

J.Y. GAC ¹, F.X. COGELS ², J.L. APPAY ¹, J.M. BOUCHEZ ¹,

J.L. DUPREY ¹, B. LABROUSSE ¹, D. ORANGE ¹.

PROJET CEE (EQUESEN) TS2 0198 F EDB

**RECONNAISSANCE GEOCHIMIQUE SUR
LES EAUX DE LA LAME
DE SUBMERSION DE LA VALLEE DU
FERLO (Sénégal).**



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

(2) FUL, Fondation Universitaire Luxembourgeoise, 140 rue des déportés, Arlon (Belgique).

RECONNAISSANCE GEOCHIMIQUE SUR
LES EAUX DE LA LAME
DE SUBMERSION DE LA VALLEE DU
FERLO (Sénégal).

J.Y. GAC ¹, F.X. COGELS ², J.L. APPAY ¹, J.M. BOUCHEZ ¹

J.L. DUPREY ¹, B. LABROUSSE ¹, D. ORANGE ¹.

Photographie de la couverture : Vue aérienne du barrage de Keur Mommar Sarr. Vallée du Ferlo à gauche et lac de Guiers à droite.

Janvier 1990

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

(2) FUL, Fondation Universitaire Luxembourgeoise, 140 rue des déportés,

Avant - Propos

Cette étude de l'ORSTOM sur la géochimie des eaux de la lame de submersion de la vallée du Ferlo constitue une contribution au programme EQUÉSEN, financé par la CEE (projet TS2 0198 F EDB). sur "L'environnement et la qualité des eaux du Sénégal" dans le contexte de l'après-barrage.

Oeuvre collective, cet ouvrage est le fruit du travail des auteurs cités, mais aussi de la collaboration de nombreux chercheurs (ornithologue et géophysicien) qui ont souvent accepté, à titre bénévole, de s'associer aux campagnes d'échantillonnages : F. BAILLON, G. JARRY, C. ROUCHOUSE et J. VASSAL. Un hommage particulier doit être rendu à M. RITZ dont le légendaire " pied marin " a parfois été mis à rude épreuve lors de "creux" anodins, pourtant bien habituels sur le lac de Guiers.

Enfin, missions, déplacements et acquisitions des données ont été grandement facilités grâce à la sollicitude et au concours de Responsables Sénégalais. J'adresse mes vifs remerciements à M. NDIAYE, Directeur de l'usine de traitement des eaux de la SONEES (Société Nationale d'Exploitation des Eaux du Sénégal) à N'Gnith et à MM. SENE et BEYE, respectivement Chef du Service Recherche et Responsable du laboratoire de Pédologie et d'Hydrologie de la CSS (Compagnie Sucrière Sénégalaise).

Jean Yves GAC

SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION	1
<i>I.- LE MILIEU NATUREL</i>	3
I. - Le cadre physique et la situation géographique.	4
II. - Le contexte géologique.	7
III. - Esquisse géomorphologique.	11
IV. - La nature des sols.	13
V. - Le climat.	18
<i>II.- HISTORIQUE ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU FERLO.</i>	26
I. - Les cartes historiques de la vallée du Ferlo.	27
II. - Fonctionnement hydrologique du lac de Guiers et du Ferlo.	39
III. - Conclusions.	44
<i>III.- GEOCHIMIE GLOBALE DE LA LAME DE SUBMERSION DU FERLO</i>	45
I. - Chronologie de la période d'inondation	45
II. - Evaluation des volumes déversés dans le Ferlo	46
III. - Evolution de la composition chimique des eaux	51
IV. - Aperçu sur les analogies et divergences d'évolution géochimique des eaux du lac de Guiers, des eaux des sédiments, des eaux du Ferlo et des eaux expérimentales.	70
<i>IV.- CONCLUSIONS GENERALES</i>	79
BIBLIOGRAPHIE	82
ANNEXES	86

RESUME

Après 32 années de sécheresse au Sahel, la vallée morte du Ferlo, située en rive gauche du Sénégal, a été inondée par la crue fluviale. A son maximum d'extension, la lame de submersion d'un volume de 48 millions de m³ s'est étendue sur près de 50 kilomètres.

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

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

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

Summary

After a 32 year drought period in the Sahel, the dead Ferlo valley located on the Senegal river left bank was inundated by the river flood. When at its maximum extension, the submergence run-off of a 48 million cubic meter volume extended over 50 km approximately.

This study comprises three parts : a summary presentation of the natural environment, a historic chronicle based on old cartographic documents and the hydrological operation of the Senegal river/lake of Guiers/Ferlo valley system starting from the turn of the century; and finally, a geodynamic and spatiotemporal review of the variability of the chemical composition of waters, essentially concentrated by evaporation.

During the flood period, the overall mineralization of waters varied from 0,7 to 41 g/l and solutions maintained a basic characteristic with low pH fluctuations around an average value of 8,45. Submergence run-off waters, confined in the continental domain, evolved towards a sea water chemical composition. This trend was confirmed by the mineralogical identification of sodium chloride precipitations.

Although they finally ended up in brines at various mineralization

degrees, the lake of Guiers and Ferlo valley waters converge towards solutions with sodic chlorinated facies. Geochemical and biochemical processes which determine the dynamic balances of various water substances are remarkably constant in those two evolving environments.

Zusammenfassung

Nach 32 Jahre Trockenheit in der Sahelzone wurde das tote Ferlotal, auf der rechten Seite des Senegals, durch Hochwasser des Flusses überschwemmt. Die Wassermenge von 48 Millionen m³ dehnte sich auf fast 50 km aus. Diese Studie umfasst drei Teile : eine zusammenfassende Darstellung des natürlichen Milieus, eine Chronik alter Kartographischer Dokumente und der Hydrologie des Systems Senegal/Guierssee/Ferlotal, und eine geodynamische Aufklärung der Variabilität der chemischen Zusammensetzung des durch Verdunstung konzentrierten Wassers.

Während der Überschwemmung bewegte sich die Gesamt-Mineralisierung des Wassers zwischen 0,7 und 41 g/l, der pH-Wert blieb basisch, mit geringen Abweichungen um den Mittelwert 8,45. Das auf den Kontinent beschränkte Überschwemmungswasser wurde in seiner chemischen Zusammensetzung dem Meerwasser ähnlich.

Diese Tendenz wurde durch die mineralische Identifikation der Natriumchloridausfällungen bestätigt.

Auch wenn sie in Salzlaken mit unterschiedlichem Mineralisierungsgrad enden, wird aus dem Wasser des Guierssees und des Ferlotals eine Natriumchloridlösung. Die geochemischen und biochemischen Prozesse, die die dynamische Bilanz der verschiedenen Wassersubstanzen bestimmen, sind in beiden evolutiven Milieus bemerkenswert konstant.

Riassunto

Dopo 32 anni di siccità nel sahel, la valle morta del Ferlo situata sulla riva sinistra del senegal, è stata inondata dalla piena fluviale. Nella sua estensione massima, l'onda di immersione, di un volume di 48 milioni di m³, ha coperto una superficie di circa 50 km.

Questo studio comprende tre parti : una presentazione sintetica dell'ambiente naturale, una cronistoria di vecchi documenti cartografici e del funzionamento idrologico del dispositivo fiume Senegal/lago di Guiers/valle del Ferlo dall'inizio del secolo, infine una, ricognizione geodinamica spaziotemporale sulla variabilità della composizione chimica della acque essenzialmente concentrate per evaporazione.

Per tutta la durata dell'inondazione, la mineralizzazione totale delle acque è variata da 0,7 a 41 g/l e le soluzioni hanno conservato un carattere basico con deboli oscillazioni del pH intorno ad un valore medio di 8,45. Le acque dell'onda di immersione, limitate alla zona continentale, si sono evolute in una composizione chimica d'acqua di mare. Questa tendenza è stata confermata dall'identificazione mineralogica di precipitazioni di cloruro di sodio.

Sebbene vadano a finire in salamole finali a diversi gradi di mineralizzazione, le acque del lago di Guiers e della valle del ferlo convergono verso soluzioni a facies clorurata sodica. I processi geochimici e biochimici che ordinano i bilanci dinamici delle diverse sostanze acquose sono, nei due ambienti evolutivi, di una costanza notevole.

Samenvatting

Na een droogte die 32 jaar lang aansleepte in de Sahel werd Ferlo, de dode vallei gelegen op de rechteroever onder water gezet omdat de Senegal uit haar oevers trad. Bij haar hoogste waterstand werd een gebied die zich tot bijna 50 km verder uitstreckte overstroomd met $48 \cdot 10^6$ m³ water.

Deze studie omvat 3 delen : een historisch overzicht van oude landkaarten en de hydrobiologische werking van de Senegal/het meer van Guiers/de vallei van Ferlo. Ten slotte volgt nog de geodynamische variabiliteit van de chemische samenstelling van het water in functie van plaats en tijd. Dit water was in hoofdzaak geconcentreerd door evaporatie.

Gedurende de periode van overstroming onderging het water een totale mineralisatie, variërend tussen 0,7 en 41 g/l. De oplossing behield haar basisch karakter met enkele lichte schommelingen van de pH rond 8,45. De hoeveelheid water die op het land was terecht gekomen evolueerde wat betreft de chemische samenstelling naar zeewater. Deze tendens werd bevestigd door de identificatie van natrium chloride in de neerslag.

Hoewel de mineralisatiegraad van het water van het meer van Guiers en de vallei van Ferlo verschilt evolueren beiden naar zoutoplossingen van NaCl. De geochemische en biochemische processen die de dynamische balans van verschillende substanties in het water bepalen zijn in de twee evoluerende milieus zeer opmerkelijk.

Resumen

El valle muerto del Ferlo, situado en el margen izquierdo del Senegal, ha sido inundado por una crecida fluvial después de 32 años de sequía en el Sahel. En su extensión máxima, la lámina de sumersión de un volumen de 48 millones de m³ ocupó una superficie de aproximadamente 50 kilómetros.

Este estudio comprende tres partes : en primer lugar una presentación sintética del medio natural, a continuación una crónica histórica desde principios de siglo basada en antiguos documentos cartográficos y en el funcionamiento hidrológico del conjunto formado por el río Senegal/lago de Guiers/valle del Ferlo, y en último lugar un reconocimiento geodinámico espacio-temporal sobre la versatilidad de la composición química de las aguas, concentradas esencialmente por evaporación.

Durante el periodo de inundación, la mineralización total de las aguas varió de 0,7 hasta 41 g/l y las soluciones conservaron un carácter básico, con oscilaciones débiles de pH alrededor de un valor medio de 8,45. Las

aguas de la lámina de sumersión, confinadas en zona continental, han evolucionado hacia una composición química de agua de mar. Esta tendencia se ha visto confirmada por la identificación mineralógica de precipitaciones de cloruro sódico.

Aunque en las salmueras finales se llegen a grados de mineralización diferentes, las aguas del lago de Guíers y del valle de Ferlo convergen en soluciones de facies de cloruro sódico. Los procesos geoquímicos y bioquímicos que rigen los balances dinámicos de las diferentes sustancias acuosas son, en ambos medios evolutivos, de una constancia notable.

INTRODUCTION

La libre circulation des eaux du fleuve Sénégal dans la vallée du Ferlo, via le lac de Guiers, est interrompue depuis le 7 septembre 1956 (GROSMAIRE, 1956) L'un des derniers témoignages écrits d'un Ferlo verdoyant revient à SAINTON (1957): " Nous distinguerons deux parties dans le lac de Guiers, nord et sud séparées par la digue de Mérinaguène (1)... la partie sud ... a 60 kms de longueur entre Keur Momar Sarr et Mboula... en fait la longueur de cette partie sud est variable, les eaux du Sénégal remontant plus ou moins loin, selon les années dans la vallée du Bounoum ou du Bas-Ferlo."

L'assèchement du Ferlo a, dans un premier temps, été progressif avec des précipitations relativement abondantes entre 1957 et 1968. A partir de 1969, début de l'épisode aride des deux dernières décennies, le rythme s'est accéléré: le niveau des nappes s'est considérablement abaissé, l'eau des céanes (puits) est devenue salée, les populations ont déserté cette région n'en gardant que le souvenir d'une vallée morte.

Une génération a vécu... lorsque le 20 septembre 1988 les vannes de la digue de Mérinaguène acceptent, non sans réticence, de s'ouvrir sous la poussée de la crue fluviale. Le Ferlo renaissait après plus de trente années d'isolement et de sécheresse.

Le renouveau, s'il a été de courte durée entre le 20 septembre et le 25 octobre 1988 (fermeture des vannes), s'est traduit par la submersion de la vallée du Bounoum et du Bas-Ferlo sur près de 50 kilomètres. Peu à peu, faute d'alimentation et sous les effets conjugués de l'évaporation et de l'infiltration, cette lame d'eau de submersion est revenue sur ses pas marquant chaque étape de son retrait par des mares résiduelles éphémères.

L'évolution de l'itinéraire chimique suivi par les eaux, au fur et à mesure de leur concentration, est manifestement sous le contrôle majeur de l'évaporation. L'interdépendance avec les nappes subaffleurantes est cependant vraisemblable et elle sera intéressante à analyser lorsque le plan d'eau artificiellement reconstitué se sera évaporé. Il s'agit en effet, et à très faibles profondeurs, d'eaux marines fossiles ou encore de reliques d'anciennes mangroves comme l'indique l'acidité particulièrement prononcée des eaux souterraines recueillies dans les premiers sondages.

Le plan prévisionnel de gestion des ressources en eau du dispositif fleuve Sénégal/lac de Guiers/Ferlo a, dans le contexte de l'après-barrages, soulevé l'opportunité de renouveler chaque année la remise en eau de la vallée du Ferlo. Cette éventualité situe l'importance de cette première reconnaissance géochimique qui peut, dans son genre, demeurer unique.

(1) L'ouvrage édifié entre le lac de Guiers et la vallée du Ferlo porte indifféremment le nom de digue de Mérinaguène ou de Keur Momar Sarr.

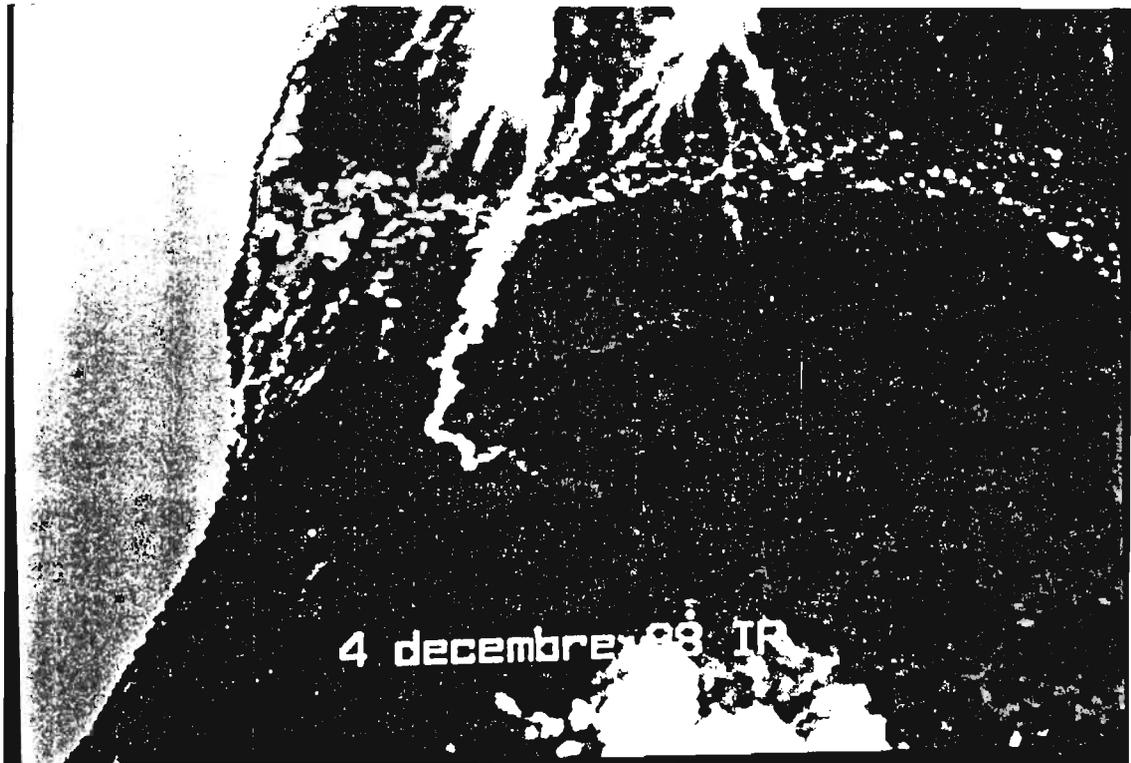


Photo 1. - Image LANDSAT du 4/12/1988 (Programme UTIS).
Vue de la basse Vallée du Fleuve Sénégal, du lac
de Guiers et du Ferlo.

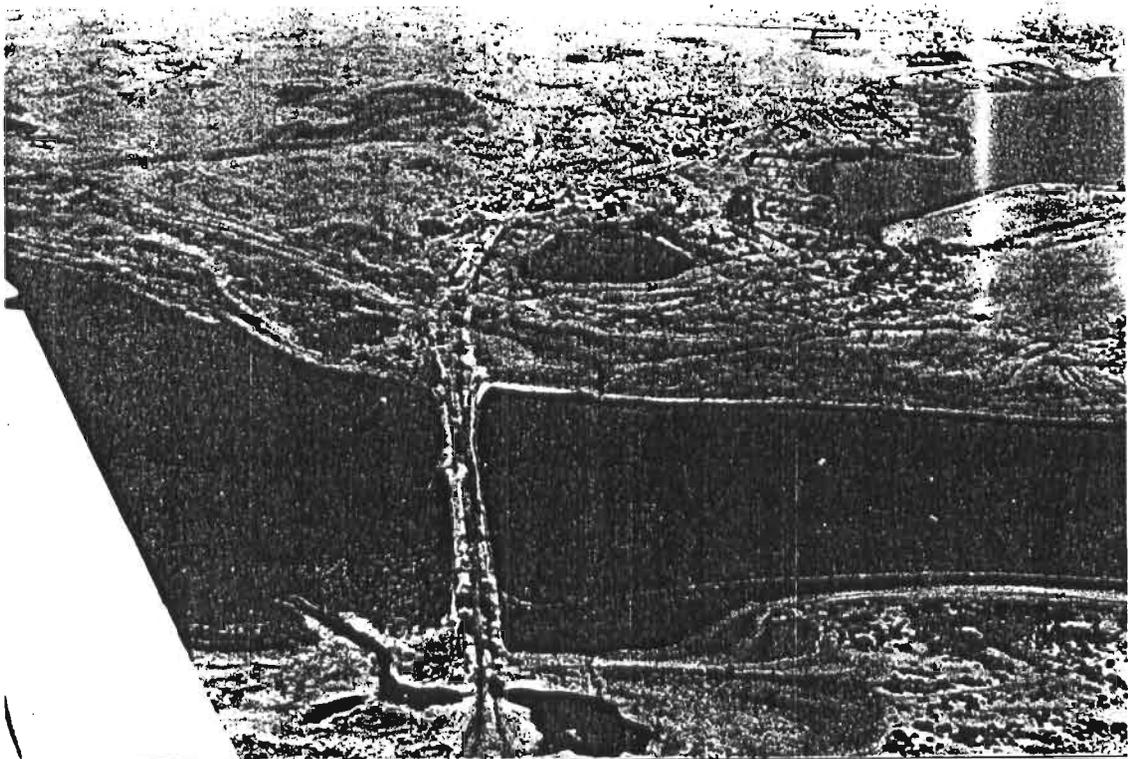


Photo 2. - Vue aérienne de Mai 1989 : au centre la digue
de Keur Momar SARR, à droite le lac de Guiers,
à gauche la vallée submergée du Ferlo.

L'objectif de cet article est d'esquisser, d'une manière très globale, l'aspect qualitatif du comportement chimique de cette lame de submersion au fur et à mesure de son recul et de la variabilité de ses contours. Les éléments du bilan chiffré seront développés ultérieurement en abordant, avant et après la phase de submersion, la géochimie des nappes de sub-surface de la vallée du Ferlo.

CHAPITRE I

LE MILIEU NATUREL

I.- LE CADRE PHYSIQUE ET LA SITUATION GEOGRAPHIQUE

La longue vallée du Ferlo se situe en rive gauche du fleuve Sénégal. Elle est limitée au Nord et à l'Est par la vallée alluviale du Sénégal, à l'Ouest par l'océan Atlantique et au Sud par les réseaux hydrographiques du Sine Saloum et de la Gambie.

A.- LE BASSIN VERSANT DU FERLO

Le " bassin versant " du Ferlo sans lit véritablement fonctionnel commence à se dessiner nettement au sud-ouest de la ville de Bakel à une altitude d'environ 100 m. (Fig.1). L'origine du bassin se situe près du village de Ngabou à 25 kilomètres du réseau hydrographique du Sénégal. La possibilité d'une ancienne communication entre les deux bassins a souvent été évoquée.

Il s'étend de 14° 30' à 16° de latitude Nord et de 12° 45' à 16° de longitude Ouest. Cette ancienne rivière longue de 602 km environ (en y incorporant le marigot du Bounoum, le lac de Guiers et l'ancienne Taouey) comporte dans sa partie amont trois branches principales improprement

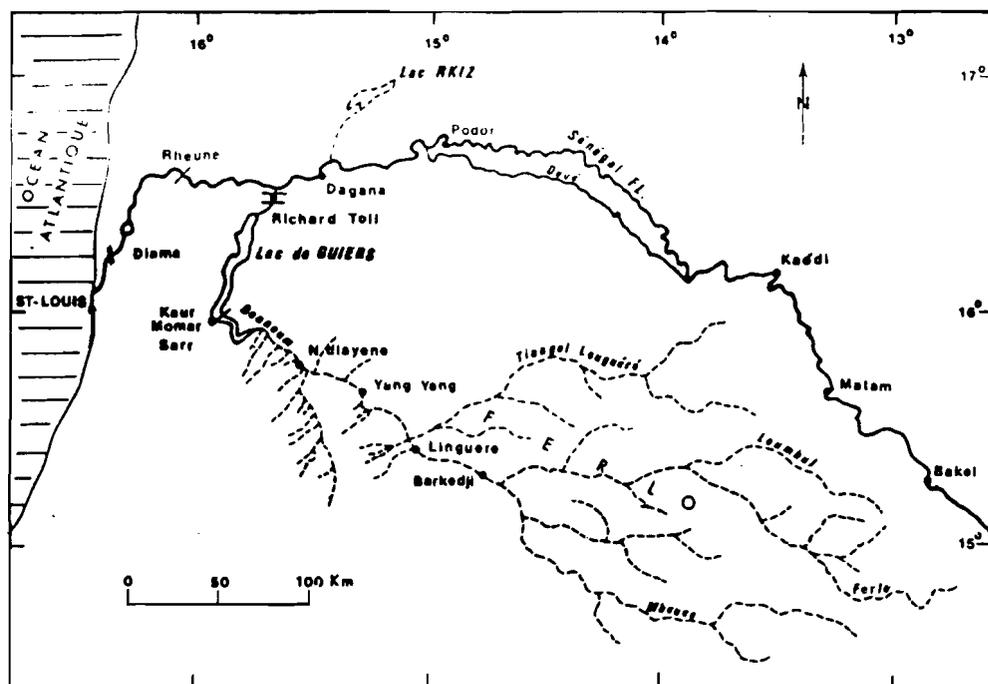


Fig. 1.- Situation géographique du bassin versant du Ferlo.

appelées aujourd'hui les vallées du Tiangol Louguéré, du Loumbol (en rive droite) et du Mboune avec son affluent le Tiangol Bananiol (en rive gauche).

La vallée du Louguéré longue de 235 km et de direction générale Est-Ouest a un dénivelé total de 60 mètres. la vallée du Loumbol longue de 120 km débouche dans le Ferlo à proximité de Ranérou. La pente y est relativement forte et ses ramifications extrêmes ne sont séparées du réseau du Sénégal que par une étroite ligne de crêtes. Le Mboune est l'affluent le plus important. Son tracé sur les cartes topographiques est imprécis; sa longueur peut être évaluée à 265 km.

A leur jonction (km 335), quelques kilomètres en aval de Linguère l'altitude est de 20 mètres. La vallée décrit ensuite de nombreux méandres tout en gardant une orientation générale NE-SW. Elle traverse successivement les villages de Yang-Yang (km 440) et de Ndiayène (km 466) souvent cités dans les ouvrages des explorateurs du siècle dernier qui remontaient le cours d'eau en pirogue. Quelques kilomètres en aval de Naudi, la vallée du Ferlo s'élargit, emprunte le marigot du Bounoum et aboutit au lac de Guiers à Keur Momar Sarr (km 526). Autrefois le transit des eaux fluviales se faisait à travers le lac puis la rivière Taouey avant de parvenir au fleuve Sénégal à la hauteur de Rd Toll. Le sens des écoulements était tributaire des positions respectives des plans d'eau fluvio-lacustres.

B.- LA VALLEE DU BOUNOUM

Elle constitue la partie terminale du cours inférieur du Ferlo. Elle est limitée, dans le cadre de cette étude, à la zone longue d'environ 50 km comprise entre la digue de fermeture de la partie sud du lac de Guiers et le village de Naudi.

Remarques: Cette limitation n'est pas fortuite; elle tient compte de la configuration topographique et des possibilités actuelles de submersion de la vallée du Ferlo par les eaux du Sénégal via le lac de Guiers. Il est vraisemblable en effet que dans les conditions actuelles de gestion des grands ouvrages et jusqu'à l'échéance de 1995 (mise en service du canal de Cayor), l'ouverture éventuelle de la digue de Mérinaguène ou de Keur Momar Sarr ne provoquera pas d'inondation dans la vallée du Ferlo bien au-delà de Naudi.

La vallée du Bounoum peut-être scindée en trois secteurs:

- le secteur aval, d'orientation générale, NW-SE s'étend de la digue de Keur Momar Sarr jusqu'à Diatmel. Long de 15 km et large de 3 à 4 km, il comporte deux chenaux situés de part et d'autre de la levée sableuse de Dounou Ndial (Fig.2 en annexe). Le chenal principal longe la rive orientale: les altitudes y sont comprises entre - 0,50 m et + 0,50 m IGN. Le chenal secondaire occupe en rive ouest la zone déprimée en contrebas de la dune de Ndamé: l'altitude y varie de 0 à + 1,0 m IGN. Ils rassemblent en une succession de petites mares et de bas-fonds humides les rares pluies de ruissellement d'hivernage.

- la partie centrale, d'orientation générale SW-NE, se prolonge sur 13 km du couloir de Diatmel jusqu'au coude de Guelefoul et de Boslabal. La vallée rétrécit en un chenal unique de moins d'un km de large à Diatmel s'élargit de nouveau à la hauteur de Diobène puis des levées sableuses du Dounou Bouladié et du Dounou Guelefoul. L'absence de documents topographiques ne permet pas de préciser les différentes altitudes. Le fond de la vallée doit se situer approximativement à la cote + 1,0 m IGN.

- le secteur amont marque le début du resserrement de la vallée dont la largeur jusqu'à Naudi ne dépasse pas 200 m. Les levés topographiques font ici aussi défauts. Les altitudes pourront cependant être déduites au cours des différentes phases d'inondation et de retrait des eaux.

C.- LE BAS - FERLO

Il correspond à l'unité aval de la vallée du Bounoum décrite ci-dessus. Dans la perspective du Canal du Cayor cette zone sera submergée et constituera le prolongement naturel de la partie sud du lac de Guiers. Par analogie avec les études antérieures sur le lac de Guiers, la physionomie et les contours du futur plan d'eau ont été établis pour différentes cotes IGN (-0,5 , 0, +0,5, + 1, +1,5 et 2,25 m). Les lignes de rivage à la cote +2,25 m correspondent à la hauteur des digues actuelles dans la partie nord-ouest et sud du lac. Cependant l'éventualité d'un rehaussement de ces ouvrages afin de constituer une réserve d'eau douce plus importante amène à fixer les possibilités maximum de remplissage à la cote + 4,0 m. A une altitude plus élevée, les déversoirs potentiels seraient trop nombreux et leurs aménagements trop coûteux (COGELS et GAC, 1981).

- le point le plus bas de la dépression du Bas-Ferlo se situe à la cote - 0,50 m IGN au sud de la digue de Keur Momar Sarr. A cette cote, le plan d'eau se réduit à une simple mare dont la superficie est de l'ordre de 6 ha (Fig.3).

- à la cote 0 IGN (niveau de la mer), trois plans d'eau distincts apparaissent. Le plus important couvre une dizaine de km² au sud de la route-digue. Les deux autres situées de part et d'autre de la levée sableuse de la partie centrale ont des superficies inférieures au km².

- à la cote + 0,5 m. IGN, le chenal principal d'écoulement est nettement individualisé tout le long de la rive orientale. Le plan d'eau n'y est interrompue que par deux petits îlots de terre ferme. Le chenal secondaire apparaît isolé en rive gauche dans la zone déprimée au nord-est de Ndame, sa longueur est de 4 km et sa largeur de quelques centaines de mètres.

- à la cote + 1,0 m IGN, les deux chenaux sont continus et encerclent l'île de Dounou Ndial. Dans la partie submergée située au sud de la digue il ne subsiste que quelques petites îles de dimension kilométrique disséminées en bordure ouest.

- à la cote + 1,5 m IGN, la majeure partie de la vallée est en eau. L'île centrale considérablement réduite offre l'aspect d'une bande de terre étirée en forme de demi-lune dont la concavité est orientée vers le SW.

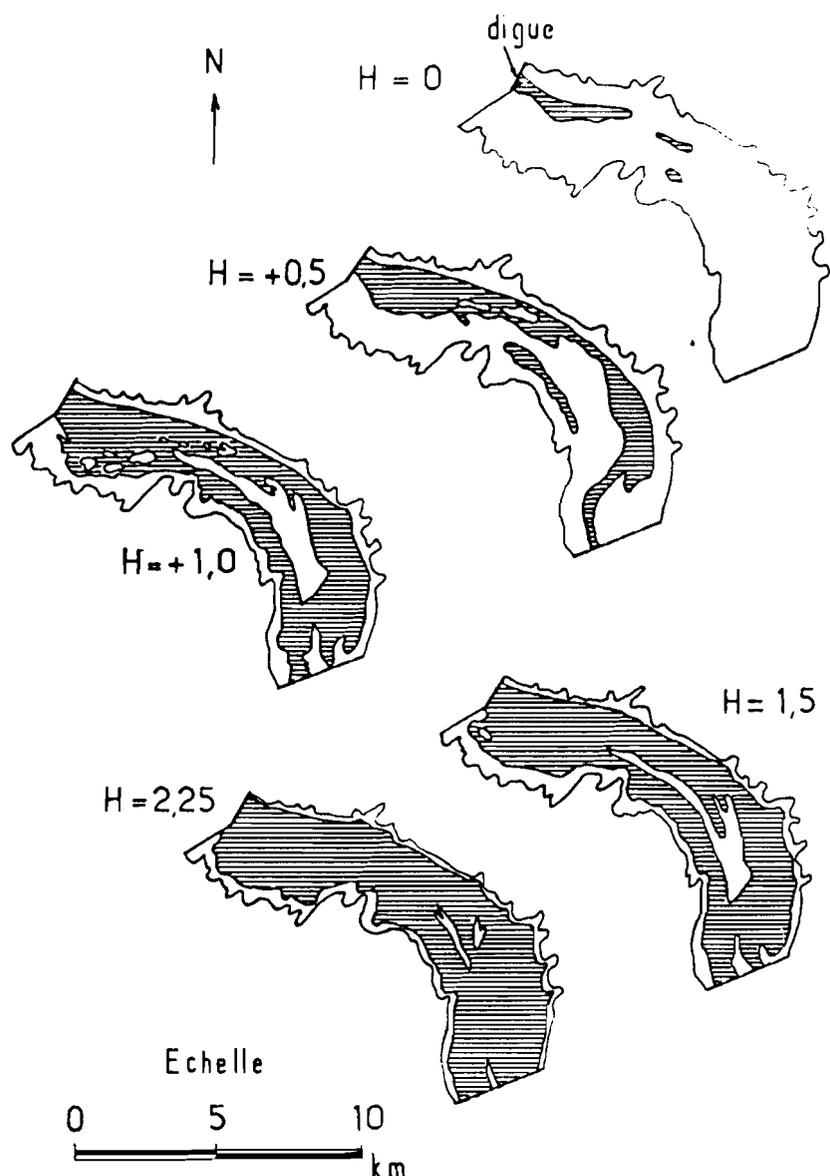


Fig. 3.- Physionomies du Bas-Ferlo à différentes cotes IGN.

Cette disposition particulière n'est pas sans liaison avec la direction dominante du sens des écoulements.

- à la cote + 2,25 m IGN (remplissage maximum avec naturellement l'édification d'une digue à Diatmel), la quasi totalité de la dépression est ennoyée. La levée principale ne laisse émergée que deux petites crêtes sableuses.

- enfin à la cote hypothétique de + 4,0 m IGN, le plan d'eau couvrirait une superficie totale de près de 43 km² ce qui ne représente en définitive qu'une modeste adjonction au 395 km² du lac de Guiers dans une situation analogue.

II.- LE CONTEXTE GEOLOGIQUE

L'histoire géologique de la région du Ferlo est intimement liée à celle de la basse vallée du Sénégal, environnement fluvio-marin développé au quaternaire sur la marge ouest-africaine après avoir été soumis aux transgressions marines du secondaire et du tertiaire.

Le bassin sédimentaire sénégal-mauritanien a pris naissance à la fin du Trias et au-début du Jurassique supérieur (Pliensbachien) entre 200 et 140 millions d'années (Ma), au moment de l'affaissement de la marge continentale qui a conduit à la séparation de l'Afrique et de l'Amérique.

A.- LE SECONDAIRE

Les dépôts les plus anciens sont datés du jurassique et du crétacé supérieur (senonien). La transgression du jurassique a mis en place des roches carbonatées. L'avancée de la mer au Senonien s'est traduit par des dépôts grésos-sableux transgressifs sur les formations précédentes. La zone de transition entre calcaires et grès a été interprétée comme une ancienne ligne de flexure indiquant l'amorce du talus continental.

La fin du Crétacé (vers 65 Ma) correspond à une régression marine généralisée marquée par les dépôts sableux du Maestrichien (Fig.4 a) qui constitue aujourd'hui un excellent aquifère. A cette époque, la venue d'intrusions magmatiques aurait provoqué des déformations jusqu'en surface engendrant des bombements à grand rayon de courbure (GUIEU, 1976). C'est ainsi que se serait mis en place le dôme du lac de Guiers . Le sommet de cette ride anticlinale situé à l'Est du lac de Guiers et de la vallée du Ferlo coïncide avec le toit du Maestrichien .

B.- LE TERTIAIRE

Au Paléocène, se déposent des calcaires (Fig.4 b). Une nouvelle poussée accentue le bombement et affecte les assises paléocène (Fig. 4 c) avant l'épisode Eocène qui est considéré comme le plus transgressif du bassin (MICHEL, 1973).

L'Eocène inférieur reconnu dans les sondages en bordure du lac de Guiers par SAINTON (1957) et TRENOUS (1968) est représenté par les calcaires marneux et argiles de l'Yprésien. A cette époque la ride anticlinale est immergée (Fig.4 d). Au moment de la grande transgression de l'Eocène moyen, le dôme est émergé: les rivages de la mer lutétienne en épousent les contours et les dépôts de marnes à huîtres, grès-quartzites et calcaires se disposent sur sa périphérie (Fig. 5 e) en bordure du bas-Ferlo au sud de Keur Momar Sarr.

A la fin de l'Eocène moyen et jusqu'au Miocène s'est produite une surrection différentielle du bassin: la mer se retire d'Est en Ouest (TESSIER, 1950; SPENGLER et al. 1966; ELOUARD, 1975). La partie occidentale du bassin se soulève tandis que la région centrale s'abaisse conduisant à la formation de la vallée du Ferlo (MICHEL, 1973). Cette régression post-éocène

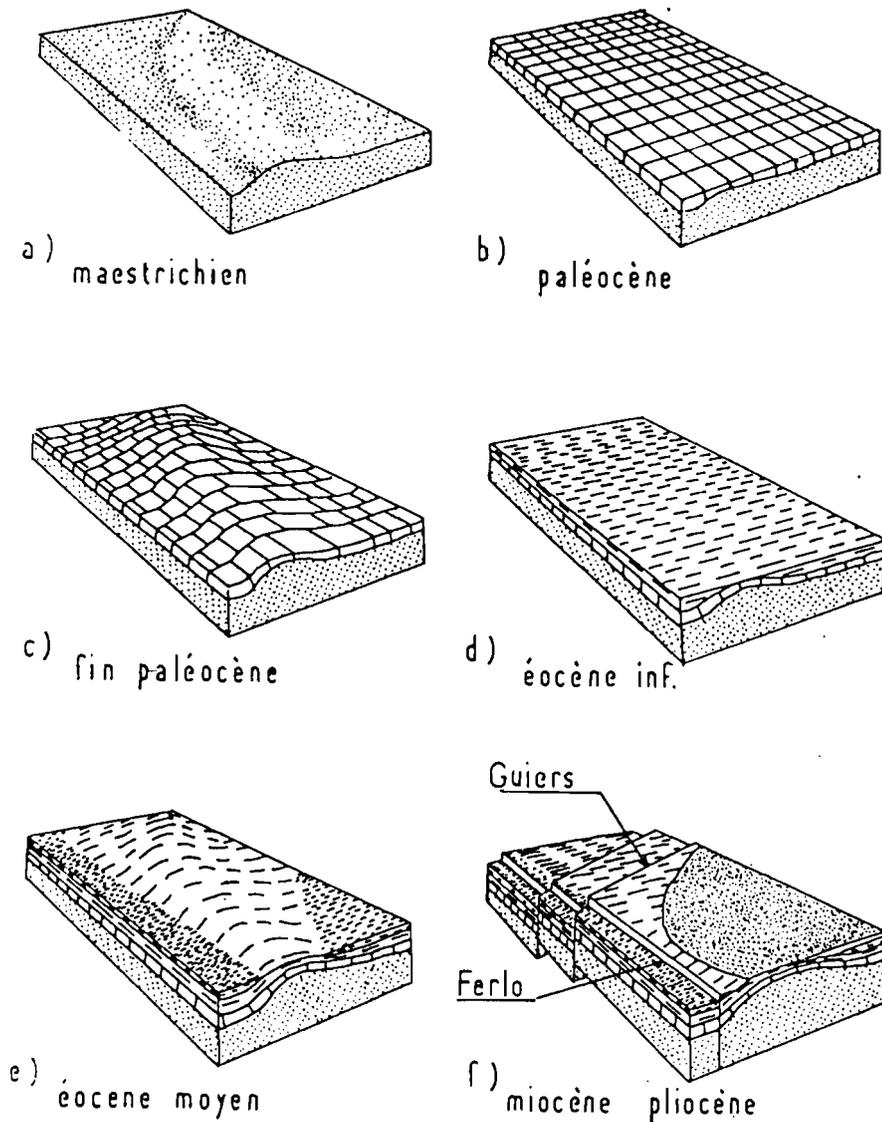


Fig.4.- Evolution de la structure géologique dans les régions du lac de Guiers et du Ferlo (TRENOUS,1970).

ne présente cependant pas un caractère tranché: ainsi le Continental Terminal n'est pas un complexe de dépôts uniquement continentaux mais un amalgame de sédiments marins et continentaux altérés (TESSIER et al., 1975).

