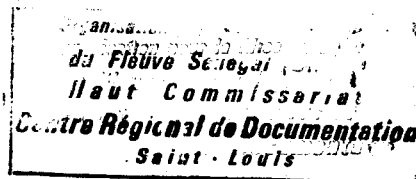


09936

Étude chimique des eaux du lac de Guiers
(Sénégal) et de leur évolution annuelle
Approche des mécanismes
de la régulation hydrogéochimique

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



Résumé : Le lac de Guiers est un lac plat de quelque 300 km², défluent en rive gauche du fleuve Sénégal dans sa partie aval. Les conditions climatiques sahéliennes et la morphologie lacustre expliquent l'évolution qualitative de ses eaux en cours de saison sèche, l'évaporation jouant un rôle hydrologique capital. L'apport d'eau douce fluviale, 3 mois par an, engendre un cycle annuel dissolution-minéralisation, très caractéristique. D'autre part, un important gradient de salinité est mis en évidence. Enfin, l'évolution du degré de minéralisation des eaux entraîne une suite de déplacements d'équilibres chimiques. Diverses réactions géochimiques impliquées dans la régulation des éléments chimiques dissous sont proposées. L'intervention des facteurs biologiques de régulation est également prise en compte.

Mots-clés : Lac sahélien - Bilan hydrologique - Évaporation - Minéralisation - Géochimie - Gradient de salinité.

Abstract : Chemical study on Guiers Lake waters (Senegal) and their annual evolution. Approach of hydro-geochemical regulation mechanisms. The lake of Guiers is a flat lake from about 300 km² area ; it is connected to the Senegal stream on its left bank.

The qualitative evolution of its water during the dry season is closely linked with sahelian climatic conditions and the lacustrine morphology ; the evaporation takes a prominent part in the water budget.

River-water entering the lake during three months per year involves a very typical annual cycle of dissolution - mineralization.

In an other hand a high gradient of salinity is obvious.

At least the evolution of rate of mineralization of water involves a succession of removal of chemical balance.

Some chemical reactions having a great influence on the regulation of dissolved ions are proposed. Intervention of biological activity is also taken into account.

Key words : Sahelian lake - Water balance - Evaporation - Mineralization - Geochemistry - Gradient of salinity.

(1) Fondation Universitaire Luxembourgeoise B - 6700 Arlon - Belgique.

(2) ORSTOM Hann, BP 1386, Dakar - Sénégal.

François-Xavier COGELS, Jean-Yves GAC

INTRODUCTION

Situé en rive gauche du fleuve Sénégal, en tête de la région du delta fluvial, le lac de Guiers occupe une dépression allongée dans l'axe nord-sud, longue de 50 km et large de 7 au maximum. Il constitue la principale réserve d'eau douce de surface du Sénégal (fig. 1). Sa zone nord est limitée par les digues de la Compagnie Sucrière Sénégalaise (CSS) qui exploite près de 8 000 ha de canne à sucre. Son extrémité sud est isolée de l'ancienne vallée du Ferlo par la digue de Keur Momar Sarr. Son existence dépend ainsi quasi entièrement de la crue annuelle du fleuve, de son amplitude et de sa durée. Du point de vue morphologique, le plan d'eau se caractérise par un rapport surface/volume important. Ce lac plat voit ainsi ses contours se modifier en permanence sous l'effet des facteurs hydrologiques dont nous déterminerons plus loin l'importance. Le battement annuel de la nappe d'eau est d'environ 2,25 m, d'où de très sensibles variations de volume et de surface mises en évidence au tableau 1.

Morphologiquement (et hydrologiquement), le lac de Guiers a beaucoup de traits communs avec le lac Tchad (CARMOUZE *et al.* 1983). Les futurs aménage-

Tableau I
 Caractéristiques morphologiques du lac de Guiers à différents niveaux

	Niveau * (mètres IGN)				
	- 1,00	0,00	1,00	1,50	2,00
Surface (km ²)	98	175	237	265	287
Volume (10 ⁶ m ³)	50	182	390	515	657

* par rapport au niveau de la mer.

ments de la vallée fluviale, barrages de Diama et de Manantali, auront de profondes répercussions sur le fonctionnement hydrologique et la qualité des eaux du milieu lacustre. C'est pourquoi il nous a semblé intéressant de décrire la qualité chimique générale des eaux du lac et son évolution annuelle avant les premiers effets de ces aménagements en cours aujourd'hui. Notre étude couvre une période de 3 ans : juillet 1979 à juillet 1982.

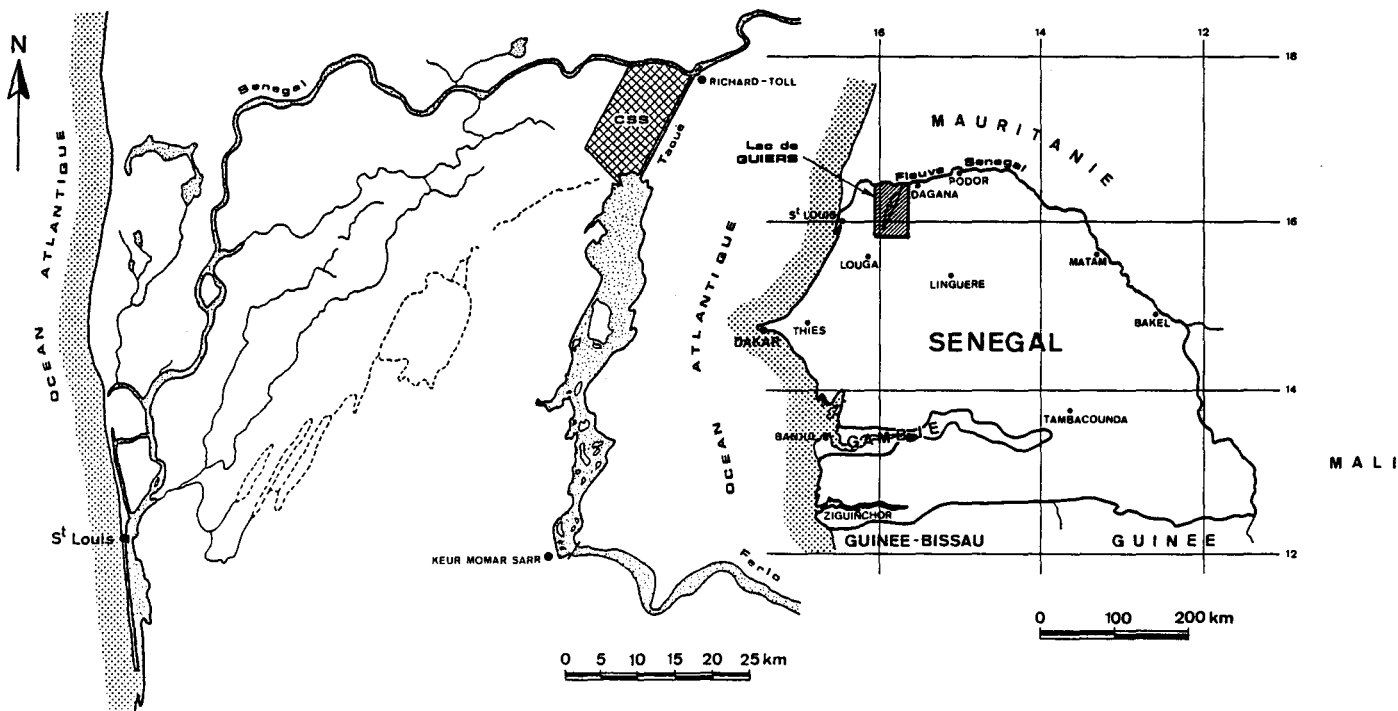


Fig. 1. — Carte de situation du lac de Guiers.

