

JACQUES LEMOALLE  
*Hydrobiologiste O.R.S.T.O.M.*  
I.N.R.A. 74203 Thonon

#### RÉSUMÉ

*Des poussées de diatomées et les diminutions concomitantes de silice dissoute (45 g SiO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) sont décrites à Bol et dans la cuvette nord du lac Tchad au cours d'une phase de bas niveau du lac (1973-74). L'influence de la diminution de silice sur les néoformations argileuses est discutée.*

#### ABSTRACT

*During a low level period of Lake Chad, seasonal developments of diatoms have been associated with a strong diminution of dissolved silica (up to 45 g SiO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) at Bol and in the northern basin of the lake. The resulting low concentration of silica may be of importance for the equilibria between sediment and water.*

La fixation de silice par les diatomées, notamment au printemps, est un phénomène bien connu dans les eaux continentales comme en milieu marin.

Les observations faites à ce sujet dans le lac Tchad présentent un intérêt particulier pour deux raisons : d'une part la silice est un élément de la régulation saline et intervient dans les phénomènes de sédimentologie du lac (CARMOUZE, 1970 et 1976 ; LEMOALLE, 1973), d'autre part les concentrations de silice mises en jeu sont particulièrement importantes.

#### RÉSULTATS

Les résultats présentés ici sont de deux types : séries chronologiques appliquées à une station précise (observations à Bol en 1973 et 1974) et observations étendues dans l'espace (cuvette nord du lac) mais quasi instantanées (22-30 avril 1974).

Les déterminations et comptages ont été effectués

au microscope inversé, et les biovolumes calculés d'après les dimensions moyennes des algues (ILTIS et LEMOALLE, 1975 ; ILTIS 1977, et *comm. pers.*). Pour le dosage de la silice réactive, on a utilisé la colorimétrie du complexe silico-molybdique réduit par le chlorure stanneux (GOLTERMAN, 1969).

#### (a) LE DÉVELOPPEMENT DES DIATOMÉES À BOL EN MARS 1973 (fig. 1)

La poussée des diatomées au début du réchauffement de l'eau est un phénomène courant dans la région de Bol (GRAS *et al.*, 1967). Le phénomène a été particulièrement net en mars 1973 à Bol avec une dominante de *Nitzschia spiculum* accompagnée de *Nitzschia* spp. et de *Melosira granulata* var. *angustissima*. Seules les variations en nombre de *N. spiculum* sont représentées figure 1. A un maximum de 36.450 cellules/ml (soit un biovolume de 17 mm<sup>3</sup>/l) correspond une diminution de 16 mg/lSiO<sub>2</sub>, le minimum de silice apparaissant environ 12 jours après le maximum des diatomées.

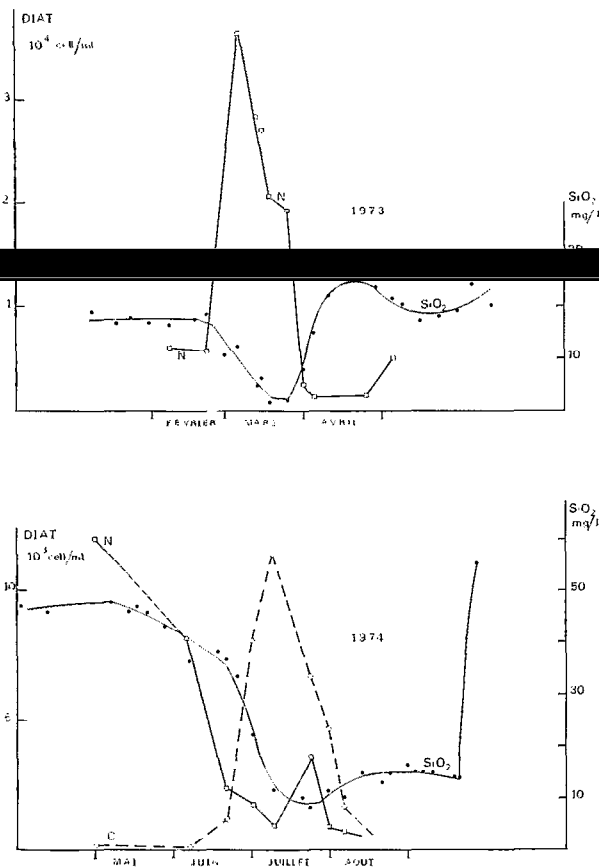


Fig. 1. — Nombre de diatomées et concentration en silice à Bol en mars 1973 ( $\square$  *Nitzschia spiculum*,  $\circ$  *Cyclotella meneghiniana*).