De l'Oligocène au Miocène inférieur, les phénomènes d'érosion s'amplifient dans l'arrière-pays. Cette période régressive est associée à une intensification des remontées d'eaux profondes correspondant à un régime de type glaciaire.

Au milieu du Miocène, une pulsation chaude des eaux de surface coïncide avec le plus haut niveau marin atteint depuis la fin de l'Eocène. Connue en basse Casamance, elle correspond aux dépôts d'argiles, de sables glauconieux, de débris coquilliers et d'ooïdes ferrugineux (MONTEILLET, 1988). Le Miocène supérieur est marqué par un optimum climatique humide et chaud avec un niveau marin proche de l'actuel. L'érosion des parties émergées et le transport des matériaux vers les zones basses conduisent à la mise en place des formations gréseuses, argileuses et azoïques du Continental Terminal (Fig. 4 f). Le début d'un modelé en compartiments par le jeu d'un système de failles date de cette époque. Les failles qui ont déterminé les orientations du lac de Guiers et du Ferlo se manifesteront à diverses époques du quaternaire.

Au début du Pliocène, le recul des glaciers polaires engendre un haut niveau marin. Le taux de sédimentation est plus élevée qu'au Miocène sous l'effet d'un climat tropical humide dans les régions sahéliennes. A la fin du Pliocène d'importantes modifications de la circulation atmosphérique à l'échelle du globe provoque une détérioration du climat dont l'instabilité augmente.

C.- Le QUATERNAIRE

L'évolution géologique de la basse vallée du Sénégal marquée, au cours du Quaternaire par de nombreuses péripéties climatiques et glacio-eustatiques a été précisée grâce à de nombreux travaux dont les plus exhaustifs sont ceux d'AUDIBERT (1970), de MICHEL (1973), de MONTEILLET (1986/88) et plus récemment de DIOUF (1989). Les enseignements les plus significatifs au cours du Pléistocène et de l'Holocène concernent l'environnement sédimentaire du delta et de ses annexes lacustres (Rkiz, Ferlo-Guiers).

1. Le Pléistocène

- La plus ancienne transgression marine quaternaire reconnue par HEBRARD (1978) a été datée du Tafaritien (125.000 ans B.P.). Le Tafaritien type décrit par cet auteur comprend de bas en haut: des grès conglomératiques ferruginisés, des grès fins à nodules calcaires passant latéralement à des grès fins argileux comprenant des intercalations de diatomites, des grès à végétaux et des calcaires à microfaune marine. Les récents travaux de GIRESE et al.(sous presse) ont montré que le niveau gréseux fin à faciès argileux interprété comme glauconitique était en fait un sédiment pigmenté par de la montmorillonite calcique et magnésienne. De même, les "intercalations de diatomites" ne sont en réalité qu'un mélange de calcite et de traces de gypse et de thénardite. Il semble que la plus ancienne transgression observée corresponde à l'Aouïjien intercalée entre deux épisodes arides et/ou régressifs, ceux de l'Akcharien et de l'Ogolien I.

- Une période aride (Akcharien) dont le caractère régressif est incertain a pour conséquence ensuite le démantèlement des formations ferrugineuses cuirassées du Quaternaire ancien (Pléistocène) et du Pliocène.

- Les bassins subsidence formés pendant l'Akcharien ont par la suite subit l'incursion de la mer Aouïjienne. Cette mer chaude, peu profonde et

agitée voit se développer une faune abondante et variée d'huîtres, de Balanes et d'oursins (DIOUF, 1989). Au Sénégal, cet épisode ne serait que très localement représenté par des grès calcaires à stratifications entrecroisées.

- L'Ogolien I (appelé également Trarzien par HEBRARD, 1978), correspond à un épisode aride régressif, à une intensification des actions éoliennes et au premières ébauches d'alignements dunaires importants.

- Une nouvelle transgression vers 40.000 ans B.P. (Inchirien) voit le Sénégal édifié les dépôts de la basse terrasse et la lente subsidence du delta..

- Vers 30.000 ans B.P., une phase de creusement intense affecte l'ensemble du bassin versant du fleuve Sénégal. Elle est consécutive à un abaissement du niveau de base et à l'installation progressive d'un climat aride. "Les graviers sous berges" se déposent en contrebas de la basse terrasse. A la fin de cette période, un court stade humide permet l'installation, en bordure de la vallée et des marges du delta de population de l'industrie moustéroïde (BESSAC, 1955).

- De 20.000 à 15.000 ans B.P. (Ogolien II), au cours de la dernière grande régression glacio-eustatique, le climat a évolué vers l'aride. Le niveau marin serait descendu à - 120 m. Les alizés continentaux définissent un vaste erg Ogolien. Les cordons dunaires ont barré le fleuve qui devient endoréique; celui-ci abandonne sa charge solide en amont pour constituer dans sa vallée le premier remblais sablo-argileux.

2. L'Holocène

Il correspond au Quaternaire récent et a été subdivisé en trois épisodes climatiques, Tchadien, Nouakchottien et Tafolien.

- De 11.000 à 7.000 ans B.P. (Tchadien), la fonte des glaces aux hautes latitudes a entraîné un relèvement du niveau marin vers - 50 m. Le climat devenu plus humide a favorisé la reprise de la ferruginisation des sols et de l'écoulement dans le réseau hydrographique. Le fleuve a réaménagé son cours à travers les cordons sableux. Pendant une courte phase sèche, le fleuve édifie le second remblais.

- De 7.000 à 4.000 ans B.P. (Nouakchottien), la mer envahit le delta et son niveau se situe à 2,5 m au-dessus du zéro actuel. Le golfe constitué crée une vaste ria qui ennoie les dépressions annexes du Rkiz, du lac de Guiers et du Ferlo. Le sable de l'erg ogolien a été remanié et étalé en une terrasse dont les dépôts situés à une altitude variant de + 1 à + 2 m sont caractérisés par une faune marine de mollusques. Un lambeau de cette terrasse affleure en bordure de la vallée du Bounoum au sud de KeurMomar Sarr.

- De 4.000 à 1.880 ans B.P. (Tafolien), une importante dérive littorale régularise la cote et édifie une succession de cordons sableux. Le golfe se transforme en une série de lagunes qui ne communiquent avec l'océan que par des passes instables. L'alluvionnement fluvial se substitue peu à peu à la sédimentation à caractère lagunaire et le Sénégal bâtit de puissantes

levées et érige un delta digité en forme de patte d'oie à la hauteur de Richard-Toll.

- Au début de l'ère chrétienne, les cordons littoraux continuent de s'épaissir provoquant le comblement progressif du golfe et la désorganisation de l'écoulement du fleuve dans son delta. Les embouchures septentrionales se ferment et le cours du fleuve se déplace vers le sud-ouest. La formation de La langue de Barbarie, étroite flèche sableuse littorale instable et fragile située entre l'océan Atlantique et l'embouchure du fleuve date de cette époque (JOIRE, 1947; TRICART, 1961, GAC et al. 1982). L'évolution géologique et géomorphologies au cours du Quaternaire a laissé un héritage important dans le delta. Elle est à l'origine du modelé actuel et du façonnement des grands cordons dunaires: dunes rouges de l'Ogolien, dunes jaunes du Tafolien, dunes littorales subactuelles et actuelles. Les extrémités amont du delta du Sénégal et en particulier les dépressions annexes comme la vallée du Ferlo ont surtout été intéressées au cours d'un passé récent par les transgressions de l'Holocène. Cette vallée fluviatile antérieurement active et aujourd'hui fossile est creusée dans un plateau d'environ trente mètres d'altitude. Le fond de ce talweg, du moins dans son bief aval, est à une altitude voisine du zéro I.G.N..

Le soubassement constitué par les calcaires éocènes est surmonté d'alluvions d'une épaisseur de 7 à 8 mètres. MONTEILLET (1988) à partir de datations au radiocarbone sur des amas coquilliers et sur la matière organique d'interlits argileux a pu montrer que les vitesses de sédimentation ont été de l'ordre de 0,77 m/ millénaire pour la période comprise entre 3.340 ans B.P. et 1.545 ans B.P. et d'environ 0,30 à 0,37 m/millénaire au cours des phases ultimes de dépôt. La sédimentation a donc été assez active entre 3.340 et 1.545 ans B.P. malgré la persistance d'étiages prolongés comme en témoignent les interlits argileux. Le régime de crues périodiques et d'écoulements turbulents étaient caractérisés par une migration latérale rapide et fréquente de chenaux multiples. Le fléchissement ensuite du rythme des dépôts correspond à la baisse sensible des débits du Ferlo entraînant en corollaire une invasion marine saisonnière de sa basse vallée.

Vers 1800 ans B.P., une nouvelle chute des écoulements de l'amont, associée peut-être à un changement des lignes de rivage dans le delta provoque une invasion saline durable dans le bief aval du Ferlo via la dépression du lac de Guiers jusqu'à 1.545 ans B.P.. Puis l'influence marine s'est atténuée et ce déclin a été suivi à la période subactuelle par un épisode lacustre qui précédait lui-même le tarissement complet observé aujourd'hui des apports d'eaux douces de l'amont.

Il faut ensuite remonter à la période historique et au récit des voyageurs pour resituer les périodes, éphémères à l'échelle géologique, de submersion de la vallée du Ferlo par de l'eau douce ou de l'eau de mer.

III.- ESQUISSE GEOMORPHOLOGIQUE

Le croquis géomorphologies de la basse vallée du Ferlo a été ébauché par SOW (1979) puis dressé par DIOP (1984) dans son étude sur le delta sous-lacustre du lac de Guiers et sur l'importance des matériaux déposés au

cours des épisodes fonctionnels de l'Holocène.

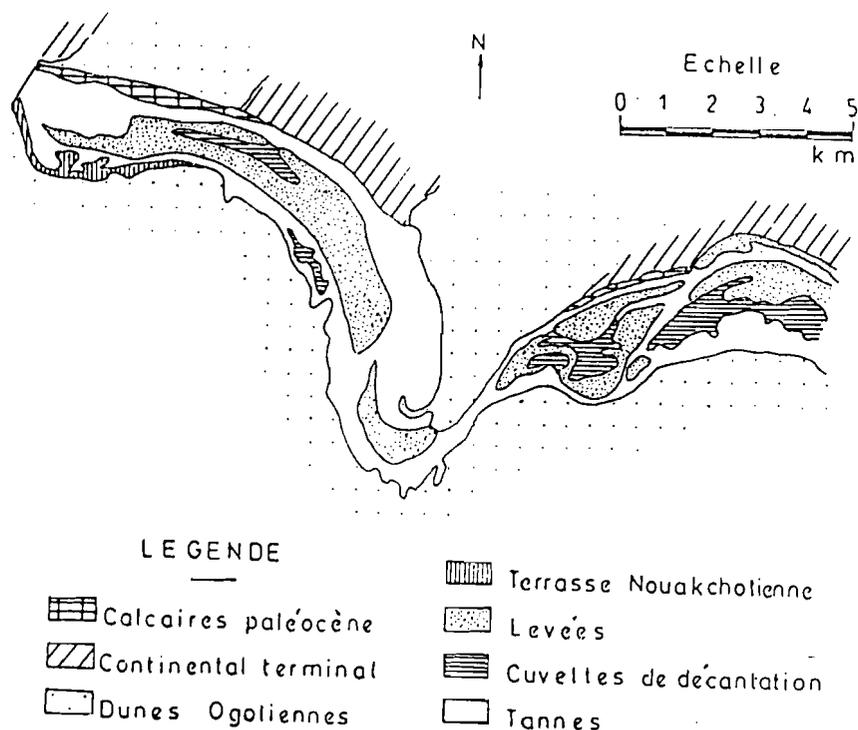


Fig. 5.- Croquis géomorphologique du Bas - Ferlo

L'ossature du relief est constituée par les grès du Continental Terminal. Cette assise discontinue et transgressive sur les formations calcaires du Paléocène a été recouverte par les sables ogoliens remarquables par leur teinte vive, rouge orange ou saumon. Ces sables rouges dessinent un véritable champ de dunes de direction générale NE-SO et donnent au paysage son aspect vallonné.

Selon TRICART (1961), le climat au début de la phase aride qui présida au dépôt des sables de couverture était très contrasté avec des précipitations sous formes d'averses violentes: elles déterminèrent les écoulements du Ferlo qui creusa la vallée du Bounoum et le sillon du lac de Guiers. Par la suite une succession ininterrompue de phases arides et sèches marquées chronologiquement par les événements suivants: rubéfaction des dunes ogoliennes, entaille du barrage dunaire par le Ferlo, remaniement des dunes rouges, mise en place de bourrelets éoliens, édification d'une terrasse marine et du delta par le Ferlo, arrêt des écoulements et développement d'un milieu lacustre, aménagement sur le pourtour du lac de Guiers, recrudescence des actions éoliennes, ont donné au paysage son modelé actuel (Fig.5) de dunes, de terrasses, de levées, de cuvettes de décantation et de tannes.

Cette évolution paléogéographique et l' environnement géomorphologique ont joué un rôle déterminant dans le développement des différents types de sols.

IV.- LA NATURE DES SOLS

L'étude pédologique de reconnaissance du Bas-Ferlo a été réalisée en novembre 1980 par le GERSAR (Groupement d'Etudes et de Réalisations des Sociétés d'Aménagement Régional) à la demande de Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta du Sénégal (SAED).

La surface cartographiée se situe au sud de la digue de Mérinaguène ou de Keur Momar Sarr. Elle s'étend sur environ 30 kilomètres, couvre une superficie de l'ordre de 72 km² et correspond sensiblement à la zone du Bas-Ferlo submergée par les eaux du lac entre septembre et novembre 1988.

La classification adoptée fait référence aux travaux d' AUBERT (1965). Les sols de la vallée du Bas-Ferlo se répartissent en quatre classes principales (Fig.6):

- les sols minéraux bruts,
- les sols peu évolués,
- les sols halomorphes,
- et les sols hydromorphes.

A.- LES SOLS MINÉRAUX BRUTS (Fig. 6a)

Ils occupent les hauteurs du paysage sur les grands cordons dunaires des bordures de la vallée, de la partie centrale et amont du lit du chenal. C'est la zone à acacias et balanites avec un tapis herbacée très dispersé sur les rares surfaces planes.

Ces sols minéraux bruts non climatique (profil type: n°1), d'apport éolien sur matériau sableux dunaire présentent des profils simples du type A(C). L'horizon A est peu développé (0 à 20 cm), de couleur brun (10 YR 5/3) sableux et non structuré. L'horizon sous-jacent est gris (10 YR 5/1), sablo-argileux et à structure polyédrique arrondie. Le taux de matière organique est extrêmement faible.

B.- LES SOLS PEU ÉVOLUÉS (Fig. 6b)

Dans la topographie, ils se situent en contrebas des précédents sur le flanc ouest de la dépression et dans sa partie amont. On y différencie:

- les sols peu évolués modaux sur matériau d'épandage sableux "homogène" (profil n°2),
- les sols peu évolués modaux sur matériau sableux polyphasé (profil n°3),
- les sols peu évolués hydromorphes sur matériau polyphasé (profil n°4).

1. Les sols peu évolués modaux sur matériau d'épandage sableux

Ils se sont généralement développés aux abords des parties basses de la vallée. La topographie y est assez irrégulière. La végétation est analogue à celle que l'on trouve sur les sols minéraux bruts avec quelques peuplements de tamarix. Le profil est de type A.C.

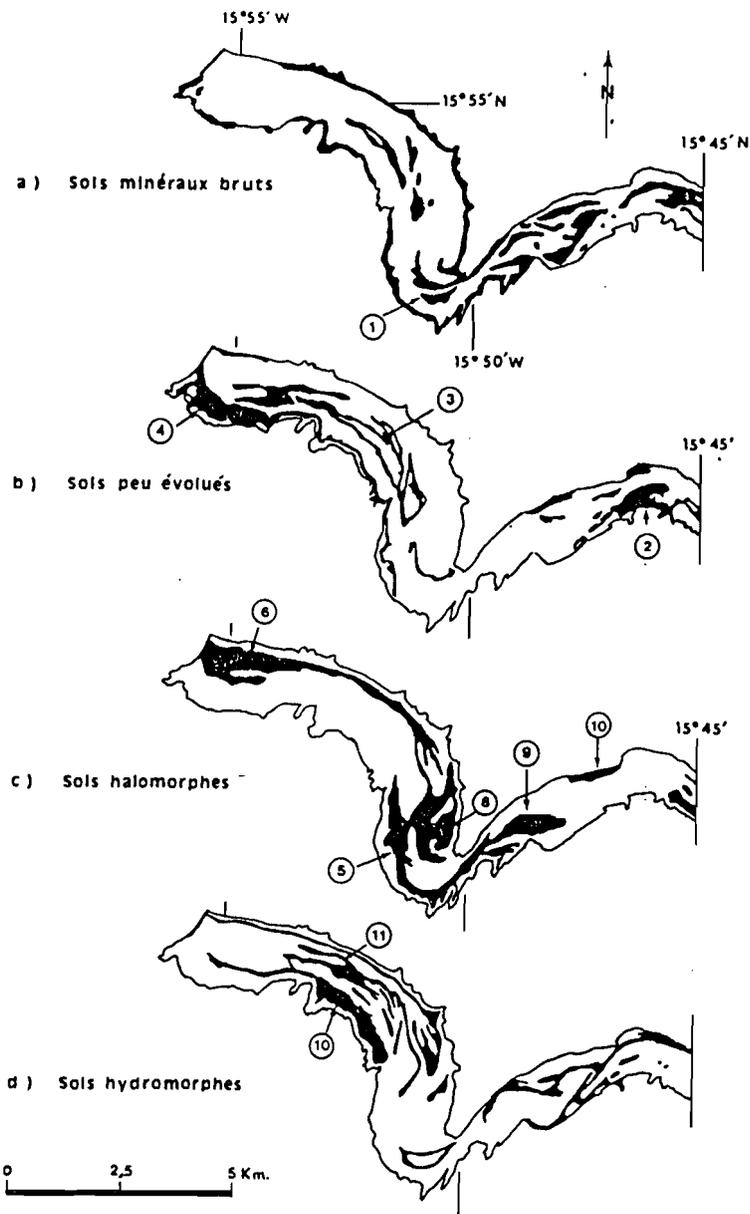


Fig. 6.- Esquisse pédologique du Bas - Ferlo (GERSAR, 1984)

L'horizon superficiel est gris clair (10 YR 5/2), très légèrement humifère et à texture sablo-limoneuse. L'horizon sous-jacent est beige (7,5 YR 8/2) avec des tâches jaunâtres et oranges. La texture sableuse grossière leur confère une forte perméabilité et une structure fragile bouillante.

2. Les sols peu évolués modaux sur matériau sableux polyphasé

Ils se situent principalement sur des levées sableuses. Le profil est également du type A.C.

L'horizon de surface est de faible épaisseur (35 cm), gris (10 YR 5/1), limono-sableux, à structure polyédrique fine et à faible taux de matière organique (0,5 %). Il surmonte un horizon C épais constitué d'une succession de niveaux sableux lessivés et de lits d'accumulation d'argiles (et/ou) de fer correspondant à une superposition de dépôts différents présentant de nombreuses tâches rouilles et jaunes. Les mesures sur l'extrait de sol 1/10 indiquent des pH basiques dans les horizons supérieurs et très acides (pH = 3,8) à la base du profil en relation avec la présence de sulfures. La salinité exprimée par la conductivité sur l'extrait 1/10 est élevée dans tout le profil avec une valeur minimum de 1,7 mS.

3. Les sols peu évolués hydromorphes sur matériau polyphasé

Ils sont localisés dans la partie aval de la vallée au sud de la digue de Keur Momar Sarr. A l'exception de quelques plages de végétation herbacée et de très rares peuplements de tamarix isolés, les sols sont nus.

Les sols sont des profils de type A.C. L'horizon supérieur est noir (2,5 YR 2,5/0), sablo-argileux, à structure polyédrique subangulaire fine avec un taux significatif de matière organique (1,3 %). L'horizon sous-jacent est gris-brun (10 YR 7/2), sableux à sablo-argileux et à structure fragile. Le pH est basique sur la totalité du profil et les salinités élevées (de 1,4 à 2,4 mS). La présence de mini-horizons coquilliers vers 20 cm de profondeur témoigne d'un ancien niveau lacustre.

C.- LES SOLS HALOMORPHES (Fig. 6c)

Ce sont les sols dominants dans la vallée du Bas- Ferlo où ils sont localisés sur la bordure orientale dans la partie aval et dans le chenal principal au droit du coude de Lambaye. Ils correspondent à des sols dont l'évolution est dominée, soit par la richesse en sels solubles, soit par l'importance du sodium échangeable dans le complexe absorbant (susceptible d'engendrer une structure massive, diffuse et d'une compacité très élevée).

Ils se dissocient en deux familles:

- les sols salins à horizon superficiel friable sur matériau fin, ou sur matériau filtrant à faible profondeur (profil n°6),

- les sols salins acidifiés différenciés en trois unités principales : sur matériau fin (profil n°7), sur matériau sableux grossier (profil n°8) ou "enterré" sous matériau d'épandage sableux (profil n°9).

1. Les sols salins à horizon superficiel friable sur matériau fin

Ils se rencontrent dans le lit mineur du chenal principal. La topographie d'ensemble est plane avec une microondulation de type gilgai. Le sol est en majeure partie nu avec quelques rares acacias et une faible couverture herbacée. La nappe est profonde, au delà de 2 mètres.

Le profil comporte généralement trois ou quatre horizons dont les couleurs varient du gris (10 YR 4/1) en surface à gris brun (2,5 Y 5/2) dans les horizons intermédiaires et au gris bleuté (2,5 Y 3/0) en profondeur. La texture est fine sur l'ensemble du profil (limono-argileuse) avec

quelques rares passées sableuses. La structure est prismatique en surface et massive à débits polyédriques dans les horizons inférieurs. Un réseau de fentes centimétriques de dessiccation jalonnent tout le profil lui conférant une allure verticale. Le taux de matière organique est de 1,2 à 1,3 % et le pH basique. La salinité est élevée (de 2,0 à 8,0 mS) avec un chimisme caractéristique chloruré-sulfaté et le sodium comme cation dominant. Les dépôts coquilliers abondants en surface soulignent l'origine marine ou fluviatile du matériau. Certains profils sont incrustés de cristaux de gypse.

2. Les sols salins à horizon superficiel friable sur matériau filtrant situé à faible profondeur

Ils se sont développés dans les parties basses des chenaux exclusivement dans la zone déprimée au sud de la digue de Keur Momar Sarr. Ils portent toute l'année une nappe salée fluctuant entre 1,0 m et 1,5 m. La végétation est essentiellement herbacée (paspalum, vetivera, chien-dent, et de rares *Sevusium*) avec quelques tamarix.

Le profil type comporte de quatre à cinq horizons argileux à argilo-limoneux. La couleur passe du gris sombre (10 YR 4/2) en surface à gris brun (10 YR 3/2) et gris bleu (2,5 Y 3/0) en profondeur; la présence de tâches jaune ocre est liée à celle de racines. La structure est prismatique en surface et polyédrique dans les horizons sous-jacents. La richesse en matière organique est remarquable (de 3 à 8 %). Le pH neutre en surface est légèrement basique en profondeur. La salinité est plus élevée dans les horizons superficiels (4,5 mS). Des poches de coquilles parsement le profil.

3. Les sols salins acidifiés

Ces sols se situent dans le lit majeur du chenal principal de part et d'autre du coude de Lambaye en position topographique relativement élevée. Le sol est fréquemment jonché d'arbustes morts (tamarix ou acacias); la végétation qui subsiste est constituée d'Acacias *Adansoni*, de tamarix et quelques touffes de graminées et de *sesuvium*. On y distingue trois familles dont les caractéristiques principales restent similaires.

Les teintes dans les profils passent du gris (10 YR 4/1) en surface au gris brun (10 YR 3/3) en profondeur. Les tâches sont de couleur brun rouge (7,5 YR 3/2) , le plus souvent jaune ocre (7,5 YR 5/6) dues à la présence de jarosite, sulfate de fer et de potassium $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$, minéral fréquemment rencontré dans les profils de mangrove. La texture d'ensemble argilo-limoneuse est localement fibreuse (tourbe) en profondeur . La structure est polyédrique en surface, massive à débits polyédriques dans les horizons sous-jacents. Le taux de matière organique est très élevée (1 à 3 % dans les horizons supérieurs, 11 à 12 % dans les niveaux fibreux et localement jusqu'à 34 % dans les horizons à caractère tourbeux. Le pH est nettement acide (< 4) à partir de 30 cm. La salinité est toujours supérieure à 6 mS et peut atteindre 20 mS à la base des profils.

D.- LES SOLS HYDROMORPHES (Fig. 6d)

Ils sont caractérisés par un taux de matière organique inférieur à 10 % dans les horizons supérieurs. Ils ont été différenciés en deux groupes:

- les sols hydromorphes à gley, salés, sur matériau alluvionnaire (profil n° 10),

- et les sols hydromorphes à pseudo-gley, non salés, à tâches et concrétions sur matériau sableux (profil n° 11).

1. Les sols hydromorphes à gley, salés

Ils occupent principalement les zones basses des chenaux secondaires de la vallée submergées autrefois par la crue annuelle du fleuve Sénégal. La végétation est constituée essentiellement de chiendent, de paspalum et de vetivera.

Le profil type comporte de quatre à cinq horizons au-dessus d'une nappe située vers 1,5 m. La couleur dominante est le gris (10 YR 5/1) en surface, le gris brun (10 YR 6/2) en dessous et le gris foncé (7,5 YR 4/2) en profondeur. L'abondance des racines détermine un réseau de tâches disséminées dans le profil à partir de 25 cm. La texture d'ensemble est limono-argileuse à argileuse avec quelques passées sableuses. La structure polyédrique domine dans le profil. Le taux de matière organique est plus important en surface (1,2 %) qu'en profondeur (0,3 %). Le pH est basique dans les premiers 45 cm; il devient acide (de 5,7 à 3,6) ensuite. La salinité du sol augmente graduellement vers la base du profil (de 0,9 mS à 3,0 mS).

2. Les sols hydromorphes à pseudo-gley, non salés, à tâches et concrétions, sur matériau sableux

Ils se distribuent le long du lit majeur de la vallée. La topographie y est généralement plane sans microrelief apparent. La submersion y était annuelle mais de courte durée. La surface de ces sols est poudreuse avec une végétation de tamarix.

Le profil comporte trois ou quatre horizons dont les couleurs varient du gris sombre (10 YR 4/1) au gris clair (10 YR 7/2). Les tâches noires de matière organique sont très étendues dans les niveaux supérieurs et des tâches ocre-jaune (10 YR 6/8) parsement la base du profil. La texture est limono-argileuse puis sableuse à la base. La structure est polyédrique fine en surface et massive en profondeur. La matière organique abondante au sommet du profil (1,5 %) disparaît dans les horizons inférieurs. Le pH est basique et la salinité faible en surface (0,1 mS) s'élève en profondeur (de 1,5 mS à 2,8 mS).

Cette esquisse pédologique réalisée en 1980 par le GERSAR dans son étude de réhabilitation, de factibilité et d'avant-projets détaillés de périmètres d'irrigation sur la rive gauche du fleuve Sénégal montre la diversité des sols de la basse vallée du Ferlo.

De la digue de Keur Momar Sarr jusqu'à 15° 45' de longitude Ouest soit sur environ 30 km, l'aire cartographiée d'environ 72 km² se subdivise en sols minéraux bruts (28,6 %), en sols peu évolués (22,5 %), en sols halomorphes (30,5 %) et en sols hydromorphes (23,4 %). L'ouverture de la digue de Keur Momar Sarr entre le 20/ 09 et le 25/10/1988 a essentiellement submergée les sols halomorphes et hydromorphes.

V.- LE CLIMAT

Dans cette partie consacrée au climat, nous nous contenterons pour l'instant de brosser à grands traits la circulation des masses d'air de l'atmosphère en domaine tropical et de situer l'importance et la variabilité des précipitations sur l'ensemble du bassin du Ferlo. Une étude plus précise sera entreprise par la suite sur les principaux paramètres climatiques tels que la température, l'insolation, l'humidité et la tension de vapeur d'eau, la vitesse et la direction des vents ou encore l'évaporation et l'évapotranspiration.

A.- LES MECANISMES GENERAUX

La vallée du Ferlo située dans la partie centrale du Sénégal est comprise dans la zone du climat tropical de l'hémisphère boréal. La circulation atmosphérique y est régie par une double ceinture de hautes pressions: celles des Açores et de Lybie au nord de l'équateur et de Saint Hélène au sud.

Les différentes situations météorologiques, pendant l'année sont assujetties aux flux d'alizés et de moussons engendrés dans les deux hémisphères qui convergent vers la zone de basses pressions relatives du talweg intertropical. L'accumulation d'importantes quantités de vapeur d'eau dans ce talweg donne naissance à de puissants mouvements convectifs générateurs de masses nuageuses et de précipitations. Cette zone d'interférence constitue la ZITC (zone intertropicale de convergence) dont la trace au sol est l'équateur météorologique. La position de la ZITC subit des migrations en latitude en fonction du déplacement des anticyclones subtropicaux. Elles expliquent les profonds contrastes saisonniers et spatiaux des climats en Afrique de l'Ouest caractérisés par deux saisons: une saison d'hiver (de novembre à mars) et une saison d'été (d'avril à octobre).

1. La saison d'hiver

En saison d'hiver, la région est sous l'influence des hautes pressions septentrionales dont la situation et la puissance relatives engendrent une variété de temps déterminé par le type d'alizé dominant: alizé maritime, alizé maritime continentalisé, alizé continental de Nord-Est et l'alizé d'Est ou Harmattan. Le récent ouvrage de LE BORGNE (1988) sur la pluviométrie au Sénégal et en Gambie fournit des schémas instructifs sur les variantes climatiques les plus fréquentes.

- L'alizé maritime est spécifique aux zones littorales. De direction Nord-Ouest (Fig.7a),il est frais et humide après le survol de régions maritimes. Il provoque rosées et brouillards, exceptionnellement la formation de pluies.

- L'alizé maritime continentalisé est plus fréquent (Fig.7b). De direction Nord à Nord-Est, il est plus sec, plus chaud et souvent porteur de brumes sèches.

Fig. 7 a

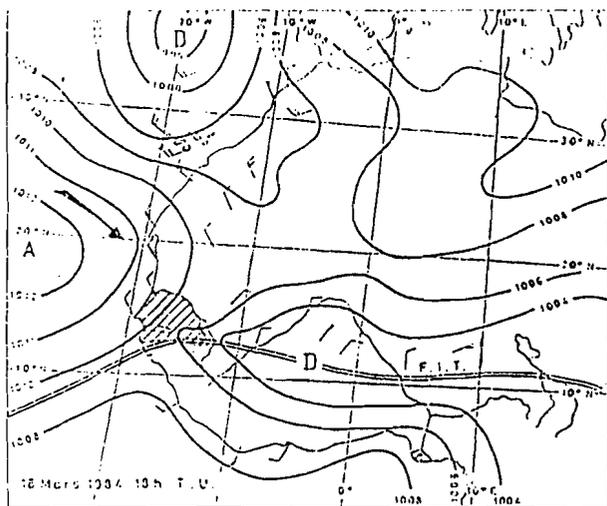


Fig. 7 b

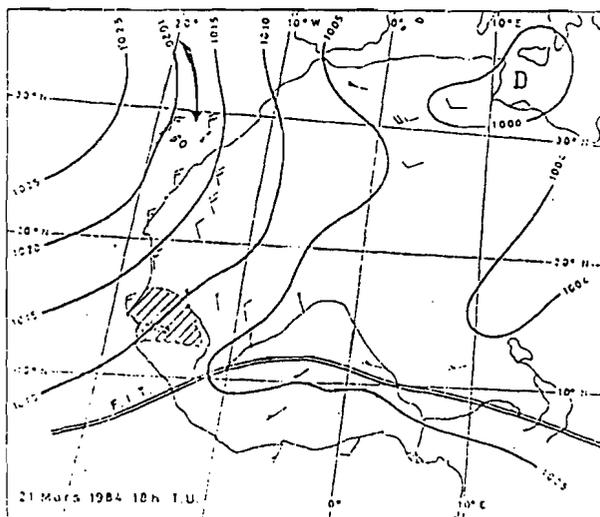


Fig. 7 a - Situation d'alizé maritime

Fig. 7 b - Situation d'alizé maritime continentalisé

Fig. 7 c - Alizé de Nord - Est

Fig. 7 d - Situation d'Harmattan

Fig. 7 c

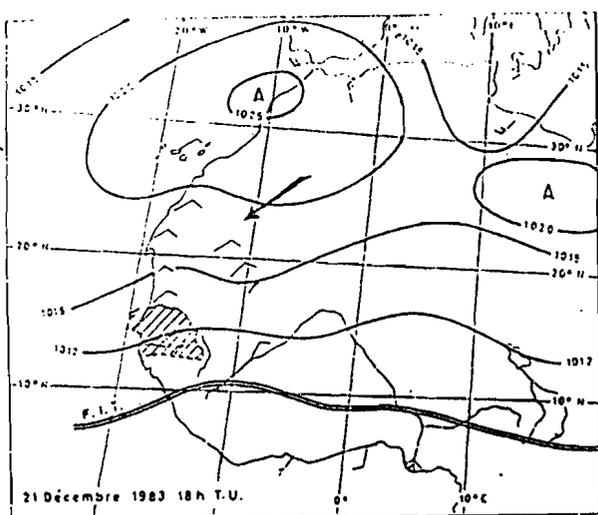
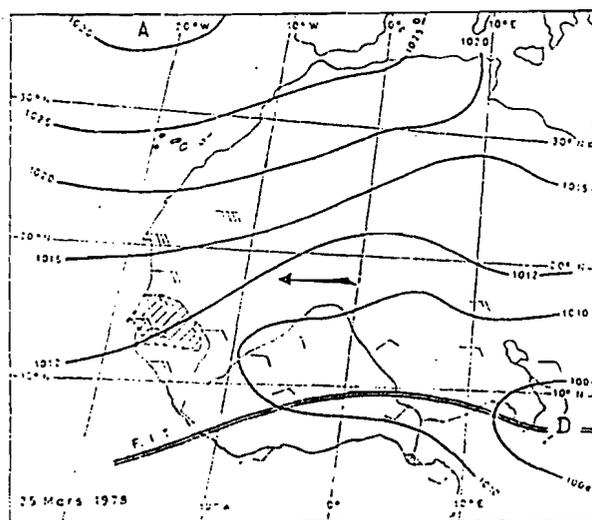
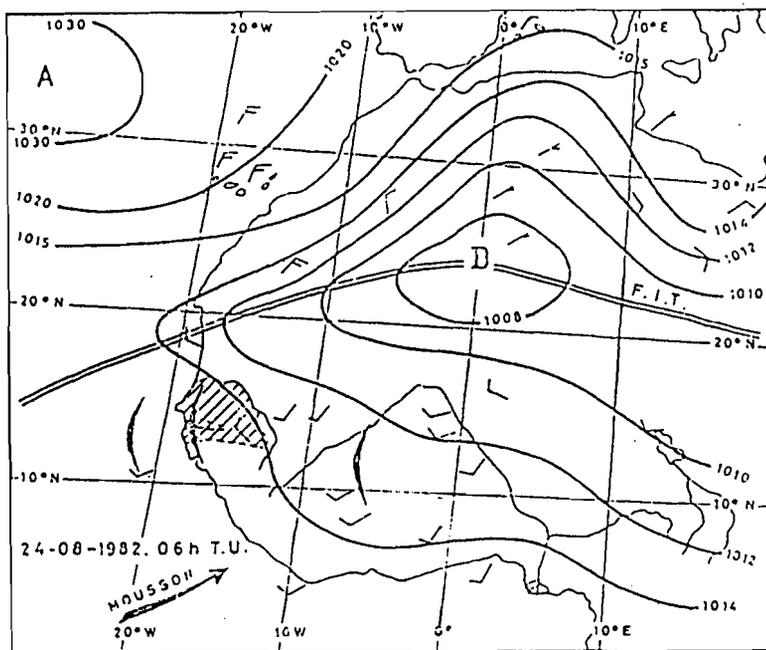


Fig. 7 d





(Ligne de grains

Fig. 7 e - Situation d'hivernage

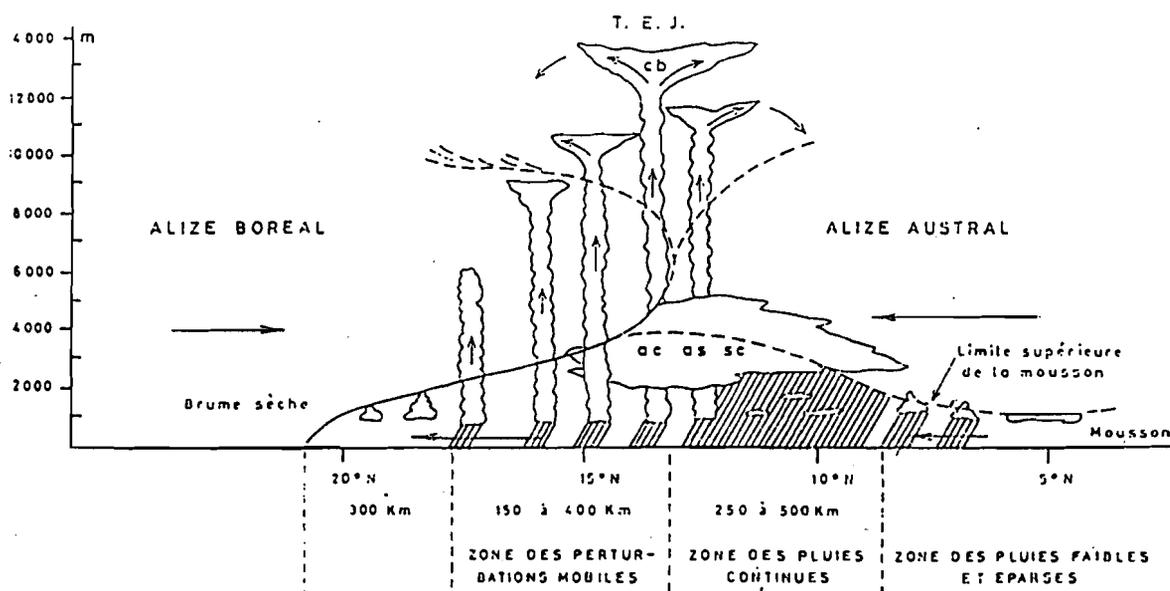


Fig. 8 - L'équateur météorologique et ses zones pluvieuses

- L'alizé continental de Nord-Est est associé à une dorsale de hautes pressions centrée au large du Maroc (Fig.7c). D'origine polaire, il apporte une certaine fraîcheur malgré son long parcours terrestre où il peut se charger de lithométéores.

