14.52	14.52
M6	3.7	0.89	2.76	0.0	1.45	0.76	0.3	3.5	0.51	7.35	6.01
M7	2.95	7.25	0.0	0.0	2.64	1.67	0.95	4.8	1.33	10.2	10.06
M8	3.2	4.36	0.56	0.0	1.25	0.86	0.57	7.06	1.36	8.12	9.74
C'1	14	23.4	0.0	0.0	4.47	13.5	1.81	23	1.06	37.4	42.78
C'2	9.9	22.65	0.0	0.0	4.22	12.5	1.44	19.4	0.83	32.55	37.56
C'3	8.8	21.95	0.0	0.0	4.39	11.15	1.33	17.1	0.83	30.75	33.97
C'4	3.65	6.8	0.0	0.0	1.73	2.97	0.65	6.84	0.94	10.45	12.19
C'5	5.35	12.35	0.78	0.0	2.89	5.9	0.98	12.1	0.66	18.48	21.87
C'6	7.2	2.4	3.76	0.0	1.65	2.17	0.59	7.34	0.54	13.36	11.75
C'7	3.7	2.27	1.92	0.0	1.19	1.42	0.5	4.25	0.74	7.89	7.36
C'8	4	1.2	2.64	0.0	00.81	1.48	0.58	3.84	0.76	7.84	6.71
C'9	1.8	2.27	5.88	0.4	0.72	2.44	0.6	4.84	0.74	10.35	10.6
C1	18.9	15.4	2.48	0.0	3.73	5.55	1.43	30.8	0.74	36.78	41.51
C2	19.3	16.45	2.8	0.3	2.07	12.25	2.28	25.0	0.43	38.85	41.6
C3	19.0	23.8	2.1	0.0	9.7	8.35	2.22	29.0	0.54	44.9	49.27
C4	4.5	5.4	3.16	0.24	2.12	2.25	0.99	8.4	0.59	13.3	13.76
C5	3.4	1.07	3.28	0.0	1.03	1.01	0.44	4.03	0.79	7.75	6.51
L1	3.6	0.46	2.65	0.25	0.79	0.87	0.34	4.0	0.74	6.96	6.00
L2	7.95	0.14	3.6	0.42	0.72	1.5	0.35	7.9	0.96	12.11	10.47
L3	6.3	0.98	3.55	0.0	1.01	1.29	0.52	6.21	0.21	10.83	9.03
L4	1.87	0.42	2.1	0.1	1.15	0.41	0.18	1.5	0.24	4.49	3.224
L5	6.3	0.89	3.5	0.0	1.0	1.29	0.53	6.38	0.21	10.69	9.2
L6	6.0	1.07	2.65	0.1	1.48	0.87	0.37	5.25	0.29	9.82	7.97
L7	1.54	0.0	3.0	0.0	1.0	0.54	0.15	1.39	0.56	4.54	3.08
L8	6.15	0.68	2.8	0.3	0.94	1.2	0.49	6.65	0.19	9.93	9.28
L9	2.05	0.0	3.0	0.0	0.64	0.53	0.23	2.25	0.64	5.05	3.65
L10	5.5	0.94	3.45	0.0	0.94	1.2	0.46	5.8	0.21	9.89	8.4
L11	1.84	0.21	2.2	0.0	0.6	0.36	0.3	2.15	0.14	4.25	3.41
L12	5.6	0.94	3.32	0.0	0.97	1.17	0.47	5.85	0.28	9.86	8.46
L13	2.0	0.51	2.45	0.0	1.0	0.46	0.26	2.09	0.18	4.96	3.81
D1	5.05	0.98	2.6	0.0	1.75	0.76	0.36	5.09	0.28	8.63	7.96
D2	2.17	0.34	3.0	0.0	0.81	0.5	0.35	3.21	0.21	5.51	4.87
D3	8.5	0.0	5.68	0.72	0.98	1.62	0.77	9.04	0.09	14.9	12.41
L4	1.3	0.0	2.8	0.0	0.75	0.52	0.13	1.37	0.28	4.1	2.77
L5	12.5	15.7	0.0	0.0	5.1	4.37	1.56	18.0	1.29	28.2	29.03
L6	2.0	1.45	5.35	0.0	0.38	1.12	0.47	6.12	0.41	8.8	8.09
L7	2.52	0.81	0.06	0.0	0.3	0.34	0.36	3.12	0.89	3.39	4.12
L8	1.35	0.0	2.35	0.0	0.38	0.4	0.17	1.44	0.26	3.7	2.39
L9	5.5	3.3	3.7	0.0	2.43	2.0	0.31	6.75	0.46	12.5	11.49
L10	1.75	0.04	3.7	0.0	0.81	0.81	0.3	2.0	0.28	5.49	3.92
L11	2.2	(0.11)	0.5	0.0	0.36	0.3	0.21	1.94	0.16	2.81	2.81
L12	4.75	4.32	0.15	0.0	1.25	1.68	0.65	7.4	0.89	9.22	10.98
L13	7.0	2.95	0.2	0.0	0.81	1.56	1.06	8.3	1.13	10.15	11.73
L14	4.15	0.0	3.1	0.0	1.03	0.81	0.22	3.75	0.24	7.25	5.81
L15	3.0	0.38	3.0	0.0	0.93	0.93	0.25	3.0	0.26	6.38	5.11
TOTAL:	287.26	217.65	117.17	3.83	84.04	121.2	31.58	387.7		625.91	624.62
x :	22.97	17.4	9.36	0.3	6.72	9.69	2.52	31		TOTAL: 1250.53	

