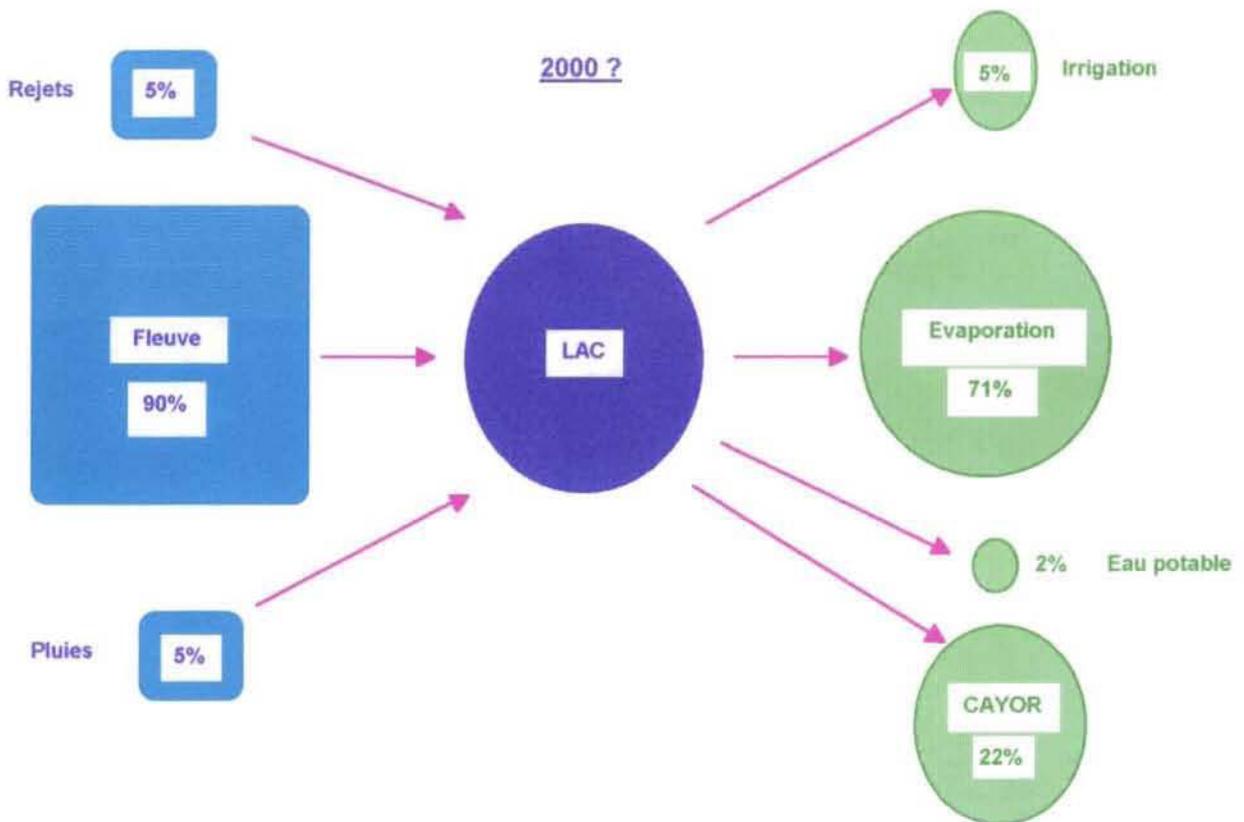


LE LAC DE GUIERS

ETUDE GENERALE DU SYSTEME LACUSTRE ET PROBLEMATIQUE DE GESTION



(1) Institut français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM)
BP 1386, Dakar, Sénégal

(2) Université de Dakar, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines

SOMMAIRE

INTRODUCTION	3
I - PRESENTATION GENERALE DU LAC DE GUIERS	
A - LE CADRE GEOGRAPHIQUE	4
B - HISTORIQUE DES AMENAGEMENTS	4
C - CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES	8
II - HYDROLOGIE ET GESTION QUANTITATIVE	
A - REGIME HYDROLOGIQUE DU GUIERS DEPUIS 1976	
1 - Fonctionnement du réservoir et utilisation des eaux	9
2 - Hauteurs d'eau	13
3 - Bilans hydrologiques 1976-1992	14
B - L'EVAPORATION DU LAC	
1 - Mode de calcul	20
2 - Résultats	20
3 - Evaporation calculée au lac, mesurée en bac, et les paramètres du climat	21
C - MODELE DE GESTION DES EAUX	
1 - Présentation générale	22
2 - Contenu	24
3 - Options de simulations	26
4 - Deux exemples d'utilisation	27
III - QUALITE HYDROCHIMIQUE DES EAUX	
A - METHODOLOGIE DE L'ETUDE QUALITATIVE	
1 - Stations d'échantillonnage	30
2 - Séries et périodes	30
3 - Paramètres mesurés et présentation des résultats	32
B - TEMPERATURES AQUATIQUES ET pH	32
C - EVOLUTION DE LA SALINITE DES EAUX DEPUIS L'ANNEE HYDROLOGIQUE 1976-77	34
D - QUALITE GENERALE DES EAUX	
1 - Bilan qualitatif 1989-1992	36
2 - Comparaison entre les périodes 1989-92 et 1979-82	42

E - TEST D'UNE STATION DE REFERENCE POUR LE SUIVI QUALITATIF DES EAUX	
1 - Corrélation entre la chlorinité moyenne du lac et celle de la station de N'Gnith	45
2 - Autres paramètres	47
F - APPLICATION D'UN PREMIER MODELE DE GESTION GLOBALE DES EAUX	
1 - Présentation succincte du modèle	49
2 - Test de fiabilité du modèle	50
3 - Applications du modèle	51
IV - MODIFICATIONS HYDROBIOLOGIQUES RECENTES	55
V - GESTION FUTURE DES EAUX - CRITERES ET PERSPECTIVES QUALITATIVES	
A - CRITERES DE GESTION QUANTITATIVE DES EAUX ET IMPLICATIONS	59
B - CRITERES DE GESTION QUALITATIVE	
1 - Facteurs déterminants de l'évolution qualitative future	60
2 - Simulations	61
CONCLUSIONS GENERALES	64
BIBLIOGRAPHIE	65

INTRODUCTION

L'étude du lac de Guiers a pour objectif ultime le développement d'un modèle de gestion du milieu lacustre, destiné à en valoriser les potentialités dans le contexte de l'"Après-Barrages".

La première étape du travail a été de mieux appréhender le fonctionnement actuel du système "lac de Guiers" sur le plan hydrologique. Les bilans hydrologiques annuels ont été calculés sur la période 1976-1992 puis l'évaporation du plan d'eau a été quantifiée. Ce premier volet de l'étude a permis aussi de constater et d'expliquer les effets des récents aménagements hydrauliques fluviaux sur le lac.

Le suivi physico-chimique du réservoir durant trois années constitue la deuxième étape du travail. Les grandes caractéristiques qualitatives actuelles sont décrites et expliquées. Là aussi, les nouvelles conditions hydrauliques fluviales influencent très nettement la qualité générale des eaux. Une étude qualitative identique menée entre 1979 et 1982 permet la comparaison. Enfin, une station de référence pour un suivi qualitatif simplifié du Guiers sera proposée et testée.

Le modèle de gestion quantitative des eaux du Guiers qui a été développé et testé permet de simuler et d'étudier les alternatives de gestion du réservoir et ses échanges avec le fleuve. Il devrait se révéler particulièrement utile à l'avenir compte tenu de l'augmentation des besoins autour du lac (projet du "canal de Cayor") et des restrictions à la consommation qui risquent à l'avenir d'être imposées aux utilisateurs dans la vallée du Sénégal.

Enfin, un modèle complémentaire intégrant cette fois les aspects quantitatifs et qualitatifs de la gestion a été développé pour permettre une approche globale de la problématique. Il doit permettre de prévoir les conséquences qualitatives sur les eaux du Guiers des alternatives de sa gestion quantitative.

L'optimisation de la gestion de la ressource hydrique est la clé de la valorisation des investissements financiers importants consentis dans la vallée du fleuve Sénégal. Ce travail se veut l'un des éléments de réponse aux problèmes posés.

I - PRESENTATION GENERALE DU LAC DE GUIERS

A - LE CADRE GEOGRAPHIQUE

Le lac de Guiers est l'unique lac d'eau douce d'importance au Sénégal. Il est situé à la latitude 14°09'N et longitude 16°08'W.

Ce lac d'origine tectonique se présente comme une étroite dépression longue de 50 km et large de 7 km au maximum. A 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 du marigot sinueux de la Taoué (Fig. 1).

A la cote moyenne de 1 m IGN, le Guiers couvre 240 km² pour un volume de 390 millions de m³, soit une profondeur moyenne de 1.63 m seulement. Le Guiers est donc un lac plat dont les zones les plus profondes se situent sous le niveau de la mer, à la cote - 2 m IGN environ.

Cette morphologie particulière a facilité depuis toujours les échanges fleuve-lac et même permis à certaines époques la pénétration d'eau de mer dans la réserve lors d'années à faibles débits fluviaux. Elle favorise aussi directement l'évaporation du réservoir et par la même indirectement l'évolution qualitative de ses eaux.

Avant la mise en fonction du barrage de Diama en 1985, le lac jouait un rôle capital pour l'agriculture et l'économie régionale en assurant l'eau douce nécessaire à l'irrigation durant la phase annuelle de la remontée d'eau de mer dans le cours du fleuve Sénégal.

Aujourd'hui les principaux utilisateurs des eaux sont la Compagnie Sucrière Sénégalaise (CSS) au Nord, la Société Nationale d'Exploitation des Eaux du Sénégal (SONEES) en rive Ouest et les cultures irriguées sur son pourtour.

Le Guiers se subdivise en 3 grandes régions naturelles (fig. 1) :

- une région Nord, endiguée à son extrémité septentrionale par les périmètres sucriers de la CSS, et limitée au Sud par l'étroit chenal de Ndiakhaye à hauteur de l'île de Diokhor. Les eaux de la région sont soumises aux prélèvements CSS et à l'agriculture irriguée très développée sur les rives.

- une région Centre, soumise directement aux pompages de la SONEES. Quelques exploitations agricoles privées se sont installées récemment dans cette région.

- une région Sud, très peu profonde, morcelée et parsemée d'îlots plus ou moins apparents selon la hauteur des eaux. La région est limitée par la digue de Keur Momar Sarr.

Régions Nord et Centre représentent près de 90% du volume total du réservoir.

B - HISTORIQUE DES AMENAGEMENTS

La fig. 2 indique schématiquement les composantes actuelles du système lacustre du Guiers et de ses relations avec le fleuve Sénégal.

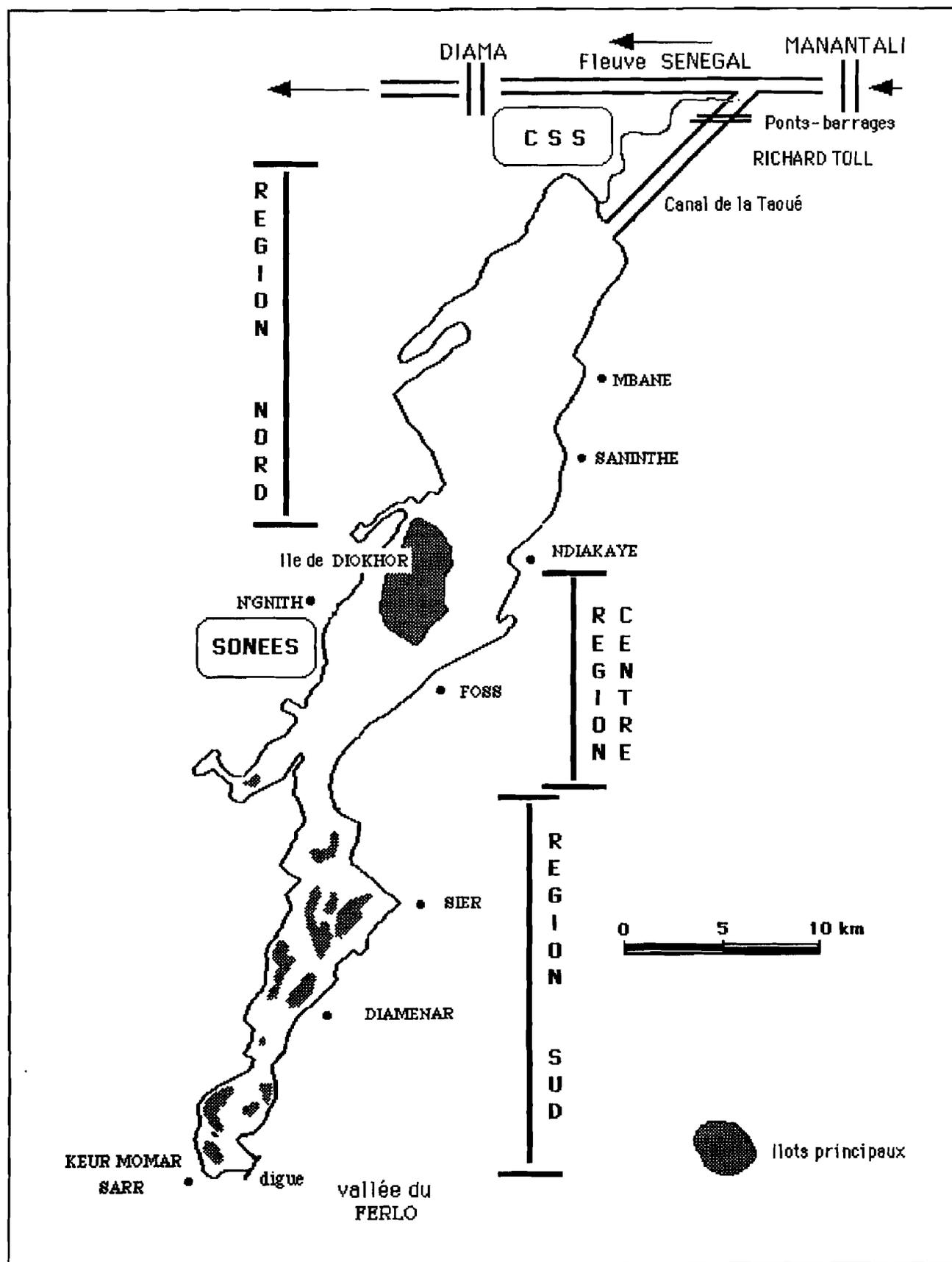


Fig. 1 : Carte générale du lac de Guiers

1 - Avant 1970

- Le lac de Guiers a fonctionné en système naturel jusqu'en **1916**. Son existence et son extension dépendaient alors uniquement de l'importance et de la durée des crues et décrues du Sénégal. En 1913, 1914 et 1915, suite à 3 années consécutives d'étiages fluviaux sévères et prolongés, le lac fut envahi par l'eau de mer. Les dégâts occasionnés aux cultures incitèrent alors à la construction d'une digue sommaire barrant le marigot de la Taoué pour prévenir les intrusions marines dans le Guiers aux basses eaux.

- Le premier pont-barrage de Richard-Toll fut aménagé en **1947** (B1) et fut ainsi le premier aménagement fixe construit sur l'axe fleuve Sénégal - lac de Guiers. Son but premier était de retenir les eaux douces dans la réserve afin d'assurer toute l'année l'approvisionnement des rizicultures installées sur les terres adjascentes à la Taoué et plus tard en rive Est du plan d'eau.

- Afin d'assurer entièrement au lac son rôle de réservoir d'eau douce, la digue de Keur Momar Sarr fut construite en **1956**, isolant ainsi le plan d'eau de la vallée du Ferlo.

D'autre part et à la même époque, le marigot de Niet Yone, exutoire naturel du Guiers vers la vallée du Ndiaël au Nord-Ouest fut fermé à son embouchure dans le lac.

2 - De 1970 à 1985

- L'usine de production d'eau potable de la SONEES s'installa à N'Gnith en rive Ouest en **1970**. L'eau traitée sur place est acheminée par conduite forcée vers les régions Sud du pays et l'agglomération dakaroise en particulier.

- Face à l'augmentation des besoins en eau douce liée à l'extension des périmètres sucriers de la CSS, les capacités de remplissage du Guiers furent améliorées par la réfection des digues septentrionales et la construction en **1974** du canal rectiligne de la Taoué, relayant le marigot sinueux originel.

- Le dispositif hydraulique de la Taoué fut complété en **1980** par la construction du second pont-barrage (B2), 500 m en aval du premier. Le jeu des 2 ponts-barrages permettra ainsi à la CSS de prélever ses eaux d'irrigation soit à partir du fleuve soit au départ du lac en fonction de la période de l'année et de la qualité des eaux fluviales.

3 - Depuis 1985

La mise en fonction du barrage de Diama en **1985** et de celui de Manantali en **1988** et la disponibilité quasi permanente d'eau douce au niveau de la jonction fleuve-Taoué ont induit une nouvelle destinée pour le lac de Guiers.

Moins sollicité par les pompages CSS (désormais à 90% fluviaux), le lac fit l'objet alors d'importants aménagements hydroagricoles sur son pourtour :

- La réouverture des vannes de la digue de Keur Momar Sarr en **1988** permit la réalimentation en eau de la vallée du Ferlo à sec depuis plus de 30 ans. Cette mise en eau devait permettre la mise en valeur des terres de la vallée fossile et l'adoucissement des eaux méridionales du Guiers.

- Les remplissages très conséquents des années 1991 surtout 1992 ont eu raison des digues de l'extrémité Nord-Ouest et de la rive Est du Guiers qui furent réfectionnées à la hâte. Au Sud, la digue de Keur Momar Sarr, délabrée et sur le point de céder, fut entièrement restaurée durant l'année **1993**.

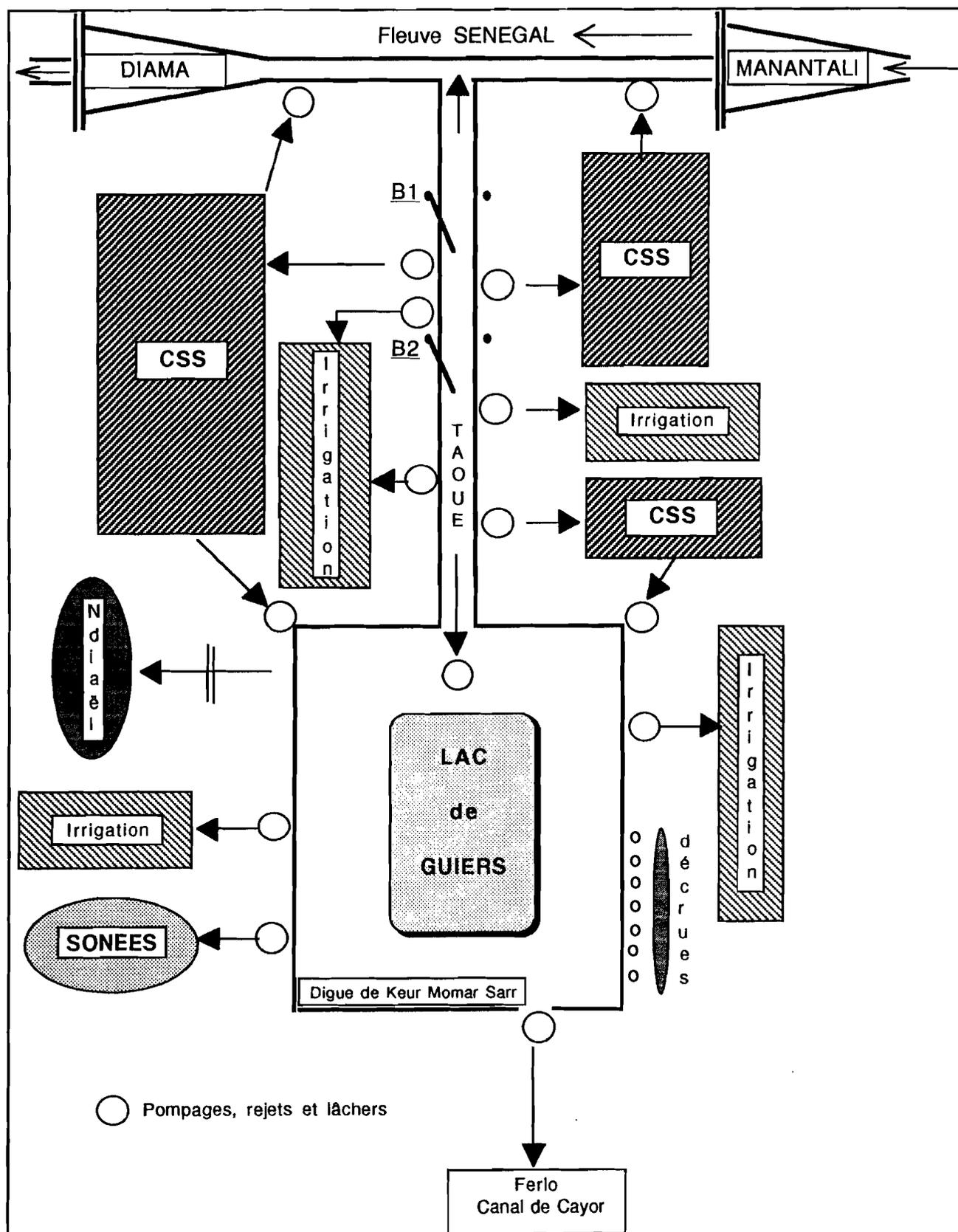


Fig. 2 : Schéma des composantes actuelles du système fluvio-lacustre

- La remise en eau de la dépression du Ndiaël est prévue en 1994 grâce à la réouverture du marigot de Niet-Yone, fermé 30 ans plus tôt. Développement agricole et création d'une réserve ornithologique sont les principales raisons de cet aménagement.

- Le projet de construction du canal de Cayor devrait, à l'horizon de l'an 2000, modifier complètement la destinée et le fonctionnement du Guiers. Ce canal d'adduction d'eau douce vers le Sud du pays, la région de Thiès et la presqu'île du Cap Vert, doit s'alimenter depuis l'extrémité méridionale du lac, lui-même approvisionné par le fleuve.

Le Guiers risque alors de devenir un simple lieu de transit entre le fleuve et le canal. Son mode de gestion quantitative futur conditionnera la mise en valeur de ses potentialités sur sa périphérie et influencera aussi indirectement l'évolution qualitative de ses eaux.

C - CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES

Les abaques de surface et volume ont été calculés et présentés par COGELS et GAC (1982), COGELS (1984), COGELS et al. (1990).

Des sondages complémentaires effectués dans la région sud du lac ont permis d'affiner les résultats, de présenter de nouveaux abaques (fig. 3) et de proposer des formules de calcul plus faciles d'emploi que précédemment et sous la forme d'équations polynomiales.

Les formules proposées sont valables pour des hauteurs d'eau du Guiers de -1.50 m à 3.00 m IGN.

$$\text{Surface} = 170.72 + 80.03 H_l - 3.01 H_l^2 - 10.03 H_l^3 + 1.71 H_l^4 + 1.93 H_l^5 - 0.79 H_l^6 + 0.08 H_l^7$$

$$\text{Volume} = 181.69 + 169.54 H_l + 39.48 H_l^2 + 1.14 H_l^3 - 1.25 H_l^4 - 0.41 H_l^5$$

$$\text{Hauteur d'eau } H_l : \text{ m} \quad - \quad \text{Surfaces} : \text{ km}^2 \quad - \quad \text{Volumés} : 10^6 \text{ m}^3$$

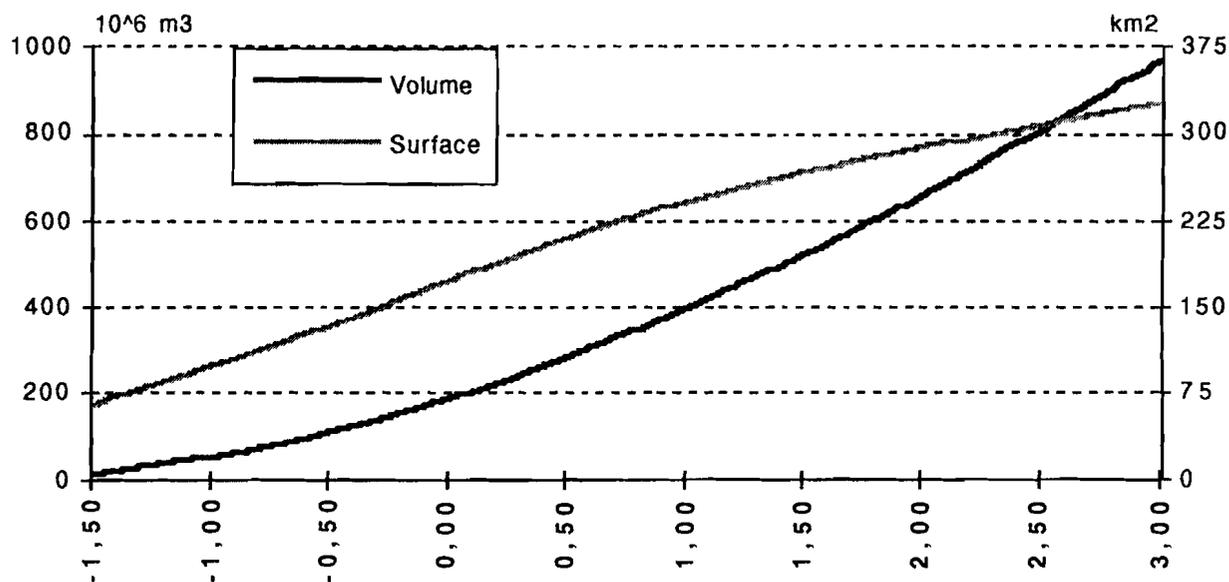


Fig. 3 : Relation entre la cote (IGN), la surface (km^2) et le volume du Guiers (10^6 m^3).

II - HYDROLOGIE ET GESTION QUANTITATIVE

L'étude hydrologique couvre la période 1976-1993. En l'espace de 18 ans, la région a été le théâtre de bouleversements profonds. Ils tiennent essentiellement aux contraintes imposées par une sécheresse persistante, par le développement hydroagricole accéléré et les aménagements hydrauliques successifs de plus en plus élaborés qui ont été déployés.

Il a ainsi fallu gérer au mieux des ressources en eau qui s'amenuisaient au fil des années. Certes les choix de solutions provisoires n'ont pas toujours été pertinents et il était exclu qu'ils puissent l'être tant la nature et la demande agro-alimentaire imposaient des réponses rapides à des situations parfois inattendues et imprévisibles à l'amont comme à l'aval du dispositif fluvio-lacustre.

Le but final de la vaste étude hydrologique entreprise est la mise au point d'un outil de gestion qui permette à la fois la simulation prévisionnelle de l'état hydrologique du Guiers compte tenu des multiples sollicitations dont il fait l'objet et le calcul des besoins en eau nécessaires à son approvisionnement en cours d'année sur la base des disponibilités fluviales.

Le modèle de gestion quantitative du Guiers qui a été développé (cf. II. C) sera ensuite complété par un outil de gestion qualitative de ses eaux (cf. III. F) qui permettra alors d'aborder la problématique d'utilisation intégrée des eaux avec une vue globale des implications des différentes alternatives de gestion.

