

IX^e Congrès International de Sédimentologie
NICE - 1975

Aspects sédimentologiques actuels d'un Bassin
Continental endoréique : le Bassin Tchadien.
par J.P. CARMOUZE, C. CHEVERRY, J.Y. GAC,
G. MAGLIONE, M. A. ROCHE, Chercheurs à
l'O.R.S.T.O.M., 24, Rue Bayard
Paris 8^{ème}, France.

La dynamique des eaux et des éléments minéraux en solution et en suspension, d'un bout à l'autre du système hydrologique du Lac Tchad, représente un modèle du triptyque "érosion-transport-sédimentation" dans un bassin endoréique cristallin et alluvial de la bande climatique tropicale à subdésertique. Cette dynamique de la matière a fait l'objet, entre 1966 et 1975, d'une étude multidisciplinaire menée par des géologues, hydrologues, pédologues et géochimistes de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.

Dans le cas du bassin tchadien, dont la superficie totale est de l'ordre de deux millions de kilomètres carrés, les faits sont accentués par le rapport pluie/évaporation qui varie très fortement, de 1,3 à 0,09, entre l'amont et l'aval. Les valeurs de 1,3 sont relevées au sud du dispositif, dans les bassins versants du Logone et du Chari. Ces deux fleuves abordent en se dirigeant vers le nord des régions basses, plates, qui constituent une série de pièges sédimentaires de plus en plus efficaces. Leurs eaux représentent 95 % de l'alimentation actuelle du lac Tchad. Les valeurs de 0,09 sont relevées sur la bordure nord-est du lac, dans les interdunes alternativement noyées et exondées, derniers pièges du système.

Lors de ce cheminement, les eaux s'évaporent, les teneurs en isotopes lourds augmentent, les suspensions décantent, les éléments minéraux dissous se concentrent favorisant la sédimentation. Une véritable "chromatographie" de la matière se développe dans le système, dont on résumera les grands traits en suivant l'axe nord-sud (Fig. 1).

1 - BILAN DE L'ÉROSION ET DE L'ALTERATION DANS LES BASSINS AMONT.

Les bassins versants du Logone et du Chari sont adossés aux flancs nord de l'Adamaoua (Cameroun) et de la dorsale centre-africaine. Le bassin de l'Ouham, d'une superficie de 45.000 km² est bien représentatif. Il a fait l'objet d'une étude détaillée (1). Les formations du socle précambrien constituent l'essentiel de son soubassement géologique avec une forte représentation de granites et de migmatites (60 %), une représentation plus réduite de charnockites (16 %), de gneiss (12 %), d'amphibolites (6 %) et de quartzites (5%).

Dans ce bassin de l'Ouham, l'exportation totale annuelle de substances dissoutes s'élève à 578.000 tonnes dont 50.000 t. à la montée des eaux (9 %), 342.000 t. aux hautes eaux (59 %), 147.000 t. à la décrue (25 %) et 39.000 t. aux basses eaux (7 %). La silice et les bicarbonates constituent 85 % de cette charge soluble, l'ensemble des bases y contribuant pour 15 % (Fig. 2). Les éléments les mieux exportés sont dans l'ordre :

Si Na Ca K Mg Fe Al Mn Ti

(1) J.Y. GAC et M. PINTA, Cah. ORSTOM, sér. Géol., V, 1, 1973, p. 83-96.

9 DEC. 1975
O. R. S. T. O. M.
Collection de Référence
no 7921 Hydrologie

La concentration moyenne annuelle en substances dissoutes est de 56 mg/l, dont une teneur moyenne de 21,5 mg/l de silice. A 700 km de l'Océan Atlantique, ce bassin se situe bien en dehors des influences océaniques, comme en témoignent les faibles concentrations en chlore. Les valeurs obtenues, rapprochées de celles concernant d'autres bassins africains (2), montrent que les eaux du bassin de l'Ouham semblent bien caractériser les eaux issues du drainage des formations du socle précambrien, c'est-à-dire de vieux massifs à prédominance granitique, fortement arasés, colonisés par une savane boisée et sièges d'une pédogénèse de type essentiellement ferrallitique.

