

ÉVALUATION DES PERTES DU LAC TCHAD PAR ABANDON SUPERFICIEL ET INFILTRATIONS MARGINALES

M.A. ROCHE

Section Hydrologie du Centre ORSTOM de Fort-Lamy.

RÉSUMÉ

Plusieurs processus physico-chimiques ou purement physiques contribuent à la régulation saline des eaux du lac Tchad :

— Les phénomènes physico-chimiques et biochimiques dans le lac, tout en y participant, sont quantitativement insuffisants pour assurer à eux seuls cette régulation.

— La morphologie des côtes orientales est favorable à l'abandon superficiel des eaux les plus minéralisées dans les cuvettes littorales lors des baisses annuelles et surtout pluriannuelles du niveau du lac. Un rejet superficiel des sels toujours plus vers l'extérieur a lieu lors des fortes crues pluriannuelles.

— Les pertes par infiltrations marginales sont les plus susceptibles de maintenir constante à l'échelle annuelle la salure des eaux. Un rappel et des précisions sur les conditions géologiques de gisement, la piézométrie, les salures et les compositions isotopiques des nappes souterraines associées au lac sont présentés. On conclut que l'infiltration des eaux du lac est possible bien que s'effectuant suivant un mode particulier.

Une évaluation des pertes par infiltration et abandon superficiel est tentée en estimant une valeur moyenne des salures sur l'ensemble du front côtier et en la comparant à celle des apports liquides. Ces pertes seraient comprises entre 9,5 et 7,7 % des apports liquides suivant les fronts d'évacuation considérés.

ABSTRACT

The salinity of the water of Lake Chad was controlled by a number of physical and physico-chemical processes :

— the physico-chemical and biochemical phenomena involved were insufficient to exercise complete control ;

— the morphology of the eastern shores favoured the surface abandonment of the most highly mineralized waters in the littoral basins during the annual and above all the multiannual drops in the surface level of the Lake. A surface displacement of salts, always more pronounced towards the outside, took place during the high multiannual floods ;

— losses from marginal infiltration were the most likely factors maintaining a constant annual level of water salinity. A resume with data on the geological conditions of deposition, piezometry, salinity and isotopic composition of the underground water associated with the Lake was presented. It was concluded that the infiltration of Lake water was possible, although it occurred in a particular way.

An attempt was made to calculate the losses due to infiltration and surface abandonment by estimating an average value of salinity for the whole littoral face and comparing this with the salinity of the liquid received. These losses lay probably between 9,5 and 7,7 % of the incoming liquid, according to the evacuation face under consideration.

ZUSAMMENFASSUNG

Mehrere physikalisch-chemische oder rein physikalische Prozesse tragen zur Regelung des Salzgehaltes für das Wasser des Tschadsees bei :

— die physikalisch-chemischen und die biochemischen Vorgänge im See, wenn sie auch dazu beitragen, sind mengenmässig nicht in der Lage, diese Regelung alleine sicher zu stellen ;

— die Morphologie der Ostküste ist für eine oberflächliche Abgabe der am meisten mineralhaltigen Wässer in Ufersenkungen bei den jährlichen und vor allem mehr jährigen Absenkungen des Wasserspiegels im See günstig. Bei den starken mehrjährigen Hochwassern tritt ein oberflächliches Zurückdrängen der Salze immer mehr nach aussen ein.

— die Verluste durch Versickern am Rande tragen am meisten dazu bei, im jährlichen Masstab den Salzgehalt des Wassers konstant zu halten. Es wird ein Überblick mit Angaben über die geologischen Bedingungen der Lagerstätten, die Piezometrie, die Salzgehalte und die isotopische Zusammensetzung der zugehörigen Grundwasserschichten des Sees gegeben. Die Schlussfolgerung ist, dass ein Versickern des Seewassers möglich ist, wenn es auch in einer ganz besonderen Weise eintritt.

Es wird versucht die Verluste durch Versickern und oberflächliche Abgabe dadurch zu schätzen, dass ein Mittelwert des Salzgehaltes für die ganze Küstenfront ermittelt und demjenigen des zufließenden Wassers gegenüber gestellt wird. Diese Verluste sollten zwischen 9,5 und 7,7 % des Eintrages mit dem Zuflusswasser, je nach den betrachteten Austragfronten, liegen.

РЕЗЮМЕ

Наблюдается несколько физико-химических или чисто химических процессов способствующих регулированию засоленности вод озера Чад :

— физико-химические и биохимические явления происходящие в озере, хотя и участвуют в этом регулировании, все же количественно недостаточны чтобы обеспечить его полностью.

— морфология восточного берега благоприятствует поверхностному проникновению наиболее минерализованных вод в прибрежные котловины, во время годовых и особенно многолетних понижений уровня озера. Поверхностный вынос солей все дальше наружу происходит в течении сильных многолетних наводков.

— выносы путем краевых инфильтраций более всего способны, в пределах одного года, сохранить постоянный уровень солесодержания вод. В работе даются сводка и уточнения касательно геологических условий месторождения, приводятся пьезометрические данные и определения степени засоления и изотонического содержания грунтовых вод приобщенных озеру. Делается вывод, что инфильтрация вод озера возможна, хотя и происходит особым образом.

Делается попытка оценить вынос через инфильтрацию и поверхностное отложение путем вычисления среднего значения солесодержаний на всем береговом фронте и сравнением его со значением притоков жидкости. Этот вынос по-видимому колеблется между 9,5 и 7,7 % притока жидкости, в зависимости от изучаемого фронта эвакуации.

INTRODUCTION À L'HYDROLOGIE DU LAC TCHAD

Les études géologiques (1 à 8)* permettent de préciser l'histoire hydrologique du lac Tchad. Après une longue phase aride, le Paléo-Tchad se crée par crues successives, vers 12 000 ans BP (avant nos jours). A la fin du Pléistocène et pendant l'Holocène, son niveau et sa superficie varient énormément en fonction des conditions climatiques régnant sur le bassin. Deux séquences lacustres s'identifient au Tchad (7,8) : l'une de 12 000 à 11 000 ans BP (séquence 1 de Labdé), l'autre de 10 000 à 2 000 ans BP (séquence 2 de Labdé). Le lac aurait ainsi atteint, entre 5 000 et 6 000 ans BP, la cote 320 m au Tchad (5) et une étendue d'environ 400 000 km². Au Niger oriental, des dépôts lacustres situés vers la cote 400 m sont datés entre 8 000 et 9 000 ans BP (3). Un niveau à 287-290 m a été atteint entre 3 200 et 1 800 ans. L'assèchement général au Kanem date de 2 400 ans. Le lac commence à se déverser vers 1 800 ans BP dans le Bahr el Ghazal précédemment asséché. Les dernières alluvions y sont datées de moins de deux siècles (7). La crue de 1957 a atteint la région de Massakory. La définition des altitudes est délicate car certains auteurs n'excluent pas a priori que des mouvements épirogéniques, bien que modestes, aient pu avoir lieu dans la cuvette à l'Holocène. D'autre part, il est possible qu'il y ait eu à certaines époques plusieurs lacs indépendants.