L'étude quantitative débute par la compréhension du fonctionnement du système lacustre et de ses interactions avec le fleuve Sénégal. L'évolution limnimétrique du lac est étudiée sur 17 années hydrologiques complètes. Les effets du barrage de Diama sur le fonctionnement du Guiers sont décrits simultanément.

Le calcul des bilans hydrologiques constitue la deuxième étape de l'étude. Les entrées - sorties d'eau sont quantifiées afin de préciser la part respective des paramètres hydrologiques et de cerner ainsi les premiers éléments fondamentaux des critères futurs de la gestion du réservoir. Ces bilans permettront aussi de calculer l'évaporation du plan d'eau, dont la description fait l'objet d'un point particulier.

La présentation du modèle de gestion des eaux (LGPLG) clôture le chapitre hydrologique. Elle est complétée par quelques exemples d'utilisation pratique de l'outil, appliqués aux conditions du futur et particulièrement à la période de fonctionnement du canal de Cayor.

A - REGIME HYDROLOGIQUE DU GUIERS DEPUIS 1976

1 - Fonctionnement du réservoir et utilisation des eaux

La fig. 4 schématise le fonctionnement du lac pour chacune des 3 périodes étudiées.

a) de 1976 à 1979

Le lac et le fleuve communiquent pendant la crue fluviale soit en général entre le 15 juillet et le 15 octobre. Le pont-barrage B1 est ouvert durant ces 3 mois et le lac se remplit jusqu'à l'amorce de la décrue du Sénégal. B1 est alors fermé pour éviter l'inversion du flux.

L'année hydrologique du Guiers comporte ainsi 2 phases : remplissage durant 3 mois et isolement les 9 mois restants.

Les principaux utilisateurs des eaux sont alors :

- La CSS qui prélève ses eaux d'irrigation à sa station de pompage P1 dans le canal de la Taoué pour alimenter les casiers sucriers. Par ailleurs et vu la qualité des sols de la région, le désalement des parcelles cultivées pour la canne à sucre est indispensable et doit être continu. Les eaux de drainage des cultures collectées à la sortie des drains sont acheminées vers l'ancien lit du marigot de la Taoué et déversées directement dans le Guiers à son extrémité Nord-Ouest (station de rejets R1).

- La SONEES qui capte ses eaux à la station de N'Gnith en rive Ouest. Les pompages sont conditionnés par la profondeur de la prise d'eau et doivent être interrompus en périodes d'étiages extrêmes pour des niveaux du lac inférieurs à -0.85 m IGN.

- Les cultures irriguées autour du lac encore peu étendues et concentrées sur la rive Nord-Est autour de Mbane. La SAED pratique également la riziculture en rive Ouest de la Taoué où elle dispose de plusieurs petites stations de pompage. Les remplissages annuels du lac sont encore aléatoires et soumis uniquement à l'importance et à la durée de la crue fluviale. Les besoins croissants de la CSS rendent encore difficile et risqué le développement de la culture irriguée d'initiative privée.

- Les cultures traditionnelles de décrue, pratiquées sur tout le pourtour du réservoir. Ces cultures sont intéressantes, alimentaires mais aussi financièrement (MATHIEU, 1985). Elles compensent les carences de l'agriculture traditionnelle pluviale défavorisée par une pluviométrie déficitaire et très irrégulière à cette époque.

b) de 1980 à 1984

L'extension des cultures de la CSS vers la zone Nord - Est de la Taoué nécessite la mise en place d'une seconde station de pompage (P2) sur le canal. L'entreprise sucrière dont les besoins en eau s'accroissent chaque année est confrontée à des crues fluviales de faible ampleur qui ne permettent pas de bons remplissages du Guiers.

D'autre part les remontées d'eau de mer dans le cours du Sénégal sont de plus en plus importantes et précoces. La CSS décide donc la construction du second pont-barrage B2, qui lui permettra de pomper ses eaux d'irrigation dans le fleuve avant l'arrivée de la langue salée en épargnant ainsi l'eau du lac sur une plus longue période.

L'année hydrologique du Guiers se divise alors en 3 phases :

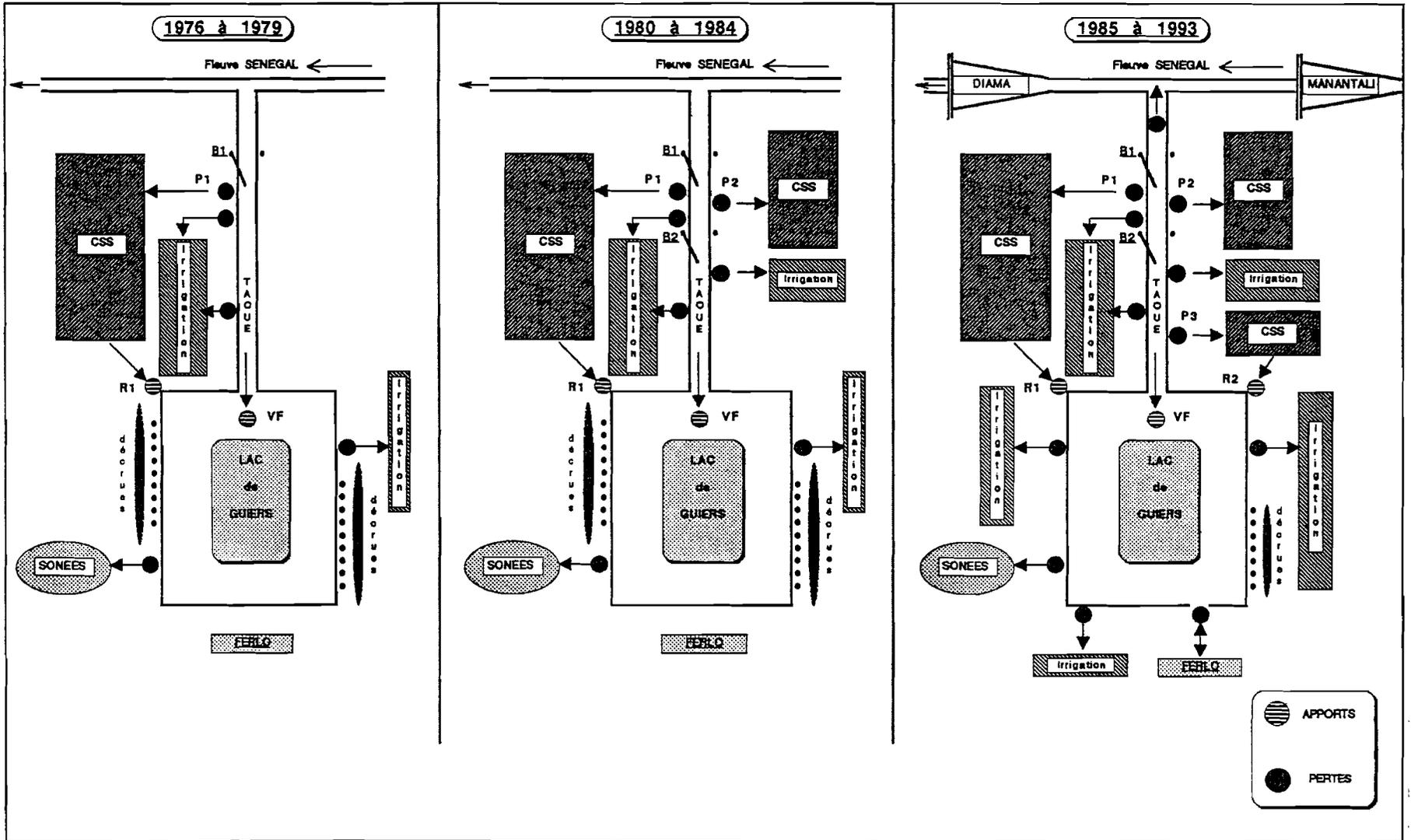
- La phase de remplissage correspondant à la crue fluviale (15 juillet - 15 octobre). B1 et B2 sont ouverts.

- La phase d'isolement (a) durant laquelle B2 est fermé et B1 maintenu ouvert pour permettre les pompages CSS à partir du fleuve (15 octobre - 15 février).

- La phase d'isolement (b) qui débute dès l'arrivée de l'eau de mer à la jonction fleuve-Taoué. B1 est alors fermé, B2 est ouvert et la CSS pompe ses eaux dans le lac durant le reste de l'année hydrologique (15 février - 15 juillet).

Les utilisateurs des eaux sont les mêmes que durant la période 1976-1979. Seules les conditions hydrologiques ont changé. Le lac moins sollicité par les pompages CSS mais par contre son remplissage est très faible certaines années et la situation devient précaire pour les utilisateurs. L'irrigation (projets maraîchers et rizicoles) se développe surtout sur la rive Est de la Taoué.

Fig. 4 : Evolution de l'utilisation des eaux autour du lac de 1976 à 1993



La SONEES doit interrompre régulièrement ses pompages pour cause de niveau trop bas et de mauvaise qualité des eaux.

c) depuis 1985

La mise en fonction des barrages de Diama, en novembre 1985 et de Manantali en 1988 va modifier le régime hydrologique du fleuve et bouleverser complètement celui du lac.

- *entre 1985 et 1987*, le barrage de Manantali n'est pas encore en fonction, le fleuve n'est donc pas maîtrisé dans sa partie amont et l'année hydrologique du Guiers est assez semblable à celle de la période 1980-84. Grâce aux effets du barrage de Diama, le niveau fluvial est cependant plus stable et plus élevé qu'auparavant et l'eau de mer n'atteint plus Richard-Toll. Le lac se remplit mieux et la phase d'isolement (a) peut être prolongée. La gestion de la retenue de Diama est parfois problématique et le Guiers lui sert d'appoint à l'une ou l'autre occasion.

- *à partir de 1988*, la régularisation (partielle) des débits fluviaux par le barrage de Manantali assure un niveau d'eau suffisant toute l'année à hauteur de la jonction fleuve-Taoué. Les eaux d'irrigation de la CSS prélevées aux stations P1 et P2 sont d'origine fluviale uniquement. Le barrage B1 est ouvert en permanence, B2 n'étant (théoriquement) ouvert que durant la seule phase de remplissage annuelle du Guiers.

Les années hydrologiques 1988-89, 1989-90 et 1990-91 présentent la même répartition des phases hydrologiques que celle des 2 années précédentes, avec une phase de remplissage suivie d'une phase d'isolement.

La grande disponibilité en eau fluviale permet l'ouverture annuelle des vannes de la digue de Keur Momar Sarr dès le mois de septembre et durant 1, 2 ou 3 mois selon les années. La raison première de cette chasse d'eau dans le Ferlo est d'évacuer vers la vallée fossile les eaux méridionales du Guiers les plus minéralisées et parfois problématiques pour la qualité des prélèvements de la SONEES à l'usine de N'Gnith.

A partir de 1989, la CSS étend ses cultures au Sud-Est du canal de la Taoué où elle installe une nouvelle station de pompage (P3). Une seconde station de rejets des eaux de drainage des parcelles cultivées est aménagée à l'extrémité Nord-Est du lac (R2).

Les cultures irriguées se développent autour du lac, surtout à partir de 1988-89. La disponibilité en eau, maintenant permanente, favorise en effet les initiatives hydroagricoles privées. Ces initiatives sont soit individuelles soit collectives et villageoises, souvent aidées financièrement par les ONG nord américaines installées dans la région (KANE, 1993). Cet attrait pour la culture irriguée et un niveau du Guiers plus stable qu'auparavant induisent l'abandon progressif des cultures traditionnelles de décrue.

L'année hydrologique 1991-92 marque une nouvelle étape de l'histoire hydrologique du Guiers. L'année débute de manière normale, avec fermeture du barrage B2 en octobre 1991, suivie d'une baisse progressive du niveau du lac alors en phase d'isolement. En février 1992, la disponibilité en eau fluviale incite les autorités à réouvrir B2 en dehors de toute période habituelle soit en février 1992. La remontée brutale des eaux dans le Guiers qui s'en suit, noie les cultures de décrue alors en pleine activité et qui vivent là leurs derniers instants sur les rives du plan d'eau.

En 1992-93, la gestion hydrologique du lac est pour le moins bouleversée : B2 n'est fermé qu'en janvier 1993 puis réouvert encore en avril de la même année. Au Sud, les vannes du Ferlo restent ouvertes en permanence.

La limnimétrie du Guiers est ainsi de plus en plus soumise à celle du fleuve. Les variations de hauteur d'eau dans le Sénégal provoquent d'ailleurs des mouvements d'eau ponctuels du lac vers le fleuve et même du Ferlo vers le lac. La gestion de l'ensemble devient assez anarchique.

2 - Hauteurs d'eau

La fig. 5 indique l'évolution des hauteurs d'eau du Guiers de l'année hydrologique 1976-77 à l'année 1992-93. Toutes les données limnimétriques sont issues des mesures quotidiennes effectuées à la station de la SONEES à N'Grith.

a) Avant la mise en fonction du barrage de Diama (1976-77 à 1984-85)

Cette période se caractérise par :

- Un marnage annuel important du plan d'eau, de **2.09 m** en moyenne avec un maximum de 2.55 m au cours de l'année hydrologique 1982-83.

- Une grande variabilité interannuelle du niveau de remplissage maximal, à cause de l'irrégularité des crues fluviales à cette période. Le niveau maximum mesuré fut de **1.81 m** du 26 au 28 septembre 1981. Le minimum fut de **-1.48 m**, atteint en fin d'année hydrologique 1982-83.

- Un niveau moyen de **0.38 m** pour l'ensemble des 9 années hydrologiques prises en compte.

A noter encore l'irrégularité des hauteurs d'eau et les 2 pics limnimétriques constatés lors du remplissage du lac au début des années 1983-84 et 1984-85. La construction sur le fleuve, en aval de Richard-Toll du barrage provisoire de Rheune, qui préfigurait celui de Diama, permit une hausse inhabituelle du niveau fluvial à son amont et un remplissage providentiel du Guiers au cours de ces 2 années consécutives d'étiages fluviaux extrêmes.

Ces conditions hydrologiques particulières, la grande instabilité des niveaux, la morphologie même du lac induisaient annuellement d'importantes variations de surface du Guiers et l'exondation annuelle d'une très importante frange de rivage couvrant près de 150 km².

b) Après la mise en fonction du barrage de Diama (1985-86 à 1992-93)

Les hauteurs d'eau dans le Guiers sont nettement plus élevées durant cette seconde période. Leur moyenne annuelle est de **0.99 m** soit de quelques 0.61 m supérieure à celle de la période précédente.

- Deux sous-périodes se démarquent nettement : De 1985-86 à 1990-91, le lac évolue selon son cycle annuel habituel remplissage-vidange. Sa hauteur d'eau moyenne annuelle oscille alors autour de 0.85 m.

- A partir de l'année 1991-92, le cycle remplissage-vidange est modifié à cause du changement dans le mode de gestion de la jonction fleuve-lac. Les ouvertures de B2 sont de plus longue durée et des remplissages complémentaires sont effectués en cours d'année. La hauteur d'eau moyenne est de 1.28 m durant l'année hydrologique 1991-92 et atteint 1.50 m en 1992-93.

- Les variations annuelles de niveau sont de **1.64 m** en moyenne soit 0.45 m inférieures à celles de la période antérieure à Diama. En 1992-93 le marnage est seulement de 0.80 m.

- Compte tenu des conditions hydrologiques fluviales plus favorables, le niveau maximum moyen du lac s'est amélioré. Il atteint 1.72 m pour 1.26 m durant la période précédente. Le maximum absolu du Guiers est mesuré les 28, 29 et 30 septembre 1993 avec une cote de 1.92 m. Les digues des régions Nord-Ouest et Est du lac cédèrent alors et la brusque baisse de niveau qui suivit est bien visible à la fig. 5.

- Les niveaux extrêmes inférieurs sont de 0.08 m en moyenne pour -0.83 m durant la période précédente. En 1992-93 le niveau minimum atteint est seulement de 1.12 m.

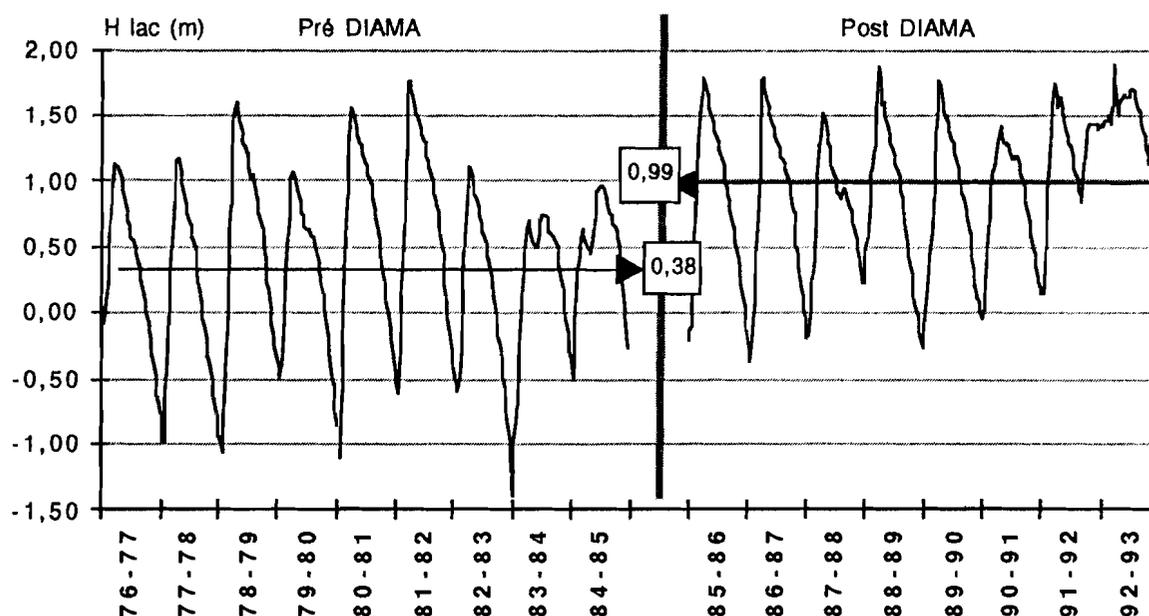


Fig. 5 : Evolution des hauteurs d'eau dans le Guiers (m IGN) de l'année hydrologique 1976-77 à 1992-93.

Cotes moyennes plus élevées et meilleure stabilité du niveau caractérisent les conditions limnimétriques du Guiers dans sa période d'après-barrage de Diama.

A l'avenir, la disponibilité permanente d'eau à niveau suffisant dans la réserve de Diama assurera au lac des conditions hydrologiques sans doute assez semblables à celle de l'année 1992-93, soit niveau moyen élevé et faible marnage, grâce à plusieurs remplissages ponctuels en cours d'année. Ces conditions, favorables sur le plan strictement hydrologique, risquent cependant d'engendrer des conséquences négatives, directes et indirectes, d'ordres économique, sanitaire et écologique. Ces questions seront étudiées plus loin.

3 - Bilans hydrologiques 1976 - 1992

a) Les termes du bilan

L'équation du bilan hydrologique du Guiers s'établit à partir de la connaissance des différents termes d'entrées et de sorties d'eau du réservoir. Sur une période déterminée, la variation du volume du lac (ΔV) se calcule selon la formule :

$$\Delta V = (VF + V_{p0} + V_r) - (V_{p1} + V_{p2} + V_{p3} + V_E)$$

<u>APPORTS</u>	<u>PERTES</u>
VF : apports fluviaux	Vp1 : pompages d'irrigation
Vp _O : apports pluviométriques	Vp2 : pompages SONEES
Vr : rejets de la CSS	Vp3 : lâchers au Ferlo ou au fleuve
	VE : Evaporation

L'équation générale du bilan hydrologique ne prend pas en compte les pertes par infiltration et les échanges entre les nappes et les eaux de surface. Ces 2 composantes potentielles du bilan sont considérées comme de même ordre de grandeur.

Les termes du bilan (fig. 6) sont quantifiés comme suit :

- Le terme **Vp1** regroupe les pompages CSS des stations P1, P2 et P3.

La quantification des débits aux pompes est simple mais le jeu ouverture-fermeture des 2 ponts-barrages de la Taoué, B1 et B2, et la localisation des stations P1 et P2 intercalées entre eux, complique parfois les calculs. Un calendrier strict de la gestion des 2 ouvrages est indispensable.

Dans Vp1 sont aussi inclus les pompages destinés à l'irrigation autour du lac (P4) et le long de la Taoué. Ici encore la connaissance précise du jeu de barrages B1 et B2 est indispensable car les rizières cultivées sur la rive Ouest de la Taoué (P5) sont alimentées par leurs stations de pompage situées entre les 2 ponts-barrages mais aussi entre B2 et le lac. Les prélèvements sont donc d'origine lacustre ou fluviale selon l'état du barrage B2.

- Les pompages **Vp2** de la SONEES sont très précis et à relevé quotidien.

- Le terme **Vp3** regroupe les lâchers vers la vallée du Ferlo mais aussi les (rares) transferts du lac vers le fleuve (Vp3'). Ces lâchers au Ferlo, sont annuels depuis 1988 et sont estimés en périodes de jonction fleuve - lac .

- L'évaporation du lac **VE** est déduite du bilan hydrologique pour les périodes durant lesquelles ni VF, ni Vp3 ne sont effectifs. Seules les phases d'isolement du lac sont considérées pour le calcul de l'évaporation. En effet, en phase de remplissage et en phase de lâchers au Ferlo, l'impossibilité de quantification directe des termes VF et Vp3 rend aléatoire le calcul du paramètre. Durant ces périodes (limitées sauf en 1992), l'évaporation du lac est estimée sur la base de sa corrélation moyenne avec celle mesurée en bac d'évaporation installé dans le périmètre de la CSS.

- Les rejets dans le lac **Vr** des eaux de drainage des champs de la CSS (Vr) concernent la station R1 depuis 1976 et la station R2 depuis 1990. Les mesures de débit des pompes sont obtenues à la CSS.

- L'apport pluviométrique **Vpo** est calculé sur la base des données quotidiennes des pluviographes à la CSS. La moyenne des mesures de 3 stations météo réparties dans l'exploitation sert de référence et est extrapolée à l'ensemble du lac, aucune autre station n'existant dans la région du Guiers.

- L'apport pluviométrique direct au lac est calculé en connaissant la hauteur de pluie du jour n et la surface du plan d'eau au jour correspondant.

- L'apport pluviométrique indirect au lac est estimé effectif sur une surface de ruissellement dans le bassin limité à l'altitude 4 m et en tenant compte d'un coefficient de ruissellement de 10% attribué à l'étroitesse du bassin, à la végétation rare et au caractère généralement orageux des pluies.

- L'apport fluvial VF est inquantifiable directement à cause du manque d'équipement limnimétrique correct sur le canal de la Taoué et de l'imprécision des abaques hauteur d'eau - débits disponibles. L'estimation de l'évaporation du lac selon la méthode évoquée plus haut permet d'estimer les échanges fluviolacustres.

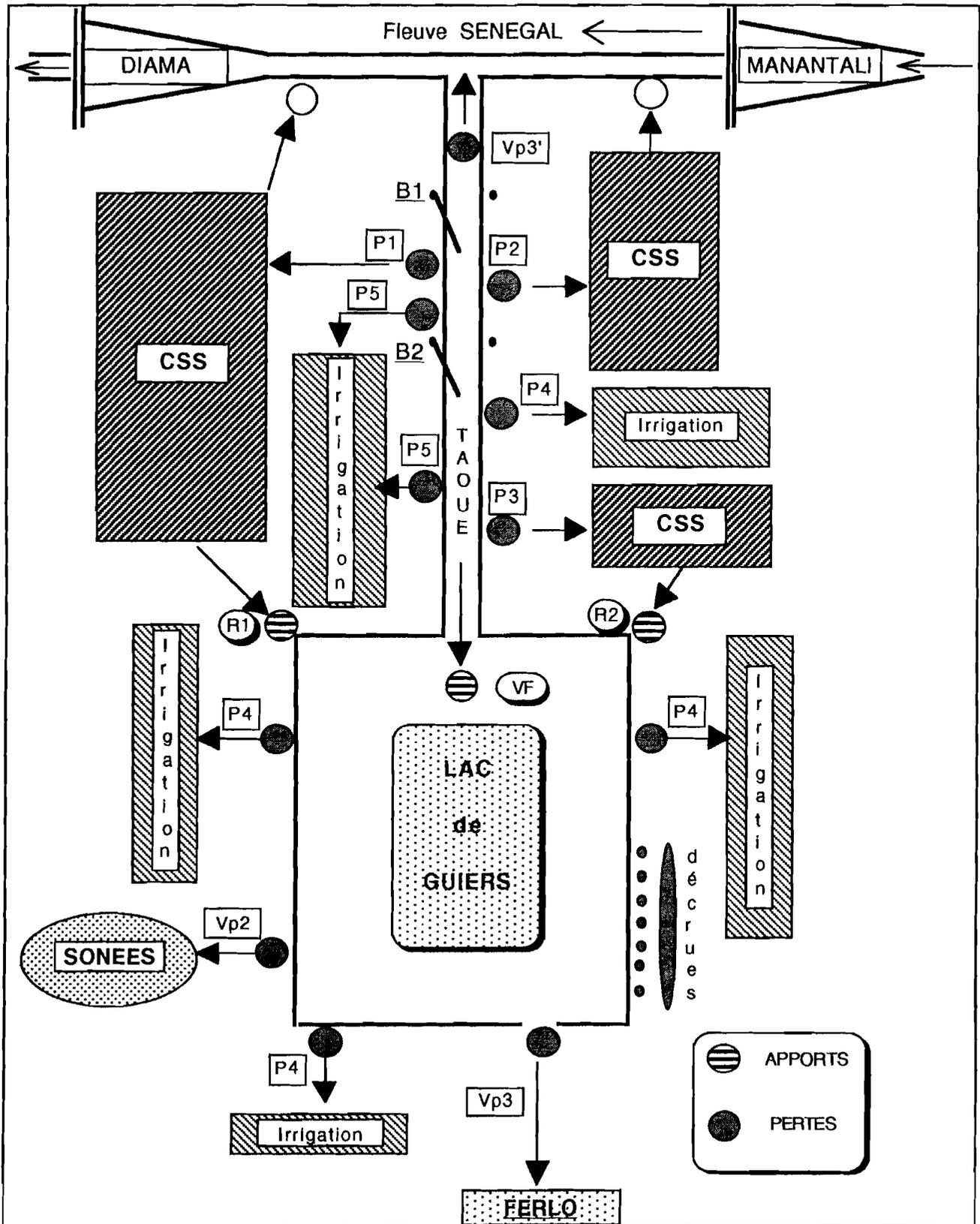


Fig. 6 : Localisation schématique des termes du bilan hydrologique

b) Bilans hydrologiques moyens

Les bilans annuels ont été calculés et présentés par COGELS et al. (1990), GAC et al. (1991, 1992 et 1993).

La fig. 7 indique les bilans moyens interannuels pour les périodes 1976-85 et 1986-92, soit respectivement avant et après la mise en fonction du barrage de Diama.

