

GEOCHIMIE DES EAUX DE LA VALLEE DU FERLO (SENEGAL)

Dr. GAC, J.Y., Institut Français de Recherche Scientifique pour le
Développement en Coopération (ORSTOM)

Dr. COGELS, F.X., Fondation Universitaire Luxembourgeoise (FUL)
ORSTOM, Hann B.P. 1386
Dakar, Sénégal

ABSTRACT

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

Cette étude comprend une présentation succincte du milieu naturel, une chronique historique et enfin une reconnaissance sur la variabilité de la composition chimique des eaux 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 prononcé (faibles variations du pH autour d'une valeur moyenne de 8,45). Les eaux de la lame de submersion, confinées en domaine continental, ont évolué vers une composition chimique d'eau de mer. Cette tendance a été confirmée par l'identification minéralogique de précipitations de chlorure de sodium.

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

INTRODUCTION

La libre circulation des eaux du fleuve Sénégal dans la vallée du Ferlo, via le lac de Guiers, a été interrompue en septembre 1956. L'assèchement de la vallée 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 puits est devenue salée et les populations ont abandonné cette région n'en gardant que le souvenir d'une vallée morte.

Une génération a vécu...lorsque le 20 septembre 1988, le Ferlo réalimenté par la crue fluviale renaissait après plus de trente années de sécheresse et d'isolement. Après la fin des déversements le 20 octobre 1988, la remise en eau du Ferlo fournissait l'opportunité d'étudier l'évolution chimique de cette lame de submersion revenant peu à peu sur ses pas sous le double contrôle de l'évaporation et de l'infiltration. Rappelons que dans un proche avenir la basse vallée du Ferlo servira de transit aux eaux fluviales qui seront acheminées vers la presqu'île du Cap-Vert par le futur canal à ciel ouvert : le canal du Cayor.

LE MILIEU NATUREL

Le Ferlo se situe en rive gauche du fleuve Sénégal. Son bassin versant, sans lit véritablement fonctionnel, s'étend de 14°30' à 16° de latitude Nord et de 12°45' à 16° de longitude Ouest (Fig.1). La liaison avec le Sénégal s'établit par le lac de Guiers et le canal de la Taoué.

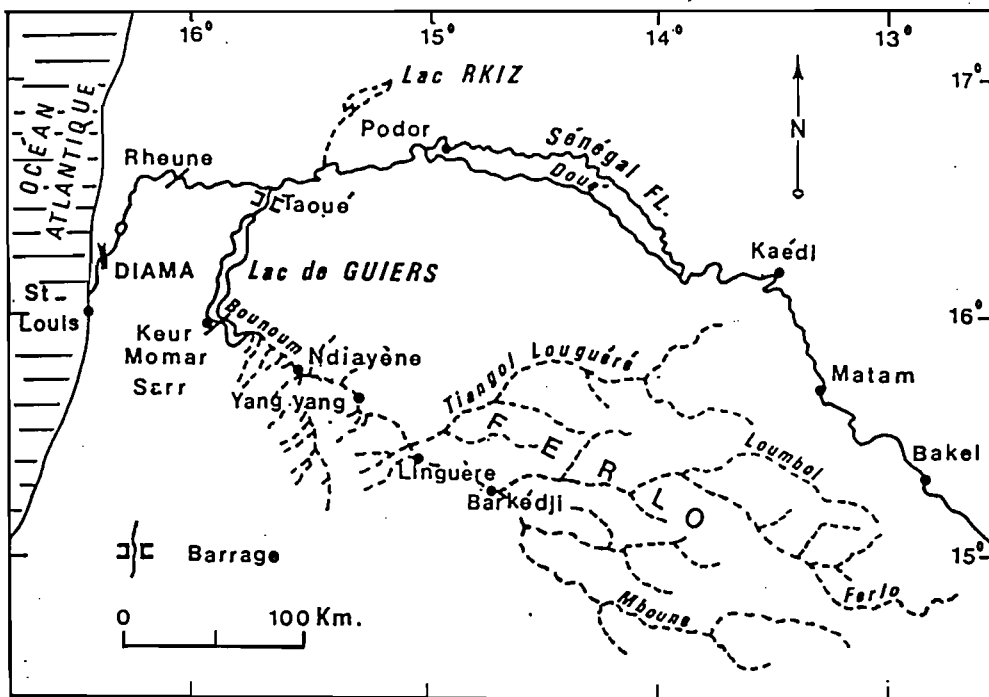


Figure 1. Situation géographique du bassin versant du Ferlo.