Depuis sa dernière régression, commencée il y a quelques deux millénaires (7), le lac Tchad n'est plus qu'une pellicule d'eau d'épaisseur variable mais ne dépassant pas actuellement un maximum de 5 à 7 m. Sa superficie, très fluctuante en fonction des apports liquides, a oscillé depuis le début du siècle entre 8 000 et 24 000 km². Son bilan hydrologique annuel (9,10) se traduit généralement par :

$$\frac{V}{S} + P = DH + p$$

en désignant par :

S = La superficie moyenne du lac.

V = Le volume des apports des tributaires (environ 88 % des apports liquides dont 83 % par le Chari, 4 % par l'El Beïd, 1 % par la Komadougou et le Yedseram).

P = La hauteur moyenne des précipitations (environ 12 % des apports liquides).

DH = La variation de niveau du lac.

p = La hauteur des pertes par évaporation et infiltration, paramètres non séparables par le bilan hydrologique.

De juillet à décembre-janvier, les apports sont supérieurs aux pertes, le niveau remonte ; de décembre-janvier à juillet, les apports sont inférieurs aux pertes, il descend. Sur 26 années, la différence de hauteur (en m) entre le minimum et le maximum annuel se caractérise par les valeurs suivantes : moyenne = 0,93, écart-type = 0,40. Le niveau subit des variations pluriannuelles importantes sans cycle périodique apparent. Celles-ci ont été observées ou reconstituées avec une bonne approximation sur les cent dernières années. On sait ainsi que les altitudes maximum et minimum atteintes ont été respectivement de 284,5 et 280,0 m.

ASPECTS DE LA RÉGULATION SALINE DU LAC TCHAD

Depuis le delta du Chari jusqu'aux rives, la salure des eaux augmente sous l'effet de l'évaporation et donc surtout en fonction de leur temps de séjour dans le lac (11 à 17). Les courbes d'égale concentration tendent à être parallèles aux côtes mais de vastes courants saisonniers, principalement en relation avec la

* Les chiffres renvoient aux numéros entre crochets des références bibliographiques.

crue des tributaires et les vents, modifient ce schéma sur une grande surface du lac (13, 15) (fig. 1). Ils balayent notamment les côtes s'étendant entre Baga Kawa et Nguigmi et une bonne partie du golfe Wulgo. Ailleurs, à proximité des rives, la répartition d'ensemble n'est pas modifiée au cours de l'année car les eaux s'y trouvent isolées dans des bras très allongés. Les teneurs ioniques y augmentent alors très rapidement. Malgré cet accroissement marqué, elles demeurent cependant étonnamment faibles. De $50 \mu\text{mhos}\cdot\text{cm}^{-1}$ au delta du Chari, les conductivités sur les côtes atteignent des valeurs variant de 100 à 2000 $\mu\text{mhos}\cdot\text{cm}^{-1}$ suivant les régions (1).

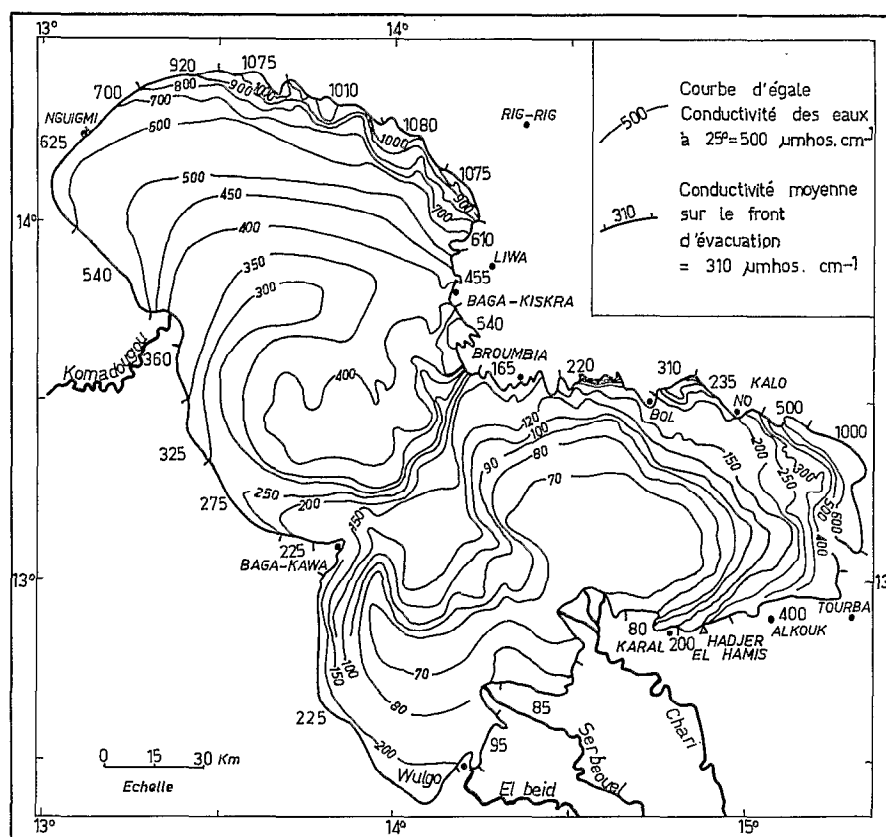


FIG. 1. — Conductivité des eaux du lac Tchad en mars et avril 1967.

Les observations effectuées en 1908, 1957 puis de 1962 à 1968 confirment qu'il n'y a pas eu d'évolution vraiment nette des salures pendant cette période (12). Les différences constatées peuvent être en effet imputables aux variations saisonnières qui sont importantes dans certaines zones. La variation annuelle sur l'ensemble du lac reste en grande partie à préciser. La quantité d'eau évaporée est du même ordre de grandeur que celle apportée en année moyenne par les tributaires et les pluies. Elle est évaluée

(1) Pour une conductivité C comprise entre 30 et 110 $\mu\text{mhos}\cdot\text{cm}^{-1}$, la corrélation [10] avec le poids total d'ions dissous $p = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K} + \text{Cl} + \text{SO}_4 + \text{CO}_3 + \text{CO}_3\text{H}$ (en mg/l) est définie par $p = 0,700 C + 13$. Pour $C > 125$, elle peut s'écrire $p = C^{0,975}$. Il est cependant préférable, pour l'estimation du bilan salin, de considérer les quantités d'ions dissous exprimées en milliéquivalents (voir la fig. 6).

