

Premiers effets des barrages du fleuve Sénégal sur le lac de Guiers

François-Xavier COGELS (1), Abou THIAM (2),
Jean-Yves GAC (1)

RÉSUMÉ

La récente mise en fonction de deux barrages a régularisé le cycle hydrologique du fleuve Sénégal, et le fonctionnement du lac de Guiers, qui en est un défluent, a été complètement modifié. La disponibilité permanente d'eau douce fluviale permet de meilleurs remplissages annuels et une plus grande stabilité du niveau du lac. Ces nouvelles conditions empêchent l'exondation annuelle d'une importante frange de rivage comme c'était le cas auparavant. Elles ont aussi induit l'adoucissement progressif de ses eaux. La minéralisation globale du lac a diminué de près de 50 % dans la région méridionale. Simultanément, les variations annuelles de la salinité autrefois importantes ont nettement régressé. La végétation aquatique est elle aussi en cours de modification avec le développement excessif de *Pistia stratiotes* et celui d'espèces jusqu'alors très peu représentées comme *Sphenoclea zeylanica*. L'apparition récente de fleurs d'eau dans le lac peut laisser supposer le début d'un processus d'eutrophisation des eaux, lié au développement agricole de la région.

MOTS CLÉS : Fleuve Sénégal — Lac plat — Barrages — Impacts — Régime hydrologique — Qualité des eaux — Végétation aquatique — *Pistia stratiotes*.

ABSTRACT

INITIAL EFFECTS OF THE SENEGAL RIVER DAMS ON THE LAC DE GUIERS

The recent construction of two dams has regulated the hydrological cycle of the river Senegal and strongly modified the functioning of lac de Guiers, which is an effluent of R. Senegal. The permanent availability of river water allows better annual fill-ups and a greater stability of the lake level. These new hydrological conditions of Guiers also impede the yearly emergence of a wide littoral zone as before. They have also caused a gradual softening of the lake water: the total dissolved solids have decreased by nearly 50 % in the southern region. At the same time, the former important yearly variations of the salinity have distinctly regressed. The aquatic vegetation is also in modification, with an excessive development of *Pistia stratiotes* and the recent expansion of *Sphenoclea zeylanica*. Frequent algal blooms may indicate some eutrophication due to the development of irrigated agriculture around the lake.

KEY WORDS : Senegal River — Shallow lake — Dams — Impacts — Hydrological regime — Water quality — Aquatic vegetation — *Pistia stratiotes*.

(1) Orstom, BP 1386, Dakar, Sénégal.

(2) Institut des sciences de l'environnement, université. Ch. A. Diop, Dakar, Sénégal.

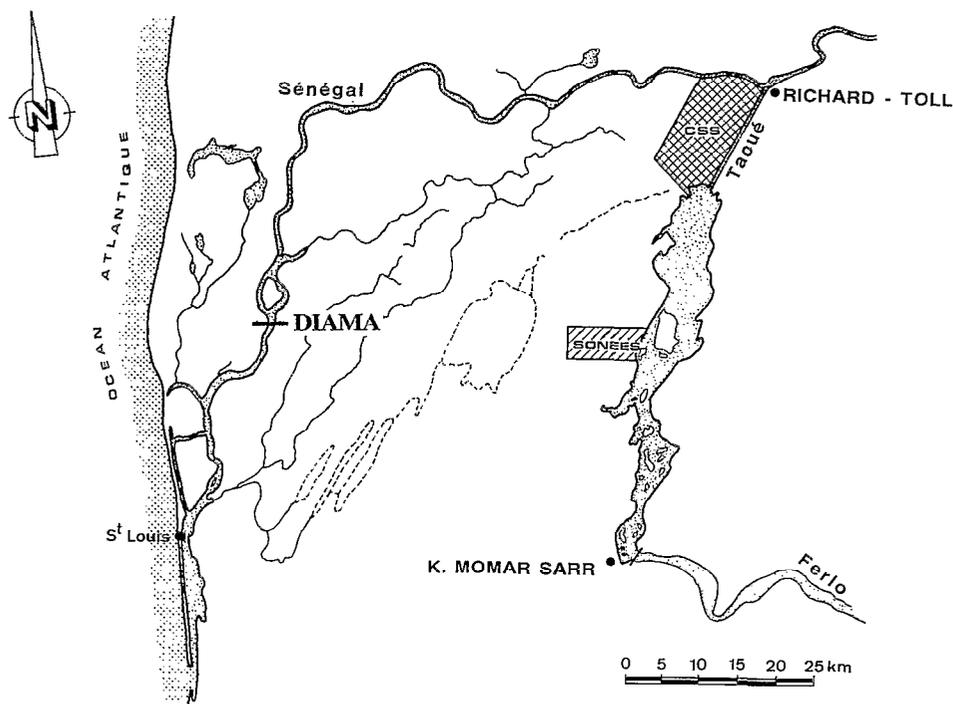


Fig. 1. — Carte de situation du lac de Guiers et de la basse vallée du fleuve Sénégal.
Situation of lac de Guiers and of the lower valley of the Senegal River.

INTRODUCTION

Le lac de Guiers est l'unique lac d'eau douce d'importance au Sénégal. Situé à la latitude $14^{\circ} 09'N$ et à la longitude $16^{\circ} 08'W$, ce lac plat d'origine tectonique se présente comme une étroite dépression longue de 50 km et large de 7 km au maximum. À l'origine, il constituait le déversoir aval du bassin versant du Ferlo peu avant la confluence à Richard-Toll avec la basse vallée du fleuve Sénégal. Il communiquait alors directement avec le lit mineur du fleuve par l'intermédiaire d'un marigot sinueux, la Taoué. À cause d'une pluviométrie négligeable sur le bassin du Ferlo, remplissage et vidange annuels du Guiers étaient sous la seule et directe dépendance de l'importance et de la durée des crues et décrues fluviales. Aujourd'hui un canal rectiligne a relayé le marigot de la Taoué et un double système de vannes à hauteur de l'embouchure du canal dans le fleuve (à Richard-Toll) permet de contrôler les transferts d'eau vers la dépression lacustre (figs. 1 et 2).

L'endiguement de la région Nord et la fermeture des exutoires au sud et à l'ouest en ont fait la plus grande réserve d'eau douce du pays avant la construction des barrages sur le fleuve Sénégal.

Depuis près de 50 ans ses eaux sont utilisées pour l'irrigation, de rizières tout d'abord, puis pour celle des 7500 ha de canne à sucre exploités aujourd'hui par la Compagnie sucrière sénégalaise (CSS). De nombreuses petites installations hydroagricoles assez rudimentaires sont dispersées sur son pourtour. L'usine des eaux (Sonees) installée en rive ouest assure 20 % des besoins en eau potable de la ville de Dakar. Enfin un grand projet est à l'étude pour l'adduction complémentaire d'eau vers Dakar par l'intermédiaire d'un canal partant de l'extrémité sud du Guiers (projet du canal de Cayor).

Depuis 1985, la mise en fonction des barrages de Diama et de Manantali a profondément modifié le fonctionnement hydrologique du fleuve et du lac de Guiers.