- L' Harmattan découle d'une interpénétration des cellules de Lybie et des Açores (Fig.7d). L'alizé est alors très chaud et très sec par suite de son trajet continental. Le ciel est clair et l'amplitude diurne importante. Quand il est fort, il s'accompagne de brumes sèches dont les aires d'alimentation peuvent être très lointaines.

- Le temps de Heug est tout à fait particulier. Il correspond uniquement à la pluie (pluie qui lave les mangues) de contre-saison en saison sèche . Il résulte de l'infiltration et de la propagation de masses froides d'air polaire entre les zones de hautes pressions boréales. La fréquence de ces passages nuageux est en moyenne de 3 par saison; leur contribution aux pluies annuelles reste très modeste (quelques %). Dans la série pluviométrique (1933 à 1988) de la station de Linguère choisie pour sa situation au coeur de la vallée du Ferlo, les manifestations de Heug ont cependant provoqué à plusieurs reprises des précipitations de novembre à février supérieures à 30 mm.

2. La saison d'été

En saison d'été, communément appelée "hivernage" d'avril à octobre, le régime de moussons plus uniforme succède progressivement aux temps contrastés des alizés (Fig. 7e). Issu du renforcement de l'anticyclone des régions australes et de la dépression thermique saharienne, ce vent est chaud, humide, instable et porteur de pluies. La progression vers le Nord du FIT (Front Intertropical) ne se fait pas parallèlement à l'équateur géographique mais obliquement selon un axe général d'orientation SW-NE.

Sur le continent l'interférence entre l'air sec et chaud et la mousson océanique chargée d'humidité, se fait, non plus sur un plan vertical mais sur un plan incliné, les flux d'harmattan surmontant les flux de mousson. La discontinuité de vent est alors décalée au sol par rapport à la zone de convergence d'altitude, le flux de mousson s'enfonce en coin sous l'air subsident (Fig.8). Dans les couches moyennes de la troposphère, l'axe des basses pressions se trouve à environ 400 à 500 kilomètres plus au sud dans une zone de forte nébulosité. Plusieurs bandes zonales sont à distinguer:

- au nord de la trace au sol du FIT, règne la sécheresse et le domaine de l'harmattan,

- au sud, dans celui de la mousson une première zone de 250 à 300 kilomètres de large connaît un temps lourd, chaud et humide. L'épaisseur de la mousson, inférieure à 1500 mètres, y est trop faible pour donner naissance à d'importantes formations nuageuses et à des précipitations,

- plus au sud, sur une étendue de 150 à 400 km, l'épaisseur de la mousson (de 3 à 4000 m.) permet le développement d'orages isolés ou de perturbations mobiles appelées "lignes de grains",

- à cette région d'averses et d'orages, succède, la zone des pluies continues large de 250 à 500 km. La mousson se développe sur 4 à 5000 mètres et donne naissance à des amas nuageux qui engendrent des pluies abondantes non orageuses,

- enfin dans la partie terminale, les vents d'altitude issus de l'anticyclone des Açores en écrasant et en cisillant la mousson s'opposent à la formation de nuages, ce qui se traduit par de faibles pluies et de bruines.

Ce n'est qu'en juin et juillet que l'ensemble de la vallée du Ferlo est baignée par la mousson. Son retrait à partir des mois de septembre et d'octobre est d'autant plus rapide que sa progression vers le nord aura été lente. L'importance des précipitations reste donc fonction de l'épaisseur de la mousson et de sa plus ou moins grande pénétration sur le continent. Il en découle:

- que le Nord est moins arrosé que le sud,

- qu'au mois d'août, le sud des régions côtières par suite de la remontée des pluies continues est plus arrosé que l'intérieur,

- que les précipitations sont très variables d'une année sur l'autre.

B. EVALUATION DES PRECIPITATIONS DANS LA VALLEE DU FERLO

Le choix pour cette estimation, s'est finalement porté sur la station de Linguère en raison de sa position centrale dans le bassin versant du Ferlo. Les valeurs moyennes qui figurent dans les tableaux I et II ont été calculées à partir de fichiers pluviométriques non homogénéisés. Il ne peut donc en aucun cas de séries chronologiques de référence.

Pour la période d'observations de 55 ans qui s'étend de 1934 à 1988, les précipitations moyennes annuelles sur le Ferlo sont de 463 mm. L'irrégularité du régime pluviométrique transparaît dans la comparaison des valeurs extrêmes de 1983 (190,7 mm) et de 1936 (853,6 mm), soit un rapport de 1 à 4,5.

A l'échelle mensuelle, on retrouve le schéma classique de l'alternance en zone tropicale de deux saisons bien tranchées: une saison humide, de juin à octobre, qui rassemble 98% des pluies annuelles et une saison sèche, de novembre à mai, interrompue par les quelques rares manifestations du Heug. Le mois d'août est en règle générale le mois le plus pluvieux.

Le classement par années sèches et humides,

Années sèches (par ordre croissant):

1983,1941,1972,1973,1978,1970,1968,1971,1974,1956.

Années humides (par ordre décroissant):

1936,1937,1969,1951,1953,1952,1960,1958,1957,1950.

Tableau I - Précipitations (en mm) - Station de Linguère

ANNEE	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLE	AOUT	SEPTEM	OCTOBR	NOVEMB	DECEMB	TOTAL
1934	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.6	102.6	129.7	102.7	8.5	0.0	0.0	367.1
1935	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.7	73.4	275.1	62.2	45.0	0.0	0.0	478.4
1936	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	44.1	156.5	395.3	242.5	3.2	0.0	0.0	853.6
1937	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.5	198.3	256.0	89.1	122.6	0.0	0.0	680.5
1938	0.0	1.0	43.8	0.0	0.0	23.5	94.3	178.9	143.8	84.9	0.0	0.0	570.2
1939	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	56.0	86.8	253.4	113.5	22.1	0.0	0.0	532.3
1940	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.4	81.0	266.2	130.3	20.9	0.0	0.0	517.8
1941	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	54.5	46.9	100.1	0.4	0.0	0.0	204.7
1942	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	66.6	293.0	73.3	0.7	2.6	0.0	437.2
1943	0.0	0.5	0.0	0.1	3.1	51.8	55.3	258.9	75.3	53.6	0.0	30.9	529.2
1944	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	73.2	153.3	144.3	75.6	5.0	1.5	452.9
1945	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	114.3	267.6	119.3	25.3	0.0	0.0	526.5
1946	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	8.4	118.4	173.1	91.2	43.4	0.0	0.0	434.5
1947	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	4.7	45.4	343.3	122.5	27.5	32.1	0.0	575.5
1948	0.0	5.2	0.0	0.0	0.0	104.2	73.2	139.2	103.3	35.2	0.0	0.0	460.3
1949	0.0	0.0	0.0	0.0	23.4	21.4	107.9	212.0	58.4	49.0	0.0	4.5	476.6
1950	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	2.1	98.1	220.2	206.7	45.5	0.0	0.0	575.9
1951	0.0	0.0	0.0	0.0	31.5	17.8	74.4	170.8	154.2	195.5	33.3	0.0	677.5
1952	0.0	0.0	0.0	1.1	1.0	24.7	164.4	117.6	278.9	31.7	0.0	0.0	519.4
1953	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	67.7	156.8	167.4	148.6	128.7	0.0	0.0	669.2
1954	1.4	34.5	0.0	0.0	4.7	14.9	78.4	249.9	111.1	1.1	10.4	0.0	506.4
1955	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0	90.5	151.4	205.3	119.9	6.3	0.0	0.0	586.4
1956	1.1	0.0	0.0	0.0	5.1	7.5	81.8	48.3	166.6	6.1	0.0	16.0	333.2
1957	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	73.9	26.1	259.1	126.3	94.3	3.9	16.0	585.1
1958	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	57.1	73.5	291.2	66.8	107.2	0.0	1.1	595.8
1959	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	91.7	128.2	102.9	208.9	5.4	0.0	0.0	538.0
1960	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	183.5	148.5	271.9	5.2	0.0	0.0	611.9
1961	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	52.4	151.3	143.3	162.6	13.9	0.0	0.0	523.5
1962	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.6	53.0	190.6	40.4	48.5	0.2	0.0	341.3
1963	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	186.0	119.8	94.5	96.5	70.8	0.0	0.0	399.6
1964	1.6	0.0	0.0	4.6	0.8	15.9	153.2	209.8	92.9	3.8	0.0	0.0	482.6
1965	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	45.5	69.3	152.8	146.5	11.9	0.3	0.0	426.3
1966	0.0	16.3	0.0	0.0	0.0	68.0	10.3	77.9	134.8	212.9	0.0	14.5	518.4
1967	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	160.1	122.1	201.5	68.6	0.4	0.0	556.0
1968	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	9.6	72.8	61.5	112.4	21.6	4.5	2.6	301.7
1969	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	5.5	113.1	293.6	146.2	117.8	0.0	0.0	679.0
1970	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	88.7	106.3	74.0	8.2	2.1	0.0	297.1
1971	0.0	0.0	0.3	0.0	0.6	1.4	82.7	120.6	103.0	19.2	0.5	0.0	328.3
1972	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	46.0	54.9	72.9	45.4	19.0	0.0	0.0	245.4
1973	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	49.6	120.5	85.3	0.0	0.0	0.0	255.4
1974	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	44.5	169.9	80.0	30.0	0.0	0.0	330.6
1975	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	17.5	256.1	129.8	72.5	1.1	0.0	0.0	477.3
1976	2.3	4.1	0.2	2.0	0.0	6.6	77.6	133.5	94.2	51.7	1.0	5.2	378.4
1977	0.0	0.0	0.0	5.6	0.0	8.9	54.8	191.6	78.5	0.0	0.0	0.6	340.0

Tableau I - Précipitations (en mm) - Station de Linguère - (suite)

ANNEE	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLE	AOUT	SEPTEN	OCTOBR	NOVEMB	DECEMB	TOTAL
1978	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.9	69.7	41.6	98.5	29.6	18.8	0.2	267.3
1979	15.7	0.0	0.0	0.0	2.2	44.0	63.9	181.7	68.0	15.0	0.0	3.2	393.7
1980	0.0	6.8	0.0	0.0	0.0	12.5	83.1	169.0	80.2	9.1	0.0	0.2	380.9
1981	0.2	0.5	0.0	0.0	2.2	11.7	118.8	151.1	52.2	40.3	0.0	0.0	377.0
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	38.7	120.4	168.4	66.7	91.3	0.0	0.0	486.0
1983	0.0	3.5	0.0	0.0	12.2	16.3	23.9	47.8	86.8	0.1	0.0	0.1	190.7
1984	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	153.8	101.2	39.7	85.2	0.1	0.0	0.0	380.0
1985	0.7	0.0	0.5	0.0	0.0	17.7	103.3	129.3	95.2	18.9	0.1	17.6	383.3
1986	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	51.2	157.6	121.3	5.7	----	----	336.9
1987	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	13.8	169.1	126.4	192.2	57.5	0.0	0.0	559.1
1988	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	31.9	5.5	265.9	148.7	0.0	0.0	0.0	452.3
MOY.	0.6	1.3	0.8	0.2	2.2	27.8	95.3	172.6	118.1	40.2	2.1	1.8	463.0

Tableau II - Précipitations moyennes mensuelles et annuelles (en mm) à Linguère au cours de différentes périodes.

Période	1934-1988 (55 ans)	1934-1960 (27 ans)	1961-1988 (28 ans)	1936 (maximum)	1983 (minimum)
Mois					
Janvier	0,6	0,2	1,0	0,0	0,0
Février	1,3	1,5	1,1	0,0	3,5
Mars	0,8	1,6	tr	0,0	0,0
Avril	0,2	tr	0,4	0,0	0,0
Mai	2,2	3,7	0,8	12,0	12,2
Juin	27,8	31,4	24,3	44,1	16,3
Juillet	95,3	100,7	90,1	156,5	23,9
Août	172,6	207,5	138,9	395,3	47,8
Septembre	118,1	134,6	102,2	242,2	86,8
Octobre	40,2	46,1	34,5	3,2	0,1
Novembre	2,1	3,2	1,0	0,0	0,0
Décembre	1,8	2,0	1,6	0,0	0,1
Année	463,0	532,5	395,9	853,6	190,7

permet de formuler les remarques suivantes:

- sur les 10 années les plus déficitaires, 8 appartiennent aux deux dernières décennies.

- en revanche, le renversement de tendance envisagé par FAURE et GAC (1981); GAC et FAURE (1987) semble se réaliser avec l'amélioration de la pluviosité depuis 1985.

- parmi les années excédentaires se trouvent regroupées essentiellement les années 30 et 50.

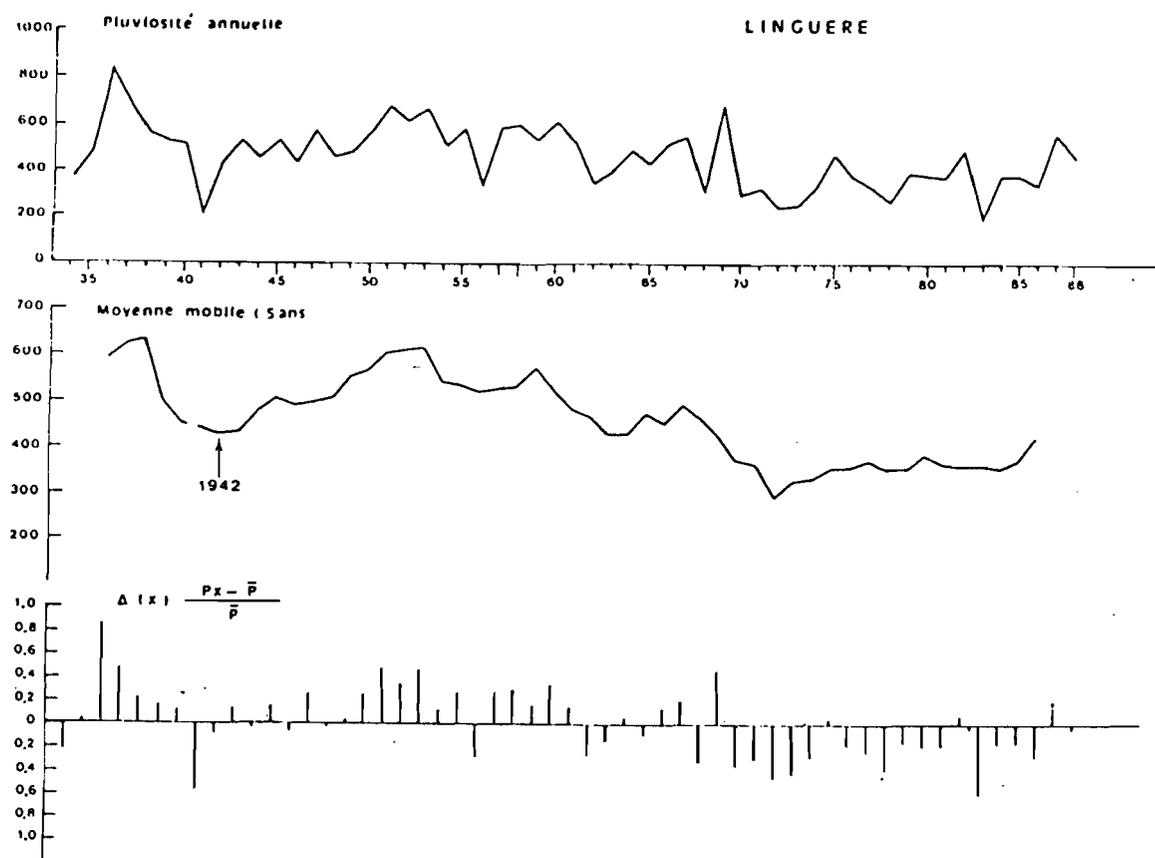


Fig. 9 - Evolution de la pluviosité moyenne (mm) à Linguère de 1934 à 1988, de la moyenne mobile sur 5 ans et de l'écart standard.

La figure 9 synthétise ces résultats en mettant en évidence:

- une séquence humide avant 1940
- une séquence sèche centrée sur l'année 1942
- une séquence humide de 1945 à 1969
- une séquence sèche de 1969 à 1984 avec les déficits records des années 72-73 et 82-83-84
- le renouveau peu sensible, malgré tout, depuis 1985.

CHAPITRE II

HISTORIQUE ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE LA VALLEE DU FERLO

Avant 1956, l'alimentation en eau douce de la vallée du Ferlo était sous la double dépendance des précipitations de la saison des pluies sur son bassin versant et, de l'importance de la crue du Sénégal. Episodiquement, en période d'étiage fluvial, la position en contrebas de l'océan d'une partie de la vallée offrait une troisième possibilité: l'invasion du lit mineur par de l'eau de mer.

Cette dernière situation, fréquente au cours de l'Holocène, a été mise en évidence par MONTEILLET (1988): "A partir de 3500 ans B.P., la baisse du débit du Ferlo provoque d'abord une invasion marine saisonnière de sa basse vallée. Vers 1800 ans B.P., un nouveau fléchissement du débit associé à une modification de la ligne de rivage dans le delta du fleuve, a provoqué une remontée saline durable du bief aval de la vallée du Ferlo. Celle-ci a été suivie ensuite par un épisode lacustre. La période actuelle se caractérise par le tarissement des eaux douces de l'amont." L'ultime remontée des eaux océaniques date des années centrées sur 1913. Depuis lors, l'existence de digues et de barrages a préservé le lac de Guiers et le Ferlo des importantes intrusions marines qu'a connu le cours inférieur du Sénégal dans les années 40 et depuis deux décennies.

Depuis 1956, la crue du fleuve n'inonde plus ⁽¹⁾ la vallée du Bounoum ou Bas-Ferlo par suite de la construction de l'ouvrage de Keur Momar Sarr au sud du lac de Guiers. Les anciens chenaux de la vallée ne sont plus jalonnés que par des mares temporaires qui s'évanouissent, en début de saison sèche, sous les effets conjugués de l'évaporation, de l'infiltration et de l'abreuvement des nombreux troupeaux. Ces mares temporaires de dimensions réduites (quelques centaines de m²) et de faibles profondeurs (de 20 à 50 cm) sont sans aucune mesure avec l'inondation qui, de septembre à octobre 1988, a submergé la vallée du Ferlo sur plus de 50 kilomètres.

La reconstitution chronologique du fonctionnement hydrologique de la vallée du Ferlo est d'une extrême complexité. En système ouvert, lorsque les masses d'eaux et de sels circulaient librement sur l'ensemble du bassin versant du Sénégal, des chroniques très élémentaires peuvent être établies à partir de documents historiques. En système fermé, de manière saisonnière depuis 1916 puis permanente depuis 1956, l'évolution du plan d'eau dans le Ferlo a été assujettie aux aménagements successifs du dispositif fluvio-lacustre. Chaque changement a introduit des conditions nouvelles et le jeu de nouveaux paramètres dont il est parfois difficile, à posteriori, de discerner l'influence exacte sur les positions respectives des différents plans d'eau.

(1) Cette affirmation de MICHEL (1973) est peu vraisemblable. Il est probable que la remise en eau du Ferlo eût lieu, au moins pendant quelques années, après la construction de la digue.

A cet égard cette étude se propose, entr'autre, d'être aussi exhaustive que possible sur les grandes étapes qui ont marqué l'histoire hydrologique de l'ensemble du dispositif fleuve Sénégal/lac de Guiers/vallée du Ferlo. La compréhension des événements géochimiques ne peut qu'en être facilitée.

I.- LES CARTES HISTORIQUES DE LA VALLEE DU FERLO

Les documents ont été répertoriés par BECKER et al.(1988). L'analyse particulièrement pertinente de ces historiens, souvent reprise ici "in extenso", démontre l'intérêt incontestable que représentent, même avec des insuffisances notoires, les cartes géographiques anciennes pour la connaissance d'une région.

De 1600 à nos jours, il existe près de 500 documents géographiques où figure la vallée du Sénégal. Ces cartes peuvent être consultées dans différents services d'archives français et notamment aux Archives de la Marine, aux Archives de France (avec l'ancien fond de la Marine, section d'outre-mer), à la Bibliothèque Nationale et au Muséum d'Histoire Naturelle de Paris. Aux Archives Nationales du Sénégal, il existe de nombreuses cartes de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle réalisées lors de la conquête militaire (BECKER et al. 1988).

Les 9 documents retenus entre 1628 et 1870 permettent de suivre les progrès successifs dans la connaissance géographique de la région du lac de Guiers et de la vallée du Ferlo. Il ne s'agit cependant que de simples reproductions d'une partie des originaux et, souvent de qualité moyenne.

A. LE XVII^{ème} SIECLE

1628 Carte de la rivière du Senega dessinée pour le compte de la Compagnie néerlandaise des Indes Occidentales par J. BASTIAENSZ sans doute vers 1628. Elle figure dans les Atlas Vingboons du XVII^{ème} siècle (Fig. 10).

Les toponymes au nombre de 110 déterminés par THILMANS (1975) n'apportent aucune indication précise sur le lac de Guiers et sur la vallée du Ferlo. Pour mémoire, les numéros accolés au lac de Guiers correspondent aux indications suivantes: 36- Fea Jook, 37- Groot Marebouw (grand marabout), 38- Cleyne Marebouw (petit marabout), 39- Alkeyte Dorp (village de l'Alcaïde), 40- Git (jais).

Le tracé du Bas-Sénégal est remarquablement précis pour un document de cette époque. En revanche, la partie amont est décalée de 90 ° par rapport au cours réel. Cette orientation vers le Nord au lieu d'un parcours vers l'Est est étonnante de la part d'un navigateur !. Il est plus vraisemblable que la confusion résulte plutôt d'une erreur d'assemblage au

Nous adressons nos remerciements à C. BECKER, chercheur au C.N.R.S., pour avoir eût l'extrême courtoisie de mettre à notre disposition l'ensemble de ses archives cartographiques.

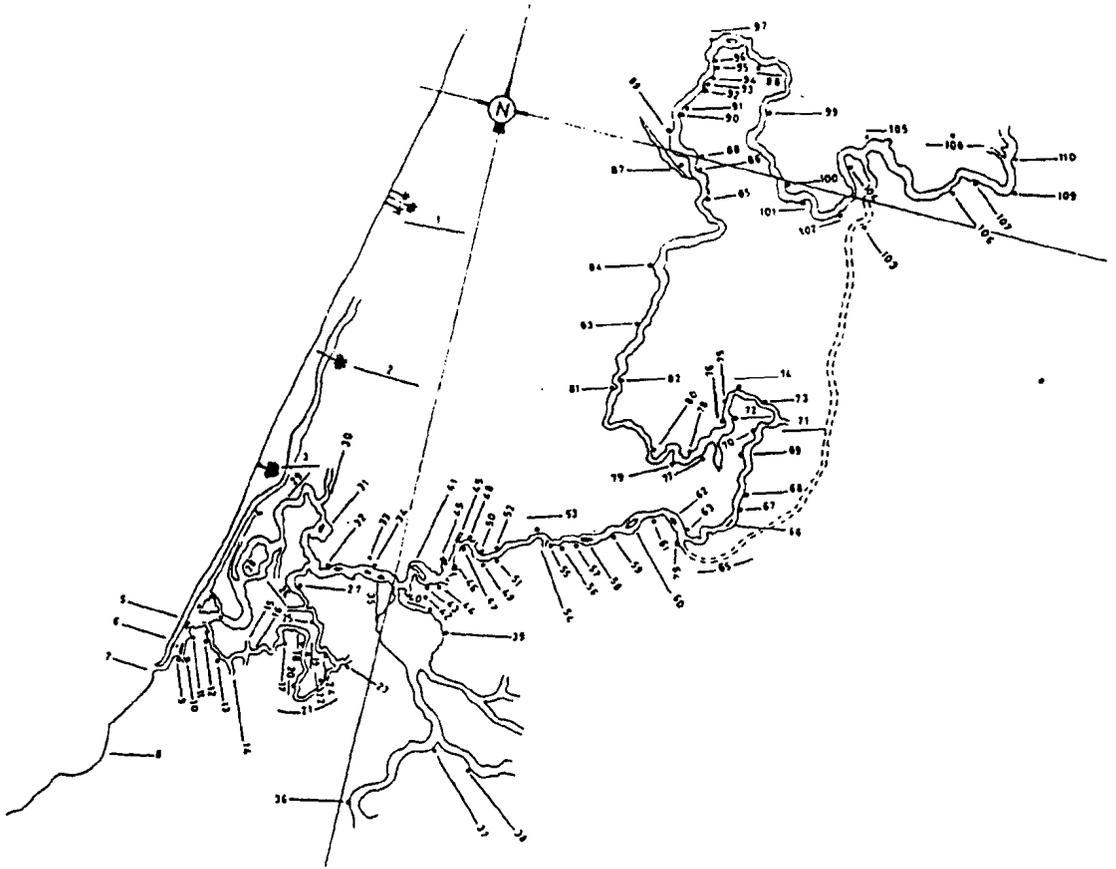
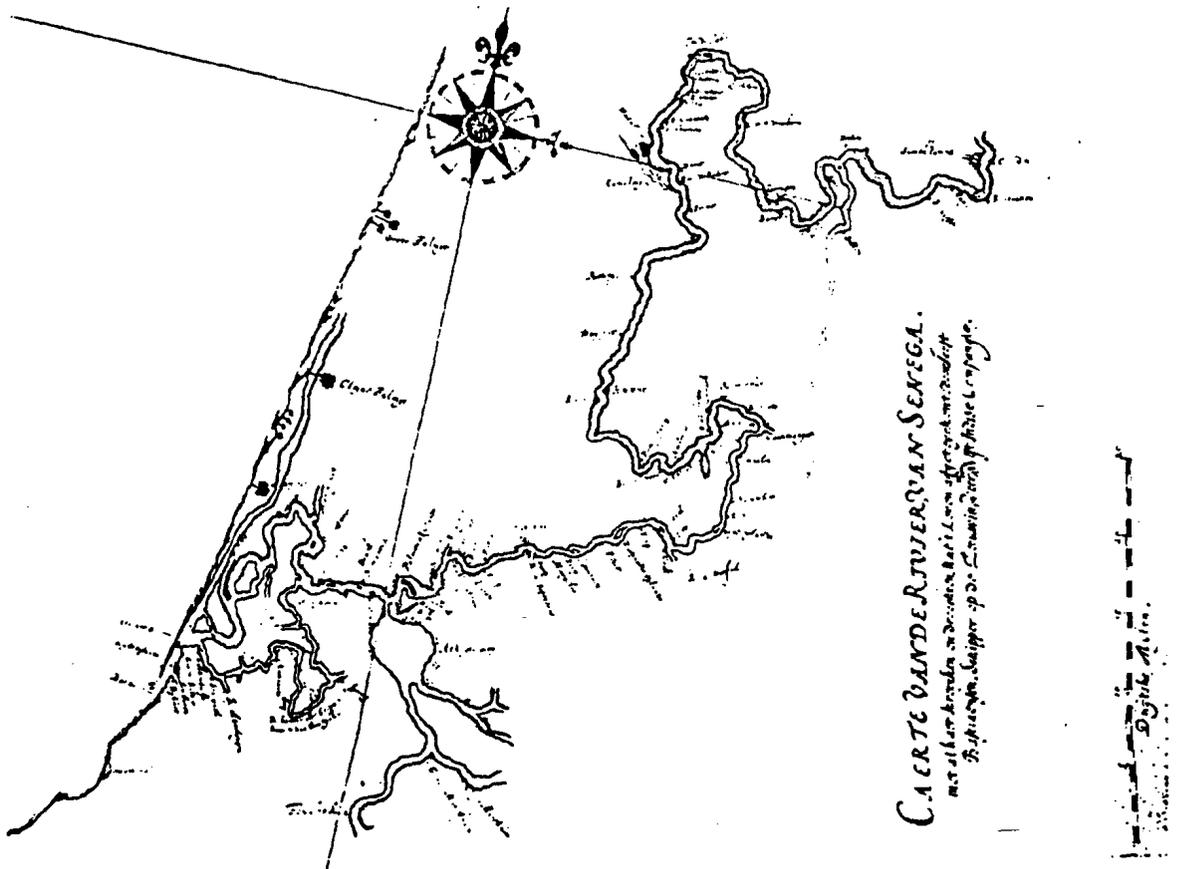


Fig. 10 - Carte de la rivière Senega - (J. BASTIAENSZ, 1628)



rapport au lac de Guiers. Ce dernier se prolonge au sud par une petite rivière non identifiée qui situe la vallée du Bounoum, terminaison aval du Ferlo.

A signaler, le tracé en pointillé du marigot des Maringouins qui indique la possibilité d'une liaison intermittente du Sénégal avec l'océan Atlantique au nord de l'embouchure principale.

1725 Carte des pays voisins des rivières de Sanaga et de Gambia qui date du début du XVIII^{ème} siècle (1725 ?), (Fig. 12).

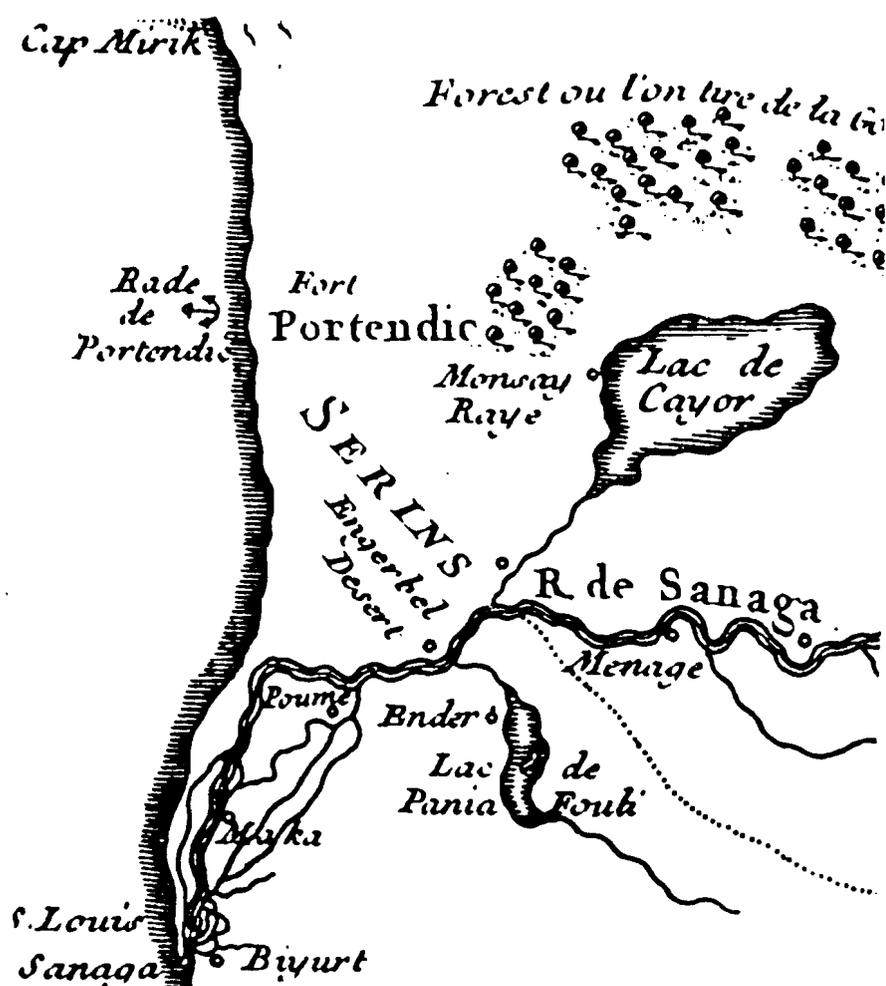


Fig. 12.- Carte des pays voisins des rivières de sanaga et de Gambia (1725)

Le lac de Guiers, qui porte le nom de Pania Foubi est bien dessiné et comporte une île centrale nettement éloignée des deux rives. On sait que cette île, l'actuelles île Ghélan, redevient une presqu'île (liaison qui s'établit avec la rive ouest) quand le plan d'eau du lac s'abaisse sous la cote + 1,00 m IGN (COGELS et GAC (1981/1982).

Cette situation suggère qu'à cette époque, les crues du Sénégal étaient fortes. Ceci semble confirmer par le tracé de la vallée du Ferlo au sud du lac, les nombreux bras indiqués dans le delta du Sénégal, l'extension considérable du lac de Cayor et l'existence de "forest" où l'on tire de la gomme au nord du lac de Rkiz. Dans l'ensemble, les orientations principales des lacs et des cours d'eaux sont exactes.

A noter, la localité d'Engerbel (Diourbel) en rive droite du fleuve à la hauteur de la ville actuelle de Rosso. L'appellation Biyurt en bordure de l'océan signifie simplement localité de l'embouchure.

1750 *Carte particulière du Senega depuis le désert en remontant jusqu'à l'isle du Morfil (Fig. 13).*

Cette carte a été réalisée par D'ANVILLE (1697-1782) pour illustrer l'ouvrage de LABAT (1728). Elle fait partie de toute une série de cartes détaillées qui constituent une véritable synthèse des connaissances cartographiques sur la Sénégambie au milieu du XVIII^{ème} siècle.

Le lac de Guiers (lac de Panier Foule) communique avec le Sénégal par la rivière portugaise. L'île centrale Guelaray est bien positionnée à proximité de la rive Ouest.

Certains noms de localités sont très peu différents des appellations actuelles: Themoy (Temeye Salane), Sadines (sanninthe), Fosse (Foss), Ender (Nder) demeure du roi, Malles (Mal). Nieye sur la bordure occidentale a une consonance phonétique qui n'est pas sans rappeler le village de N'Gnith.

La position du village de Gouyougue et la configuration donnée au lac dans sa partie méridionale laisse supposer un Ferlo large et abondamment inondé.

C.- LE XIX^{ème} SIECLE

1802 *Carte de la Cote Occidentale d'Afrique . Depuis le Cap Barbas (littoral nord de la Mauritanie) jusqu'au Cap Tagrin (Sierra Leone), (Fig.14).*

Cette carte a été dressée en 1802 (an X) par LAPIE, Ingénieur géographe attaché au dépôt général de la Guerre, d'après les Mémoires de LA JAILLE, ancien officier de la Marine chargé par le gouvernement français de visiter en 1784 et 1785 cette partie de la côte africaine.

L'échelle de la carte originale est au 1/2.000.000. Selon BECKER et al. (1988) cette carte s'inspire des travaux antérieurs de D'ANVILLE et de DELISLE.

Le lac de Guiers dénommé ici Panié Foul se prolonge dans sa partie méridionale au delà des localités de Gouyougue et de Maca jusqu'au montagnes de Mahel.

Une particularité à signaler: l'indication de trois lacs en rive droite du fleuve Sénégal (lac de Cayor, lac de Chamchi et le lac de Dimeur). Au

sud du lac de Cayor, on remarque un petit lac dont la présence confirme l'actualité de l'annotation de l'auteur à droite du Cayor " ce lac se remplit des eaux du fleuve au temps de l'inondation".

Les toponymes habituels se retrouvent autour du lac: Dombo, Temoi, Saline, Decar, Nairé et Ender.

1853 *Carte des peuples du Sénégal, dressée par D. BOILAT, prêtre missionnaire apostolique, pour servir à l'intelligence de leur histoire* (Fig.15).

Bien qu'elle soit de qualité médiocre, cette carte est intéressante à plusieurs titres:

- les principaux Royaumes y figurent et sont délimités avec une grande précision,

- le lac de Cayor où le Rkiz est de dimension réduite,

- dans l'encadré sur les " Environs de Saint Louis du Sénégal", le marigot des Maringouins semble fonctionnel en rive droite du fleuve,

- le lac de Guiers porte pour la dernière fois le nom de Panier Foule et son extension vers le sud est limitée au fort de Mérinaghène qui vient d'être construit pour la surveillance du Royaume du Walo. La vallée du Ferlo est bien dessinée.

La flèche sableuse littorale, la langue de Barbarie, porte trois sémaphores et sa longueur de près de 25 Km témoigne du déplacement de l'embouchure du fleuve vers le Sud.

1856 *Carte du Sénégal de Podor à Saint Louis avec les itinéraires des colonnes expéditionnaires du Sénégal au cours des années 1855 et 1856 commandées par le colonel FAIDHERBE* (Fig. 16).

Cette carte dressée par le sergent Gabbardy à l'échelle approximative du 1/ 600 000 est d'une lecture malaisée par suite d'une inscription désordonnée des annotations.

Le grand lac aux teintes foncées en rive droite est alimenté par un effluent du Sénégal qui se faufile depuis la hauteur de la localité de Gaé entre de multiples massifs dunaires. Dans sa partie centrale sont indiqués lac de Cayar, de Khomak et de Rouiz (appellation proche du Rkiz actuel).

Le lac de Ghier ou Guier prend son nom "moderne". L'île de la partie centrale est individualisée à très faibles distances de la rive Ouest (cote probable: + 1,00 m IGN).

La vallée du Bounoum est en eau comme le prouve la présence étonnamment indiquée (point noir à l'extrémité sud du lac) d'un bateau à vapeur le GUET NDAR en décembre 1854.