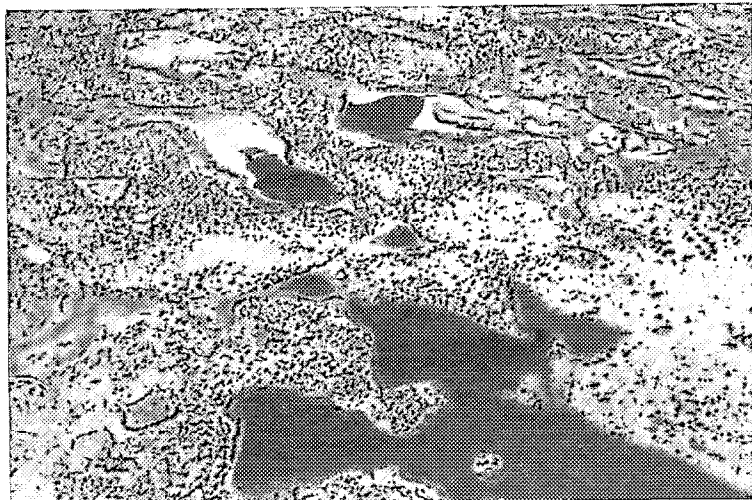


FIG. 2. — Rives est de la partie septentrionale du lac Tchad. Les eaux les plus minéralisées sont abandonnées à l'extrémité des bras interdunaires lors de la baisse du niveau du lac (février 1967).



FIG. 3. — Rives est de la partie septentrionale du lac Tchad. Les communications très compliquées existent entre les cuvettes littorales (février 1967).

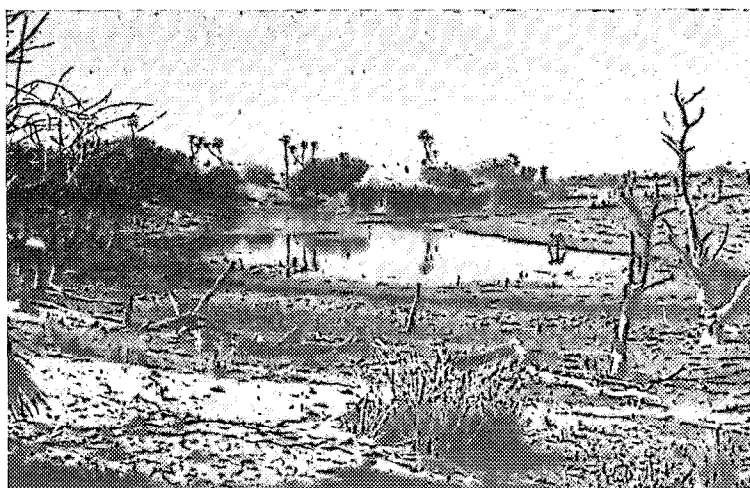


FIG. 4. — Extrémité d'un bras interdunaire sur la côte nord de la partie méridionale du lac Tchad (mai 1967).

(Clichés M.A. ROCHE)

voisine de 2 m par an, alors qu'actuellement la profondeur moyenne du lac est de l'ordre de 3 à 5 m. La salure moyenne des apports (exprimées par la conductivité) étant voisine de $50 \mu\text{mhos}\cdot\text{cm}^{-1}$ (18), celle du lac devrait s'accroître en moyenne chaque année, et depuis plusieurs millénaires, de cet ordre de grandeur. La mesure de la salure moyenne du lac en mars-avril 1967 a permis d'estimer que la quantité de sels dissous (en milliéquivalent) correspondait seulement à 13 années d'apports par le Chari (14).

Il apparaît ainsi clairement qu'un ou plusieurs mécanismes, physico-chimiques ou purement physiques, assurent la régulation saline du lac Tchad. Les études actuelles sur le lac et ses bordures permettent d'avancer que trois types de phénomènes entrent en jeu :

- les phénomènes physico-chimiques et biochimiques dans le lac même,
- l'évacuation superficielle des eaux et des sels,
- l'infiltration des eaux et des sels dans les terrains de bordure.

PROCESSUS RÉGULATEURS DE LA SALURE DES EAUX

Phénomènes physico-chimiques et biochimiques

Des phénomènes physico-chimiques, liés en particulier au faciès bicarbonaté calcique ou sodique des eaux, paraissent participer à la régulation saline du lac. Des encroûtements de carbonate, probablement de calcium, enrobant des tiges de végétaux, ont été observés sous 5 mètres d'eau à l'extrémité de certains bras au nord du lac, traduisant une précipitation de sels (19, 13). D'autre part, il est certain qu'une partie des sels dissous entre dans le cycle biologique de la flore et de la faune, sans être totalement restituée à l'eau (20). Les ions se comportent évidemment différemment suivant les phénomènes d'interaction avec le milieu. Il est cependant très plausible que ces phénomènes sont quantitativement insuffisants pour pouvoir assurer à eux seuls la régulation saline des eaux.

Abandon et évacuation superficiels des sels

TILHO (1), dès 1909, émettait l'idée de la « dénatronisation automatique (du lac) par le simple jeu de ses crues et de ses assèchements successifs ». BOUCHARDEAU (12) évoquait également des pertes par écoulement dans « une zone marginale ».

Ce phénomène, dont l'importance pour la régulation saline du lac n'a pas été autrement soulignée, nous paraît mériter une explication plus détaillée car il joue effectivement un très grand rôle. De l'extrême nord à la pointe est, les côtes orientales sont particulièrement circonvolutionnées car les eaux envahissent les dépressions interdunaires de l'erg du Kanem, sur plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres. De Tourba au delta du Chari, les dépressions inondées sont à la fois plus vastes et moins profondes. Au Cameroun et au Nigéria, les côtes assez régulières, prennent l'aspect de plages souvent encombrées de roseaux et papyrus. Cependant, immédiatement au sud de Baga-Kawa, il existe de nombreux bras, séparés par cette même végétation qui a colonisé les hauts-fonds.