Le barrage fluvial de Diama, situé à 100 km en aval de la jonction du canal de la Taoué et à quelque 50 km de l'embouchure du Sénégal a pour rôle principal d'empêcher la remontée d'eau de mer dans la basse vallée du fleuve. À cause d'un relief quasi inexistant et d'un faible débit fluvial à l'étiage, les intrusions salines se propageaient autrefois sur plus de 250 km à l'intérieur des terres (GAC *et al.*, 1986). L'eau fluviale devenant saumâtre une partie de l'an-

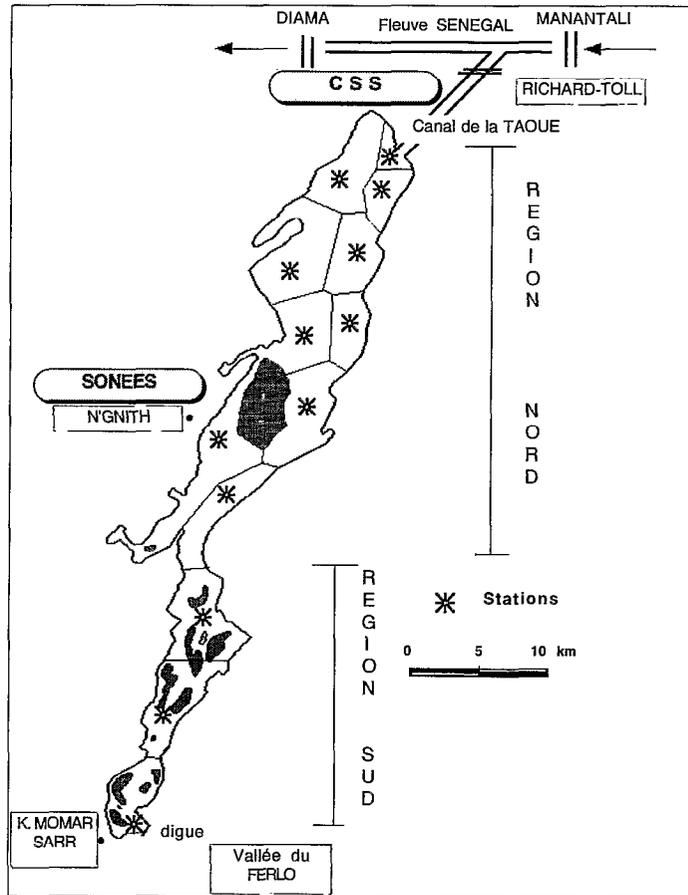


FIG. 2. — Carte du lac de Guiers, à la cote 1 m IGN, emplacement des stations d'échantillonnage et délimitation de leur zone d'influence respective (îlots indiqués en hachuré).

Map of the lac de Guiers (level : 1 m IGN), location of sampling stations and their zone of influence.

née, le développement des exploitations agricoles irriguées était limité.

Un second barrage (Manantali au Mali dans le haut bassin), régulateur de crues, est situé à 1200 km en amont. Opérationnel depuis 1987, il régularise les crues naturelles et préserve un écoulement significatif en saison sèche.

Le fonctionnement des deux barrages doit permettre la mise en valeur de 250 000 ha de cultures irriguées dans la vallée et assurer une importante production hydroélectrique.

Les premiers effets de ces aménagements fluviaux récents se font sentir au lac de Guiers ; ils sont (entre autres, mais principalement) d'ordre hydrologique, induits par la modification du régime fluvial et des relations fleuve-lac, d'ordre chimique et liés directement et indirectement aux changements intervenus

dans l'utilisation et la gestion des eaux de la réserve, et enfin d'ordre biologique, nettement perceptibles au niveau de la végétation aquatique.

L'étude présentée ici synthétise les modifications les plus importantes intervenues dans ces trois composantes de l'environnement lacustre.

Morphologie du lac

Le lac de Guiers se divise en deux régions bien distinctes :

— une région Nord, vaste zone d'eau libre qui à elle seule représente plus de 85 % du volume total du lac. Elle est limitée à son extrémité septentrionale par les digues qui ceinturent les champs de canne à sucre. La profondeur moyenne est faible, de l'ordre

de 2 m. Le fond du lac se situe sous le niveau de la mer à la cote - 2 m IGN ;

— une région Sud morcelée et parsemée d'îlots plus ou moins apparents selon la hauteur des eaux. Elle est limitée à son extrémité par une digue qui l'isole de l'ancienne vallée du Ferlo. De faible profondeur, la zone Sud a souvent été asséchée au cours de la dernière décennie (en 1978 et 1983 particulièrement) à la suite d'apports fluviaux très déficitaires.

Le tableau I indique les caractéristiques morphologiques principales des deux régions, à la cote de 1 m IGN qui peut être considérée aujourd'hui comme le niveau moyen des eaux.

TABLEAU I

Caractéristiques morphométriques du lac à la cote de 1 m IGN
Morphometry of the lake at the level 1 m IGN

	Région Nord	Région Sud	Total lac
Surface (km ²)	170	70	240
Volume (Mm ³)	338	52	390
Surface/Volume	0,50	1,35	0,62
Profondeur moyenne (m)	1,99	0,74	1,63
Profondeur max. (m)	3,00	1,75	

LES AMÉNAGEMENTS DU FLEUVE ET LEURS EFFETS SUR LE GUIERS

Effets sur l'hydrologie du lac

SITUATION ANTÉRIEURE À 1985 (AVANT DIAMA)

En régime hydrologique « naturel » (avant la mise en fonction de Diama), l'année hydrologique du Guiers se décomposait en 2 périodes bien distinctes :

— une phase de remplissage (août à octobre) débutant avec l'arrivée de la crue fluviale à Richard-Toll à hauteur du canal de jonction de la Taoué. L'ouverture des deux vannes du canal permettait le remplissage du Guiers : le niveau maximal était tributaire de l'importance et de la durée de la crue du fleuve ;

— une phase d'isolement de 9 mois (novembre à juillet). Le niveau du lac diminuait alors plus ou moins régulièrement, sous les effets de l'évaporation et des pompages divers. La CSS, principal consommateur, y pompait ses eaux dès l'arrivée de la langue salée marine à hauteur de la jonction fluvio-lacustre et jusqu'au début de la phase de remplissage suivante.

Cette alternance de deux phases était répétitive chaque année mais leur durée respective restait bien sûr soumise à la pluviométrie sur le haut bassin et en particulier sur le massif du Fouta Djalon.

La fig. 3 indique l'évolution du niveau lacustre depuis le début des observations en 1976 et permet de comparer la situation d'avant et d'après barrage.