APERÇU DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE LACUSTRE

Le fonctionnement hydrologique lacustre a été décrit précédemment par COGELS *et al.* (1982 et 1983) ; nous en rappellerons ici les éléments essentiels.

L'année hydrologique du Guiers se subdivise en deux grandes phases :

— *la phase d'alimentation* par les eaux du fleuve en crue, par l'intermédiaire du canal de la Taoué reliant

le milieu fluvial au milieu lacustre. Cette phase couvre une période de 3 mois en moyenne, du 15 juillet au 15 octobre.

— *la phase d'isolement* débutant à l'amorce de la décrue fluviale. Les barrages de la Taoué, situés à proximité de l'embouchure du canal dans le fleuve sont alors fermés évitant ainsi l'écoulement du lac dans le cours d'eau. Cette phase dure jusqu'à la crue fluviale suivante soit 9 mois environ.

Les différents paramètres hydrologiques intervenant dans les variations annuelles du niveau des eaux et leur localisation sont schématisés à la figure 2 :

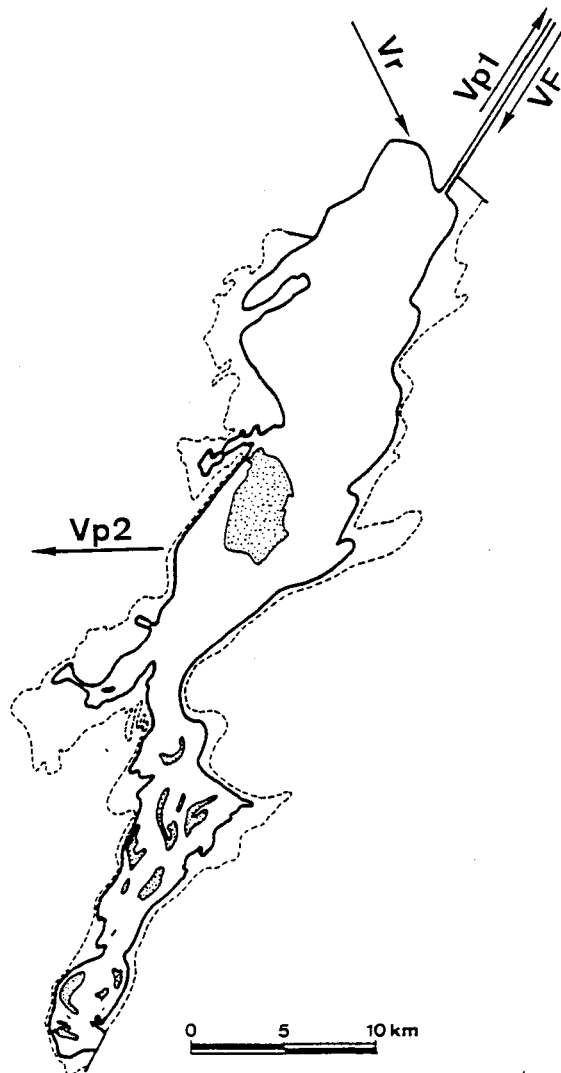


Fig. 2. — Localisation des paramètres du bilan hydrologique.

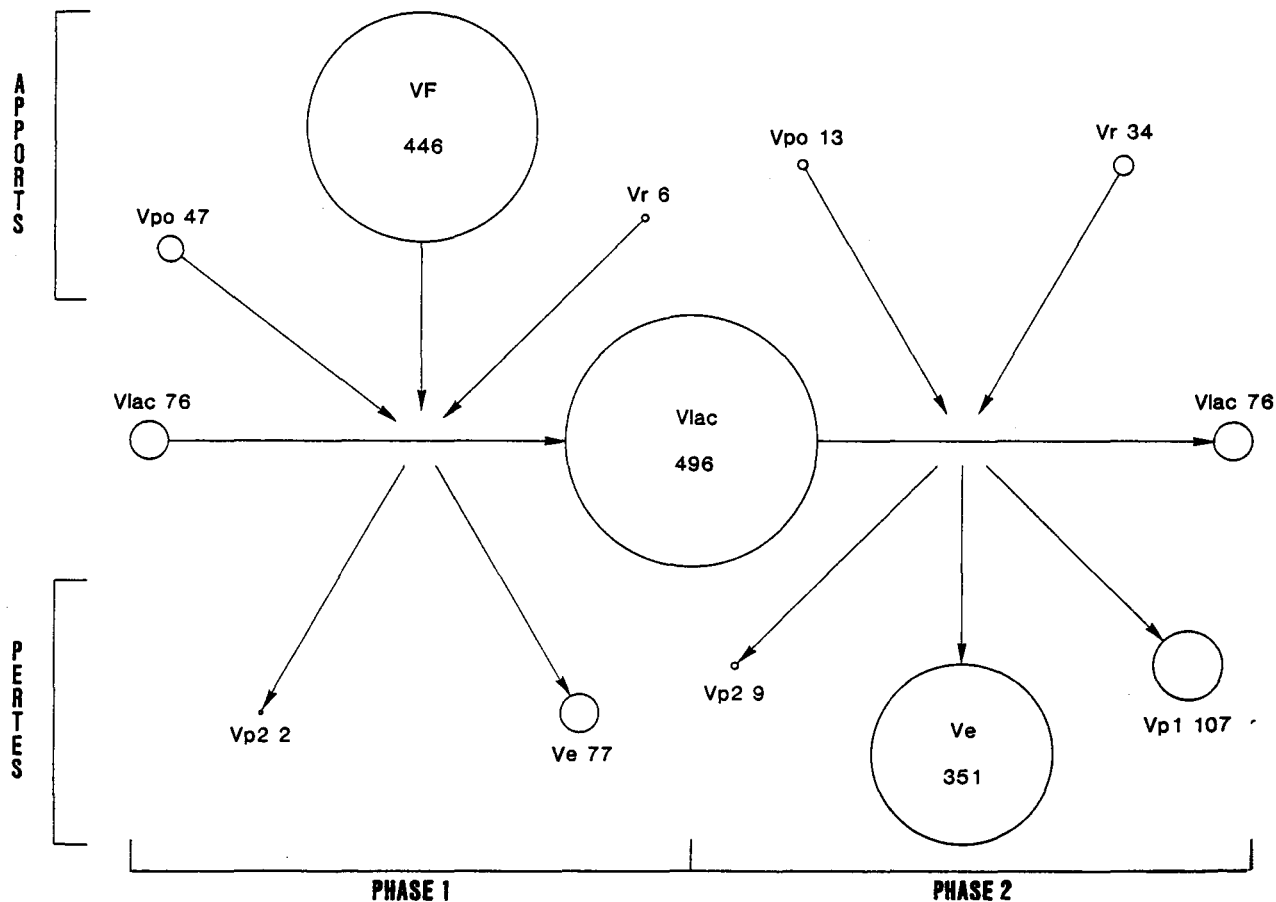


Fig. 3. — Bilan hydrologique moyen annuel par phase ($10^6 m^3$)

VF : Apports fluviaux — Vp1 : Pompages CSS — Vr : Rejets CSS — Vp2 : Pompages eau potable — Vpo : Pluviométrie — Ve : Évaporation — Vlac : Volume lacustre (en début et fin de phase de remplissage). Phase 1 : Remplissage — Phase 2 : Isolement.