Les photos aériennes (fig. 2 et 3), prises sur les rives du Kanem, illustrent nettement le développement suivant : les bras côtiers, très allongés, sont jalonnés de seuils sableux de hauteurs variées, ce qui explique que les surfaces inondées y sont très fluctuantes en fonction des variations annuelles et surtout pluriannuelles du niveau du lac. Lorsque celui-ci baisse, les eaux situées à l'extrémité des bras se trouvent morcelées en une ou plusieurs mares et ne font plus alors partie du lac (fig. 4). Les eaux les plus minéralisées sont ainsi abandonnées. Ce phénomène tend à faire diminuer la salure des eaux du lac tandis que celle des mares augmente rapidement par évaporation. Généralement, les mares qui jalonnent les bras asséchés sont d'autant plus minéralisées qu'elles sont éloignées du lac car leur isolement est alors plus ancien. Nos observations ont été faites pendant une telle période de réduction de la surface du lac. Lorsque le niveau du lac remonte, les eaux de la première mare et les sels éventuellement cristallisés sur ses bordures

sont récupérés. Des petits thalwegs asséchés, d'environ 1 m de profondeur et de quelques mètres de large, relient fréquemment une cuvette à l'autre, indiquant ainsi qu'un véritable écoulement des eaux se réalise à certaines périodes. Ce processus serait donc un facteur d'augmentation de salure, lié à un accroissement de surface.

Toutefois, on conçoit que la résultante de ces variations successives de niveau soit à long terme un rejet superficiel des sels toujours plus à l'extérieur, à l'occasion de fortes crues pluriannuelles.

La création de polders ou les déversements dans le Bahr el Ghazal représentent des cas particuliers de ce processus. Cet émissaire a certainement joué un rôle important dans l'évacuation des sels lors de ses écoulements vers les Bas-Pays du Tchad mais actuellement il ne peut participer que très faiblement à la régulation saline.

La topographie des côtes permet de penser que ce processus peut jouer pleinement au moins dans la partie orientale des côtes depuis la région de Nguigmi jusqu'au delta du Chari. Toutefois, s'il semble pouvoir être très efficace à l'échelle pluriannuelle, il peut expliquer difficilement à lui seul la régulation saline annuelle.

Infiltrations côtières

Les premiers auteurs (15, 5) ont pensé que la régulation saline du lac se réalise par infiltration des eaux : en alimentant les nappes, les eaux de surface évacuent en même temps leurs sels dissous. Un débit relativement faible passant à travers les côtes apparaît suffisant car les salures y sont les plus élevées. BOUCHARDEAU (12), en se basant sur la répartition des concentrations en « natron » dans le lac, a établi un modèle mathématique permettant de préciser l'hypothèse des pertes par infiltration.

Conditions géologiques de gisement des nappes côtières

Le lac Tchad s'étend sur la zone supérieure de la formation du Tchad (Quaternaire), constituée essentiellement de couches intercalées de sables, d'argiles sableuses et d'argiles (2 à 8 et 21 à 25).

Nous avons participé à l'élaboration de projets puis supervisé une campagne de 32 forages de profondeurs variables (5 à 77 m) équipés de piézomètres à Tchingam, No et Soro. La nappe de la zone supérieure des formations du Tchad, qualifiée de phréatique à l'échelle de la cuvette tchadienne, a ainsi été étudiée sur toute son épaisseur sur les côtes nord et est de la partie méridionale du lac Tchad. Nos observations précisent et généralisent un certain nombre de caractères communs à l'hydrogéologie de la région (26), les travaux de SERVANT (7 et 8) permettant de situer les différentes formations dans l'histoire du bassin.

L'aquifère (quaternaire récent, peut-être plus ancien à la base) repose sur un mur imperméable (probablement plio-quaternaire) situé entre 208 et 217 m — altitude absolue — de Tchingam à No et sans doute inférieur à 207 m à Soro. La nappe circule dans des sables de granulométrie moyenne, passant à des sables plus fins vers 233 à 226 m. Ces derniers constituent l'erg. Au moins deux ou trois couches lenticulaires d'argile imperméable d'une épaisseur de 1 à 7 m, peuvent exister à différents niveaux entre 225 et 270 m. Elles représentent les témoins d'épisodes lacustres dont certains sont compris entre 40 000 et 21 000 ans BP (séquence des Soulias). L'épaisseur de sables aquifères est au minimum de 54 à 63 m. Une partie de l'eau des sables s'écoule dans les argiles craquelées, à perméabilité en grand, qui combrent les fonds des polders entre 278 et 281 m environ (séquence 1 2 de Labdé, 10 000 - 2 000 ans BP). Cet aquifère est isolé des sables sous-jacents par une couche de limons argileux de très faible perméabilité (séquence 1 1 de Labdé, 12 000 - 11 000 ans BP) et son alimentation se réalise essentiellement par ses bordures. Le lac, dont le niveau moyen était de 282 m au moment de l'étude, s'étend sur cet ensemble.

Sur la côte sud de la partie méridionale (région de Karal à Alkoug), jusqu'à une dizaine de kilomètres à l'intérieur des terres, les puits traversent des sables fins qui à une certaine profondeur sont aquifères. Puis, la surface piézométrique s'abaissant vers le sud, on constate que ces sables reposent vers 18 m de profondeur sur des argiles sableuses beige clair. D'après les villageois, l'eau serait en charge sous ces

argiles, probablement dans des lits sableux, et remonterait d'environ 2 mètres une fois celles-ci foncées. A Hadjer el Hamis, en bordure même du lac, l'aquifère est sableux mais à 3 m de profondeur, des argiles gris-noir ont été traversées sur environ 2 m. Elles correspondent probablement à un ancien bras. La nappe sous-jacente y est mise en charge.

Dans les zones étudiées on peut conclure que la nature géologique des terrains est favorable aux infiltrations du lac.

La nappe de Kadzell serait difficilement alimentée par le lac car le toit argileux qui la recouvre limite les infiltrations (2).

Piézométrie des nappes côtières

Les études hydrogéologiques (24, 25, 27) ont révélé que le lac est entouré de dépressions piézométriques (fig. 5). Celles-ci sont séparées les unes des autres par des crêtes piézométriques qui, au sud et à l'ouest, correspondent aux eaux superficielles des tributaires. Le gradient piézométrique est ainsi toujours orienté des rives du lac vers l'intérieur des terres, sauf dans les zones de débouché des tributaires où il n'est pas marqué.