La période antérieure à 1985 se caractérise par :

— une grande variabilité interannuelle des niveaux maximaux atteints au remplissage, soit 1,76 m durant l'année hydrologique 1981-82 pour seulement 0,69 m en 1983-84 ;

— des niveaux moyens annuels toujours très bas (moyenne : 0,38 m) et parfois extrêmes en fin de phase d'isolement comme les cotes de - 1,14 m en 1979-80 et même de - 1,40 m en 1982-83 ;

— un marnage annuel important, de 2,09 m en moyenne, avec un maximum de 2,55 m au cours de l'année hydrologique 1982-83 ;

— une profondeur moyenne annuelle de 1,25 m,

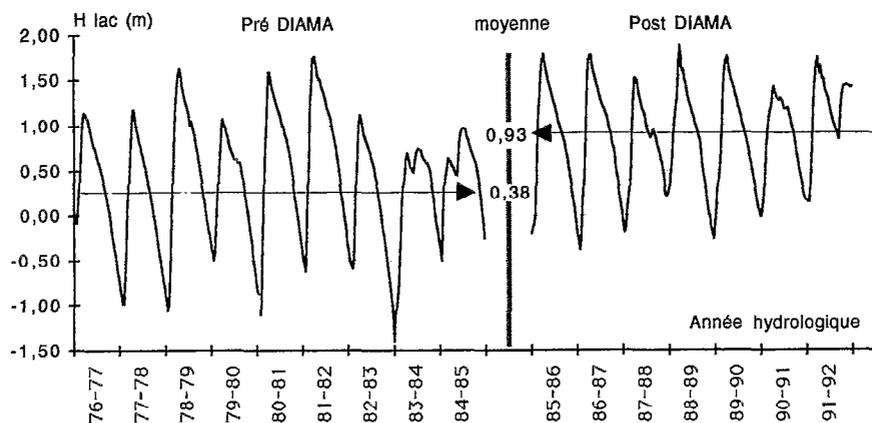


FIG. 3. — Hauteurs d'eau enregistrées au lac (m IGN) avant et après la mise en fonction du barrage de Diama en 1985 et niveau moyen des deux périodes.

Lake water levels (m IGN) recorded before and after 1985, when the Diama dam was operated, and average levels for the two periods.

pour une surface du plan d'eau de 202 km² et un volume de 252 millions de m³.

Ces conditions hydrologiques particulières, la grande instabilité des niveaux, la morphologie du lac et son rapport surface/volume élevé induisaient de très importantes variations de surface du plan d'eau et l'exondation annuelle d'une large frange de rivage.

À ce titre l'année hydrologique 1982-83 a été spectaculaire : niveau inférieur de -1,40 m fin juin 1983, assèchement complet de la zone méridionale et réduction de la région Nord à une mare terminale surchauffée de 70 km², profonde de 0,25 m en moyenne.

Les bilans hydrologiques établis pour la période 1976-1984 (COGELS et GAC, 1982; COGELS *et al.*, 1990) ont montré que l'évaporation (2,25 m/an) représentait près de 85 % des pertes annuelles en eau du lac, contre quelque 15 % pour les divers pompages. Quant au taux d'utilisation des apports fluviaux au lac (pour l'irrigation et la production d'eau potable), il était de l'ordre de 27 %.

SITUATION 1985-1992

Deux modifications essentielles sont intervenues depuis 1985 :

— le barrage de Diama et la régulation des débits à Manantali (depuis 1987) permettent le maintien d'un niveau fluvial plus élevé et plus stable à hauteur de la jonction du canal de la Taoué à Richard-Toll.

Entre 1985 et 1991, les périodes et durées de remplissage annuel du Guiers sont restées plus ou moins semblables à celles d'avant 1985. Les niveaux atteints dans le lac en fin de phase de remplissage sont cependant nettement supérieurs à ceux de la période précédente ;

— les pompages pour l'irrigation de la canne à sucre à partir du lac ont été réduits. En effet, les eaux fluviales maintenant douces toute l'année assurent en continu l'approvisionnement des cultures.

La fig. 3 illustre les modifications intervenues dans l'hydrologie du lac. On constate que depuis le début de l'année hydrologique 1985-86, les hauteurs d'eau atteintes au remplissage sont supérieures de 0,54 m en moyenne à celles d'avant la période de fonctionnement de Diama. Quant aux niveaux inférieurs, atteints en fin de phase d'isolement, ils se situent aujourd'hui à 0,73 m au-dessus de ceux de la période pré-Diama.

La cote moyenne annuelle est supérieure de 0,55 m à celle observée avant 1985 (0,93 m et 0,38 m). Enfin le marnage moyen annuel a été réduit de 2,09 m à 1,76 m.

Les niveaux extrêmes inférieurs rencontrés en fin de phase d'isolement avant 1985 ne sont plus d'actualité depuis la régularisation des débits fluviaux. La cote 0 m est rare et des niveaux inférieurs ne sont qu'exceptionnels.

Niveaux moyens annuels plus élevés et meilleure stabilité limnimétrique sont les deux caractéristiques essentielles de la période actuelle.

À noter qu'en 1992 la disponibilité importante et constante d'eau à l'amont du barrage de Diama et la stabilité de niveau ont incité les autorités compétentes à ouvrir la jonction fleuve-lac dès le début mars, en dehors de la période habituelle de remplissage. Le niveau du Guiers s'est élevé rapidement de la cote 0,80 m à celle de 1,30 m pour ensuite s'y maintenir grâce à des apports fluviaux constants. Ce mode de gestion qui préfigure peut-être celui qui sera adopté à court terme risque cependant d'engendrer de profonds bouleversements écologiques dans le Guiers.

La CSS ne s'approvisionne plus qu'occasionnellement à partir du lac où le taux d'utilisation effective des apports fluviaux s'est considérablement réduit aujourd'hui (7 à 8 %). Par contre, l'évaporation représente actuellement 90 % des pertes annuelles. Cette situation nouvelle incite à s'interroger sur le mode actuel de gestion quantitative des eaux du Guiers où un remplissage inutilement élevé (compte tenu des besoins) entraîne, de par la morphologie du lac, une augmentation très sensible de l'évaporation de la nappe d'eau.

D'autre part, afin d'éliminer les eaux très minéralisées de la région Sud du lac, qui accentuaient les difficultés de traitement à l'usine des eaux, des lâchers sont effectués annuellement depuis 1987 vers la vallée morte du Ferlo par l'ouverture de la digue méridionale du lac. Ces lâchers sont planifiés durant les périodes de hauteurs d'eau maximales du Guiers en fin de phase de remplissage. Ils durent 45 jours en moyenne et n'interviennent que modestement dans le bilan hydrologique du lac. En revanche, ils influencent nettement l'évolution de la qualité générale des eaux.

Effets sur la qualité des eaux du lac

ÉVOLUTION DES CHLORURES DISSOUS

Le caractère conservatif du chlorure dissous en fait un bon indicateur de l'évolution générale des solutions, particulièrement dans le cas du Guiers soumis à un cycle annuel minéralisation-dilution très marqué. Cependant, vu l'intervention des nombreux processus géochimiques et biologiques régulateurs dans l'évolution des solutions, la minéralisation glo-

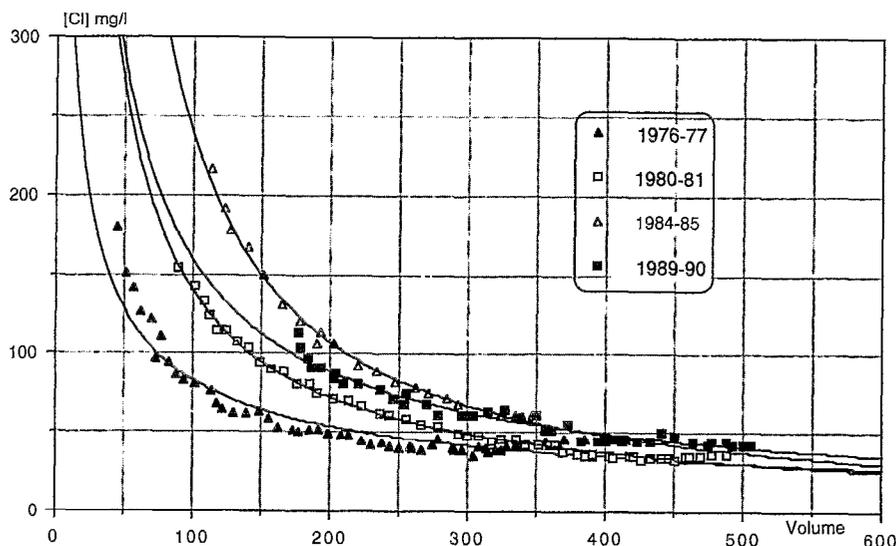


FIG. 4. - Évolution interannuelle de la relation entre la chlorinité moyenne (mg/l) et le volume du lac (10^6 m^3).
Inter-annual evolution of the relationship between average chlorinity (mg/l) and the lake volume (10^6 m^3).

bale de l'eau ne suit pas strictement celle des éléments conservatifs.