Le cours de la Taoué, cordon ombilical entre le fleuve et le lac, est

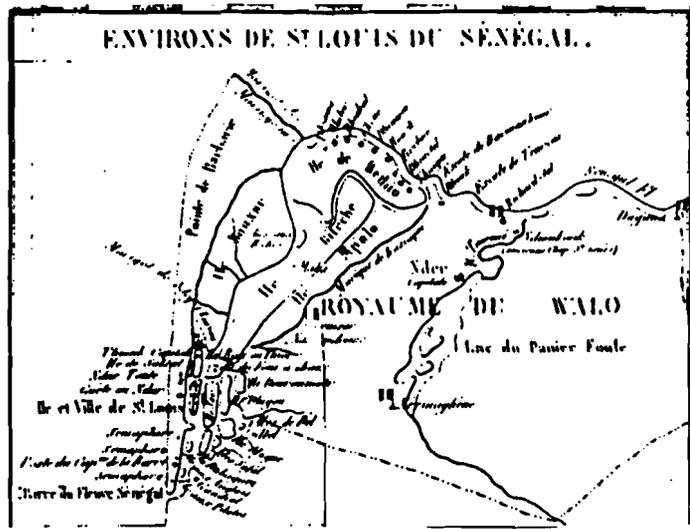


Fig. 15 - Carte des peuples du Sénégal (BOILAT, 1853)

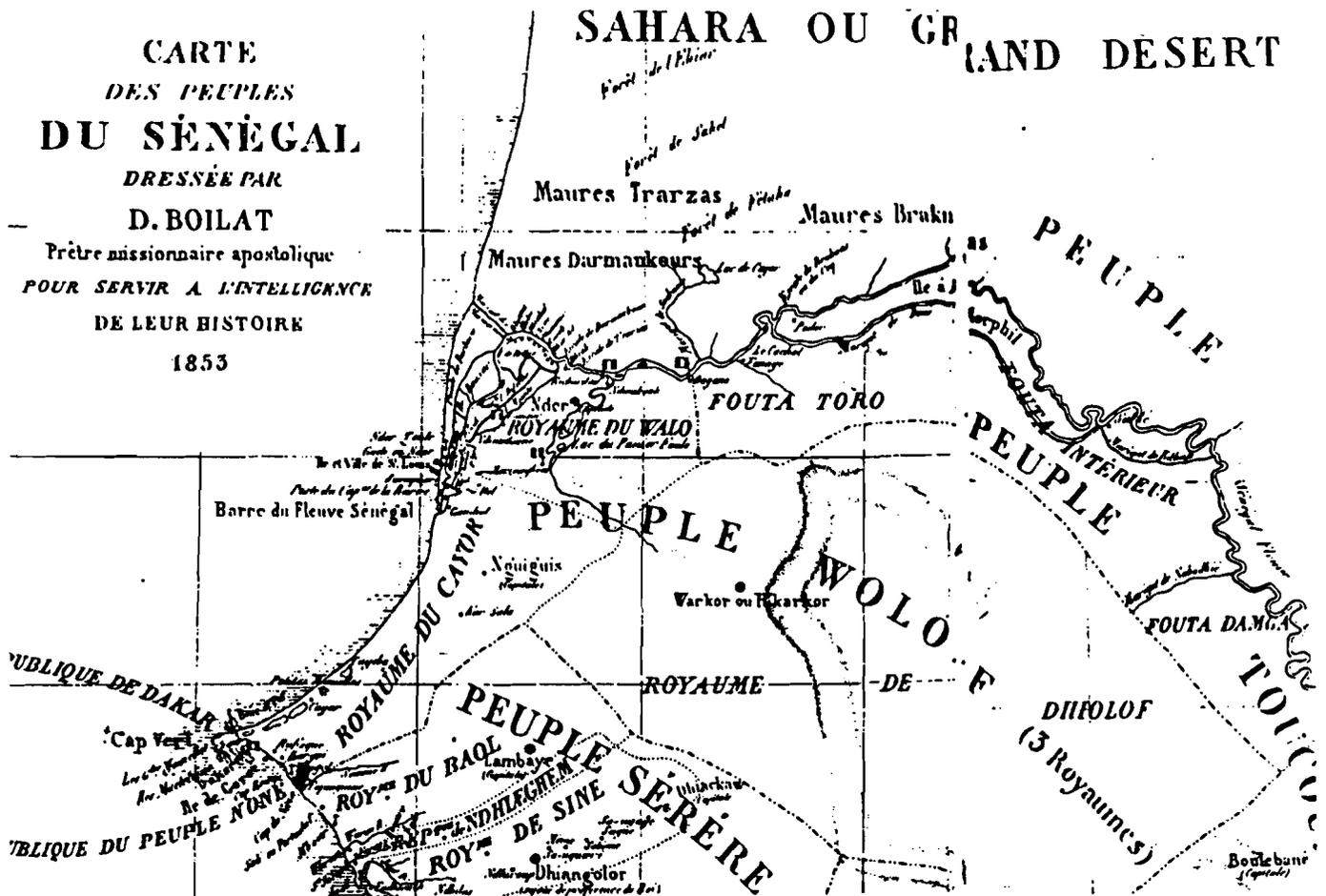
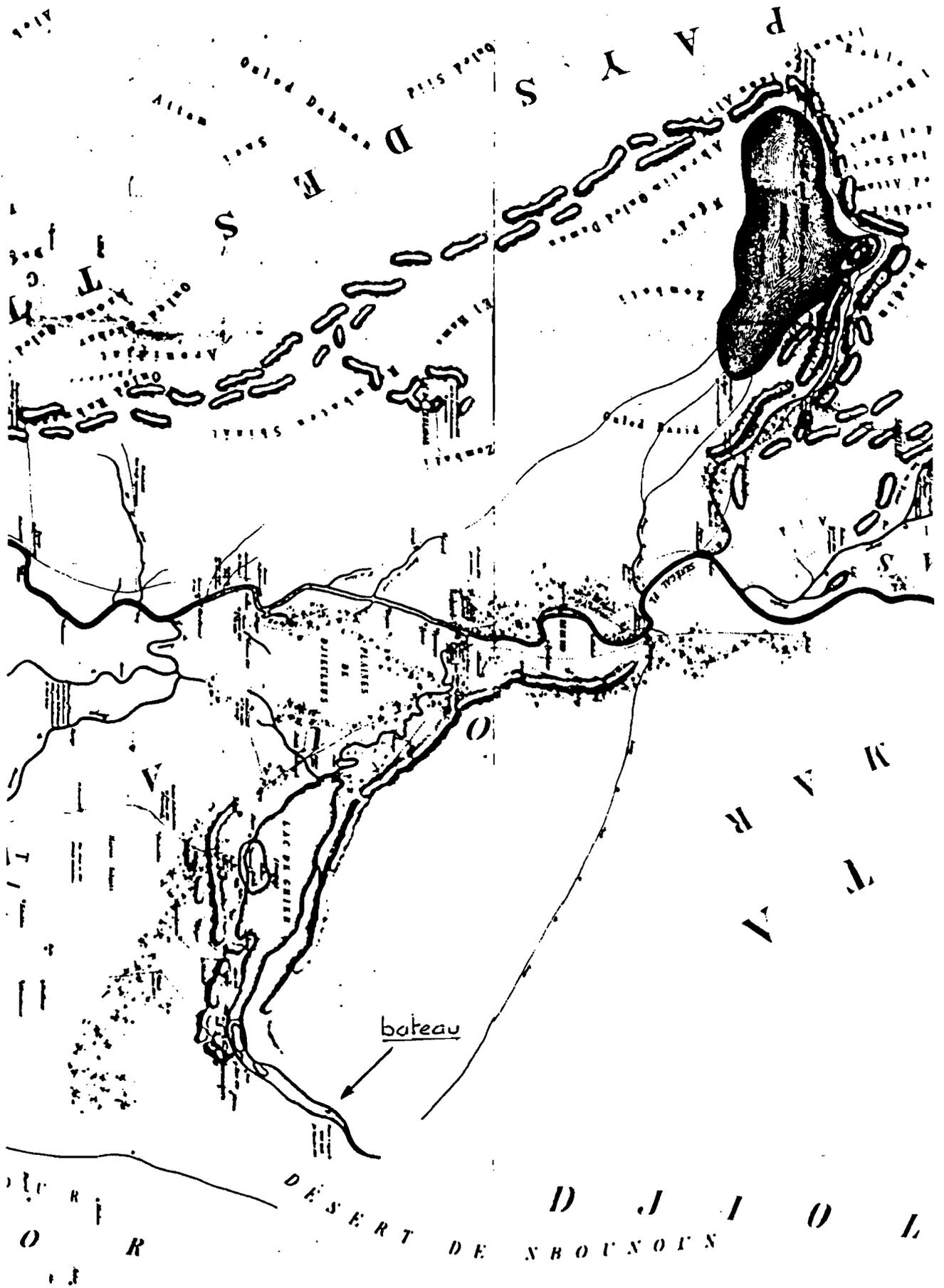


Fig. 16 - Carte du Sénégal de Podor à Saint-Louis (GABBARDY, 1856)



dessiné avec une grande précision sur le tracé des différents méandres.

Le dernier îlot méridional, au centre de la vallée du Bounoum montre que la cartographie de cette région se précise. Il s'agit de l'actuel massif dunaire de Dounou Dial.

Enfin le désert de Bounoum, indiqué au sud de la carte, apparaît pour la première fois sur un document géographique.

1866 Carte du Soudan Occidental dressée par MAGE sur ordre du Conte de DE CHASSELOUP LAUBAT, Ministre, Secrétaire D'Etat au Département de la Marine et des Colonies. D'après les voyages du Lieutenant de Vaisseau MAGE en 1859 et 1860 et de MAGE et du chirurgien de la marine QUINTIN en 1863 et 1866 (Fig. 17).

Cette carte générale est à l'échelle du 1/ 1 500 000. Le Ferlo ou "désert sans eau" ainsi que le désert du Bounoum sont mentionnés à la partie inférieure du document.

Le marigot du Bounoum s'étend très à l'amont prenant sa source dans trois mares près de la localité de Ouarkhokh qui se situe à mi-chemin entre les villes actuelles de Linguère et de Dahra.

Beaucoup de lieux habités portent le nom que nous leur connaissons aujourd'hui: Dagana, Tiagar, Rong et Saldé (sur le fleuve Sénégal); Richard Toll, Ndombo, Nder en bordure du lac de Guiers

Certaines erreurs de tracé subsistent mais l'essentiel de la cartographie de la vallée du Sénégal est acquise.

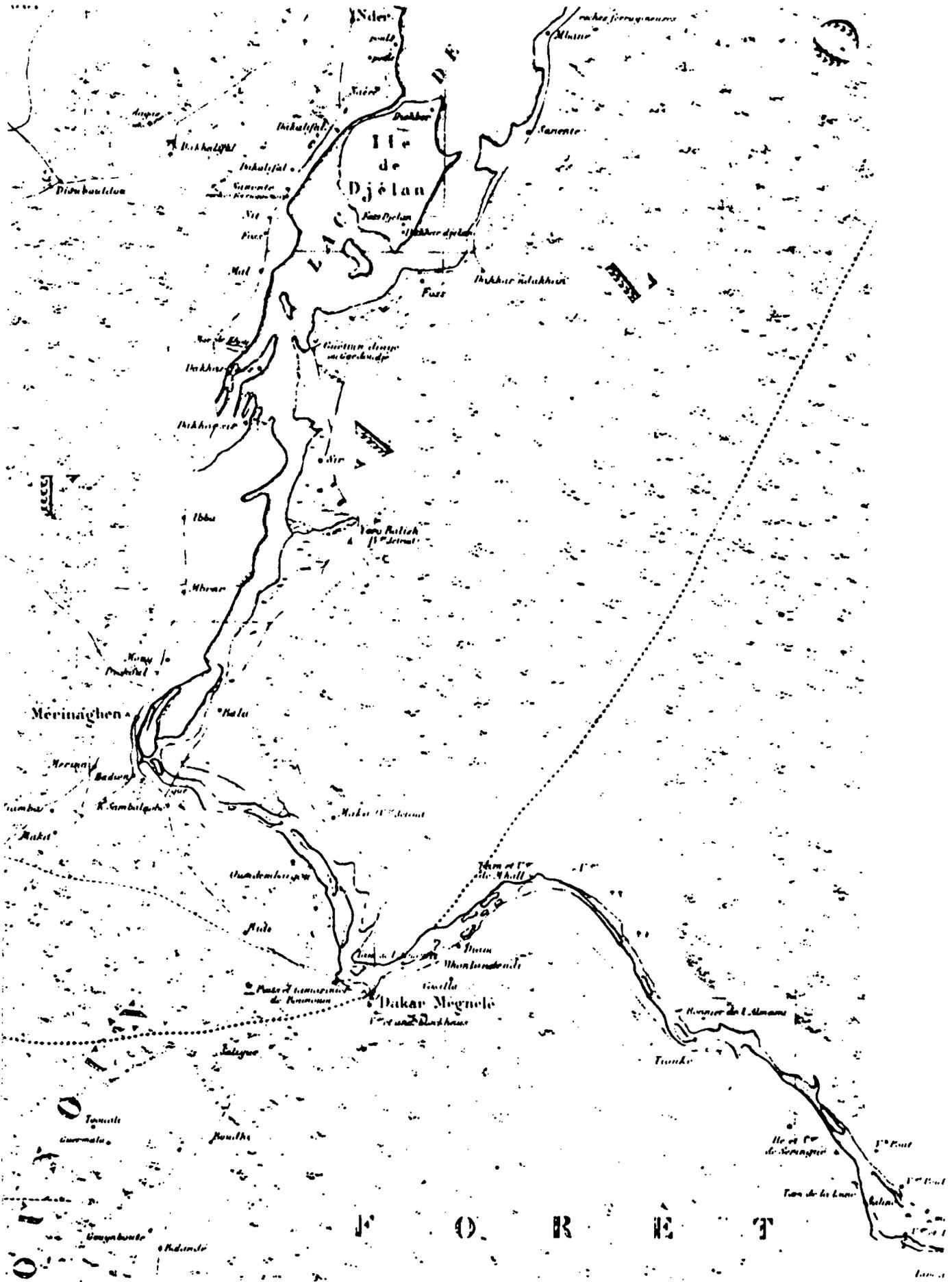
1870 Carte de la Banlieue de St Louis, du OUALO, du NDIAMBOUR. levée et dressée sur ordre du Colonel PINET LAPRADE, Gouverneur, par le Capitaine d'Etat Major BOIS assisté pour les reconnaissances par le Sous-Lieutenant FREY (Fig. 18).

Ce dernier document qui utilise les travaux antérieurs de nombreux cartographes tels que BROSSARD DE CORBIGNY, BRAOUZEC, GAILLARD DE REGNAULT, AZAN, VINCENT, MARTIN et LORANS constitue la synthèse des connaissances vers la fin du XIX^{ème} siècle.

Il améliore considérablement le tracé du lac de Guiers, de la vallée du Bounoum et du Ferlo et surtout signale un nombre important de localités nouvelles.

Au sud de Mérinaghène, le resserrement du lac à la hauteur de l'ancien emplacement de Gouyougue (référence carte de 1802) et la présence dans ce seuil d'un petit îlot servant de gué ont sans nul doute été à l'origine du choix de cet endroit pour l'édification en 1957 de la digue de Keur Momar Sarr. De nombreuses annotations figurent tout le long de la vallée du Ferlo qui s'étendait sur plus de 100 kilomètres. A noter la présence d'une localité au sud du Bounoum: Dakar Mégnélé. Aujourd'hui disparue, elle devait avoir l'importance du village de Mérinaghène.

Fig. 18 - Fragment de la carte de BOIS et FREY (1870)



D.- LE XX^{ème} SIECLE

"A la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème} siècle, la vallée du Sénégal est bien connue. Après les relevés des militaires, les renseignements sont fournis par les autorités coloniales et collectés par des cartographes spécialisés" (BECKER et al., 1988). Les cartes géographiques deviennent de plus en plus précises et à différentes échelles s'organisent les levés topographiques. La voie est ouverte à la mise en place d'observations hydro-métriques et de stations climatiques ainsi qu'au développement d'études géologiques et pédologiques.

L'époque est à la mise en valeur des connaissances et à l'exploitation des terres. De nombreux projets d'irrigation sont conçus lorsque survient la crise climatique de 1913.

Le fleuve Sénégal avec un module de 271 m³/s enregistre cette année-là un déficit de près de 62 % par rapport à la moyenne (713 m³/s) des 10 premières années de mesure des écoulements (FAURE et GAC, 1981; GAC et FAURE, 1987). La remontée saline vers l'amont du fleuve est d'une amplitude exceptionnelle: 216 km en 1914, 186 km en 1915 et 200 km en 1916 (GAC et al. 1981; GAC et al. 1985; GAC et al. 1986 a et 1986 b).

Des taux de salinité supérieurs à 10 g/l se maintiennent pendant plusieurs semaines à la hauteur de la confluence du Sénégal et de la Taoué. Cette succession d'invasion saline amène à concevoir les premiers projets d'aménagements pour préserver la réserve d'eau douce du lac de Guiers et de la vallée du Ferlo.

II.- FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU LAC DE GUIERS ET DU FERLO

Nous reprenons ici pour l'essentiel les conclusions de GAC (1987) sur " L'évolution du plan d'eau du lac de Guiers. Les barrages de Rheune et de Diama: deux opportunités".

En ne tenant compte que des grandes étapes, on distingue dans l'ordre chronologique les événements suivants :

1. Avant 1916, état naturel avec deux périodes:

- antérieurement à 1890, alimentation exclusive du lac en eau douce,
- après 1890, remontée saline dans le fleuve et possibilité de pénétration de la mer dans le lac et le Ferlo.

Selon BANCAL (1923), l'estuaire du Sénégal s'est trouvé limité par un seuil rocheux qui barrait le fleuve à la hauteur de la localité de Faff (situé 125 km en amont de St Louis). C'est le défoncement de ce seuil en 1890 qui aurait modifié le régime du fleuve avec en corollaire une remontée saline plus importante en domaine continental. L'existence de ce seuil a cependant été contesté car " ne s'expliquant pas géologiquement". La X^{ème} carte du Sénégal (appelé Niger) document manuscrit inédit réalisé par ADANSON en 1749 ne porte aucune indication particulière à la hauteur de la localité de

Faffl.

2. De 1916 à 1947, ont lieu les premiers aménagements sur la Taoué.

Après l'importante intrusion de l'eau de mer dans le lac de Guiers et la vallée du Ferlo au cours des premiers mois de 1915, le Gouverneur ANTONETTI fit ériger un barrage sur la Taoué en juin 1915. Bien qu'en ciment, l'ouvrage muni de vannes était mal conçu et il fût emporté par la crue en septembre. Il semble que l'expérience ne fût pas renouvelée les années suivantes; l'eau de mer accéda au lac peut-être en 1919, certainement en 1921. Comme le rapporte TROCHAIN (1940), les populations érigèrent elles-mêmes en 1925 un barrage établi avec des moyens de fortune (terres et fascines) sur la Taoué. De 1925 à 1946, il est probable que l'ouvrage emporté par les crues était reconstruit chaque année aux basses eaux. Pendant 22 ans, cette diguette a joué le rôle de barrage anti-sel.

3. En 1947, construction du pont-barrage de Richard-Toll.

Cet ouvrage en dur, de facture moderne est construit sur la Taoué à quelques centaines de mètres de la confluence avec le fleuve Sénégal. Muni de 8 vannes, il est ouvert à l'arrivée de l'onde de crue et fermé quelques jours après la cote maximale lorsque les plans d'eau fluvio-lacustres sont au même niveau et que le fleuve amorce sa décrue.

4. De 1947 à 1956, mise en place des casiers rizicoles.

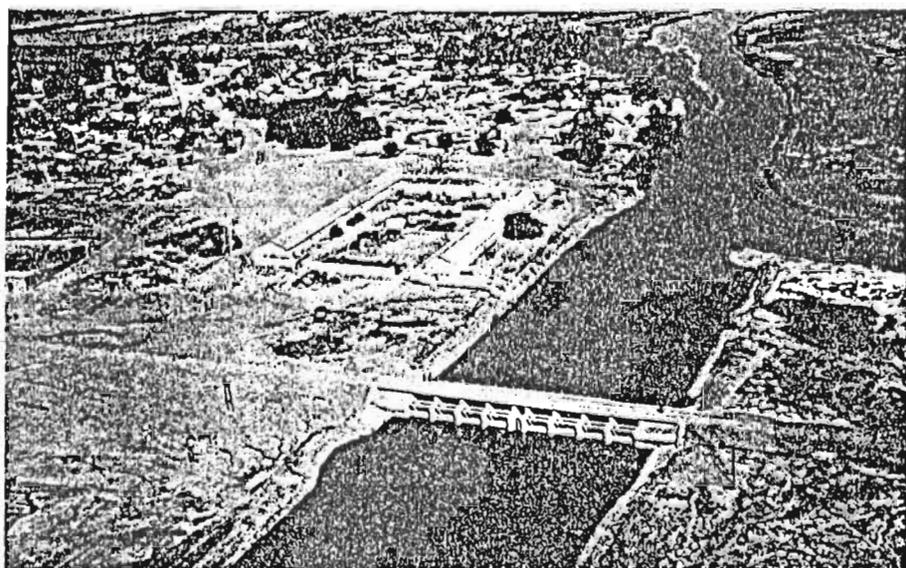
Des digues sont érigées sur les rives nord-ouest du lac. La brèche sur le marigot Niet Yone est partiellement colmatée pour interrompre les pertes en eau douce vers les plaines du Ndiaël situées à l'Ouest. Les casiers rizicoles sont alimentés en eau douce par une station de pompage qui jouxte, à l'amont coté lac, le pont-barrage. Les eaux proviennent du Sénégal tant que la marée n'a pas atteint la hauteur de Rd Toll; l'alimentation est ensuite fournie par la réserve constituée dans le lac de Guiers.

5. En 1956 (du 11 juin au 7 septembre), construction de la digue de Keur Momar Sarr et fermeture définitive de la brèche de Niet-Yone vers le N'Diaël

Les vallées du Bounoum et du Ferlo sont isolées du réseau hydrographique du Sénégal. Le lac de Guiers devient un véritable réservoir d'eau douce ses deux exutoires potentiels (Ndiaël et Ferlo) étant supprimés.

6. En 1970/71, implantation de la station de Ngnith et culture de la canne à sucre.

En 1970, la SONEES (Société Nationale d'Exploitation des Eaux du Sénégal) achève à Ngnith (rive ouest du lac) la construction de l'usine de traitement des eaux. Cette usine destinée à l'approvisionnement des métropoles régionales est reliée à la presqu'île du Cap Vert par une conduite de 250 km environ. En 1971, la Compagnie Sucrière Sénégalaise (CSS) se substitue à la Société de Développement Rizicole du Sénégal (SDRS): implantés sur les quelques centaines d'hectares aménagés dans les années 50, les casiers de cannes à sucre occupent aujourd'hui près de 7.000 ha. Le principe d'irrigation reste identique.



Le pont barrage de la Taouey (cliché de 1950)



La Taouey et le Diéri (cliché de 1950)
Au premier plan, les rizières d'essai.



Le Sénégal et la Taouey (cliché de 1950).
On discerne le pont-barrage sur la Taouey et les installations de Richard-Toll.

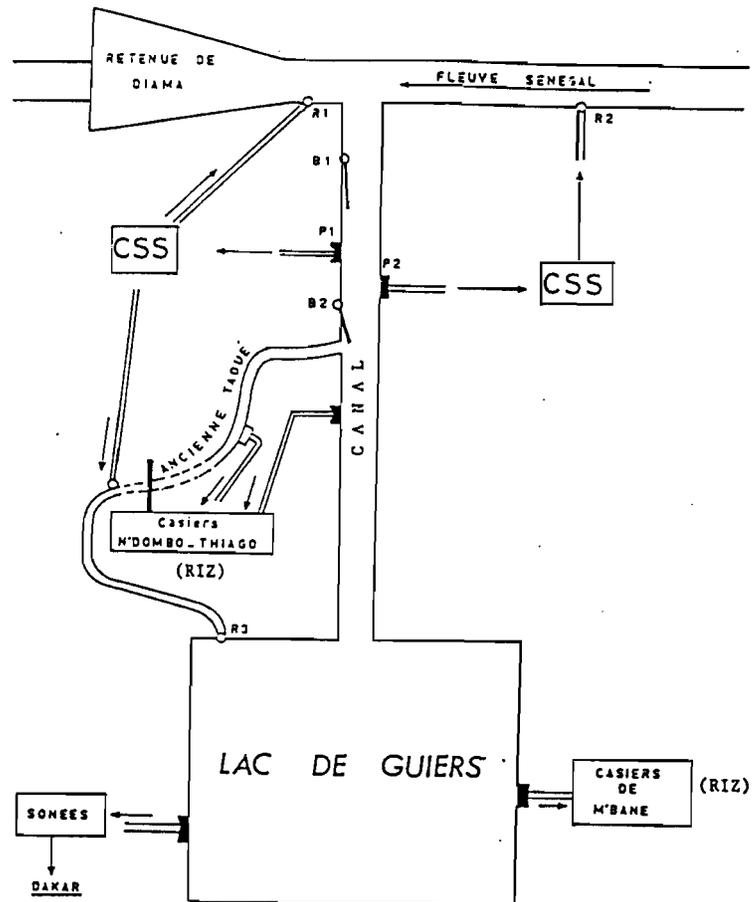


Fig. 19 - Représentation schématique du lac de Guiers, de la réserve de Diama et des aménagements (P, station de pompage; R, rejet; B, barrage)

7. De 1974 à 1975, rectification du cours de la Taoué.

De 1974 à 1975, après les années sèches de 1972 et de 1973 et l'étude du recalibrage de la Taoué, trois possibilités sont envisagées pour assurer un meilleur remplissage du lac de Guiers: raccourcir, élargir ou approfondir le lit de la Taoué. En définitive, pour éviter les importantes pertes de charge dues aux nombreux méandres de la Taoué, la décision est prise de creuser un chenal rectiligne de 17 km (Fig.19) à l'Est de la Taoué celle-ci étant utilisée pour évacuer les eaux de drainage des casiers sucriers vers la zone nord du lac !

8. En 1980, construction d'un second barrage sur le chenal

Edifié en 1980, à 500 m en aval du premier pont-barrage, ce second ouvrage est destiné à prolonger la durée du temps de pompage dans le fleuve pendant la période des basses eaux. Les prélèvements pour

l'irrigation de la canne à sucre se poursuivent dans le Sénégal tant que la langue salée n'est pas parvenue à la hauteur de Richard-Toll. Le pont-barrage est ensuite fermé et les pompages sollicitent la réserve constituée dans le lac de Guiers.

9. Le 25 novembre 1983, construction du barrage de Rheune sur le Sénégal.

Depuis le 22 mai 1983, le lac de Guiers avait atteint dans sa partie centrale la cote d'alerte de - 0,80 m IGN qui constitue la limite des possibilités de pompages pour la production d'eau potable à la station d'épuration de Ngnith. Tous les espoirs qui reposaient sur une crue forte du fleuve furent déçus; elle fût tardive à l'aval (le 28/07/83 à Richard-Toll) et l'une des plus faibles du siècle (OLIVRY, 1984). Pour piéger les derniers écoulements du fleuve et rehausser le plan d'eau du lac de Guiers, inéluctablement condamné à l'assèchement, on construisit à 50 km en aval de Richard-Toll la digue en terre de Rheune I. Sous la poussée de la nouvelle onde de crue, le "bouchon de Rheune I saute le 23 juillet 1984.

10. Le 15 novembre 1984, colmatage de la brèche:Rheune II.

Le remplissage du lac achevé précocement le 3/09/84 à la suite de la crue la plus faible du siècle conduit à un scénario analogue à celui de 1983. La brèche de Rheune I est colmatée. La digue en terre de Rheune II est emportée par la crue du Sénégal le 9/08/85.

11. Le 14 novembre 1985, mise en fonction de Diama

Situé à 50 km de l'embouchure, ce barrage anti-sel de grande envergure constitue le premier lien de terre ferme entre le Sénégal et la Mauritanie. Les projets de l'après- barrage se mettent en place.

12. Au printemps 1987, achèvement du barrage de Manantali

Le barrage amont de Manantali situé à 1200 km environ de l'embouchure du Sénégal est installé sur le Bafing, branche-mère principale du fleuve. Il est destiné à régulariser partiellement les crues du Sénégal (environ 60 %) en stockant les eaux du Bafing, les deux autres affluents le Bakoye et la Falémé suivant de manière classique leur cycle hydrologique habituel.

La crue 1987 a permis un premier remplissage partiel du barrage. Les premières lachures ont eut lieu à partir du 26/09/87. En 1988, le passage de la crue s'est produit entre le 2 septembre et le 24 octobre.

13. Du 20 septembre au 25 octobre 1988, inondation du Ferlo

Le niveau du plan d'eau du lac de Guiers à la mi-septembre 1988 atteint 1,88 m IGN , cote la plus élevée observée depuis 1972. Les vannes de la digue de Keur Momar Sarr restent ouvertes pendant 35 jours permettant l'inondation de la vallée du Bounoum ou Bas-Ferlo sur près de 50 kilomètres. Au maximum de son extension fin octobre la lame de submersion couvrait une superficie de l'ordre de 50 km².

14. Statut définitif à l'échéance du XXI ème siècle.

Le statut définitif du dispositif fluviolacustre est prévu pour la décennie 1990-2000 avec la construction du Canal du Cayor (Fig.20). Cet ouvrage, à ciel ouvert, devrait relier la vallée du Bounoum (15 km environ au sud du lac de Guiers) à la presqu'île du Cap vert: long de 240 km, il devrait à terme pouvoir acheminer près de 430 millions de m³/an.

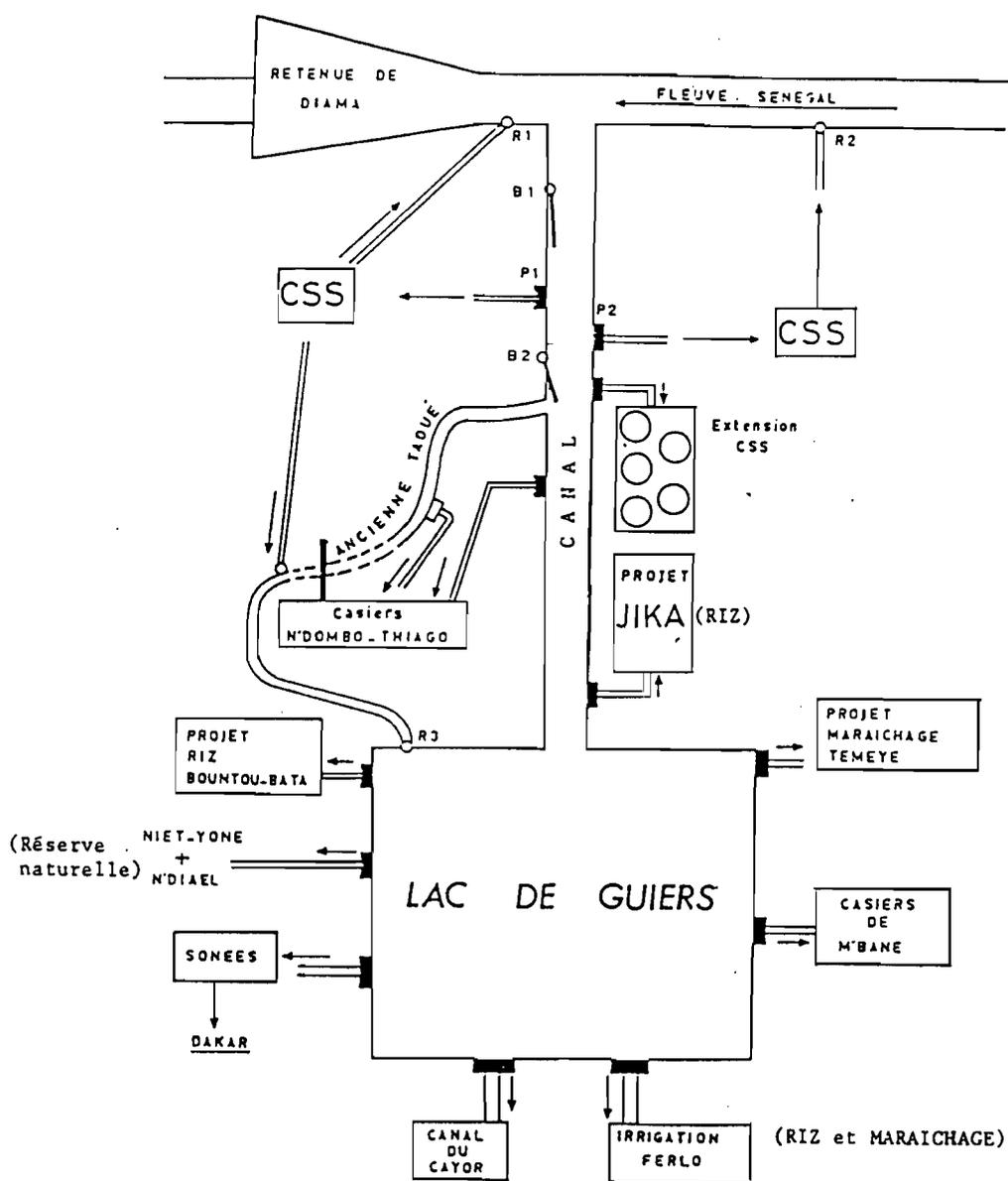


Fig. 20 - Représentation schématique de l'exploitation future du système fluviolacustre

III.- CONCLUSIONS

En résumé, quatre types de situations: l'état naturel avant 1916, le stade intermédiaire de 1916 à 1956, l'assèchement au cours de l'épisode 1956-1988 et les conditions actuelles.

1. Etat naturel(avant 1916)

La liaison entre le fleuve , le lac de Guiers et le Ferlo était permanente. Au gré de la crue et de la remontée du flot salé, les masses d'eau s'écoulaient librement et par simple gravité entre les trois milieux. Le système fonctionnait selon le principe des vases communicants. Les différents plans d'eau variaient à tout instant à la recherche d'un état d'équilibre différé par le flux et le reflux des transferts dans la Taoué.

2. Stade intermédiaire (de 1916 à 1956)

Le fleuve, le lac et la vallée du Ferlo communiquaient dès l'arrivée de l'onde de crue. De 1916 à 1948, elle détruisait au préalable le barrage en terre édifié sur la Taoué l'année précédente; de 1948 à 1956 l'ouverture des vannes du pont- barrage de Richard-Toll permettaient aux eaux du Sénégal ayant rempli le lac de Guiers, de remonter dans la vallée du Bounoum plus ou moins vers l'amont, selon l'importance de la crue annuelle. Les crues de 1924, 27, 35, 36, 50, 54 et 55 auraient largement dépassées la localité de Yang-yang submergeants sur près de 100 km le Bas-Ferlo.

3. L'assèchement de 1956 à 1988

La construction de la digue en terre de Keur Momar Sarr dans la partie sud du lac de Guiers avait pour objectif d'assurer un meilleur remplissage de la dépression lacustre. En 1956,l'isolement du Ferlo n'était envisagé que pour une courte durée. Les vannes placées à l'extrémité du barrage indiquaient manifestement que leurs fermetures n'avaient qu'un caractère provisoire! On sait ce qu'il en advint...Il fallut attendre 32 ans.

4. Les conditions actuelles

La lame de submersion qui a inondé le Ferlo sur près de 50 km entre le 20 septembre et le 25 octobre 1988 s'est progressivement retirée vers l'aval et le lac. Le 10/07/ 1989, elle se situait à moins de 5 km du barrage et il existe de très fortes probabilités pour que l'assèchement soit total avant l'éventuelle réouverture des vannes en septembre-octobre 1989.

Note: Depuis la rédaction de cette partie du document en juillet 1989, une nouvelle liaison entre le lac de Guiers et le Ferlo a été établie par l'ouverture de la digue entre le 29 août et le 17 octobre 1989.

CHAPITRE III

GEOCHIMIE GLOBALE DES EAUX DE LA LAME DE SUBMERSION DE LA VALLEE DU FERLO

I. CHRONOLOGIE DE LA PERIODE D'INONDATION

La liaison entre le lac de Guiers et la vallée du Ferlo a été établie pendant 35 jours du 20 septembre au 25 octobre 1988. Deux situations sont à distinguer au cours de cette période:

- du 20 septembre (15 h 30) au 14 octobre (17 h 00)

Le pont barrage de Richard-Toll est fermé: l'alimentation du lac par les eaux fluviales est interrompue. Le barrage de N'Dombo est ouvert et la communication lac de Guiers/Ferlo établie. Le 20 septembre, le plan d'eau lacustre est à sa cote maximale (+ 1,88 m IGN); il se situe le 14 octobre à + 1,54 m IGN. La variation de niveau est de 34 cm en 24 jours.

- du 14 octobre (17 h 00) au 25 octobre (12 h 30)

La liaison fleuve/lac est rétablie: les eaux circulent librement entre le Sénégal et le Ferlo, via le lac de Guiers. De 1,54 m IGN le 14 octobre, le niveau du lac atteint + 1,65 m le 23 octobre puis redescend à 1,59 m le 25 octobre. A partir du 23 octobre, le lac se situe en position haute par rapport au fleuve et au Ferlo. Par simple gravité, les écoulements ont lieu dans le sens lac/fleuve et lac/Ferlo.

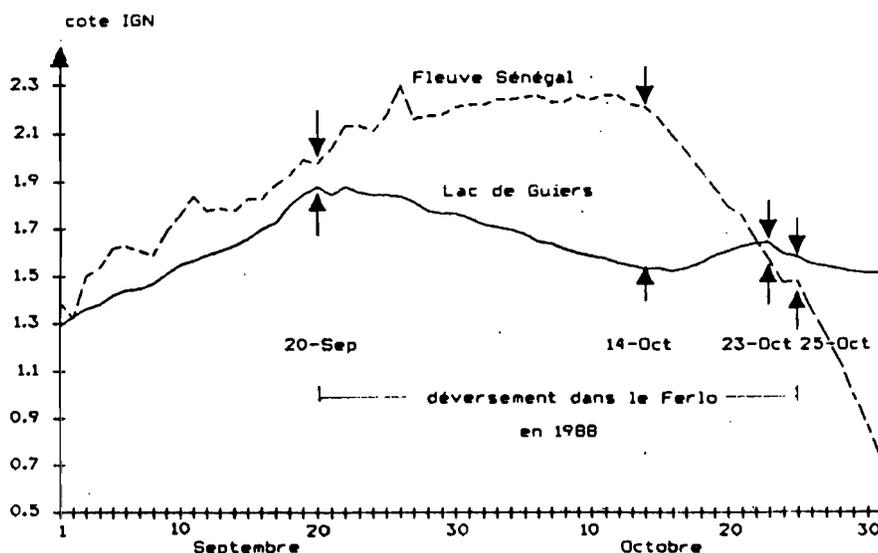


Fig. 21 .- Evolution des plans d'eau fluvio-lacustre entre le 20 septembre et le 25 octobre 1988.

Remarque:

En termes de bilan pour le lac de Guiers, l'évolution relative des plans d'eau fluvio-lacustres (Fig.21) pendant cette période de 35 jours, conduit à quelques commentaires sur la gestion des ouvrages:

- En premier lieu, la fermeture du pont barrage de Richard-Toll le 20 septembre a été prématurée: la liaison fluvio-lacustre aurait pu être maintenue jusqu'au 6 octobre, date du maximum de la crue du fleuve. L'élévation supplémentaire du plan d'eau du lac aurait été d'environ 25 cm et la cote maximale de l'ordre de + 2,10 m IGN.

