

BILAN DES APPORTS EN FER AU LAC TCHAD (1970-1973)

J. LEMOALLE

Hydrobiologiste à N'Djaména

RÉSUMÉ

On définit le fer réactif comme étant le fer qui est en solution après 10 minutes d'ébullition de l'échantillon brut en milieu HCl 4 %. Le fer réactif apporté au lac Tchad par le Chari et le Logone a été dosé sur des échantillons recueillis chaque semaine. Bien que les volumes d'eau écoulés aient décreu de 1970-71 à 1972-73, les apports en fer ont augmenté : 98, 110 et 147 milliers de tonnes pour les trois années hydrologiques successives, ce qui met en valeur le rôle des plaines d'inondation, qui n'a pas joué la dernière année, par suite d'une crue particulièrement faible. L'étude des variations de concentration de la silice dissoute permet d'interpréter en partie les variations des débits en fer selon que les eaux ont ruisselé sur les terrains ou au contraire percolé à travers les sols inondés du bassin versant.

ABSTRACT

Reactive iron has been determined as iron which is present in solution after ten minutes of boiling of a raw water sample with 4 % HCl. The reactive iron brought to lake Chad by the Chari and Logone rivers has been measured weekly. Although the water volumes reaching the lake have decreased from 1970-71 to 1972-73, the iron load brought to the lake has increased: 98, 110 and 147 thousand metric tons for 1970-71, 1971-72 and 1972-73 respectively. This shows the importance of the "flood plains" which were not flooded the last season, due to an unusually low flood. A survey of the seasonal pattern of dissolved silica during the last year was used to explain in part the variations of reactive iron according to the ratio between waters which have been either running on or seeping through the soils in the catchment area.

INTRODUCTION.

L'importance du fer dans les eaux du Lac Tchad a déjà été signalée, tant pour la sédimentologie que pour la productivité de ses eaux. En effet, les pseudo-sables décrits par GUICHARD (1957) couvrent une surface de 2 700 km² environ au fond du lac (DUPONT, 1970) et sont constitués de granules à structure oolithique contenant 30 à 40 % d'oxydes de fer. La quantité ainsi accumulée est de l'ordre de 20.10⁶ tonnes de fer, dans un sédiment superficiel probablement autochtone et peut-être en cours de formation (LEMOALLE, DUPONT, 1973). D'autre part, les particules fines en suspension dans les eaux du

lac jouent un rôle complexe dans la production primaire : probablement positif par leur association avec les cellules du phytoplancton, ce rôle est en partie négatif par l'énergie lumineuse absorbée aux dépens de la photosynthèse; une liaison directe a en effet été montrée entre le fer des particules et la transparence de l'eau (LEMOALLE, 1973).

Le Lac Tchad n'ayant pas d'exutoire, un bilan des apports au lac peut permettre de situer l'ordre de grandeur des phénomènes mis en jeu dans les différents comportements du fer dans le lac. Ce bilan a été fait pour trois années hydrologiques de mai 1970 à avril 1973, en liaison avec une étude des débits solides du Chari à Chagoua et du Logone à Fort-Foureau, juste avant leur confluent à

N'Djaména (nouveau nom de Fort-Lamy) (1). Les pertes entre cette ville et le lac ont jusqu'à présent été jugées négligeables. Pour plus de détail sur l'hydrologie de ces deux fleuves qui représentent 95 % des apports fluviaux au lac, on se reportera à BILLON (1968), CARRÉ (1972) et CHOURET (1973).

On estime que le fer dosé au cours de cette étude est le fer susceptible de réagir assez facilement dans le milieu naturel sous l'effet de variations du milieu physicochimique ou biologique. La littérature et l'expérience prouvent que les formes du fer analysées sont le mieux définies par le mode opératoire utilisé, c'est pourquoi la méthodologie peut ici paraître assez développée.

MÉTHODES.

Le débit en fer des fleuves peut être défini par la somme du fer dissous et du fer particulaire qui transitent en une section. Si l'élément dissous peut être considéré en première approximation comme distribué de façon homogène dans toute la section, il n'en est pas de même des particules. Les résultats utilisés ici sont la moyenne arithmétique des concentrations en trois points de la surface (rive gauche, milieu, rive droite) multipliée par un facteur dépendant de la section de la rivière : ici 1,05 pour le Chari à Chagoua et 1,10 pour le Logone à Fort-Foureau (CARRÉ, 1972).