Tableau I

ZONE CENTRALE

locali- sation	ANIONS m.moles				CATIONS m.moles				SILICE mg/l	SOMME DES ANIONS m.moles	SOMME DES CATIONS m.moles
	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ H ⁻	CO ₃ ⁻²	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺			
D"2	4.75	2.74	3.76	0.0	1.73	1.82	0.5	6.7	0.76	11.25	10.75
D"3	4.75	2.53	4.6	0.0	1.32	2.01	0.45	6.56	0.76	11.88	10.34
D'3	10.2	9.6	5.44	0.0	1.17	4.69	0.86	23.1	0.51	25.24	29.82
D'4	9.0	4.28	2.0	0.25	1.95	2.65	0.51	9.64	0.54	15.53	14.75
D'1	7.0	0.34	3.1	0.35	0.53	2.12	0.48	5.38	0.58	10.79	8.51
E1	9.45	0.98	3.6	0.0	2.12	1.85	0.48	6.2	0.51	14.03	10.65
E2	8.5	4.01	1.28	0.0	1.93	2.35	0.59	8.64	0.53	13.79	13.51
E3	11.5	14.75	0.0	0.0	3.62	7.2	1.08	16.6	0.74	26.25	28.5
E4	11.7	13.55	1.14	0.0	4.1	7.2	0.96	16.4	0.64	26.39	28.65
E5	20.1	9.25	3.1	0.75	1.53	6.1	1.3	26.4	0.71	33.2	35.33
E6	69.3	31.55	0.0	0.0	5.0	18.7	2.4	84.0	0.88	100.85	110.1
E7	119.0	48.0	0.0	0.0	4.13	30.7	2.97	139.0	0.81	167.0	176.8
E8	249.0	62.0	4.2	0.0	13.3	51.5	5.7	225	0.14	315.2	295.5
E9	309.0	64.0	0.0	0.0	10.25	58.5	8.75	279	0.39	373.0	356.5
S2	7.85	3.54	2.85	0.45	2.1	3.04	0.64	6.84	0.89	14.69	12.62
S2-1	13.4	15.75	0.2	0.0	2.5	7.45	1.35	22.5	1.04	29.35	33.8
S2-2	8.7	7.3	0.22	0.0	2.2	4.03	0.84	9.6	0.99	16.22	16.67
S2-3	8.1	4.6	3.75	0.7	1.48	4.2	0.64	9.6	0.71	17.15	15.92
S2-4	105.0	36	4.96	0.0	12.55	19.0	4.5	107	0.26	145.96	143.05
K1	9.8	12.8	0.28	0.0	3.37	5.3	1.3	15.6	0.36	22.88	25.57
K2	6.5	0.51	2.65	0.2	0.89	1.22	0.52	5.81	0.56	9.86	8.44
K3	7.35	0.47	4.5	0.0	1.23	1.56	0.53	6.5	0.29	12.32	9.82
K4	6.5	0.0	4.2	0.4	0.97	1.51	0.43	6.13	0.66	11.1	9.04
K5	7.2	2.43	3.4	0.45	1.72	2.25	0.56	7.84	0.54	13.48	12.37
K6	7.35	24.3	1.96	0.0	11.45	8.2	1.02	16.6	0.59	33.6	37.27
K7	7.35	0.51	4.28	0.0	1.26	1.48	0.47	6.13	0.54	12.14	9.34
K8	9.7	1.49	3.1	0.4	1.31	2.22	0.56	9.14	0.54	14.69	13.23
K9	11.7	(4.34)	3.3	0.3	2.89	3.35	0.79	11.0	0.23	19.64	18.03
K10	14.3	(9.45)	2.1	0.15	3.4	5.2	0.9	17.5	0.21	26.0	27.0
K11	12.2	2.43	2.4	0.2	1.43	2.7	0.79	10.7	0.28	17.23	15.62
K12	20.9	16.1	2.95	0.35	1.9	8.45	1.21	34.1	0.86	40.3	45.66
L16	4.0	3.3	2.1	0.0	2.25	2.31	0.61	3.62	0.28	9.4	8.79
L17	2.9	0.0	2.1	0.3	0.6	0.47	0.3	2.81	0.42	5.3	4.18
L18	16.0	(24.2)	8.2	0.0	10.25	15.0	2.62	19.5	0.0	48.4	47.37
L19	6.0	5.55	1.0	0.0	3.12	2.5	0.41	7.8	0.61	12.55	13.83
L20	15.0	1.5	4.9	0.4	0.93	2.62	0.92	14.8	0.11	21.8	19.27
L21	9.0	5.35	0.0	0.0	1.97	2.68	0.84	8.56	1.83	14.35	14.05
L22	127.0	59.0	0.0	0.0	8.4	39.5	4.31	138	1.53	186.0	190.21
L23	10.0	10.65	6.5	0.0	3.81	7.0	1.56	12.2	0.89	27.15	24.57
TOTAL:	1459.05	519.95	104.1	5.65	136.6	350.6	55.65	1362.5		1925.96	1905.43
x :	38.08	13.54	2.71	0.14	3.56	9.15	1.45	35.56		TOTAL: 3831.29	