Deux paramètres hydrologiques prédominent largement :

- Les apports fluviaux VF qui comptent pour 85 et 88 % des apports totaux annuels au lac pour chacune des 2 périodes, soit quelques 465 et 575 10^6 m^3 par an.

- L'évaporation (VE) qui représente une perte moyenne annuelle de 446 (jusqu'à 1985) et 538 (après 1985) 10^6 m^3 . Les valeurs plus élevées de la seconde période s'expliquent par la surface moyenne du plan d'eau plus importante induite elle même par les niveaux d'eau plus élevés (cf. II. A. 2).

- A titre indicatif, les pertes par évaporation du Guiers représentent environ le double de la consommation totale annuelle d'eau dans la grande agglomération dakaroise. Exprimée en unité de débit, l'évaporation atteint en moyenne et pour chacune des 2 périodes respectivement 14 et 17 m^3/s , soit des valeurs très proches de celles des débits prévus des pompages destinés au canal de Cayor.

- Les rejets des zones irriguées (Vr) ne comptent que pour 5 à 7 % (30 et 36. 10^6 m^3) dans le total des apports annuels au lac. Leur importance quantitative est donc faible, mais par contre leurs effets qualitatifs se révèlent très appréciables comme le montreront les études qualitatives présentées au point III.

- Les apports pluviométriques (Vp_0) sont du même ordre de grandeur que les rejets Vr. Ils totalisent annuellement et respectivement 47 et 45. 10^6 m^3 à chacune des deux périodes et correspondent à une pluviométrie moyenne annuelle de 222 et de 185 mm. Du point de vue du volume d'eau pluviale reçue par le lac, les différences de hauteurs pluviométriques aux 2 périodes sont compensées par une plus grande surface moyenne du Guiers durant la seconde période.

Signalons aussi que les écarts pluviométriques interannuels sont très marqués, (caractéristique du climat local). Les valeurs extrêmes mesurées aux pluviographes de la CSS sont de 406 mm en 1978 et de 35 mm seulement en 1983.

- Entre les 2 périodes, la différence entre les volumes pompés et destinés à l'irrigation est bien nette. Les Vp_1 qui représentent 16 % des pertes du lac en 1976-85, avec 89. 10^6 m^3 annuellement, ne totalisent plus que 33. 10^6 m^3 en 1986-92. Ils ne représentent plus alors que quelques 5 % des sorties d'eau du réservoir. L'effet anti-sel du barrage de Diama sur la qualité des eaux fluviales en est la cause puisque dorénavant la CSS peut prélever à partir du fleuve l'essentiel de ses eaux d'irrigation.

- Les pompages SONEES sont stables durant toute la période étudiée. Ils totalisent annuellement quelques 15. 10^6 m^3 . Ils ont été réduits ou interrompus certaines années d'étiage excessif comme en 1979 et en 1983.

- Les pertes Vp_3 concernent les lâchers au Ferlo de 1988 à 1992 et les rares transferts de soutien du lac vers le fleuve en 1983, 1987 et 1988 (Vp_3'). Les Vp_3 sont insignifiants durant la période 1976-85 (2. $10^6 \text{ m}^3/\text{an}$) mais prendront de l'importance entre 1986 et 1992 (50. $10^6 \text{ m}^3/\text{an}$) où ils représentent quand même 8 % du total des pertes.

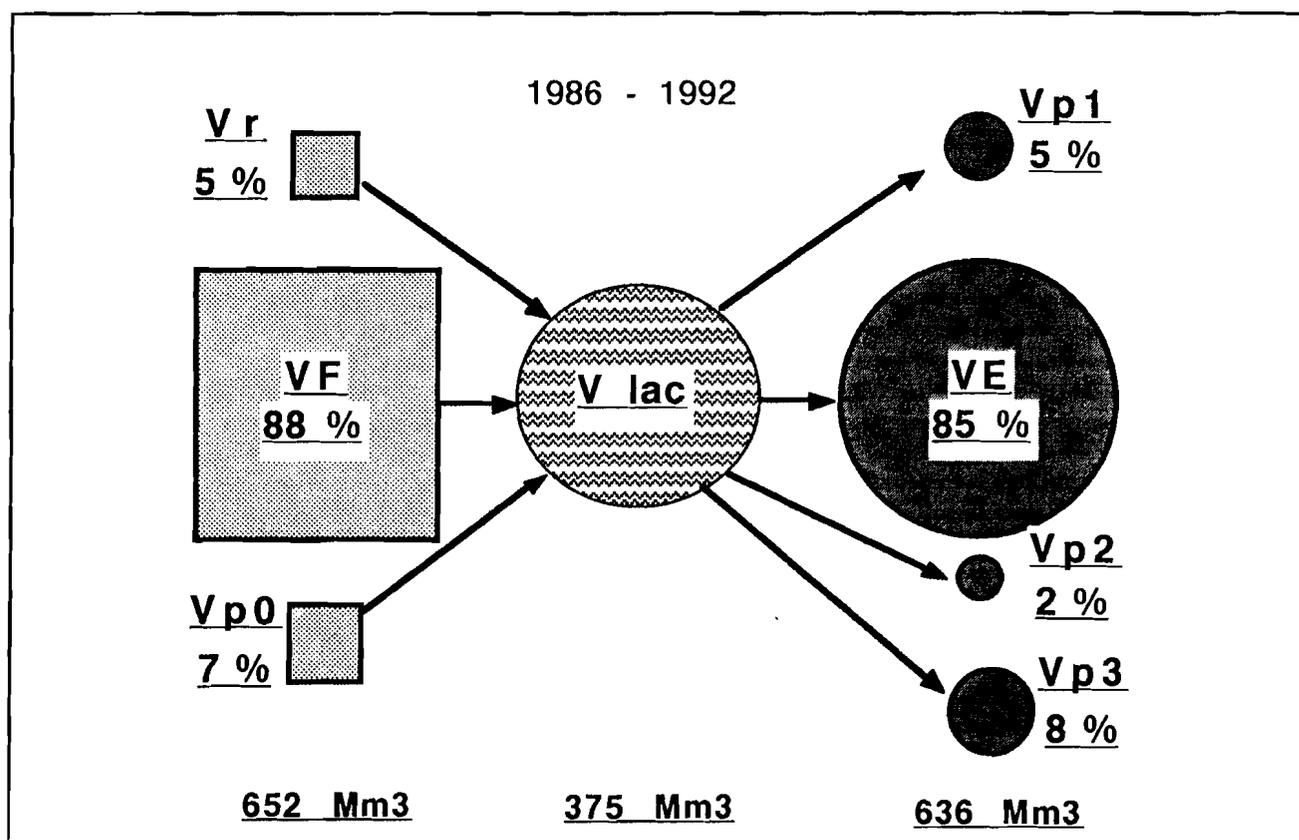
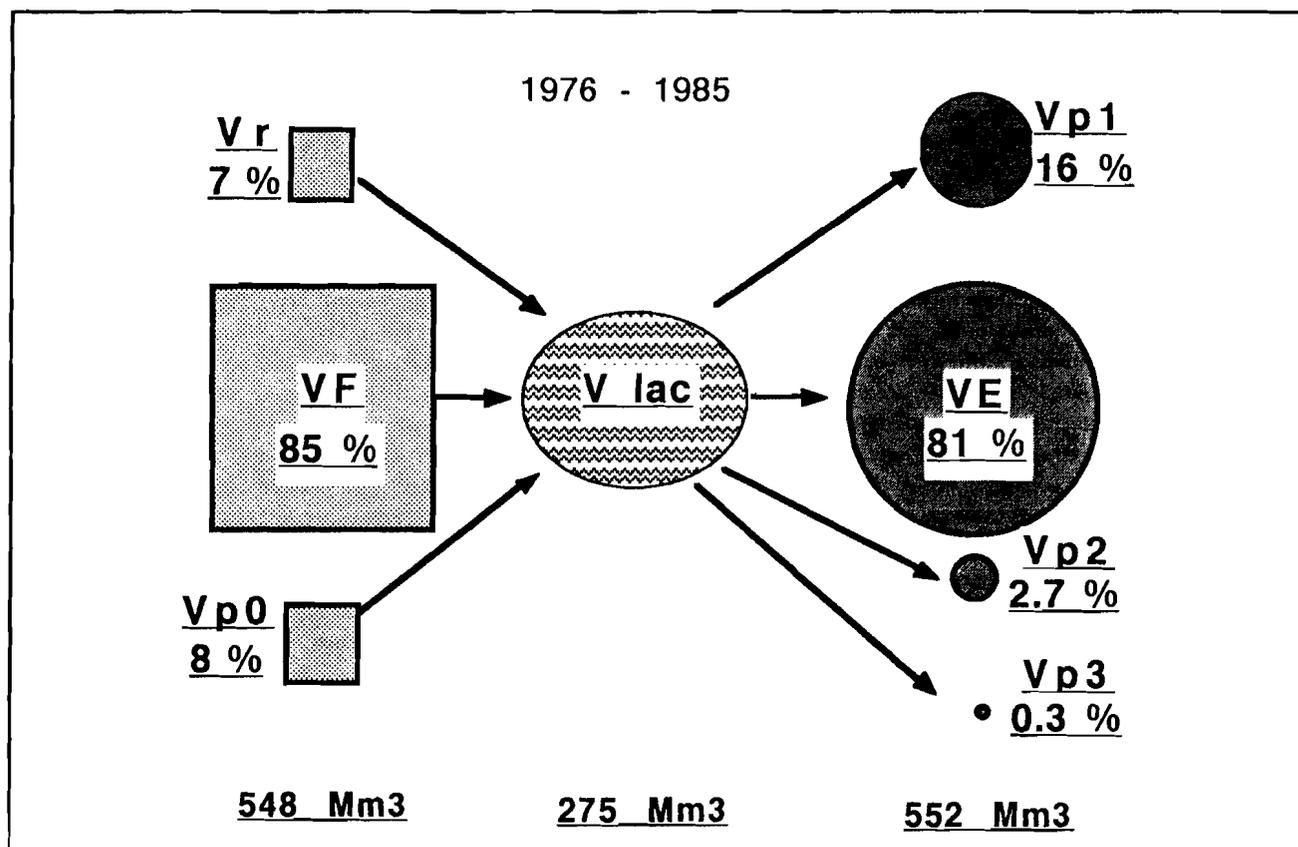


Fig. 7 : Bilans hydrologiques des périodes 1976-85 et 1986-92 (10^6 m^3)

c) Taux d'utilisation des eaux fluviales dans le Guiers et politique de gestion

Le taux d'utilisation des apports fluviaux (Fig. 8) par l'agriculture irriguée et les pompages SONEES est très faible. Il est de 22 % en moyenne pour la période 1976-85 et de 8 % seulement pour la période 1986-92. Cela s'explique par l'origine à 100 % fluviale des pompages de la CSS depuis 1987-88 environ.

Si, pour la période 1986 - 1992, on ajoute au total des eaux utilisées celles des lâchers Vp3 considérés ainsi comme utiles puisque destinés à la remise en valeur du Ferlo et à la désalinisation de la région Sud du Guiers, le taux d'utilisation des apports fluviaux n'est encore que de 17 %.

Ceci pose le vaste problème d'une gestion quantitative rationnelle des eaux du Guiers et de celui du choix futur des niveaux d'eau et donc de surface à imposer dans le lac puisque les pertes par évaporation à elles seules représentent de 90 à 95 % des apports fluviaux. Ce gaspillage inutile des ressources hydriques acquises au prix de lourds sacrifices financiers est injustifiable à terme.

Notons aussi que les lâchers au Ferlo n'ont eu, jusqu'à présent, aucun effet incitatif pour le développement agricole de l'ex-vallée fossile devenue depuis 5 ans un vaste bassin d'évaporation. Rien n'a été fait pour favoriser l'utilisation agricole de la remise en eau de cette vallée.

On peut cependant admettre le rôle bénéfique des lâchers au Ferlo sur la qualité des eaux du lac et la désalinisation progressive de la région Sud du Guiers. Le coût du traitement des eaux à l'usine de la SONEES s'en trouve sans doute réduit.

Comme il sera montré plus loin (cf. III) ces lâchers jouent en fait et surtout un rôle qualitatif régulateur sur le lac (bien involontaire) en compensant les rejets excessifs des eaux de drainage de la CSS très minéralisées .

Après la mise en fonction du canal de Cayor, soit aux environs de l'an 2000, le taux d'utilisation des eaux du Guiers devrait progresser jusqu'à 30-35 %. Si la mise en valeur hydroagricole de la vallée du Ferlo se concrétisait, il pourrait atteindre les 40 à 45 %.

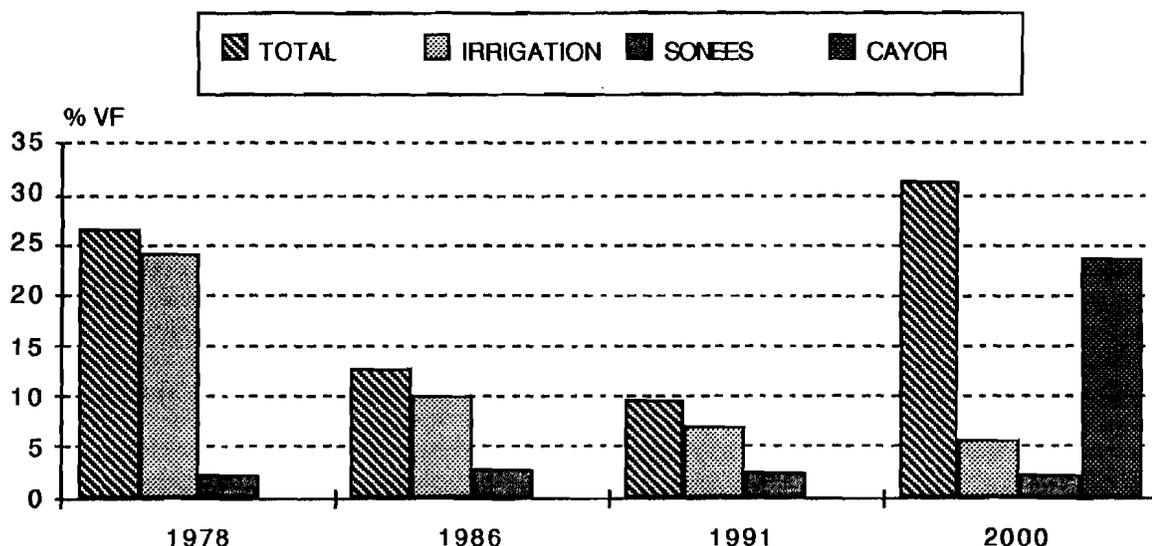


Fig. 8 : Taux d'utilisation des apports fluviaux dans le lac (%)

B - L'EVAPORATION DU LAC

L'évaporation étant l'un des termes-clé du bilan hydrologique, sa quantification précise et la connaissance de son évolution dans l'année sont indispensables avant l'intégration du paramètre dans le modèle de gestion quantitative qui sera développé plus loin.

1 - Mode de calcul

Les bilans hydrologiques du Guiers ont été calculés mensuellement sur la base de l'équation présentée au point II.A.3.a. La quantification directe de l'évaporation n'est possible qu'en phase d'isolement, puisque le paramètre est alors la seule inconnue de l'équation du bilan.

Durant les phases d'ouvertures de la jonction fleuve - lac et de lâchers vers la vallée du Ferlo, 2 ou parfois 3 termes du bilan hydrologique sont inconnus simultanément. L'évaporation du lac durant ces périodes ne peut alors plus être quantifiée directement mais doit être estimée d'après sa relation moyenne avec l'évaporation mesurée en bac "Classe A".

L'évaporation mensuelle du Guiers a ainsi été calculée sur la période 1976-1991.

En 1992, la jonction fleuve - lac a été ouverte dès le mois de février et s'est prolongée tout le reste de l'année. De leur côté, les lâchers au Ferlo ont été effectifs dès le mois de septembre. Cette année 1992 a donc été hydrologiquement très perturbée et le calcul de l'évaporation du Guiers rendu trop aléatoire. Il n'en sera donc pas tenu compte.

2 - Résultats

La fig. 9 indique l'évolution annuelle moyenne de l'évaporation du Guiers

La hauteur d'eau moyenne évaporée dans le lac est de **6.25 mm/jour**, soit environ **2.28 m/an**. Les écarts-type sont relativement faibles, témoignant ainsi d'une bonne reproductibilité interannuelle des paramètres du climat, bases du processus d'évaporation : vitesse du vent, température aérienne et déficit de tension de vapeur d'eau dans l'air. Cette répétition interannuelle de l'évolution des paramètres du climat est d'ailleurs caractéristique des régions sahéliennes.

Le cycle annuel d'évaporation du plan d'eau est typique, avec :

- un maximum en mai,
- une régression durant les mois de juillet, août et septembre, correspondant à la période chaude mais humide de la saison des pluies de l'hivernage,
- une progression en octobre dès le retour du climat sec mais chaud encore,
- une régression de novembre à janvier, saison froide et sèche,
- une augmentation très nette jusqu'en mai correspondant à des conditions climatiques de plus en plus chaudes et sèches.

Le maximum mensuel absolu de la période étudiée a été mesuré en mai 1980 avec 9.31 mm/jour, et le minimum en janvier 1979 avec 2.69 mm/jour.

Les données mesurées et calculées au lac de Guiers ont été comparées avec celles mesurées dans d'autres lacs sahéliens du même type morphologique comme le lac Tchad (2.15 m/an) (RIOU, 1975), le lac de Bam au Burkina Faso (2.34 m/an) (POUYAUD, 1979) et la mare d'Oursi au Nord

du Burkina Faso (CHEVALLIER et al., 1985). Les cycles annuels de l'évaporation sont identiques mais légèrement décalés dans le temps en fonction de la période et de la durée de la saison des pluies.

L'évaporation du lac sera l'un des termes de base intégré par la suite dans le modèle quantitatif de gestion des eaux. Les données d'évaporation journalière "type" ont été calculées sur la base de la courbe générale annuelle. La bonne reproductibilité interannuelle de l'évaporation du Guiers doit permettre cette extrapolation et la fiabilité des résultats obtenus par le modèle conforte cette hypothèse.

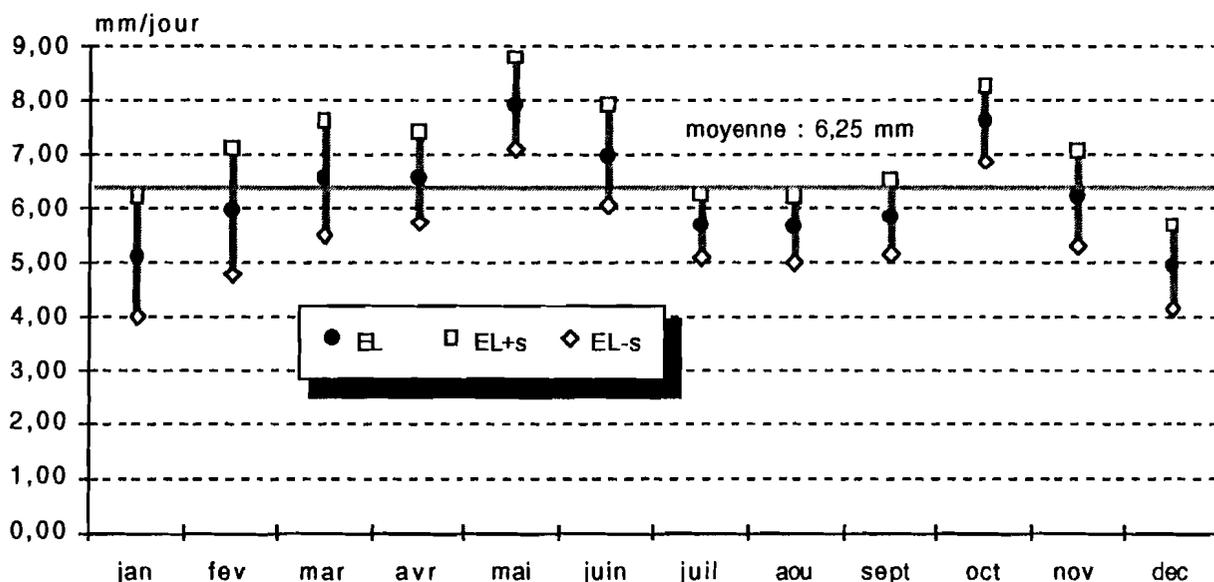


Fig. 9 : Evaporation moyenne mensuelle du Guiers (1976-1991) et écart-type (s) (mm/jour).

3 - L'évaporation au lac et en bac, et les paramètres du climat

A titre indicatif, l'évaporation calculée au lac a été corrélée avec les paramètres climatiques mesurés aux stations météo de la CSS, à savoir vitesse du vent, déficit de tension de vapeur de l'air et température aérienne (COGELS et al., 1991).

Une régression multiple a été établie sur la base des moyennes mensuelles des paramètres en question. La corrélation, calculée pour la période 1977-1991 est valable puisque son coefficient est de 0.94.

Elle s'écrit :

$$EL = 0.25 de - 0.20 U2 + 0.23 Ta - 3.30$$

EL = évaporation du lac (mm/jour)

de = déficit de tension de vapeur de l'air (mm Hg)

U2 = vitesse du vent à 2 m. (m/s)

Ta = Température de l'air (°C)

Un même type de corrélation, non indiquée ici, peut être appliquée aux mesures de l'évaporation en bac "Classe A". Dans ce cas, le coefficient de corrélation atteint 0.96. Ce genre de corrélation doit cependant être considéré avec certaines réserves et ne s'applique peut-être qu'aux seules conditions climatiques de la région du Guiers. L'extrapoler à d'autres lacs sahéliens sans étude complémentaire est hasardeux et c'est pourquoi elle n'est mentionnée ici qu'à titre indicatif.

De son côté, l'évaporation mesurée en bac "Classe A" suit assez fidèlement l'évolution de celle calculée au lac. La fig. 10 ci-après en indique les valeurs moyennes mensuelles pour la

période 1976-1991. L'évaporation en bac est nettement plus élevée qu'au lac puisqu'elle atteint le total annuel de 3.60 m environ. Cette différence est normale, car les paramètres fondamentaux du climat agissent de manière beaucoup plus directe et rapide sur le processus d'évaporation en bac.

Comme l'indique la fig. 10, le rapport entre l'évaporation en bac et celle du lac n'est pas constant dans l'année. Il va croissant avec l'avancée de la saison sèche et se réduit par contre en saison humide. Ceci s'explique par le rôle fondamental joué par le déficit de tension de vapeur de l'air de saison sèche, très nettement plus important à la surface du bac que sur l'étendue du plan d'eau. En bac et sous l'effet du vent, la pellicule d'air à l'interface eau-air est constamment et rapidement remplacée par de l'air sec. Le processus est par contre beaucoup plus lent au dessus du lac.

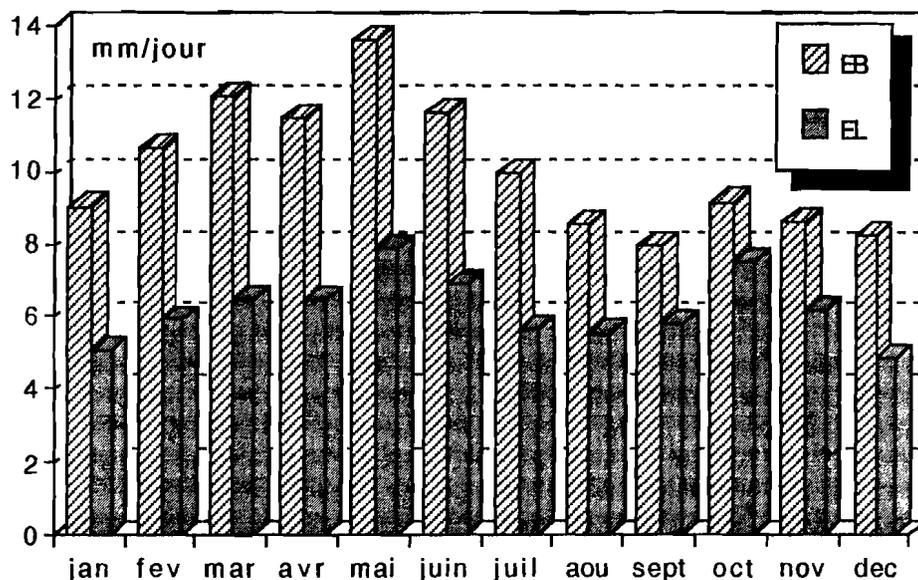


Fig. 10 : Evaporation mensuelle (moyenne 1976-1991) du lac (EL) et du bac "Classe A" (EB) (mm/jour).

C - MODELE DE GESTION DES EAUX

1 - Présentation générale du modèle

a) Justification du modèle

Le modèle de gestion quantitative des eaux du lac de Guiers (LGPLG - Logiciel de Gestion Prévisionnelle des Eaux du Lac de Guiers) a été créé en 1991, pour permettre la simulation du fonctionnement hydrologique du plan d'eau dans de multiples conditions, mais aussi pour quantifier les divers termes des bilans hydrologiques dans le contexte des relations très étroites entre le fleuve Sénégal, le lac de Guiers et la vallée du Ferlo (EVORA et al., 1991; COGELS, 1992; COGELS et al., 1992 a).

A l'avenir, l'utilisation d'un outil de gestion des eaux du Guiers s'avérera indispensable, vu la complexité du système hydraulique à gérer dans et autour du lac d'une part et entre fleuve et lac d'autre part.

En effet :

- Le Guiers sera, dans le futur, le lieu de transit des eaux fluviales qui alimenteront le canal de Cayor, vaste projet d'adduction d'eau vers une grande partie du pays dont toute la région du Cap-Vert et la ville de Dakar en particulier. L'approvisionnement de ce futur ouvrage, dont l'extrémité Sud du lac constituera l'émergence, sera assujéti entre autres aux modalités de gestion hydrologique du Guiers.

- Les apports fluviaux nécessaires à l'approvisionnement du canal de Cayor sont tels qu'ils justifieront soit plusieurs remplissages annuels du réservoir soit son approvisionnement en continu. Le choix de l'une ou l'autre alternative dépend des disponibilités fluviales elles mêmes destinées prioritairement aux cultures irriguées dans la vallée. L'approvisionnement du Guiers sera ainsi peut être limité à certaines périodes précises de l'année et la planification des apports fluviaux au lac deviendra alors déterminante.

- La production d'eau potable à l'usine de N'Gnith (SONEES) constitue un autre centre vital pour la région et le pays. L'approvisionnement en continu de l'usine est maintenant assuré depuis la mise en fonction de la réserve de Diama grâce au remplissage annuel du lac à des niveaux suffisants. La préoccupation majeure réside désormais dans la qualité future des eaux à traiter à la station, partiellement influencée par l'évolution du niveau dans le réservoir. Signalons aussi divers phénomènes biologiques apparus récemment, dont le développement périodique d'algues phytoplanctoniques qui engendrent quelques problèmes à la station : colmatage des pompes par les algues, mauvais goût de l'eau etc.....

- L'économie de l'eau par la réduction des pertes par évaporation passe par une gestion stricte de la superficie du plan d'eau. Son remplissage à niveau correct évitera les pertes inutiles. Compte tenu de la morphologie "lac plat" du Guiers, les cotes de remplissage devront être calculées avec grande précision et le recours à l'outil mathématique se révélera indispensable.