Nous n'avons pas fait la distinction entre fer soluble et fer particulaire parce que d'une part les concentrations en fer soluble sont faibles ($< 50 \text{ mg/m}^3$) relativement au fer particulaire, et d'autre part les résultats trouvés dépendent des conditions de filtration et de la quantité de particules présentes dans l'échantillon. En effet le fer analytiquement considéré comme soluble est celui qui passe à travers un filtre de diamètre moyen des pores de 0,45 micron. Au cours de la filtration les pores se colmatent progressivement, leur diamètre utile diminue et les premières gouttes qui passent sont plus de dix fois plus concentrées en fer que les dernières (LEMOALLE, 1969). Il en résulte une sous-estimation du fer soluble d'autant plus importante que l'échantillon est riche en particules. L'erreur étant fonction de la quantité et de la taille des particules, il est difficile de trouver un mode opératoire convenable.

L'échantillon brut a donc été attaqué de façon suffisamment douce pour ne mettre en solution que le fer susceptible de réagir dans des conditions naturelles. L'attaque se fait en milieu chlorhydrique à 4 %, par une ébullition de dix minutes en présence de chlorhydrate d'hydroxylamine, suivant la technique préconisée par STRICKLAND et PARSONS (1965). Selon ces auteurs, les argiles ne sont pratiquement pas détruites.

Dans deux séries de quinze mesures, des comparaisons ont été faites entre cette méthode et la

détermination du « fer libre » utilisée en pédologie (DEB, 1950) : le fer libre de nos échantillons correspond en moyenne à $100 \pm 15 \%$ du fer réactif déterminé après attaque chlorhydrique. L'analyse proprement dite a été faite ensuite, après centrifugation, par colorimétrie de l'orthophénanthroline ferreuse en milieu tampon acétate (GOLTERMAN, 1969), soit manuellement, soit sur analyseur automatique Technicon. La reproductibilité du dosage complet (attaque plus colorimétrie) a été calculée sur une série de vingt-quatre échantillons analysés en double. L'écart type intraclasse calculé (C.E.A., 1969) est de 38 pour une concentration de l'ordre de $2\,000 \text{ mg/m}^3$ de fer.

Enfin, en deux occasions une analyse complète des suspensions du Chari et du Logone a été faite. Les valeurs obtenues pour le fer correspondent au fer total contenu dans les suspensions recueillies, extrait par attaque triacide (DABIN, 1965). Les teneurs en Fe_2O_3 trouvées : 9,25 et 8,50 % pour le Logone et 7,20 et 7,40 % pour le Chari sont plus faibles que dans la plupart des sédiments du lac. Il convient donc de signaler que l'acide chlorhydrique utilisé pour faire flocculer les particules en suspension dans dix litres d'eau suffit à la mise en solution d'une partie du fer associé aux particules (pH 2,5). Ce fer représente 3 à 8 % du fer réactif tel que nous le déterminons, ce qui est important dans une étude sur le fer, mais n'intervient que pour 0,5 % dans l'estimation des concentrations solides.

RÉSULTATS (2).

Les volumes d'eau apportés au lac par le Chari au cours des trois années hydrologiques étudiées sont différents les uns des autres. En effet, la première année, 1970-71, est une année où le volume écoulé est légèrement inférieur à la moyenne, 1971-72 est une année faible considérée comme décennale sèche. Enfin 1972-73 a vu des débits très faibles, résultats d'une pluviométrie très pauvre sur le bassin versant, simultanés de la sécheresse de toute la zone sahélienne (fig. 1). Au cours de ces trois années les apports en eau au Lac Tchad n'ont pas suffi à compenser les pertes par évaporation et infiltration, et le niveau du lac a baissé, entre mai 1970 et mai 1973, de 2,0 m (échelle de Bol).

Pour chacun des cycles annuels, le Logone fournit les premiers apports importants en fer; en juin et juillet les eaux rouges du Logone restent nettement visibles sur la rive gauche du fleuve, en aval du

(1) Les prélèvements ont été effectués par l'équipe d'hydrologie et analysés au laboratoire du Centre O.R.S.T.O.M., N'Djaména.