La vallée du Bounoum constitue la partie terminale du cours inférieur du Ferlo. Longue d'environ 50 km, elle s'étend entre la digue de Keur Momar Sarr (au sud du lac de Guiers) et le village de Ndiayène: les altitudes du lit mineur y sont comprises entre - 0,5 et + 1,5 m IGN . Cette configuration topographique particulière explique que la vallée du Bounoum puisse être submergée, via le lac de Guiers, par les eaux du Sénégal ou occasionnellement par les eaux océaniques.

L'histoire géologique de la région est intimement liée à celle de la vallée du Sénégal, environnement fluvio-marin développé au cours du Quaternaire après avoir été soumis aux transgressions marines du secondaire et du tertiaire. L'ossature du relief est constituée par les grès du Continental terminal surmonté par les sables dunaires de l'Ogolien, remarquables par leur teinte vive rouge-orange ou saumon. Dans les chenaux déprimés la pédogénèse a essentiellement développé des sols halomorphes et des sols hydromorphes qui contiennent une nappe salée à très faible profondeur. Le régime climatique de type sahélo-soudanien se caractérise par son importante irrégularité et par l'alternance de deux saisons nettement tranchées (saison des pluies de juin à octobre et saison sèche de novembre à mai). Les précipitations moyennes annuelles mesurées entre 1934 et 1988 s'élèvent à 463 mm/an : les pluviométries extrêmes ont été observées en 1983 (191 mm) et en 1936 (854 mm).

HISTORIQUE ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU FERLO

Bref historique

Avant 1956, l'alimentation en eau douce ou salée du Ferlo était sous la triple dépendance des précipitations de la saison des pluies sur son bassin versant, de l'importance de la crue du Sénégal et épisodiquement, en période d'étiage fluvial, des invasions de sa vallée par de l'eau de mer. Cette dernière situation fréquente à l'Holocène a été mise en évidence par Monteillet (1988) qui situe l'ultime grande transgression marine vers 1800 ans B.P.. Des invasions salines de moindre ampleur se sont manifestées jusqu'en 1916, date des premiers endiguements sur le lac de Guiers.

Pour la période récente l'inondation par les eaux du Sénégal est rapporté par de nombreux écrits. C'est ainsi que la spectaculaire crue de 1860 autorisa le Lieutenant de vaisseau Braouzec à naviguer à bord d'une canonnière sur les terres inondées du Ferlo. De nombreux documents cartographiques du XIX^{ème} siècle signale aussi la présence d'embarcations à fort tirant d'eau (4 à 5 m) qui remontait la vallée du Bounoum. Au XX^{ème} siècle les crues fluviales ont engendrées des déversements vers le Ferlo jusqu'en 1956 : le mouvement des masses d'eau entre les différents milieux (fleuve, lac et vallée) se faisait alors par simple gravité selon les positions respectives des plans d'eau.

Chronologie des aménagements

En ne tenant compte que des grandes étapes qui ont profondément transformé l'environnement fluvio-lacustre on distingue dans l'ordre chronologique les évènements suivants:

- avant 1916, état naturel.
- de 1916 à 1947, construction annuelle d'une digue sur la Taoué.
- en 1947, édification du pont-barrage de Richard-Toll sur la Taoué.
- de 1947 à 1956, mise en exploitation de casiers rizicoles.
- en 1956, construction de la digue de Keur Momar Sarr et fermeture de la brèche de Niet-Yone vers le N'Diaël.
- en 1970/71, usine de traitement des eaux à Ngnith et culture de la canne à sucre.

- de 1974 à 1975, rectification du cours de la Taoué (canal).
- en 1980, construction d'un second barrage sur la Taoué.
- en 1983, construction du barrage de Rheune sur le Sénégal.
- en 1985, édification du barrage anti-sel de Diama sur le Sénégal.
- en 1987, achèvement du barrage amont de Manantali.
- en 1988, inondation du Ferlo.