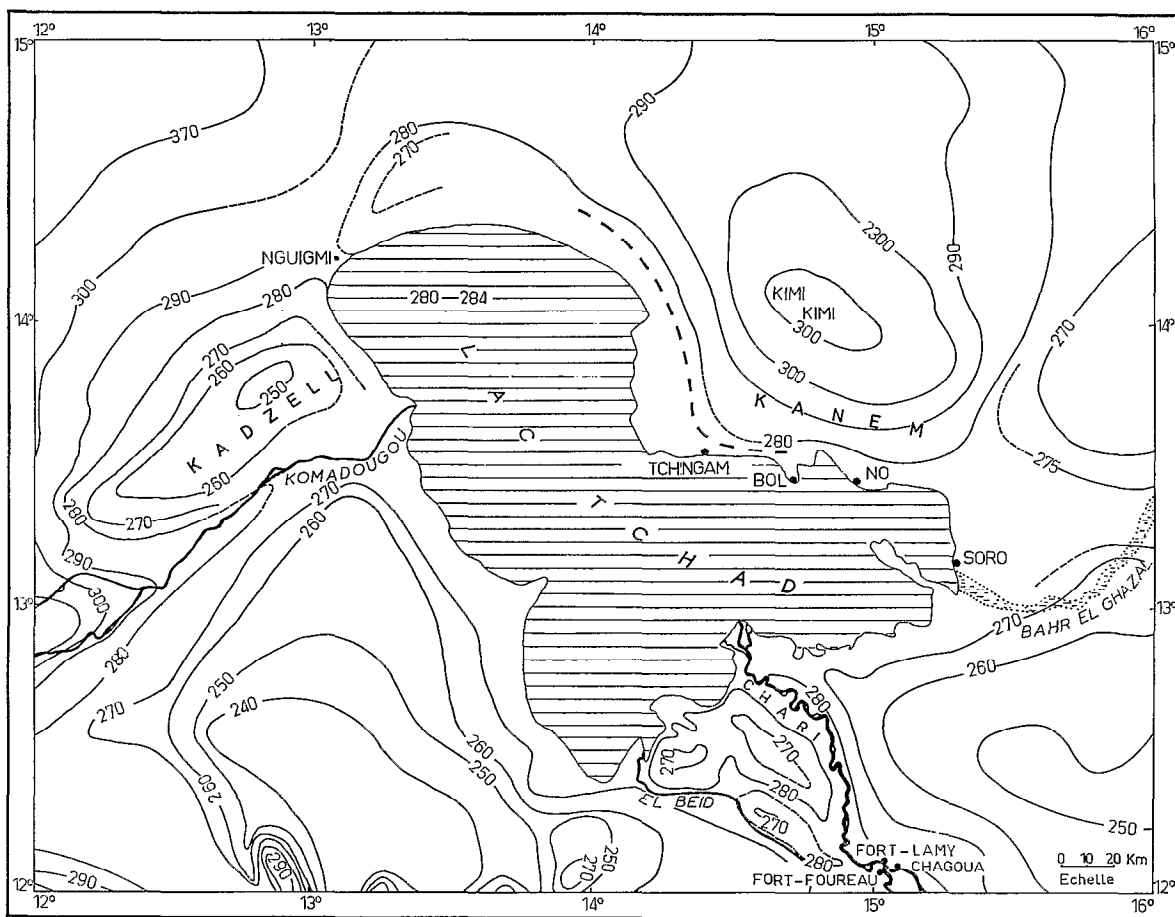


FIG. 5. — Piézométrie de la nappe phréatique dans la région du lac Tchad.

Sur la côte sud, à Hadjer et Hamis, nous avons pu observer, par un profil de sondages, que le niveau piézométrique de la nappe phréatique se rattache à la ligne de rivage du lac et non pas aux zones sableuses du milieu du lac. Le gradient piézométrique, jusqu'à 350 m du rivage, est de 9 ‰. Ceci résoud l'indétermination posée par SCHNEIDER (4) dans cette zone.

Dans le Kanem existe une gouttière piézométrique qui longe le lac à quelques kilomètres des rives (2) : au point le plus bas, le niveau piézométrique est à 275 m, c'est-à-dire 5 à 7 m en dessous du niveau actuel du lac. Au-delà de cette dépression marginale, le niveau remonte en direction du dôme de Kimi-Kimi jusqu'à 313 m. Une étude de la nappe des polders de Bol (23) indique également un gradient piézométrique orienté du lac vers le polder. Nous avons nous-mêmes mesuré par nivellement de petits sondages, les gradients moyens en divers points des côtes orientales. Ils y sont généralement compris entre 2 et 4 ‰. Des mesures trimestrielles ont montré qu'il n'y a pas inversion du gradient en bordure même du lac, à aucun moment de l'année. A Daguil on observe bien localement une légère inversion du gradient pendant la période des basses eaux du lac. Ce phénomène se réalise cependant à quelques mètres du rivage sans que la nappe puisse se déverser dans le lac en raison d'un fort gradient qui se maintient toute l'année sous la ligne de rivage.

Divers avis ont été émis pour l'explication du modelé piézométrique. Il est maintenant sûr, comme nous avons conclu pour la nappe phréatique du Grand Erg occidental (28), que dans l'erg du Kanem, la nature même des sables favorise l'infiltration encore actuelle des eaux de pluie et constitue une protection efficace contre l'évaporation. Les sables sont ici directement responsables de la stabilité pluriannuelle du niveau piézométrique, lequel s'établit parallèlement à la topographie générale. La présence de la gouttière piézométrique du Kanem s'expliquerait en partie ainsi mais il est également possible qu'elle se soit établie à la suite d'un assèchement complet puis d'une remontée du lac. PIRARD (2) émettait cette dernière hypothèse pour le creux piézométrique du Kadzell.

Quelles que soient les hypothèses avancées, retenons que les gradients piézométriques sont favorables aux pertes par infiltration sur pratiquement tout le pourtour du lac.

Dans certains polders les infiltrations sont visibles derrière les barrages où se forme un court ruisseau qui gagne la mare généralement présente à l'aval. C. CHEVERRY (24) signale ce fait à Bol-Bérim. Nous l'avons souvent observé dans d'autres polders, tels par exemple à Baga-Kiskra, Broumbia, No et même en aval du seuil sableux séparant le lac de la première mare littorale à Daguil. Les débits estimés étaient inférieurs à 1 ou 2 l/s.

Dans les bras littoraux asséchés, on remarque fréquemment sur la périphérie des mares résiduelles une frange de suintements présentant localement l'aspect de petites sources. Elle correspond à l'affleurement des eaux souterraines. Les profils piézométriques que nous avons déterminés par nivellement confirment l'alimentation de ces cuvettes par la nappe dunaire (11, 31). Il faut souligner qu'à l'extrémité des anciens bras, la nappe dunaire se déverse aussi dans les mares. Il en est de même de celle contenue sous un seuil séparant deux mares : le profil piézométrique est bombé, les eaux souterraines se déversent de part et d'autre du seuil et la mare amont ne s'écoule pas dans celle située en aval.