Les chlorures ainsi considérés comme paramètre de référence sont analysés depuis 1976 à cadence hebdomadaire à la station centrale de N'Gnith (en rive ouest) par le laboratoire de la Sonees (Société nationale d'exploitation des eaux du Sénégal). Cette station peut être considérée comme représentative de la qualité moyenne des eaux du lac (COGELS *et al.*, 1992). Une étroite corrélation permet à tout moment de transposer les mesures effectuées à N'Gnith à une estimation précise de la chlorinité moyenne du lac.

Évolution du rapport chlorinité / volume du lac

— De 1976 à 1985, le Guiers a été l'objet d'une salinisation progressive de ses eaux causée par les rejets dans la région Nord des eaux de drainage des exploitations agricoles irriguées (sur sols salés). La concentration moyenne en chlorures de ces rejets est de 300 mg/l pour un volume quotidien de l'ordre de $85\,000 \text{ m}^3$.

L'augmentation interannuelle du taux des chlorures dans le lac était alors très nette comme le montre la fig. 4 qui met en relation volume du plan d'eau et chlorinité correspondante. Les années hydrologiques 1976-77, 1980-81 et 1984-85 ont été prises comme références de la situation antérieure à la mise en fonction du barrage de Diama.

— L'année hydrologique 1989-90 montre par contre une légère diminution du taux des chlorures dissous par rapport aux années précédentes. Cette

réduction s'explique par les lâchers d'eau annuels (depuis 1988) vers la vallée du Ferlo qui, en évacuant les eaux très minéralisées de la région méridionale, ont accéléré le processus d'adoucissement du lac.

Malgré leur minéralisation assez élevée, ces apports sont bénéfiques aux sols du Ferlo, à sec depuis des dizaines d'années et naturellement sursalés. Ils permettent aujourd'hui la mise en valeur de quelques zones de décrue dans la vallée.

On constate donc depuis 1986 une légère décroissance du taux de chlorinité des eaux, qui fait suite à la longue phase de progression qui avait débuté aux environs des années 1970 avec les premiers déversements des eaux de drainage des cultures irriguées dans le Guiers.

Évolution interannuelle de la chlorinité moyenne et de ses valeurs extrêmes

Deux types de corrélations sont utilisées (COGELS *et al.*, 1993) : la première lie étroitement le niveau du lac à sa chlorinité moyenne (intégrée sur le volume total de la réserve). Sur la base de la cote moyenne annuelle du plan d'eau, on peut déduire sa teneur moyenne en chlorures pour la même période. La seconde corrélation permet d'évaluer la chlorinité moyenne des eaux du Guiers d'après les mesures de la station centrale de N'Gnith. Elle sera utilisée pour connaître les valeurs extrêmes du taux de chlorures dissous en cours d'année.

La fig. 5 illustre l'évolution des chlorures dissous depuis l'année hydrologique 1976-77.

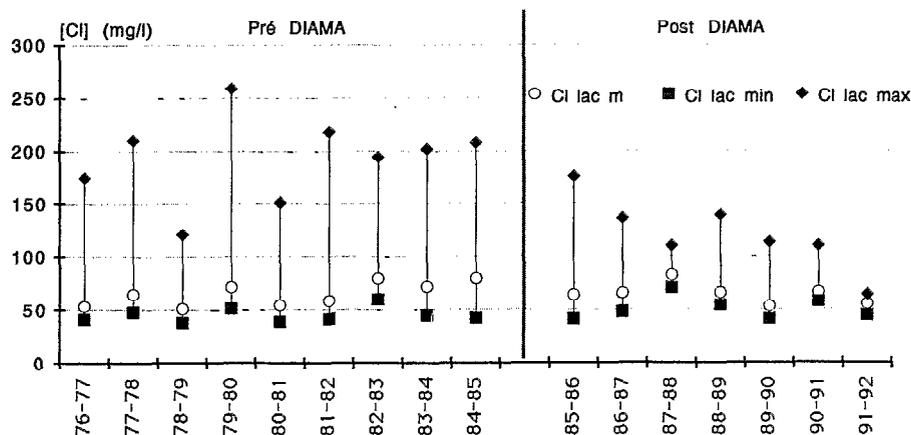


FIG. 5. — Chlorinité moyenne, intégrée sur le volume total du lac (mg/l). Valeurs annuelles maximale, moyenne et minimale de l'année hydrologique 1976-77 à 1990-91.

Average chlorinity, integrated on the total volume of the lake. Annual maximum, average and minimum values from the hydrological year 1976-77 until 1990-91.

La chlorinité moyenne annuelle du lac n'a guère varié depuis 1976 et se stabilise aux environs de 65 mg/l. Les valeurs extrêmes inférieures n'ont pas diminué dans la période post-Diama, mais ceci est dû à la seule année 1987-88. Par contre, les valeurs extrêmes supérieures ont régressé d'un peu plus de 35 %.

Comme pour les variations de niveau, la chlorinité des eaux se caractérise par une stabilisation progressive et des écarts annuels plus réduits depuis l'année hydrologique 1985-86. Les nouvelles conditions hydrologiques du fleuve ont permis des remplissages du Guiers meilleurs qu'auparavant. Cette modification du régime fluvial associée aux lâchers annuels des eaux les plus minéralisées vers le Ferlo ont engendré un adoucissement du réservoir et en corolaire maintenu les plus hauts niveaux de la chlorinité nettement en dessous des valeurs extrêmes d'avant 1985.

ÉVOLUTION DE LA QUALITÉ GÉNÉRALE DES EAUX

Bases de l'étude

Les bilans physicochimiques globaux destinés aux comparaisons des situations avant et après Diama ont été établis sur la base de deux grandes campagnes d'échantillonnages couvrant l'ensemble du plan d'eau :

— la première entre juillet 1979 et juillet 1982 a porté sur 18 séries d'analyses aux 13 stations localisées à la fig. 2. Les résultats obtenus ont déjà fait l'objet de divers comptes rendus et publications (COGELS et GAC, 1987) ;

— la seconde de septembre 1989 à janvier 1992 avec 21 séries d'analyses effectuées aux mêmes stations.

À chaque site est attribuée une zone théorique d'influence dont le volume a été calculé en fonction de la cote du plan d'eau et de la bathymétrie locale. Sur la base des mesures enregistrées à chaque station, il est possible de calculer la masse totale dans le lac ou partie du lac de chaque élément dissous et d'en déduire la concentration moyenne de cet élément pour l'ensemble du Guiers ou seulement pour l'une de ses régions.

