

# I-2. Ressources en eau souterraine et relations avec le Lac

---

D. DJORET, G. FAVREAU<sup>1</sup>

## Introduction

Le bassin du lac Tchad est un vaste bassin endoréique qui a commencé son remplissage au Crétacé. Des couches sédimentaires allant jusqu'à 7000 m d'épaisseur ont été déposées et servent de siège à une réserve importante d'eau souterraine. De bas en haut, on distingue la nappe du Crétacé, du Continental Terminal (CT), du Pliocène et du Quaternaire. Ces aquifères sont transfrontaliers et s'étendent dans le bassin conventionnel de la CBLT dont ils débordent les limites. L'objectif de ce chapitre est de traiter de la disponibilité en eau douce autour du lac Tchad dans un rayon de 50 km. Un accent particulier est mis sur la nappe du Quaternaire qui est de loin la plus exploitée pour les besoins domestiques et l'élevage. Plusieurs types d'ouvrages sont construits pour le captage : puits ouverts cimentés, puits traditionnels, forages à pompes manuelles et à pompes immergées.

La sécheresse qui sévit depuis le début des années 1970 a entraîné le retrait du lac Tchad dont la superficie est passée de 25 000 km<sup>2</sup> à une surface comprise entre 2000 et 15 000 km<sup>2</sup> selon les années. Depuis quelques années, l'eau souterraine est utilisée pour l'irrigation des petits

---

<sup>1</sup> Citation conseillée : Djoret D, Favreau G., 2014 – “Ressources en eau souterraine et relations avec le Lac”, In Lemoalle J., Magrin G. (dir.) : *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles*, Marseille, IRD Editions, coll Expertise collégiale, 59-78 (clé USB).

périmètres au Tchad (Pallas *et al*, 2012) et au Niger (PNUD, 1991). Cette exploitation ne présente cependant pas un impact visible sur le niveau de la nappe.

Malgré l'alimentation de la nappe bordière du Quaternaire par le lac Tchad, les niveaux d'eau souterraine dans les zones de creux piézométriques situés autour du lac Tchad baissent depuis quelques décennies sous l'effet de la sécheresse qui sévit dans le Sahel depuis le début des années 1970. Suite à cette baisse de niveau, des puits cimentés se sont asséchés. Par contre, dans les zones de recharge le long des tributaires et dans les zones humides, on note des variations annuelles de niveau qui indiquent que la nappe est renouvelée en ces zones. On ne connaît cependant pas avec précision les quantités disponibles, rechargées, et le taux de renouvellement de la nappe.

Les nappes du Pliocène et du CT sont actuellement très sollicitées au Nigeria où plusieurs forages profonds captent la nappe du Pliocène (middle aquifer).

En phase de Moyen Tchad, le processus des échanges entre le lac Tchad et la nappe bordière au Nord-Est détermine la faible salinité du lac. Les sels sont aussi exportés dans les dépressions inter dunaires bordières. Ce processus semble continuer en phase de Petit Tchad puisque les eaux du lac Tchad sont douces de nos jours. Mais l'intensité des échanges est-elle la même qu'au Moyen Tchad ? Il n'y a aucune étude récente pour répondre à cette question.

Quelques modèles hydrodynamiques des nappes ont été proposés. Les connaissances actuelles sont cependant insuffisantes pour une gestion rationnelle et objective de cette ressource et encore moins dans le futur quand des besoins supplémentaires se feront sentir (intensification de l'agriculture, accroissement de la population et besoin de sécurisation par rapport à la variabilité des pluies) (CBLT/BGR 2008, 2009, 2010, 2012).

## 1. La ressource disponible en eau souterraine

Le bassin du lac Tchad possède de vastes régions constituées de formations sédimentaires (sables, grès), servant de siège d'aquifères continus sous les formes suivantes:

- nappes libres (souvent désignées sous le terme « nappe phréatique»);
- nappes profondes captives ou semi-captives, artésiennes sous certaines conditions hydrauliques et topographiques.

Les aquifères continus et transfrontaliers couvrent presque les trois quarts de la superficie totale du bassin orographique. Autour du lac Tchad, seul le Quaternaire affleure (figure 1).