Ceci permet donc de penser que les eaux du lac s'infiltrent à partir des rives jusqu'aux dépressions situées dans l'arrière pays. Cependant, contrairement à ce qu'on aurait pu croire, les eaux des mares isolées dans les bras par des seuils évoluent indépendamment, les eaux ne pouvant s'infiltrer de l'une à l'autre. La conséquence directe est que les sels se trouvent bloqués dans les cuvettes et ne peuvent en être évacués superficiellement ou par infiltration seulement quand le niveau des eaux y devient supérieur à celui de la nappe dunaire ou du seuil, notamment à la suite d'une nouvelle liaison avec le lac. L'évacuation peut aussi s'effectuer par un « lessivage » par les eaux de pluies, si le niveau piézométrique baisse suffisamment par rapport au fond de la cuvette asséchée. L'altitude du fond des dépressions est ainsi un facteur déterminant de ce phénomène. Ceci se produit par exemple dans les dépressions secondaires qui occupent les seuils sableux. Ces conclusions rejoignent celles de MAGLIONE (31) qui souligne l'importance de la morphologie des cuvettes pour le blocage ou l'évacuation latérales des eaux.

Les infiltrations à travers le fond du lac sont hypothétiques. Certaines régions sableuses (20, 21) y seraient favorables mais les pertes devraient être alors importantes, compte tenu des faibles minéralisa-

tions au milieu du lac, pour assurer la régulation saline. Elles ne peuvent être raisonnablement que très limitées.

Jusqu'en 1968 on admettait ainsi que les eaux du lac s'infiltraient directement jusqu'aux « natronnières » où elles s'évaporent pour donner naissance à une série de sels bicarbonatés (trona et gaylussite) (30).

Salures des eaux

Avant l'utilisation des techniques isotopiques, rien ne permettait donc de mettre réellement en doute ces hypothèses bien que MAGLIONE (31) et nous-mêmes ayons découvert dans la partie supérieure de la nappe phréatique des eaux de salures plus faibles que celles du lac. Par exemple, les eaux d'un puits de Matafo ont une conductivité de $135 \mu\text{mhos} \cdot \text{cm}^{-1}$, alors que celles du lac font $170 \mu\text{mhos} \cdot \text{cm}^{-1}$ à proximité. La conductivité la plus faible a été mesurée à Kalo avec une valeur de $64 \mu\text{mhos} \cdot \text{cm}^{-1}$, tandis que les eaux du lac les plus proches atteignent plusieurs centaines de $\mu\text{mhos} \cdot \text{cm}^{-1}$. Il est par ailleurs assez courant que la nappe présente des salures du même ordre de grandeur que les eaux lacustres voisines. On aurait pu expliquer ces observations, en imaginant une infiltration des eaux lacustres à une époque où le lac avait un niveau supérieur à celui de maintenant et par suite des eaux moins salées dans les zones considérées. Cette explication devient difficile en considérant les résultats isotopiques.

La salure de la nappe des sables est généralement de quelques centaines à quelques milliers de $\mu\text{mhos} \cdot \text{cm}^{-1}$. Elle augmente localement avec la profondeur (26), une stratification saline existant alors. Elle peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de $\mu\text{mhos} \cdot \text{cm}^{-1}$ en bordure de certaines cuvettes.

Compositions isotopiques

Les premiers résultats isotopiques de l'oxygène 16 et 18 (32, 33) ont montré que l'infiltration massive des eaux du lac ne se produit pas. Dans les dunes littorales celles-ci se mélangent progressivement à des eaux d'origine météorique infiltrées, jusqu'à ce que leur proportion deviennent rapidement inférieure à quelques pour-cent (limite d'évaluation par cette méthode).

Les derniers résultats isotopiques sur toute l'épaisseur de la nappe phréatique (26) révèlent que des eaux lacustres occupent localement toute l'épaisseur de l'aquifère côtier. Elles s'infiltrèrent préférentiellement dans le sens longitudinal des bras, en isolant ou repoussant des masses hydriques d'origine météorique. Ces dernières reposent sur des eaux d'origine lacustre auxquelles elles se mélangent progressivement. Si le phénomène d'infiltration n'est pas effectivement aussi simple qu'on le pensait avant les études isotopiques, il existe néanmoins sur les côtes du Kanem.

PRÉCISIONS DANS L'ÉVALUATION DES PERTES PAR INFILTRATION ET ABANDON SUPERFICIEL

Les pertes totales sont déterminées avec une bonne précision par le bilan hydrologique. Elles s'élèvent en moyenne à 2 350 mm par an mais les deux termes évaporation et infiltration ne sont pas séparables. BOUCHARDEAU (12) a pensé à estimer ce dernier terme par un bilan salin sommaire de la forme $QS = Q_0 S_0$. Le débit et la salure des eaux quittant le lac y sont respectivement représentés par Q et S, ceux des eaux du Chari par Q_0 et S_0 . L'équation signifie qu'il sort autant de sels qu'il en entre. Manquant alors de résultats sur la répartition spatiale des salures, il avait estimé que les pertes par infiltration devaient être comprises entre 5 et 20 % des apports du Chari. TOUCHEBEUF de LUSSIGNY (35), admettant que les eaux s'infiltraient avec des salures voisines de 400 mg/l, évaluait ces pertes à 10 %.

Nous soulignons que le bilan ne peut en fait séparer les pertes par abandon des eaux dans les cuvettes littorales et par infiltration. Une meilleure évaluation de ces pertes peut être tentée en estimant avec plus de précision une valeur de la salure moyenne sur l'ensemble du front côtier. Celle-ci est déterminée par :

$$S = \frac{\sum S_i l_i}{L}$$

où S_i est la salure moyenne sur une longueur l_i du front et L la longueur totale du front.

Comme pour le premier mode d'estimation, deux hypothèses de base doivent être posées :

— Le débit unitaire sortant est régulièrement réparti sur l'ensemble de la côte (nous avons cependant soustrait les zones de débouché des tributaires). Il est évidemment peu probable qu'il en soit ainsi mais l'erreur entraînée n'est pas très importante comme nous le montrerons plus loin.

— La salure des eaux reste constante dans le temps. Il a été démontré d'après les résultats de 1908, 1957 et 1962 à 1968 (13) que l'évolution pluriannuelle sur l'ensemble du lac n'est pas suffisamment marquée pour être différenciée de l'évolution annuelle. Des études en cours permettront de préciser l'erreur entraînée par cette dernière.

D'après les mesures de conductivité que nous avons effectuées sur le lac en 1967 et janvier 1968 (13) (fig. 1), il est possible de définir des salures moyennes S_i sur des longueurs de front l_i , déterminées sur les cartes au 1/200 000. La traduction des $\mu\text{mhos}\cdot\text{cm}^{-1}$ en milliequivalent (mé/l) s'effectue grâce à la corrélation établie entre la conductivité et l'alcalinité (14) (fig. 6) qui dans le lac représente pratiquement la moitié de la concentration ionique de l'eau. La valeur moyenne de la salure S sur l'ensemble du front a ainsi été estimée à 11,0 mé/l.