Parmi les suspensions, la kaolinite domine nettement les autres espèces minérales (Fig. 2). Le spectre minéralogique de ces suspensions mime d'ailleurs celui des sols du bassin. Les éléments chimiques les mieux exportés sont dans l'ordre :

Si Al Fe Ti K Mn Mg Ca Na

La concentration moyenne annuelle des suspensions est de 40,6 mg/l.

Le bilan annuel de l'évacuation totale (cycle hydrologique 1969-1970) s'élève à 1.023.000 tonnes, dont 57 % pour les substances dissoutes, 41 % pour les particules fines en suspension et 2 % pour les matériaux du charriage de fond. L'érosion chimique spécifique se chiffre ainsi à 7,5 t/km²/an et l'érosion mécanique spécifique à 10 t/km²/an.

L'analyse d'un tel bilan montre que l'altération chimique et l'approfondissement des profils l'emportent sur l'érosion mécanique. L'évolution géochimique et morphologique actuelle est favorable à une augmentation de l'épaisseur des profils et apparaît ainsi comme caractéristique d'une période biostasique.

2 - LE DEVENIR DE LA MATIERE TRANSPORTEE DANS LE LAC TCHAD.

21. Les plaines d'inondation.

Entre les zones d'exportation amont et le lac Tchad, les particules ont à franchir un premier piège : les plaines d'inondation. Les eaux de débordement s'écoulent en effet pendant cinq mois sur plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés de vertisols, de sols hydromorphes, parfois halomorphes.

Très variables selon l'hydraulicité et les chemins empruntés, les pertes y sont sévères, en moyenne de l'ordre de 30 % d'eau, 50 % des suspensions, 10 % d'ions et de silice dans les plaines du Logone inférieur. Malgré ces pertes, les eaux conservent à leur arrivée au lac un spectre d'éléments dissous assez semblable au spectre moyen amont : Ca, Mg, Na, K.

22. Les apports au lac Tchad (3).

En année moyenne, 43 milliards de m³ d'eaux fluviales (Chari grossi du Logone à N'djaména) débouchent dans le lac Tchad avec une composition isotopique de l'oxygène de - 3 ‰ et des concentrations respectives en suspension, en ions et en silice dissoute de 71, 42, et 25 mg/l. Ces apports

(2) D.A. LIVINGSTONE, Data of Geoch., 6 th., US. Geol. Survey Prof. Paper, 440 G, 1963.

(3) M.A. ROCHE, Thèse, Paris-VI, ORSTOM Paris, 1973, 398 p.

équivalent à un déversement moyen annuel de :

- 3 millions de tonnes de suspensions, dont la moitié de kaolinite.
- 1,8 millions de tonnes d'ions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^-)
- 1,1 millions de tonnes de silice dissoute (H_4SiO_4).

Les apports éolien et pluvial en éléments solubles, difficiles à évaluer ne doivent pas représenter plus de 15 % des apports fluviaux.

23. Caractéristiques physiques du lac Tchad.

Le lac Tchad peut être divisé en deux cuvettes, nord et sud, de part et d'autre d'une zone de hauts fonds ("Grande Barrière"). Ces deux cuvettes sont bordées au nord et à l'est par l'erg fixé du Kanem dont les sommets de dunes, orientés sud-est/nord-ouest s'enfoncent vers l'intérieur du lac, formant d'abord un vaste archipel (sommets des dunes encore exondés), puis une zone d'ilôts-bancs (sommets immergés, colonisés par des phanérogames aquatiques).

A la cote 281,5 m (cote moyenne du plan d'eau entre 1968 et 1971), la surface du lac est de 20.550 km², et sa profondeur moyenne de 3 m., avec quelques fonds de 8 m. Mais cette physionomie du lac est susceptible de changer profondément à l'échelle pluriannuelle. D'un aspect de petite mer intérieure, le lac peut passer à celui d'un marécage comme actuellement, à la suite de la vague de sécheresse qui a touché le Sahel ces dernières années.