- Entre le 23 et le 25 octobre, la libre circulation des eaux entre les trois milieux aurait dû être interrompue.: le lac, placé en position haute, s'est déversé dans le fleuve et le Ferlo.

En termes de bilan pour la vallée du Ferlo, la gestion la plus rationnelle aurait consisté à laisser le libre flux des masses d'eaux entre le 20 septembre et le 23 octobre.

A son extension maximale, vers le 15 novembre (pour tenir compte des pertes de charge), la lame de submersion s'est étendue sur près de 50 kms entre Keur Momar Sarr et l'ancien village de Naudi. Quelques survols aériens et les observations réalisées au cours de 11 campagnes de prélèvements ont permis de suivre l'évolution de la configuration du plan d'eau et sa réduction progressive lors de son retrait vers le lac:

- 15 novembre 1988 : km 50 (nord du village de Naudi)
- 4 décembre 1988 : km 41
- 15 janvier 1989 : km 33
- 10 avril 1989 : km 23
- 24 avril 1989 : km 19
- 17 mai 1989 : km 14
- 13 juin 1989 : km 12
- 9 juillet 1989 : km 8 (sud de Keur Momar Sarr).

II. EVALUATION DES VOLUMES DEVERSES DANS LE FERLO EN 1988

L'absence de documents cartographiques et d'une topographie suffisamment précise de l'ensemble de la zone submergée ne permet d'évaluer les volumes déversés dans le Ferlo qu'à partir du bilan hydrologique du lac de Guiers.

A.- LES ELEMENTS DU BILAN HYDROLOGIQUE

Le bilan hydrique du lac entre un état initial V_i et un état final V_f n'est que la résultante des entrées et des sorties d'eau durant une période déterminée:

$$V_f - V_i = (V_E + V_{p0} + V_{ms} + V_n + V_r) - (V_E + V_{p1} + V_{p2} + V_{ms} + V_{inf})$$

Les différents éléments du bilan hydrologique:

(V_F), Apports du fleuve Sénégal ; (V_{p0}), Apports par les pluies ; (V_{me}), Apports marins (1) ; (V_n), Apports souterrains (2); (V_r), Rejets des zones irriguées ; (V_E), Pertes par évaporation ; (V_{p1}), Pompages de la CSS (3) ; (V_{p2}), Pompages de la SONEES (4) ; (V_{ms}), Retour des eaux marines (1) et (V_{inf}), pertes par infiltration (2).

(1) Avant 1916 l'eau de mer pouvait, lors des étiages du fleuve Sénégal, pénétrer dans le lac. Les éventuels flux et reflux d'eau salée (V_{me} , V_{ms}) constituaient des composantes plus ou moins importantes du bilan hydrique.

(2) Le volant d'eau mis en jeu par l'intervention des nappes est peu connu. PLAUD (1966) fait état d'échanges réciproques entre eaux de surface et eaux souterraines (V_n et V_{inf}) d'importances insignifiantes et de valeurs sensiblement égales

(3) Pertes pour l'irrigation: pompages variables en fonction des superficies cultivées par la Compagnie Sucrière Sénégalaise (CSS)

(4) Pompages pour la production d'eau potable à l'usine de traitement de Ngnith de la SONEES (Société Nationale d'Exploitation des Eaux du Sénégal).

La variation de volume pour une période donnée s'écrit plus simplement:

$$\Delta V = (V_F + V_{p0} + V_r) - (V_E + V_{p1} + V_{p2} + V_f)$$

L'inondation du Ferlo introduit dans le bilan une nouvelle composante (V_f) correspondant aux volumes d'eau déversés dans la vallée.

Au cours de la période d'inondation du Ferlo, le plan d'eau du lac de Guiers a oscillé entre + 1,88 m et + 1,59 m (IGN). Le volume et la surface du lac sont déterminés à partir des relations établies par COGELS et GAC (1982) et COGELS (1984). Les hauteurs d'eau sont exprimées en mètres, les surfaces en km² et les volumes en millions de m³.

$$- 0,50 < H < + 4,00$$

$$S = 58,603 + 164,822 \ln (H + 2)$$

$$- 0,80 < H < + 1,99$$

$$V = 50,326 (H + 2)^{1,857}$$

B.- IMPORTANCE DE LA LAME DE SUBMERSION

Les deux situations précédentes doivent être examinées séparément.

1. Période du 20 septembre au 14 octobre

Elle s'étend sur 24 jours. Le pont barrage de Richard-Toll est fermé, ceux de N'Dombo et de Keur Momar Sarr sont ouverts. Il en résulte que:

- les apports du fleuve sont nuls ($V_F = 0$),
- les pompages pour l'irrigation (V_{P1}) sont soustraits au lac,
- les déversements vers le Ferlo participent à l'abaissement du plan d'eau lacustre.

Au cours de cette période la superficie du lac se réduit de 15 km² passant de 282 km² à 267 km². La variation de volume est de 97,7 millions de m³. On en déduit (en millions de m³) :

$$97,7 = (V_E + V_{P1} + V_{P2} + V_f) - (V_F + V_{D0} + V_r)$$

$$V_F = 0$$

$$V_{D0} = 0,98 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

La seule pluie observée est celle du 21 septembre (3,4 mm). Elle correspond (pour $H = +1,85$ m et $S = 280,8$ km²) à un apport direct au lac de $0,95 \cdot 10^6$ m³ et à un apport différé sur le bassin versant de $0,03 \cdot 10^6$ m³ (en admettant, que le coefficient de ruissellement est de 10 %, sur la portion sèche du bassin versant limité à la cote + 4,00 m IGN).

$$V_r = 2,44 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Les eaux de drainage (ou rejets) des casiers de cannes à sucre se déversent partiellement, via l'ancien chenal de la Taoué, dans la zone nord du lac de Guiers. Le volume de ces rejets est quantifié mensuellement par la CSS (3,57 et 2,76 millions de m³ en septembre et octobre 1988).

$$V_E = 43,03 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Les pertes par évaporation sont calculées à partir des taux moyens journaliers établis pour chaque mois par COGELS (1984). Elles sont respectivement de 5,39 mm/jour en septembre et de 7,36 mm/jour en octobre. Du 20 au 30 septembre et du 1 au 14 octobre, la superficie moyenne du lac a été respectivement de 279,8 et de 271,3 km².

$$V_{P1} = 12,62 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Les pompages de la CSS pour l'irrigation de la canne à sucre se font dans le lac de Guiers. Ils sont aussi quantifiés mensuellement à partir du nombre d'heures de fonctionnement des pompes vers le casier principal de Richard - Toll et celui de Kouma- Mbilor. Les volumes totaux soutirés en septembre et octobre 1988 ont été de 12,92 et de 18,41 millions de m³.

$$V_{P2} = 0,96 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Les prélèvements de la SONEES pour le traitement et la fourniture d'eau potable sont relativement constants et de 40 000 m³ / jour.

Toutes les composantes du bilan hydrologique du lac étant connues, on peut évaluer les volumes déversés dans la vallée du Ferlo entre le 20 septembre et le 14 octobre:

$$V_f = 97,7 + 0,98 + 2,44 - (43,03 + 12,62 + 0,96)$$

Pendant cette première phase de 24 jours, les volumes déversés dans le Ferlo sont de 44,51 millions de m³ et le débit moyen de l'ordre de 21,5 m³/s. Il correspond en première approximation, (surface mouillée de

8,5
~~3,4~~ m²: 3 vannes de 1,20⁹m de diamètre), à une vitesse moyenne du courant de 6,3 m/s.
2,5

2. Période du 14 octobre au 25 octobre

La décision d'ouvrir à nouveau le barrage de Richard-Toll a été prise le 14 octobre à 17 h . Le niveau du fleuve se situait alors 67 cm au dessus de celui du lac (Fig.21). Le rétablissement de la libre circulation des masses d'eaux entre les trois milieux (fleuve/lac/Ferlo) était cependant trop tardif, le fleuve Sénégal amorçant déjà sa décrue. Ceci s'est traduit, à partir du 23 octobre, par une position haute du lac par rapport au fleuve et à la vallée du Ferlo. Naturellement, par le simple jeu de la gravité, les eaux lacustres se sont simultanément déversées vers le plan d'eau de Diama au nord et vers la vallée du Ferlo au Sud.

a) Du 14 octobre au 23 octobre

Elle s'étend sur 9 jours. Tous les barrages sont ouverts. Il en résulte que les prélèvements pour l'irrigation de la canne à sucre peuvent être considérés comme étant soustraits au fleuve et qu'ils n'entrent pas en ligne de compte dans le bilan hydrologique du lac ($V_{D1} = 0$).

Le niveau du lac s'élève de + 1,54 m à + 1,65 m IGN . La superficie et le volume augmentent passant respectivement de 267 km² à 272 km² et de 526,4 à 557,1 millions de m³ soit une variation de surface de 5 km² et de volume de 30,7 10⁶m³. Les apports l'emportent sur les pertes (en millions de m³).

$$30,7 = (V_F + V_r + V_{D0}) - (V_f + V_{D1} + V_{D2} + V_E)$$

$$V_r = 0,80 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

L'évaluation de ces rejets de la CSS se fait à partir des données mensuelles (2,76 millions de m³ en octobre 1988)

$$V_{D0} = 0$$

Le lac ne reçoit aucune précipitation.

$$V_{D1} = 0$$

$$V_{D2} = 0,36 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Les prélèvements sont de l'ordre de 40.000 m³/jour.

$$V_E = 17,83 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Les pertes par évaporation s'effectuent sur une surface moyenne exposée de 269,2 km² au taux journalier de 7,36 mm calculé par COGELS (1984).

$$\text{On en déduit: } V_F - V_f = 48,09 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Au cours de cette période de 9 jours, la différence de débit entre les déversements du fleuve dans le lac et du lac dans le Ferlo est de :

$$D_F - D_f = 61,84 \text{ m}^3/\text{s}$$

b) Du 23 octobre au 25 octobre

Pendant ces deux jours, où l'ensemble du dispositif évolue encore en système ouvert, le plan d'eau du lac de Guiers se situe au dessus de ceux du fleuve Sénégal et de la vallée du Ferlo.

Le niveau du lac décroît de 1,65 m à 1,59 m IGN. La diminution de volume s'élève à 17,1 millions de m³ :

$$17,1 = (V_f + V_{\text{lac-fleuve}} + V_E + V_{p1} + V_{p2}) - (V_{p0} + V_r)$$

$$V_E = 3,98 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Les pertes par évaporation s'effectuent sur une surface moyenne de 270,6 km² au rythme journalier de 7,36 mm.

$$V_{p1} = 1,19 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Ils sont calculés à partir du soutirage d'octobre pour l'irrigation des casiers de Richard-Toll et de Khouma- Mbilor (18,41 millions de m³)

$$V_{p2} = 0,08 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Prélèvements de 40 000 m³ / jour.

$$V_{p0} = 0 \text{ (aucune pluie)}$$

$$V_r = 0,18 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Les apports des eaux de drainage dans la zone nord du lac sont calculés à partir des rejets mensuels d'octobre (2,76 millions de m³).

On en déduit : $V_{\text{lac-fleuve}} - V_f = 12,03 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ soit des déversements journaliers globaux vers le fleuve et la vallée du Ferlo de 6,02 millions de m³.

$$D_{\text{lac-fleuve}} + D_f = 69,62 \text{ m}^3/\text{s}$$

En définitive, pour estimer les apports vers le Ferlo au cours de ce second épisode, il n'existe d'autre alternative que celle d'admettre un débit constant pour les écoulements que ce soit dans le sens fleuve / lac ou inversement dans le sens lac/ fleuve.

$$(1) D_F - D_f = 61,84$$

$$\text{et } (2) D_F + D_f = 69,62$$

$$D_F = 65,73 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{et } D_f = 3,89 \text{ m}^3/\text{s}$$

Finalement du 14 au 25 octobre, les déversements du lac de Guiers dans la vallée du Ferlo se sont poursuivis au rythme de 3,9 m³/s ce qui représentent 3,71 millions de m³.

C.- ESTIMATION DES DEVERSEMENTS DANS LE FERLO

Pendant la période d'ouverture de la digue de Keur Momar Sarr du 20 septembre au 25 octobre 1988, les volumes d'eaux douces déversés dans

la vallée du Ferlo peuvent être estimés à $48,22 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

La superficie inondée ayant été de l'ordre de 50 km^2 on évalue à environ 1 m la profondeur moyenne de la lame de submersion. Ce résultat est conforme aux observations effectuées in situ.

A partir de son isolement le 25 octobre, le Ferlo évolue en système fermé. A la phase d'exondation va succéder un retrait progressif de la lame de submersion vers les parties basses de la vallée situées au pied du barrage de Keur Momar Sarr. Les eaux résiduelles emprisonnées diminuent de volume et se concentrent par évaporation et échanges éventuels avec la nappe phréatique. Onze campagnes de prélèvements permettent d'esquisser d'une manière globale l'évolution spatio-temporelle de la physicochimie des eaux du Ferlo. Les modalités du passage d'un régime de submersion à un régime de remontées capillaires ainsi que les paragenèses salines directement liées à la concentration des eaux dans ce milieu confiné seront étudiées ultérieurement.

III. EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE LA LAME DE SUBMERSION

A.- LES VARIATIONS DES PLANS D'EAU DU LAC ET DU FERLO

Les deux milieux aquatiques, isolés à partir du 25 octobre 1988, ont vu leurs plans d'eau s'abaisser progressivement.

1. Le lac de Gulers

Le 18 juin 1989, le lac achève son cycle hydrologique à la cote - 0,27 m IGN. Depuis le 25 octobre 1988, l'abaissement du plan d'eau lacustre a été de 1,86 m.

Au cours de cette période de 237 jours, le bilan des entrées d'eau dans le lac se résume aux rejets habituels dans la zone nord et à la seule pluie de faible importance (0,9 mm) tombée le 16 décembre 1988. Le bilan des sorties d'eau est bien plus complexe: aux pertes classiques par évaporation, pompages et éventuellement par infiltrations, il faut ajouter les déversements du lac dans la retenue de Diama.

Ces écoulements dans le sens lac/fleuve imposés à deux reprises (du 1 au 14 mars et du 20 avril au 4 mai 1989) constituaient, à cette époque de l'année, un fait remarquable. Ils furent la conséquence d'évènements peu fréquents, qu' il n'est d'ailleurs pas exclu de voir se reproduire simultanément dans le futur, (marées de fortes amplitudes dans le bief aval et étiage prononcé du fleuve Sénégal à l'amont du barrage de Diama). Le plan d'eau amont se situait alors en contrebas du plan d'eau aval, avec la perspective du rehaussement de ce dernier sous l'effet de marées à caractère équinoxial et les risques encourus pour l'édifice de Diama dont les vannes ont été conçus pour soutenir des pressions dans le sens amont-aval.

2. La vallée du Ferlo

Les observations sur le retrait progressif de la lame de submersion



Photo 3. - L'embarcation "EQUESEN" franchissant la digue de Keur Momar SARR (J.Y. GAC).



Photo 4. - "EQUESEN" atteignant le Ferlo en Novembre 1989.

du Ferlo et de l'abaissement de son plan d'eau n'ont été réalisées qu'au cours des campagnes de prélèvements effectuées entre février et juillet 1989. En l'absence d'échelle limnimétrique, les variations de niveau ont été suivies à partir de repères sommaires installés sur les vannes de la digue de Keur Momar Sarr. Elles n'ont donc qu'une valeur indicative.

Du 18 février au 9 juillet, le niveau du plan d'eau s'est abaissé de 1,15 m au rythme sensiblement constant de l'ordre de 9 mm/jour. En admettant comme valeurs extrêmes les pertes enregistrées (- 0,70 m) par le lac du 25 octobre 1988 au 18 février 1989, période où la situation des deux plans d'eau ne diffère que par les sollicitations des pompages sur le lac de Guiers, on évalue entre 1,70 m et 1,85 m la baisse du plan d'eau de la lame de submersion du Ferlo pendant la période d'inondation d'octobre 88 à juillet 89.

B.- LES CAMPAGNES DE PRELEVEMENTS DANS LES DIFFERENTS SITES DE LA VALLEE DU FERLO

Les prélèvements d'eau dans la vallée du Ferlo ont été effectués au cours de 11 campagnes successives entre janvier et août 1989 (19 janvier, 11 février, 20 février, 11 avril, 24 avril, 17 mai, 9 juin, 13 juin, 10 juillet, 15 juillet et 8 août). L'écart entre les différentes stations sélectionnées est de l'ordre de 2 km (Fig. 22).

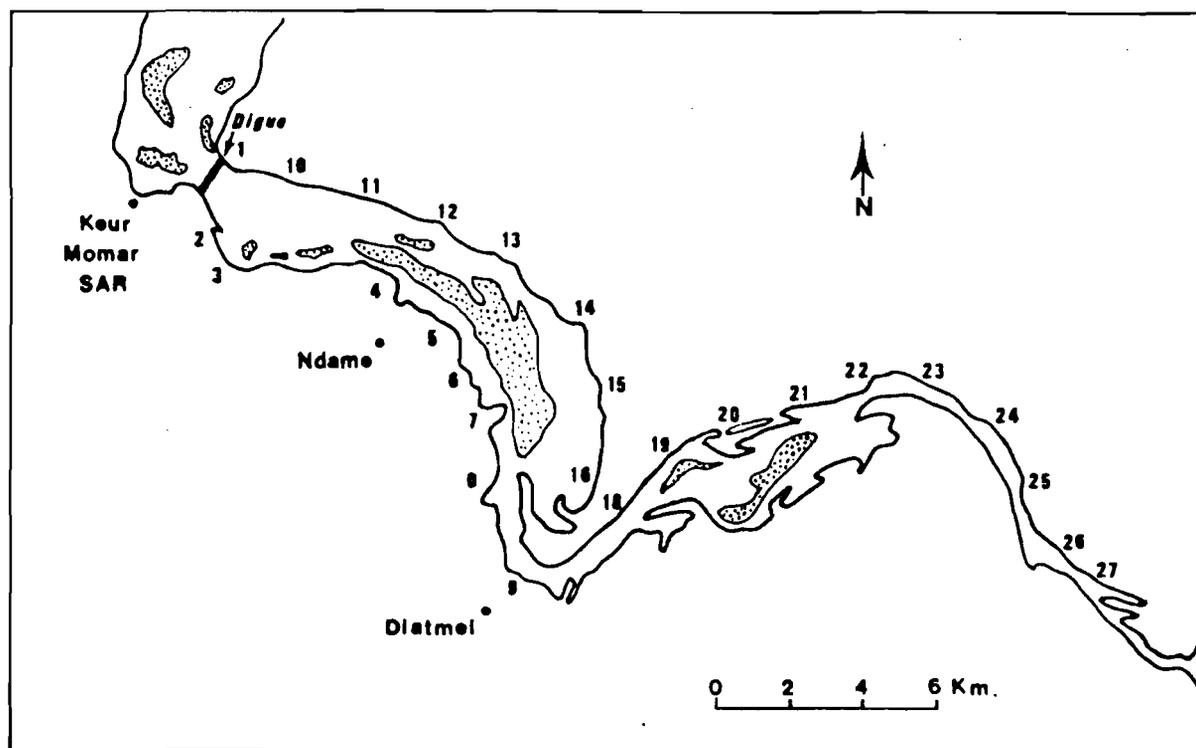


Fig. 22 - Situations géographiques des stations du Ferlo



Photo 5. - "EQUESEN" sur la digue de Keur Momar SARR
(J.L. APPAY, F.X. COGELS).



Photo 6. - Le "Renouveau" dans le Ferlo (B. LABROUSSE)

Le retour progressif de la lame de submersion vers la digue de Keur Momar Sarr a, dans un premier temps, provoqué l'assèchement de la zone amont puis de la partie aval située en rive Ouest. Les dernières étendues en eau se situaient sur le flanc Est de la vallée. Ces phases de retrait ont déterminé la fréquence de prélèvements aux 27 sites: 1 à 2 échantillons pour les stations les plus lointaines (F₂₇ à F₁₉), 3 à 4 pour les stations intermédiaires (F₁₆, F₁₈ et de F₃ à F₉) et de 6 à 8 pour les stations les plus proches (F₂ et de F₁₀ à F₁₅). Les prélèvements au site F₁ ont été réalisés à chaque campagne.

En définitive, 116 échantillons d'eau ont été analysés au laboratoire du centre ORSTOM de Dakar. Ils sont répertoriés par campagnes dans les tableaux placés en annexe selon une numérotation du type 1F₁; le premier chiffre correspond au jour du prélèvement (campagne n°1 du 19 janvier), la lettre F aux eaux de surface du Ferlo et l'indice au numéro de la station.

C.- EVOLUTION GLOBALE DE LA PHYSICOCHEMIE DES EAUX DE LA LAME DE SUBMERSION DU FERLO

1. La minéralisation totale des solutions

Le tableau III montre que la minéralisation des eaux de la lame de submersion s'échelonne entre 0,74 et 41,2 g/l.

Les eaux les plus diluées correspondent à l'extension maximale de la nappe d'inondation et se situent dans le voisinage immédiat de la digue de Keur Momar Sarr. Les eaux les plus concentrées sont caractéristiques des ultimes phases d'assèchement, soit dans le lit mineur, soit dans les mares résiduelles ou encore dans des milieux confinés très particuliers tels que la petite zone déprimée, localisée en contrebas du village de Ndamé.

Il existe un gradient de salinité spatio-temporelle qui s'accroît au fur et à mesure de la réduction progressive de la lame de submersion. Les eaux se concentrent par évaporation et éventuellement par échanges réciproques avec les nappes sub-affleurantes.

- les minéralisations moyennes de l'ensemble de la nappe d'eau varient de 1,2 g/l en janvier, à 1,7 g/l en février, à 3,3 g/l en avril, à 5,9 g/l en mai (en négligeant les eaux sursalées de Ndamé), à 8,6 g/l en juin et à 15,0 g/l en juillet.

- dans le couloir central du lit mineur, pour prendre l'exemple des stations les plus suivies (1, 13 et 15), les charges dissoutes de janvier à juin ont augmentées de 0,7 g/l à 10,5 g/l (station 1), de 1 à 16,3 g/l (station 13) et de 1,04 à 29,9 g/l (station 15).

Dans ce corpus analytique, dans l'ensemble homogène, il faut noter la particularité des échantillons 9F₁₅, 6F₄, 6F₅ et 6F₆ qui se distinguent par des taux de salinité très élevés (de 30 à 41 g/l). Ils correspondent aux mares résiduelles en voie d'assèchement et aux phases terminales de concentration par évaporation. Les échanges réciproques avec les nappes phréatiques sont ici vraisemblables. Les sondages effectués font état de sols à caractère vertique en F₁₅ et de sols sulfatés acides en F₄, F₅ et F₆

Tableau . III - EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE LA
LAME DE SUBMERSION DU FERLO EN FONCTION DE LA MINERALISATION
(Conductivité en mS, Cations et Anions en meq/L, Silice en mmoles/L)

N°	g/L-	pH	EC	Cl	SO4	ALC	Ca	Mg	K	Na	H4SiO4
1 F 1	0,74	8,46	1,06	4,25	0,83	4,53	1,91	2,47	0,47	5,36	0,62
3 F 1	1,00	8,43	1,39	7,24	1,70	5,03	2,41	3,29	0,55	7,94	0,65
1 F 13	1,00	8,58	1,44	6,88	1,85	5,19	2,54	3,26	0,57	8,20	0,55
1 F 12	1,00	8,49	1,46	6,96	1,92	5,07	2,50	3,31	0,57	8,22	0,57
1 F 10	1,01	8,50	1,45	7,12	1,96	5,01	2,60	3,27	0,59	8,05	0,56
1 F 14	1,01	8,55	1,47	6,96	1,82	5,29	2,53	3,36	0,59	8,03	0,59
1 F 2	1,02	8,52	1,49	6,96	1,92	5,18	2,71	3,31	0,58	8,63	0,52
1 F 11	1,04	8,60	1,48	7,20	2,00	5,18	2,59	3,36	0,59	8,39	0,63
1 F 15	1,04	8,50	1,49	7,16	1,85	5,27	2,32	3,34	0,59	8,63	0,68
1 F 19	1,05	8,45	1,49	7,53	1,85	5,16	2,36	3,39	0,67	8,96	0,64
2 F 1	1,08	8,22	1,48	8,59	2,19	5,06	2,32	3,52	0,60	8,74	0,46
1 F 3	1,08	8,41	1,57	7,77	1,89	5,47	2,53	3,47	0,63	9,42	0,48
1 F 21	1,10	8,33	1,57	8,03	1,96	5,39	2,24	3,74	0,66	9,62	0,62
2 F 11	1,15	8,56	1,63	9,66	2,31	4,79	2,14	3,76	0,62	10,64	0,45
2 F 13	1,16	8,50	1,64	9,41	2,11	5,09	2,19	3,85	0,66	10,83	0,47
2 F 10	1,16	8,48	1,65	9,41	2,41	4,98	2,25	3,87	0,62	10,70	0,43
1 F 4	1,17	8,58	1,67	8,38	2,03	5,92	2,49	3,88	0,69	10,13	0,54
2 F 12	1,17	8,44	1,64	9,66	2,19	5,13	2,36	3,78	0,64	10,64	0,45
3 F 2	1,17	8,19	1,71	9,80	2,50	4,95	2,40	3,78	0,61	9,78	0,62
2 F 15	1,20	8,51	1,68	9,66	2,24	5,43	2,23	3,93	0,66	11,05	0,50
3 F 12	1,20	8,41	1,71	9,80	2,35	5,47	2,36	3,95	0,63	10,02	0,61
3 F 11	1,22	8,36	1,74	9,86	2,45	5,54	2,27	3,99	0,64	10,20	0,58
3 F 10	1,22	8,35	1,74	9,78	2,65	5,52	2,35	3,91	0,64	9,92	0,60
3 F 13	1,23	8,35	1,75	10,03	2,45	5,64	2,22	3,95	0,65	10,23	0,65
2 F 3	1,26	8,31	1,76	10,16	2,96	5,33	2,42	4,03	0,66	11,59	0,45
1 F 22	1,26	8,44	1,75	9,44	2,27	6,05	2,36	4,32	0,73	11,39	0,62
2 F 2	1,26	8,37	1,73	10,42	3,02	5,23	2,47	3,93	0,69	11,35	0,46
3 F 15	1,27	8,30	1,86	10,57	2,32	5,76	2,24	4,11	0,69	10,74	0,68
1 F 8	1,28	8,54	1,83	9,81	2,36	5,91	2,29	4,11	0,74	11,90	0,62
3 F 3	1,28	8,41	1,87	10,83	2,79	5,52	2,59	4,11	0,66	10,64	0,55
1 F 7	1,30	8,60	1,92	9,81	2,36	6,01	2,45	4,18	0,74	12,22	0,60
1 F 9	1,31	8,55	1,88	9,95	2,45	6,02	2,36	4,18	0,77	12,05	0,66
1 F 23	1,31	8,38	1,85	10,05	2,45	6,10	2,34	4,36	0,76	11,84	0,62
3 F 16	1,35	8,35	1,89	11,24	2,49	5,92	2,23	4,44	0,74	11,81	0,70
1 F 6	1,40	8,54	2,04	10,64	2,59	6,68	2,89	4,59	0,79	12,77	0,58
1 F 25	1,41	8,61	2,00	11,33	2,70	6,31	2,13	4,63	0,87	13,10	0,57
2 F 4	1,48	8,58	2,15	12,38	2,76	6,70	2,58	4,89	0,82	13,75	0,41
1 F 26	1,51	8,48	2,38	12,56	2,86	6,70	2,13	5,14	0,93	14,14	0,55
1 F 5	1,52	8,57	2,19	11,35	2,82	7,43	3,17	4,95	0,86	13,88	0,49
3 F 4	1,52	8,39	2,26	13,15	2,49	7,07	2,55	5,10	0,83	13,59	0,45
2 F 5	1,52	8,47	2,17	12,69	3,05	6,74	2,56	5,04	0,81	14,42	0,39
2 F 9	1,58	8,46	2,27	13,63	3,49	6,35	2,43	5,08	0,91	14,85	0,51
2 F 8	1,59	8,56	2,29	13,96	3,22	6,33	2,31	5,08	0,94	15,55	0,52
1 F 24	1,64	8,38	2,31	13,73	2,64	7,38	2,48	5,58	0,96	16,12	0,50
1 F 27	1,66	8,53	2,55	14,24	3,22	7,17	2,29	5,55	1,01	15,99	0,41
3 F 9	1,69	8,40	2,46	14,45	3,66	6,94	2,37	5,35	0,91	15,42	0,73
3 F 5	1,76	8,42	2,61	15,77	2,95	7,98	2,76	5,92	0,92	15,96	0,39
4 F 1	1,84	8,40	2,80	16,93	4,42	6,82	3,36	6,79	1,07	15,72	0,60
4 F 2	1,84	8,20	2,80	16,78	4,48	6,24	3,68	6,66	1,12	17,31	0,55
5 F 1	1,86	8,00	2,90	18,01	4,42	6,38	3,40	6,91	1,19	17,70	0,16
4 F 10	1,87	8,40	2,77	16,78	4,40	6,45	3,24	6,83	1,10	18,29	0,57
4 F 11	1,87	8,60	2,83	17,39	4,45	6,52	3,17	6,87	1,13	17,49	0,55
2 F 6	1,90	8,57	2,76	16,98	3,53	7,90	2,91	6,54	0,99	19,18	0,30
3 F 18	1,93	8,43	2,83	17,62	4,07	7,52	2,58	6,42	1,10	18,40	0,59
2 F 7	1,97	8,58	2,87	17,88	3,67	8,14	2,91	6,95	1,02	19,79	0,25
3 F 6	2,04	8,48	3,06	18,75	3,71	8,88	2,94	6,91	1,04	19,23	0,27
4 F 12	2,05	8,30	3,12	19,31	4,34	7,20	2,76	7,65	1,29	20,41	0,56
3 F 22	2,14	8,67	3,23	20,43	3,83	8,70	2,30	7,00	1,34	21,42	0,29
3 F 8	2,20	8,42	3,32	22,10	4,60	8,02	2,50	7,24	1,10	21,36	0,38
3 F 23	2,26	8,68	3,39	22,32	3,74	9,12	2,32	7,34	1,47	22,72	0,12

Tableau . III - EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE LA LAME DE SUBMERSION DU FERLO EN FONCTION DE LA MINERALISATION (Conductivité en mS, Cations et Anions en meq/L, Silice en mmoles/L)

N°	g/L	pH	EC	Cl	SO4	ALC	Ca	Mg	K	Na	H4SiO4
3 F 20	2,28	8,59	3,39	22,10	4,00	9,04	2,95	7,28	1,37	22,66	0,26
4 F 13	2,55	8,70	3,77	24,78	5,17	8,78	2,73	9,05	1,56	26,75	0,52
3 F 24	2,57	8,70	3,80	26,09	4,37	9,77	1,86	8,31	1,64	26,32	0,29
4 F 15	2,57	8,40	3,79	25,18	5,30	8,48	2,62	9,34	1,57	27,45	0,48
4 F 3	2,80	8,20	4,34	28,22	7,02	7,96	2,27	11,43	1,79	30,36	0,29
3 F 7	2,93	8,43	4,48	30,23	4,75	11,32	2,78	10,28	1,49	30,32	0,01
6 F 10	2,95	8,17	4,83	29,21	8,15	7,88	3,96	12,42	1,67	30,62	0,48
10 F 14	2,97	8,08	4,98	37,62	6,03	4,41	2,40	8,80	1,60	37,00	0,06
3 F 27	3,01	8,57	4,55	30,23	5,62	10,41	1,90	9,21	1,97	33,49	0,36
6 F 1	3,04	8,20	4,86	33,00	7,66	6,52	4,64	11,20	2,15	34,20	0,07
6 F 2	3,07	8,12	5,06	30,31	8,50	8,10	3,84	13,16	1,74	31,84	0,54
3 F 26	3,10	8,71	4,67	31,98	5,87	10,59	1,63	9,46	2,01	34,10	0,32
4 F 18	3,42	8,70	5,31	37,63	7,25	9,21	2,19	12,42	2,10	38,09	0,21
10 F 11	3,51	8,21	5,72	44,64	8,71	3,85	4,10	11,00	1,60	43,00	0,00
6 F 11	3,51	8,50	5,89	36,91	8,52	9,24	3,14	15,96	1,99	36,62	0,51
4 F 20	3,58	8,60	5,59	39,62	7,34	10,28	2,27	12,67	2,20	37,69	0,41
4 F 16	3,69	8,60	5,70	39,96	8,19	9,58	2,39	13,57	2,18	42,17	0,23
6 F 12	3,73	8,22	6,40	40,96	8,58	9,41	2,87	16,95	1,06	40,97	0,48
4 F 21	3,87	8,60	5,92	42,40	7,78	10,34	2,24	13,66	2,35	44,98	0,24
3 F 25	4,26	8,83	6,34	47,76	6,24	13,88	2,02	13,49	2,56	47,85	0,10
4 F 4	4,38	8,40	6,57	46,44	7,58	14,54	2,12	17,44	2,59	48,76	0,00
3 F 21	4,69	8,73	6,68	50,25	6,42	18,05	3,27	14,81	2,44	50,11	0,01
5 F 18	4,71	8,70	7,76	54,51	9,75	10,30	1,92	15,47	2,85	57,68	0,18
10 F 13	4,72	7,88	8,57	60,41	10,75	5,07	2,90	15,00	2,00	62,00	0,01
7 F 1	5,03	8,48	8,49	55,25	15,84	9,43	4,10	19,00	2,60	56,00	0,32
8 F 1	5,37	8,58	8,83	61,43	16,04	9,31	3,90	20,00	2,70	61,00	0,23
8 F 2	5,49	8,69	9,13	62,89	16,98	9,25	3,60	21,00	2,80	61,00	0,42
8 F 10	5,84	8,71	9,66	66,29	18,12	10,02	4,10	21,00	3,00	66,00	0,38
10 F 12	5,89	8,01	10,45	77,27	13,52	6,18	3,50	19,00	2,50	75,00	0,01
6 F 3	5,92	8,50	9,64	65,19	16,29	13,10	2,54	27,48	3,76	64,38	0,10
8 F 11	5,98	8,77	9,94	67,67	18,88	9,53	3,80	22,00	2,90	70,00	0,28
6 F 15	6,05	8,62	9,93	70,65	14,59	11,82	3,32	25,50	4,46	68,07	0,07
6 F 13	6,10	8,52	10,04	71,27	14,77	12,68	2,12	26,32	3,78	68,07	0,15
6 F 18	6,59	8,28	10,86	78,47	16,50	12,15	2,95	27,97	4,37	73,51	0,10
8 F 12	6,89	8,81	11,87	88,49	17,17	10,86	3,00	26,00	3,30	75,00	0,35
10 F 10	7,24	8,44	12,23	88,98	22,30	6,25	5,00	25,00	3,10	91,00	0,10
10 F 1	7,36	8,52	12,34	90,81	22,67	6,82	4,50	26,00	3,20	91,00	0,10
10 F 2	7,64	8,55	12,96	94,51	22,12	7,17	4,10	27,00	3,50	97,00	0,09
11 F 1	8,04	8,41	13,71	106,74	18,35	10,89	4,50	26,00	3,50	93,00	0,27
8 F 13	8,37	8,84	13,00	100,06	21,80	11,50	3,10	28,00	3,80	107,00	0,58
4 F 22	9,19	8,70	13,28	116,00	17,47	16,75	2,91	28,79	4,62	113,96	0,02
9 F 10	9,78	8,46	14,82	125,05	25,89	9,07	5,69	33,56	3,66	125,00	0,09
9 F 2	9,79	8,33	15,03	124,20	26,05	8,33	3,50	32,00	3,71	131,00	0,00
9 F 1	10,47	8,38	16,13	129,31	29,76	8,06	2,90	34,00	3,96	145,00	0,03
6 F 21	11,53	8,40	19,32	149,60	30,65	16,57	4,14	63,20	6,89	113,53	0,04
6 F 16	12,49	8,41	21,10	157,30	34,65	17,83	4,18	80,60	7,57	121,36	0,07
9 F 12	12,70	7,79	19,93	171,58	32,50	5,80	3,88	38,09	4,73	176,00	0,06
8 F 15	14,70	8,72	23,50	187,56	37,89	16,42	3,30	53,00	6,40	185,00	0,01
9 F 11	15,12	7,98	23,30	195,56	41,86	6,12	4,09	56,35	4,96	212,00	0,01
9 F 14	15,79	7,86	24,80	208,78	40,09	9,79	3,50	49,36	5,37	216,00	0,04
8 F 14	16,27	8,83	24,50	207,42	41,49	18,10	2,50	56,00	6,90	208,00	0,25
9 F 13	16,32	8,41	25,30	216,44	46,26	11,99	2,57	58,24	5,73	204,00	0,07
9 F 15	29,90	8,38	42,20	421,38	71,11	18,57	9,01	95,43	9,21	378,00	0,00
6 F 5	40,85	8,46	54,50	524,00	80,97	74,21	2,32	212,70	23,91	446,28	0,06
6 F 4	41,10	8,43	56,00	505,00	83,50	78,81	2,32	184,70	21,43	488,04	0,06
6 F 6	41,19	8,42	59,50	548,00	81,99	78,55	2,00	133,27	19,18	481,95	0,05

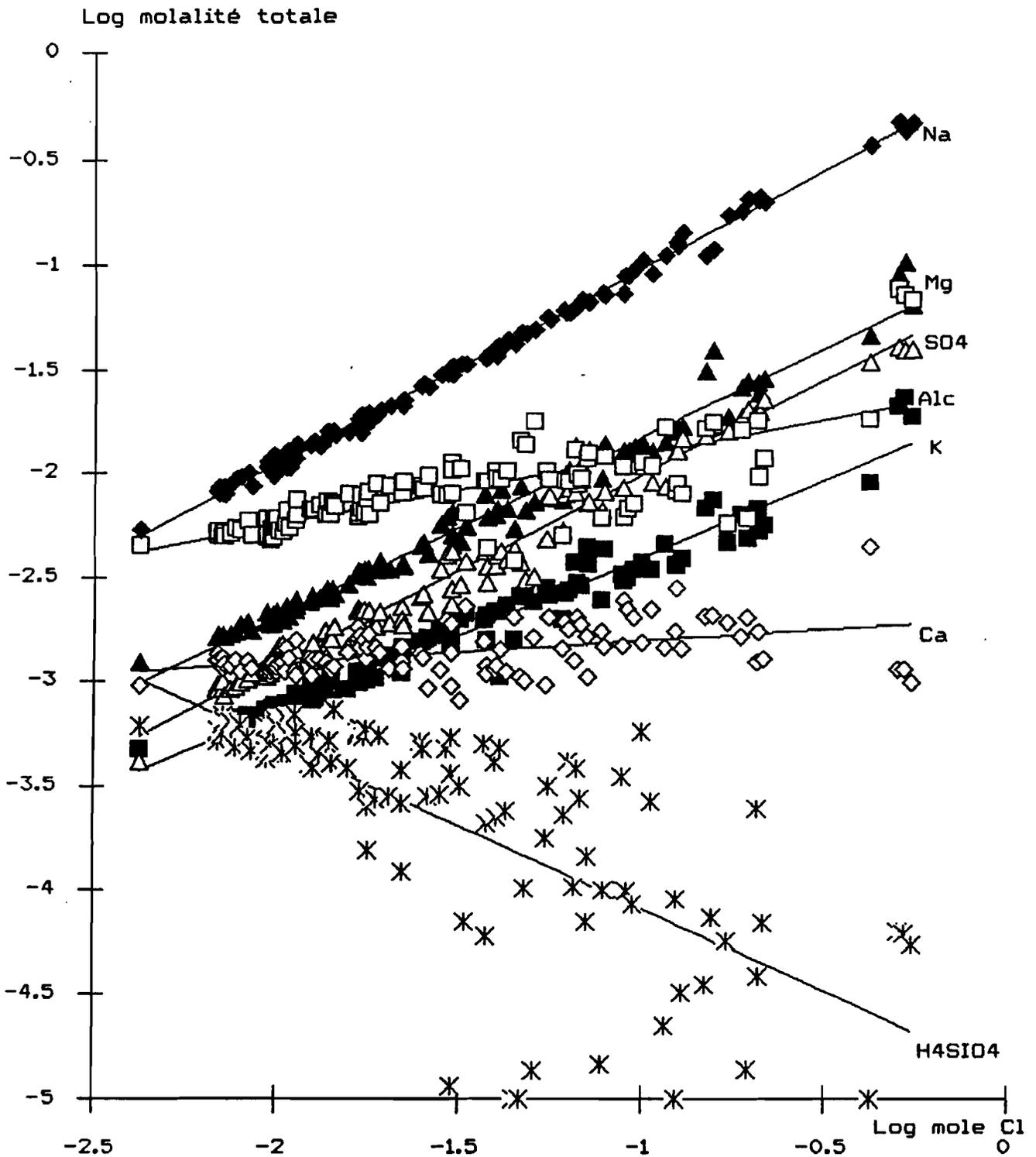


Fig. 23 - Evolution de la composition chimique des eaux de la lame de submersion du Ferlo en fonction du facteur de concentration (Log mole Cl)

(mangroves reliques ?) dont les aquifères sont extrêmement salés (entre 40 et 50 g/l).