— Au rang des apports :

- l’approvisionnement fluvial (VF) ;
- les rejets dans le lac des eaux de drainage des cultures irriguées (Vr) ;
- les apports pluviométriques Vpo (non représentés sur la carte) : apports directs et ruissellement.

— Au niveau des pertes :

- les prélèvements destinés à l’irrigation de la canne à sucre (Vp1) ;
- les pompes destinés à la production d’eau potable (Vp2) ;
- l’évaporation (Ve non représentée).

Ces différents termes hydrologiques ont été quantifiés pour la période 1976-1982 (COGELS, 1984). La figure 3 en synthétise les moyennes annuelles par phase.

L’évaporation représente à elle seule 79 % du bilan total annuel des pertes. Les pompages destinés à

l’irrigation de la canne à sucre et à la production d’eau potable n’en totalisent respectivement que 19 % et 2 %.

Les apports sont tributaires pour 81 % de la crue fluviale, ensuite des précipitations (11 %), enfin des rejets des eaux de drainage des cultures irriguées (8 %).

Apports fluviaux et évaporation sont donc les deux paramètres clés du fonctionnement hydrologique du lac. Leurs effets sur l’hydrochimie seront tout aussi évidents puisqu’ils induiront ainsi annuellement :

— une période de concentration progressive des solutions en cours de phase d’isolement, sous l’effet de l’évaporation principalement ;

— une période de dilution des eaux lacustres en phase de remplissage, liée aux apports fluviaux peu minéralisés.

QUALITÉ CHIMIQUE DES EAUX, ÉVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE ET APPROCHE DES MÉCANISMES DE LA RÉGULATION

Méthode d'étude

ÉTUDE CHIMIQUE GLOBALE

L'étude est basée sur le suivi chimique de 13 stations réparties sur le lac (fig. 4), au cours de 28 séries de prélèvements entre juillet 1979 et juillet 1982.

Les analyses, effectuées sur les échantillons prélevés à 10 cm de profondeur, concernent les principaux ions en solution : (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+). La qualité chimique des eaux des différents termes du bilan hydrologique est également prise en compte.

A chaque station de prélèvement est attribuée une zone théorique d'influence. Nous en connaissons le volume en fonction de la hauteur des eaux (COGELS,

1984). Sur la base de la cote du lac à chaque date de prélèvement et de la concentration des eaux aux différentes stations pour les divers paramètres, nous pouvons alors calculer la masse totale des éléments chimiques présents dans le lac à chaque échantillonnage, et donc la concentration moyenne lacustre de l'élément chimique étudié.

ÉVOLUTION RÉGIONALE DE LA QUALITÉ DES EAUX

Le lac a été subdivisé en 5 grandes régions (R1 à R5) réparties sur un transect nord-sud comme l'indique la figure 4. L'évolution hydrochimique qualitative de ces 5 régions est étudiée durant l'année hydrologique 1981-82 en début, milieu et fin de phase d'isolement. La concentration moyenne régionale des divers éléments dissous sera calculée connaissant le volume et la composition des eaux des stations relatives aux diverses régions (une seule station pour la région 3).

Étude hydrochimique générale (1979-1982)

BILAN HYDROCHIMIQUE LACUSTRE

Le tableau 2 indique l'importance moyenne annuelle de différents termes du bilan hydrochimique.

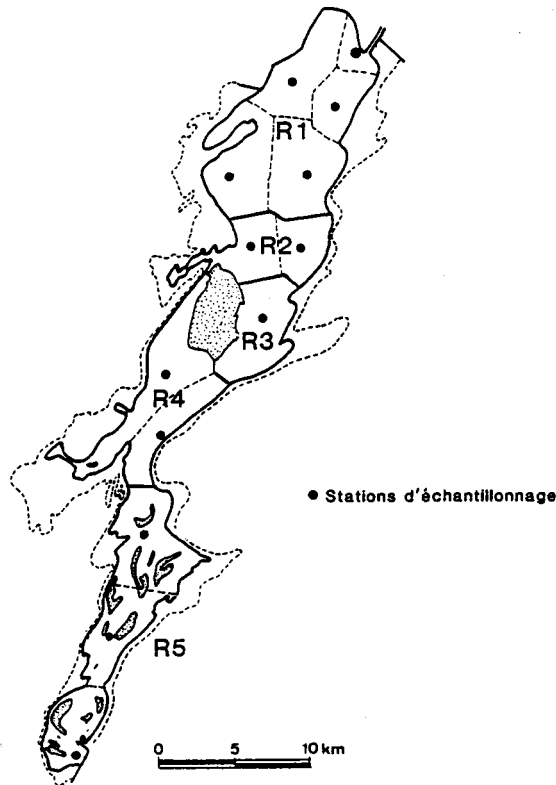


Fig. 4. — Répartition des stations d'échantillonnages sur le lac — Délimitation des zones d'influence respective des stations (pointillé) et des régions (R1 à R5).

Tableau II

Bilan moyen annuel entrées-sorties (par voies hydrologiques) dans le lac des différents paramètres hydrochimiques.

	Apports (A) (t)	Pertes (P) (t)	(A-P) (t)	(A-P) (10^6 eq)
Cl^-	10 170	10 185	- 15	-0,45
SO_4^{2-}	6 116	3 155	2.961	61,15
HCO_3^-	13 478	12 745	733	12,02
Ca^{++}	2 970	2 331	639	31,89
Mg^{++}	2 332	1 759	573	47,14
Na^+	6 512	6 608	- 96	-4,17
K^+	1 294	729	565	14,45

Ces bilans sont obtenus en connaissant l'évolution dans le temps (période 1979-1982) des paramètres hydrologiques et de leur qualité chimique respective.

Le bilan général A, P exprimé en équivalents est assez bien équilibré pour le niveau de précision auquel nous pouvons nous attendre pour ce genre de calcul (73.22 contre 89.11).

Les apports au lac en bicarbonates et potassium sont essentiellement d'origine fluviale. Par contre ceux en chlorures, sulfates, magnésium et sodium sont en

majorité issus des rejets des zones irriguées. Leurs fortes teneurs en chlorures et sulfates s'expliquent, pour les premiers par la nature salée des sols destinés à la culture de la canne à sucre (et dont les eaux de drainage sont évidemment très chargées) pour les seconds par l'emploi de gypse pour la désalinisation de ces mêmes sols. La composition chimique moyenne des trois termes du bilan des apports (VF, Vpo et Vr) est indiquée au tableau 3.

Tableau III

Composition chimique de trois des termes du bilan hydrologique (mg/l) (moyenne 1979-1982)

VF : apports fluviaux, Vpo : apports pluviométriques, Vr : rejets des zones irriguées

	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
VF	2,1	0,1	23,9	2,6	2,1	2,2	2,2
Vpo	6,9	5,0	9,5	2,3	0,6	5,5	0,7
Vr	223,7	145,4	74,6	34,3	35,8	131,2	7,1

COMPOSITION ET ÉVOLUTION CHIMIQUE DES EAUX DU LAC

Chlorures

La figure 5 illustre et compare l'évolution du volume lacustre et de la concentration moyenne en chlorures dissous de juillet 1979 à juillet 1982.

Globalement, en cours d'année hydrologique, les teneurs en chlorures évoluent de manière inversement proportionnelle au volume du plan d'eau.

— *En phase d'isolement* : augmentation progressive des teneurs sous l'effet de l'évaporation principale. Ce paramètre induit un facteur de concentration moyen de 3,7 environ (COGELS, 1984). Les rejets des zones irriguées très minéralisés, jouent également un rôle important sur la concentration progressive des solutions (COGELS *et al.*, 1983).