Il convient de souligner la grande richesse végétale des rives et des ilôts-bancs du lac qui constitue un important réservoir de matière organique (Phragmites, Cypérus papyrus, Typha, herbiers à Potamogeton...). Les sédiments superficiels qui constituent les fonds du lac se rangent dans quatre types principaux : vase (50 % de la surface des fonds, dominante dans la région des ilôts-bancs), argile (20 %), sable (21 %), pseudo-sable enfin (10 à 15 %, entre le delta du Chari et la "Grande Barrière").

24. Régime hydrochimique du lac Tchad (3), (4), (5) .

Les eaux fluviales, à leur débouché dans le lac, se dirigent vers les rives et décrivent dans la cuvette nord un mouvement circulaire. Soumis à une intense évaporation, le lac voit ainsi chaque année 93 à 96 % de ses apports hydriques éliminés. Les salures augmentent du delta vers les rives. Cependant, les salures ioniques globales sur les rives ne sont que de 3 à 40 fois supérieures à celles des eaux fluviales au niveau du delta du Chari, les teneurs en silice n'étant supérieures que de 2 à 6 fois.

La concentration ionique moyenne reste faible, 320 mg/l (moins que l'eau d'Evian), la teneur moyenne en silice dissoute étant de 50 mg/l. Les eaux demeurent bicarbonatées, les chlorures ne représentant au plus que 1 % de la salure anionique. Avec l'augmentation de la salure on assiste à un

(4) J.P. CARMOUZE, Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol., VI, 2, 1972, p. 108-169.

(5) J.P. CARMOUZE, C.R. Acad. Sc. Paris, 275, 1972, p. 1871-1874.

changement du spectre cationique, qui passe de :



En faisant l'hypothèse que le sodium est "non réactif", le stock de chacun des ions dissous dans le lac représente leur temps de résidence (nombre d'apports moyens annuels) respectif. Il est de 16 ans pour Na^+ , de 12 ans pour K^+ , de 10 ans pour HCO_3^- , de 9 ans pour Mg^{2+} , de 7 ans pour Ca^{2+} et seulement de 3 ans pour H_4SiO_4 . Globalement, la quantité d'ions dissous dans le lac n'équivaut qu'à 10 années d'apports.

Cette faible concentration des eaux lacustres implique donc une régulation saline, qui est assurée par deux grands mécanismes :

- des interactions avec l'environnement minéral et organique conduisent à une sédimentation chimique et à un piégeage biochimique sélectifs dans le lac lui-même.

- une évacuation non sélective des eaux et des sels dissous se réalise par infiltrations le long des rives du lac, essentiellement des rives septentrionales (rivage du Kanem).

En se servant de l'ion sodium comme traceur on peut estimer par défaut la "sédimentation" des autres éléments dans le lac et par excès les pertes hydriques et salines par infiltrations. Globalement, 37 % de l'apport ionique et 83 % des apports en silice sédimentent dans le lac. Par ordre décroissant le piégeage est de 58 % pour le calcium, de 45 % pour le magnésium, de 37 % pour les espèces carbonatées et de 23 % pour le potassium.

Ce piégeage des ions et de la silice contribue pour la plus grande part à des néoformations argileuses qui sont actuellement l'objet d'études (J.P. CARMOUZE). On peut déjà retenir :

- une néoformation de nontronite en granules (pseudo-sable) dans le delta. Il s'agit d'une silicification des oxydes ferriques des apports fluviaux qui s'organisent très rapidement en goéthite dans le lac.
- une néoformation de smectite magnésienne, dans le nord et l'extrême est du lac, accompagnée d'une précipitation de calcite, vraisemblablement magnésienne.

Les infiltrations sont estimées entre 4 et 7 % des apports hydriques annuels. Elles évacuent en direction des nappes phréatiques littorales 63 % des ions et 17 % de la silice apportés annuellement au lac.

25. Relations entre le lac et les nappes littorales (3)

Le lac Tchad repose en position perchée sur une nappe phréatique de 70 m de puissance contenue dans les dépôts fluviolacustres et dunaires de l'Holocène et du Pleistocène supérieur et moyen. Il est entouré de dépressions piézométriques au centre desquelles le niveau des eaux souterraines est de 30 à 50 m inférieure à celui de l'étendue lacustre. Par ailleurs une gouttière drainante, dont le niveau est inférieur de 5 à 7 m à celui du lac, longe sa rive nord-est.