Number of diatoms left ordinate, ( $\square$  = *Nitzschia spiculum*,  $\circ$  = *Cyclotella meneghiniana*) and silica concentration (right ordinate) at Bol during march 1973 (top) and July 1974 (bottom).

La concentration en  $\text{SiO}_2$  croît ensuite rapidement pour prendre des valeurs légèrement plus élevées qu'en février. Rappelons qu'à cette époque le niveau de l'eau est très bas (profondeur 0,4 m) et que les macrophytes n'ont pas encore poussé : le sédiment superficiel est donc très sensible à la turbulence créée par le vent qui favorise les échanges entre l'eau et le sédiment.

#### (b) LE DÉVELOPPEMENT DES DIATOMÉES À BOL EN 1974 (fig. 1)

La faible poussée de *Nitzschia* spp. (12.000 cellules/ml, soit un biovolume de  $5 \text{ mm}^3/\text{l}$ ) en avril-mai 1974 (trois fois moins qu'en 1973) n'a pas modifié sensiblement la très forte concentration de  $45 \text{ mg/l}$  de silice réactive. Par contre, le dévelop-

pement de *Cyclotella meneghiniana*, qui atteint  $11.400 \text{ cellules/ml}$  (soit un biovolume de  $31 \text{ mm}^3/\text{l}$ ) le 10 juillet, provoque une diminution supérieure à  $30 \text{ mg/l}$  de la silice ; il apparaît, comme en 1973, un décalage d'une douzaine de jours entre le maximum de diatomées et le minimum de la silice. Celle-ci ne croît que modérément après la disparition des diatomées, et se stabilise vers  $15 \text{ mg/l}$  jusqu'au début de la crue lacustre. Notons que les conditions

de celles qui prévalaient en 1973 : les macrophytes, nombreux et bien développés, protègent du vent la faible surface d'eau restant libre et les prélèvements ont eu lieu à une station plus profonde à cette époque (1,5 m) que le point étudié en mars 1973 (0,4 m).

#### (c) OBSERVATIONS D'UNE POUSSÉE DE DIATOMÉES DANS LA CUVETTE NORD

De faibles concentrations en silice dissoute ont été observées en avril 1974 dans un certain nombre d'échantillons de la cuvette nord du lac. La composition en ions majeurs et silice des eaux du Tchad étant le plus souvent étroitement liée à leur conductivité, ces déficits en silice sont mis en évidence

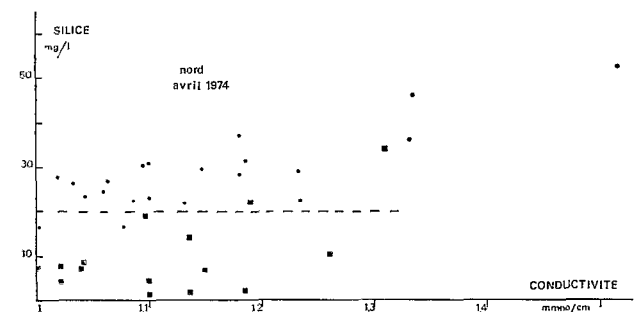


Fig. 2. — Diagrammes de la concentration en silice fonction de la conductivité, en avril 1974 dans la cuvette nord du lac. Les points encadrés correspondent aux stations dans lesquelles le biovolume des diatomées est supérieur à  $10 \text{ mm}^3/\text{l}$ .

Silica vs conductivity in the northern basin of lake Chad (April 1974). The squares indicate stations with a diatom biovolume exceeding  $10 \text{ mm}^3/\text{l}$ .

sur le diagramme  $\text{SiO}_2 = f(\text{conductivité})$  (fig. 2), par la dispersion vers le bas d'un certain nombre de points. On a vérifié par ailleurs que la modification de composition des échantillons correspondants ne porte que sur la silice et non sur les autres ions majeurs (d'après les données de CHANTRAINE et LEMOALLE, 1975), ce qui exclut une perte de silice par formation de composés minéraux insolubles. Le déficit de silice est donc ici indépendant de la