La comparaison des salinités entre les eaux des séries 9, 10 et 11 prélevées le 9 juillet, le 15 juillet et le 8 août indiquent une succession de phases de dilution et de concentration des eaux de la lame de submersion. dûe à l'arrivée de la nouvelle saison des pluies (43,8 mm le 11/07).

L'évolution de la minéralisation totale illustre dans ses grandes lignes l'itinéraire chimique des solutions pendant toute la durée de l'inondation de la vallée du Ferlo. L'étude des variations des paramètres physiques (pH et conductivité) met en évidence les interactions avec les milieux sous-jacents; celle des similitudes ou des divergences de comportement des constituants majeurs de la charge dissoute peut définir les paragenèses salines successives dans un environnement, somme toute, proche d'un milieu " en voie de poldérisation".

Pour traduire de manière simple et explicite, l'évolution des différents paramètres où des constituants de la charge dissoute plusieurs formulations graphiques sont envisageables; variabilité en fonction de la minéralisation, de la conductivité ou encore de l'un des éléments en solution. Le choix, ici, des teneurs en chlorures (exprimées en log molalités) comme critère de comparaison se justifie par le caractère "conservatif" de cet élément, concentré près de 130 fois au cours de la période d'inondation (Fig. 23).

2. Les paramètres physiques)

a) Le pH

Le pH est remarquablement constant autour d'une valeur moyenne de 8,45 (écart type : 0,20). Une unité pH sépare les valeurs extrêmes 7,79 et 8,84 .*Les eaux de la lame de submersion du Ferlo sont basiques toute l'année (Fig.24).*

Les variations du pH au cours des saisons sont faibles: 8,5 en janvier et février, 8,4 en avril et en mai, 8,6 en juin et 8,2 en juillet. La diminution relative de juillet est la conséquence des premières précipitations de la nouvelle saison des pluies caractérisées par une légère acidité (pH 6,7 à 6,8 selon TRAVI et al. 1987).

L'évolution saisonnière du pH dans les différents sites de prélèvements n'indique aucune variation significative. Les valeurs moyennes s'échelonnent entre 8,31 et 8,63. Il est étonnant de constater, par ailleurs, que parmi les valeurs relativement les plus fortes (pH à 8,5), on relève en rive Est les eaux des stations 6 et 7 qui surmontent une ancienne mangrove. Dans ce secteur, les eaux souterraines situées à faible profondeur (environ 1 m) ont un caractère acide très prononcé avec des valeurs de pH de 2,5 à 3,0. Ceci semble indiquer, que dans ce secteur, les échanges réciproques entre les eaux de surface et les nappes phréatiques sont insignifiants . La lame de submersion reposerait sur un fond "chimiquement inerte". La contradiction est évidente avés les interprétations

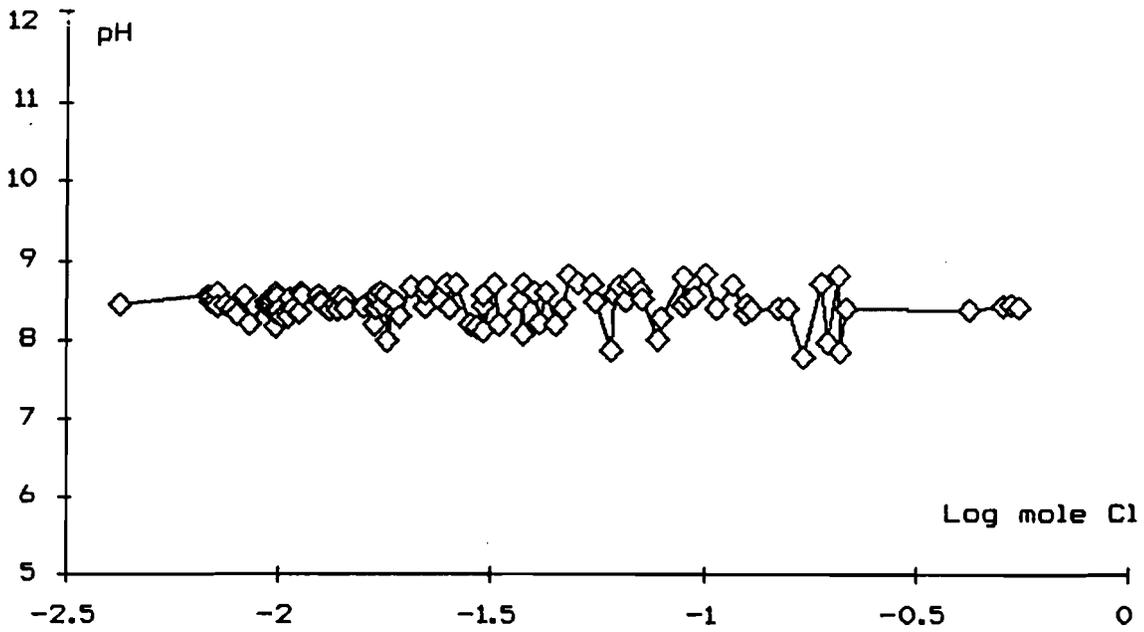


Fig. 24 - Evolution du pH en fonction des teneurs en Chlorures

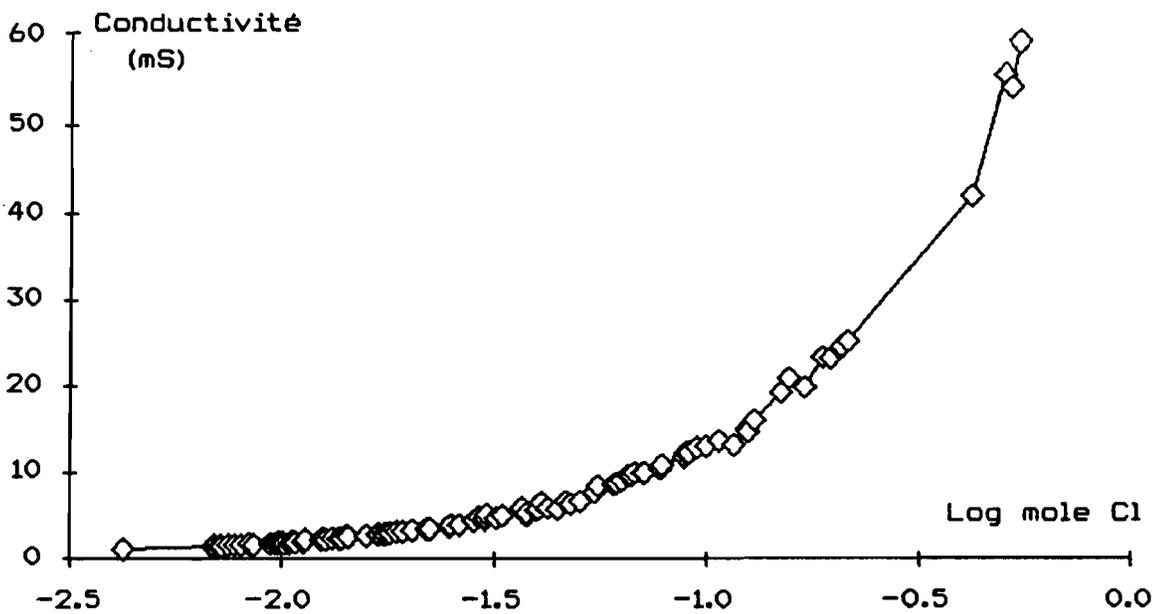


Fig. 25 - Evolution de la conductivité en fonction des teneurs en Chlorures

précédentes sur la variabilité de la minéralisation totale. Des études précises sont à mener dans cette région.

b) La Conductivité

La conductivité (en mS) ou conductance spécifique est une des mesures classiques permettant un contrôle simple et rapide de la minéralisation des solutions. D'une manière générale, et pour un type d'eau donné, la conductivité augmente lorsque les eaux se concentrent.

La conductivité des eaux d'inondation du Ferlo observe cette règle (Fig.25). *Les variations de la conductivité en fonction des concentrations en chlorures se traduisent par une courbe exponentielle.* L'équation de la régression exponentielle, liant la conductivité (en mS) et les teneurs en chlorures (log molalité) est la suivante:

$$\text{Cond.} = 93 (7,16 \log \text{Cl})$$

De manière simplifiée, elle se décompose en 4 segments où la croissance de la conductivité est linéaire. L'existence de ces différents paliers est de toute évidence en liaison étroite avec l'évolution des proportions relatives des éléments constitutifs de la charge dissoute en solution.

Les différents points d'inflexion, de ce découpage en portions rectilignes, se situent pour des concentrations en chlorures de 32 mmoles (log -1.50), de 120 mmoles (log -0.92) et de 420 mmoles (log -0,38). Les notions d'activité et de force ionique sont ici incontournables pour discerner le "poids" respectif de chaque élément dans la valeur de la conductivité de la solution. La détermination des activités confirmerait sans doute les modifications de faciès chimiques notées à partir de la simple observation des molalités:

14 mmoles \leq Cl \leq 32 mmoles: Na \geq Cl \geq Alc. \geq Mg \geq SO₄ = K \geq Ca
faciès sodique, chloruré et carbonaté

32 mmoles \leq Cl \leq 120 mmoles: Cl \geq Na » Alc = Mg \geq SO₄ \geq K \geq Ca
faciès chloruré-sodique et carbonaté

120 mmoles \leq Cl \leq 420 mmoles: Cl \geq Na » Mg \geq SO₄ \geq Alc. \geq K \geq Ca
faciès chloruré-sodique et magnésien

420 mmoles \leq Cl : Cl \geq Na » Alc. \geq Mg \geq SO₄ \geq K » Ca
faciès chloruré-sodique et carbonaté

3. L'itinéraire chimique des ions en solution

a) Les ions sodium et chlorures

Les ions sodium et chlorures sont, à tout instant, les constituants majeurs de la charge dissoute. Ils suivent des voies parallèles et augmentent linéairement avec le facteur de concentration (Fig.26).

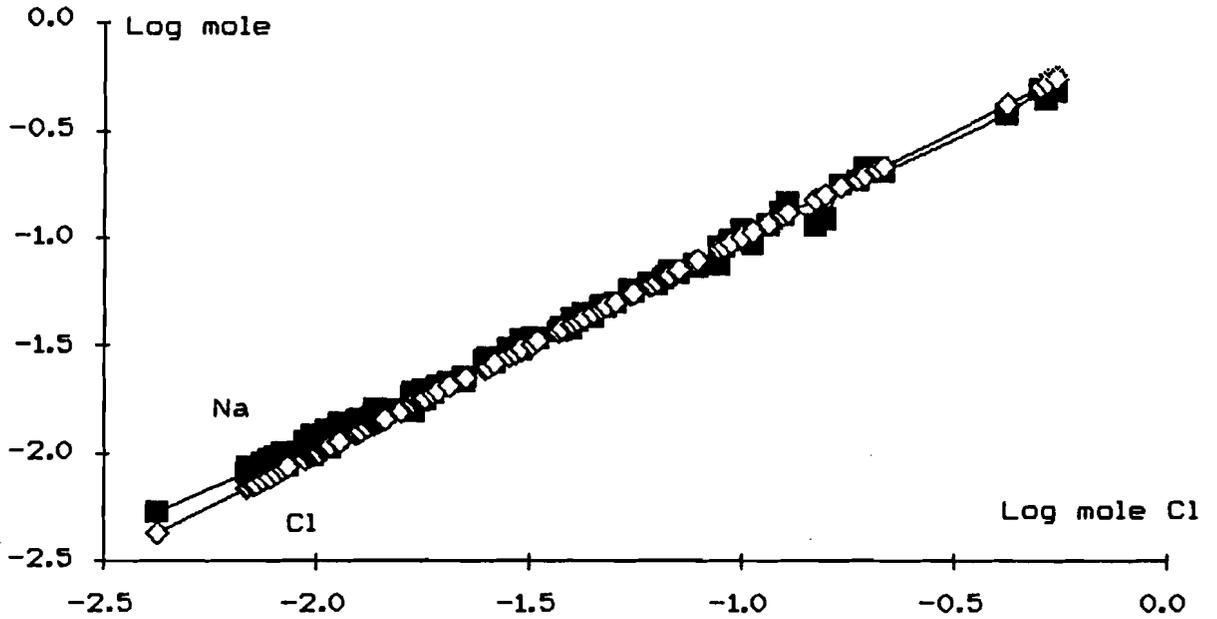


Fig. 26 - Evolution des teneurs en Sodium et en Chlorures en fonction des teneurs en Chlorures

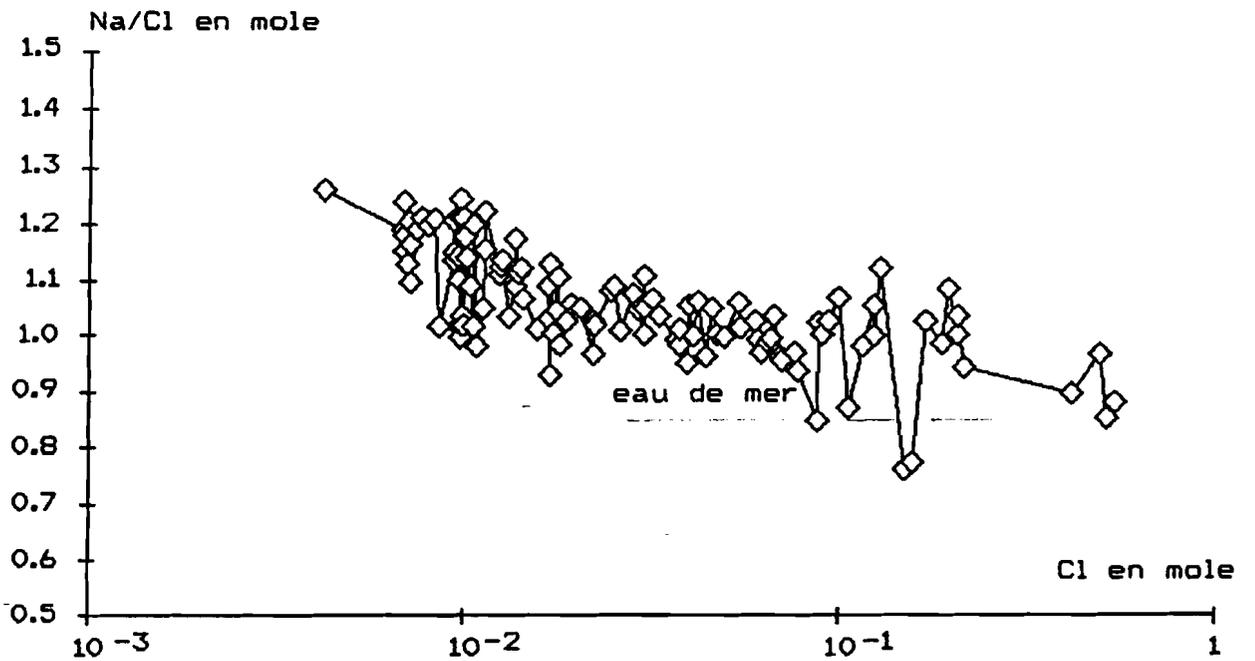


Fig. 27 - Evolution du rapport molaire Na/Cl en fonction des teneurs en Chlorures

Les teneurs en sodium varient de 0,12 à 11,2 g/l et celles des chlorures de 0,15 à 19,4 g/l. Les facteurs de concentration sont de 93 pour le sodium et de 130 pour les chlorures. *Les saumures finales ont des teneurs en chlorures et sodium identiques à celles de l'eau de mer (19,0 g/l de Cl et 10,5 g/l de Na).*

La figure 27 illustre l'évolution du rapport molaire Na/Cl en fonction des teneurs en chlorures. La décroissance est très nette: le rapport varie de 1,26 à 0,87. Les eaux qui présentent les taux de salinité les plus élevés se caractérisent par des concentrations molaires relatives en sodium et en chlorures (Na/Cl = 0,87) qui permettent de les identifier à de l'eau de mer (Na/Cl = 0,85).

Les eaux de la lame de submersion de la vallée du Ferlo , confinées en domaine continental à plus de 70 km de l'océan , évoluent vers une composition chimique d'eau de mer. Ce résultat est suffisamment remarquable pour qu'il soit indispensable de le confirmer par la matérialisation de précipitations de chlorures de sodium du type halite ou ClNa.

Les travaux de CARN (1985), sur l'évolution chimique des eaux du lac de Guiers concentrées par évaporation en laboratoire avaient montré que, si la précipitation d'halite était de règle dans les saumures finales, elle pouvait aussi s'organiser de manière prématurée (pour des minéralisations totales de l'ordre de 10 g/l), bien avant les phases ultimes de concentration des solutions. Il faisait alors état "d'un effet de pollution par l'évaporation

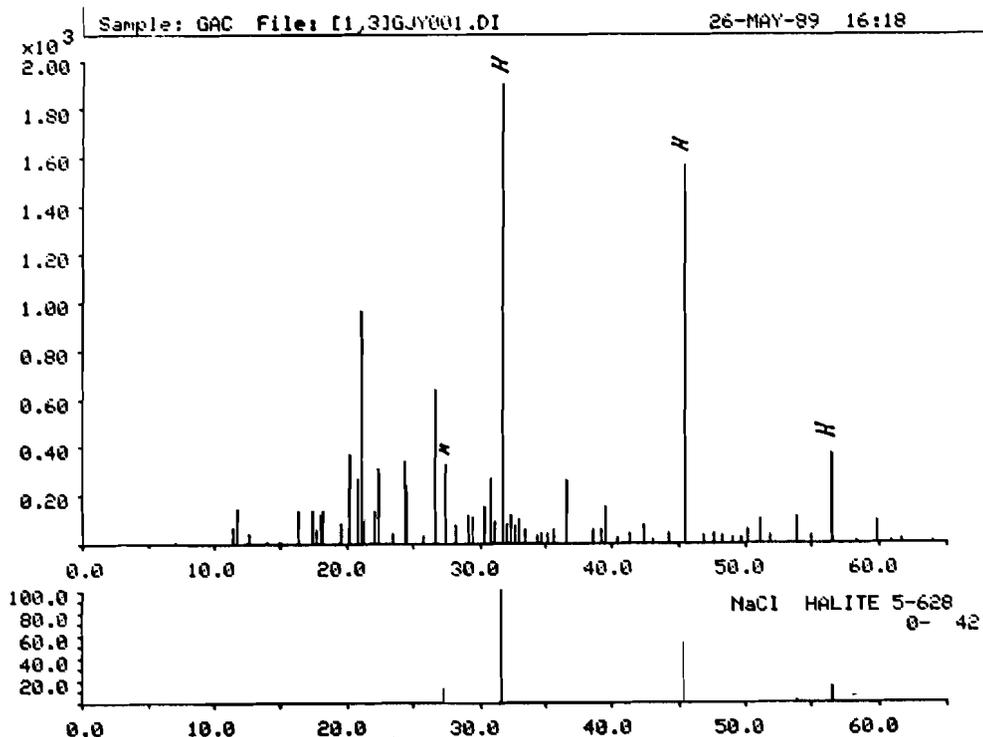


Fig. 28.- Diffractogramme mettant en évidence la présence d'Halite (H).

à sec d'une fine phase mouillante, retenue par la tension des parois et intervenant lors de l'abaissement du niveau de l'eau". Concrètement, dans le milieu naturel, ceci revient à prendre en compte les mares résiduelles de faible profondeur, en voie d'assèchement, et les efflorescences salines déposées en auréoles concentriques sur leurs pourtours.

La présence d'halite a ainsi été confirmée dans les échantillons de sels prélevés en mai 1989 aux alentours d'une petite étendue d'eau (salinité de 11,5 g/l) située à proximité de la station 21. Associée essentiellement au quartz, l'halite constitue le minéral prédominant dans les dépôts. Le diagramme de diffractométrie des rayons X de la figure 28 met en évidence la réflexion de base de l'halite (2,82 Å à 31°77) et les trois réflexions harmoniques principales qui se situent à 1,99 - 1,63 et 3,25 Å (45°50- 56°54 et 27°46). L'analyse chimique des dépôts indiquent une teneur de 22,6 % en Na₂O dans l'échantillon brut.

b) Les ions calcium et l'alcalinité (HCO₃ et CO₃)

L'alcalinité regroupe l'ensemble des espèces aqueuses susceptibles d'accepter des protons. Autrement dit, la réserve alcaline d'une solution se définit par la quantité d'ions H⁺ qu'il faut lui ajouter jusqu'à ce que toute nouvelle diminution du pH corresponde exactement à toute nouvelle addition d'ions H⁺. Dans la majorité des milieux aquatiques continentaux où les pH sont compris entre des valeurs de 4 et de 12, les ions d'acides faibles dominants sont H₂CO₃, HCO₃⁻ et CO₃⁼.

Prédominance des espèces carbonatées en fonction du pH:

3,9 ≤ pH ≤ 6,4	H ₂ CO ₃	< HCO ₃	< CO ₃
6,4 ≤ pH ≤ 8,3	HCO ₃	< H ₂ CO ₃	< CO ₃
8,3 ≤ pH ≤ 10,3	HCO ₃	< CO ₃	< H ₂ CO ₃
10,3 ≤ pH ≤ 12,3	CO ₃	< HCO ₃	< H ₂ CO ₃

Pour toutes les eaux du Ferlo, dont les pH sont compris entre 7,79 et 8,84 les ions bicarbonates (HCO₃⁻) et carbonates (CO₃⁼) constituent l'essentiel de l'alcalinité.

Les concentrations en calcium varient de 1,6 à 5,69 meq/l, soit de 32 à 114 mg/l (Fig.29). La teneur anormalement élevée de 9,01 meq/l (180 mg/l), notée pour l'eau 9F₁₅, correspond vraisemblablement à une erreur analytique. Le facteur de concentration est de 3,6. On retrouve ici le schéma classique d'évolution de l'ion calcium qui participe, dès les premiers stades de concentration des eaux, aux précipitations carbonatées dans le réseau de la calcite (CO₃Ca).

L'alcalinité est essentiellement représentée, dans la gamme de pH des eaux du Ferlo par les bicarbonates. Les teneurs s'échelonnent entre 4,5 meq/l (0,27 g/l) et 78,8 meq/l (4,8 g/l). La réserve alcaline finale correspond à un facteur de concentration de 17,5. Dans les solutions diluées, la courbe représentative de l'alcalinité s'infléchit, au moment de la précipitation du carbonate de calcium, puis les teneurs évoluent de manière aléatoire avant de croître à nouveau dans les saumures finales (Fig.29). Le rapport molaire Alc./Cl diminue rapidement, tout en demeurant supérieur au rapport molaire Ca/Cl (Fig.30).

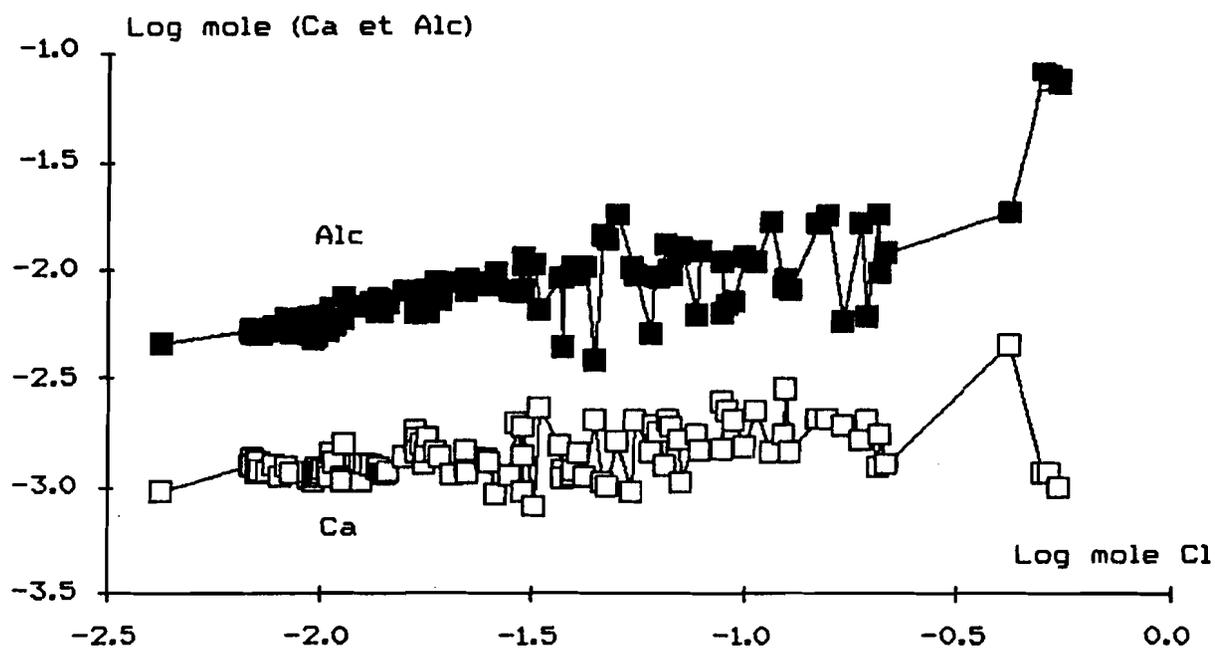


Fig. 29 - Evolution des teneurs en calcium et de l'alcalinité en fonction des teneurs en Chlorures

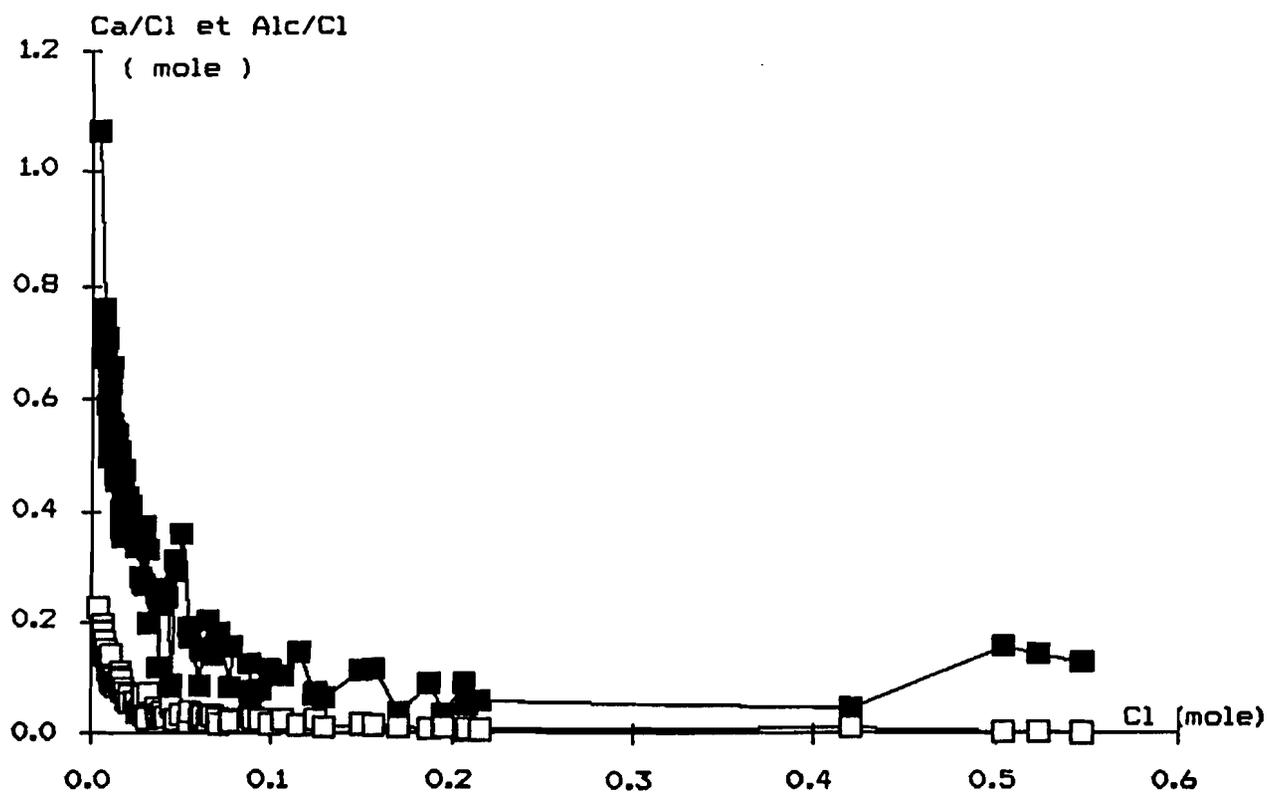


Fig. 30 - Evolution des rapports molaires Alc/Cl et Ca/Cl en fonction des Chlorures

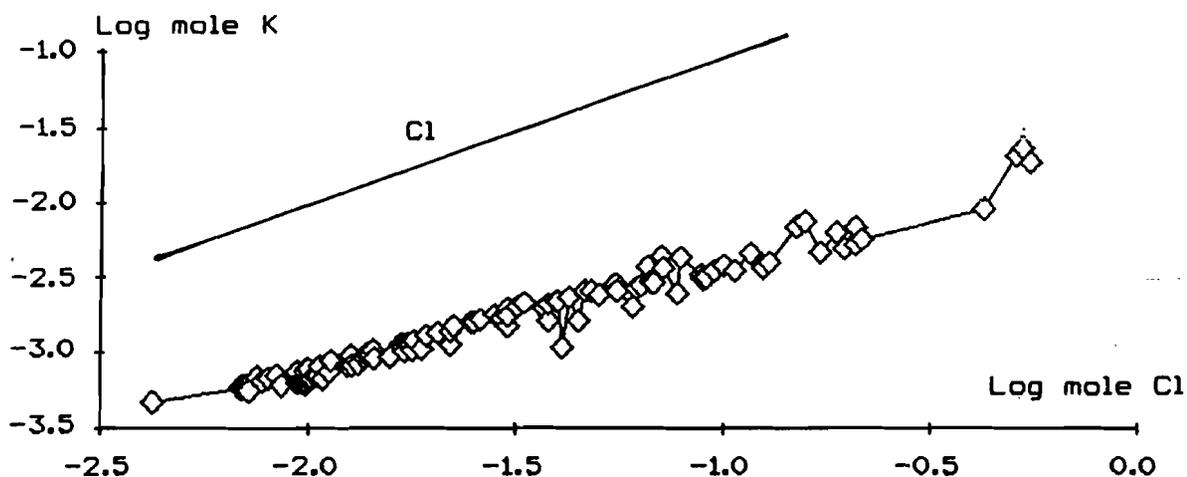


Fig. 31 - Evolution des teneurs en Potassium en fonction des teneurs en Chlorures

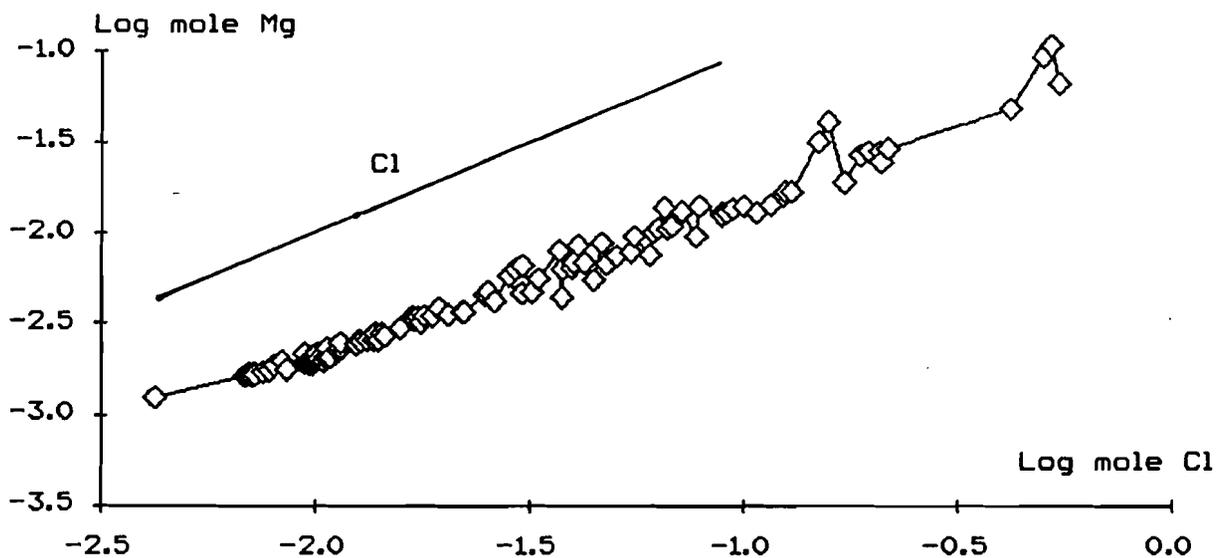


Fig. 32 - Evolution des teneurs en Magnésium en fonction des teneurs en Chlorures

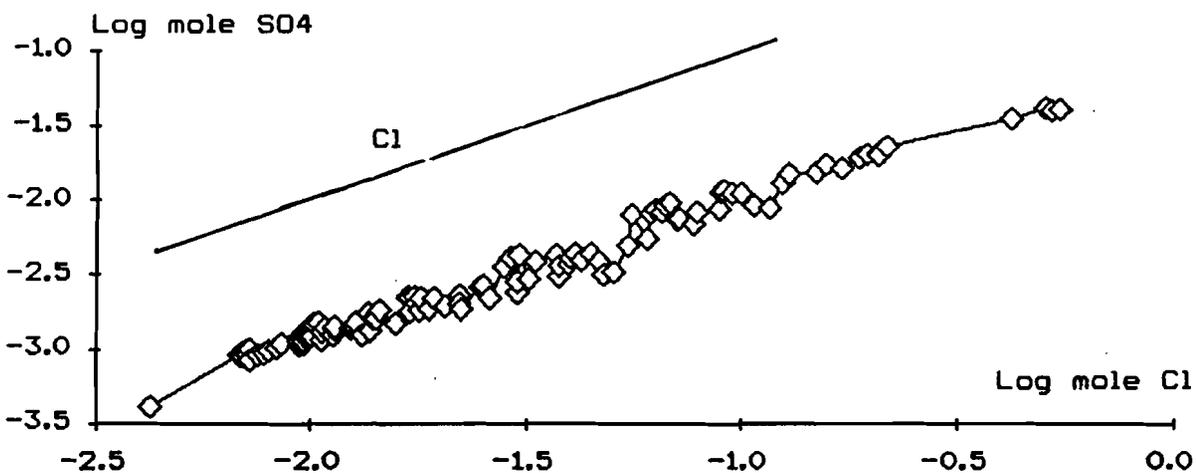


Fig. 33 - Evolution des teneurs en Sulfates en fonction des teneurs en Chlorures

c) Les ions magnésium, potassium et sulfates

Ces trois éléments se comportent de manière similaire. Leurs concentrations respectives augmentent linéairement avec les teneurs en chlorures (Fig.31, 32 et 33) Ils ne se différencient dans leur itinéraire chimique que par des facteurs de concentration différents : 51 pour K, 86 pour Mg et 101 pour SO_4 .

Les teneurs en potassium varient de 18 à 932 mg/l, celles du magnésium de 0,06 g/l à 5,17 g/l et les concentrations en sulfates de 0,08 à 8,02 g/l.

L'augmentation continue et importante des sulfates en solution indique que la précipitation de gypse ($SO_4 Ca$) est peu probable, la totalité du calcium ayant été précocement consommée dans la néoformation de calcite. Des études minéralogiques sur les efflorescences salines seraient nécessaire pour identifier éventuellement la formation de calcite magnésienne. Enfin l'évolution du potassium suggère une dépendance continue et son contrôle par des processus biochimiques; il constitue un élément essentiel du cycle biologique des macro et microphytes aquatiques.

d) La silice

L'évolution des teneurs en silice se différencie très nettement de celle des autres constituants; la tendance générale, mise en évidence par les figures 34 et 35, indique une décroissance progressive des concentrations de cet élément en solution.