Les gradients hydrauliques sont donc favorables aux infiltrations des eaux du lac dans la nappe phréatique. Cependant, toutes les observations concourent à montrer la lenteur des vitesses d'écoulement et la complexité des relations entre eaux infiltrées d'origine lacustre et eaux d'origine météorique.

Ainsi, les études isotopiques ont mis en évidence la forte contribution des eaux pluviales actuelles dans l'alimentation de la nappe du Kanem pour une pluviosité annuelle de 250 à 350 mm. Sur les rives septentrionales et sur toute l'épaisseur de la nappe, les eaux de pluie infiltrées se mélangent en proportions décroissantes vers le bas avec des eaux lacustres plus évaporées et plus anciennes. Il faut en effet garder présent à l'esprit que les phénomènes actuels s'inscrivent dans une évolution quaternaire, faite d'une alternance de phases arides et humides, dont ils subissent encore l'héritage.

3 - LE DEVENIR DES IONS DANS LES MILIEUX CONFINES INTERDUNAIRES (6), (7) .

Sur la bordure nord-est du lac Tchad, les dépressions interdunaires constituent autant d'entités hydrologiques dans lesquelles les eaux, sous le jeu de l'excédent évaporatoire, se concentrent selon deux modes.

31. Evaporation directe : Paragenèse synsédimentaire.

C'est le cas des eaux d'origine lacustre pure qui sont piégées lors de la création de polders; le cas également des eaux d'affleurement de la nappe phréatique dans les lacs interdunaires. Les eaux s'évaporent à l'air libre et déposent leurs sels selon une zonation centripète due aux solubilités respectives des différents sels.

Les premiers stades, représentés par un polder en voie d'assèchement (ou par la baisse du plan d'eau d'un lac peu minéralisé) montrent la précipitation à la surface des vases d'une calcite faiblement magnésienne (2 à 6 %), de gaylussite ($\text{CaNa}_2(\text{CO}_3)_2 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$), et dans les ultimes laisses évaporatoires de trona ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

En se concentrant, ces eaux acquièrent un caractère alcalin prononcé (pH supérieur à 9), leur teneur en silice augmente. Elles deviennent "agressives" vis-à-vis des sédiments sous-jacents : le sodium se fixe sur le complexe adsorbant des argiles, favorise leur dispersion. La matière organique du sédiment est partiellement extraite et se mélange aux microcristaux de trona pour donner le "salant noir".

Dans certains lacs interdunaires, plus minéralisés, la zonation en auréoles plus ou moins concentriques est quelque peu différente : nahcolite (NaHCO_3), trona, puis halite (NaCl), avec dans les parties centrales encore recouvertes de saumures saturées, de fins agrégats de magadiite ($\text{Na Si}_7 \text{O}_{13}(\text{OH})_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$).

32 - Evaporation capillaire : Paragenèse diagénétique précoce.

Dans le cas des polders⁺ ou des ouadis⁺⁺ à nappe phréatique peu profonde (moins de 3 m.), la finesse des sédiments argilo-diatomitiques (nette dominance d'argiles montmorillonitiques) conduit à des phénomènes de remontées capillaires intenses. Les solutions se concentrent et déposent leurs sels soit en surface sous forme d'efflorescences, soit au sein même du sédiment. Mais le sédiment ou le sol ne sont pas de simples supports inertes et le niveau d'organisation qu'ils ont acquis introduit une nouvelle dichotomie dans les voies de concentration : concentration "oxydante" en milieu ayant une bonne capacité d'aération; concentration "réductrice" en milieu à drainage déficient.

(6) G. MAGLIONE, Thèse, Paris-VI, ORSTOM, 1974, 331 p.

(7) C. CHEVERRY, Thèse, Strasbourg, ORSTOM, 1974, 275 p.

+ "Polders" : dépressions interdunaires isolées artificiellement du lac; les plus anciens ont 50 ans.