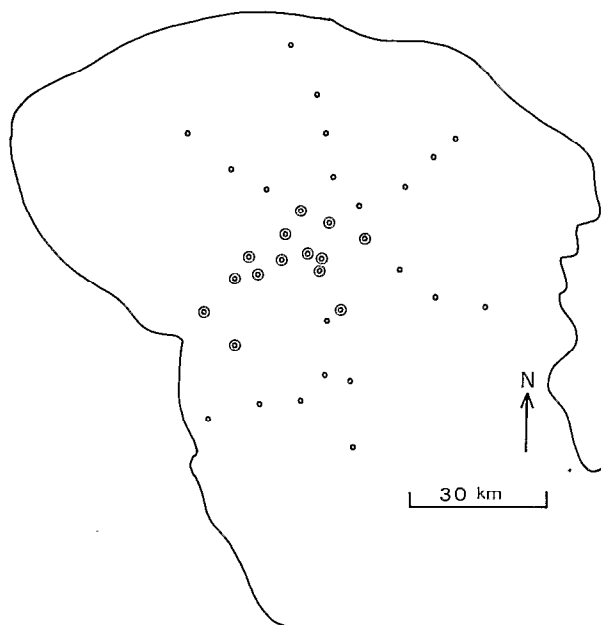


Fig. 3. — Localisation des stations (nord, avril 1974). Les stations où la concentration en silice est inférieure à 20 mg/l sont entourées d'un cercle.

Sampling stations in the northern basin (April 1974), and silica depleted stations (circles).

composition de l'eau; par contre les stations correspondantes sont toutes regroupées dans le centre-ouest de la cuvette (fig. 3) et sont caractérisées par une grande concentration de diatomées.

Les comptages d'algues ayant été convertis en biovolumes, *Cyclotella meneghiniana* et *Coscinodiscus rudolfii* forment l'essentiel du phytoplancton lorsque les diatomées sont dominantes (LITIS, 1977 et *comm. pers.*). Un certain nombre de stations présentent des « concentrations » en diatomées supérieures à 10 mm<sup>3</sup>/l. Dans le diagramme SiO<sub>2</sub> = f (conductivité), (fig. 2), les points représentatifs de ces stations sont encadrés. On constate qu'ils sont situés dans le domaine SiO<sub>2</sub> < 20 mg/l, à l'exception de deux stations (numérotées K39 et K40). Inversement, on trouve dans ce domaine deux stations pour lesquelles les « concentrations » en diatomées sont respectivement de 9,6 et 9,3 mm<sup>3</sup>/l, valeurs encore très proches de la limite 10 mm<sup>3</sup>/l arbitrairement

Il y a donc un lien évident entre les faibles taux de silice dissoute et la quantité de diatomées présentes. Les observations effectuées à Bol ont permis de constater un décalage entre le maximum des diatomées et le minimum de silice. Dans le cas de la cuvette nord, l'échantillonnage est déployé sur une grande surface, mais presque ponctuel dans

le temps. Il peut donc ne pas y avoir de relation étroite entre concentration en silice et nombre de diatomées, cette relation dépendant de la phase de développement des algues, qui peut être différente suivant les stations. C'est pourquoi une sélection entre stations « pauvres » et stations « normales » en silice a seule été faite.

Revenons aux deux stations K39 et K40, riches à la fois en silice et en diatomées, ce qui paraît incompatible. Un vent d'une force inhabituelle a soufflé dans la portion de matinée précédant ces prélèvements, la couleur de l'eau passant de vert foncé la veille au soir, à gris. Il y a donc eu, au cours de la nuit, remise en suspension de sédiment superficiel et possibilité de transfert de silice dans l'eau libre par dilution de l'eau interstitielle correspondante (deux analyses d'eau interstitielle de sédiment juste exondé à Kindjéria ont donné la même concentration de silice : 75 mg/l, valeur sensiblement plus élevée que pour l'eau du lac).

Dans l'hypothèse où une turbulence au niveau du fond contribue à augmenter la quantité de silice dissoute dans l'eau sus-jacente lorsque celle-ci est relativement appauvrie, les concentrations presque normales mesurées aux stations K39 et K40 seraient expliquées, de même que serait expliqué le retour rapide à 20-23 mg/l de la concentration en silice à Bol en avril 1973.

## DISCUSSION

### (a) COMPARAISON AVEC D'AUTRES LACS

Les exemples publiés dans la littérature concernent principalement les régions tempérées où les concentrations initiales en silice, C<sub>0</sub>, sont beaucoup plus faibles que dans le lac Tchad, mais où la profondeur de la zone euphotique est plus grande. Deux paramètres sont donc à considérer : les variations de concentration ΔC, souvent proches de C<sub>0</sub>, et les quantités Q mises en jeu par unité de surface.

Ainsi dans les lacs du Lake District (Grande Bretagne) une consommation de presque toute la silice disponible (2 à 3 mg/l) représente une faible variation ΔC, mais porte sur des profondeurs de l'épilimnion supérieures à 5 m (LUND, 1949 et 1950). En bilan annuel GRIM (1939) évalue Q = 60 g/m<sup>2</sup> pour ΔC de l'ordre de 5 mg/l. Dans le Lough Neagh, lac peu profond, Q varie de 60 à 70 g/m<sup>2</sup> au cours de deux années successives pour ΔC = 5,1 mg/l. D'après les données de BAILEY-WATTS (1976 a, b) on peut évaluer Q à 50 g/m<sup>2</sup> en moyenne sur 4 ans dans le Loch Leven, avec ΔC ne dépassant pas 11 mg/l.