- L'évolution de la qualité des eaux du Guiers dépendra bien sûr de la qualité des apports au lac mais aussi du mode de gestion du réservoir et de son évolution limnimétrique annuelle. Cette interdépendance sera détaillée plus tard. Le modèle de gestion quantitative servira de base à l'outil de gestion qualitative et globale mis au point ultérieurement (cf. III. F.).

b) Cadre d'utilisation du modèle

Le modèle développé permet de fournir des éléments de réponses aux interrogations les plus courantes des futurs gestionnaires du Guiers.

Il permet ainsi de calculer :

- L'évolution du niveau des eaux du lac en cours d'année sur la base des paramètres du bilan hydrologique soit les pompages divers et rejets au lac, la pluviométrie, l'évaporation, les apports fluviaux, les lâchers d'appoint à Diama et au Ferlo etc.

- La cote minimale à respecter au remplissage du lac et son évolution limnimétrique idéale durant la période choisie. Ces critères limnimétriques de départ, calculés par le modèle, doivent permettre une exploitation normale du réservoir par les divers utilisateurs, et éviter de dépasser en fin de période un niveau limite inférieur prédéterminé.

- Les quantités d'eau fluviale nécessaires au remplissage principal du Guiers ou à ses réapprovisionnements en cours d'année et celles disponibles pour l'irrigation autour du réservoir et autres consommations, sur la base d'une évolution prédéterminée et imposée de la cote du lac durant la période en question.

- Le niveau des eaux minimum dans la réserve de Diama qui permette d'assurer les approvisionnements du lac tels que calculés par ailleurs.

- Les besoins en eau pour les cultures irriguées autour du Guiers compte tenu des diverses spéculations agricoles possibles, de leurs besoins respectifs en eau en cours d'année et de l'efficacité de l'irrigation.

Le modèle doit ainsi permettre de guider le choix des opérateurs sur la base de la simulation des différentes options possibles dans la gestion du plan d'eau et de leurs conséquences et implications limnimétriques et hydrauliques.

Remarque :

Le but poursuivi par la mise à disposition du modèle quantitatif des eaux présenté ici n'est pas de définir la gestion future optimale du lac de Guiers. Il est encore trop tôt pour le faire car beaucoup d'inconnues subsistent quant aux utilisations des ressources de la réserve dans les 20 années à venir. Notons entre autres :

- Les besoins des utilisateurs agricoles des eaux du Guiers dans les années à venir, eux-mêmes assujettis à l'extension des cultures irriguées autour du lac et surtout à la mise en valeur éventuelle de la vallée du Ferlo.

- Le devenir de l'usine des eaux de la SONEES à N'Gnith et l'évolution de ses capacités de traitement.

- Le délai de mise en fonction du canal de Cayor et la planification de ses pompages.

- La politique de gestion de la relation fleuve-lac sur le canal de la Taoué qui conditionnera le fonctionnement hydrologique annuel du Guiers. Cette politique devra être définie sur la base de critères économiques, écologiques et sanitaires dont il a déjà été question, mais qui n'ont pas encore été pris en compte par les décideurs.

- L'évolution annuelle de la disponibilité en eau au niveau de la jonction fleuve-lac. Cette disponibilité dépendra de la gestion de la réserve de Manantali et du développement hydroagricole dans la vallée, de son importance et de sa planification dans le temps.

Le modèle de gestion LGPLG a été conçu pour une utilisation par les opérateurs de terrain. Il est facile d'emploi et utilisable sans outil informatique sophistiqué. Il est écrit en langage Turbo Pascal.

2 - Contenu

Le modèle est basé sur le calcul prévisionnel du bilan hydrologique (cf. II. A. 3), soit :

$$\Delta V \text{ lac } (dt) = V \text{ lac}(t_2) - V \text{ lac}(t_1) = (V \text{ entrées} - V \text{ sorties})$$

$V_{lac}(t_2)$ et $V_{lac}(t_1)$: Volumes du lac aux temps 2 et 1

$V \text{ entrées}$ = apports pluviométriques (apports directs et ruissellement) (Q_a)
 = rejets des zones irriguées (Q_b)
 = apports par le fleuve (Q_c)

$V \text{ sorties}$ = Evaporation (Q_d) et pompages et prélèvements divers (Q_e)

$$\text{d'où } V \text{ lac}(t_2) - V \text{ lac}(t_1) = Q_a + Q_b + Q_c - Q_d - Q_e \quad (1)$$

Présentée sous cette forme, l'équation permet de calculer les variations du volume du lac (quotidiennes dans le cas de LGPLG) et par là l'évolution de sa cote journalière, sur la base des apports et des pertes en eau.

L'équation peut aussi s'écrire:

$$\underline{Qc = V_{lac(t2)} - V_{lac(t1)} + Qe - Qa - Qb + Qd} \quad (2)$$

Dans ce second cas, l'équation sert à calculer les besoins en eau du lac nécessaires pour assurer les divers prélèvements compte tenu d'une variation du volume et donc de hauteur d'eau dans le réservoir, préalablement imposée. On en déduit les variations quotidiennes du volume du réservoir ΔV .

Qa : [pluviométrie (mm) du jour n] x [surface du lac (Slac) du jour n].

Un coefficient de ruissellement de 10% est pris en compte sur le bassin versant du lac limité d'une part par la configuration des contours du lac et d'autre part par la limite supérieure du bassin, fixée arbitrairement à la cote +4,00 m. Les données pluviométriques sont obtenues aux trois stations climatologiques de la CSS à Richard-Toll.

Qb : rejets des eaux de drainage des champs de canne à sucre dans le nord du lac; les débits sont mesurés directement aux pompes.

Qc : Les apports fluviaux ne sont pas quantifiables directement par application des équations de LAMAGAT (1990) de la station de jaugeage à Richard-Toll sur le canal de la Taoué. Elles se basent sur la différence de hauteur d'eau entre l'échelle limnimétrique de la Taoué et l'échelle de la SONEES à N'Gnith prise comme référence (Notons cependant que de nouvelles courbes de tarage du canal de la Taoué sont disponibles depuis peu).

Qc est calculé par le modèle dans le cas des conditions de l'équation (2), c'est à dire s'il est le seul terme inconnu du bilan. Qc peut aussi être un terme introduit dans le bilan pour des simulations effectuées au moyen de l'équation (1) si l'on cherche à connaître l'effet sur l'hydrométrie du réservoir d'apports d'eau fluviale disponible à certaines époques de l'année bien précises.

Qd : L'évaporation quotidienne moyenne du lac est estimée sur la base des résultats du calcul des bilans hydrologiques moyens de la période 1976 - 1991.

Qe : somme des prélèvements d'origines diverses, soit :

- **Qe1** : Prélèvements directement quantifiables aux pompes; c'est le cas pour les besoins d'irrigation de la canne à sucre et pour les pompages de l'usine de production d'eau potable de la SONEES.

- **Qe2** : Besoins d'eau d'irrigation pour les cultures irriguées autour du lac; le modèle effectue ce calcul pour divers choix de cultures, en tenant compte de l'évolution des besoins à la parcelle dans l'année et de l'efficacité de l'irrigation.

- **Qe3** : Besoins du futur canal de Cayor.

LGPLG travaille au pas de temps quotidien et sur une période de deux années consécutives au maximum.

3 - Options de simulations

4 options principales de calcul sont disponibles :

a) Evolution limnimétrique quotidienne du lac

Le logiciel calcule l'évolution du niveau des eaux du lac du jour n au jour $(n+x)$ sur la base d'une cote de départ et du contenu des fichiers relatifs aux paramètres entrées et sorties d'eau.

Les calculs sont effectués après avoir introduit le nombre de jours de simulation et le code du jour de son début. La cote du lac correspondant à la fin de la période de simulation est affichée en fin de calcul avec le bilan hydrologique final.

Cette option est principalement destinée à étudier les variations de niveau du lac durant ses périodes d'isolement.

b) Niveau limnimétrique optimal de remplissage du réservoir

Cette simulation fonctionne en sens inverse de la précédente, en remontant chronologiquement du jour $(n+x)$ au jour n . Elle est destinée au calcul du niveau optimal de remplissage du lac compte tenu des consommations prévues pour l'année à venir et du niveau d'eau désiré dans le réservoir en fin de période.

c) Quantification des apports fluviaux

Dans l'optique d'une gestion future très précise de l'hydrologie du Guiers, la possibilité d'imposer jour par jour une évolution de son niveau est intéressante parce qu'elle permet d'harmoniser au mieux les intérêts des différents utilisateurs des eaux. Les fichiers relatifs aux pompages prévus en cours d'année, celui de l'évolution imposée de la hauteur d'eau dans le lac et celui des périodes de jonction fleuve-lac (périodes de remplissages) sont fournis au modèle.

Deux fichiers sont générés par le calcul :

-un fichier "Fleuve" qui précise les besoins en apports fluviaux en période de jonction fleuve-lac mais aussi les apports supplémentaires nécessaires ou les pompages complémentaires (fictifs) possibles compte tenu de l'évolution choisie de la cote du lac.

-un fichier "cote au quai de Richard-Toll" indiquant la cote minimale requise dans le canal de la Taoué permettant d'assurer le remplissage du lac sur la base de l'évolution limnimétrique imposée. Les courbes de tarage du canal de la Taoué établies en 1992 dans le cadre de l'étude de faisabilité du canal de Cayor permettent aujourd'hui le calcul précis des niveaux à respecter dans le fleuve pour assurer au lac l'approvisionnement nécessaire.

A la fin de chaque simulation, le modèle indique le bilan hydrologique global de l'option de calcul choisie. Il permet aussi la représentation graphique du résultat des simulations : courbes limnimétriques du lac, transferts fleuve-lac et bilans hydrologiques.

d) Besoins en eau pour l'irrigation

Trois fichiers de données sont introduits dans les calculs : les surfaces cultivées, les besoins en eau des espèces végétales cultivées, besoins variables en cours d'année, et l'efficience de l'irrigation.

Les 3 fichiers de base distinguent les différentes possibilités de culture irriguée autour du lac et dans le Ferlo : canne à sucre, riz d'hivernage et de contre saison, maïs d'hivernage et de contre saison, légumes et tomates. Les calculs intègrent ces paramètres et le modèle indique les besoins d'irrigation totaux quotidiens.

4 - Deux exemples d'utilisation

Les 2 simulations proposées font référence à des conditions hydrologiques lacustres et à des alternatives de gestion du réservoir potentielles après la mise en fonction du canal de Cayor, soit postérieures à l'an 2000.

a) Les termes du bilan hydrologique :

- Les rejets CSS sont identiques à la situation de 1993 : $0,085 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jour}$
- La pluviométrie est basée sur celle de l'année 1989 : 237 mm
- Les pompages pour le canal de Cayor : $1,05 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jour}$
- Les pompages de la SONEES sont doublés par rapport à 1993 : $0,08 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jour}$
- Les pompages pour l'irrigation autour du lac sont destinés à 1000 ha de riz dont 500 en double culture annuelle, et 500 ha de tomates.
- Les pompages CSS et SAED dans le Nord du lac : $0,05 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jour}$
- L'évaporation du plan d'eau est basée sur la moyenne 1976-1991.

b) Les contraintes limnimétriques imposées au lac sont :

- Pour les 2 simulations :

- Un niveau de remplissage maximum à la cote 2.50 m, ce qui suppose le rehaussement des digues qui ceinturent le réservoir.
- Un niveau limite inférieur à ne pas dépasser fixé à 0.50 m.
- Une variation annuelle du niveau des eaux.

- Pour la simulation A :

L'année hydrologique est divisée en 3 périodes et comprend :

- Un approvisionnement continu et quantifié avec précision entre octobre et février pour assurer la baisse progressive et imposée du niveau d'eau.
- Une phase d'isolement de 4 mois.
- Une phase de remplissage du 30 juin au 30 septembre avec évolution imposée du niveau de l'eau dans le réservoir.

- Pour la simulation B :

L'année hydrologique est également divisée en 3 périodes soit :

- Une phase d'isolement d'octobre à fin mars.
- Un palier de 3 mois à la cote 0.50 m assuré par un approvisionnement fluvial continu
- Une phase de remplissage identique à celle de la simulation A.

c) Résultats

La fig. 11 indique les résultats des 2 simulations en précisant l'évolution limnimétrique du lac et les apports fluviaux indispensables pour l'assurer. De son côté, le tableau I compare les bilans finaux de ces 2 simulations d'un point de vue strictement hydrologique.

	Simulation A	Simul. A	Simulation B	Simul. B
	APPORTS	% apports	APPORTS	% apports
Fleuve	1014	91,3%	957	90,9%
Pluies	65	5,8%	65	6,1%
Rejets CSS	31	2,8%	31	3,0%
	PERTES	% pertes	PERTES	% pertes
Pompages SONEES	29	2,6%	29	2,8%
Pompages Cayor	384	34,6%	384	36,5%
Irrigation	66	6,0%	66	6,3%
Evaporation	630	56,8%	573	54,4%
Taux d'utilisation des eaux fluviales(%)	47%		50%	

Tableau I : Bilan hydrologique des simulations A et B. Apports et pertes en 10^6 m^3 .

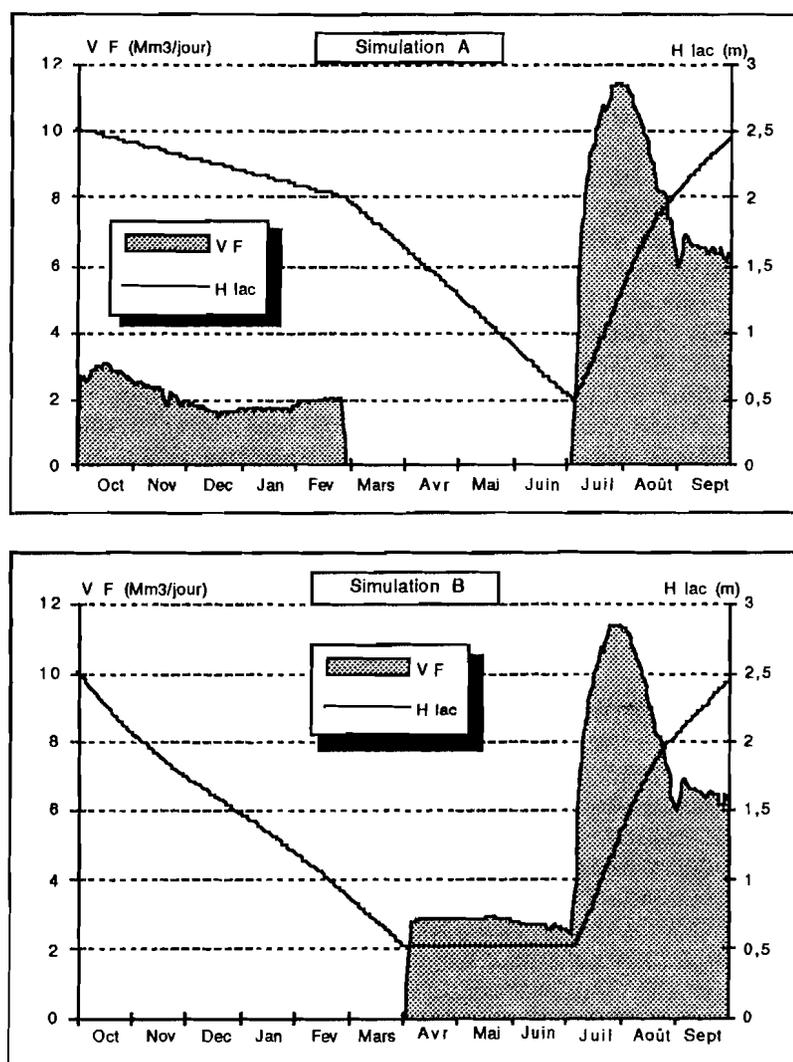


Fig. 11 : Evolution de la hauteur d'eau (m) dans le lac et apports fluviaux ($10^6 \text{ m}^3/\text{jour}$) nécessaires pour 2 simulations de la période postérieure à la mise en fonction du canal de Cayor.

Comparativement aux bilans hydrologiques 1976-1992, les apports fluviaux prévus par les 2 simulations constituent toujours l'élément clé des entrées d'eau. Par contre, les pertes ne sont plus quasi exclusivement dues à l'évaporation, mais sont un peu mieux partagées grâce aux prélèvements destinés au canal de Cayor.

L'évaporation représente quelques 55 % de ces pertes, pour plus de 85 % durant la période 1976-1992. Ceci se traduit dans le taux d'utilisation réel des eaux fluviales dans le Guiers qui atteint là près de 50% contre moins de 10 % en 1992.

III - QUALITE HYDROCHIMIQUE DES EAUX

L'étude hydrochimique du Guiers comporte 6 parties :

- Une synthèse de la méthodologie suivie dans l'approche qualitative des eaux.
- Une présentation rapide des conditions de températures aquatiques et de pH du Guiers.
- Une description de l'évolution globale de la salinité du lac entre les années hydrologiques depuis 1976.
- L'étude qualitative générale du lac qui concerne les éléments majeurs dissous. Basée sur les mesures effectuées au lac entre 1989 et 1992, ces résultats seront ensuite comparés à ceux mesurés dans les mêmes conditions et entre 1979 et 1982 soit avant la mise en fonction du barrage de Diama. Les effets des aménagements sur la qualité générale des eaux pourront ainsi être approchés.
- La recherche d'une station de référence du lac permettant à l'avenir un suivi qualitatif simplifié du réservoir.
- La mise au point et le test d'un premier modèle de gestion globale des eaux qui intègre les aspects quantitatifs et qualitatifs de la gestion du Guiers.

Remarque :

L'étude qualitative entreprise ici ne concerne que les éléments chimiques majeurs. Elle ne s'intéresse donc pas à la problématique de l'évolution qualitative des eaux du lac liée spécifiquement aux aménagements hydroagricoles dans la vallée et sur la périphérie du plan d'eau. Les problèmes de l'eutrophisation du milieu aquatique sont ébauchés par ailleurs, mais ne font pas partie des termes de référence du programme EQUASEN.

A - METHODOLOGIE DE L'ETUDE

1 - Stations d'échantillonnages

13 stations ont été choisies pour l'échantillonnage régulier des eaux et le dosage des éléments majeurs dissous : 7 stations dans la région Nord du Guiers, 3 en région Centre et 3 dans la région Sud. Leurs emplacements et références numériques sont indiqués à la fig. 12.

Elle sera aussi proposée comme station de référence pour le suivi qualitatif régulier du lac tel que défini au point III. E.

2 - Séries et Périodes

- 1989 - 1992 : L'étude de la qualité générale des eaux du Guiers se base sur 23 séries de prélèvements dont la répartition dans le temps et la hauteur d'eau dans le lac correspondante sont indiqués à la fig. 13.

Les séries 4 et 6 ne sont pas indiquées. Il s'agit de séries d'analyses intermédiaires destinées à 2 petites études spécifiques menées en 1989-90.

- 1979 - 1982 : les comparaisons entre la situation qualitative actuelle et celle qui prévalait avant la mise en fonction du barrage de Diama (en 1985) seront établies d'après les

analyses effectuées sur la période 1979-82 et qui ont porté sur 28 séries d'échantillonnages aux mêmes stations qu'en 1989-92 (GAC et COGELS, 1986; COGELS et GAC, 1987).

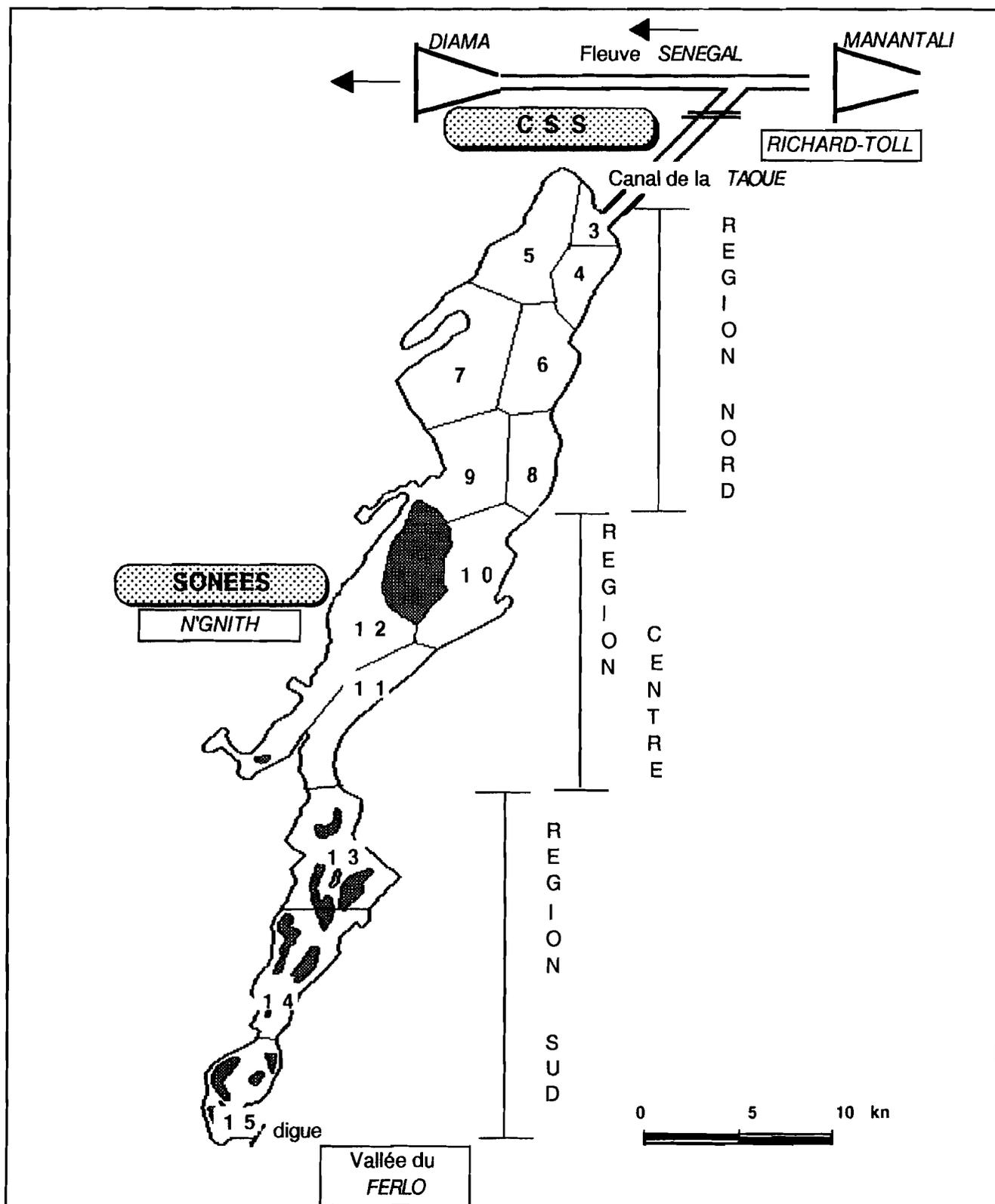


Fig. 12 : Emplacement des stations d'échantillonnage au lac et leurs zones d'influence respectives.

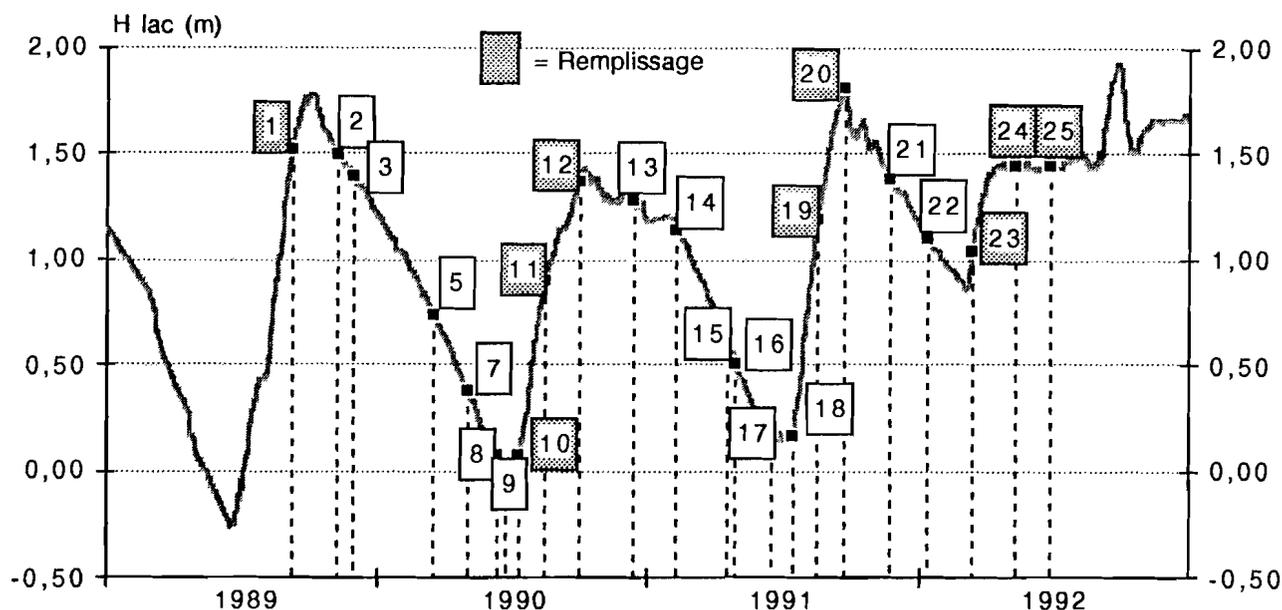


Fig. 13 : Numérotation et répartition des séries d'échantillonnages entre 1989 et 1992 et selon la hauteur des eaux du Guiers. Les séries correspondant aux phases de remplissage du lac sont mises en évidence.

3 - Paramètres mesurés et calcul des teneurs moyennes

Les échantillons d'eau sont prélevés à 20 cm sous la surface environ. Les éléments analysés sont : Chlorures, sulfates, carbonates et bicarbonates, calcium, magnésium, sodium et potassium. Minéralisation globale, conductivité et pH complètent les analyses.

Mode de calcul de la qualité moyenne des eaux :

A chaque station d'échantillonnage (fig. 12) est attribuée une zone d'influence théorique dans laquelle on considère que la qualité de l'eau est homogène. Le volume de chaque zone a été calculé à chaque série d'analyses. En le multipliant par la concentration de l'élément X dans la zone on obtient le poids total de l'élément. L'addition des poids calculés dans les 13 zones permet de quantifier la masse totale de l'élément pour l'ensemble du lac et donc sa concentration moyenne dans le plan d'eau.

De leur côté, les qualités régionales seront calculées en regroupant les stations 3 à 9 pour la région Nord, 10 à 12 pour la région Centre et 13 à 15 pour la région Sud.

B - TEMPERATURES AQUATIQUES ET pH

1 - Température des eaux

La fig. 14 indique l'évolution moyenne intermensuelle des températures aquatiques mesurées à la station de N'Gnith (station 12) et de son écart-type.

La température moyenne annuelle des eaux est de 24,6°C. L'évolution annuelle est bien marquée avec un minimum en janvier (19,3°C) et un maximum en septembre (29,5°C).