++ "ouadis" : dépressions interdunaires isolées naturellement au cours du quaternaire.

321. Concentration "oxydante" : Paragenèse chloro-sulfatée.

Les bicarbonates de la nappe précipitent à l'état de calcite faiblement magnésienne. Les composés du soufre s'observent à l'état de gypse, de thénardite (Na_2SO_4), localement de jarosite ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), la halite formant le dernier maillon de la paragenèse. Les pH n'atteignent pas des valeurs suffisantes pour mobiliser la silice.

Ce mode de concentration découle d'une circulation des solutions dans un milieu fortement structuré, bien aéré, réintroduisant dans le circuit des solutions des éléments jusque là stockés dans le sédiment : soufre réduit ou organique, calcium échangeable des argiles lacustres. La matière organique héritée du sédiment joue ici un rôle propre (8) en favorisant, par ses liaisons avec l'argile, la structuration du milieu.

322. Concentration "réductrice" : Paragenèse carbonatée et silicatée.

Les bicarbonates et carbonates de la nappe précipitent en bonne part à l'état de carbonates alcalins, en surface du sol et au sein du sédiment. Les composés du soufre sont bloqués en profondeur à l'état de sulfures métalliques. Les pH atteignent des valeurs extrêmes, de même que les teneurs en silice dissoute (jusqu'à 3700 mg/l). Les néoformations silicatées sodiques connaissent leur plein développement (9) : magadiite, kanemite ($\text{Na H}(\text{Si}_2\text{O}_4(\text{OH})_2) \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) découverte à l'occasion de cette étude.

Dans les milieux où les ions aluminium sont disponibles on observe la formation d'alumino-silicates de type zéolite comme la mordénite ainsi que des argiles nettement magnésiennes.

Ce mode de concentration est représentatif de la majorité des interdunes du Kanem. Il traduit un confinement de divers ordres : topographique, pédologique. Les structures sont dégradées, les argiles dispersées, la matière organique solubilisée, le milieu imperméabilisé.

Pour chacune de ces voies, un modèle thermodynamique simple a été proposé, qui rend compte de la distribution des différents sels dans le paysage et dans le temps.

33. En résumé.

Le moteur de cette distribution "chromatographique" des ions dans le paysage des bordures nord-est du lac est le rapport pluviosité/évaporation qui traduit l'état de confinement du milieu. Dans ce cadre, les eaux et leurs ions "proposent", mais c'est en définitive le milieu de sédimentation chimique, et entre autres l'organisation pédologique acquise, qui "disposent".

Le faciès géochimique régional est carbonaté-sodique. Ce faciès se retrouve aussi bien comme terme de l'évaporation directe que de l'évaporation capillaire selon la voie réductrice. C'est là en effet où le support sédiment ou sol joue le rôle modificateur le moins marqué. En ce sens, les paragenèses de la voie oxydante présentent un caractère de "métastabilité" vis-à-vis des conditions géochimiques régionales.

(8) C. CHEVERRY, T. DUPUIS et J. TRICHET, Congrès de Nice, 1975.

(9) G. MAGLIONE, Congrès de Nice, 1975.

4 - CONCLUSION.

Dans ce bassin, l'opposition entre les milieux "lessivants" de l'amont, et les milieux "confinants" de l'aval est bien tranchée. On a pu préciser les facteurs, les mécanismes, les bilans partiels d'une sédimentation à dominante chimique, caractéristique d'une période biostasique.

Dans la mesure où ces aspects actuels permettent d'ébaucher un modèle de sédimentation continentale, ils contribuent à l'analyse stratigraphique, sédimentologique et paléoécologique des séries continentales du Quaternaire (10).

(10) M. SERVANT, Thèse, Paris-VI, ORSTOM, 1973, 348 p.