Un appauvrissement en silice de l'ordre de 30 mg/l,

tel que ceux observés à Bol et en certains points de la cuvette nord du lac Tchad en 1974, correspond à  $Q = 45 \text{ g/m}^2$  pour la seule poussée de diatomées du début de réchauffement des eaux. Les variations en concentration sont donc supérieures à celles que l'on peut observer en régions tempérées, mais elles portent sur une colonne d'eau réduite (1,5 m). Par unité de surface, l'action des diatomées sur la silice, bien qu'importante, n'est donc pas particulièrement notable dans le lac Tchad si l'on estime que les biomasses en 1974 sont élevées par rapport à celles qui se développent en période de Tchad normal.

Rappelons cependant que les apports fluviaux moyens en silice dissoute sont évalués à  $9,7 \cdot 10^9 \text{ g SiO}_2/\text{an}$  (CARMOUZE, 1976) soit 51 g par mètre carré de lac Tchad « normal ». L'importance des diatomées doit donc être prise en compte dans l'étude du comportement de la silice, puisque les fixations constatées sur une courte période en 1974 sont du même ordre de grandeur que les apports moyens.

Il est possible qu'une partie de la silice ainsi sédimentée sous forme de frustules soit remise en solution, encore que les conditions de leur dissolution soient mal connues et que la matière organique et

(1976) a étudié les réactions qui se produisent entre les particules et les eaux interstitielles ou sus-jacentes. Si nous suivons le point représentatif du milieu dans les diagrammes d'équilibre (d'après les constantes d'équilibre de ROBIE et WALDBAUM, 1968, et TARDY, 1969) (fig. 4), l'évolution normale va du

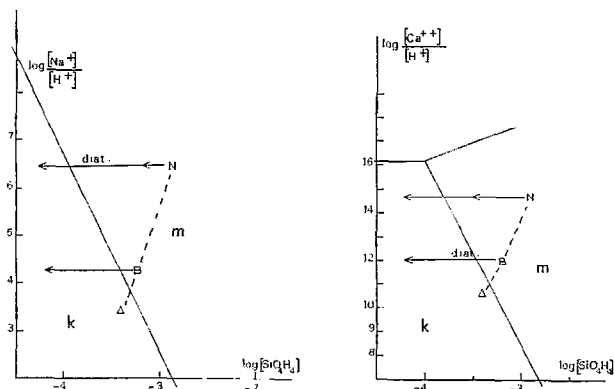


Fig. 4. — Évolution d'un point représentatif des conditions de milieu normal depuis le delta ( $\Delta$ ) jusqu'à Bol (B) ou la cuvette nord (N) (tireté). Le déficit de silice dû aux diatomées ramène le point dans le domaine de la stabilité de la

comme des inhibiteurs (JØRGENSEN, 1955 ; LEWIN, 1961). Dans les lacs alcalins équatoriaux de l'Afrique de l'Est, HECKY et KILHAM (1973) estiment respectivement à 3-15 et 10-16 mé/l les domaines d'alcalinité dans lesquels prolifèrent *Cyclotella meneghiniana* et *Coscinodiscus rudolfii*. Dans ces conditions, qui sont assez semblables de celles rencontrées dans la cuvette nord en avril 1974 (alcalinité de 10 à 16 mé/l), les tests des diatomées sont retrouvés absolument intacts dans le sédiment superficiel. Il ne s'y produit donc pas de dissolution malgré un pH égal ou supérieur à 9, favorable à une grande solubilité de la silice.

#### (b) INFLUENCE SUR LES ÉQUILIBRES EAU-SÉDIMENT

Sur un plan théorique, nous pouvons considérer les effets des variations de concentration en silice sur les réactions d'équilibre et de néoformation des sédiments du lac.

L'évolution des conditions moyennes de milieu, par augmentation de la concentration des eaux à partir du delta, sont telles que l'on quitte le domaine de stabilité de la kaolinite pour entrer dans celui de la montmorillonite (LEMOALLE, 1973). CARMOUZE

sont respectivement désignés par *k* (kaolinite) et *m* (montmorillonite).