Dans les perspectives à court terme, figurent l'inondation de la plaine du N'Diaël (réouverture de la brèche de Niet-Yone) et surtout la construction du Canal du Cayor (canal à ciel ouvert de 240 km de long) reliant la basse vallée du Ferlo à la presqu'île du Cap-Vert.

Fonctionnement hydrologique actuel

Le déversement des eaux du Sénégal vers la vallée du Ferlo est tributaire de la politique de gestion des barrages et des digues édifiés sur le fleuve (Diama à l'aval et Manantali à l'amont), sur le canal de la Taoué (2 ponts barrage : B1 et B2) qui assure la liaison avec le lac de Guiers, et au sud de la dépression lacustre (digue de Keur Momar Sarr). La figure 2 illustre la complexité du dispositif mis en place pour une exploitation optimale des eaux fluviales.

Au moment de l'arrivée de l'onde de crue (en juin/juillet), les ponts barrage B1 et B2 situés sur le canal de la Taoué sont ouverts pour permettre le remplissage du lac. Lorsque que celui atteint une cote suffisante la liaison est établie avec la vallée du Ferlo. Cette liaison est, en principe, maintenue, tant que le plan d'eau du fleuve se situe au-dessus de celui de la dépression lacustre.

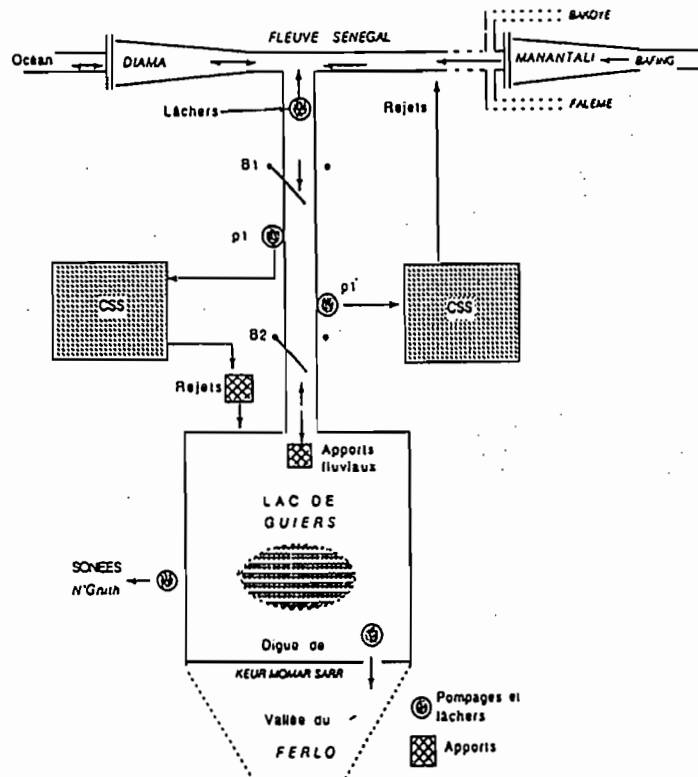


Figure 2. Schéma du dispositif fluviolacustre en 1988

CHRONOLOGIE DE LA PERIODE D'INONDATION DU FERLO EN 1988

La liaison entre le lac de Guiers et la vallée du Ferlo a été établie pendant 35 jours du 20 septembre au 25 octobre. Deux situations sont à distinguer au cours de cette période (Fig.3) :

- du 20 septembre au 14 octobre, l'alimentation du lac par les eaux fluviales était interrompue. Le niveau du plan d'eau lacustre a varié entre 1,88 m et 1,54 m IGN,

- du 14 au 25 octobre, les eaux ont circulé librement entre les trois milieux. De 1,54 m le 14 octobre, le niveau du lac a atteint 1,65 m le 23 octobre puis est redescendu à 1,59 m le 25 octobre. A partir du 23 octobre, le lac placé en position haute s'est déversé dans le fleuve et dans le Ferlo.

En termes de bilan pour le lac de Guiers l'évolution relative des plans d'eau fluvio-lacustres permet de faire remarquer que la fermeture du barrage B1 sur le canal de la Taoué a été prématurée. Le remplissage du lac aurait pu se poursuivre jusqu'au 6 octobre date du maximum de la crue conduisant ainsi à une élévation supplémentaire de 25 cm du plan d'eau du lac avec tous les avantages que cette option représentait pour l'inondation du Ferlo.