— *En phase de remplissage* : dilution des eaux lacustres très concentrées en fin de phase d'isolement par les eaux fluviales peu chargées.

La figure 6 montre ensuite la relation liant les concentrations moyennes lacustres en Cl⁻ et le volume du

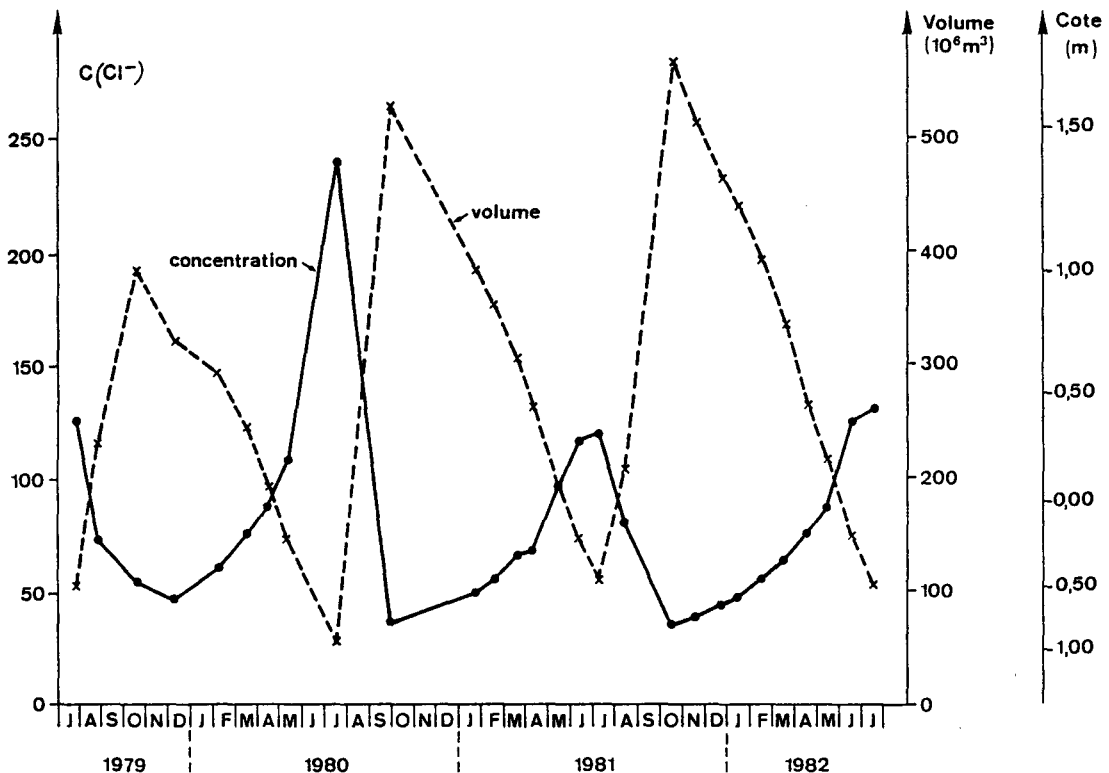


Fig. 5. — Évolution comparée des teneurs en Cl⁻ (mg/l) du volume et de la côte du lac de juillet 1979 à juillet 1982.

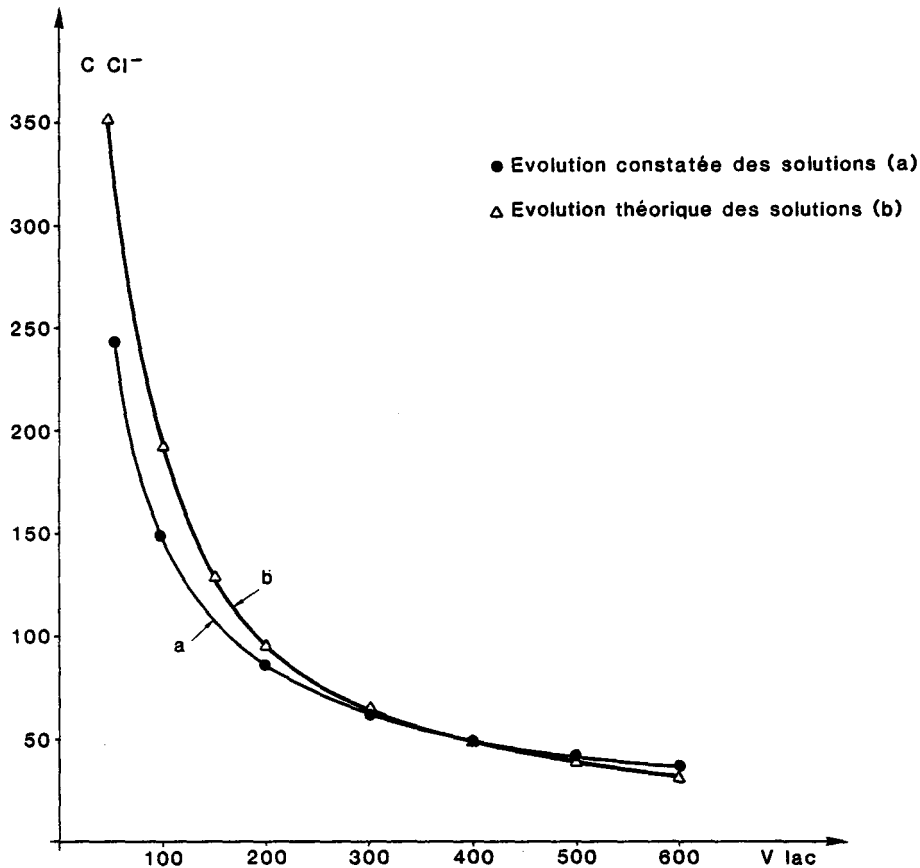


Fig. 6. — Évolution des concentrations (c) en Cl⁻ (mg/l) théoriques et constatées en fonction du volume du lac (V lac en 10⁶m³).

lac aux différentes séries d'échantillonnages. La relation (a) s'écrit :

$$C_{\text{lac}} = 5,525 V_{\text{lac}}^{-0,787}$$

(C : concentration mg/l - V : volume en 10⁶ m³)

Le coefficient de corrélation est de 0,982. La figure 6 indique également l'évolution théorique des chlorures en solution si l'évaporation était le *seul* paramètre régulant la concentration de l'élément dissous (courbe b). Pour ce faire, partant du taux maximum de dilution des eaux (observé en fin de phase de remplissage en 1980), nous multiplions la teneur en Cl⁻ correspondante par les facteurs successifs de concentration. Cette courbe d'évolution théorique des solutions (b) se situe dans l'ensemble à un niveau légèrement supérieur à celui de l'évolution constatée des solutions (courbe a) ; ceci prouve l'intervention de facteurs autres que l'évaporation dans la régulation hydrochimique de l'élément ; dans ce cas, des prélèvements destinés à l'irrigation (Vp1) essentiellement.

Autres éléments dissous

Le tableau 4 indique, pour chacun des paramètres, la relation liant les concentrations moyennes lacustres observées au volume du plan d'eau. Les coefficients

Tableau IV

Relations entre le volume du lac (V en 10⁶m³) et la concentration moyenne de divers éléments chimiques dissous (C en mg/l).