*Stability diagrams of kaolinite (k) and montmorillonite (m) (from TARDY, 1969). Due to evaporation, ionic concentrations usually increase from the river delta ( $\Delta$ ) to Bol (B) or the northern basin (N), thus crossing the boundary between k and m. By lowering the dissolved silica concentration, the diatom peaks bring the water back in the kaolinite domain (arrows).*

delta ( $\Delta$ ) à Bol (B) ou à la cuvette nord (N) par concentration progressive des eaux. La diminution de la concentration en silice provoquée par le développement des diatomées ramène brusquement le point représentatif dans le domaine de stabilité de la kaolinite, et ceci tant que de nouveaux équilibres ne rétablissent pas la concentration en silice.

En estimant que les diagrammes d'équilibres peuvent être utilisés pour prévoir les tendances des réactions, nous constatons donc que les poussées de diatomées peuvent perturber de façon nette le cours moyen des néoformations de sédiments du lac.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'O.R.S.T.O.M. le 18 avril 1978.*

## BIBLIOGRAPHIE

- BAILEY-WATTS (A. E.), 1976, a. — Planktonic diatoms and silica in Loch Leven, Kinross, Scotland : a one month silica budget. *Freshwater Biology*, 6 : 203-213.
- BAILEY-WATTS (A. E.), 1976, b. — Planktonic diatoms and some diatom-silica relations in a shallow eutrophic Scottish Loch. *Freshwater Biology*, 6 : 69-80.
- CARMOUZE (J.-P.), 1970. — Salures globales et spécifiques dans les eaux du lac Tchad. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, vol. II, n° 1 : 61-65.
- CARMOUZE (J.-P.), 1976. — La régulation hydrogéochimique du lac Tchad. *Trav. et Doc. O.R.S.T.O.M.*, n° 58, O.R.S.T.O.M., Paris, 418 p.
- CHANTRAINE (J. M.), LEMOALLE (J.), 1975. — Analyses d'eau du lac Tchad de septembre 1973 à décembre 1974. *O.R.S.T.O.M. N'Djaména*, 17 p. *multigr.*
- DICKSON (E. L.), 1975. — A silica budget for Lough Neagh, 1970-72. *Freshwater Biology*, 5 : 1-12.
- GOLTERMAN (H. L.), CLYMO (R. S.), 1969. — Methods for chemical analysis of fresh waters. IBP Handbook n° 8. Blackwell, Oxford, 166 pp.
- GRAS (R.), ILTIS (A.), LÉVÊQUE-DUWAT (S.), 1967. — Le plancton du Bas Chari et de la partie est du lac Tchad. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrobiol.*, vol. I, n° 1-4 : 25-100.
- GRIM (J.), 1939. — Beobachtungen am Phytoplankton des Bodensees (Obersee) sowie deren rechnerische Auswertung. *Int. Rev. Hydrobiol.*, 39 : 193-315.
- HECKY (R. E.), KILHAM (P.), 1973. — Diatoms in alkaline, saline lakes : ecology and geochemical implications. *Limnol. Ocean.* 18, 1 : 53-71.
- ILTIS (A.), 1977, a. — Peuplements phytoplanctoniques du lac Tchad. I. Stade Tchad normal (février 1971 et janvier 1972). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrobiol.*, vol. XI, n° 1 : 33-52.
- ILTIS (A.), 1977, b. — Peuplements phytoplanctoniques du lac Tchad. II : Stade Petit Tchad (avril 1974, novembre 1974 et février 1975). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrobiologie*, vol. XI, n° 1 : 53-72.
- ILTIS (A.), LEMOALLE (J.), 1975. — Un plancton à diatomées à Bol (lac Tchad) en 1973. *O.R.S.T.O.M. N'Djaména*, 21 p. *multigr.*
- JORGENSEN (E. G.), 1955. — Solubility of silica in diatoms. *Physiol. Pl.*, 8 : 846-851.
- LEMOALLE (J.), 1973. — Iron bearing oolites and the present conditions of iron sedimentation in Lake Chad (Africa). in *Ores in sediments*, G. C. Amstutz et A. J. Bernard eds, Springer Verlag, Berlin.
- LEWIN (J. C.), 1961. — The dissolution of silica from diatom walls. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 21 : 182-189.
- LUND (J. W. G.), 1949. — Studies on *Asterionella*. I. The origin and nature of the cells producing seasonal maxima. *J. Ecol.*, 37 : 389-419.
- LUND (J. W. G.), 1950. — Studies on *Asterionella formosa* Hass. II. Nutrient depletion and the spring maximum. *J. Ecol.*, 38 : 1-35.
- ROBIE (R. A.), WALDBAUM (D. R.), 1968. — Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298,15°K, and one atmosphere pressure, and at higher temperatures. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 1259, 256 p.
- TARDY (Y.), 1969. — Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 31, 199 p.