La courbe représentative de la silice s'infléchit pour un facteur de concentration de l'ordre de 10 ($\log Cl = - 1,5$). Il s'agit également, sans que l'on puisse évoquer un déterminisme précis, du facteur de concentration qui correspond au début de la croissance exponentielle de la conductivité. L'existence d'un point d'inflexion amène à distinguer deux types de comportement de la silice dans la phase aqueuse:

- dans les solutions diluées, les teneurs en silice sont relativement stables autour d'une valeur moyenne de 30 mg/l avec cependant un écart type de 8 mg/l. Les concentrations varient entre les valeurs extrêmes de 44 mg/l et de 7 mg/l.

- dans les solutions les plus concentrées, les variations des teneurs sont extrêmement importantes de part et d'autre d'une valeur moyenne de 10,4 mg/l. Cette grande dispersion se traduit par un écart type de 10 mg/l. Au cours de cette phase, les teneurs en silice dissoute peuvent être nulles.

Il est vraisemblable que ces deux comportements de la silice sont dépendants d'une consommation permanente de cet élément par des processus géochimiques et biologiques. La silice serait sollicitée dans la néoformation d'édifices silicatés (du type smectites et / ou d'une phase amorphe) ou consommée par les diatomées et les macrophytes aquatiques.

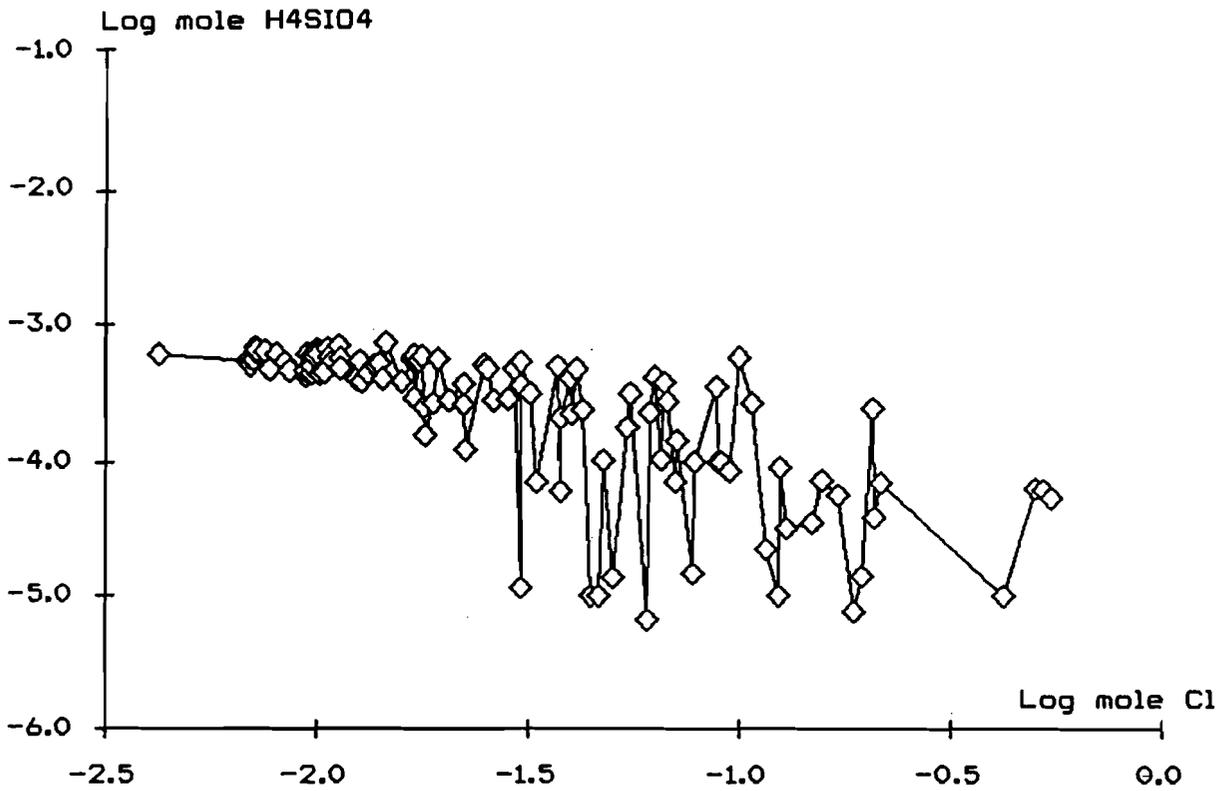


Fig. 34 - Evolution des teneurs en Silice en fonction des teneurs en Chlorures

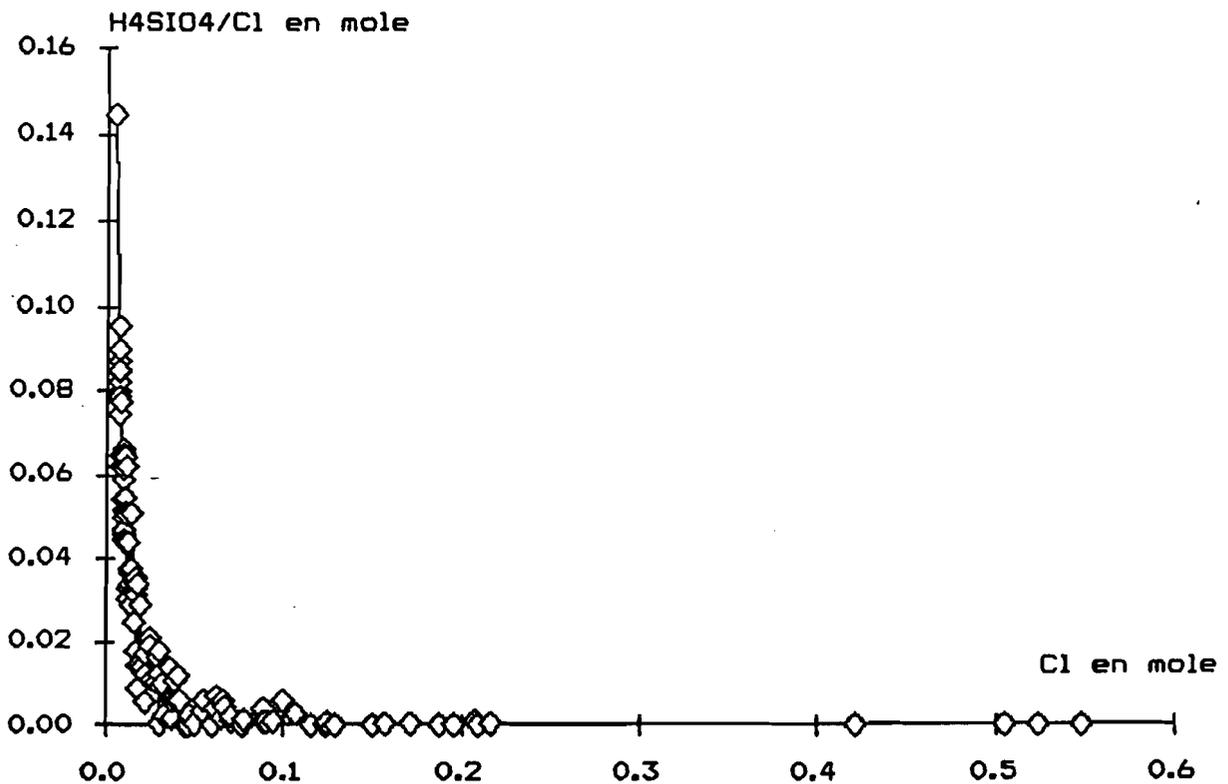


Fig. 35 - Evolution du rapport H4SiO4/Cl en fonction des teneurs en Chlorures

4. Le concept d'activité ionique et les équilibres thermodynamiques

Qu'elle soit météorique, de nappe ou hydrothermale l'eau est d'abord un solvant. En solution, les éléments sont présents sous forme d'ions simples, de paires d'ions ou d'ions complexes. Les résultats de l'analyse chimique d'une solution aqueuse peuvent s'exprimer de différentes façons: ainsi dans le passé les teneurs étaient données en oxydes (Na_2O , P_2O_5 ...), en sels (NaCl , CaSO_4), puis en ions simples (Na^+ , Cl^- ...) ou concentrations totales des éléments en solution.

L'application de la loi d'action de masse aux réactions d'équilibre entre les ions et les ions complexes d'une part, et entre les ions et les minéraux susceptibles de se former d'autre part, a nécessité de faire appel à une autre grandeur l'activité.

Dans les solutions très diluées, l'activité et la concentration (molarité: moles d'ion/litre; molalité: moles d'ion par kg d'eau) se confondent. Dans les solutions concentrées, les distances entre les ions sont faibles et les interactions deviennent importantes entre les molécules du solvant et les espèces dissoutes. L'activité est différente de la concentration et liée à celle-ci par la relation:

$$a_i = \tau_i \cdot m_i$$

a : activité de l'ion i
 τ : coefficient d'activité de l'ion i
 m : molalité ou concentration (moles/kg d'eau)

Dans la majorité des cas, τ est $<$ à l'unité : l'activité est plus faible que la molalité et d'autant plus que les saumures sont concentrées. Le coefficient d'activité dépend pour chaque ion de sa charge et de la force ionique I de la solution, c'est à dire de l'abondance des différents ions en solution:

$$I = 1/2 \sum m_i Z_i^2 \quad - \log \tau_i = A Z_i^2 \sqrt{I} / 1 + a_i^\circ B \sqrt{I} - B^\circ I$$

Z_i : charge de l'ion i
 A et B : constantes caractéristiques du solvant
 a° : coefficient lié au diamètre de l'ion hydraté i
 B° : coefficient qui dépend de la température et de la nature des ions en solution.

En définitive, la précipitation de minéraux secondaires par l'intermédiaire de solutions aqueuses fait appel à des relations thermodynamiques qui figent temporairement et de manière fictive, des équilibres réversibles, conservation de masse, lois d'action de masse, relations entre activités et molalités. Elles conduisent à prévoir, dans des environnements évolutifs, les comportements instantanés ou peu différés qui conduisent des écosystèmes aquatiques en cours de concentration, vers une stabilité géochimique provisoire.

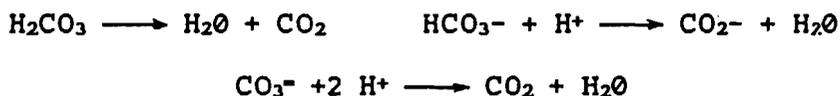
La complexité des calculs pour l'évaluation des coefficients d'activité ou pour quantifier les transferts de masse a abouti à l'élaboration de programmes informatiques due en premier lieu à l'école américaine (HELGESON, 1968; 1970) et HELGESON et al (1969, 1970). Leur adaptation aux cas concrets, les plus fréquents dans le milieu naturel, a été réalisée par

FRITZ (1975) par la mise au point du programme EQUIL. Ce programme calcule la distribution des éléments entre les ions simples et les ions complexes, puis détermine le degré de saturation de chaque solution par rapport à un répertoire de minéraux.

A titre d'exemple, le tableau IV indique la distribution des espèces aqueuses dissoutes de l'eau 3F₂₁ de la lame de submersion du Ferlo. Cette solution a une force ionique *I* de 0,078, un pH de 8,73, une pression partielle de CO₂ de 0,00117 atmosphère (log fugacité CO₂ = -2,933) et une charge totale de 4,737 g/kg H₂O.

Les activités des ions libres (Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, CO₃⁻ et SO₄⁻) sont inférieures aux molalités et aux concentrations données par l'analyse. Pour les ions libres, les coefficients d'activité s'échelonnent entre 0,39 pour les sulfates (SO₄) et 0,80 pour les chlorures (Cl). C'est l'activité des ions libres qui permet de tester l'état de saturation des solutions par rapport aux sels susceptibles de précipiter.

La validité de la distribution entre les différentes espèces aqueuses peut être contrôlée à partir de la réserve alcaline. On prend en compte les réactions faisant intervenir les formes carbonatées et les constantes d'équilibre qui les régissent. L'activité de l'eau est de 0,997 (soit équivalente à l'unité) et le milieu est considéré comme ouvert, au contact de l'atmosphère qui constitue un réservoir infini de CO₂, à pression partielle constante (*p* CO₂ = 0,0004 atmosphère et log *p* CO₂ = 10^{-3,5}).



La loi d'action de masse appliquée à ces réactions donne:

$$\log p \text{CO}_2 - \log [\text{H}_2\text{CO}_3] = + 1,46$$

$$\log p\text{CO}_2 - \log [\text{HCO}_3^-] - \log [\text{H}^+] = + 7,81$$

$$\log p\text{CO}_2 - \log [\text{CO}_3^-] - 2 \log [\text{H}^+] = + 18,13$$

Les proportions relatives des espèces carbonatées les plus abondantes (carbonates et bicarbonates) ne dépendent que de la valeur du pH :

$$\log [\text{CO}_3^-] - \log [\text{HCO}_3^-] = -10,32 - \log [\text{H}^+]$$

Les activités calculées (Tableau IV) des ions libres carbonatés HCO₃⁻ et CO₃⁻ (0,00968 et 0,00025) vérifient bien la valeur du pH:

$$- \log [\text{H}^+] = \text{pH} = 10,32 + 2,014 - 3,604 = 8,73$$

Tableau IV

Distribution des espèces aqueuses dissoutes de l'eau (3F21) de la lame de submersion du Ferlo.

(la neutralité électrique est ajustée avec les teneurs en Sodium)

Espèce aqueuse	molalité (x 10 ³)	activité (x 10 ³)	coefficient d'activité
K ⁺	2,42505	1,889	0,78
KCl°	< 0,00072	< 0,00074	1,02
KSO ₄ ⁻	0,01423	0,0112	0,78
Σ	2,440		
Na ⁺	52,9897	42,007	0,80
NaCl°	0,2269	0,231	1,02
NaCO ₃ ⁻	0,2438	0,195	0,80
NaSO ₄ ⁻	0,5179	0,413	0,80
NaHCO ₃	0,2247	0,229	1,02
Σ	54,2030		
Ca ²⁺	1,2199	0,528	0,43
CaCO ₃ °	0,2043	0,208	1,02
CaHCO ₃ ⁺	0,1153	0,093	0,81
CaSO ₄	0,0904	0,092	1,02
CaOH ⁺	< 0,0001	< 0,001	0,79
Σ	1,6300		
Mg ²⁺	5,2625	2,489	0,47
MgCO ₃ °	1,5279	1,556	1,02
MgHCO ₃ ⁺	0,2416	0,192	0,79
MgSO ₄ °	0,3716	0,379	1,02
MgOH ⁺	0,0064	0,005	0,79
Σ	7,4100		
H ₄ SiO ₄ °	1,1808	1,203	1,02
H ₃ SiO ₄ ⁻	0,1292	0,102	0,79
Σ	1,3100		
SO ₄ ²⁻	2,2157	0,855	0,39
HSO ₄ ⁻	<< 0,0001	<< 0,001	0,79
CO ₃ ²⁻	0,6252	0,249	0,40
HCO ₃ ⁻	12,1267	9,687	0,80
H ₂ CO ₃ °	0,0396	0,040	1,02
Cl ⁻	50,0223	38,971	0,78

Enfin, à partir de la distribution de toutes les espèces aqueuses, le programme détermine le produit ionique ($\log Q$) correspondant à chaque minéral à partir des activités des ions servant de référence dans le calcul du produit de solubilité ($\log K$). La différence $\log K - \log Q$ fixe le degré de saturation de la solution vis à vis de tel ou tel minéral. Ce degré de saturation est testé pour tous les minéraux dont l'ensemble des éléments constituants sont représentés dans la solution.

Ainsi, dans l'exemple choisi, la solution est sursaturée vis à vis de la calcite (CO_3Ca), de la magnésite (MgCO_3), du talc [$\text{Si}_4\text{Mg}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$]. Elle est sous-saturée vis à vis du gypse, ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de l'halite (NaCl), de la sylvite (KCl).

IV. APERCU SUR LES ANALOGIES ET LES DIVERGENCES D'EVOLUTION GEOCHIMIQUE DES EAUX DU LAC DE GUIERS (SUPERFICIELLES ET INTERSTITIELLES), DE LA LAME DE SUBMERSION DU FERLO ET DES DONNEES EXPERIMENTALES.

A.- EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE SURFACE DU LAC DE GUIERS

De nombreuses campagnes de prélèvement, 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 du lac de Guiers avant la mise en place des grands barrages sur le fleuve Sénégal.

1. Les paramètres physiques

La conductivité des eaux de surface augmente pendant la phase d'isolement du lac et diminue, bien entendu, en période de remplissage par les eaux très diluées du fleuve Sénégal. Elle oscille entre $80 \mu\text{S}$ (fin du remplissage) et 15 mS dans les mares résiduelles terminales de la partie sud en fin de saison sèche. La minéralisation totale varie de $0,09$ à $6,5 \text{ g/l}$.

Les variations du pH sont illustrées par la figure 36. Il décroît de $7,6$ à $7,1$ jusqu'à un facteur de concentration des eaux du lac de 10 qui correspond à une minéralisation d'environ $0,5 \text{ g/l}$. Il augmente ensuite régulièrement pour atteindre des valeurs de 9 dans les saumures finales.

2. La composition moyenne des eaux de surface

En tenant compte de la répartition des volumes liée aux différents sites de prélèvements, il a été possible d'évaluer, pour chaque cote du plan d'eau, la composition chimique moyenne à un instant donné. Le tableau V résume les résultats obtenus aux cotes $- 1,15 \text{ m}$, $- 0,50 \text{ m}$, $+ 0,50 \text{ m}$ et $+ 1,50 \text{ m}$.

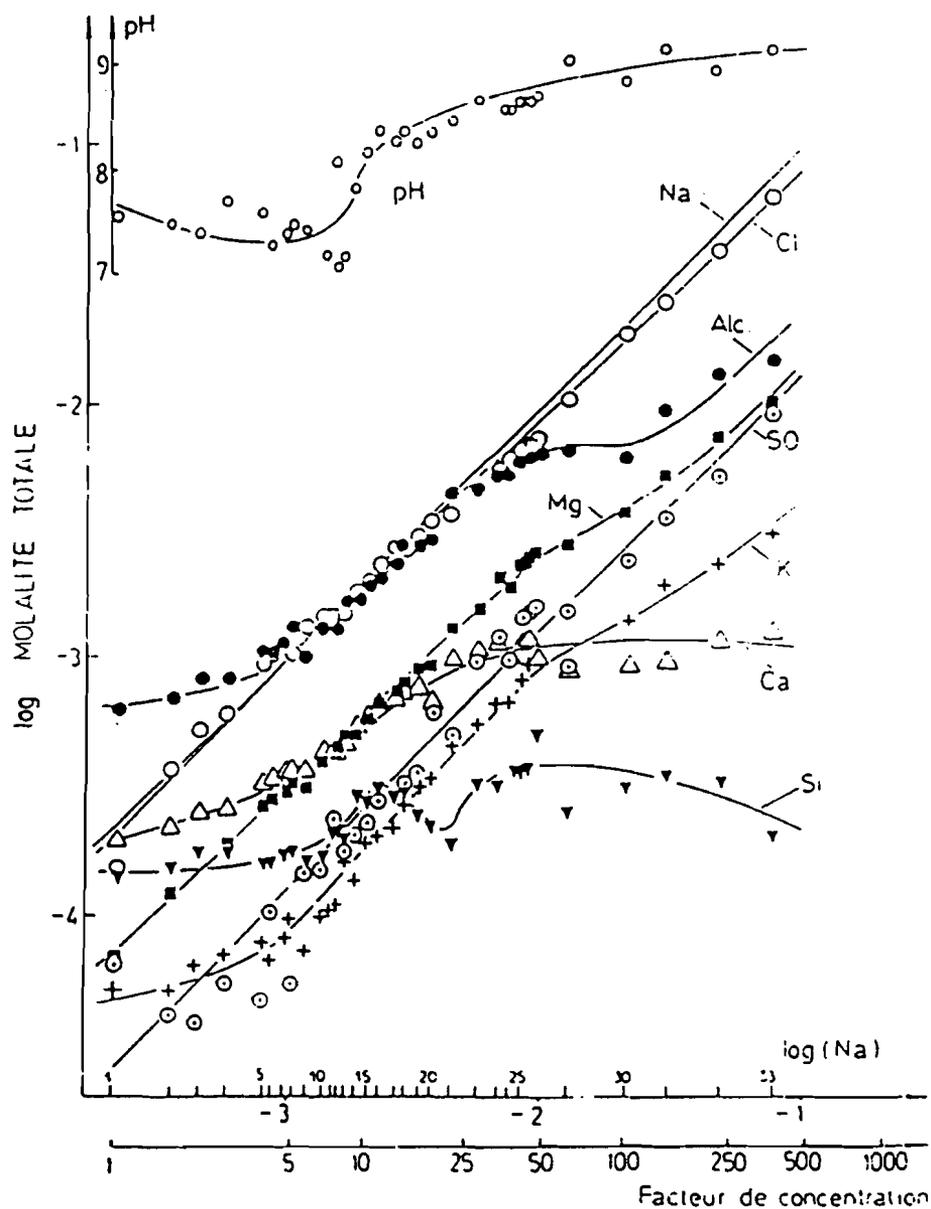


Fig. 36 - Evolution spatio-temporelle de la composition chimique des eaux de surface du lac de Guilers (COGELS et GAC, 1983). Les teneurs en sodium (log molalité totale) précisent les facteurs de concentration.

Tableau.V - Composition chimique moyenne des eaux du lac de Guiers (en mg/l) aux cotes -1,15; - 0,5; + 0,5 et + 1,5 m IGN.

Eléments	-1,15	-0,5	+0,5	+1,5
Cl ⁻	184,3	119,5	65,9	45,5
SO ₄ ⁻	75,8	32,8	17,1	11,0
HCO ₃ ⁻	200,7	151,2	109,4	93,3
Σ anions	10,1	6,5	4,0	3,0
Ca ⁺⁺	42,4	25,0	18,5	16,0
Mg ⁺⁺	28,4	19,9	12,6	9,8
K ⁺	14,4	9,4	6,5	5,3
Na ⁺	121,2	80,6	43,2	28,8
Σ cations	10,1	6,6	4,0	3,0

3. Itinéraire chimique des eaux de surface du lac de Guiers

L'évolution des teneurs en solution des différents éléments, au fur et à mesure que les eaux se concentrent par évaporation, est indiquée sur la figure 36.

- le sodium, les chlorures et les sulfates suivent des voies identiques en augmentant régulièrement avec le facteur de concentration. Ces éléments ne participent donc, en principe, à aucune précipitation chimique.

- les courbes représentatives de l'évolution des teneurs de l'alcalinité, du magnésium, du potassium et du calcium se caractérisent, à des taux de concentration différents, par des fléchissements plus ou moins marqués. Tous ces éléments sont concernés par des précipitations chimiques. Pour le potassium et le magnésium celles-ci se produisent dans les dernières phases de concentration. L'alcalinité et le calcium présentent deux épisodes distincts: en milieu dilué, la précipitation de calcite est certaine; en milieu concentré, il pourrait s'agir de piégeages concomitants du calcium et du magnésium dans une calcite magnésienne (GAC, 1980).

-- La courbe schématisant l'évolution des teneurs en silice montre qu'elles demeurent constantes jusqu'à un taux de concentration de 10. Par la suite, cet élément augmente puis diminue avant de croître à nouveau pour atteindre dans les saumures finales une valeur proche de la teneur initiale.

Les eaux du lac de Guiers évoluent progressivement d'un faciès carbonaté calcique vers un faciès chloruré sodique.

B.- COMPOSITION PHYSICOCHEMIQUE DES EAUX DES SEDIMENTS SOUS LACUSTRES.

L'étude des eaux interstitielles des sédiments du lac de Guiers a été réalisée au moment de l'assèchement exceptionnel de la dépression lacustre en juin 1983. La partie submergée se réduisait alors à une étendue d'eau de quelques dizaines de km² dans la zone Nord (H = - 1,15 m -IGN). Les résultats de près de 266 sondages analysés par GAC et al. (1985) et BAMBA (1985), ont montré que globalement l'évolution chimique des eaux des sédiments présentait de nombreuses analogies avec celle des eaux libres de surface (Fig.37).

1. Les paramètres physiques

La conductivité des eaux interstitielles varie de 0,38 à 32 mS. Ces valeurs extrêmes correspondent à des minéralisations totales de l'ordre de 0,27 et de 25,7 g/l. Les aquifères de sub-surface les plus concentrés sont localisés au niveau des sédiments de la partie centrale du lac.

L'éventail des pH, mesurés *in situ* est important: de 4 à 8,8 . Les eaux à acidité prononcée se limitent cependant à quelques aquifères de la rive Ouest de la partie centrale de la dépression lacustre.

2. La composition moyenne des eaux interstitielles

La composition moyenne des eaux interstitielles des sédiments du lac de Guiers est indiquée dans le tableau VI. Les eaux ont été arbitrairement regroupées par secteurs géographiques: extrême nord, zone nord, zone centrale, zone sud et extrême sud. Il existe, pour l'ensemble des aquifères des sédiments du lac, un gradient spatial de salinité (dans le sens nord-sud) qui se surimpose à un augmentation de la minéralisation entre les positions hautes dans la topographie et les zones déprimées.

Tableau VI.- Composition chimique moyenne (en mg/l) des eaux des sédiments du lac de Guiers .

Région	Extrême Nord	Zone Nord	Zone centre	Zone Sud	Extrême Sud
Cl ⁻	314,8	160,2	1237,2	1973,8	2239,7
SO ₄ ⁼	445,7	51,9	1193,1	2102,2	1847,7
Alc	184,3	194,3	169,5	189,0	383,2
Σ ⁻	21,2	8,8	62,5	102,5	108,2
Ca ⁺⁺	70,1	38,3	125,4	214,4	229,3
Mg ⁺⁺	47,1	22,3	213,2	319,0	229,3
K ⁺	30,1	14,9	51,6	75,5	82,9
Na ⁺	296,1	107,4	832,0	1437,3	1556,4
Σ ⁺	21,0	8,8	61,3	101,4	105,0
Salinité	1426,1	610,1	3855,9	6341,3	6663,3

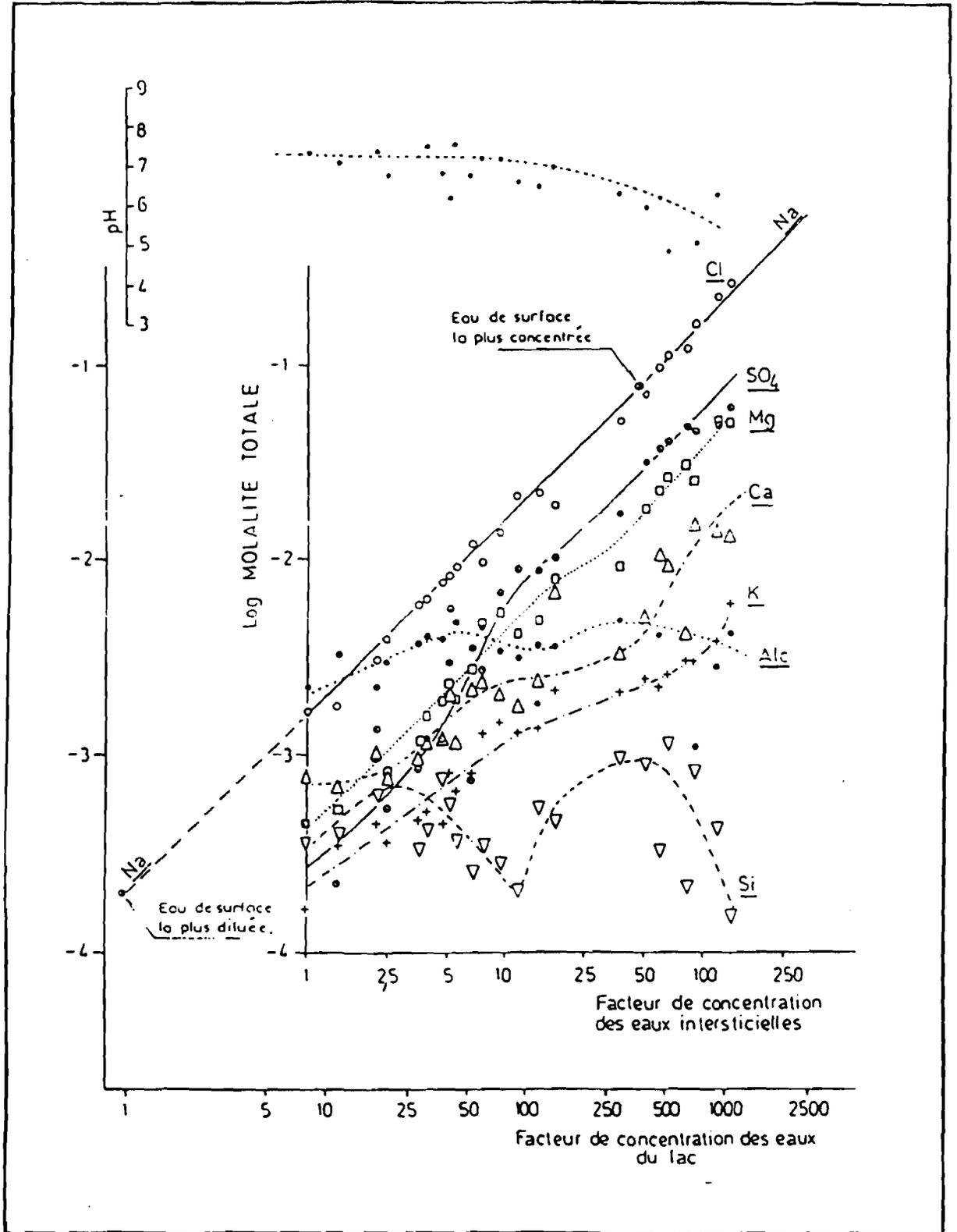


Fig. 37 - Evolution de la composition chimique des eaux des sédiments du lac de Guiers en fonction du facteur de concentration (log molalité Na) selon GAC et al. (1985).

3. Itinéraire chimique des eaux interstitielles

L'évolution des différents éléments est indiquée sur la figure 37. Les courbes ont été tracées en procédant à des regroupements basés sur les teneurs en sodium (pris ici comme indicateur du facteur de concentration).

- les chlorures et le sodium suivent des itinéraires identiques; ils augmentent régulièrement. Le calcul du rapport molaire Na/ Cl, pour l'ensemble des eaux interstitielles, indique que trois secteurs seulement ont un rapport proche de celui de l'eau de mer. En première analyse, ces trois cas singuliers peuvent être considérés comme des particularismes locaux. Il faut cependant remarquer, sans interprétation possible pour l'instant, qu'ils font ressortir du paysage les trois principaux seuils topographiques de la dépression lacustre: ceux de Foss, de Sier et de Diaménar.

- les courbes représentatives des autres éléments montrent des fléchissements plus ou moins marqués et à des taux de concentration différents: c'est le cas pour le magnésium, le calcium, le potassium, les osulfates mais aussi pour le pH qui reste stable jusqu' à un facteur de concentration de 30 avant de décroître.

- Les comportements de la silice et de l'alcalinité ne semblent obéir à aucun déterminisme géographique. L'évolution des teneurs apparaît complexe et parfois inattendue. Les formes carbonatées ou la réserve alcaline sont relativement stables. La silice intervient certainement dans les cycles biogéochimiques.

C.- EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DU LAC DE GUIERS CONCENTREES EXPERIMENTALEMENT PAR EVAPORATION

Cette expérience d'évaporation de 9 mois a été réalisée, en 1984 par CARN (1985), au laboratoire de Géochimie de l'ORSTOM au centre de Dakar-Hann. La solution initiale (120 litres), en provenance de la partie Nord du lac, a été prélevée en juin 1983 au moment de l'un des plus bas niveaux, jamais observé du plan d'eau (cote: -1,15 IGN).

L'eau originelle présentait les caractéristiques suivantes: pH = 8,1; conductivité = 1,13 mS, minéralisation totale de 0,7 g/l, force ionique de 0,012 et une pression partielle de CO₂ de 10^{-2,861} atmosphère.

1. L'activité biologique

L'échantillon d'eau a été préalablement débarrassé des suspensions minérales et organiques par centrifugation. Néanmoins, des microorganismes demeurés à l'état quiescent sous forme d'algues et de bactéries se sont développés tout au long de l'expérience, donnant à la solution finale une coloration vert tendre.

Outre quelques bactéries coccoïdes et filamenteuses, des cyanophycées (*Lungbya angustissima*, *L.limnetica*, *Oscillatoria brevis*, *O.quadripunctulata*, *O.tenins*) et des diatomées (*Fragilaria construens*, *Melosira granulata*, *Nitzschia amphibia*, *N.frustulum*, *N.palea*), l'essentiel du plancton était constitué par une petite algue verte unicellulaire: *Nannochloris coccoïdes*. L'action des

bactéries dénitrifiantes suivie ou non d'une volatilisation de l'azote a provoqué une rapide diminution des nitrates et des nitrites et une croissance progressive des ions ammoniums.

2. Les paramètres physiques (pH et conductivité)

Les eaux conservent tout au long de l'expérience un caractère basique. Les pH observés augmentent de 8,07 à 8,85. Certaines fluctuations seraient à imputer à des processus biologiques qui en interférant sur la pression partielle de gaz carbonique provoqueraient une diminution du pH.

La conductivité augmente régulièrement passant de 1,13 à 42,7 mS en cours d'évaporation. Elle varie linéairement avec la force ionique (I). L'équation de la droite de régression liant ces deux variables est analogue à celle déterminée par GAC (1980) au cours d'une expérience d'évaporation similaire conduite sur les eaux du Chari au Tchad:

$$\text{lac de Guiers:} \quad \log I = 1,056 \log \text{Cond.} + 1,019$$

$$\text{lac Tchad} \quad : \quad \log I = 1,093 \log \text{Cond.} + 1,058$$

3. L'aiguillage chimique des solutions

La figure 38 schématise l'évolution des différents éléments au cours de l'évaporation. Rappelons que lorsqu'aucun sel ne précipite, les teneurs augmentent progressivement. S'il y a dépôt d'un minéral, l'évolution des éléments constitutifs de ce minéral va dépendre du rapport pondéral dans les phases liquides et solides.

- le sodium, les chlorures et le potassium suivent des évolutions parallèles: ces éléments se concentrent jusqu'aux phases finales et se maintiennent à l'état dissous. On rappellera cependant ici la précipitation inhabituelle et pour des causes particulières de l'halite (ClNa).

- les teneurs en calcium augmentent régulièrement jusqu'à un facteur de concentration de 2. La courbe représentative du calcium présente ensuite une succession de paliers (teneur constante) et de points d'inflexion. Vers un facteur de concentration de 20 (minéralisation de l'ordre de 15 g/l), les teneurs augmentent de nouveau. Les courbes d'évolution de l'alcalinité et du calcium sont tout à fait comparables et cet étroit parallélisme traduit la précipitation de calcite. Elle se produit de façon continue mais avec une importance inégale à chaque étape: il est aussi très probable que les dernières matérialisations de calcite incorporent dans leur réseau une part non négligeable de magnésium.

- après une première phase d'ascendance régulière et linéaire, la courbe de la silice s'infléchit et marque un palier pour des teneurs proches (120 à 130 mg/l) du seuil de saturation de la silice amorphe.

- la progression constante des sulfates n'est interrompue que dans les termes les plus concentrées avec les premières manifestations de gypse ($\text{SO}_4 \text{ Ca}, 2\text{H}_2\text{O}$).

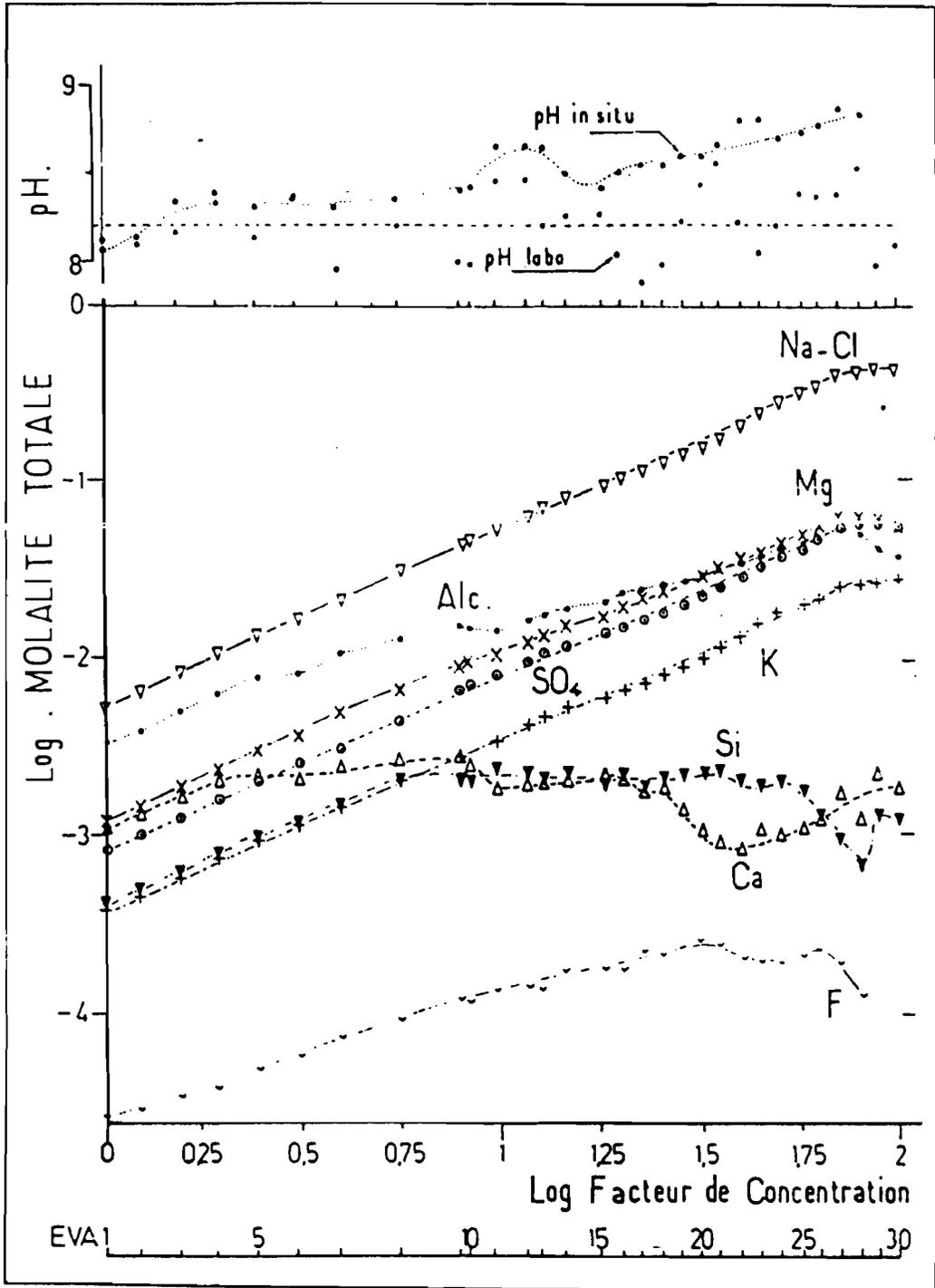


Fig. 38 - Evolution de la composition chimique des eaux du lac de Guliers concentrées par évaporation en laboratoire (CARN, 1985).