SO ₄ ⁻⁻	C=3 394 v ^{-0,960}	r= 0,803
HCO ₃ ⁻	C=1 249 v ^{-0,431}	r= 0,893
Ca ⁺⁺	C= 173 v ^{-0,395}	r= 0,866
Mg ⁺⁺	C= 417 v ^{-0,621}	r= 0,957
Na ⁺	C=4 235 v ^{-0,814}	r= 0,982
K ⁺	C= 157 v ^{-0,567}	r= 0,948

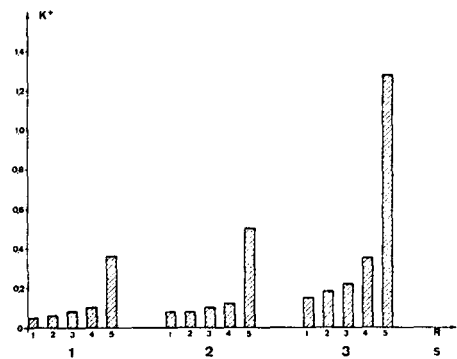
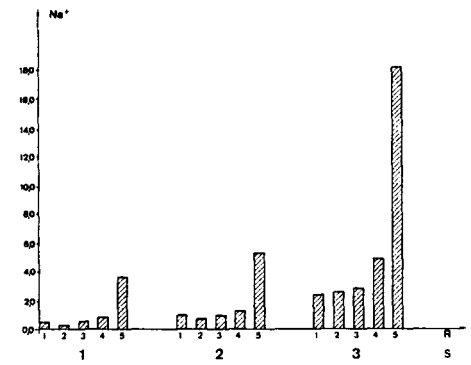
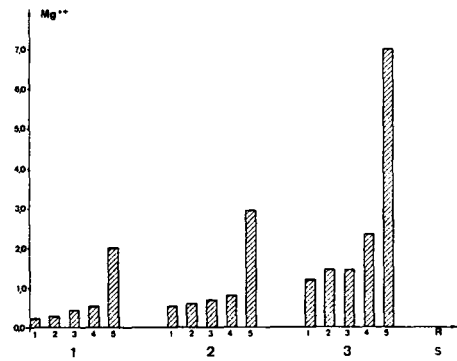
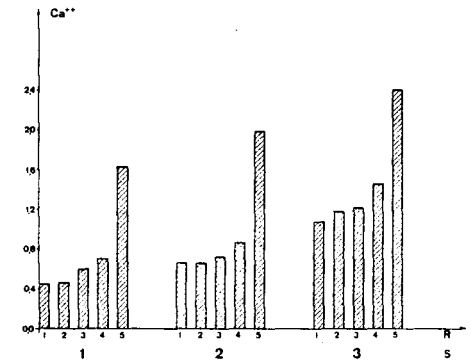
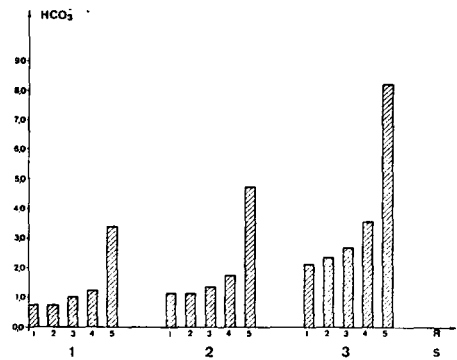
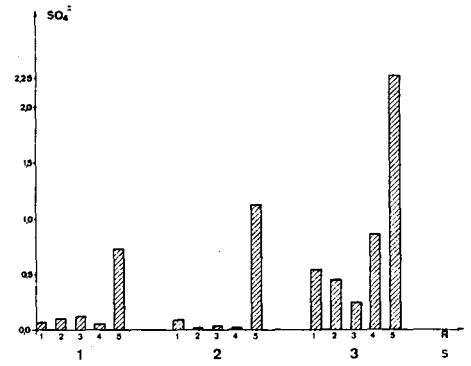
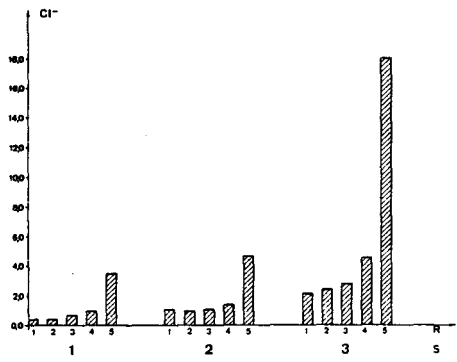


Fig. 7. — Évolution spatio-temporelle de la qualité chimique des eaux du lac à différents endroits et périodes (meq/l). S : Série d'échantillonnage (cf. tabl. 6). R : Région lacustre (cf. fig. 4).

de corrélation plus ou moins proches de l'unité indiquent l'intervention plus ou moins sensible des facteurs hydrologiques et des phénomènes de régulation que nous tenterons d'expliquer plus loin.

Partant de là, nous pouvons alors calculer la composition moyenne des eaux du lac pour divers niveaux « types » soit : -0,50 m (fin de phase d'isolement), 0,50 m (cote moyenne annuelle) et 1,50 m (fin de phase de remplissage). Les résultats sont indiqués au tableau 5.

Évolution hydrochimique régionale

L'hydrochimie du Giers se caractérise entre autres par un remarquable gradient nord-sud du degré de minéralisation des eaux. Sur la base des données du tableau 6, la fig. 7 schématise ce gradient pour chacun des 7 paramètres étudiés et ce pour l'année

hydrologique 1981-82, en début (Série 1 — octobre 1981), milieu (Série 2 — février 1982) et fin (Série 3 — juin 1982) de phase d'isolement du lac. La répartition spatiale des 5 zones est représentée à la fig. 4.

ÉVOLUTION SPATIALE

L'hydrochimie régionale se caractérise par :

— Un degré de minéralisation progressif du nord vers le sud, quelle que soit la période de l'année considérée. Seuls les SO_4^{--} font exception, la zone 1 pouvant atteindre des teneurs plus élevées que les zones qui lui font suite. C'est le cas à la série 3 et ceci est lié à la nature (4 meq/l en SO_4^{--}) et à la localisation des rejets Vr des cultures irriguées.

— Si, pour une même série, l'évolution des concentrations est relativement régulière de la région 1 à la

Tableau V
Composition chimique moyenne des eaux du lac
à différentes hauteurs d'eau.

Niveau	- 0,50 m		0,50 m		1,50 m	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
Cl^-	139,9	3,95	66,3	1,87	40,5	1,14
SO_4^{--}	38,3	0,80	15,4	0,32	8,5	0,18
HCO_3^-	166,8	2,73	110,8	1,82	84,7	1,39
Σ anions		7,48		4,01		2,71
Ca^{++}	27,3	1,36	18,8	0,94	14,7	0,73
Mg^{++}	22,9	1,88	12,7	1,04	8,6	0,71
Na^+	94,5	4,11	43,7	1,90	26,3	1,14
K^+	11,1	0,28	6,5	0,17	4,6	0,12
Σ cations		7,63		4,05		2,70

Tableau VI
Composition chimique moyenne (meq/l) des eaux des 5 régions
géographiques du lac (R1 à R5) à différentes époques et séries
d'échantillonnages (S1-octobre 1981/S2-février 1982/S3-juin 1982)