Fig. 1. Carte de situation du Bassin Tchadien

--- limite du bassin
 ... rivage lacustre à 320 m
 (≈ 6000 ans BP)

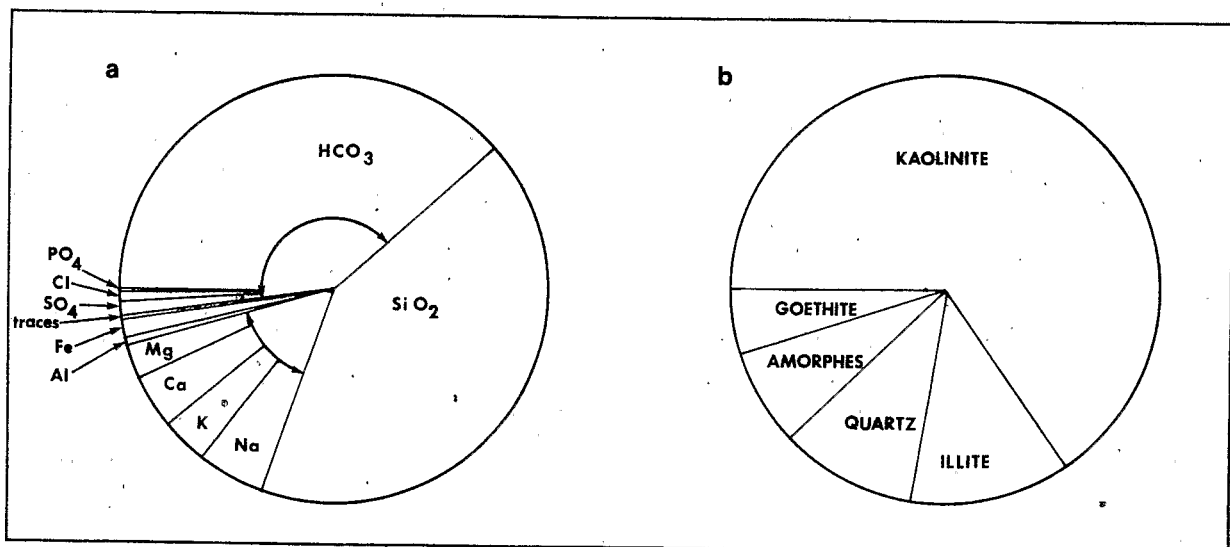
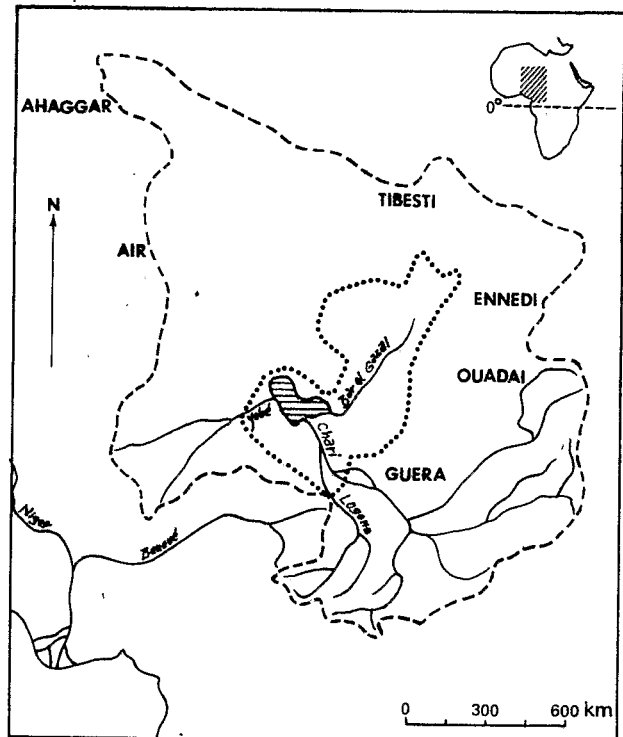


Fig. 2. Les exportations du bassin de l'Ouham. Repartition pondérale :
 (a) des ions dans la charge dissoute
 (b) des espèces minérales dans la charge solide