(2) Les tableaux de résultats sont disponibles au Centre O.R.S.T.O.M., B. P. 65, N'Djaména, Tchad.

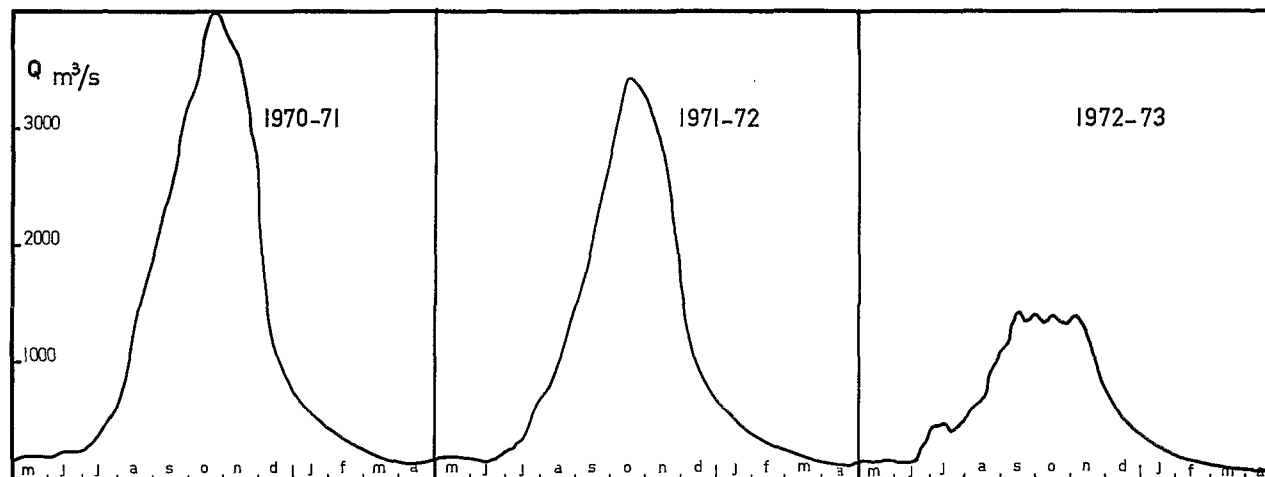


Fig. 1. — Les débits du Chari à N'Djaména (après le confluent du Logone) au cours des trois années considérées.

confluent. Les concentrations atteignent 20 à 30 mg Fe/l. En août le niveau du Logone est assez haut, en année normale, pour qu'une partie de ses eaux se déverse dans les plaines d'inondation. Ce sont des eaux de crue, riches en suspensions solides, qui vont décanter dans les plaines. Dans une année proche de la normale comme en 1970-71 et même en 1971-72, le Chari a un apport en fer plus régulier. Au-delà d'une certaine cote de crue, il se déverse dans des affluents des volumes d'eau qui sont, pour la plupart, perdus pour lui. Le Logone au contraire, inonde de vastes plaines mais récupère en partie ses propres eaux, ainsi que celles du Chari, filtrées par la végétation. Il s'enrichit donc d'eaux claires à peu de distance du confluent, et malgré un débit liquide important, ses apports solides sont peu importants à partir d'octobre. Au cours de leur cheminement normal les eaux des deux fleuves se chargent légèrement en suspensions, peut-être par érosion des berges (CHOURÉ, 1972).

En 1972-73 le schéma précédent ne s'applique plus car les seuils de déversement n'ont pas tous été atteints. Le débit en fer du Chari a légèrement diminué : 44 500 tonnes au lieu de 52 000 et 59 000 tonnes en 1970-71 et 1971-72, respectivement, alors que les apports liquides sont nettement plus faibles (fig. 2). Le Logone, par contre, n'a pas inondé les plaines à l'ouest de son lit, dans lesquelles il perdait beaucoup de suspensions, et n'a presque pas reçu d'eaux épurées des plaines à l'est de son cours, eaux provenant soit du Chari, soit de déversements du Logone lui-même, en amont. Il n'y a donc pratiquement pas eu de pertes cette année, et 102 000 tonnes de fer sont arrivées à N'Djaména par le Logone, contre 46 000 et 51 000 tonnes en 1970-71 et 1971-72 respectivement.