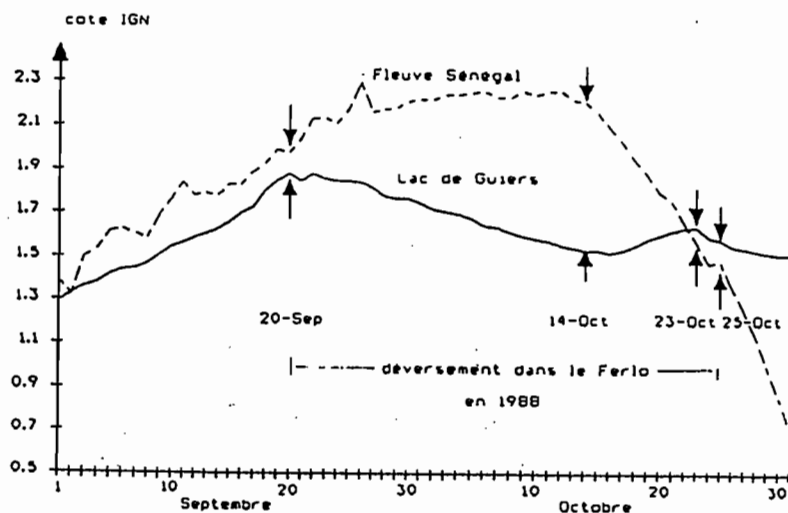


Figure 3. Evolution relative des plans d'eau fluvio-lacustres (septembre/octobre 1988)

A son extension maximale, vers le 15 novembre 1988, la lame d'eau de submersion du Ferlo d'un volume de l'ordre de 50 millions de m³ s'étendait sur près de 50 km entre la digue de Keur Momar Sarr et le village de Ndiayène. Faute d'alimentation cette étendue d'eau s'est progressivement réduite à un rythme moyen d'abaissement du plan d'eau de l'ordre de 9 mm/jour. Pendant cette phase de retrait, 11 campagnes de prélèvements ont permis de suivre pas à pas l'itinéraire chimique des solutions essentiellement concentrées par évaporation.

EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA LAME DE SUBMERSION

Les campagnes de prélèvements

Les prélèvements d'eaux en 27 stations (Fig.4) ont été effectués entre janvier et août 1989. Le retrait progressif de la lame de submersion a

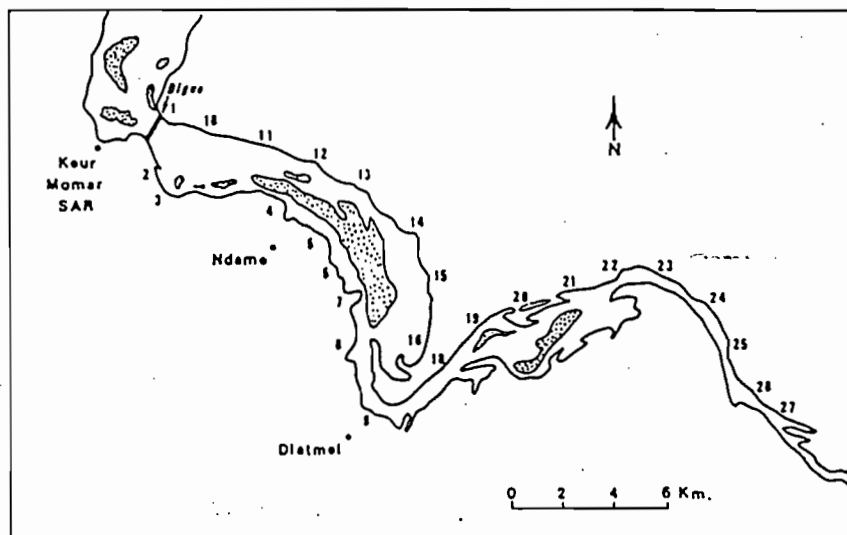


Figure 4. Localisation géographique des stations de prélèvement.

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 dans les parties déprimées sur le flanc Est de la vallée.