Une régression (analogue à celles présentées à la fig. 4) permet ensuite le calcul de la relation liant le volume de chacune des régions à la concentration des divers paramètres qui y sont mesurés.

On considère aussi que les campagnes d'analyses 1979-82 et 1989-92 sont représentatives respectivement des situations qualitatives du Guiers d'avant et d'après la mise en fonction du barrage de Diama. Par référence à la fig. 3, les cotes moyennes du plan d'eau durant ces deux périodes sont respectivement de 0,38 m et de 0,93 m.

Résultats

Le tableau II indique la qualité moyenne des régions Nord et Sud dans les situations d'avant et d'après Diama.

On remarque :

— un gradient spatial important avec une nette différence de qualité entre les régions Nord et Sud. Cette différence s'explique par la situation en «cul-

TABLEAU II

Qualité chimique moyenne des eaux des régions Nord et Sud du Guiers (meq/l) et minéralisation globale de ses eaux (mg/l) avant (période P1) et après (période P2) la mise en fonction du barrage de Diama
Average chemical quality of water in the North and South regions of the Guiers (meq/l) and total dissolved solids (mg/l) before (P1 period) and after (P2 period) Diama dam started working

	Région Nord			Région Sud		
	P1 (1979-82)	P2 (1989-92)	Δ	P1 (1979-82)	P2 (1989-92)	Δ
H lac (m)	0,38	0,93		0,38	0,93	
Vol. (Mm3)	225	324		27	49	
Cl	1,47	1,03	-30%	6,99	3,35	-52%
SO ₄	0,28	0,51	85%	1,50	0,64	-57%
HCO ₃	1,57	1,21	-23%	5,21	3,02	-42%
Ca	0,87	0,61	-30%	2,06	1,16	-44%
Mg	0,83	0,72	-14%	3,71	2,03	-45%
Na	1,46	1,13	-23%	7,50	3,69	-51%
K	0,13	0,14	8%	0,62	0,33	-47%
Σ anions	3,32	2,75		13,69	7,01	
Σ cations	3,30	2,60		13,89	7,21	
Min. gl. (mg/l)	227	187	-18%	921	480	-48%

de-sac» de la région méridionale, du moins jusqu'en 1988, année des premiers lâchers des eaux de la zone Sud vers la vallée du Ferlo. La profondeur moyenne y est nettement plus faible qu'en zone Nord et les effets de l'évaporation sans doute plus marquants.

Sur la base des concentrations en chlorures et en sodium, la différence Nord-Sud était de l'ordre d'un facteur 4,9 pour la période précédant Diama. Elle est de l'ordre d'un facteur 3,2 aujourd'hui. Pour les autres variables, les différences sont légèrement atténuées à cause de l'intervention des processus géochimiques régulateurs.

Les sulfates ne sont pas à prendre en considération dans cette interprétation, à cause de leur intervention dans ces processus. Une sulfato-réduction très importante au niveau des sédiments a été mise en évidence dans la zone Sud tandis que le relargage de l'élément par oxydation du FeS₂ est probable en région Nord (COGELS et GAC, 1987).

Les différences de minéralisation globale entre les deux régions sont dans un rapport de 4 et 2,5 pour les deux périodes respectivement.

On constate une nette diminution des concentrations des éléments dissous mesurés depuis la mise en fonction de Diama, surtout dans la région Sud du lac principalement influencée par les lâchers annuels vers la vallée du Ferlo. Sulfates exceptés (et potassium dans une moindre mesure), la diminution des concentrations moyennes a été de 10 à 30 % en région Nord et de 40 à près de 60 % en région Sud. Si l'on se base sur les chlorures comme paramètre de référence, les diminutions sont respectivement de 25 et 50 %.

Une diminution nette de la salinité des eaux, très marquée dans la région méridionale du lac, et des variations annuelles de la concentration des éléments dissous bien moindres sont les deux facteurs qui caractérisent les nouvelles conditions chimiques du Guiers depuis la mise en fonction du barrage de Diama.

De son côté, le bilan global de la quantité de sels dans le lac montre une augmentation de l'ordre de 11 % entre les deux périodes étudiées en passant de 76 000 à 84 000 tonnes. Cette augmentation est très nette en région Nord (19 %) alors que la région méridionale reste stable. La baisse quasi générale de concentration des éléments dissous constatée depuis 1982 devrait donc être attribuée à leur seule dilution plus importante dans la réserve, favorisée par des remplissages plus conséquents. En fait, comme l'augmentation du taux de chlorures le laissait déjà supposer (fig. 4 et 5), la quantité de sels dissous dans le lac a augmenté progressivement depuis la fin de la première période d'étude en 1982 et ce jusqu'en 1985 où elle a culminé à près de 120 000 tonnes (COGELS *et al.*, 1992). Cette augmentation rapide est imputable aux rejets CSS puisque les lâchers vers le Ferlo «compensateurs» n'interviendront pour la première fois qu'en 1988. On se situe donc actuellement dans une phase de régression du stock des éléments dissous.

Cette régression récente a été expliquée par l'application d'un modèle de gestion globale des eaux du Guiers qui intègre les différents paramètres du bilan hydrologique et leur qualité chimique respective.

Certains paramètres du bilan sont de qualité considérée constante, comme les rejets de la CSS et les apports pluviométriques ou fluviaux. D'autres, comme les pompages autour du lac et les lâchers vers le Ferlo, voient leur qualité évoluer dans le temps sous l'effet des apports et pertes divers et de l'évaporation du plan d'eau. Testé sur la base de l'évolution des chlorures dans le lac, le modèle donne des résultats fiables, conformes aux mesures de terrain (NIANG, 1992).

Afin de préciser la part respective de chacun des facteurs hydrologiques dans le bilan hydrochimique du lac, la simulation a été appliquée aux années 1989 à 1992 et indique que les rejets CSS totalisent 71 % des apports en minéraux dissous pour 27 % au fleuve et 3 % aux pluies. Les pompages dans la réserve représentent 26 % du total des pertes en éléments et le solde, soit 74 %, est issu des lâchers au Ferlo. Rejets de la CSS et lâchers vers le Ferlo sont donc bien les deux facteurs clé de l'évolution qualitative du Guiers alors qu'hydrologiquement ils ne représentent respectivement que 4 % des apports et 13 % des pertes annuelles en eau. Si les rejets CSS ont un débit et une qualité assez constants dans l'année, les volumes lâchés vers le Ferlo sont plus irréguliers dans le temps, ce qui explique les variations qualitatives parfois brutales constatées ces dernières années au lac. Notons enfin qu'aujourd'hui, les rejets CSS apportent annuellement au Guiers quelque 25 000 tonnes d'éléments dissous, tandis que les lâchers au Ferlo en évacuent en moyenne 39 000 tonnes. Comme le stock dans le lac est aujourd'hui de 84 000 tonnes, on comprend le rôle qualitatif fondamental de ces 2 paramètres.

En région Nord comme en région Sud, la composition chimique des eaux, exprimée cette fois en % de meq/l, varie très peu entre la période 1 et la période 2 (tabl. III). Exprimée dans les mêmes unités, celle des

rejets de la CSS s'est également peu modifiée. La minéralisation globale des rejets a par contre fortement augmenté, passant de 650 mg/l en 1979-82 à 950 mg/l aujourd'hui. Leur teneur en sulfates a augmenté de plus de 50 %, ce qui explique sans doute leur hausse sensible enregistrée en région Nord ces dernières années.