Le transit à N'Djaména, donc les apports en fer au lac, se chiffre ainsi pour les trois années :

1970-71.....	98 000 tonnes
1971-72.....	110 000 tonnes
1972-73.....	147 000 tonnes

La fraction du fer réactif par rapport au débit solide, soit Fe/Cs, a été calculée au cours de ce bilan. Ce rapport a un maximum entre septembre et janvier (fig. 2). A court terme les fluctuations relativement importantes peuvent s'expliquer, outre les incertitudes de mesure, par des remaniements de berges ou de bancs de sable localisés à peu de distance en amont des stations de prélèvements. Pour chacune des trois années une évolution saisonnière apparaît : pauvreté relative en période de basses eaux et de début de crue, maximum du pourcentage en fer de septembre à janvier, c'est-à-dire après le maximum des pluies, quand les eaux de ruissellement ont moins d'importance que les eaux d'infiltration qui ont percolé dans les terrains gorgés d'eau. On sait que ces eaux, de potentiel d'oxydoréduction bas, entraînent dans leur mouvement du fer sous forme réduite, dissoute et donc mobile. La réduction n'est pas instantanée et ne se produit qu'après un certain temps d'engorgement (VIZIER, 1970). On est donc conduit à penser que là est l'origine de l'importance relative du fer entre septembre et janvier. Aux basses eaux, lorsque les terrains sont plus secs, le fer a moins de chances de parvenir à l'état ferreux jusque dans l'eau des rivières.

Cette importance relative du fer a légèrement augmenté au cours des trois années de ce bilan, ce qui peut être un indice de l'importance croissante des eaux d'infiltration quand les pluies deviennent