Tableau I

ZONE SUD

locali- sation	ANIONS m.moles				CATIONS m.moles				SILICE mg/l	SOMME DES ANIONS m.moles	SOMME DES CATIONS m.moles
	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	CO ₃ H ⁻	CO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺			
E'1	12.0	10.8	0.0	0.0	2.17	5.45	1.44	16.9	0.23	22.8	25.96
E'2	11.0	9.45	2.85	0.2	3.48	5.05	1.25	14.9	0.24	23.5	24.68
E'3	55.8	39.85	3.56	0.0	14.55	19.0	1.69	66.4	0.29	99.21	101.64
E'4	69.3	32.1	3.08	0.32	9.5	15.2	1.84	79.4	0.48	104.8	105.94
E'5	214.0	48.0	2.76	0.0	13.65	50.5	3.63	199.0	0.29	264.76	266.78
F1	47.3	15.6	1.16	0.0	1.9	6.35	2.0	60.7	0.43	64.06	70.95
F2	14.1	5.05	9.8	0.5	0.37	2.25	1.56	27.9	0.24	29.45	32.08
F3	12.2	4.8	6.1	0.25	0.65	5.05	1.58	15.4	0.19	23.35	22.68
F4	49.3	26.15	1.26	0.0	3.38	12.5	2.25	64.7	0.73	76.71	82.83
F5	115.0	36.55	0.0	0.0	9.65	25.0	2.34	110.0	1.06	151.55	146.99
F6	63.5	29.35	2.3	0.0	8.45	16.0	1.5	69.4	0.59	95.15	95.35
F7	44.8	23.15	3.04	0.0	3.25	10.0	1.84	63.0	0.33	70.99	78.19
F8	47.3	11.5	10.0	0.8	0.34	5.75	1.91	65.5	0.38	69.6	73.5
G1	34.0	1.67	8.4	0.0	2.0	3.73	1.68	32.0	0.16	44.07	39.41
G2	91.0	24.4	0.98	0.0	3.04	12.0	2.41	104.0	0.86	116.38	121.45
G3	21.0	3.51	2.8	0.3	1.78	4.09	1.25	19.0	0.19	27.61	26.12
G4	39.5	(42.82)	0.0	0.0	9.0	16.1	2.22	55.0	0.46	82.32	82.32
G5	107.0	44.7	0.0	0.0	9.4	28.2	2.66	111.0	1.21	151.7	151.26
H1	26.0	4.2	2.5	0.2	2.31	3.67	1.22	24.1	0.43	32.9	31.3
H2	35.3	26.7	0.0	0.0	5.7	12.5	2.16	48.2	1.33	62.0	68.56
H3	96.5	36.55	0.2	0.0	10.65	22.7	2.19	99.4	0.44	133.25	134.94
H4	19.0	13.45	4.56	0.36	2.44	7.45	2.0	29.6	0.34	37.37	41.49
L24	28.0	2.65	6.3	0.6	1.25	4.31	1.69	26.2	0.07	37.55	33.45
L25	19.0	12.7	3.75	0.0	3.75	8.0	2.81	25.5	0.32	35.45	40.06
L26	95.0	5.95	5.5	0.0	2.93	9.9	3.46	80.0	0.32	106.45	96.29
TOTAL:	1366.9	511.65	80.9	3.53	125.69	310.75	50.58	1507.2		1962.98	1994.22
X :	34.54	12.92	2.04	0.08	3.17	7.85	1.27	38.08		TOTAL: 3957.2	