Effets sur la végétation aquatique lacustre

L'étude décrit les changements les plus visibles intervenus ou en cours dans les principaux peuplements des macrophytes du Guiers et tente d'en discerner la ou les causes principales. L'historique bibliographique de la végétation aquatique du Guiers étant pauvre, les comparaisons entre situation antérieure et actuelle se basent pour l'essentiel sur l'étude phytosociologique de THIAM (1984) réalisée au début des années 1980. Un aperçu des conséquences physiques, biologiques et économiques des changements est présenté.

— *Typha australis* est une espèce bien représentée au lac. Des eaux permanentes, profondes de 1 m environ et un niveau stable sont 3 facteurs écologiques qui favorisent son développement.

Les descriptions anciennes de la végétation du Guiers présentées par LEUDELOT et LELIÈVRE (1828), PERROTET (1833) — cité par TROCHAIN (1940) —, LEMMET et SCORDEL (1918) et HENRY (1918) font mention d'une végétation aquatique lacustre composée de *Typha*, *Phragmites*, *Cyperus articulatus*, *Nymphaea*, *Arundo donax*, *Echinochloa*, *Veliveria* et diverses Utriculaires.

TROCHAIN (1956) fait état des typhaies en forte expansion depuis 1945 dans la zone méridionale du Guiers et estime la surface occupée (en 1952) à un millier d'hectares. Des pêcheurs qui ont connu cette

TABLEAU III

Profil chimique des eaux des régions Nord et Sud du Guiers et des rejets de la CSS avant (période P1) et après (période P2) la mise en fonction du barrage de Diama (% meq/l)
Chemical composition of water in the North and South of Guiers and of CSS wastes, before (P1 period) and after (P2 period) Diama dam started working (% meq/l)

	Région Nord	Région Nord	Région Sud	Région Sud	Rejets	Rejets
	P1 (1979-82)	P2 (1989-92)	P1 (1979-82)	P2 (1989-92)	P1 (1979-82)	P2 (1989-92)
Cl	22%	19%	25%	24%	30%	30%
SO4	4%	10%	5%	5%	15%	14%
HCO3	24%	23%	19%	21%	5%	6%
Ca	13%	11%	7%	8%	7%	8%
Mg	13%	13%	13%	14%	12%	14%
Na	22%	21%	27%	26%	31%	27%
K	2%	3%	2%	2%	1%	1%

époque confirment d'ailleurs aujourd'hui cet envahissement. Enfin, l'examen des photos de la couverture aérienne de la région Sud du lac en 1953 montrent un important développement végétal à cette époque.

Cette prolifération végétale des années 1950 est à mettre en relation avec les conditions limnimétriques qui prévalaient alors (CREMOUX, 1961) et peut-être aussi avec l'adoucissement simultané des eaux. À l'époque, un régime fluvial à débits élevés (FAURE *et al.*, 1981; GAC *et al.*, 1986) et bien étalés dans l'année permettait des conditions limnimétriques dans le Guiers favorables et stables, et évitait des taux de minéralisation excessifs grâce à une bonne dilution annuelle des eaux. La digue méridionale du Guiers n'existait pas encore et l'extension du lac dans la vallée du Ferlo jouait aussi un rôle de frein aux variations de niveau. Enfin les pompages dans le lac étaient très limités.

ADAM (1964) signale encore l'importance des typhaies au début des années 1960. L'année 1965-66 marque la fin du cycle hydrologique fluvial favorable amorcé 20 ans plus tôt. Fleuve et lac entament alors une phase cruciale marquée par des années d'étiages très prononcés comme en 1971-72 et 1972-73. Ces faibles crues fluviales se traduisent dans le Guiers par de mauvais remplissages, des niveaux d'étiage très bas, l'assèchement de sa région méridionale en 1969 et 1971 (REIZER, 1974), et celui du lac quasi tout entier en juin 1973. Après la courte période de répit des années 1974-75 et 1975-76, la situation tant fluviale que lacustre redevient très défavorable et le restera jusqu'à la mise en fonction du barrage de Diamina en 1985 (cf. fig. 3).

Les typhaies du Guiers vont ainsi progressivement régresser entre les années 1970 et 1985. Les observations de THIAM (1984) en 1980 le confirment bien. Cette année-là, la surface occupée est estimée à 170 ha seulement. Les années extrêmes qui font suite, dont l'année hydrologique 1982-83 qui vit le lac presque entièrement asséché, aboutiront à la disparition de la quasi-totalité du reste du peuplement.

Depuis 1986, les typhaies sont à nouveau en développement surtout en région Sud. Dans la région Nord par contre, l'extension des cultures irriguées a réduit les zones de colonisation potentielle de l'espèce. La couverture actuelle de la région méridionale peut être estimée à une centaine d'hectares et ce développement végétal a eu pour conséquence immédiate son exploitation par l'artisanat local.

Typha australis semble donc bien avoir accusé un cycle de développement dans le Guiers dépendant des changements de régime hydrologique du plan d'eau et de celui du taux de minéralisation des eaux qui en est la conséquence.

Les conditions sont aujourd'hui réunies pour voir

l'espèce entamer une nouvelle phase d'expansion; niveaux des eaux assez stables, profondeur moyenne de 1 à 1,5 m en région Sud et adoucissement du milieu sont en effet autant de facteurs favorables.

Les conséquences d'un développement végétal excessif peuvent être d'ordre hydrologique, faisant obstacle au déplacement des masses d'eau vers l'extrémité sud du Guiers, elle-même point de départ du futur canal de Cayor. Elles peuvent être aussi d'ordre sanitaire, avec les typhaies comme support aux larves d'anophèles vecteurs de paludisme, et indirectement d'ordre économique en assurant refuge à la faune aviaire destructrice des cultures. Ces graves conséquences sanitaires et économiques sont en fait celles vécues par les populations riveraines du Guiers au début des années 1950 et décrites par GROSMOIRE (1957) et TROCHAIN (1956).

— *Pistia stratiotes* est aujourd'hui le témoin le plus visible des nouvelles conditions du milieu lacustre engendrées par les aménagements fluviaux.

Jusqu'en 1985, l'espèce était représentée par quelques groupements isolés dérivant sur le lac au gré de l'orientation des vents. En 1990, *Pistia* couvrait quelques hectares limités à l'extrémité sud du lac. Aujourd'hui (fin 1992), le peuplement est devenu envahissant et représente quelques centaines d'hectares en obstruant toute la région méridionale. Les vents de direction générale nord-sud ont favorisé cette localisation. En fonction des modifications de direction, même très ponctuelles, le peuplement se déplace, freiné seulement par les nombreux îlots qui parsèment cette région Sud. Si les *Pistia* sont en partie d'origine fluviale (transitant par le canal de la Taoué), la reproduction végétative et sexuée de l'espèce dans le lac est rapide.