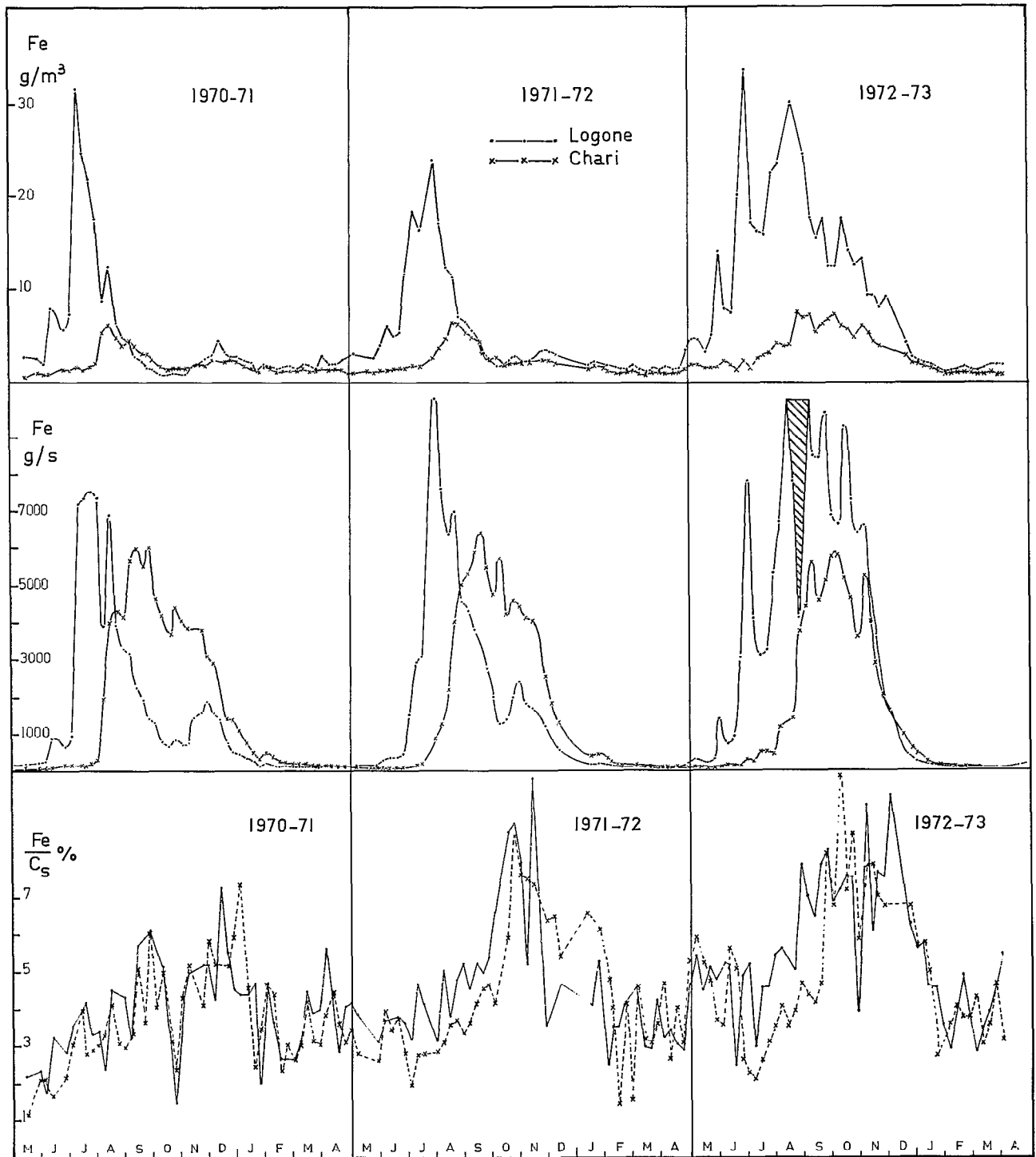


Fig. 2. — En haut, concentrations en fer réactif (Fe g/m^3) dans le Chari et le Logone. Au milieu, courbe des débits en fer réactif (Fe g/s) dont la planimétrie a permis le calcul des apports annuels au lac. Le pic inversé, hachuré, est un rabattement du pic vrai qui sortait des limites de la figure. En bas, rapport, exprimé en %, du fer réactif au débit solide total (pointillé : Chari ; trait plein : Logone).

moins abondantes et ont donc moins tendance à causer des ruissellements intenses.

Quand les eaux d'infiltration parviennent dans les rivières, dans un milieu riche en oxygène et de potentiel plus élevé, le fer ferreux dissous passe à l'état ferrique et, étant donné les conditions de pH, devient particulaire. Nous n'avons pu jusqu'à présent déterminer si ces particules sont individualisées par rapport aux argiles en suspension, ou si le fer est adsorbé sur l'argile. Il reste néanmoins très réactif, soit par action chimique, soit par action de surface (adsorption), notamment vis-à-vis des phosphates et de la silice.

Des analyses sur échantillons filtrés de la silice réactive (GOLTERMAN, 1969), supposée dissoute, ont été faites au cours de l'année 1972-73. Bien que certaines données manquent (fig. 3), il semble que la concentration en silice ait suivi une évolution saisonnière opposée à celle du fer.

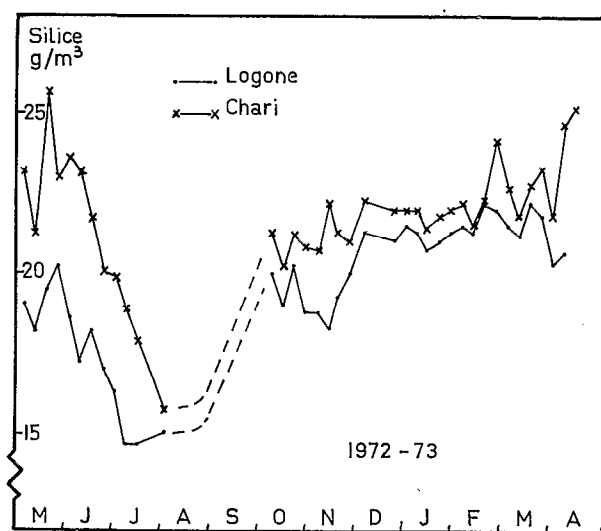


Fig. 3. — Concentrations en silice dans le Chari et le Logone au cours de l'année 1972-73. En tireté, forme de la courbe pour la période au cours de laquelle seules quelques analyses ont été faites.

La séquence des phénomènes au cours de l'année peut s'expliquer comme suit :

— de juillet à septembre : grande concentration en fer (les eaux de ruissellement n'ont pas eu le temps de se charger en silice),

— de septembre à janvier : diminution des concentrations en fer (due à l'importance relative des eaux de percolation qui ont dissous la silice),

— de janvier à juin : très peu de fer dans les fleuves, les eaux de percolation ont séjourné longtemps dans les roches, le fer reste bloqué lorsque leur potentiel remonte, la silice reste en solution.