Tableau . I

ZONE EXTREME SUD

locali- sation	ANIONS m.moles				CATIONS m.moles				SILICE mg/l	SOMME DES ANIONS m.moles	SOMME DES CATIONS m.moles
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ H ⁻	CO ₃ ²⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺			
I1	175.0	39.85	8.0	0.0	15.7	24.5	3.15	116.0	0.19	222.85	209.35
I2	1511.0	45.85	0.0	0.0	14.7	25.2	2.97	153.0	0.74	196.85	195.87
I3	53.5	33.65	0.0	0.0	10.15	13.5	2.56	65.0	1.24	87.15	91.21
I4	88.0	27.2	1.28	0.0	4.6	16.7	2.35	91.4	0.73	116.48	115.05
I5	11.7	5.5	3.2	0.25	2.45	4.03	1.43	12.5	0.16	20.65	20.41
J1	39.5	0.0	19.6	0.0	0.42	6.75	1.59	42.7	1.09	59.1	51.46
J2	47.3	9.35	3.85	0.3	3.07	8.5	1.9	46.2	1.04	60.8	59.67
J3	63.5	12.05	8.55	0.0	4.5	10.75	2.09	63.0	0.36	84.1	80.34
J4	18.2	13.4	7.4	1.6	3.36	5.94	1.55	35.0	0.19	40.6	45.85
J5	35.8	22.5	5.8	0.5	2.25	10.6	2.41	57.2	0.21	64.6	72.46
J6	11.5	2.7	8.3	0.6	1.7	3.89	1.35	12.8	0.56	23.1	19.74
L27	6.75	(1.73)	1.2	0.0	1.56	2.06	0.66	5.4	0.27	9.68	9.68
L28	5.5	0.64	2.4	0.0	0.56	1.12	0.44	5.4	0.19	8.54	7.52
L29	9.0	2.1	4.15	0.0	1.37	2.31	1.12	9.2	0.18	15.25	14.0
L30	20.0	7.35	9.1	0.0	3.25	6.2	2.12	22.4	0.42	36.45	33.97
TOTAL:	736.25	223.87	82.83	3.25	69.64	142.05	27.69	787.2		1046.2	1026.58
% :	35.51	10.8	3.9	0.15	3.35	6.8	1.3	37.97		TOTAL: 2072.78	

TABLEAU.2- REGROUPEMENT DES EAUX INTERSTITIELLES EN FONCTION DU FACTEUR DE CONCENTRATION (Fc).