	R1			R2			R3			R4			R5		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Cl^-	0,40	1,01	2,15	0,36	0,96	2,40	0,66	1,06	2,76	0,88	1,28	4,58	1,49	4,70	18,02
SO_4^{--}	0,07	0,09	0,54	0,10	0,01	0,45	0,12	0,04	0,25	0,06	0,01	0,85	0,71	1,13	2,27
HCO_3^-	0,70	1,15	2,10	0,75	1,15	2,35	1,00	1,35	2,60	1,21	1,70	3,53	3,38	4,72	8,22
Ca^{++}	0,44	0,65	1,08	0,46	0,66	1,18	0,60	0,72	1,11	0,69	0,86	1,46	1,61	1,97	2,39
Mg^{++}	0,23	0,56	1,20	0,29	0,58	1,43	0,45	0,68	1,47	0,55	0,80	2,33	1,99	2,93	7,00
Na^+	0,37	0,91	2,30	0,34	0,76	2,43	0,61	1,01	2,79	0,79	1,19	4,88	3,64	5,22	18,12
K^+	0,05	0,08	0,15	0,06	0,08	0,18	0,08	0,10	0,22	0,10	0,10	0,32	0,36	0,50	1,28

région 4, la transition région 4, région 5 est particulièrement brutale, avec un facteur de concentration de l'ordre de 4 pour les Cl^- et Na^+ , de 3,6 pour K^+ et Mg^{++} et de 2,8 pour Ca^{++} et HCO_3^- ; ceci s'explique par la nature saline des sols de cette région 5, mais également par sa morphologie particulière : faible profondeur, apparition de seuils et formation de grandes mares temporaires en fin de phase d'isolement d'où surconcentration des eaux sous l'effet de l'évaporation. Quant aux différences de facteurs de concentration de paramètre à paramètre elles s'expliquent par le caractère plus ou moins conservatif de l'élément.

ÉVOLUTION TEMPORELLE

L'évolution hydrochimique régionale est sous la dépendance de trois facteurs :

- l'évaporation (V_e) en cours de phase d'isolement : ceci a été mis en évidence précédemment ;
- les rejets (V_r) des eaux de drainage des cultures irriguées dans la région 1.
- le déplacement des masses d'eau durant la phase d'isolement du lac, sous l'effet des divers prélèvements et plus particulièrement de ceux destinés à l'irrigation de la canne à sucre (V_{p1}).

Le facteur de concentration des eaux de série à série d'échantillonnage (f.c.), calculé sur la base de l'évolution des teneurs en Na^+ et Cl^- , varie d'une région à une autre.

De la série 1 à la série 2, le f.c. moyen dans les régions 1 et 2 est de 2,5 contre seulement 1,5 aux régions 3, 4 et 5. Au phénomène d'évaporation se surimpose, dans le cas des régions 1 et 2, l'effet des rejets V_r à l'extrémité nord du lac. Se diluant dans ces eaux, les rejets traversent toute la partie septentrionale du lac, suivant en cela le mouvement général des eaux engendré par les pompages V_{p2} . Rappelons que les prélèvements V_{p1} ne sont pas effectifs durant cette période.

De la série 2 à la série 3, le f.c. moyen des eaux est cette fois le plus élevé dans les régions méridionales 4 et 5 ; il y atteint 3,7 durant cette période contre seulement 2,6 aux régions 1, 2 et 3. L'évaporation est alors le seul paramètre à entrer en jeu dans le processus de minéralisation des eaux ; les rejets V_r ne se diluent plus que très peu dans la région 1 puisque directement dirigés vers l'embouchure de la Taoué, aspirés par les importants pompages V_{p1} . Le f.c. moyen plus élevé dans les régions 4 et 5 s'explique par la morphologie de la partie méridionale du lac ; sa faible profondeur induit indirectement la minéralisation plus rapide de ses eaux. Enfin, sous l'effet des prélèvements V_{p1} , d'importantes masses d'eaux transitent de la région 5 à la région 4 d'où une minéralisation accrue de cette dernière par les eaux très chargées de l'extrémité méridionale du lac. Cette intervention est cependant très difficilement quantifiable.

Approche des mécanismes de la régulation bio-géochimique des eaux

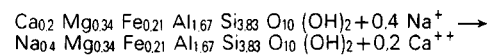
L'évolution des concentrations en Cl^- en cours d'année est exclusivement sous la dépendance des facteurs hydrologiques : apports fluviaux, rejets, prélèvements et évaporation. Cet élément peut donc être considéré comme conservatif, c'est-à-dire n'intervenant pas dans les phénomènes de la régulation chimique, géochimique et biologique, dans la colonne d'eau et le sédiment. Par contre les autres éléments risquent d'évoluer sous la dépendance simultanée des facteurs hydrologiques et biogéochimiques. Il est donc intéressant d'en étudier l'évolution par rapport à l'élément conservatif pris comme référence. Les relations entre les concentrations en Cl^- et chaque élément x (exprimées en logarithme de la concentration en moles/l) aux mêmes périodes d'échantillonnages sont illustrées par la figure 8. Sur chaque graphique nous tracerons également la droite théorique d'évolution de l'élément s'il était conservatif comme les chlorures. Cette droite a pour origine le point correspondant à la dilution de l'élément x pour une dilution maximale des Cl^- , puis évolue vers les zones à plus fortes concentrations selon un rapport x/Cl^- toujours identique.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

L'interprétation de l'évolution respective de chacun des paramètres par rapport aux chlorures est la synthèse d'une étude complète du sujet réalisé précédemment (COGELS, 1984). Elle concerne les mêmes paramètres que ceux envisagés ci-dessus auxquels nous ajouterons la silice dissoute dont nous n'avons cependant mesuré les concentrations que sur une courte période. L'étude se base à la fois sur des analyses hydrochimiques et sédimentologiques.

a) Sodium

Sodium et chlorures sont les paramètres dissous les plus conservatifs. La fig. 8a illustre la relation excellente liant les deux éléments qui évoluent de manière similaire. Malgré cela, on constate annuellement une légère perte du stock de l'élément dissous, non liée aux facteurs hydrologiques, mais très plausible si l'on s'en réfère aux réactions géochimiques dans le sédiment et plus particulièrement à la transformation de montmorillonite calcique en montmorillonite sodique selon la réaction :



(d'après GARRELS *et al.*, 1965).

Les analyses sédimentologiques du lac semblent confirmer la réaction proposée, particulièrement dans la région sud, puisque les pourcentages moyens de montmorillonite calcique et sodique sont les suivants :

- Région nord : 85 % Montmorillonite-Ca 15 % Mont-Na

- Région centre : 80 % Montmorillonite-Ca 20 % Mont-Na
- Région sud : 25 % Montmorillonite-Ca 75 % Mont-Na

b) Calcium

La fig. 8b indique une consommation notable de l'élément, croissante au fur et à mesure de l'augmentation de la salinité exprimée par les teneurs en Cl^- . Ce phénomène est normal si l'on se réfère à la précipitation de la calcite, et explique une consommation en Ca^{++} moyenne interannuelle dans le lac de l'ordre de 650 t. (COGELS, 1984). Les stations méridionales sont toute l'année en état de sursaturation vis-à-vis de la calcite, les zones centre et nord n'y parvenant qu'en fin de cycle hydrologique. En plus d'autres réactions possibles de néoformations argileuses, la voie biochimique explique aussi la disparition de l'élément, comme sa fixation dans les coquilles de mollusques, abondants sur le fond (1). Le cycle fixation-redissolution semble cependant rapide vu la sursaturation quasi générale des eaux en CO_2 et ce particulièrement dans les régions centre et nord ; la proportion de coquilles vides par rapport au nombre de mollusques vivants y est d'ailleurs très faible.

c) Sulfates

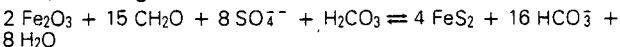
La régulation hydrochimique des sulfates est la plus complexe à interpréter (fig. 8c). Le tracé de la droite d'évolution théorique des solutions est problématique puisque les Cl^- et les SO_4^{--} , ne sont pas simultanément à leur taux de dilution maximum. Nous nous baserons sur le point de concentration en Cl^- le plus faible pour déterminer l'origine de la droite.