Cette variation saisonnière est à rapprocher de celle trouvée par ROCHE (1968) pour les débits en sels du Chari.

CONCLUSION.

L'ordre de grandeur des apports en fer réactif au Lac Tchad par le Chari se situe à 10^5 tonnes en année moyenne. Ce fer est associé à environ vingt fois plus de particules minérales et son importance s'accroît en année de faible crue : les apports eux-mêmes sont plus importants, et ceci dans un lac qui perd alors une proportion notable de son volume. La comparaison entre année normale et année déficitaire a permis de mettre en évidence le rôle des plaines d'inondation qui fixent une fraction importante des apports solides.

Par l'interprétation simple des variations, au niveau de N'Djaména, de l'importance relative du fer par rapport au débit solide total, nous avons présenté un schéma de comportement du fer seul qui s'inscrit dans un ensemble complexe d'érosion et d'altération dans la partie amont du bassin dont l'étude est en cours (GAC, 1973). Ce schéma est résumé en un tableau où le nombre des croix représente les variations au cours de l'année de chacun des éléments des colonnes.

Période	Fer total	Fer ruissellement	Fer percolé	Silice
Juillet à septembre..	+++	+++	+	+
Septembre à janvier.	++	++	+++	++
Janvier à juin.....	+	+	+	+++

Manuscrit reçu au S.C.D. le 18 février 1974.

BIBLIOGRAPHIE

- BILLON (B.), 1968 — Mise au point des mesures de débits solides en suspension (Rép. du Tchad). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrol.*, 5, 2 : 3-15.
- CARRE (P.), 1972 — Quelques aspects du régime des apports fluviaux de matériaux solides en suspension vers le Lac Tchad. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrol.*, 9, 1 : 19-45.
- C.E.A., 1969 — Méthodes statistiques en chimie analytique. DUNOD, Paris, vol. 3, fasc. 2, 34 p.
- CHOURET (A.), 1973 — Étude des transports solides en suspension au Tchad. (Campagne 1971-72). O.R.S.T.O.M., Fort-Lamy, 33 p. *multigr.*
- DABIN (B.), 1965 — Application des dosages automatiques à l'analyse des sols. 1^{re} partie. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 8, 4 : 335-566.
- DEB (B. C.), 1950 — The estimation of free iron oxides in soils and clays, and their removal. *J. Soil Sc.* 1, 2 : 212-220.
- DUPONT (B.), 1970 — Distribution et nature des fonds du Lac Tchad (nouvelles données). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.* ; 2, 1 : 9-42.
- GAC (J.-Y.), PINTA (M.), 1973 — Bilan de l'érosion et de l'altération en climat tropical humide. Estimation de la vitesse d'approfondissement des profils. Étude du bassin versant de l'Ouham (République Centrafricaine). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, 5, 1 : 84-93.
- GOLTERMAN (H. L.), GLYMO (R. S.), 1969 — Methods for chemical analysis of fresh waters. IBP, London, 172 p.
- GUICHARD (E.), 1957 — Sédimentation du Lac Tchad. O.R.S.T.O.M., Fort-Lamy, 46 p. *multigr.*
- LEMOALLE (J.), 1969 — Premières données sur le fer soluble dans le Lac Tchad. O.R.S.T.O.M., Fort-Lamy, 10 p. *multigr.*
- LEMOALLE (J.), DUPONT (B.), 1973 — Iron bearing oolites and the present conditions of iron sedimentation in Lake Chad (Africa). In Ores in sediments, GC. AMSTRUTZ, A. J. BERNARD eds, Springer Verlag : 167-178.
- LEMOALLE (J.), 1973 — L'énergie lumineuse et l'activité photosynthétique du phytoplancton dans le Lac Tchad. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrobiol.*, 7, 2 : 95-116.
- ROCHE (M. A.), 1968 — Première estimation des apports en sels au Lac Tchad par le Chari. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrol.*, 5, 1 : 55-76.
- STRICKLAND (J. D. H.), PARSONS (T. R.), 1965 — A manual of sea water analysis. *Fish. Res. Bd Canada Bull.*, 125, 103 p.
- VIZIER (J. F.), 1970 — Étude des phénomènes d'hydromorphie et de leur déterminisme dans quelques types de sols du Tchad. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 8, 1 : 33-47.