Variations des paramètres physiques (pH et conductivité)

Le pH est remarquablement constant autour d'une valeur moyenne de 8,45 (écart type : 0,2). Une seule unité pH sépare les valeurs extrêmes observées (7,79 et 8,84). Les eaux de la lame de submersion du Ferlo ont un caractère basique prononcé. Ce résultat est surprenant en particulier dans le secteur nord-est où l'existence d'une mangrove fossile (contenant une nappe acide : pH 2,5 à 3) a été mise en évidence. Ceci semble indiquer que les échanges réciproques entre les eaux de surface et les aquifères sub-affleurants sont insignifiants et que la lame de submersion reposerait sur un fond "chimiquement inerte".

La conductivité évolue de manière exponentielle. Elle augmente d'abord lentement pour des minéralisations inférieures à 3 g/l, puis plus rapidement entre 3 et 8 g/l avant de croître de façon importante pour des concentrations supérieures à 10 g/l. Cette évolution est en liaison étroite avec les modifications successives des proportions relatives de l'activité des éléments en solution.

Evolution globale de la physico-chimie des eaux du Ferlo

La minéralisation totale des solutions a évolué entre 0,74 et 41,2 g/l (Tableau 1).

Tableau 1: Composition chimique des eaux de la lame de submersion du Ferlo pour différents facteurs de concentration
(Conductivité en mS, cations et anions en meq/l, silice en mmoles/l)

Fc	g/l	pH	Ec	Cl	SO4	Alc	Ca	Mg	K	Na	H4SiO4
1	0.74	8.46	1.06	4.25	0.83	4.53	1.91	2.47	0.47	5.36	0.62
10	3.87	8.60	5.92	42.40	7.78	10.34	2.24	13.66	2.35	44.98	0.24
25	8.04	8.41	13.71	106.74	18.35	10.89	4.50	26.00	3.50	93.00	0.27
50	16.27	8.83	24.50	207.42	41.49	18.10	2.50	56.00	6.90	208.00	0.25
100	29.9	8.38	42.20	421.38	71.11	18.57	9.01	95.43	9.20	378.00	0.06
130	41.19	8.42	59.50	548.00	82.00	70.55	2.00	133.27	19.20	482.00	0.05

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 dans les mares résiduelles. Il existe un gradient de salinité spatiotemporelle qui s'accroît au fur et à mesure de la réduction progressive de la lame de submersion.

L'étude du corpus analytique (116 échantillons) pour traduire simplement et de manière explicite, l'évolution des constituants de la charge dissoute peut être envisagée selon plusieurs formulations graphiques telles que la variabilité en fonction de la minéralisation totale, de la conductivité ou encore de l'un des éléments dissous. Le choix, dans cette étude, des teneurs en chlorures se justifie par le caractère "conservatif" de cet élément concentré près de 130 fois en solution pendant la durée de l'inondation (Fig.5).

L'itinéraire chimique des ions en solution

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. 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 saumures finales ont des teneurs en ces deux éléments identiques à celles de l'eau de mer.

Les teneurs en calcium varient de 32 à 114 mg/l. Le facteur de concentration est de 3,6. On retrouve ici le schéma classique d'évolution de cet élément qui participe, dès les premières étapes de la minéralisation des eaux aux précipitations carbonatées de la calcite (CO₃Ca).

L'alcalinité, dans la gamme de pH des eaux du Ferlo, est essentiellement représentée par les ions bicarbonates. Les teneurs s'échelonnent entre 0,3 et 5 g/l. La réserve alcaline finale représente 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.