L'intervention des phénomènes biogéochimiques se surimpose aux rejets très importants de la CSS et explique la dispersion des points autour de la droite.

On peut penser dans ce cas à :

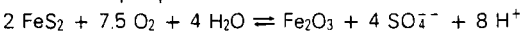
- Une sulfato-réduction au niveau des sédiments, confirmée d'ailleurs dans la région sud du Guiers (COGELS, 1984). Ce phénomène expliquerait l'énorme consommation annuelle de l'élément dans le lac (4 000 t) et les points situés sous la droite théorique d'évolution des solutions.

L'équation générale s'écrit :



Cette consommation des sulfates s'accompagne donc d'une production de bicarbonates.

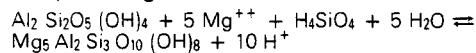
- Un relargage des SO_4^{--} , mis en évidence dans la région nord du lac (COGELS, 1984) qui explique la position des points situés au-dessus de la droite d'évolution théorique des solutions. L'équation suivante est proposée :



d) Magnésium

Les concentrations en Mg^{++} dissous évoluent conjointement avec celles des chlorures, du moins aux périodes à taux de dilution important des eaux lacustres. Aux plus fortes concentrations les points s'écartent de la droite d'évolution théorique de l'élément, prouvant ainsi son caractère non conservatif (fig. 8d). Ce phénomène débute cependant à des concentrations en Cl^- plus élevées que dans le cas du calcium. La consommation totale moyenne annuelle de magnésium dans le lac est de l'ordre de 550 t. Les processus biologiques (végétation aquatique et mollusque) n'interviennent sans doute que peu dans la régulation de l'élément dissous. Divers processus géochimiques de régulation ont été envisagés (COGELS, 1984) : le seuil de formation d'hydroxycarbonates n'est jamais atteint et, vu les conditions de pH et les teneurs élevées en HCO_3^- , la brucite n'a que peu de chances de se former. Si la formation de la sépiolite est par contre probable, la transformation kaolinite \rightarrow chlorite est la réaction sans doute la plus importante, la précipitation de la chlorite nécessitant un taux de sursaturation des eaux bien moindre que dans le cas de la sépiolite formée à partir de la phase liquide. Les études précédentes indiquent cette néoformation, principalement dans les régions centre et sud du lac.

L'équation générale s'écrit :



e) Potassium

Le caractère non conservatif du potassium est mis en évidence à la fig. 8e. La perte nette moyenne annuelle du stock de l'élément par voies autres qu'hydrologiques est estimée à 560 t. Les processus géochimiques, tels la formation de l'illite et surtout celle de montmorillonites potassiques à partir de montmorillonites calciques par simple échange Ca^{++} , K^+ , expliquent 80 % de la consommation annuelle. Ces réactions se déroulent pour l'essentiel dans la région méridionale du lac. La fixation de l'élément par voie biologique représente les 20 % restants. Au Guiers, les thyphaies constituent l'essentiel de la végétation aquatique. L'estimation de leur biomasse actuelle et l'extrapolation de données de productivité et de composition des végétaux recueillies au lac Tchad (CARMOUZE, 1976, CARMOUZE *et al.*, 1978) et au lac Nyumba en Tanzanie (GAUDET *et al.*, 1981) nous permettent de justifier la consommation annuelle de quelque 70 t de K^+ par cette voie.

f) Silice

N'ayant pu analyser la silice dissoute que durant la seule année hydrologique 1981-82, nous n'en n'avons pas traité précédemment. Les variations des teneurs

(1) Situation identique à celle observée par CARMOUZE (1976) au lac Tchad.

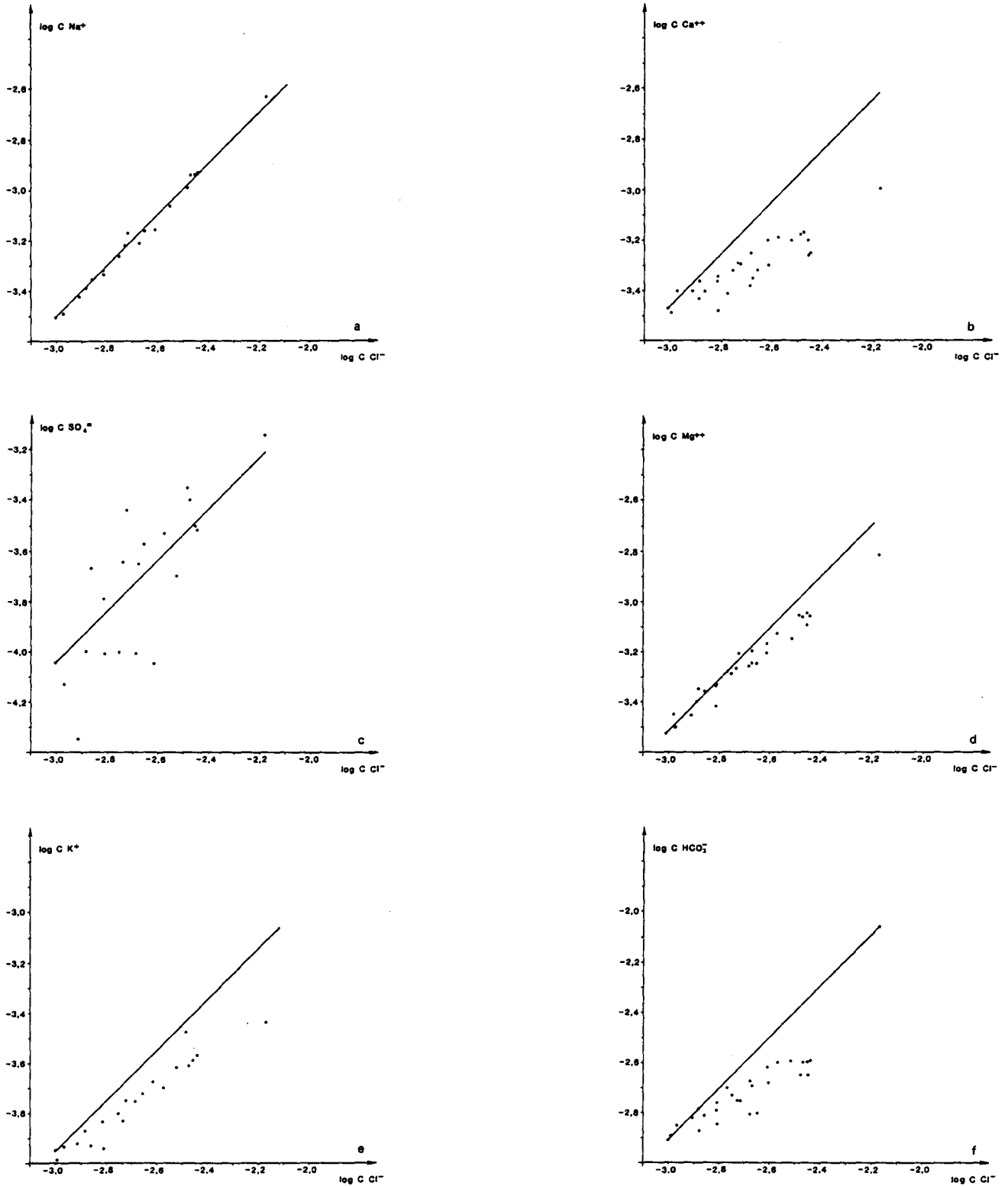


Fig. 8. — Concentration des éléments dissous en fonction des chlorures (log. de la molarité) et droite d'évolution théorique des solutions. a) sodium b) calcium c) sulfates d) magnésium e) potassium f) bicarbonates.