L'amplitude moyenne annuelle est donc de 10°C environ. Le cycle est répété chaque année, avec parfois quelques variantes comme le minimum atteint en décembre et le maximum dès le mois d'août (très rarement).

Les variations interannuelles des températures moyennes mensuelles sont faibles comme l'indique l'écart-type moyen qui n'est que de 1.1°C.

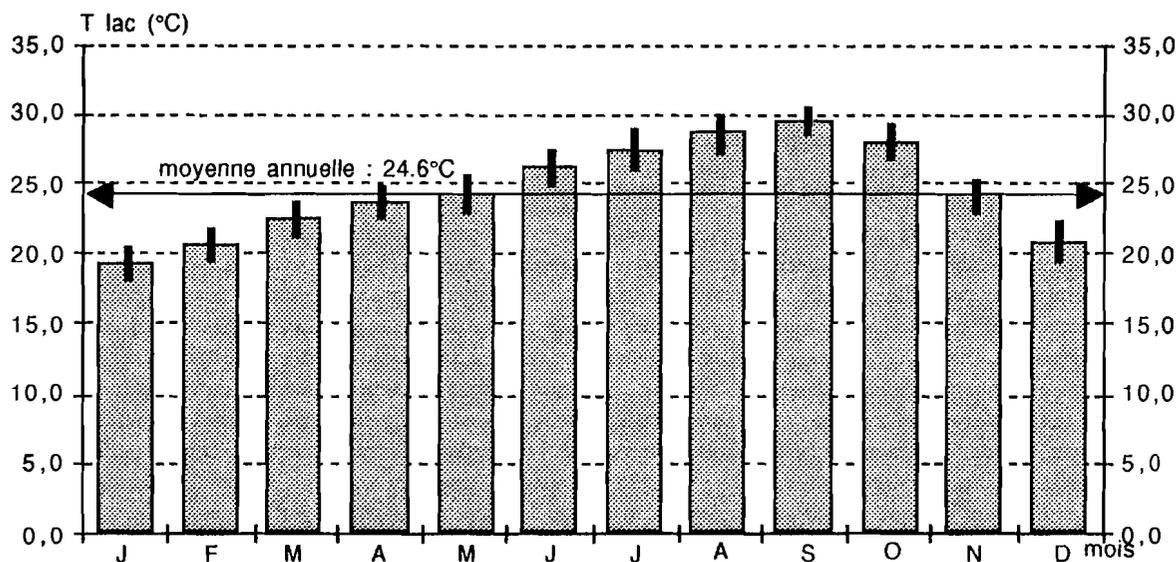


Fig. 14 : Températures moyennes mensuelles des eaux du Guiers à la station 12 pour la période 1976 - 1992 et écart-type.

2 - pH

Les pH sont assez stables au cours des séries d'échantillonnages. Le tableau II ci-dessous indique, par région, les valeurs moyennes pour l'ensemble des séries de la période 1989-92, l'écart-type et les extrêmes enregistrés.

On constate aussi un léger gradient Nord - Sud, correspondant d'ailleurs à celui de la minéralisation globale des eaux.

Le calcul du pH moyen du lac est basé sur celui de la salinité moyenne de ses eaux, elle-même dépendante du volume du réservoir et donc de son niveau. Pour un niveau d'eau de 1 m IGN, (considéré comme moyen pour la période 1989-1992), la salinité est de 232 mg/l, correspondant à un pH moyen de 7.71.

	Région Nord	Région Centre	Région Sud
moyenne	7,62	7,76	7,96
écart-type	0,28	0,31	0,28
max.	8,45	8,73	8,87
min.	6,86	7,14	7,26

Tableau II : pH moyen, écart-type et valeurs extrêmes mesurées au lac entre 1989 et 1992.

Il est intéressant d'étudier ensuite l'évolution du pH dans le lac sur une plus longue période, et d'après les mesures hebdomadaires effectuées au laboratoire de la station de la SONEES à N'Gnith (station 12).

La fig. 15 indique l'évolution du paramètre depuis 1977 avec celle de la hauteur des eaux dans le Guiers. Les 2 courbes de tendance indiquées sur le graphique sont l'expression d'équations polynomiales du 3^e degré qui intègrent au mieux l'ensemble des données de chacun des 2 paramètres.

Les 2 courbes de tendance montrent une évolution croissante similaire. En 1977 le pH moyen enregistré à N'Gnith était de l'ordre de 7.35. La moyenne a évolué régulièrement pour atteindre aujourd'hui 8.20 environ soit une croissance de quelques 12 % en 15 ans.

On remarque aussi une meilleure stabilité du paramètre depuis 1992, qui correspond d'ailleurs à une bonne stabilité du niveau des eaux cette même année. Le pH semble même régresser quelque peu en fin d'année 1992; ceci s'explique par l'apport quasi constant au lac d'eau fluviale de pH 7 - 7,2 inférieur au pH moyen du Guiers. Cette évolution décroissante du pH se prolongera sans doute encore quelque temps à cause d'une part de la jonction fleuve-lac quasi permanente depuis 1992 et d'autre part des rejets d'eaux de drainage parfois très acides à la station R2 (cf. fig. 6). Des eaux à pH 3.0 y ont été prélevées.

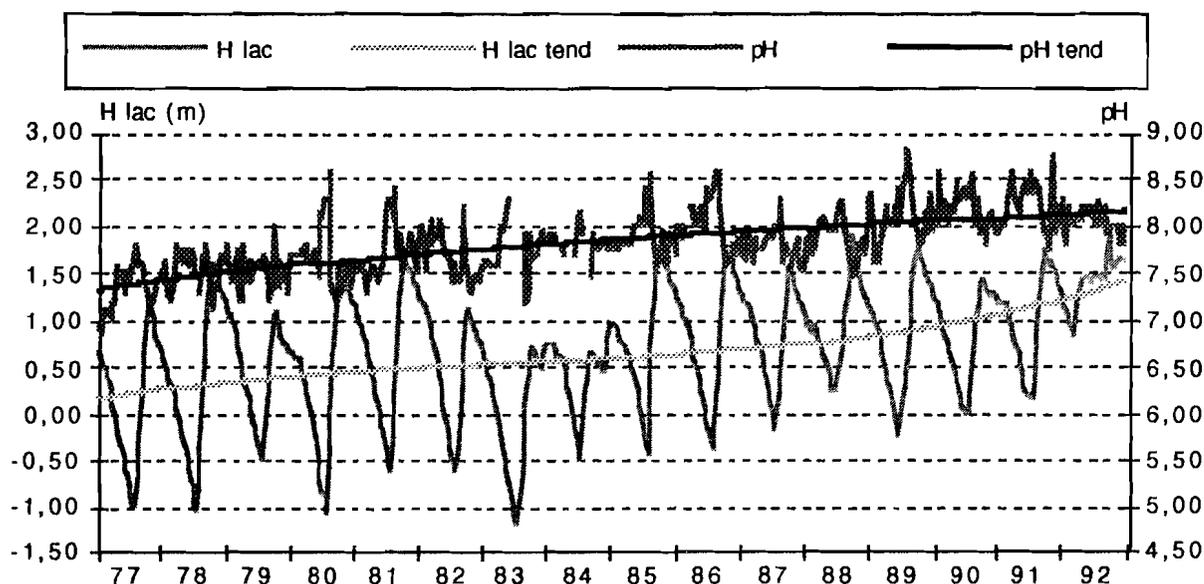


Fig. 15 : Evolution du pH et de la hauteur des eaux à la station 12 de 1977 à 1992 et tendance générale des 2 paramètres

C - EVOLUTION DE LA SALINITE DES EAUX DEPUIS L'ANNEE HYDROLOGIQUE 1976-1977

L'étude de l'évolution de la salinité générale du Guiers présentée ci-après est une synthèse des travaux présentés par COGELS (1983 a et b) et COGELS et al.(1992 b).

La fig. 16 indique, par année hydrologique, les valeurs moyennes et extrêmes de la salinité des eaux dans le Guiers depuis 1976.

Ces 2 paramètres sont calculés comme suit :

- Salinité moyenne annuelle du lac : une corrélation 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 en déduit donc sa teneur moyenne en chlorures pour la même période. Une seconde corrélation est ensuite appliquée qui lie les teneurs moyennes en chlorures dissous précédemment calculées et la salinité moyenne du lac (COGELS et al., 1992 b).

- Valeurs extrêmes de la salinité : Une corrélation lie la chlorinité moyenne des eaux du Guiers aux mesures (simultanées) à la station de N'Gnith. Cette corrélation est utilisée pour connaître les valeurs extrêmes du taux de chlorures dissous (et de salinité) durant la période étudiée.

Signalons aussi qu'au cours de certaines années à étiages très sévères comme en 1979-80 et 1982-83, la corrélation entre la salinité des eaux mesurée à N'Gnith et celle du lac a été faussée à cause de conditions hydrologiques extrêmes. L'extrapolation à l'ensemble du lac des valeurs maximales mesurées à la station 12 devient alors aléatoire. Les valeurs extrêmes de ces 2 périodes sont donc à considérer avec certaines réserves.

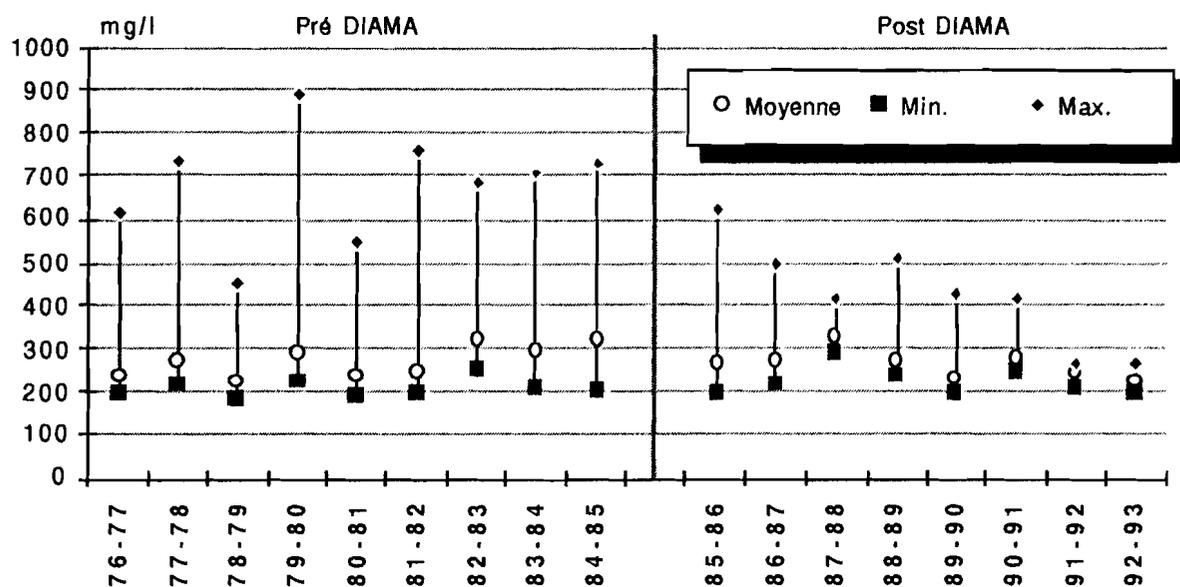


Fig. 16 : Salinité moyenne et extrême du Guiers de l'année hydrologiques 1976-77 à 1992-93.

La fig. 16 appelle les commentaires suivants :

- La salinité moyenne annuelle du Guiers s'est très peu modifiée au cours des 17 années hydrologiques étudiées. Elle est de 271 mg/l (en moyenne) pour la période pré-Diama pour 264 mg/l dans la seconde période.

- Les valeurs extrêmes minimales ont légèrement augmenté entre les 2 périodes, passant de 207 à 222 mg/l (moyennes interannuelles). Par contre les valeurs extrêmes maximales ont très nettement régressé. Leur moyenne interannuelle passe ainsi de 608 à 427 mg/l.

- Les variations (intra) annuelles de la salinité ont nettement régressé depuis la mise en fonction du barrage aval : avant Diama le coefficient de salinité annuelle des eaux était de 2.0 environ. Il n'est plus que de 0.92 durant la seconde période.

- A noter qu'en 1991-92 et 1992-93, les valeurs maximales et les variations annuelles de la salinité des eaux se démarquent nettement de celles enregistrées au cours des 6 autres années hydrologiques de la période post-Diama. Un parallèle peut être établi avec les modifications intervenues simultanément dans la gestion hydrologique du Guiers. La question sera étudiée plus loin.

Tous les changements intervenus sont à attribuer aux nouvelles conditions hydrologiques lacustres imposées par les récents aménagements hydrauliques fluviaux : de meilleurs remplissages du réservoir engendrant une plus forte dilution dans le réservoir et les lâchers des eaux méridionales dans la vallée du Ferlo sont les causes principales de ces modifications qui seront discutées plus tard.

D - QUALITE GENERALE DES EAUX

La qualité chimique des eaux du Guiers et son évolution annuelle sont sous la dépendance de la qualité respective et de l'importance volumétrique des divers termes du bilan hydrologique et des effets conjugués de l'évaporation.

- Au rang des apports on recense les eaux fluviales lors du ou des remplissages annuels, les rejets des eaux de drainage des cultures irriguées, et la pluie.

- Les eaux d'irrigation CSS et autres, celles destinées à la production d'eau potable de la SONEES et les lâchers annuels vers le Ferlo constituent les pertes du lac. Leur qualité respective évolue en fonction de leur localisation sur le plan d'eau et de la période de l'année.

Les échanges avec les nappes phréatiques constituent l'inconnue du système; la complexité du réseau phréatique autour du lac a rendu jusqu'à maintenant impossible toute investigation approfondie sur le sujet.

Le processus évolutif annuel de la qualité des eaux du Guiers est donc très complexe vu le nombre de paramètres qui y interviennent. D'autre part les eaux du réservoir ne sont pas qualitativement homogènes et la localisation des pompages et pertes diverses sur la périphérie du plan d'eau peut avoir des incidences spécifiques sur l'évolution de sa qualité.

La fig.17 schématise les paramètres entrées-sorties qui interviennent dans l'évolution qualitative des eaux du Guiers. Elle indique bien la complexité du système et celle des interrelations diverses qui le régissent.

1 - Bilan qualitatif 1989-1992

a) Chlorures et sodium

Qualité moyenne du Guiers

Ces 2 paramètres conservatifs seront analysés simultanément. La fig. 18 indique l'évolution de leurs teneurs moyennes respectives dans le lac aux 23 séries d'échantillonnages et celle du volume du réservoir entre 1989 et 1992. Rappelons d'autre part le mode de calcul de la qualité moyenne des eaux indiqué précédemment au point III. A. 3.

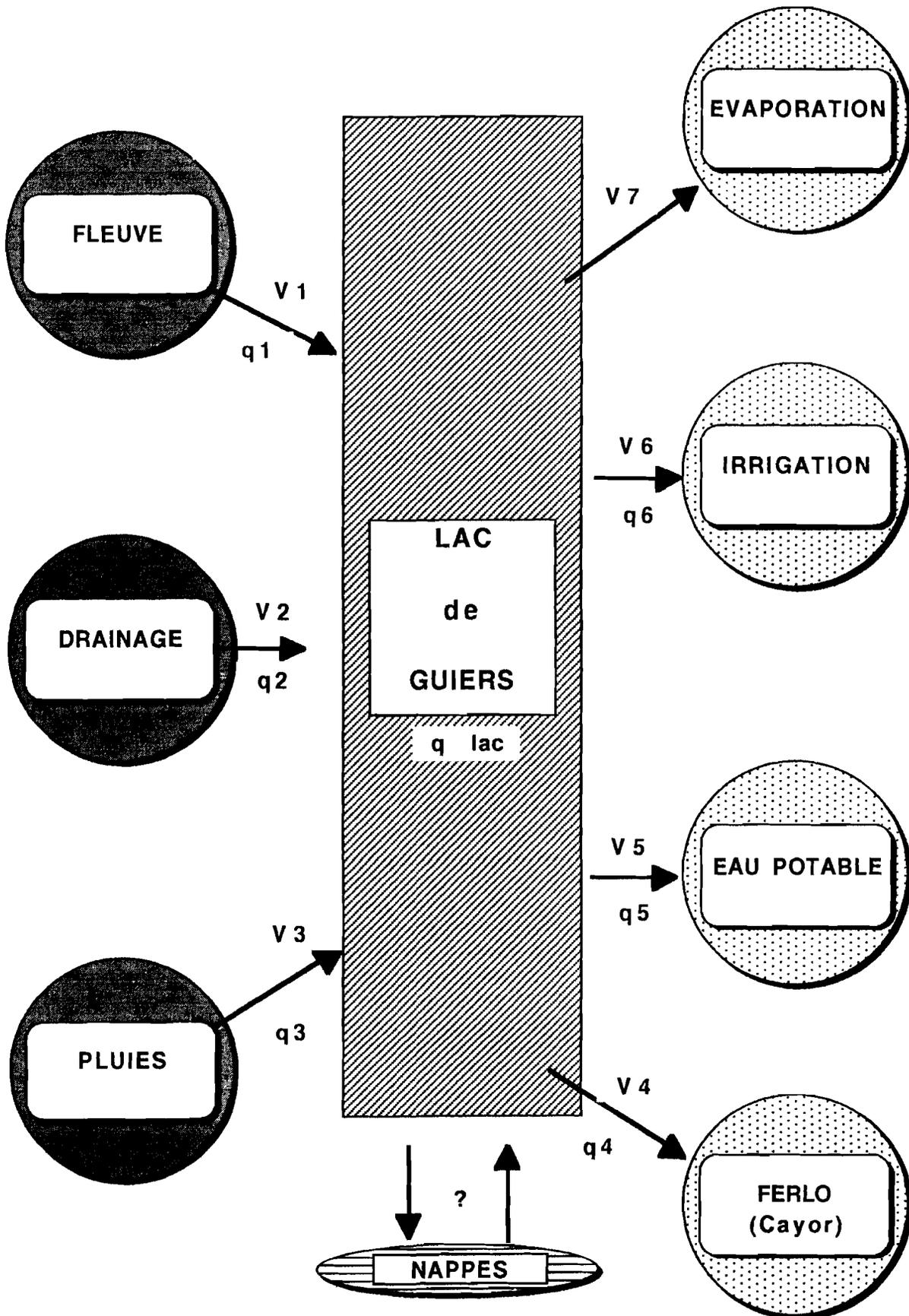


Fig. 17 : Paramètres du bilan hydrologique et leur intervention quantitative (Volumes V) et qualitative (qualité q) dans l'évolution qualitative du lac.

On remarque à la fig. 18 :

- une évolution parfaitement conjointe des teneurs moyennes des chlorures et sodium dissous, quelle que soit la période de l'année.

- une relation inverse entre d'une part les concentrations moyennes des 2 éléments et d'autre part le volume du lac. Le cycle annuel dilution - minéralisation est donc bien mis en évidence (COGELS et GAC, 1993). L'influence respective des entrées et sorties d'eau du lac et les effets de l'évaporation sur la concentration des solutions seront examinés plus loin.

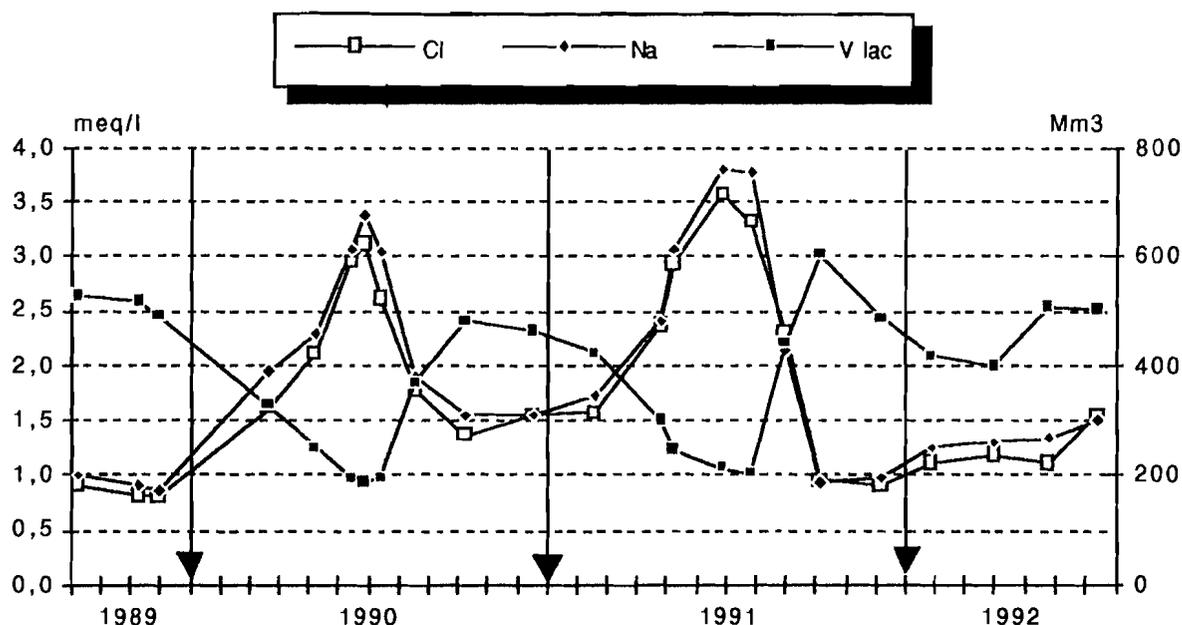


Fig. 18 : Evolution des teneurs moyennes en chlorures et sodium dissous (meq/l) et du volume du Guiers (10^6 m^3) entre 1989 et 1992.

Transposée sur un graphique (X,Y) (fig. 19), la relation générale entre la chlorinité et le volume du lac présente un coefficient de corrélation de 0.89.

Les points correspondant aux phases de remplissage (PR) et indiqués sur le graphique se différencient nettement des autres. Leur dispersion autour de la courbe de régression s'explique par la plus grande imprécision du calcul de la chlorinité moyenne en phase de remplissage, à cause du déplacement important des masses d'eau durant cette phase. En effet, les stations du lac et leurs zones d'influence ne présentent alors pas d'homogénéité suffisante de leurs eaux et l'exactitude des calculs de chlorinité moyenne s'en trouve faussée.

En prenant en compte uniquement les points correspondant aux périodes d'isolement du lac (HPR), la relation chlorinité - volume présente un coefficient de corrélation de 0.95 soit bien meilleur que celui calculé pour l'ensemble des 2 périodes réunies (PR+HPR) de l'année hydrologique.

Les commentaires relatifs à l'évolution des chlorures au lac s'appliquent de la même manière au sodium dissous.

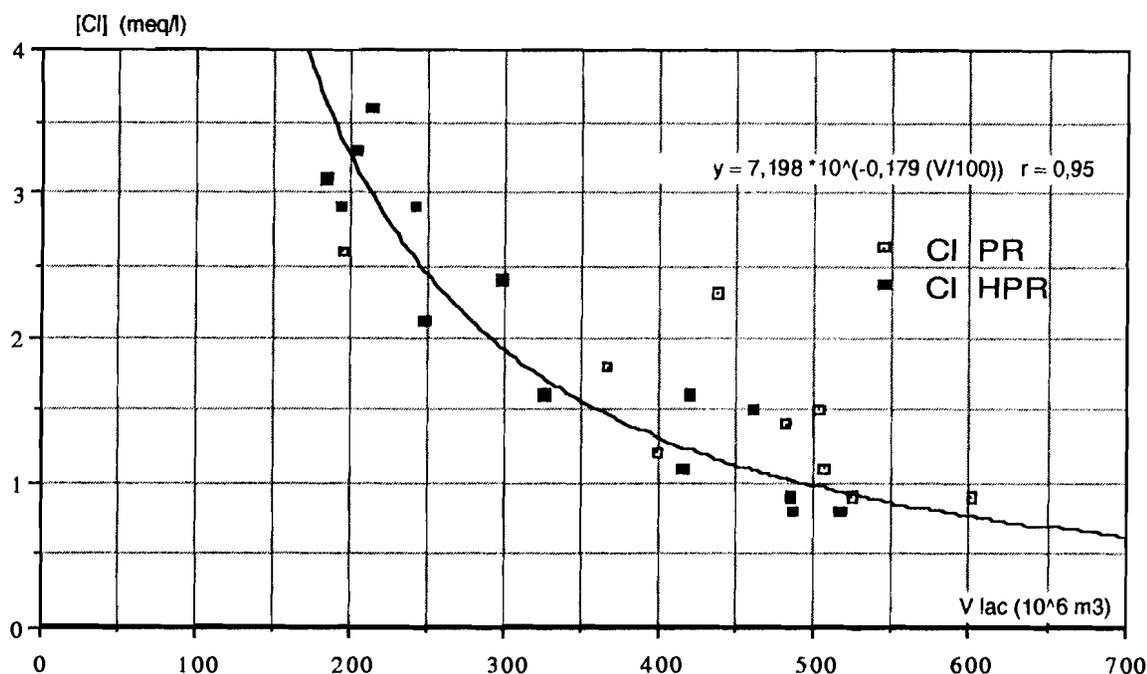


Fig. 19 : Relation entre le volume du lac de Guiers (10^6 m^3) et la chlorinité de ses eaux (meq/l) entre 1989 et 1992, en phases de remplissages (PR) et d'isolement (HPR) du plan d'eau.

La chlorinité moyenne du Guiers durant la période d'étude 1989-1992 est de **1.44 meq/l** soit **51 mg/l**. Elle est calculée sur la base de la hauteur d'eau moyenne de la période d'étude soit 1.00 m IGN correspondant à un volume de $390 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Pour sa plus grande précision, la formule de corrélation entre volume du lac et chlorures dissous correspondant aux périodes d'isolement du lac (HPR), a été choisie pour ce calcul.

De son côté et pour une même cote de référence de 1 m IGN, la concentration moyenne du lac en sodium est de **35.9 mg/l**, soit **1.56 meq/l**.

Qualité régionale

L'évolution des concentrations régionales des divers éléments dissous est exprimée sur la base de la hauteur d'eau dans le lac et non pas en fonction du volume de chacune de ses 3 grandes régions (cf. fig. 12). En effet, le volume de ces 3 régions n'évolue pas de manière proportionnelle en fonction du niveau du lac, et la comparaison interrégionale deviendrait ainsi aléatoire.

D'autre part, les comparaisons ne concernent que les seules périodes d'isolement du lac (HPR), pour les raisons d'homogénéité de qualité d'eau autour des points d'échantillonnages, déjà évoquées précédemment

La fig. 20 met en relation les chlorinités moyennes du lac et les hauteurs d'eau correspondantes. On y remarque que les différences de concentrations entre régions Nord et Centre sont peu marquées avec de bons coefficients de corrélation.

Par contre, la chlorinité de la région Sud se différencie très nettement de celle des 2 autres régions puisque la corrélation [Cl] : Hlac présente un coefficient de 0.90 seulement.

L'hétérogénéité de qualité des eaux, plus importante en région Sud que dans les autres régions et concrétisée par un fort gradient de salinité, est bien mise en évidence.