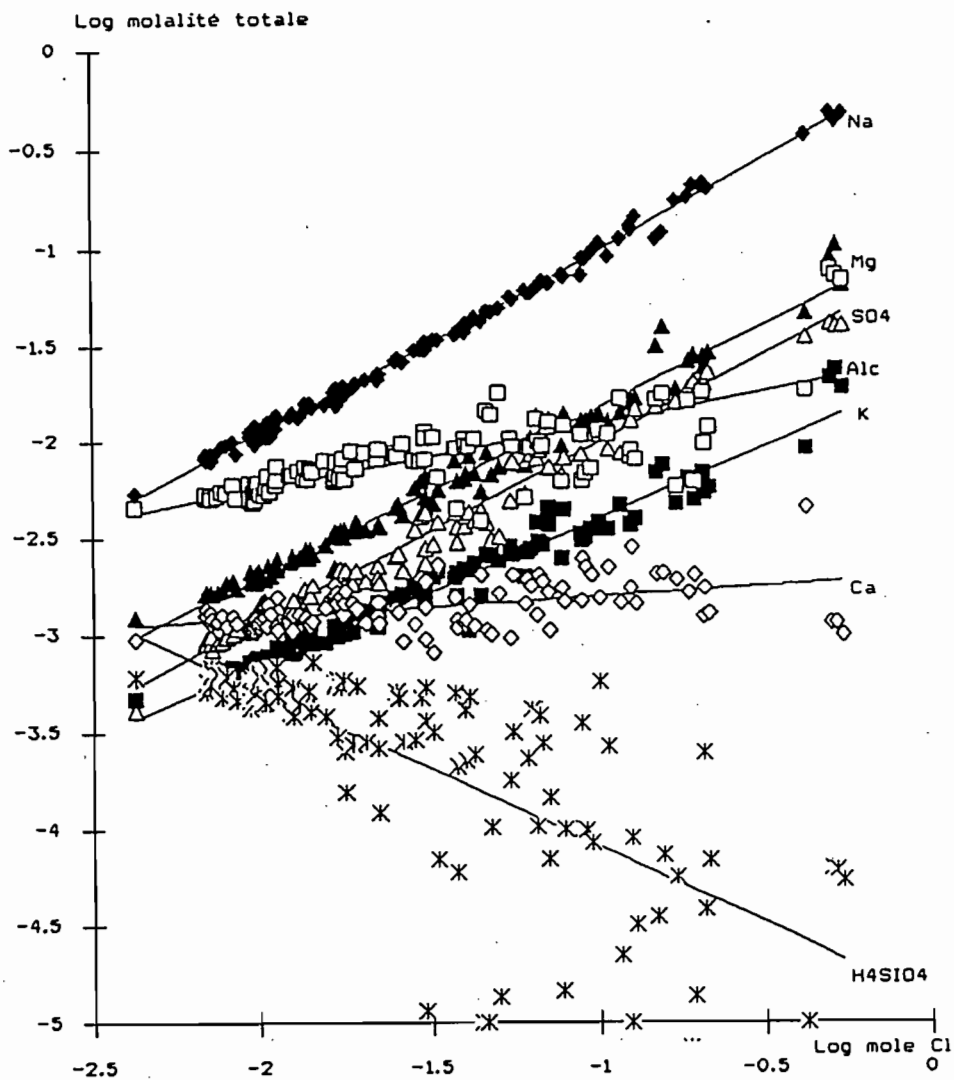


Figure 5. Evolution de la composition chimique des eaux de la lame de submersion en fonction des teneurs en chlorures

Les ions magnésium, potassium et les sulfates évoluent de manière similaire. Leurs teneurs respectives augmentent linéairement : ils ne se différencient que par des facteurs de concentration différents : 51 pour le potassium, 86 pour le magnésium et 101 pour les sulfates. Des études minéralogiques sont en cours pour identifier éventuellement des précipitations de calcite magnésienne ou encore de gypse. L'évolution du potassium suggère une dépendance continue et son contrôle par des processus biochimiques.

L'évolution des teneurs en silice se différencie très nettement de celle des autres éléments. Dans les solutions diluées la teneur reste relativement constante alors que dans les solutions concentrées, la tendance est à décroissance progressive de cet élément en solution. Il est vraisemblable que ces deux comportements sont dépendants de processus géochimiques (néoformation d'édifices silicatés) ou biologiques (consommation par les diatomées et les macrophytes aquatiques).

Aperçu sur les analogies et les divergences d'évolution chimique des eaux de la lame de submersion du Ferlo et du lac de Guiers.

De nombreuses études ont été réalisées sur la géochimie globale des eaux de surface et des eaux interstitielles du lac de Guiers (Cogels et Gac 1983; Cogels 1984; Gac et Cogels 1986a, 1986b; Bamba 1987). Elles ont été complétées en laboratoire par une simulation expérimentale de l'évolution des eaux lacustres concentrées par évaporation (Carn 1985).

Les eaux de surface du lac de Guiers, les eaux de la lame de submersion du Ferlo, les eaux de l'expérience d'évaporation empruntent 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.