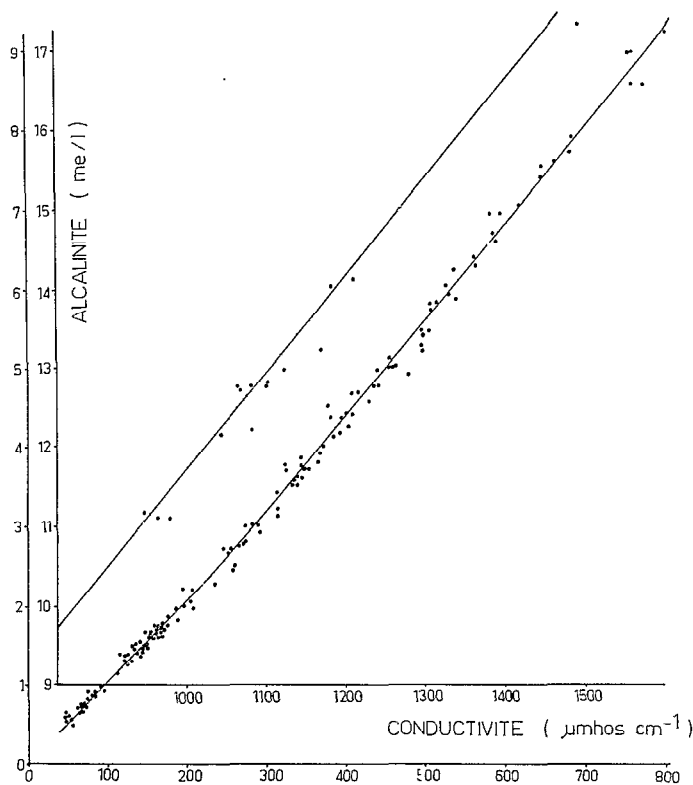


FIG. 6. — Corrélation entre la conductivité et l'alcalinité totale des eaux du lac Tchad.

La concentration ionique moyenne des eaux alimentant le lac a été évaluée :

— Chari = 1,07 mé/l (18),

— El Beïd = 3,34 mé/l, pour l'année 1968-1969 d'hydraulicité moyenne, d'après les mesures journalières effectuées à l'embouchure,

— Komadougou et Yedseram = Les quelques valeurs connues amènent pour l'instant à attribuer une minéralisation globale analogue à celle de l'El Beïd.

— Pluies = 0,4 mé/l, d'après les mesures effectuées en 1968 et 1969 sur les pluies à Bol et à Fort-Lamy.

Compte tenu des participations respectives à l'alimentation du lac, on estime la salure moyenne de l'apport liquide à $S_o = 1,05$ mé/l.

$$\text{Il vient : } \frac{\text{Pertes superficielles et souterraines}}{\text{Apports liquides}} = \frac{S_o}{S} = \frac{1,05}{11,0} = 9,5 \%$$

Les côtes occidentales et une grande partie de celles du golfe de Wulgo sont balayées par des courants saisonniers. Les eaux n'y séjournent pas longtemps. Leur minéralisation peut ainsi y rester relativement constante sans qu'aucun processus de régulation saline ne s'y produise. D'autre part les cuvettes littorales n'y existent pas ou sont peu développées. Les pertes seraient de 7,7 % si elles ne se produisaient que sur le front oriental compris entre Nguigmi et le delta du Chari où la salure moyenne a été estimée à 13,6 mé/l.

On voit ainsi qu'à l'échelle du lac, l'erreur, entraînée sur la mauvaise connaissance des zones d'évacuation n'est pas très forte.

En plus des hypothèses de base posées précédemment, plusieurs erreurs viennent fausser l'évaluation des pertes, entraînant un résultat par excès ou par défaut.

Les faits suivants ont pour conséquence une estimation légèrement par excès :

— Dans quelques zones, nous pensons ne pas avoir prospecté le front réel d'évacuation des sels car le bateau était parfois arrêté par des accumulations d'îles flottantes. Celles-ci barrent l'extrémité de certains bras sans toutefois arrêter les eaux. Les conductivités mesurées étaient alors inférieures à celles existant sur le front réel.

— Les phénomènes physico-chimiques et biochimiques, bien que difficile à évaluer quantitativement, amènent une diminution des teneurs ioniques dans le lac.

L'évaluation par défaut est due principalement à une sous-estimation de l'apport en sels au lac, en raison de l'apport éolien difficile à chiffrer. Il n'est certainement pas négligeable.

CONCLUSION

La régulation saline du lac Tchad assurée par deux processus principaux :

— L'abandon superficiel des eaux les plus minéralisées dans les cuvettes littorales des côtes nord et est lors des baisses de niveau, et un rejet des sels à l'extrémité des bras lors des fortes crues pluriannuelles.

— L'infiltration des eaux, préférentiellement dans le sens longitudinal des bras.

La valeur totale de ces pertes superficielles et souterraines est estimée à 9,5 % des apports liquides, par la mesure de la salure globale sur le front de perte. Elles seraient voisines de 7,7 % si le processus ne jouait que sur les côtes orientales, entre Nguigmi et le delta du Chari.

Les hypothèses de base et plusieurs autres causes entraînent une estimation par excès ou par défaut. Les erreurs doivent cependant se compenser partiellement et bien qu'il apparaisse difficile de connaître l'erreur finale, l'on peut penser que les valeurs calculées sont proches de la réalité.