D.- ANALOGIES ET DIVERGENCES D'EVOLUTION CHIMIQUE

Les eaux de surface du lac de Guiers, les eaux de la lame de submersion du Ferlo et les eaux de la simulation en laboratoire, concentrées par évaporation, suivent à tous points de vue, des itinéraires chimiques remarquablement identiques. Issues de milieux hétérogènes, les eaux interstitielles, qui fournissent à un instant donné, le "spectre spatial" de la chimie des aquifères ne présentent, de façon étonnante, que des comportements partiellement divergents pour l'alcalinité et le calcium.

Quelles que soit leur origine et leur environnement initial toutes les solutions diluées, qui aboutissent à des degrés de minéralisation très variables dans les saumures terminales, s'orientent au cours de leur évolution vers un faciès chloruré sodique. Les processus géochimiques et biochimiques qui contrôlent les bilans dynamiques des diverses substances seraient ici d'une remarquable constance.

Les chlorures et le sodium suivent des voies identiques; ils ne participent à aucun cycle biogéochimique et leurs teneurs respectives augmentent régulièrement en solution.

Le magnésium, le potassium et les sulfates ont des comportements très voisins. Ces éléments demeurent en solution jusqu'à des taux de salinités élevés. Dans les phases ultimes de concentration, la croissance moins rapide des teneurs a été attribuée à la participation du potassium dans le cycle biologique des macrophytes, du magnésium dans les néoformations argileuses et carbonatées, des sulfates dans la précipitation tardive de gypse.

L'alcalinité et le calcium sont associés dans le système H_2O-CO_2-CaO . Chaque environnement impose ses contraintes et l'évolution des teneurs de chaque constituant est dépendante d'une part, des proportions initiales dans la solution-mère et dans les minéraux susceptibles de se former d'autre part. Quand un minéral comme la calcite précipite, les rapports des concentrations des ions impliqués (Ca^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} et H^+) se modifient. Les réactions font aussi intervenir la pression partielle de gaz carbonique qui peut-être constante (eaux de surface) ou variable (eaux interstitielles).

La silice dissoute présente dans tous les cas étudiés un comportement similaire; les concentrations restent stables ou diminuent avec le facteur de concentration. L'évolution de cet élément est sous le double contrôle de processus géochimiques et de cycles biologiques.

CONCLUSIONS GENERALES

L'étude du cadre physique du Ferlo, les recherches historiques sur quelques documents cartographiques de la vallée du Sénégal établis entre le XVII^{ème} et le XX^{ème} siècle, l'analyse de la variabilité du fonctionnement hydrologique du Ferlo et la reconnaissance géochimique des eaux de la lame de submersion de sa vallée fournissent des enseignements nouveaux.

Après 32 années de sécheresse et d'alimentation exclusive par les eaux de pluie, la vallée du Bas-Ferlo ou Bounoum a été remise en eau le 20 septembre 1988. Jusqu'au 28 octobre 1988, crues et décrues du Sénégal, ont engendrées le mouvement des masses d'eau qui se sont écoulées librement et par simple gravité entre le fleuve Sénégal, le lac de Guiers et la vallée du Ferlo. L'ensemble du dispositif aquatique a fonctionné selon le principe des vases communicants, recherchant à tout instant un état d'équilibre différé par le flux et le reflux des eaux fluviales dans la dépression lacustre.

Les chroniques historiques ont montré les progrès successifs dans la connaissance géographique de la région du lac de Guiers et de la vallée du Ferlo. La première localisation précise du lac de Guiers sur un document cartographique date du début du XVII^{ème} siècle. Relié au fleuve Senega par la rivière Portugaise (la Taoué), il portera successivement les noms de lac de Panier Foule, lac de Pania Fouti, lac de Panié Foule. Les appellations modernes (lac de N'Gher ou Ghier ou Guier puis Guiers, désert de Nbou-noun puis Bounoum , désert sans eau puis Ferlo) sont précisées peu avant 1850. La configuration du lit mineur du Ferlo apparaît nettement à partir de 1719. Les transcriptions manuscrites sur les documents retracent ensuite son histoire hydrologique avec son cortège de phases sèches et humides: en 1756, " zone qui s'assèche pendant l'hiver et estensemencé" ou encore, un siècle plus tard en décembre 1854, " bateau à vapeur le Guet Ndar dans le Ferlo".

Le bassin versant du Ferlo, " sans lit véritablement fonctionnel " à notre époque, commence à se dessiner à plus de 500 km en amont du lac de Guiers. Les remontées d'eau fluviale ou océanique sont cependant restées le plus souvent cantonnées dans la partie aval du Bounoum, dont les zones déprimées se situent en contrebas du niveau moyen des mers. Son histoire géologique est intimement liée à celle de la basse vallée du Sénégal, environnement fluvio-marin développé au quaternaire sur la marge ouest-africaine après avoir été soumis aux transgressions marines du secondaire et du tertiaire. Les grès du Continental terminal forment une assise discontinue et transgressive sur les formations calcaires du paléocène et cette ossature du relief, recouverte par les sables quaternaires, a modelé le paysage actuel lui donnant son aspect vallonné de dunes, de terrasses, de levées et de cuvettes de décantation. Les hauteurs topographiques sont occupées par des sols minéraux bruts et des sols peu évolués, les points bas par des sols hydromorphes et halomorphes.

Le climat de type tropical se caractérise par de profonds contrastes saisonniers liés à la migration de la zone intertropicale de convergence. En saison d'hiver, les variétés de temps sont assujetties au type d'alizé dominant: maritime, maritime continentalisé, continental de Nord-Est et Harmattan. En saison d'été, la vallée est sous l'influence du régime de mousson avec ses zones de perturbations mobiles (lignes de grains), de pluies continues et de pluies faibles et éparses. Les précipitations moyennes annuelles au centre du bassin versant s'élèvent à 463 mm (1934- 1988): l'irrégularité du régime pluviométrique transparaît dans la comparaison des valeurs extrêmes de 1983 (190 mm) et de 1936 (854 mm).

En ne tenant compte que des grandes étapes et des interventions anthropiques majeures au cours de ce siècle, 14 événements ont marqué de manière durable l'environnement du lac de Guiers et du Ferlo. Dans l'ordre chronologique on relève : l'état naturel (avant 1916), les premiers aménagements sur la Taoué (1916-1947), la construction du pont barrage de Richard - Toll (1947), la mise en place des casiers rizicoles (1947-1956), la construction de la digue de Keur Momar Sarr (1956), l'implantation de la canne à sucre (1970), la construction de l'usine de traitement des eaux (1971), la rectification du cours de la Taoué (1974/1975), la construction du second barrage sur la Taoué (1980), l'édification du barrage de Rheune I sur le Sénégal (1983) et de Rheune II (1984), l'achèvement des barrages de Diama (1985) et de Manantali (1987), l'inondation de la vallée du Ferlo (du 20 septembre au 25 octobre 1988).

Depuis un siècle, le fonctionnement hydrologique du lac de Guiers et de la vallée du Ferlo a profondément évolué sous l'effets d'aménagements de plus en plus élaborés. Chaque changement a introduit des conditions nouvelles et le jeu de nouveaux paramètres dont il est malaisé, à posteriori, de mesurer l'incidence exacte qu'ils ont pu avoir sur les oscillations des plans d'eau. Cette succession d'événements souligne la difficulté d'une tentative de reconstitution séculaire du bilan hydrologique du Ferlo. En résumé quatre types de situations sont à analyser: l'état naturel avant 1916, le stade intermédiaire de 1916 à 1956, l'assèchement de 1956 à 1988 et l'état actuel "le renouveau " depuis 1988.

La libre circulation des eaux fluviales établie pendant 35 jours, via le lac de Guiers, a provoqué le déversement de 48 millions de m³ dans la vallée du Ferlo. A son maximum d'extension, la lame de submersion s'est étendue sur près de 50 kms en amont de la digue de Keur Momar Sarr. Peu à peu, faute d'alimentation, cette nappe d'eau est revenue sur ses pas marquant chaque étape de son retrait par des mares éphémères. Sa composition chimique, proche de celle du lac de Guiers dans la phase initiale, a ensuite évoluée pour aboutir dans ce milieu confiné à des saumures terminales extrêmement concentrées.

Pendant la période d'inondation, la minéralisation totale a varié de 0,74 à 41,2 g/l. Le gradient de salinité établi, de l'aval vers l'amont, dès l'interruption des écoulements s'est progressivement accentué lors des phases d'assèchement. Les variations de la conductivité sont liées de manière exponentielle à la croissance des concentrations. Les eaux de la lame de submersion sont restées basiques toute l'année avec de faibles oscillations du pH autour d'une valeur moyenne de 8,45.

L'itinéraire chimique des constituants majeurs obéit à des règles précises et immuables. Le sodium et les chlorures suivent des voies parallèles et augmentent linéairement avec le facteur de concentration. *Les eaux de la lame submersion de la vallée du Ferlo, confinées en domaine continental à plus de 70 km de l'océan, évoluent vers une composition chimique d'eau de mer. Ce résultat remarquable a été confirmé par la matérialisation de précipitations de chlorures de sodium (Halite).*

Dans les solutions diluées, l'alcalinité et le calcium s'associent temporairement dans la néoformation de minéraux carbonatés puis leurs itinéraires divergent. Aux fortes minéralisations, les teneurs en calcium restent stables autour d'une valeur moyenne de 110 mg/l alors que les espèces carbonatées aqueuses s'élèvent à 4,8 g/l dans les ultimes phases de concentration.

Le potassium, le magnésium et les sulfates ont des comportements similaires. Leurs concentrations respectives dans les solutions augmentent régulièrement à un rythme toutefois inférieur à celles du sodium et des chlorures. Cette croissance relativement moins rapide a été attribuée à la participation du potassium dans le cycle biologique des macrophytes, du magnésium dans les néoformations argileuses et carbonatées et des sulfates dans la précipitation tardive de gypse.

Le comportement de la silice dissoute constitue une particularité. Les concentrations de cet élément restent stables ou diminuent avec le facteur de concentration. L'évolution de la silice est sous le double contrôle de processus géochimiques et de cycles biologiques.

Les eaux de surface du lac de Guiers et les eaux de la lame de submersion du Ferlo, concentrées par évaporation, suivent à tous points de vue des itinéraires chimiques identiques. Bien qu'elles aboutissent dans les saumures finales à des degrés de minéralisation différents, toutes les solutions s'orientent vers un faciès chloruré sodique. Les processus géochimiques et biochimiques qui règlent les bilans dynamiques des diverses substances aqueuses sont, dans ces environnements aquatiques évolutifs, d'une remarquable constance.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AUBERT G. (1965).- La classification des sols. Tableaux des classes, sous-classe et sous-groupes de sols utilisés par la section de pédologie de l'O.R.S.T.O.M.. *Cahier O.R.S.T.O.M., série pédologie, III, 4, pp. 89-90.*

AUDIBERT M. (1970).- Delta du fleuve Sénégal. Etude hydrogéologique. *Rapport inédit, O.E.R.S.- P.N.U.D.- F.A.O., 1-2, 68 p., St Louis (Sénégal).*

BAMBA B.S. (1985).- Première approche de la physico-chimie des eaux interstitielles des sédiments du lac de Guiers (Sénégal). *Mémoire de D.E.A. de Géologie Appliquée (Option Hydrogéologie), Fac. des Sciences, Univ. de Dakar, 48 p.*

BECKER C., MARTIN V., DIALLO Y. (1988).- Cartes historiques de la vallée du Sénégal. *Rapport inédit.*

BESSAC H. (1953). Découverte de paléolithique évolué à Richard Toll. *Notes Africaines, 59, pp. 65-67.*

CARN M. (1985).- Etude expérimentale de l'évolution chimique des eaux du lac de Guiers (Sénégal) concentrées par évaporation. *Mém. de D.E.A. de Géologie Appliquée (Option Hydrogéologie), Fac. des Sciences, Univ. de Dakar, 75 p.*

COGELS F.X. et GAC J.Y. (1981/82).- Le lac de Guiers: fonctionnement, bilans hydriques. Evaporation d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne (Sénégal). *Cah. ORSTOM, série Géologie, vol. XII, n° 1, pp. 41-60.*

COGELS F.X. et GAC J.Y. (1983).- Aménagements et évolution hydrogéochimique du lac de Guiers depuis 1916. *Rapp. multigr. ORSTOM, Dakar, 18 p.*

COGELS F.X. et GAC J.Y. (1983).- La chloronité des eaux du lac de Guiers: bilan quantitatif, qualitatif et perspectives. *Actes du Colloque de l'ISE : " le lac de Guiers: problématiques d'environnement et de Développement ", mai 1983, Université de Dakar, pp. 41-57.*

COGELS F.X. et GAC J.Y. (1984).- Evolution hydrochimique du lac de Guiers (Sénégal) au cours de la sécheresse actuelle au Sahel. *Actes du X^{ème} R.A.S.T., Bordeaux, Société Géologique de France (Ed.), p. 141.*

COGELS F.X. (1984).- Etude limnologique d'un lac sahélien: le lac de Guiers (Sénégal). *Thèse doctorale, Fondation Universitaire Luxembourgeoise (F.U.L.), Arlon, Belgique, 329 p.*

DIOUF M.B. (1989).- Sédimentologie, minéralogie et géochimie des grès carbonatés quaternaires du littoral sénégal-mauritanien. *Thèse de Doctorat d'Etat, mention Océanologie, Univ. de Perpignan, 237 p.*

ELOUARD P. (1975).- Formations sédimentaires de Mauritanie occidentale. In " Notice explicative de la carte géologique de la Mauritanie au 1/ 1.000.000", pp. 171- 232.

FAURE H, GAC J.Y. (1981).- Will the sahelian drought to end in 1985 ? *Nature*, 289, 5801, pp. 475-478.

FRITZ B. (1975).- Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. *Mémoire, Sciences Géologiques*, n° 41, 152 p

GAC J.Y. (1980).- Géochimie du bassin du lac Tchad. *Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. de Strasbourg (juin 1979). Trav. et Doc. ORSTOM, Paris, n° 123, 251 p.*

GAC J.Y., CARN M., VILLENEUVE J., BAMBA S.S., TRAVI Y., VINCKE P.P., DIOP M., LE BRUSQ J.Y., GOULEAU D., COGELS F.X. (1985).- Etude préliminaire de la physicochimie des eaux interstitielles du lac de Guiers (Sénégal). *Rapp. multigr., Centre ORSTOM de Dakar, 49 p*

GAC J.Y., FAURE H. (1987).- Le "vrai" retour à l'humide est-il pour demain ? *C.R. Acad. Sciences, Paris, t. 305, Série II, pp. 77-781.*

GAC J.Y., KANE A., SAOS J.L., CARN M., VILLENEUVE J.E. (1985).- L'invasion marine dans la basse vallée du Sénégal. *Rapp. ORSTOM Dakar, multigr. 64 p.*

GAC J.Y., CARN M., SAOS J.L. (1986).- L'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal. I.- Période 1903-1980. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale de l'ORSTOM, 19, 1, pp. 3-17.*

GAC J.Y., CARN M., SAOS J.L. (1986) .- L'invasion marine dans la basse vallée du Sénégal. II.- Période 1980-1983: proposition d'un nouveau modèle d'intrusion continentale des eaux océaniques. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale de l'ORSTOM, 19, 2, pp. 93-109.*

GAC J.Y, MONTEILLET J., FAURE H. (1981).- Marine shorelines in estuaries as paleoprecipitation indicators. In "Variations of the global water budget". A. STREET-PERROT et al. (Eds), Reidel Publ. Cie, pp.361-370.

GAC J.Y., KANE A., MONTEILLET J. (1982). - Migrations de l'embouchure du fleuve Sénégal depuis 1850. *Cah. ORSTOM, série Géologie, XII, 1, pp. 73- 77.*

GERSAR (1984).- Etude pédologique de reconnaissance de la zone du lac de Guiers (vallée du Bounoum). *Rapp. SAED "Etudes de réhabilitation, de factibilité et d'avant-projets détaillés de périmètres d'irrigation sur la rive gauche du fleuve Sénégal", I, Dakar, Ministère du Développement Rural, 58 p.*

GROSMAIRE P. (1956).- Eléments de politique sylvo-pastorale au sahel Sénégalais. II.- Les conditions du milieu. Fascicule 10: Le milieu physique. Titre 3: Les eaux, le lac de Guiers, la basse vallée du Ferlo, céanes et

puisards, puits. *Bull. du Serv. des Eaux et Forêts du Sénégal (Inspection Forestière du Fleuve, Saint Louis), II, 10-3, 56 p.*

GUIEU G. (1976).- Les bassins à évaporites de la marge ouest-africaine du Maroc à l'Angola. *Rapport. Dep. Géologie, Fac. des Sciences, Univ. de Dakar, n° 32, 86 p.*

HEBRARD L. (1978).- Contribution à l'étude géologique du quaternaire du littoral mauritanien entre Nouakchott et Nouadhibou 18°- 21° latitude Nord. Participation à l'étude des désertifications du Sahara. *Doc. Fac. Sci. Lyon, 71, 210 p.*

HELGESON H.C. (1968).- Evaluation of irreversible reactions in geochemical process involving minerals and aqueous solutions. I. Thermodynamic relations. *Geochim. Cosmochim. Acta, 32, pp. 853-877.*

HELGESON H.C. (1970).- A chemical and thermodynamic model of ore deposition in hydrothermal systems. In " *Fiftieth Anniversary Symposium Volume* ", Morgan B.A. Ed. *Miner. Soc. Amer. Spec. Paper n° 3, pp. 155-186.*

HELGESON H.C., GARRELS R.M. et MACKENZIE F.T. (1969).- Evaluation of irreversible reactions in geochemical process involving minerals and aqueous solutions. II. Applications. *Geochim. Cosmochim. Acta, 33, pp. 455-481.*

HELGESON H.C., BROWN T.H., NIGRINI A. et JONES T.A. (1970).- Calculation of mass transfer in geochemical processes involving aqueous solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta, 34, pp. 569-592.*

JOIRE J. (1947).- Amas de coquillages du littoral sénégalais dans la banlieue de Saint-Louis. *Bull. IFAN, 9, pp. 170-340.*

LABAT J.B. (1728).- Nouvelle relation de l'Afrique occidentale. Ed. Cavelier, Paris. " *Carte de la rivière Falémé, des pays de Bamboucq et d'une partie du Niger* " (tome IV, p. 32).

LE BORGNE J. (1988).- La pluviométrie au Sénégal et en Gambie. *Rapport Univ. Cheikh Anta Diop, Département de Géographie, labo. de Climatologie, Université de Dakar (Sénégal) 93 p.*

MICHEL P. (1973).- Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. *Mémoire ORSTOM, Paris, n° 63, 753 p.*

+ MONTEILLET J. (1986/1988).- Environnements sédimentaires et paléocéologie du delta du Sénégal au Quaternaire. *Thèse de Doct. d'Etat, Univ. de Perpignan, 267 p.*

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. *Rapp. multigr., ORSTOM, Dakar, 9 p.*

PLAUD M. (1966).- Pose de piézomètres et étude de la nappe phréatique autour du lac de Guiers (Sénégal). *Rapport interne de la Direction de l'Hydraulique du Ministère de l'Energie et de l'Hydraulique de la République*

du Sénégal, 21 p.

SAINTON C (1957). Etude géologique de la région du lac de Guiers (Sénégal). *Rapp. du Service de géologie et de Prospection minière (Haut Commissariat de la république en A.O.F.)*, Dakar, 26 p.

SPENGLER A. de, CASTELIN J., CAUVIN J., LEROY M. (1966). Le bassin secondaire-tertiaire du Sénégal. In " *Bassins sédimentaires du littoral africain, 1^{ère} partie: littoral Atlantique*". Sympo. Reyre D., Ed. Assoc. Serv. Géol. Afr., Paris, pp. 80-94.

TESSIER F. (1950).- Contribution à la stratigraphie et à la paléontologie de la partie ouest du Sénégal (Crétacé, tertiaire). *Bull. Dir. Mines A.O.F.*, Dakar, n° 14, 573 p.

TESSIER F., FLICOTEAUX R., LAPPARTIENT J.R., NAHON D., TRIAT J.M. (1975).- Réforme du concept de Continental Terminal dans les bassins sédimentaires côtiers de l'Ouest Africain. *IX Congr. Inter. Sédimentologie.*, Nice, Thème 1, pp. 207-212.

THILMANS G. (1975).- Les planches sénégalaises et mauritaniennes des " *Atlas Vingboons* " (XVII^{ème} siècle). *Bull. I.F.A.N.*, T. 37, série B, n° 1, pp. 95-116.

TRENOUS J.Y. (1968).- Rapport de mission dans la région du lac de Guiers, la vallée du Ferlo, la zone Linguère, Dahra, Coki, Louga. *Rapp. Dep. Géologie, Fac. des Sciences, Univ. de Dakar*, 13 p.

TRENOUS J.Y. (1970).- Etude géologique dans le Sénégal nord occidental et le Ferlo. *Trav. labo. Sciences de la Terre, A, 4, Labo. de Sédimentologie Continentale, St Jérôme, Marseille*, 28 p.

TRICART J. (1961).- Notice explicative de la carte géomorphologique du delta du Sénégal. *Mém. BRGM*, 8, 137 p.

TABLEAUX ANNEXES

EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE LA LAME
DE SUBMERSION DU FERLO SUIVANT LES 11 CAMPAGNES DE PRELEVEMENTS
(Conductivité en mS, Cations et Anions en meq/L, Silice en mmoles/L)

N°	pH	EC	Cl	SO4	ALC	Ca	Mg	K	Na	Anions	Cations	H4SiO4	g/l
1 F 1	8,46	1,06	4,25	0,83	4,53	1,91	2,47	0,47	5,36	9,61	10,21	0,62	0,74
1 F 2	8,52	1,49	6,96	1,92	5,18	2,71	3,31	0,58	8,63	14,06	15,23	0,52	1,02
1 F 3	8,41	1,57	7,77	1,89	5,47	2,53	3,47	0,63	9,42	15,13	16,05	0,48	1,08
1 F 4	8,58	1,67	8,38	2,03	5,92	2,49	3,88	0,69	10,13	16,33	17,19	0,54	1,17
1 F 5	8,57	2,19	11,35	2,82	7,43	3,17	4,95	0,86	13,88	21,6	22,86	0,49	1,52
1 F 6	8,54	2,04	10,64	2,59	6,68	2,89	4,59	0,79	12,77	19,91	21,04	0,58	1,40
1 F 7	8,60	1,92	9,81	2,36	6,01	2,45	4,18	0,74	12,22	18,18	19,59	0,60	1,30
1 F 8	8,54	1,83	9,81	2,36	5,91	2,29	4,11	0,74	11,90	18,08	19,04	0,62	1,28
1 F 9	8,55	1,88	9,95	2,45	6,02	2,36	4,18	0,77	12,05	18,42	19,36	0,66	1,31
1 F 10	8,50	1,45	7,12	1,96	5,01	2,60	3,27	0,59	8,05	14,09	14,51	0,56	1,01
1 F 11	8,60	1,48	7,20	2,00	5,18	2,59	3,36	0,59	8,39	14,38	14,93	0,63	1,04
1 F 12	8,49	1,46	6,96	1,92	5,07	2,50	3,31	0,57	8,22	13,95	14,60	0,57	1,00
1 F 13	8,58	1,44	6,88	1,85	5,19	2,54	3,26	0,57	8,20	13,92	14,57	0,55	1,00
1 F 14	8,55	1,47	6,96	1,82	5,29	2,53	3,36	0,59	8,03	14,07	14,51	0,59	1,01
1 F 15	8,50	1,49	7,16	1,85	5,27	2,32	3,34	0,59	8,63	14,28	14,88	0,68	1,04
1 F 19	8,45	1,49	7,53	1,85	5,16	2,36	3,39	0,67	8,96	14,54	15,38	0,64	1,05
1 F 21	8,33	1,57	8,03	1,96	5,39	2,24	3,74	0,66	9,62	15,38	16,26	0,62	1,10
1 F 22	8,44	1,75	9,44	2,27	6,05	2,36	4,32	0,73	11,39	17,76	18,80	0,62	1,26
1 F 23	8,38	1,85	10,05	2,45	6,10	2,34	4,36	0,76	11,84	18,6	19,30	0,62	1,31
1 F 24	8,38	2,31	13,73	2,64	7,38	2,48	5,58	0,96	16,12	23,75	25,14	0,50	1,64
1 F 25	8,61	2,00	11,33	2,70	6,31	2,13	4,63	0,87	13,10	20,34	20,73	0,57	1,41
1 F 26	8,48	2,38	12,56	2,86	6,70	2,13	5,14	0,93	14,14	22,12	22,34	0,55	1,51
1 F 27	8,53	2,55	14,24	3,22	7,17	2,29	5,55	1,01	15,99	24,63	24,84	0,41	1,66
2 F 1	8,22	1,48	8,59	2,19	5,06	2,32	3,52	0,60	8,74	15,84	15,18	0,46	1,08
2 F 2	8,37	1,73	10,42	3,02	5,23	2,47	3,93	0,69	11,35	18,67	18,44	0,46	1,26
2 F 3	8,31	1,76	10,16	2,96	5,33	2,42	4,03	0,66	11,59	18,45	18,70	0,45	1,26
2 F 4	8,58	2,15	12,38	2,76	6,70	2,58	4,89	0,82	13,75	21,84	22,04	0,41	1,48
2 F 5	8,47	2,17	12,69	3,05	6,74	2,56	5,04	0,81	14,42	22,48	22,83	0,39	1,52
2 F 6	8,57	2,76	16,98	3,53	7,90	2,91	6,54	0,99	19,18	28,41	29,62	0,30	1,90
2 F 7	8,58	2,87	17,88	3,67	8,14	2,91	6,95	1,02	19,79	29,69	30,67	0,25	1,97
2 F 8	8,56	2,29	13,96	3,22	6,33	2,31	5,08	0,94	15,55	23,51	23,88	0,52	1,59
2 F 9	8,46	2,27	13,63	3,49	6,35	2,43	5,08	0,91	14,85	23,47	23,27	0,51	1,58
2 F 10	8,48	1,65	9,41	2,41	4,98	2,25	3,87	0,62	10,70	16,8	17,44	0,43	1,16
2 F 11	8,56	1,63	9,66	2,31	4,79	2,14	3,76	0,62	10,64	16,76	17,16	0,45	1,15
2 F 12	8,44	1,64	9,66	2,19	5,13	2,36	3,78	0,64	10,64	16,98	17,42	0,45	1,17
2 F 13	8,50	1,64	9,41	2,11	5,09	2,19	3,85	0,66	10,83	16,61	17,53	0,47	1,16
2 F 15	8,51	1,68	9,66	2,24	5,43	2,23	3,93	0,66	11,05	17,33	17,87	0,50	1,20
3 F 1	8,43	1,39	7,24	1,70	5,03	2,41	3,29	0,55	7,94	13,97	14,19	0,65	1,00
3 F 2	8,19	1,71	9,80	2,50	4,95	2,40	3,78	0,61	9,78	17,25	16,57	0,62	1,17
3 F 3	8,41	1,87	10,83	2,79	5,52	2,59	4,11	0,66	10,64	19,14	18,00	0,55	1,28
3 F 4	8,39	2,26	13,15	2,49	7,07	2,55	5,10	0,83	13,59	22,71	22,07	0,45	1,52
3 F 5	8,42	2,61	15,77	2,95	7,98	2,76	5,92	0,92	15,96	26,7	25,56	0,39	1,76
3 F 6	8,48	3,06	18,75	3,71	8,88	2,94	6,91	1,04	19,23	31,34	30,12	0,27	2,04
3 F 7	8,43	4,48	30,23	4,75	11,32	2,78	10,28	1,49	30,32	46,3	44,87	0,01	2,93
3 F 8	8,42	3,32	22,10	4,60	8,02	2,50	7,24	1,10	21,36	34,72	32,20	0,38	2,20
3 F 9	8,40	2,46	14,45	3,66	6,94	2,37	5,35	0,91	15,42	25,05	24,05	0,73	1,69
3 F 10	8,35	1,74	9,78	2,65	5,52	2,35	3,91	0,64	9,92	17,95	16,82	0,60	1,22
3 F 11	8,36	1,74	9,86	2,45	5,54	2,27	3,99	0,64	10,20	17,85	17,10	0,58	1,22
3 F 12	8,41	1,71	9,80	2,35	5,47	2,36	3,95	0,63	10,02	17,62	16,96	0,61	1,20
3 F 13	8,35	1,75	10,03	2,45	5,64	2,22	3,95	0,65	10,23	18,12	17,05	0,65	1,23
3 F 15	8,30	1,86	10,57	2,32	5,76	2,24	4,11	0,69	10,74	18,65	17,78	0,68	1,27
3 F 16	8,35	1,89	11,24	2,49	5,92	2,23	4,44	0,74	11,81	19,65	19,22	0,70	1,35
3 F 18	8,43	2,83	17,62	4,07	7,52	2,58	6,42	1,10	18,40	29,21	28,50	0,59	1,93
3 F 20	8,59	3,39	22,10	4,80	9,04	2,95	7,28	1,37	22,66	35,14	34,26	0,26	2,28
3 F 21	8,73	6,68	58,25	6,42	18,05	3,27	14,81	2,44	50,11	74,72	70,63	0,01	4,69
3 F 22	8,67	3,23	20,43	3,83	8,70	2,30	7,00	1,34	21,42	32,955	32,86	0,29	2,14
3 F 23	8,68	3,39	22,32	3,74	9,12	2,32	7,34	1,47	22,72	35,18	33,85	0,12	2,26
3 F 24	8,70	3,80	26,09	4,37	9,77	1,86	8,31	1,64	26,32	40,23	38,13	0,29	2,57
3 F 25	8,83	6,34	47,76	6,24	13,88	2,02	13,49	2,56	47,85	67,88	65,92	0,10	4,26

EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE LA LAME
DE SUBMERSION DU FERLO SUIVANT LES 11 CAMPAGNES DE PRELEVEMENTS
(Conductivité en mS, Cations et Anions en meq/L, Silice en mmoles/L)

N°	pH	EC	Cl	SO4	ALC	Ca	Mg	K	Na	Anions	Cations	H4SiO4	g/l
3 F 26	8,71	4,67	31,98	5,87	10,59	1,63	9,46	2,01	34,10	48,44	47,20	0,32	3,10
3 F 27	8,57	4,55	30,23	5,62	10,41	1,90	9,21	1,97	33,49	46,26	46,57	0,36	3,01
4 F 1	8,40	2,80	16,93	4,42	6,82	3,36	6,79	1,07	15,72	28,17	26,94	0,60	1,84
4 F 2	8,20	2,80	16,78	4,48	6,24	3,68	6,66	1,12	17,31	27,5	28,77	0,55	1,84
4 F 3	8,20	4,34	28,22	7,02	7,96	2,27	11,43	1,79	30,36	43,2	45,85	0,29	2,80
4 F 4	8,40	6,57	46,44	7,58	14,54	2,12	17,44	2,59	48,76	68,56	70,91	0,00	4,38
4 F 10	8,40	2,77	16,78	4,40	6,45	3,24	6,83	1,10	18,29	27,63	29,46	0,57	1,87
4 F 11	8,60	2,83	17,39	4,45	6,52	3,17	6,87	1,13	17,49	28,36	28,66	0,55	1,87
4 F 12	8,30	3,12	19,31	4,34	7,20	2,76	7,65	1,29	20,41	30,85	32,11	0,56	2,05
4 F 13	8,70	3,77	24,78	5,17	8,70	2,73	9,05	1,56	26,75	38,65	40,09	0,52	2,55
4 F 15	8,40	3,79	25,18	5,30	8,48	2,62	9,34	1,57	27,45	38,96	40,98	0,48	2,57
4 F 16	8,60	5,70	39,96	8,19	9,58	2,39	13,57	2,18	42,17	57,73	60,31	0,23	3,69
4 F 18	8,70	5,31	37,63	7,25	9,21	2,19	12,42	2,10	38,09	54,09	54,80	0,21	3,42
4 F 20	8,60	5,59	39,62	7,34	10,28	2,27	12,67	2,20	37,69	57,24	54,83	0,41	3,58
4 F 21	8,60	5,92	42,40	7,78	10,34	2,24	13,66	2,35	44,98	60,52	63,23	0,24	3,87
4 F 22	8,70	13,28	116,00	17,47	16,75	2,91	28,79	4,62	113,96	150,22	150,28	0,02	9,19
5 F 1	8,00	2,90	18,01	4,42	6,38	3,40	6,91	1,19	17,70	28,81	29,20	0,16	1,86
5 F 18	8,70	7,76	54,51	9,75	10,30	1,92	15,47	2,85	57,68	74,56	77,92	0,18	4,71
6 F 1	8,20	4,86	33,00	7,66	6,52	4,64	11,20	2,15	34,20	47,18	52,19	0,07	3,04
6 F 2	8,12	5,06	30,31	8,50	8,10	3,84	13,16	1,74	31,84	46,91	50,58	0,54	3,07
6 F 3	8,50	9,64	65,19	16,29	13,10	2,54	27,48	3,76	64,38	94,58	98,16	0,10	5,92
6 F 4	8,43	56,00	505,00	83,50	78,81	2,32	184,70	21,43	488,04	667,31	696,49	0,06	41,10
6 F 5	8,46	54,50	524,00	80,97	74,21	2,32	212,70	23,91	446,28	679,18	685,21	0,06	40,85
6 F 6	8,42	59,50	548,00	81,99	70,55	2,00	133,27	19,18	481,95	700,54	636,40	0,05	41,19
6 F 10	8,17	4,83	29,21	8,15	7,88	3,96	12,42	1,67	30,62	45,24	48,67	0,48	2,95
6 F 11	8,50	5,89	36,91	8,52	9,24	3,14	15,96	1,99	36,62	54,67	57,71	0,51	3,51
6 F 12	8,22	6,40	40,96	8,58	9,41	2,87	16,95	1,06	40,97	58,95	61,85	0,48	3,73
6 F 13	8,52	10,04	71,27	14,77	12,68	2,12	26,32	3,70	68,07	98,72	100,21	0,15	6,10
6 F 15	8,62	9,93	70,65	14,59	11,82	3,32	25,50	4,46	68,07	97,06	101,35	0,07	6,05
6 F 16	8,41	21,10	157,30	34,65	17,83	4,18	80,60	7,57	121,36	209,78	213,71	0,07	12,49
6 F 18	8,28	10,86	78,47	16,50	12,15	2,95	27,97	4,37	73,51	107,12	108,80	0,10	6,59
6 F 21	8,40	19,32	149,60	30,65	16,57	4,14	63,20	6,89	113,53	196,82	187,76	0,04	11,53
7 F 1	8,48	8,49	55,25	15,84	9,43	4,10	19,00	2,60	56,00	80,52	81,70	0,32	5,03
8 F 1	8,58	8,83	61,43	16,04	9,31	3,90	20,00	2,70	61,00	86,78	87,60	0,23	5,37
8 F 2	8,69	9,13	62,89	16,98	9,25	3,60	21,00	2,80	61,00	89,12	88,40	0,42	5,49
8 F 10	8,71	9,66	66,29	18,12	10,02	4,10	21,00	3,00	66,00	94,43	94,10	0,38	5,84
8 F 11	8,77	9,94	67,67	18,88	9,53	3,80	22,00	2,90	70,00	96,08	98,70	0,28	5,98
8 F 12	8,81	11,87	88,49	17,17	10,86	3,00	26,00	3,30	75,00	116,52	107,30	0,35	6,89
8 F 13	8,84	13,00	100,06	21,80	11,50	3,10	28,00	3,80	107,00	133,36	141,90	0,58	8,37
8 F 14	8,83	24,50	207,42	41,49	18,10	2,50	56,00	6,90	208,00	267,01	273,40	0,25	16,27
8 F 15	8,72	23,50	187,56	37,89	16,42	3,30	53,00	6,40	185,00	241,87	247,70	0,01	14,70
9 F 1	8,38	16,13	129,31	29,76	8,06	2,90	34,00	3,96	145,00	167,13	185,86	0,03	10,47
9 F 2	8,33	15,03	124,20	26,85	8,33	3,50	32,00	3,71	131,00	158,58	170,21	0,00	9,79
9 F 10	8,46	14,82	125,05	25,89	9,07	5,69	33,56	3,66	125,00	160,01	167,91	0,09	9,78
9 F 11	7,98	23,30	195,56	41,06	6,12	4,09	56,35	4,96	212,00	242,74	277,40	0,01	15,12
9 F 12	7,79	19,93	171,58	32,50	5,80	3,88	38,09	4,73	176,00	209,88	222,70	0,06	12,78
9 F 13	8,41	25,30	216,44	46,26	11,99	2,57	58,24	5,73	204,00	274,69	270,54	0,07	16,32
9 F 14	7,86	24,80	208,78	40,09	9,79	3,50	49,36	5,37	216,00	258,66	274,23	0,04	15,79
9 F 15	8,38	42,20	421,38	71,11	18,57	9,01	95,43	9,21	378,00	511,06	491,65	0,00	29,90
10 F 1	8,52	12,34	90,81	22,67	6,82	4,50	26,00	3,20	91,00	120,3	124,70	0,10	7,36
10 F 2	8,55	12,96	94,51	22,12	7,17	4,10	27,00	3,50	97,00	123,8	131,60	0,09	7,64
10 F 10	8,44	12,23	88,98	22,30	6,25	5,00	25,00	3,10	91,00	117,53	124,10	0,10	7,24
10 F 11	8,21	5,72	44,64	8,71	3,85	4,10	11,00	1,60	43,00	57,2	59,78	0,00	3,51
10 F 12	8,01	10,45	77,27	13,52	6,18	3,50	19,00	2,50	75,00	96,97	100,00	0,01	5,89
10 F 13	7,88	8,57	60,41	10,75	5,07	2,90	15,00	2,00	62,00	76,23	81,90	0,01	4,72
10 F 14	8,08	4,98	37,62	6,83	4,41	2,40	8,80	1,60	37,00	48,06	49,80	0,06	2,97
11 F 1	8,41	13,71	106,74	18,35	10,89	4,50	26,00	3,50	93,00	135,98	127,80	0,27	8,04