localisation	pH		C.E.	Ca	Mg	K	Na	Somme des	Cl	SO	CO H	CO	Somme des	SiO	Fc	Minéralisation
	Terrain	Labo.	mmhos	mm/l	mm/l	mm/l	mm/l	cations	mm/l	mm/l	mm/l	mm/l	Anions	mm/l		mg/l
A1-L4-L7.	7.29	8.13	0.63	0.79	0.44	0.17	1.59	5.12	1.7	0.44	2.14	0.03	4.86	0.36	1.0	341.97
B4-10-C8-L8-11-13-13'	7.07	7.88	0.73	0.69	0.53	0.34	2.23	5.01	1.79	0.22	2.5	0.7	6.13	0.4	1.4	408.14
B9-C'8-D2	7.35	5.85	0.71	1.05	1.02	0.45	3.53	8.12	3.03	1.35	2.18	-	7.92	0.61	2.2	572.19
A3-C5-L1	6.74	8.1	0.82	0.74	0.84	0.35	4.02	7.53	3.65	0.53	2.88	0.08	7.75	0.72	2.52	576.0
K2-L10-L12-L12'	8.0	7.98	0.73	0.94	1.19	0.47	5.84	10.57	5.81	0.83	3.23	0.5	11.8	0.33	3.67	751.69
D' '3-K3-C6	7.47	8.1	1.34	1.15	1.57	0.51	6.54	12.49	6.1	1.24	3.96	0.1	12.74	0.41	4.11	861.97
K5-L2	6.79	8.5	1.61	1.22	1.87	0.45	7.87	14.5	7.57	1.21	3.5	0.43	14.34	0.75	4.94	961.02
C4-E2	6.14	7.85	1.72	2.03	2.3	0.79	8.52	20.3	6.5	5.4	2.22	0.12	19.76	0.56	5.35	1288.99
D3-K8	7.51	8.3	1.69	1.14	1.92	0.66	9.09	15.87	9.1	0.74	4.39	0.38	15.73	0.36	5.71	1032.95
K9-K11	6.73	8.25	2.63	2.16	2.71	0.79	10.85	21.54	11.95	2.71	3.12	0.32	21.13	0.25	6.82	1340.38
C'5-I5-J6	7.16	8.06	2.51	2.34	4.6	1.25	12.46	27.59	9.51	6.8	4.09	0.28	27.76	0.35	7.83	1818.04
F3-K1	7.12	7.3	3.23	2.01	5.17	1.44	15.5	31.3	11.0	8.82	3.19	0.12	32.07	0.28	9.74	2074.07
G3	6.57	8.3	3.29	1.78	4.09	1.25	19.0	31.99	21.0	3.51	2.8	0.3	31.42	0.2	11.94	1938.64
B6-H1	6.43	7.45	4.02	2.44	4.81	1.34	24.35	40.19	21.65	8.6	1.67	0.1	40.72	0.54	15.31	2560.29
C3-H4	6.91	8.1	4.8	6.7	7.9	2.11	29.3	60.61	19.0	12.62	3.33	0.18	59.93	0.45	18.42	3918.35
B2-F7-J3	6.3	7.83	6.43	3.26	9.0	2.05	62	88.56	51.03	17.26	4.79	0.13	90.6	0.94	39.6	5677.68
E6	5.92	3.5	11.3	5.0	18.7	2.4	84.0	133.8	69.3	31.55	-	-	132.4	0.88	52.83	8218.74
H3-I1	6.14	6.4	17.95	10.65	22.7	2.19	99.4	168.29	96.5	36.55	4.1	-	169.6	0.32	62.51	10548.72
F5-G5	4.81	3.2	10.55	9.32	26.6	2.47	110.5	184.85	111.0	40.62	-	-	192.24	1.14	69.49	11560.52
E7	-	8.1	17.0	4.13	30.7	2.97	139.0	215.66	119.0	48.0	-	-	215.0	0.21	87.42	13063.82
E10-I2	5.0	5.5	19.8	14.7	25.2	2.97	153.0	235.77	156.5	45.85	1.06	-	249.26	0.81	96.22	14898.55
E'5	6.24	7.7	25.0	13.65	50.5	3.63	199.0	330.93	214.0	48.0	2.76	-	312.76	0.43	125.15	18855.39
E8	-	8.0	26.0	13.3	50.15	5.7	225.0	360.8	249.0	62.0	4.2	-	377.2	0.15	141.5	22184.19