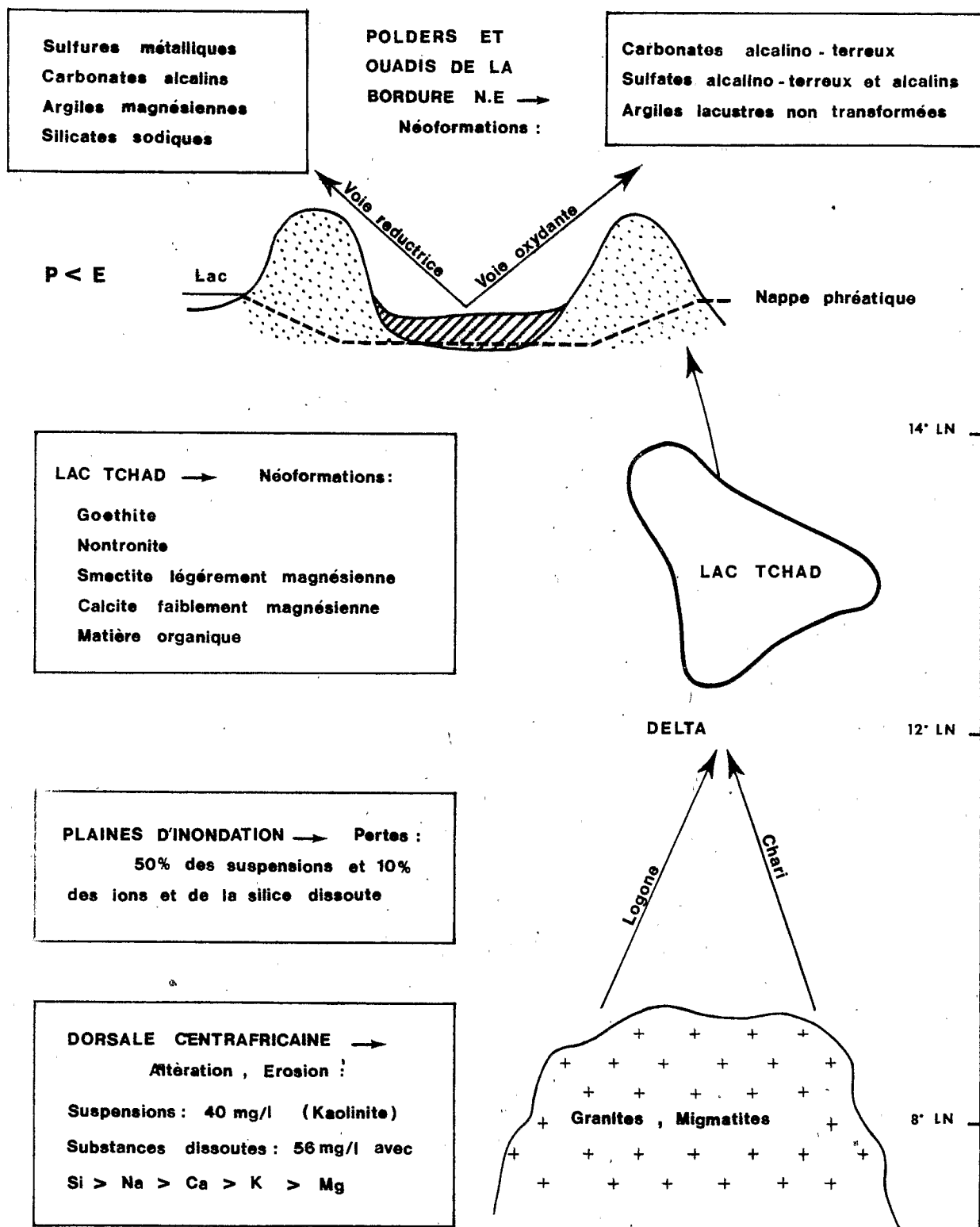
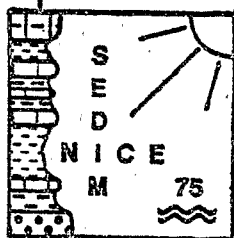


Fig.3. Dynamique superficielle de la matière dans le bassin tchadien

Extraits
des
publications
du
Congrès



IX^{me} CONGRÈS INTERNATIONAL
DE SEDIMENTOLOGIE
NICE 1975

f921