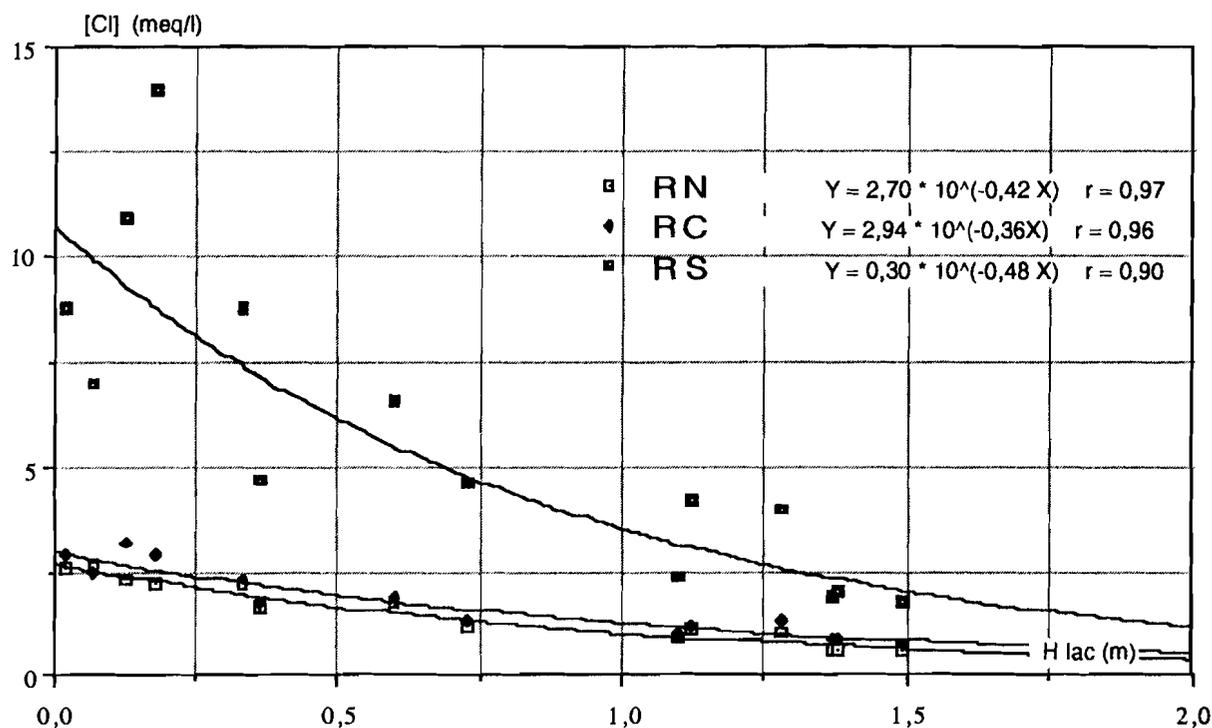


Fig. 20 : Corrélations entre la hauteur d'eau du Guiers (m IGN) et la chlorinité moyenne (meq/l) de ses 3 régions en phases d'isolement du plan d'eau.

A la cote moyenne de 1,00 m IGN, les concentrations en chlorures dissous sont, pour les 3 régions et du Nord au Sud, de 36,2, 45,4, et 125,6 mg/l respectivement. La région Sud a donc une teneur moyenne en chlorures près de 3,5 fois plus élevée que la région Nord.

Quant aux valeurs extrêmes mesurées elles ont été de 4,3 mg/l le 30/6/92, à la station 3 (Nord du lac) et de 1206 mg/l à l'extrême Sud (station 15) le 19/6/91.

A la cote 1 m IGN, les teneurs sodiques moyennes des 3 régions sont respectivement de 25,2, 31,4 et 89,9 mg/l, soit 1,1, 1,37 et 3,91 meq/l. Le facteur moyen de concentration des eaux Nord-Sud est ainsi de 3,57 soit quasi identique à celui mesuré pour les chlorures (3,47).

b) Autres éléments

Le tableau III et la fig. 21 indiquent la concentration moyenne lacustre des divers éléments, pour un niveau d'eau de 1m IGN considéré comme représentatif de la période 1989-92.

Par rapport aux chlorures et sodium dissous considérés comme conservatifs, les autres éléments interviennent de manière plus ou moins marquée dans les divers processus de la régulation géochimique et biochimique. Des cycles chimiques régulateurs sont effectifs dans la colonne d'eau, à l'interface eau-sédiment et au niveau de la biologie aquatique, tant animale que végétale. Ces interventions des divers éléments dissous sont à l'origine de variations constatées de leur concentration dans l'eau, indépendamment du seul cycle dilution-minéralisation engendré par les entrées et sorties d'eau du lac et par l'évaporation.

	mg/l	mg/l	mg/l	meq/l	meq/l	meq/l
	Région Nord	Région Centre	Région Sud	Région Nord	Région Centre	Région Sud
Cl	36.2	45.4	125.6	1.02	1.28	3.54
SO ₄	15.5	16.6	27.6	0.32	0.34	0.57
HCO ₃	70.3	87.1	193.5	1.15	1.43	3.17
CO ₃	2.4	2.9	6.7	0.08	0.10	0.22
Ca	12.5	13.5	24.0	0.62	0.67	1.20
Mg	8.6	10.5	26.0	0.71	0.86	2.14
Na	24.8	31.4	89.9	1.08	1.36	3.91
K	5.1	6.1	12.8	0.13	0.16	0.33
Salinité.	175	213	506	5.1	6.2	15.1

Tableau III : Composition moyenne régionale des eaux du Guiers (mg/l et meq/l) pour une hauteur d'eau de 1.m IGN.

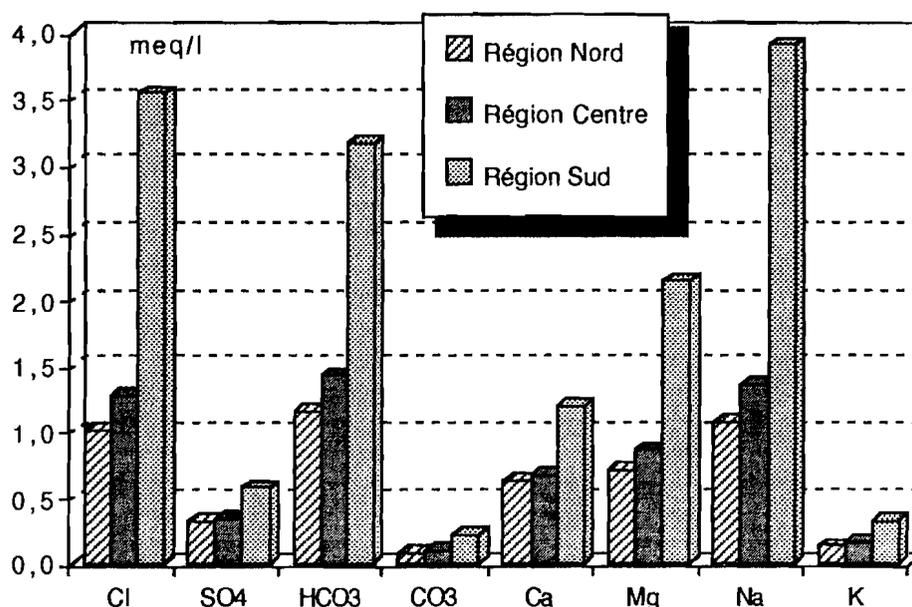


Fig. 21 : Composition moyenne (meq/l) des régions Nord, Centre et Sud du Guiers à la cote de 1 m IGN.

La sulfato-réduction dans le sédiment, les néoformations argileuses, les précipitations de la calcite et incorporations dans les coquilles de mollusques ou dans la végétation sont autant de phénomènes biogéochimiques consommant ou libérant les éléments dans le milieu (GAC et al., 1985; COGELS et GAC, 1987).

Ceci explique que la relation entre le volume du lac et la concentration des divers éléments dissous soit souvent moins étroite que dans le cas des chlorures et du sodium.

Le gradient Nord-Sud de concentration des solutions est également nettement moins élevé que celui observé dans le cas des 2 éléments conservatifs.

Annexe : L' équilibre Carbonates - Bicarbonates

Compte tenu de l'influence du pH sur l'équilibre HCO_3^- - CO_3^{2-} et de la faible corrélation directe entre pH et hauteur des eaux, il est aléatoire de préciser la part respective des 2 éléments pour une cote déterminée. Néanmoins, sur la base de l'ensemble des mesures effectuées, on obtient des corrélations assez valables entre les teneurs en HCO_3^- et CO_3^{2-} et la hauteur des eaux bien que les 2 facteurs ne soient pas liés directement.

Exprimée en poids (mg/l) la proportion des carbonates est de 3.5 % et est assez semblable dans les 3 régions. Exprimée en meq/l, la proportion des carbonates est cette fois de 6.5%.

2 - Comparaison entre les périodes 1989-92 et 1979-1982

Une étude de la qualité des eaux du Guiers a été réalisée entre 1979 et 1982 (COGELS, 1984; COGELS et GAC, 1984 et 1987) aux mêmes stations que celles retenues pour les séries d'échantillonnages 1989 -1992. 28 séries de mesures ont été effectuées à cette époque d'avant la mise en fonction du barrage de Diama.

La méthodologie des 2 études étant identique, les résultats enregistrés aux 2 périodes peuvent être comparés sur 2 bases différentes :

- Soit elle se base sur une même hauteur d'eau dans le lac aux 2 périodes. Dans ce cas, les régressions [Volume du lac (ou hauteur d'eau)/ concentration des divers éléments dissous] sont tout d'abord calculées. Les concentrations respectives dans le lac aux 2 périodes sont ensuite tirées de ces régressions puis comparées.

- Soit elle est établie non plus pour une hauteur d'eau identique aux 2 périodes mais sur la base de la hauteur d'eau moyenne réelle de chacune d'entre elles (soit 0.38 m et 0.93 m IGN respectivement).

Cette seconde approche est donc plus représentative de la situation exacte qui prévalait à chaque époque et permet de mieux comprendre leurs conséquences sur l'environnement.

a) Pour une hauteur d'eau identique aux 2 périodes soit 1 m (fig. 22) :

- La concentration de tous les éléments dissous a augmenté dans les régions Nord et Centre; l'inverse est constaté en région Sud où les diminutions sont générales et de l'ordre de 20 à 25 % pour les chlorures et le sodium.

- la salinité moyenne du lac ne s'est pas modifiée, soit 229 mg/l en période 1 et 232 mg/l en période 2. Les différences sont cependant sensibles de région à région avec une augmentation des teneurs moyennes en régions Nord et Centre de 25 et 19 % et inversement une diminution bien marquée en région méridionale (-25 %).

Le stock de sels dissous dans le lac n'a donc pas régressé depuis la mise en fonction du barrage de Diama.

Les augmentations de la salinité en régions Nord et Centre et la diminution simultanée en région Sud ne s'expliquent que par l'importance quantitative et la charge minérale des rejets de la CSS à l'extrémité Nord du Guiers d'une part et par l'impact des chasses d'eau vers la vallée du

Ferlo, effectuées depuis 1989 d'autre part. Ces dernières compenseraient donc en quelque sorte les apports minéraux des eaux de drainage.

L'application d'un premier modèle de gestion globale des eaux permettra de mieux comprendre et de justifier cette évolution. (cf. III. F).

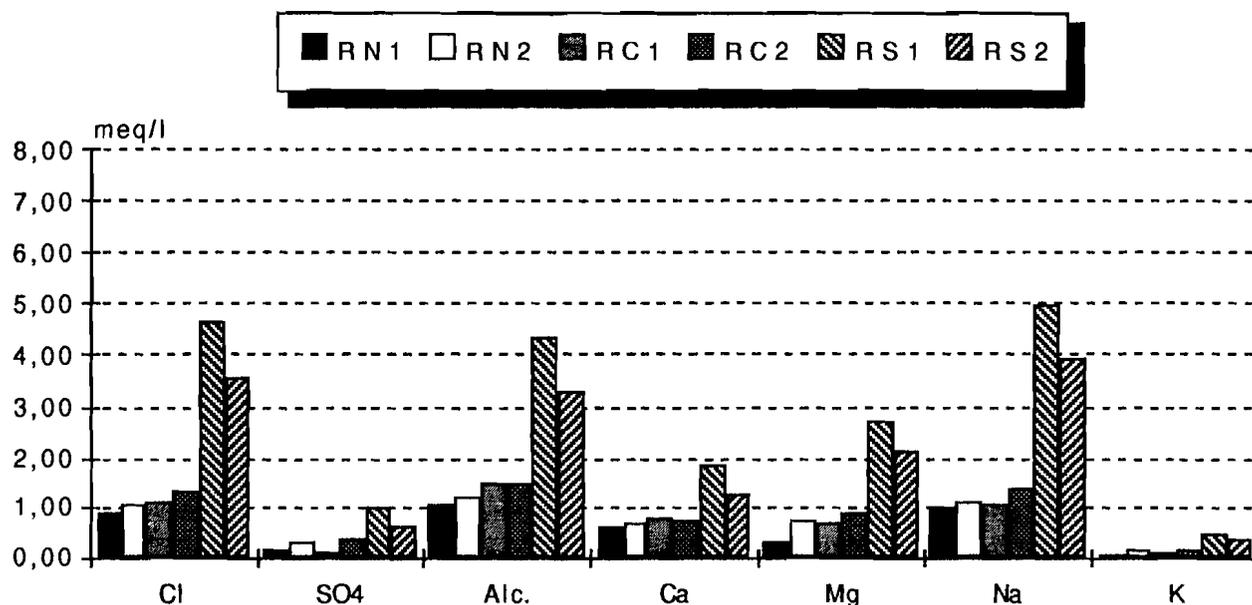


Fig. 22 : Qualité chimique (meq/l) des eaux des régions Nord (RN), Centre (RC) et Sud (RS) en 1979-82 (1) et 1989-92 (2), et pour un niveau d'eau dans le lac d'1 m IGN.

b) Pour une hauteur d'eau correspondant à la moyenne respective réelle des 2 périodes (fig. 23) :

Par rapport à la période 1979-82, la diminution des concentrations moyennes lacustres des différents éléments est quasi générale durant la période post-Diama.

La salinité moyenne du lac a régressé de 20 %, passant de 307 à 245 mg/l, celle des régions Nord, Centre et Sud de 7, 13 et 48 %.

Seule la teneur en magnésium en région Nord augmente très nettement depuis 1985. L'augmentation des sulfates et du potassium est aussi constatée en régions Nord et Centre durant cette période.

Si le stock des éléments dissous dans le lac a peu changé depuis la mise en fonction de Diama, les conditions de milieu se sont par contre fortement modifiées. Elles se caractérisent par une diminution nette de la salinité des eaux du Guiers. Ce changement est dû à priori et uniquement à une meilleure dilution des eaux du lac favorisée par des remplissages du réservoir nettement plus importants depuis 1985.

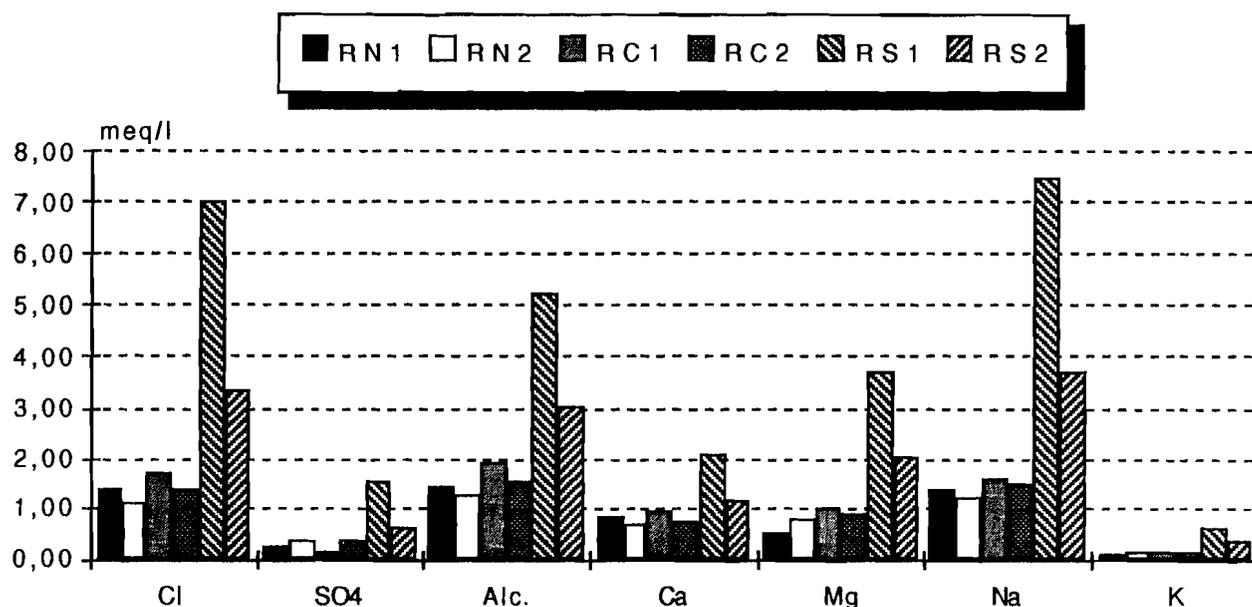


Fig. 23 : Qualité chimique (meq/l) des eaux des régions Nord (RN), Centre (RC) et Sud (RS) en 1979-82 (1) et 1989-92 (2), et pour le niveau d'eau du lac moyen de chacune des 2 périodes soit 0.38 et 0.93 m IGN.

E - TEST D'UNE STATION DE REFERENCE POUR LE SUIVI QUALITATIF DES EAUX

Le suivi qualitatif régulier des eaux du lac de Guiers s'avère un tâche longue et onéreuse tant en coûts d'analyses qu'en frais de déplacements en voiture et en bateau. Les études physico-chimiques réalisées jusqu'à présent se sont basées sur le suivi de 13 stations réparties sur le plan d'eau; elles permettent d'évaluer, entre autres, la qualité physico-chimique moyenne de ses eaux.

L'un des buts du programme EQUASEN est la recherche d'une station unique de référence qui doit permettre à l'avenir d'assurer un suivi qualitatif régulier des eaux sur la base d'un seul point d'échantillonnage et non plus de 13 comme actuellement.

Le test de la station de N'Gnith (station 12) comme station de référence a été retenu. En effet l'usine des eaux de la SONEES y dispose d'un laboratoire d'analyses qui effectue quotidiennement les mesures en rapport avec la production d'eau potable. Cette station serait donc une station idéale de référence, de par sa situation centrale et son équipement analytique de base déjà en place. Il reste donc à en tester la valeur en comparant les données qui y sont mesurées avec celles, simultanées, de la qualité moyenne du lac pour les différents éléments dissous.

La qualité moyenne du lac est calculée comme précédemment (cf. III A 3) d'après celle mesurée aux 13 stations de base réparties dans les 3 régions du plan d'eau.

Les tests de corrélation seront effectués sur l'ensemble des 2 périodes 1979-1982 et 1989-1992, soit au total 51 séries d'échantillonnages à différentes époques de l'année.

Les chlorures serviront ici aussi de paramètre de base. Les corrélations entre les concentrations mesurées à la station 12 et la qualité moyenne du lac seront détaillées pour ce

paramètre; par contre, seules les formules de corrélation seront présentées pour les autres paramètres.

Pour plus de détails, le lecteur se référera à l'étude complète réalisée et présentée par COGELS et al. (1993 c).

1 - Corrélation entre la chlorinité moyenne du lac et celle de la station de N'Gnith

La fig. 24 indique la corrélation générale qui unit les concentrations moyennes du lac et celles mesurées simultanément à la station 12. La corrélation la meilleure est obtenue par une courbe de type "Puissance" dont le coefficient $r = 0.90$.

Les points correspondants aux périodes de remplissage du lac sont précisés sur le graphique et se situent dans leur grande majorité sous la courbe de corrélation.

Cette distinction nette entre les corrélations des 2 périodes spécifiques de l'année hydrologique est normale car le déplacement important des masses d'eau en phase de remplissage rend impossible la stabilisation du gradient de chlorinité Nord-Sud tel qu'on l'observe en phase d'isolement. D'autre part, le délai de dilution des apports fluviaux dans le lac lors de son remplissage est relativement important; les effets sont assez rapides (quelques jours) dans la région Nord du Guiers mais par contre très retardés (10 à 20 jours) dans les régions Centre et Sud. Les corrélations qualitatives entre station 12 et moyenne du lac sont par conséquent faussées en période de remplissage.

La fig. 24 confirme cette première observation en indiquant séparément la corrélation des 12 points correspondants aux mesures effectuées en phases de remplissage du lac et des 39 points des phases d'isolement.

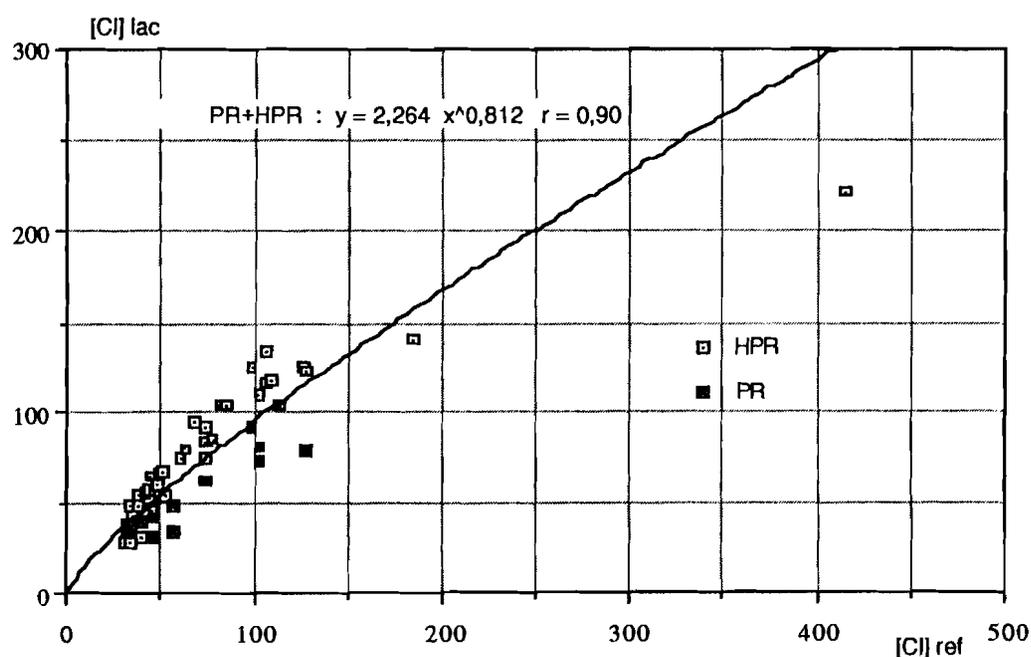


Fig. 24 : Relation entre les concentrations en chlorures moyennes du lac (mg/l) et celles mesurées simultanément à la station 12 (ref.) pour l'ensemble des 2 périodes d'échantillonnages. PR : Période de remplissage du lac ; HPR : Hors période de remplissage (Isolement).

- En phase de remplissage (fig. 25) la meilleure corrélation obtenue est linéaire avec un coefficient r de 0.91 mais qui est cependant à considérer avec des réserves. En effet, la période qui sépare la date d'ouverture des vannes du canal de la Taoué à Richard-Toll de celle de la mesure de qualité d'eau "in situ" influence sans doute beaucoup la qualité de la corrélation observée.

En début de phase de remplissage, cette corrélation est mauvaise à cause d'un gradient de salinité dans le lac trop perturbé, avec l'apport des eaux fluviales très douces dans la zone Nord tandis que les zones méridionales du Guiers ne sont pas encore atteintes par le flot. Par contre, en fin de phase de remplissage, la dilution des eaux lacustres par les eaux fluviales est quasi générale, un nouveau gradient de salinité s'est installé et stabilisé dans le plan d'eau, et la corrélation s'améliore.

Il reste cependant que toute extrapolation des mesures effectuées à la station 12 à l'ensemble du lac par la formule proposée semble assez hasardeuse durant la période de remplissage du Guiers.

- En phase d'isolement la meilleure corrélation est de type "Puissance" avec un coefficient r de 0.94. Un point se détache nettement dans le graphique. Il correspond à la série de mesures de juillet 1980 où la cote du lac avait atteint un record à la baisse soit -0.90 m. Or, à partir de la cote -0.50 m, des seuils apparaissent dans le sud du lac qui morcellent et isolent la région méridionale du reste du plan d'eau. Les grandes mares ainsi formées dans la région Sud évoluent indépendamment en bassin évaporant fermé et les corrélations avec les mesures enregistrées à la station 12 au même moment deviennent évidemment impossibles, les processus de minéralisation des eaux étant alors complètement indépendants.

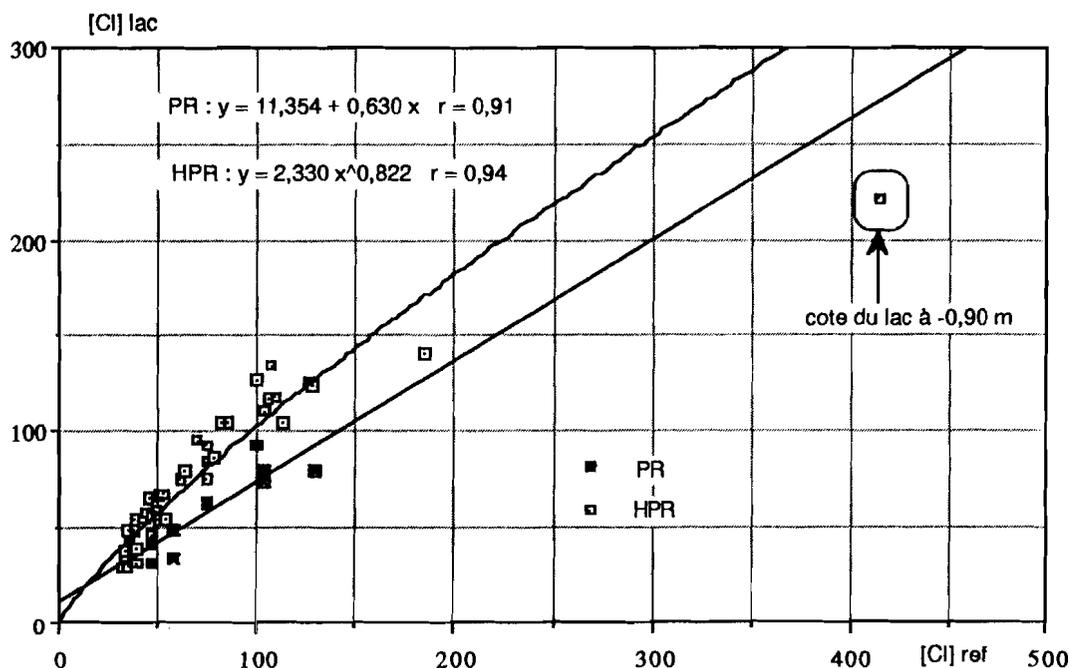


Fig. 25 : Relation entre les concentrations en chlorures moyennes du lac (mg/l) et mesurées simultanément à la station 12 (ref.) en phases de remplissage et d'isolement considérées séparément. PR : Période de remplissage du lac ; HPR : Hors période de remplissage (Isolement)

La fig. 26 prend ensuite en considération les seuls points correspondants aux phases d'isolement du lac et à des conditions limnimétriques supérieures au niveau de -0.50 m IGN.