Manuscrit déposé le 25 mai 1970

BIBLIOGRAPHIE

- [1] TILHO (J.), 1910. — Documents scientifiques de la mission Tilho 1906-1909. Imp. nat., Paris, 3 t.
- [2] PIRARD (F.), 1963. — Reconnaissance hydrogéologique du Niger oriental, rapport de fin de travaux 1960-1963, essais d'esquisses hydrogéologiques. BRGM, Orléans.
- [3] FAURE (H.), 1966. — Evolution des grands lacs sahariens à l'Holocène. *Quaternaria*, 8, pp. 167-176.
- [4] SCHNEIDER (J.L.), 1966. — Carte hydrogéologique de reconnaissance au 1/500 000, feuille de Mao et Fort-Lamy ; rapport de synthèse. BRGM, Orléans.
- [5] PIAS (J.), 1967. — Quatre deltas successifs du Chari au Quaternaire (République du Tchad et du Cameroun) *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 264, pp. 2357-2360.
- [6] DUPONT (B.), 1967. — Etude des formations sédimentaires du Kanem, premiers résultats, Sect. géol. ORSTOM, Fort-Lamy, 150 p., 41 fig.
- [7] SERVANT (M.), SERVANT (S.), DELIBRIAS (G.), 1969. — Chronologie du Quaternaire récent des basses régions du Tchad. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 269, pp. 1603-1606, 29 octobre 1969.
- [8] SERVANT (M.), SERVANT (S.), 1970. — Les formations lacustres et les diatomées du Quaternaire récent du fond de la cuvette tchadienne. A paraître, *Rev. Géogr. phys. géol. dynamique*.
- [9] BOUCHARDEAU (A.), LEFEVRE (R.), 1957. — Monographie hydrologique du lac Tchad. Serv. hydrol. ORSTOM, Paris, 112 p., 24 fig., 1 carte.
- [10] TOUCHEBEUF DE LUSSIGNY (P.), 1969. — Monographie hydrologique du lac Tchad. Serv. hydrol. ORSTOM, Paris, 169 p., 80 fig., 1 carte.
- [11] GUICHARD (E.), 1957. — Eaux du lac Tchad et mares permanentes au nord d'Ira. Comm. Sc. du Logone et du Tchad. Sect. pédo. ORSTOM, Centre de Fort-Lamy.
- [12] BOUCHARDEAU (A.), 1958. — Le lac Tchad. Serv. Hydrol. ORSTOM, Paris, *Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer*, année 1956, pp. 9-26.
- [13] ROCHE (M.A.), 1969. — Evolution dans l'espace et le temps de la conductivité électrique des eaux du lac Tchad d'après les résultats de 1908, 1957, 1962 à mars 1968. *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.*, vol. VI, n° 1, 1969.
- [14] ROCHE (M.A.), 1969. — Salinité des eaux du lac Tchad. in. Monographie hydrologique du lac Tchad (1969). Serv. hydrol. ORSTOM, pp. 127-162, 15 fig.
- [15] HOPSON (A.J.), 1968. — Annual report 1966-1967. Federal fisheries services. Lake Chad Research Station. Malamfatori, 83 p.
- [16] CARMOUZE (J.P.C.), 1968. — Ions majeurs, phosphates et silicates dans les eaux du lac Tchad en avril 1968. Sect. hydrobiol. ORSTOM, Fort-Lamy, 18 p. 18 fig.
- [17] CARMOUZE (J.P.C.), 1969. — Salures globales et spécifiques des eaux du lac Tchad en 1968. Sect. hydrobiol. ORSTOM, Fort-Lamy, 15 p., 6 fig.
- [18] ROCHE (M.A.), 1968. — Première estimation des apports en sels au lac Tchad par le Chari. *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.*, vol. V, n° 1, pp. 55-89, 11 fig.
- [19] ILLIS (A.), ROCHE (M.A.), 1967. — Compte rendu de mission sur le lac Tchad. Serv. hydrol. ORSTOM, Fort-Lamy, 8 p., 1 carte.
- [20] DUPONT (B.), LEVEQUE (C.), 1968. — Biomasse en mollusques et nature des fonds dans la zone est du lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol.*, vol. II, n° 2, 1968, pp. 113-126, 6 fig. 9 tabl.
- [21] GUICHARD (E.), 1957. — Sédimentation du lac Tchad. Comm. Sc. du Logone et du Tchad. Serv. Pédol. ORSTOM, 46 p.
- [22] PIAS (J.), 1968. — Contribution à l'étude des formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et des sols qui en dérivent (République du Tchad). Résumé de thèse. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 3-4, pp. 367-377.
- [23] DIELEMAN (P.J.), DE RIDDER (N.A.), 1963. — Expertise sur les mouvements des eaux et du sel dans le polder de Bol Guini. Inst. Internat. pour l'amélioration et la mise en valeur des terres, Wageningen, Hollande, juillet 1963.
- [24] CHEVERRY (C.), 1969. — Salinisation et alcalisation des sols des polders de Bol, conséquences sur la fertilité et l'aptitude à l'irrigation de ces sols. Serv. Pédol. ORSTOM, Fort-Lamy, 110 p., 30 fig.
- [25] Synthèse hydrologique du bassin du lac Tchad. Rapport technique présentant les principaux résultats des opérations. UNESCO, Paris, 1969.

- [26] ROCHE (M.A.), 1970. — Hydrogéologie des côtes du lac Tchad à Tchingam, No et Soro (Kanem). Serv. hydrol. ORSTOM, Fort-Lamy, 32 p., 15 fig.
- [27] SCHNEIDER (J.L.), 1967. — Relations entre le lac Tchad et la nappe phréatique (République du Tchad). Extrait de la publication n° 70 de l'AIHS, *Symposium de Garda*, pp. 122-131, 3 fig.
- [28] ROCHE (M.A.), 1968. — L'eau dans la haute Saoura-Sahara nord occidental. Thèse de troisième cycle, Paris, juin 1968, 265 p., 65 fig., 42 tabl., 20 photos.
- [29] GUICHARD (E.), 1957. — Eaux du lac Tchad et mares permanentes au nord d'Ira. Comm. Sc. du Logone et du Tchad, Serv. Pédol., ORSTOM, 26 p.
- [30] MAGLIONE (G.), 1968. — Présence de gaylussite et de trona dans les natronières du Kanem. *Bull. Soc. Franç. Minéral. Cristallogr.*, (1968), 91, pp. 388-395.
- [31] MAGLIONE (G.), 1969. — Premières données sur le régime hydrogéochimique des mares permanentes du Kanem. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol.*, vol. III, n° 1, 1969.
- [32] FONTES (J.C.), MAGLIONE (G.), ROCHE (M.A.), 1969. — Données isotopiques préliminaires sur les rapports du lac Tchad avec les nappes de la bordure nord-est. *Cah. ORSTOM, sér. Hydro.*, vol. VI, n° 1, pp. 17-34, 6 fig.
- [33] FONTES (J.C.), MAGLIONE (G.), ROCHE (M.A.), 1969. — Eléments d'hydrologie isotopique dans le bassin du lac Tchad. Serv. Hydrol., ORSTOM, 12 p., 4 fig., 4 tabl. Communication présentée au colloque de l'OUA sur les utilisations pacifiques de l'énergie atomique.
- [34] TOUCHEBEUF de LUSSIGNY (P.), 1966. — Bilan hydrologique du lac Tchad. Serv. Hydrol. ORSTOM, Communication *Symposium de Garda AIHS*, Public. n° 70, vol. 1., pp. 7-16.