Deux paramètres paraissent être déterminants pour la prolifération de l'espèce :

— l'espèce se développe préférentiellement en eau douce mais tolère des eaux légèrement saumâtres (BERHAUT, 1988). La salinité très élevée dans le lac avant 1985 et ses variations annuelles importantes à cette époque agissaient alors probablement comme facteur limitant le développement excessif du peuplement. Ceci semble confirmé par des essais menés en 1993 dans des bassins en terre creusés le long du lac, qui ont montré que le développement de *Pistia* était ralenti dans des eaux de conductivité supérieure à 2000 μmhos correspondant à une minéralisation globale de 1400 mg/l environ;

— l'assèchement annuel d'une frange importante du rivage est déterminant pour la limitation de la prolifération des *Pistia*. Les observations au Guiers montrent que, pour être efficace, cette mise à sec doit durer plus de 6 mois. Une remise sous eau plus précoce des zones exondées favorise une reprise végétative très rapide de la population.

Le développement rapide de *Pistia stratiotes* a été fréquemment observé dans les milieux lacustres tropicaux nouvellement aménagés tels que les lacs de barrage de Kossou en Côte-d'Ivoire et Volta au Ghana (DEJOUX, 1988), où le milieu n'a pas encore atteint un équilibre écologique. C'est sans doute le cas aujourd'hui au lac de Guiers. C'est aussi le cas actuellement dans le parc national ornithologique du Djoudj qui borde le fleuve Sénégal quelques kilomètres en amont du barrage de Diama. Depuis la mise en fonction du barrage, les canaux et plans d'eau du parc sont alimentés exclusivement en eau douce alors qu'il étaient approvisionnés en eau saumâtre avant 1985. *Pistia stratiotes* s'y est développé à un rythme encore supérieur à celui constaté dans le Guiers au point d'en chasser la plupart des oiseaux et simultanément les touristes!

L'impact d'un développement excessif de ces végétaux flottants sur l'hydrologie lacustre pourrait être négatif. Leur accumulation risque d'entraver le passage de l'eau et de colmater les pompes au point de départ du canal de Cayor. Notons enfin que *Pistia* et son système racinaire dense est un refuge pour de nombreuses larves aquatiques comme les anophèles.

— *Sphenoclea zeylanica* est une autre espèce en pleine et récente expansion sur le Guiers où elle semble trouver des conditions adéquates surtout dans la région Nord-Ouest et à proximité de l'embouchure du canal de la Taoué. En 1980, THIAM (1984) n'avait recensé que quelques rares individus dans les mares de bordure de la rive ouest du lac.

Le développement accéléré de l'espèce date de 1990. Fin 1992, le peuplement forme des tapis flottants de 5 à 20 m de diamètre, qui couvrent plusieurs dizaines d'hectares. Les végétaux sont enracinés à plus de 2 m de profondeur en contradiction avec leur optimum théorique que sont les eaux boueuses et de faible profondeur (RAYNAL-ROQUES, 1980). L'espèce se propage actuellement vers les régions Centre et Sud du Guiers.

À l'extrémité nord du lac, *Sphenoclea zeylanica* a supplanté *Nymphoides ezannoi* qui, avec *Aeschynomene elaphroxylon*, formait le groupement caractéristique de la zone il y a 10 ans. Cette disparition de *Nymphoides* peut aussi s'expliquer par la proximité et la « qualité » des rejets de la CSS, susceptibles de contenir ou d'avoir contenu par intermittence des résidus d'herbicides employés dans les casiers sucriers.

Quant au groupement à *Aeschynomene elaphroxylon*, il reste abondant en région septentrionale mais sa dispersion vers la région Sud du lac est en cours. Les niveaux élevés du Guiers ces dernières années et l'important courant d'eau nord-sud induit par les nouvelles conditions hydrologiques ont favorisé l'ar-

rachement du fond puis la dérive des radeaux flottants vers la zone méridionale du plan d'eau où l'espèce est présente aujourd'hui.

— *Ceratophyllum demersum* se développe rapidement dans la partie Nord du Guiers, surtout dans la zone profonde jouxtant l'embouchure du canal de la Taoué dans le lac et jamais exondée. L'espèce, peu abondante auparavant, provient entre autres des canaux d'irrigation de la CSS où sa prolifération excessive depuis 1990 nécessite de très vigoureux traitements herbicides. La prolifération de *Ceratophyllum* est signalée dans d'autres régions aux caractéristiques assez semblables à celles du Sénégal, comme dans le delta central du Niger où il est le macrophyte aquatique dominant (BLANC *et al.*, 1955; DUMONT *et al.*, 1981).

L'espèce caractérise habituellement les milieux eutrophes. Elle est aussi un support privilégié des mollusques hôtes vecteurs de la schistosomiase (KLUMPP et CHU, 1980; LÉVÊQUE, 1980), maladie qui se propage le long du fleuve Sénégal et aussi plus récemment à la périphérie du lac de Guiers (TALLA *et al.*, 1990; HANDSCHUMACHER, 1992).

Notons enfin l'absence actuelle d'*Eichhornia crassipes* (« jacinthe d'eau ») dans le Guiers.

Depuis 1990, des apparitions épisodiques de fleurs d'eau sont signalées dans la zone centrale du lac, par temps calme et très ensoleillé. Elles se composent principalement d'*Anabaena spiroides* et *Microcystis aeruginosa*, algues bleues typiques des eaux eutrophes. *Anabaena* est caractéristique des fleurs d'eau dans les lacs sahéliens (LITIS, 1980). Ces deux espèces furent identifiées au Guiers en 1980 par DIA et REYNAUD (1982) et en 1984 par COMPÈRE (1991). Ces poussées algales ne sont pour l'instant qu'épisodiques mais elles rendent difficile et accroissent le coût du traitement des eaux à l'usine de N'Gnith.

L'adoucissement récent des eaux et les fluctuations atténuées de la salinité ont certainement favorisé le développement algal. Enfin, les ouvertures et fermetures fréquentes des deux vannes de la Taoué en 1990 et 1991 mais aussi celles destinées aux lâchers annuels vers la vallée du Ferlo ont provoqué à chaque fois une augmentation sensible de la turbidité dans le lac. Le déplacement d'importantes masses d'eau vers le sud du Guiers a facilité la remise en suspension de la vase fluante du fond. On peut alors supposer corrélativement la remise en solution partielle du phosphore qui y était piégé. L'apport de nutriments au lac est sans doute favorisé aussi par l'extension récente des cultures irriguées sur son pourtour, attirées par la disponibilité permanente d'eau dans la réserve. Ces cultures couvrent aujourd'hui environ 2500 ha et des périmètres maraîchers de plusieurs milliers d'hectares sont en cours d'amé-

nagement. Une étude des nutriments dans le Guiers et du développement phytoplanctonique vient d'être entreprise.

CONCLUSIONS

Les changements induits au milieu lacustre du Guiers par les aménagements de la vallée du Sénégal sont bien perceptibles.

Du point de vue strictement hydrologique ils sont bénéfiques au lac en lui assurant de bons remplissages et une meilleure stabilité de son niveau. Afin d'éviter d'inutiles gaspillages, une gestion quantitative rigoureuse de la réserve sera à l'avenir indispensable pour maintenir cette importante surface évaporante dans des limites raisonnables compte tenu bien sûr des besoins des divers utilisateurs.

La qualité chimique des eaux s'est modifiée depuis l'année 1985, date de la mise en fonction du barrage fluvial de Diama. Leur adoucissement progressif est bien marqué, surtout en région méridionale et les importantes variations annuelles de salinité enregistrées auparavant sont aujourd'hui atténuées.