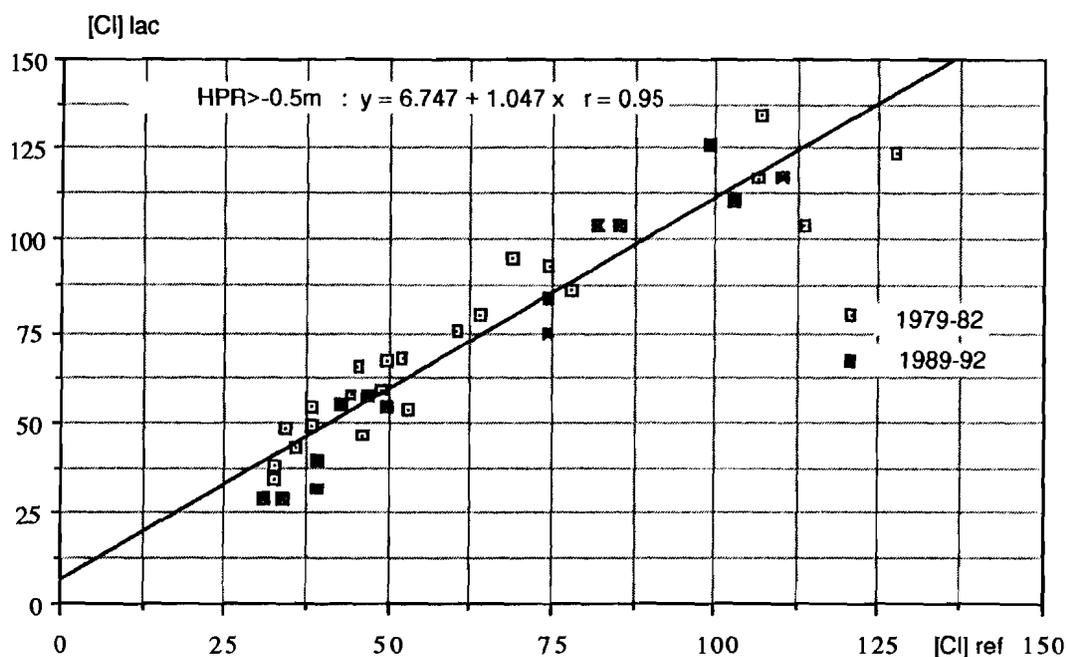


Fig. 26 : Relation entre les concentrations en chlorures moyennes du lac et celles mesurées simultanément à la station de N'Gnith (mg/l) en phase d'isolement et pour des hauteurs d'eau supérieures à -0.50 m IGN.

La meilleure corrélation obtenue est cette fois linéaire avec un coefficient r de 0.95. Les points correspondants à la période d'analyses 1989-1992 ne sont pas nettement différenciables de ceux de la période 1979-1982.

La relation générale s'écrit :

$$\text{Chlorinité moyenne des eaux du lac} = (\text{Chlorinité mesurée à N'Gnith} \times 1.047) + 6.747$$

Dans le cas des chlorures, la station de N'Gnith peut donc servir de station de référence pour le suivi qualitatif du lac du moins sous les conditions énoncées à savoir en dehors des périodes de remplissage et pour des niveaux supérieurs à -0.50 m.

Remarque : A l'avenir et compte tenu des conditions hydrologiques futures liées à l'exploitation des ouvrages de Diama et de Manantali, il est exclu que le niveau du lac soit encore inférieur à cette cote limite de -0.50 m.

2 - Autres paramètres

Le tableau IV récapitule les équations de l'ensemble des relations entre les teneurs moyennes des éléments dissous dans le lac et les mesures effectuées à la station 12. Ces relations ont été calculées pour l'ensemble des deux périodes d'échantillonnages de 1979-82 et de 1989-92.

Chlorures	$[Cl]_{lac} = 1.047 [Cl]_{ref.} + 6.747$	$r = 0.95$
Alcalinité	$Alc.lac = 0.995 Alc.ref. - 0.599$	$r = 0.92$
Calcium	$[Ca]_{lac} = 0.957 [Ca]_{ref.} + 1.305$	$r = 0.92$
Magnesium	$[Mg]_{lac} = 1.025 [Mg]_{ref.} + 0.967$	$r = 0.96$
Sodium	$[Na]_{lac} = 1.115 [Na]_{ref.} + 2.302$	$r = 0.96$
Potassium	$[K]_{lac} = 0.96 [K]_{ref.} + 0.628$	$r = 0.96$
Minéralisation globale	$Min.gl. = 1.128 [Min.gl.]_{ref.} - 8.259$	$r = 0.96$

Tableau IV : Formules de corrélations proposées entre les concentrations moyennes dans le lac des divers éléments dissous et celles mesurées à la station (mg/l).

Seules les corrélations des teneurs en sulfates entre lac et station 12 n'ont pas été retenues. Les processus géochimiques de sulfato-réduction et de relargage de l'élément, très localisés, rendent les corrélations aléatoires et la station de référence peu fiable.

Rappelons que ces corrélations ne sont valables qu'en dehors des périodes de remplissage du lac et pour des hauteurs d'eau supérieures à -0.50 m.

Commentaires généraux :

L'excellente qualité des diverses corrélations testées (sulfates exceptés) entre la concentration d'un élément déterminé à la station 12 et la concentration moyenne lacustre de ce même élément semble ainsi confirmer la valeur de cet emplacement comme station physico-chimique de référence et de suivi qualitatif.

L'intérêt du recours à une seule station de base pour un suivi qualitatif régulier du Guiers est bien sûr appréciable puisqu'il réduit la logistique et le temps de travail nécessaires.

Les corrélations proposées ne sont cependant valables qu'en période de faible déplacement des masses d'eau dans le Guiers, c'est-à-dire en dehors des phases d'apports fluviaux. La seconde condition est limnimétrique, puisqu'elle interdit une cote du lac inférieure -0.50 m.

Ajoutons cependant que les équations demeureront fiables dans la mesure où le fonctionnement hydrologique du Guiers reste à l'avenir semblable à ce qu'il est aujourd'hui. Or, les projets d'aménagements hydroagricoles autour du lac et dans le Ferlo et surtout la mise en service possible du canal de Cayor, pourraient modifier profondément le système en imposant un déplacement des masses d'eau du Nord vers le Sud beaucoup plus important et plus rapide à travers le lac, avec des directions préférentielles nouvelles. Il conviendrait alors de revoir les abaques et les corrélations proposées ici.

F - DEVELOPPEMENT D'UN PREMIER MODELE DE GESTION GLOBALE DES EAUX

1 - Présentation succincte du modèle

Le but du modèle de gestion globale des eaux est de simuler les effets qualitatifs liés aux modifications de régime hydrologique du réservoir et aux impacts des apports chimiques extérieurs.

La concentration moyenne dans le lac de l'élément X au temps t est égale au stock de l'élément présent à ce moment divisé par le volume de la réserve.

Le bilan qualitatif entre le temps t et t+1 est la résultante des entrées-sorties des divers éléments durant cette période (fig. 6). Ceci est valable dans le cas d'un plan d'eau qualitativement homogène ce qui n'est pas le cas du Guiers. Il faudra par conséquent introduire dans les calculs les variations temporelles et spatiales des concentrations des divers éléments dissous.

Le tableau V indique les différents paramètres hydrologiques et qualitatifs pris en compte par le modèle et localisés à la fig. 6.

APPORTS				
	Fleuve	Rejets CSS	Pluies	
Param. Hydrologiques	V1	V2	V3	
source	Modèle LGPLG	données CSS	Modèle LGPLG	
Paramètres qualitatifs	q1	q2	q3	
source	mesures terrain	mesures terrain	mesures terrain	
PERTES				
	Lâchers Ferlo	Pomp. SONEES	Irrigation	Evaporation
Param. Hydrologiques	V4	V5	V6	V7
source	Modèle LGPLG	mesures terrain	mesures terrain	Bil. hydrol.76-92
Paramètres qualitatifs	q4	q5	q6	
source	SM1	SM2	= qual. moy. lac	

Tableau V : Synthèse et définition des termes du bilan hydrologique utilisés dans le modèle qualitatif et leurs modes de calculs respectifs.

Le modèle qualitatif établit donc le bilan quotidien entrées - sorties des divers éléments dans le lac durant l'intervalle de temps Δt soit :

$$q_L(t1) = M(t1) / V_L(t1) = (M(t) + \Delta M) / (V_L(t) + \Delta V)$$

$$= [M(t) + (V1_{(\Delta t)} \cdot q1) + (V2_{(\Delta t)} \cdot q2) + (V3_{(\Delta t)} \cdot q3) - (V4_{(\Delta t)} \cdot q4) - (V5_{(\Delta t)} \cdot q5) - (V6_{(\Delta t)} \cdot q6)] / [V_L(t) + (V1 + V2 + V3 - V4 - V5 - V6 - V7)_{(\Delta t)}]$$

q : concentration de l'élément dissous dans le lac (q_L) ou dans les apports et pertes (q1 à q6)

M : stock de l'élément dans le lac

V : Volume du lac (V_L) ou des apports et pertes (V1 à V7)

- Les termes hydrologiques V1 et V3 peuvent être calculés au moyen du modèle de gestion quantitative des eaux du Guiers LGPLG déjà fonctionnel (EVORA et al. 1991; COGELS et al., 1992 a)
- Les termes V2, V5 et V6 sont quantifiés d'après les données de terrain.
- Le terme V4 peut être calculé au moyen du modèle LGPLG . En cas d'ouverture simultanée de la jonction fleuve - lac il est alors estimé.
- Enfin le terme V7 est calculé quotidiennement par multiplication de la hauteur d'eau moyenne quotidienne évaporée du jour n par la surface moyenne du lac ce même jour (COGELS et al., 1991).

A noter que les échanges éventuels entre le lac et les nappes phréatiques superficielles ne sont pas pris en compte car jamais encore quantifiés. Ils semblent très réduits (COGELS, 1984) et ne doivent pas influencer nettement la qualité des eaux du Guiers.

Sans entrer ici dans les détails, les données qualitatives quotidiennes correspondant aux divers éléments du bilan hydrologique sont basées sur :

- Les mesures de terrain pour les termes q1, q2 et q3.
- Un sous-modèle SM1 pour le terme q4, basé sur les formules de corrélation entre la qualité moyenne du lac et celle enregistrée à son extrémité Sud.
- Un sous-modèle SM2 qui calcule l'évolution de la qualité des eaux à la station de pompage de la SONEES (q5) , au départ de la qualité moyenne du lac (COGELS et al., 1992 b).
- La qualité des eaux destinées à l'irrigation (q6) est considérée comme identique à la qualité moyenne du lac. Elle est calculée quotidiennement d'après le bilan qualitatif général du réservoir.

2 - Test de fiabilité du modèle

Le modèle a été testé sur la période 1989 - 1992 correspondant donc à celle des analyses qualitatives générales du lac (cf. III. D). L'évolution des chlorures a été choisie comme base pour le test du modèle vu le caractère conservatif de l'élément.

La fig. 27 ci après indique :

- L'évolution théorique de la chlorinité moyenne dans le lac calculée par le modèle de janvier 1989 à décembre 1992.
- Les chlorinités moyennes du lac à chacune des 23 séries d'échantillonnages et calculées selon la méthode proposée précédemment.(cf III. A. 3).
- Les mesures de la chlorinité moyenne du Guiers calculées sur la base des mesures effectuées plusieurs fois par semaine au laboratoire de la SONEES à N'Gnith (Les corrélations entre la qualité des eaux à la station 12 et la qualité moyenne du lac ont été établies précédemment - cf. III. E).

Selon les résultats obtenus, le modèle est fiable même si des améliorations ultérieures sont à prévoir.

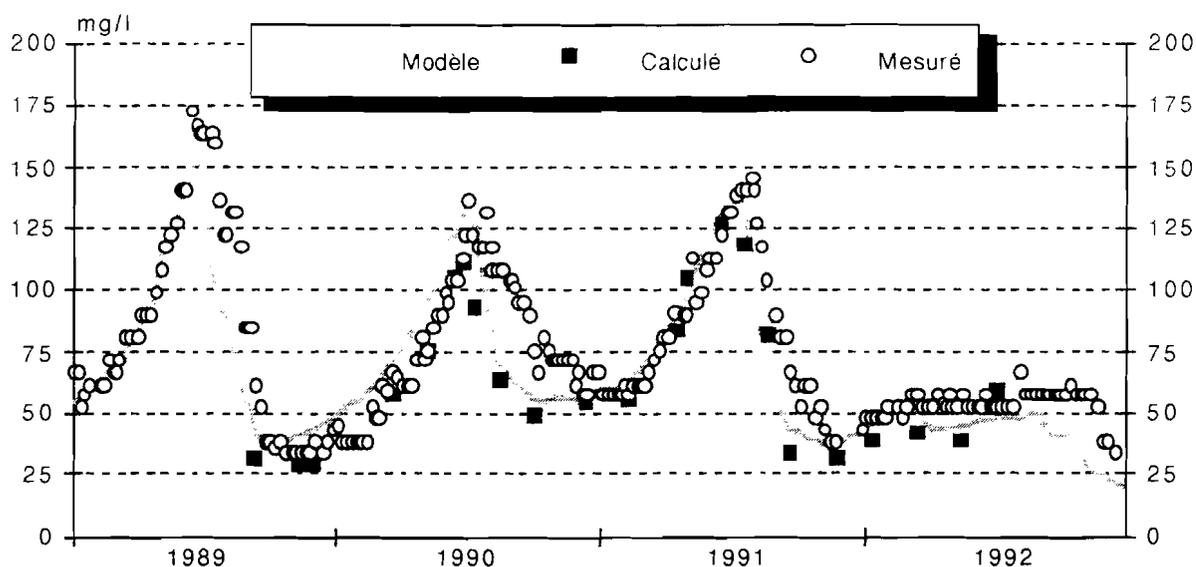


Fig. 27 : Evolution de la chlorinité moyenne du lac (mg/l) entre 1989 et 1992 - a) simulée par le modèle. b) calculée par la méthode des bilans par zone aux 23 séries d'échantillonnages. c) mesurée sur la base des corrélations avec la station 12.

Le modèle permet donc une bonne simulation de l'évolution de la chlorinité moyenne du Guiers et pourra être utilisé pour :

- expliquer l'évolution récente de la qualité des eaux
- déterminer l'impact des interventions extérieures comme les rejets de la CSS ou l'effet des chasses d'eau vers la vallée du Ferlo
- prévoir l'évolution future de la qualité dans la perspective de la mise en fonction du canal de Cayor à l'horizon 2000.

3 - Applications du modèle

a) Evolution récente de la salinité des eaux

Sur la base des comparaisons de salinité dans le lac entre les périodes 1979-1982 et 1989-1992, il avait été conclu (cf. III. D. 2) que l'actuelle diminution de la salinité moyenne constatée au Guiers était due à la dilution plus importante de ses eaux, favorisée par de meilleurs remplissages de la réserve et non à une réduction du stock des éléments dissous.

Le modèle permet de vérifier cette hypothèse, en y introduisant toutes les données quantitatives et qualitatives requises telles qu'indiquées au tableau V. L'évolution théorique du stock de chlorures dans le lac entre 1989 et 1992 sera simulée puis comparée avec celle de la période 1979-1982 pour laquelle on dispose également des données nécessaires. La fig. 28 compare ces 2 évolutions théoriques.

On remarque tout d'abord que le stock lacustre des chlorures de la période 1989-1992 reste pratiquement toujours supérieur à celui de la période 1979-1982. Ceci confirme donc les hypothèses de stabilisation du stock moyen annuel des éléments dissous dans le réservoir.

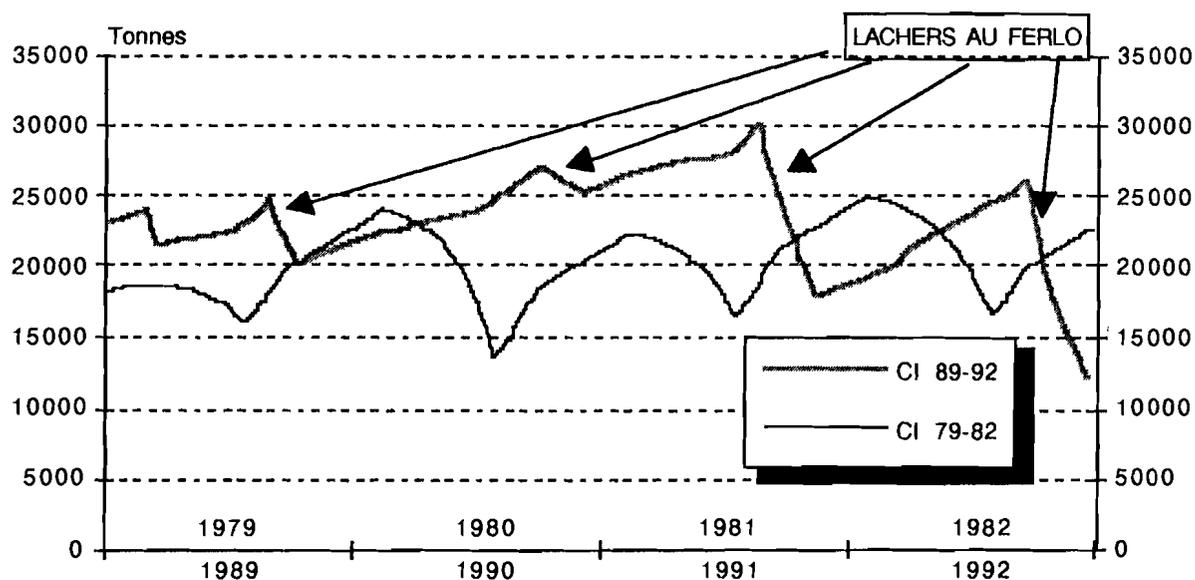


Fig. 28 : Evolution (simulée) du stock de chlorures dissous dans le lac durant les périodes 1979-1982 et 1989-1992 (tonnes).

A la fin des années (civiles) 1989, 1991 et surtout 1992, on observe chaque fois une baisse très nette du stock des chlorures. Ces périodes correspondent à celles des lâchers vers le Ferlo avec évacuation des eaux méridionales les plus minéralisées.

On remarque aussi que les faibles lâchers de 1990 n'ont pas été suffisants pour réguler le stock des chlorures et n'ont pas compensé les apports des rejets de la CSS durant cette année.

Le stock des éléments dissous dans le lac n'a pas diminué depuis la mise en fonction du barrage de Diama et les lâchers vers le Ferlo jouent un rôle qualitatif régulateur fondamental. C'est donc uniquement la meilleure dilution des eaux du Gulers favorisée par les bons remplissages de ces dernières années qui a permis la baisse du taux de salinité.

b) Effets qualitatifs des lâchers vers le Ferlo et des rejets de la CSS sur le lac

Les conclusions du paragraphe précédent soulignent le rôle qualitatif à essentiel joué par les lâchers vers le Ferlo qui ne sont effectifs que depuis 1988. Cet effet qualitatif des lâchers est particulièrement sensible en 1992, les vannes de la digue Sud du lac ayant été ouvertes dès la mi-septembre jusqu'à fin décembre.

Il est donc intéressant de simuler maintenant plusieurs options de gestion du réservoir avec ou sans les rejets CSS et les lâchers annuels vers le Ferlo afin d'en préciser les effets respectifs sur le réservoir.

4 options de gestion des lâchers et des rejets CSS ont été envisagées. Elles se basent toutes sur la période 1989-92 et concernent la chlorinité moyenne des eaux. Les conclusions seront facilement extrapolables d'ailleurs à la salinité globale du lac.

Les résultats des simulations des 4 options de gestion envisagées ici sont présentés à la fig. 29.

Ces 4 options sont définies comme suit :

- *option A* : situation réelle 1989-1992 avec rejets CSS (V2) et lâchers au Ferlo (V4).
- *option B* : simulation sans lâchers au Ferlo mais avec rejets CSS
- *option C* : simulation sans lâchers ni rejets
- *option D* : simulation avec lâchers au Ferlo mais sans rejets CSS.

En situation réelle, (*option A*), le stock des chlorures dans le lac a diminué de près de 50 % entre le 1/1/1989 et le 31/12/1992. L'effet sur le stock des lâchers annuels vers la vallée du Ferlo est très net.

Interrompre les lâchers au Ferlo (*option B*) induit immédiatement une nette augmentation du stock des chlorures sous l'effet principal des rejets de la CSS. Dans ce cas et en 4 ans, la chlorinité moyenne aurait augmenté de 50 % et le stock de Cl aurait doublé.

Par rapport à l'*option A*, l'*option C* qui prévoit l'interruption simultanée des rejets CSS et des lâchers induit une diminution plus faible du stock de chlorures, de l'ordre de 8 % en 4 ans. Seuls les divers pompages autour du lac en sont la cause. Les apports fluviaux très peu minéralisés ne compensent donc pas complètement les pertes du stock et induisent ainsi la baisse lente et progressive de salinité.

L'*option D* est la plus favorable à une baisse rapide de la chlorinité puisqu'elle conjugue les effets des lâchers au Ferlo avec la suppression des rejets de la CSS. Dans ce cas on observe en 4 ans une diminution d'environ 70 % du stock de chlorures dans le Guiers.

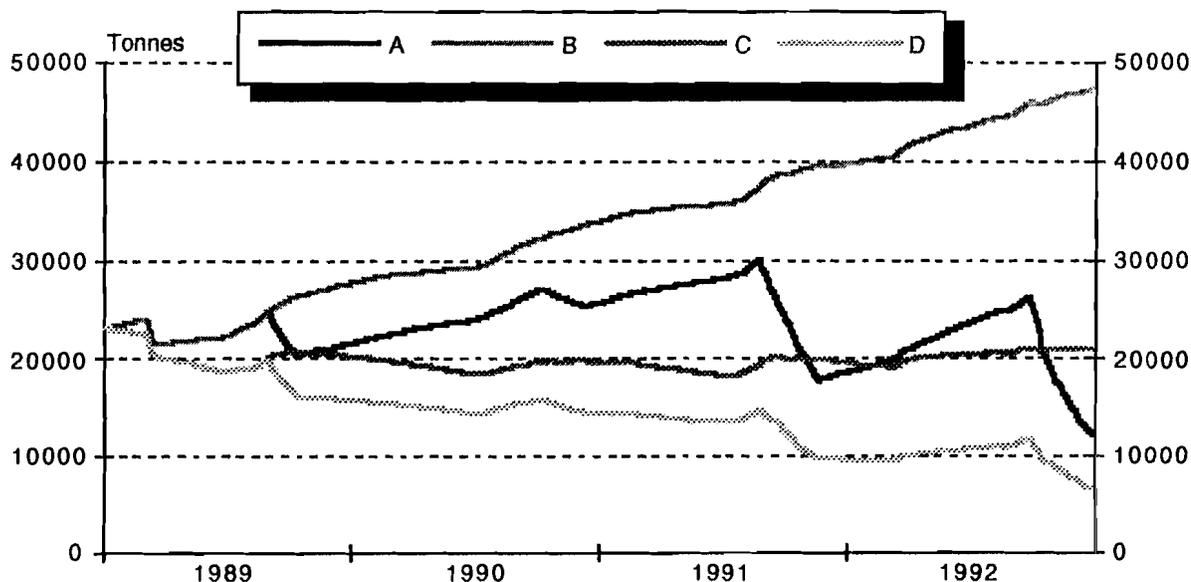


Fig. 29 : Evolution simulée du stock des chlorures dissous dans le lac (tonnes) selon 4 options de gestion.

Rejets CSS et lâchers au Ferlo sont donc les éléments fondamentaux du système et de l'évolution qualitative des eaux du Guiers.

Remarques :

Un rapide calcul montre que l'apport annuel en chlorures par la CSS est d'environ 8500 tonnes par an. Or, pour un niveau des eaux moyen de 1 m IGN, la chlorinité du lac est de 50 mg/l soit un stock de l'élément de quelques 20000 tonnes dans le réservoir. L'apport annuel des rejets de la CSS représente ainsi plus de 40 % du stock lacustre. On imagine donc aisément l'évolution de la chlorinité des eaux si les lâchers au Ferlo étaient interrompus. L'année 1990 en est un bel exemple puisque, par suite de lâchers réduits, l'augmentation du stock de chlorures dans le lac est immédiate.

IV - MODIFICATIONS HYDROBIOLOGIQUES RECENTES

Les effets directs et indirects des aménagements fluviaux sur l'hydrobiologie du Guiers ne font pas partie du programme de recherches EQUÉSEN prévu au début. Cependant, la constatation "in situ" de modifications bien visibles dans la composition de la végétation aquatique, et l'apparition épisodique de "fleurs d'eau" jamais encore recensées au Guiers ont été à l'origine d'une étude complémentaire dont la synthèse est présentée ci-après. Les principaux résultats ont été publiés par ailleurs (COGELS et al., 1993 b).

L'étude succincte décrit les changements les plus visibles intervenus ou en cours dans les principaux peuplements de 4 espèces de macrophytes aquatiques 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 modifications des peuplements végétaux est présenté.

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

Les descriptions anciennes de la végétation du Guiers présentées par LEUDELLOT et LELIEVRE (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*, *Vetiveria* 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 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. A l'époque, un régime fluvial à débits élevés (FAURE et al., 1981; GAC et al., 1986) et bien étalés dans l'année, permettaient des conditions limnimétriques dans le Guiers favorables et stables, et évitaient 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 Diama en 1985.

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, 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 colonisations potentielles 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 GROSMAIRE (1957) et TROCHAIN (1956).

b) *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 salinité 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.

c) *Potamogeton schweinfurthii* 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.

A l'extrémité Nord du lac, *Potamogeton schweinfurthii* a supplanté *Nymphoides ezanoi* 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'arrachement du fond puis la dérive des radeaux flottants vers la zone méridionale du plan d'eau où l'espèce est présente aujourd'hui.

d) *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; LEVEQUE, 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 (ILTIS, 1980). Ces deux espèces furent identifiées au Guiers en 1980 par DIA et REYNAUD (1982) et en 1984 par COMPERE (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 2 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 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'aménagement. Une étude des nutriments dans le Guiers et du développement phytoplanctonique est entreprise depuis 1993.

V - GESTION FUTURE DES EAUX - CRITERES ET PERSPECTIVES QUALITATIVES

"La gestion du cycle hydrologique consiste à organiser sur un mode dynamique, grâce à des instruments réglementaires, financiers, technologiques etc..., l'interface entre le milieu hydrique et le milieu social de telle sorte que celle-ci soit optimale, ou plus modestement satisfaisante, selon les exigences socialement exprimées à son endroit. Ces exigences, telles que l'efficacité économique ou la conservation des milieux, sont très diverses et souvent contradictoires" (P. HUBERT, EAUPUSCULE, 1984).