CONCLUSION

Après 32 années de sécheresse et d'alimentation exclusive par les eaux de pluie, la dépression du Bas-Ferlo ou vallée du Bounoum a été remise en eau en septembre 1988. Le rétablissement, pendant 35 jours (du 20/09 au 25/10/88), de la libre circulation des eaux fluviales a provoqué le déversement dans l'ancienne vallée morte du Ferlo d'une lame de submersion d'un volume de l'ordre de 48 millions de m³ qui s'est étendue sur près de 50 kms de Keur Momar Sarr. Peu à peu, faute d'alimentation et sous l'effet de l'évaporation, cette nappe d'eau douce d'origine fluviale 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 de submersion, a ensuite évolué pour aboutir dans ce milieu confiné à des saumures terminales extrêmement concentrées.

Pendant la période d'inondation, la minéralisation totale des eaux 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 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.

Dans les solutions diluées, l'alcalinité et le calcium s'associent temporairement dans la néoformation de minéraux carbonatés puis leurs itinéraires divergent. 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 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 de gypse. Le comportement de la silice dissoute constitue une particularité: les concentrations de cet élément restent stables ou diminuent : la silice est sous le double contrôle de processus géochimiques et de cycles biologiques.

Les eaux de surface du lac de Guiers et celles de la lame de submersion de la vallée du Ferlo, concentrées par évaporation, suivent 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 contrôlent les bilans dynamiques des diverses substances aqueuses sont, dans ces environnements aquatiques évolutifs, d'une remarquable similitude.

Cette reconnaissance géochimique sur l'évolution spatio-temporelle des eaux d'inondation déversées dans l'ancienne vallée du Ferlo s'inscrit dans le cadre des vastes programmes de la future gestion de l'ensemble des ressources en eau du Sénégal. Ce site, du moins dans sa partie aval, constitue en effet le lieu privilégié choisi pour le futur transit des eaux du fleuve Sénégal vers le Canal du Cayor. Ce canal, prévu à ciel ouvert, devrait répondre aux besoins en eau des populations avant l'aube du XXI ème siècle.

REFERENCES

- Bamba, S.B. 1985. Première approche de la physicochimie des eaux interstitielles des sédiments du lac de Guiers. D.E.A., Univ. Dakar, 48 p.
- Carn, M. 1985. Etude expérimentale de l'évolution chimique des eau du lac de Guiers concentrées par évaporation. D.E.A., Univ. Dakar, 75 p.
- Cogels, F.X. 1984. Etude limnologique d'un lac sahélien : le lac de Guiers. Thèse FUL, Univ. Arlon (Belgique), 3 tomes, 385 p.
- Gac, J.Y et F.X. Cogels 1983. Aménagements et évolution hydrogéochimique du lac de Guiers depuis 1916. Coll. AUPELF, Thiès, 18 p.
- Gac, J.Y. et F.X. Cogels 1986a. Le lac de Guiers : l'environnement actuel et essai d'évaluation des effets futurs des aménagements dans la vallée du Sénégal. Bull. Water Quality, XI, 2, pp.82-87.
- Gac, J.Y. et F.X. Cogels 1986b. Etude chimique des eaux du lac de Guiers (Sénégal) et de leur évolution annuelle. Approche des mécanismes de la régulation hydrogéochimique. Géodynamique, II, 1, pp. 121-134.
- Monteillet, J. 1988. Environnements sédimentaires et paléoécologie du delta du Sénégal au Quaternaire. Thèse, Univ. Perpignan, 267 p.

VII ème CONGRES MONDIAL DES RESSOURCES EN EAU

" L'eau et le développement dans la perspective du 21 ème siècle"

(13-18 mai 1991, Rabat- MAROC)

Présentation par MM.GAC⁽¹⁾ et COGELS⁽²⁾ de 3 communications :

GAC J.Y. (1991).- Salt water intrusion in the Senegal river lower valley.

COGELS F.X. et GAC J.Y. (1991). A quantitative model for the management of a sahelian lake in the senegal basin : the lake of Guiers.

GAC J.Y. et COGELS F.X. (1991). Geochemistry of the Ferlo valley waters.

mars 1991

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

(2) FUL, Fondation Universitaire Luxembourgeoise, 185 avenue de Longwy, B-6700, Arlon (Belgique).