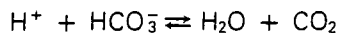
en SiO_2 dans le lac sont telles, au cours de cette année, qu'il est difficile d'en préciser une valeur moyenne et fonction de la hauteur des eaux dans le lac, comme nous l'avons fait pour les autres paramètres. Globalement les teneurs en SiO_2 varient de 5 à 25 mg/l. Le comportement de cet élément semble anarchique, le phytoplancton, diatomées essentiellement, jouant un rôle capital dans la régulation du paramètre. Durant l'année hydrologique 1981-82, les pertes par voies autres qu'hydrologiques ont été estimées à 5 000 t. Si l'on pose comme hypothèse que la quantité de silice fixée par les diatomées est entièrement restituée au milieu après dissolution des tests, la seule néoformation de la chlorite ne peut expliquer la disparition de l'élément. Comme au lac Tchad (CARMOUZE, 1976) c'est la néoformation de la nontronite qui est la plus plausible, selon l'équation :

$$1,96 \text{FeO}(\text{OH}) + 3,83 \text{SiO}_4\text{H}_4 + 0,20 \text{Mg}^{++} + 0,20 \text{Ca}^{++} = \text{Ca}_{0,20} \text{Mg}_{0,20} \text{Fe}_{1,96} \text{Si}_{3,83} \text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 0,8 \text{H}^+ + 14,48 \text{H}_2\text{O}$$

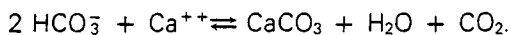
La néoformation de la nontronite s'accompagne d'une consommation de silice mais aussi de fer contenu dans la goethite. Or les sédiments du lac n'en contiennent que très peu (2 % de goethite) alors que les apports fluviaux en contiennent 3,5 % et les apports éoliens quelque 4 % (WOLLAST *et al.*, 1982). Ceci conforte l'hypothèse de la néoformation proposée.

g) Bicarbonates (fig. 8 f)

La régulation des bicarbonates est partiellement sous la dépendance des diverses réactions de néoformations proposées. En effet, la sulfato-réduction libère d'importantes quantités d' HCO_3^- ; les autres réactions (néoformation de la nontronite et de la chlorite) libèrent des ions H^+ qui, en se combinant avec les bicarbonates donneront du CO_2 et de l'eau selon la réaction



Les bicarbonates sont également consommés dans la réaction de formation de la calcite :



La consommation totale annuelle des HCO_3^- dans le lac est d'environ 1 300 t (COGELS, 1984). La quantification des apports et pertes liés aux diverses équations proposées permet de justifier la consommation annuelle de quelque 900 t. Le solide, soit 400 t entre probablement dans le cycle biologique et participe pour l'essentiel à l'élaboration des coquilles des mollusques aquatiques.

COMMENTAIRES

Les diverses réactions géochimiques proposées sont donc partiellement interdépendantes ; les produits de l'une pouvant devenir les réactifs de l'autre. Or, la quantification des éléments chimiques dissous ou libérés par voie géochimique semble assez bien correspondre avec les pertes autres qu'hydrologiques annuellement constatées (COGELS, 1984). Notons qu'au lac Tchad, les processus géochimiques proposés par CARMOUZE (1976) et GAC (1980) sont identiques aux nôtres pour le système $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2 - \text{CaO}$ et pour la formation de la nontronite. Par contre, dans le cas du magnésium, ces auteurs expliquent la disparition de l'élément par la réaction de néoformation de montmorillonites magnésiennes et ferrifères alors que nous la justifions par celle de la chlorite. L'absence de données minéralogiques, particulièrement dans la région sud du lac, ne permet pas de trancher entre les deux éventualités.

CONCLUSIONS

L'hydrochimie du lac de Guiers se caractérise par une évolution comprenant deux grandes phases : une phase de minéralisation progressive des solutions, sous l'effet de l'évaporation principalement, et correspondant à la période d'isolement du plan d'eau, suivie d'une phase de dilution par les apports fluviaux durant les quelque 3 mois de la période de remplissage. Cette évolution caractéristique se répète chaque année, plus ou moins accentuée selon le niveau du lac atteint en fin de phase de remplissage et en cours d'année hydrologique. L'hydrochimie lacustre se caractérise également par un très important gradient nord-sud de la salinité de ses eaux. La région méridionale se différencie nettement des régions nord et centre où les degrés de minéralisation sont assez identiques. Les conditions hydrochimiques extrêmes sont atteintes en fin de saison sèche dans la région sud lors de la formation puis de la progressive évaporation des mares délimitées par l'apparition de seuils. La concentration des solutions durant la phase d'isolement de lac entraîne une suite de déplacements d'équilibres chimiques, dans la colonne d'eau et le sédiment. Diverses réactions hydro-géochimiques ont été proposées. Elles jouent un rôle capital sur la régulation des paramètres chimiques dissous et expliquent la disparition annuelle d'une partie du stock des éléments étudiés par voie autre qu'hydrologique.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 20-12-1986.

BIBLIOGRAPHIE

- CARMOUZE (J.P.), 1976. — La régulation hydrogéochimique du lac Tchad. *Trav. et Doc. de l'ORSTOM* n° 58, 418 p.
- CARMOUZE (J.P.), FOTIUS (G.), LEVEQUE (Ch.), 1978. — Influence qualitative des macrophytes sur la régulation hydrochimique du lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol.*, vol. XII : 65-70.
- CARMOUZE (J.P.) et LEMOALLE (J.), 1983. — Lake Chad : The lacustrine environment. *In* : Lake Chad. Ecology and productivity of a shallow tropical ecosystem : 27-63. Monographiae Biologicae, vol. 53. Dr. W. Junk. Publishers. 575 p.
- COGELS (F.X.), GAC (J.Y.), 1982. — Le lac de Guiers : Fonctionnement, bilans hydriques — Évaporation d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne (Sénégal). *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol. XII, n° 1 : 41-60.
- COGELS (F.X.), GAC (J.Y.), 1983. — La chlorinité des eaux du lac de Guiers (Sénégal) — Bilan quantitatif, qualitatif et perspectives. *In* : Actes du colloque « Le lac de Guiers » — Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Dakar : 41-58.
- COGELS (F.X.), 1984. — Étude limnologique d'un lac sahélien : le lac de Guiers (Sénégal). Thèse doctorale, Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Arlon Belgique 329 p.
- GAC (J.Y.), 1980. — Géochimie du bassin du lac Tchad — Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. *Trav. et Doc. de l'ORSTOM*, n° 123, 251 p.
- GARRELS (R.M.), CHRIST (C.L.), 1965. — Solutions, Minerais and Equilibria. Harper and Row, N-Y. 450 p.
- GAUDET (J.J.), MITCHELL (D.S.), DENNY (P.), 1981. — Macrophytes (Aquatic Vegetation). *In* : The ecology and utilization of african inland waters : 27-36. UNEP. Reports and Proceedings, Series 1, 191 p.
- WOLLAST (R.), MACKENZIE (F.T.), 1982. — The global cycle of silica. *In* : Silicon Geochemistry, SR Aston (ed), Academic Press, London : 39-76.