La végétation aquatique du Guiers présente aussi des modifications depuis 1985, modifications évidemment plus lentes que celles observées pour les facteurs hydrologiques et chimiques. Le développement de *Pistia stratiotes* est le phénomène le plus marquant de ces changements écologiques induits sans doute par les modifications des conditions du milieu.

De prime abord, le développement végétal récent et l'apparition de fleurs d'eau peuvent aussi suggérer une eutrophisation progressive des eaux du Guiers liée à l'extension des cultures irriguées. Cette éventualité ne constitue cependant pas une certitude, du moins sur la base des premières investigations chimiques menées récemment.

REMERCIEMENTS

Cette étude s'inscrit dans le cadre du programme général de recherche STD «Equesen» (Environnement et qualité des eaux du Sénégal) financé par la CEE (DG XII).

Les auteurs remercient M. P. COMPÈRE du Jardin botanique national de Belgique à Meise pour l'identification des algues du lac.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 14 juin 1993

RÉFÉRENCES

- ADAM (J. G.), 1964. — Contribution à l'étude de la végétation du lac de Guiers (Sénégal). *Bull. Ifan*, 26 (1) : 1-72.
- BERHAUT (J.), 1988. — *Flore illustrée du Sénégal*, tome IX, 523 p.
- BLANC (M.), DAGET (J.) et d'AUBENTON (F.), 1955. — L'exploitation des eaux douces dans le bassin du Moyen Niger. *Bull. Ifan*, 17 : 1157-1173.
- COGELS (F. X.), GAC (J. Y.), 1982. — Le lac de Guiers : fonctionnement, bilans hydriques — Évaporation d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne (Sénégal). *Cah. Orstom, sér. Géol.*, XII (1) : 41-60.
- COGELS (F. X.), GAC (J. Y.), 1987. — Évolution spatio-temporelle de la chimie des eaux du lac de Guiers (Sénégal). *Géodynamique*, 1 (2) : 121-134.
- COGELS (F. X.), GAC (J. Y.), APPAY (J. L.), EVORA (N.), LABROUSSE (B.), 1990. — *Fonctionnement et bilans hydrologiques du lac de Guiers de 1976 à 1989*. Doc. multigr. Orstom Dakar, CEE, 60 p.
- COGELS (F. X.), CARN (M.), GAC (J. Y.), 1992. — *Évolution annuelle et interannuelle des chlorures dans le lac de Guiers à N'Gnith*. Doc. multigr. Orstom Dakar, CEE, 40 p.
- COGELS (F. X.), NIANG (A.), CARN (M.), GAC (J. Y.), 1993. — *Recherche d'une station de référence pour un suivi qualitatif régulier des eaux du lac de Guiers*. Doc. multigr. Orstom Dakar, CEE, 20 p.
- COMPÈRE (P.), 1991. — Contribution à l'étude des algues du Sénégal. I. Algues du lac de Guiers et du Bas-Sénégal. *Bull. Jard. Bot. Nat. Belg.* 61 (3/4) : 171-267.
- CREMOUX (R.), 1961. — *Étude de la pêche dans les eaux fluviales du Nord-Sénégal*. CTFT, Richard-Toll, 271 p.
- DEJOUX (Cl.), 1988. — *La pollution des eaux continentales africaines*. Trav. et Doc., Orstom, n° 213, 513 p.
- DIA (A.), REYNAUD (P. A.), 1982. — Le phytoplancton du lac de Guiers : approche qualitative et quantitative. *Cah. Orstom, sér. Biol.*, 45 : 35-47.
- DUMONT (H. J.), PENSAERT (J.) et VAN DE VELDE (I.), 1981. — The crustacean zooplankton of Mali (West Africa). *Hydrobiologia*, 80 : 161-187.
- FAURE (H.), GAC (J. Y.), 1981. — Will the sahelian drought end in 1985? *Nature*, 291 : 475-478.
- GAC (J. Y.), CARN (M.), SAOS (J. L.), 1986. — Invasion marine dans le fleuve Sénégal. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 19 (1) : 3-18.

- GROSMAIRE (P.), 1957. — Éléments de politique sylvo-pastorale au Sahel sénégalais. Fasc. 2 : Les conditions du milieu. *Bull. du Service des Eaux et Forêts*, n° 2 (10), 56 p.
- HANDSCHUMACHER (P.), 1992. — Des aménagements hydro-agricoles dans la vallée du fleuve Sénégal ou le risque de maladies hydriques en milieu sahélien. *Sécheresse* 4, vol. 3 : 219-226.
- HENRY (Y.), 1918. — *Irrigations et cultures irriguées en Afrique tropicale*. Larose, Paris, 296 p.
- ILTIS (A.), 1980. — Les Algues. In : *Flore et faune aquatiques de l'Afrique sahélo-soudanienne*. Tome 1. Init. et Doc. tech., Orstom n° 44 : 9-61.
- KLUMPP (R. K.), CHU (K. Y.), 1980. — Importance of the aquatic weed *Ceratophyllum* to transmission of *Schistosoma haematobium* in the Volta Lake. *Ghana Bull. Who*, 58, 5 : 791-798.
- LEMMET (J.), SCORDEL (M.), 1918. — Contribution à l'étude agrologique de la vallée du Bas Sénégal. *Bull. Com. et Hist. Sc. AOF* : 17-56.
- LEUDELOT (?), LELIÈVRE (?), 1828. — Journal d'un voyage au lac de N'ghier ou Paniéfole. Manuscrit original. *Archives nationales du Sénégal*. Ref. P273. 14 p.
- LÉVÈQUE (Ch.), 1980. — Mollusques. In : *Flore et faune aquatiques de l'Afrique sahélo-soudanienne*. Tome 1. Init. et Doc. techniques, Orstom, n° 44. : 283-305
- NIANG (A.), 1992. — Première approche pour la mise au point d'un modèle de gestion intégrée des eaux du lac de Guiers. *Rapport multigr.* 38 p.
- RAYNAL-ROQUES (A.), 1980. — Les plantes aquatiques. In : *Flore et faune aquatiques de l'Afrique sahélo-soudanienne*. Tome 1. Init. et Doc. tech., Orstom, n° 44 : 63-152.
- REIZER (Ch.), 1974. — *Définition d'une politique d'aménagement des ressources halieutiques d'un écosystème aquatique complexe par l'étude de son environnement abiotique, biotique et anthropique. Le fleuve Sénégal moyen et inférieur*. Thèse doctorale. Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Arlon, Belgique. 563 p.
- TALLA (I.), KONGS (A.), VERLE (P.), BELOT (J.), SARR (S.), COLL (A. M.), 1990. — Outbreak of intestinal schistosomiasis in the Senegal river basin. *Ann. Soc. belge Méd. trop.*, 70 : 173-180.
- THIAM (A.), 1984. — *Contribution à l'étude phytoécologique de la zone de décrue du lac de Guiers*. Thèse doct. 3^e cycle. Inst des sc. de l'environnement. Univ. de Dakar. 105 p.
- TROCHAIN (J.), 1940. — Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal. *Mém. Ifun* n° 2. 433 p.
- TROCHAIN (J.), 1956. — *Rapport préliminaire de mission botanique au Sénégal : Le problème de la pullulation de Typha australis au lac de Guiers*. Publ. Univ. de Montpellier. 17 p.