Le fonctionnement des barrages de Diama et de Manantali assure aujourd'hui au lac de Guiers un approvisionnement d'eau quantitativement satisfaisant et potentiellement réalisable toute l'année. Dans les années futures, les cultures irriguées dans la vallée auront des besoins croissants au fur et à mesure de leur développement.

D'autre part, les besoins énergétiques des pays riverains du fleuve et les échéances du remboursement des prêts accordés pour les aménagements inciteront peut-être les gestionnaires à privilégier l'utilisation hydroélectrique du barrage de Manantali. Chacun sait que la combinaison "agriculture-hydroélectricité" n'est pas toujours sans problèmes.

A moyen terme donc, la répartition des eaux entre les divers utilisateurs sera une nécessité et l'approvisionnement du lac de Guiers ne sera peut-être possible qu'une partie de l'année seulement.

Il faudra donc combiner parcimonie et gestion optimale des ressources disponibles. C'est sur cette base que les critères de gestion présentés ci-après ont été établis.

La mise en fonction du canal de Cayor est prévue aux environs de l'an 2000. Le point de départ de ce canal de 250 km se situant à l'extrémité Sud du lac, le Guiers servira donc de lieu de transit aux eaux fluviales qui approvisionneront l'ouvrage. Les besoins en eau du canal totaliseront annuellement près de l'équivalent du volume du lac lui même.

La gestion de la jonction fleuve-lac et le jeu de l'ouverture-fermeture des 2 barrages de la Taoué seront donc déterminants sur la gestion quantitative du réservoir bien sûr, mais auront aussi de profondes répercussions sur l'évolution qualitative de ses eaux.

A - CRITERES DE GESTION QUANTITATIVE DES EAUX ET IMPLICATIONS

La gestion quantitative future du Guiers se résume à 2 grandes options :

- *Laisser la jonction fleuve - lac ouverte en continu*, le Guiers n'étant alors qu'une zone de transit des eaux fluviales dirigées vers le canal de Cayor. Dans ce cas, les hauteurs d'eau dans le lac seront identiques à celles du fleuve et de la réserve de Diama et donc assez stables la majeure partie de l'année.

Cette solution de facilité risque d'avoir des conséquences négatives sur l'environnement lacustre dont la prolifération récente de la végétation est un premier exemple (COGELS et al. 1993). D'autre part, ce mode de gestion à niveau stable interdit évidemment la valorisation agricole des terres de décrue autour du lac. Enfin, il risque d'engendrer d'inutiles pertes par évaporation à cause d'une hauteur d'eau dans le lac supérieure aux nécessités.

- *Gérer le réservoir de manière indépendante du fleuve*, soit en assurant en cours d'année quelques remplissages ponctuels qui permettent de respecter une évolution du niveau des eaux imposée par le gestionnaire du réservoir (et non plus par les conditions de hauteur d'eau dans le fleuve), soit en quantifiant et en régulant avec précision les apports fluviaux nécessaires s'ils doivent s'effectuer en continu.

Les variations de niveau engendrées par le second type de gestion permettraient un meilleur contrôle de la végétation aquatique du Guiers, favoriseraient la mise en valeur des terres potentielles de décrue et limiteraient les pertes par évaporation. Enfin, les phases de remplissage pourraient être "calées" en fonction des périodes de plus grande disponibilité d'eau fluviale, elle-même destinée prioritairement aux cultures irriguées dans la vallée.

Assurer annuellement un battement de la nappe d'eau par un apport épisodique d'eau fluviale et un contrôle rigoureux des débits dans la Taoué semble être la meilleure solution limnimétrique pour le Guiers. Le modèle de gestion LGPLG déjà présenté permet ce type de gestion. L'équipement limnimétrique du canal de la Taoué devrait cependant être modernisé pour assurer la gestion optimale du plan d'eau.

B - CRITERES DE GESTION QUALITATIVE

1 - Facteurs déterminants de l'évolution qualitative future du Guiers

La qualité des eaux du Guiers sera nettement influencée par la mise en fonction du canal de Cayor dont les besoins annuels seront très importants et proches du volume maximum actuel du réservoir. Les apports massifs d'eau fluviale très douce modifieront ainsi radicalement la salinité du Guiers.

Ces modifications peuvent être prévues par le modèle qualitatif mis au point mais certaines formules de corrélations qui le composent devront être adaptées au nouveau système du fait d'un déplacement plus important des masses d'eau dans le réservoir, accompagné de changements plus ou moins sensibles du sens de leur circulation.

Plusieurs facteurs influenceront l'évolution qualitative du lac :

- L'importance volumétrique des apports fluviaux et leur qualité

Ils seront dépendants des besoins du canal, de ceux des cultures irriguées autour du lac et de l'usine de production d'eau potable. A plein régime, les besoins du canal sont estimés à 20 m³/s environ, soit un total annuel de quelques 630 millions de m³ soit aussi l'équivalent du volume du lac à sa cote de remplissage de 1.90 m IGN, cote de remplissage maximale aujourd'hui compte tenu des hauteurs des endiguements périphériques.

En estimant à 35 10⁶ m³ les besoins annuels futurs des cultures irriguées autour du Guiers et à quelques 15 à 20 10⁶ m³ ceux de l'usine de production d'eau potable, la consommation totale annuelle d'eau dans la réserve approcherait des 700 10⁶ m³. Si l'on prend en compte les pertes par évaporation du plan d'eau (soit 550 10⁶ m³ annuellement pour un niveau stabilisé à la cote de 1 m IGN), on comprend alors mieux les effets qualitatifs sur le lac des quelques 1250 10⁶ m³ d'apports fluviaux nécessaires annuellement pour compenser les pertes diverses.

Ces estimations sommaires ne laissent cependant rien présager de l'avenir puisque les besoins du canal de Cayor dépendront aussi de la mise en place de cultures irriguées le long de son parcours, ce qui n'est pas acquis aujourd'hui.

- La gestion limnimétrique du lac .

Par son effet sur la dilution des eaux, le type de gestion limnimétrique peut déterminer sa qualité chimique. En y assurant une variation annuelle des hauteurs d'eau grâce au jeu des barrages de la Taoué, on peut aussi influencer son évolution qualitative annuelle. Ce phénomène est bien mis en évidence dans les simulations présentées ci-après.

Il est cependant évident que si, selon le schéma possible de consommation d'eau présenté plus haut, les besoins totaux annuels d'eau fluviale sont équivalents à 2 fois le volume du plan d'eau, le mode de gestion du réservoir n'influencera que peu son évolution qualitative. Qualités du fleuve et du lac deviendront alors de plus en plus similaires.

- Les rejets CSS

Leur importance qualitative sur le lac sera fonction de leur taux de dilution dans le Guiers, lui-même dépendant des apports fluviaux et de la gestion quantitative retenue. Actuellement, les rejets de la station principale R1 (cf fig. 6) ont une salinité qui varie de 800 à 1300 mg/l, en fonction des périodes de l'année et de l'intensité du drainage.

La chlorinité de ces eaux varie de 200 à 600 mg/l. Les débits sont par contre assez constants et varient de 80 à 90000 m³/jour. Les eaux de la station R2 mise en service récemment sont plus chargées et très riches en sulfates à cause du gypse employé pour le désalement des terres nouvellement mises en cultures. Le pH des eaux de la station R2 est souvent de l'ordre de 3 seulement.

Le devenir des rejets CSS conditionne donc pour beaucoup l'évolution qualitative future des eaux du Guiers. Les simulations indiquées ci-après le prouvent entièrement. Il n'existe cependant pas d'alternatives à ces déversements très minéralisés, la nature des sols et du sous-sol sursalé nécessitant leur drainage permanent.

Le branchement des rejets CSS sur le collecteur général des eaux de drainage prévu pour l'ensemble de la basse vallée apporterait une solution mais le coût d'un tel ouvrage retardera sans doute sa construction.

2 - Simulations

L'évolution qualitative future du Guiers a été simulée sur la base de 3 options de gestion du réservoir et sur une durée de 4 années consécutives. Elles ont été effectuées au moyen du modèle de gestion globale déjà présenté (cf III. F).

Les paramètres inclus dans le modèle sont indiqués au tableau VI.

Les simulations ne prennent en compte que l'évolution des chlorures, témoins de l'évolution de la salinité. Les effets de dilution des apports pluviométriques ne seront pas pris en compte dans les simulations, à cause de leur trop grande irrégularité interannuelle.

Les 3 simulations débutent avec un stock de chlorures dans le lac identique à celui calculé au 1er janvier 1989, soit 23000 tonnes.

La fig. 30 indique l'évolution de la chlorinité moyenne du lac durant les 4 années de la simulation.

Gestion	A	B	C
Niveau lac	constant 1.50 m	variable 1.80 à 0.50 m	variable 1,80 à 0,50 m
Besoins du canal	10 m ³ /s	10 m ³ /s	15 m ³ /s
Irrigation	0.1 . 10 ⁶ m ³ /jour	0.1 . 10 ⁶ m ³ /jour	0.1 . 10 ⁶ m ³ /jour
Eau potable	0.05 . 10 ⁶ m ³ /jour	0.05 . 10 ⁶ m ³ /jour	0.05 . 10 ⁶ m ³ /jour
Rejets CSS	0.1 . 10 ⁶ m ³ /jour	0.1 . 10 ⁶ m ³ /jour	0.1 . 10 ⁶ m ³ /jour
Chlorinité des rejets CSS	275 mg/l	275 mg/l	275 mg/l

Tableau VI : Paramètres hydrologiques inclus dans les 3 options de gestion future du Guiers.

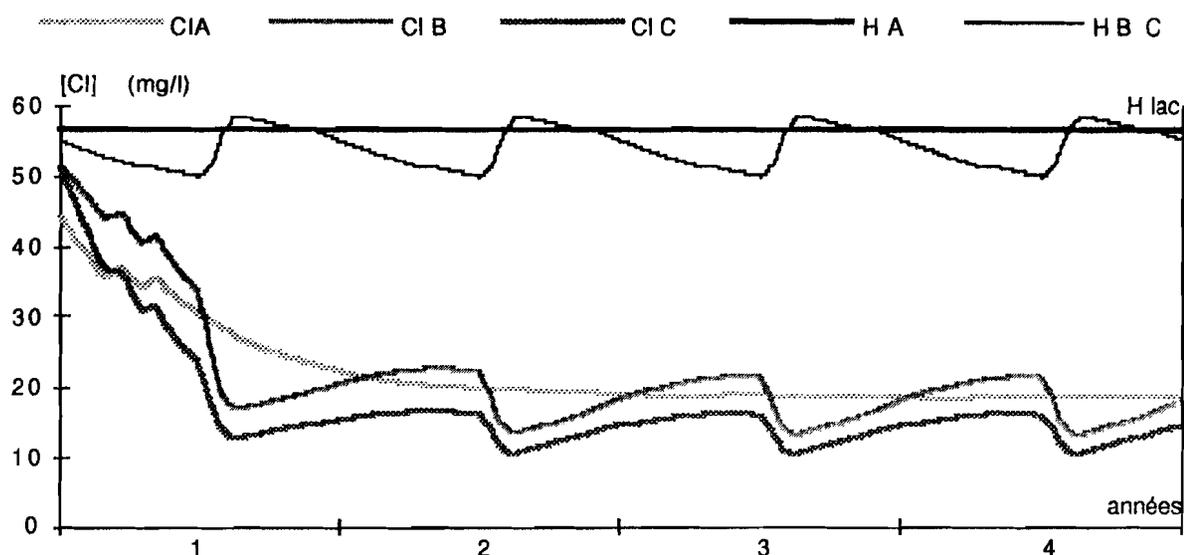


Fig. 30 : Evolution de la chlorinité moyenne du lac au cours des 4 années de simulations A, B et C (Cl A, B et C). H A et H B et C figurent le type de gestion limnimétrique appliqué au plan d'eau.

Commentaires :

Compte tenu des importants besoins du canal de Cayor et des apports fluviaux nécessaires pour l'assurer, on constate, dans les 3 situations, une nette et rapide réduction de la chlorinité, surtout au cours de la première année. La régression est nettement plus lente ensuite. Le canal de Cayor ne fait d'ailleurs qu'amplifier l'effet qualitatif régulateur assuré aujourd'hui par les lâchers au Ferlo.

Après 4 ans, le stock de chlorures a diminué de 59 % en simulation A et respectivement de 65 et 72 % aux simulations B et C. La différence constatée entre les simulations B et C s'explique par les plus grandes consommations d'eau du canal de Cayor en simulation C.

A noter aussi la différence sensible de vitesse de régression du stock de chlorures dissous entre les simulations A et B. La seule différence entre les deux réside dans le mode de gestion limnimétrique et donc quantitative de la réserve. Ceci prouve donc les interrelations quantitatives-qualitatives dans la gestion du milieu lacustre.

Notons encore que le mode de gestion proposé en simulation A induit une perte par évaporation de près de 610 millions de m³ d'eau par an. Le mode de gestion proposé aux simulations B et C permet une réduction de 10 % de ces pertes, soit quelques 60 millions de m³ annuels soit encore presque l'équivalent de la consommation totale annuelle d'eau de la ville de Dakar et de sa grande agglomération.

Enfin, la simulation A nécessite un apport fluvial moyen annuel de 950 millions de m³ (30 m³/sec) pour 900 et 1050 millions de m³ aux simulations B et C respectivement.

Cet exemple illustre bien la nécessité d'une gestion réfléchie du lac de Guiers, tant les implications et conséquences quantitatives et qualitatives du mode de gestion peuvent être importantes pour le devenir du réservoir mais aussi pour une politique réelle d'"économie" de l'eau, indispensable dans le contexte de l'"Après-Barrages".

CONCLUSIONS GENERALES

L'étude hydrologique a permis d'appréhender le fonctionnement du système fluvio-lacustre et son évolution depuis 1976. L'impact des barrages de Diama et de Manantali sur le Guiers a été clairement mis en évidence : de meilleurs remplissages et une plus grande stabilité limnimétrique en cours d'année en sont les effets premiers et les plus visibles. Les nouvelles conditions hydrologiques fluviales et la disponibilité permanente d'eau douce de bonne qualité à la jonction fleuve-Taoué pourraient suggérer une gestion simpliste du réservoir avec une ouverture permanente des vannes du canal d'amenée d'eau au lac. Cette situation est en fait celle que connaît le Guiers depuis 1991 ou peut s'en faut. Or, la quantification des termes du bilan hydrologique a montré l'influence prépondérante de l'évaporation au niveau des pertes en eau. Ceci justifie pleinement une gestion future rigoureuse du réservoir dont la morphologie de lac plat favorise une extension propice à des pertes en eau inutiles.

D'autre part une gestion du plan d'eau à niveau stabilisé ou impliquant un marnage trop faible risque d'avoir des conséquences directes et indirectes fâcheuses tant du point de vue strictement hydrologique que biologique; le développement très rapide de la végétation aquatique constaté ces dernières années en est une preuve tangible. Les conséquences sanitaires directes et indirectes d'un surdéveloppement végétal ne sont pas à dédaigner non plus.

Le taux d'utilisation réelle des eaux fluviales dans le Guiers est aujourd'hui de 5 à 7 % en moyenne ce qui est négligeable. Les pertes d'eau sont donc aujourd'hui démesurées et là aussi se pose la question de l' "économie de l'eau" à l'échelle du lac comme elle se pose pour l'ensemble de la vallée du Sénégal. Le taux d'utilisation des eaux du Guiers sera cependant plus favorable après la mise en fonction du canal de Cayor mais une gestion rigoureuse du réservoir s'impose. Le modèle de gestion LGPLG a été conçu dans ce but. Il permet maintenant d'imposer au lac une évolution limnimétrique choisie en fonction des besoins des utilisateurs, tout en atténuant les pertes par évaporation et en réduisant les effets écologiques négatifs constatés. Il restera à intégrer ce modèle de gestion aux autres modèles déjà développés pour le fleuve et les retenues de Diama et de Manantali.

La qualité générale des eaux du Guiers présente un gradient Nord-Sud, déjà bien connu, et encore très sensible aujourd'hui. Les nouvelles conditions hydrologiques fluviales permettent des remplissages du lac à un niveau plus élevé qui augmentent le taux de dilution de ses eaux. Depuis la mise en service du barrage de Diama en 1985, on constate une nette diminution de leur taux de minéralisation, accentué par les lâchers annuels vers le Ferlo à partir des vannes de la digue méridionale du lac. Ces lâchers ne font en fait que compenser les rejets très minéralisés des eaux de drainage des casiers sucriers au Nord du Guiers. L'étude du stock des sels dissous présents dans le réservoir montre en effet qu'il n'a pas ou très peu changé depuis 8 ans. C'est donc bien la dilution des eaux du lac par les eaux très douces du fleuve qui est à la base des changements qualitatifs.

Un premier modèle de gestion globale des eaux du Guiers a été développé. Il intègre les aspects quantitatifs et qualitatifs de cette gestion et permet d'en simuler les alternatives et leurs effets respectifs. Son utilisation a permis de vérifier les hypothèses avancées quant au rôle respectif des divers paramètres hydrologiques dans l'évolution qualitative des eaux. Il a permis aussi de montrer l'interdépendance qualitatif-quantitatif dans le mode de gestion du lac. Ce modèle demande à être encore amélioré mais préfigure peut-être l'outil idéal s'il peut être développé pour l'ensemble de la vallée.

Terminons en soulignant que les risques d'eutrophisation des eaux sont réels et iront croissants avec le développement de la culture irriguée dans la vallée et autour du lac. L'adoucissement des eaux favorisera l'apparition des manifestations hydrobiologiques telles qu'on les constate déjà aujourd'hui. Un suivi qualitatif régulier est indispensable.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAM J. G., (1964) - Contribution à l'étude de la végétation du lac de Guiers (Sénégal). Bull. IFAN n°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 n°17 : 1157-1173.
- CHEVALLIER P., CLAUDE J., POUYAUD B., BERNARD A., (1985) - Pluies et décrues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina Faso). Coll. Travaux et Documents de l'ORSTOM, n°90, 251 p.
- COGELS F.X., GAC J.Y., (1982) - Le lac de Guiers : fonctionnement, bilans hydriques. Evaporation d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne. Cah. ORSTOM, série Géol., Vol. XII n° 1 : 61 - 71
- COGELS F.X., GAC J.Y., (1983 a) - Circulation et salinité des eaux du lac de Guiers; problèmes de développement. In : Actes du colloque : Le lac de Guiers : Problématique régionale d'Environnement et de Développement sahélien. Université de Dakar, Institut des Sciences de l'Environnement : 25-40
- COGELS F.X., GAC J.Y., (1983 b) - La chlorinité des eaux du lac de Guiers : bilan quantitatif, qualitatif et perspectives futures. In : Actes du colloque : Le lac de Guiers : Problématique régionale d'Environnement et de Développement sahélien. Université de Dakar, Institut des Sciences de l'Environnement : 41-58
- COGELS F.X., (1984) - "Etude limnologique d'un lac sahélien : le lac de Guiers (Sénégal)".- Propositions de gestion de l'écosystème lacustre sur base de la connaissance de son fonctionnement hydrologique et hydrobiogéochimique, de ses potentialités et des impacts des futurs aménagements de la vallée du fleuve Sénégal. Thèse d'Etat, Fondation Univ. Luxembourgeoise, Arlon, Belgique, 329 p.
- COGELS F.X., GAC J.Y., (1984) - Evolution hydrogéochimique du lac de Guiers (Sénégal) au cours de la sécheresse actuelle au Sahel. In : Actes du colloque RAST - Université de Bordeaux. Société Géologique de France, Paris : 141
- COGELS F.X., GAC J.Y., (1987) - Evolution spatio-temporelle de la chimie des eaux du lac de Guiers (Sénégal). Géodynamique, vol. 1, n° 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 - CEE, 60 p.
- COGELS F.X., DACRUZ EVORA N. et GAC J.Y. (1991) - L'évaporation du lac de Guiers (Sénégal) de 1976 à 1989. Bilan et essai d'interprétation. Rapport CEE (projet EQUASEN), 25 p.
- COGELS F.X., (1992) - Justification, mise au point et application d'un modèle mathématique destiné à la gestion quantitative du lac de Guiers-Sénégal. In : The application of complex systems modelling to the management of the Environment in Senegal. International Ecotechnology Research Centre, Cranfield Inst. of Technology (UK) (Eds) : 9-22.
- COGELS F.X., CARN M., EVORA N.D. et GAC J.Y. (1992 a) - Utilisations et applications pratiques du modèle d'aide à la gestion des eaux du lac de Guiers (modèle LGPLG). Alternatives de gestion actuelle et future. Rapport CEE, projet EQUASEN , 47 p.
- COGELS F.X., CARN M., GAC J.Y. (1992 b) - Evolution annuelle et interannuelle des chlorures dans le lac de Guiers à N'Gnith de 1973 à 1991. Doc. multigr. ORSTOM - CEE, 40 p.

- COGELS F.X., GAC J.Y. (1993) - Evaporation and annual evolution of chloride concentrations in the water of a shallow Sahelian lake : Lake of Guiers (Senegal). *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 25 p. 115-118.
- COGELS F.X., CARN M., NIANG A., GAC J.Y. (1993 a) - La qualité des eaux du lac de Guiers. 1. Bilan qualitatif - 2. Effets des aménagements du fleuve Sénégal - 3. Première utilisation d'un modèle de gestion qualitative. *Doc. multigr. ORSTOM - CEE*, 52 p.
- COGELS F.X., THIAM A., GAC J.Y. (1993 b) - Premiers effets des barrages du fleuve Sénégal sur l'hydrologie, la qualité des eaux et la végétation aquatique du lac de Guiers. *Rev. Hydrobiol. Tropicale* 26 (2)
- COGELS F.X., NIANG A., CARN M., GAC J.Y., (1993 c) - Recherche d'une station de référence pour un suivi qualitatif régulier des eaux du lac de Guiers. *Doc. multigr. ORSTOM - CEE*, 15 p.
- COMPÈRE P., (1991). - Contribution à l'étude des algues du Sénégal. 1. Algues du lac de Guiers et du Bas-Sénégal. *Bull. Jard. Bot. Nat. Belg.* n° 61 (3/4) : 171-267.
- CREMOUX R., (1961) - Etude de la pêche dans les eaux fluviales du Nord Sénégal. *CTFT, Richard Toll*. 271 p.
- DEJOUX Cl., (1988) - La pollution des eaux continentales africaines. Eds de l'ORSTOM, Coll. Travaux et Documents, n°213. 513 p.
- DIA A., REYNAUD P.A., (1982) - Le phytoplancton du lac de Guiers : approche qualitative et quantitative. *Cah. ORSTOM, sér. Biol.* n°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.
- EVORA N.D., GAC J.Y., COGELS F.X., (1991) - Logiciel de gestion prévisionnelle (LGPLG) des eaux du lac de Guiers. *Rapport CEE, projet EQUÉSEN*, 56 p.
- FAURE H., GAC J.Y., (1981) - Will the sahelian drought end in 1985 ?. *Nature*, 291 : 475-478.
- GAC J.Y., CARN M., VILLENEUVE J., BAMBA S.B., TRAVI Y., VINCKE P.P., DIOP M., LE BRUSQ J.Y., GOULEAU D., COGELS F.X., 1985. Etude préliminaire de la physicochimie des sédiments du lac de Guiers (Sénégal). *Publication ORSTOM - Dakar*, 49 p.
- GAC J. Y., CARN M., SAOS J. L., (1986) - Invasion marine dans le fleuve Sénégal. *Rev. Hydrobiol. trop.* n° 19 (1) : 3-18.
- GAC J.Y., COGELS F.X., (1986) - An assessment of the impact on Lac de Guiers by dam construction on the Senegal River. / Le lac de Guiers : Paramètres du milieu actuel et évaluation des répercussions de l'aménagement de la vallée du fleuve Sénégal. *Water Quality Bulletin : Vol. 11 n° 2* : 82-87
- GAC J.Y., COGELS F.X., EVORA N., LABROUSSE B. (1991) - Le bilan hydrologique du lac de Guiers en 1990. *Rapport CEE (projet EQUÉSEN)*, 20 p.
- GAC J.Y., COGELS F.X., EVORA N. (1992) - Fonctionnement et bilan hydrologique du lac de Guiers (Sénégal) en 1991. *Rapport CEE, projet EQUÉSEN*, 40 p.
- GAC JY, COLY A., NIANG A., CARN M., COGELS F.X. (1993) - Bilan hydrologique du lac de Guiers en 1992. Vers une gestion concertée des crues du fleuve Sénégal. *Doc. multigr. ORSTOM-CEE*, 21p.
- GROSMAIRE P, (1957) - Eléments 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* n°4, vol. 3 : 219-226.
- HENRY Y., (1918) - Irrigations et cultures irriguées en Afrique tropicale. Larose, Paris, 296 p.
- HUBERT P., (1984) - *Eaupuscule - Une introduction à la gestion de l'eau*. Eds Ellipses, 192 p.
- ILTIS A., (1980) - Les Algues. *In* : Flore et faune aquatiques de l'Afrique sahélo-soudanienne. Tome 1. Eds ORSTOM, Coll. Initiations-Documentations Techniques n°44. : 9-61.
- KANE O. (1993) - Contribution à l'étude des systèmes irrigués dans la zone du lac de Guiers. Mém. de DEA en Sciences de l'Environnement. Univ. de Dakar, Institut des Sciences de l'Environnement, 77 p.
- 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.
- LAMAGAT J.P., SEGUIE L., DUBEE G., PEPIN Y., (1990) - Campagne de jaugeage sur le canal de la Taoué (Hivernage 1990). Rapport OMVS, Projet "Prévision des débits de gestion des ouvrages communs de l'OMVS" et rapport muligr. ORSTOM-Dakar, 11p.
- LEMMET J., SCORDEL M., (1918) - Contribution à l'étude agroligique de la vallée du Bas Sénégal. *Bull. Com. et Hist. Sc. AOF* : 17-56.
- LEUDELLOT (?), LELIEVRE (?), (1828) - Journal d'un voyage au lac de N'ghier ou Paniéfoule. Manuscrit original. Archives Nationales du Sénégal. Ref. P273. 14 p.
- LEVEQUE Ch., (1980) - Mollusques. *In* : Flore et faune aquatiques de l'Afrique sahélo-soudanienne. Tome 1. Eds ORSTOM, Coll. Initiations-Documentations Techniques n°44. : 283-305
- MATHIEU P., (1983) - Agriculture irriguée et culture traditionnelle de décrue dans la zone du lac de Guiers. Actes du colloque "Le lac de Guiers : Problématique d'Environnement et de Développement". Université de Dakar, Institut des Sciences de l'Environnement, 287-305.
- POUYAUD B. (1979) - Etude de l'évaporation d'un lac en climat soudano-sahélien : le lac de Bam (Haute Volta). *Cah. ORSTOM, ser. Hydrol. XVI, 2* : 89-143.
- RAYNAL-ROQUES A., (1980) - Les plantes aquatiques. *In* : Flore et faune aquatiques de l'Afrique sahélo-soudanienne. Tome 1. Eds ORSTOM, Coll. Initiations-Documentations Techniques 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.
- RIOU C. (1975) - La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. *Mém. ORSTOM*, 80, 236p.
- 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. Mémoire IFAN 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.