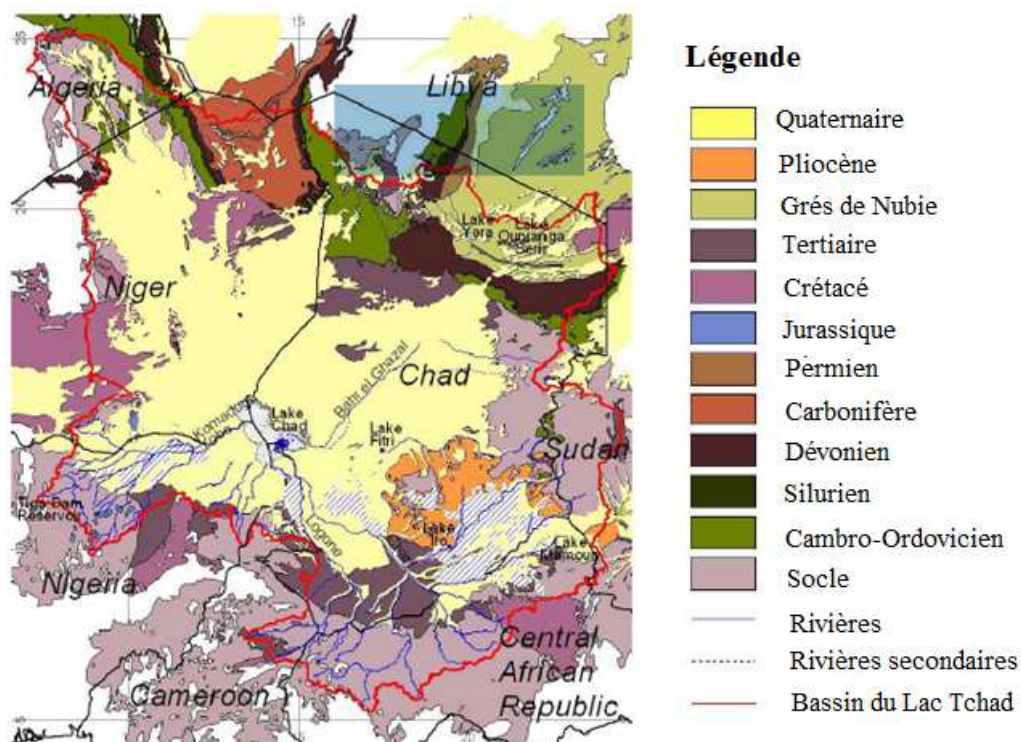


Figure 1 – Géologie du bassin du lac Tchad (Vassolo, 2012)

La coupe géologique (figure 2) montre un système d'aquifères superposés. Il est partagé entre le Tchad, le Cameroun, la RCA, le Niger, le Nigeria. On distingue de bas en haut :

- l'aquifère du Crétacé: il est de nos jours mal connu. Il repose en discordance sur le socle cristallin ;
- l'aquifère du CT (Lower aquifer au Nigeria) qui est captif dans le centre du bassin et autour du lac Tchad mais phréatique dans les pays bas (Bodélé) et au sud du Tchad ;
- l'aquifère du Pliocène inférieur (Middle aquifer au Nigeria) se situe entre 250 et 300 m sous la surface du sol. Il n'y a pas de limite nette entre cet aquifère et celui du Continental Terminal. Il est artésien autour du lac Tchad sur une superficie d'environ 60 000 km<sup>2</sup> et est exploité au Niger et au Nigeria par plusieurs forages artésiens. La série pliocène débute par une série sableuse de 10 à 30 m d'épaisseur (Pliocène inférieur) et se poursuit par une sédimentation argileuse épaisse de 200 m qui sépare le Pliocène de la nappe des formations du Quaternaire;
- la nappe phréatique : la base de l'aquifère des formations du Quaternaire se situe entre 50 et 180 m. Elle est plus profonde sous le lac Tchad. Les profondeurs par rapport au sol des niveaux statiques varient de 5 m en bordure du Chari à 80 m au centre du creux piézométrique de la nappe du Chari Baguirmi qui est la plus déprimée. Les niveaux les moins profonds se localisent près des cours d'eau. Plusieurs creux piézométriques ont été identifiés au Tchad (Chari Baguirmi), Cameroun (Ndiguina), Nigeria et Niger (Kadzel). Depuis quelques décennies, les travaux montrent que le niveau d'eau de la nappe s'abaisse dans ces zones de creux piézométriques. La nappe du Quaternaire est d'extension régionale et constitue la principale ressource exploitable par la population. Les eaux sont douces (1 g/l) à très minéralisées (jusqu'à 7 g/l).

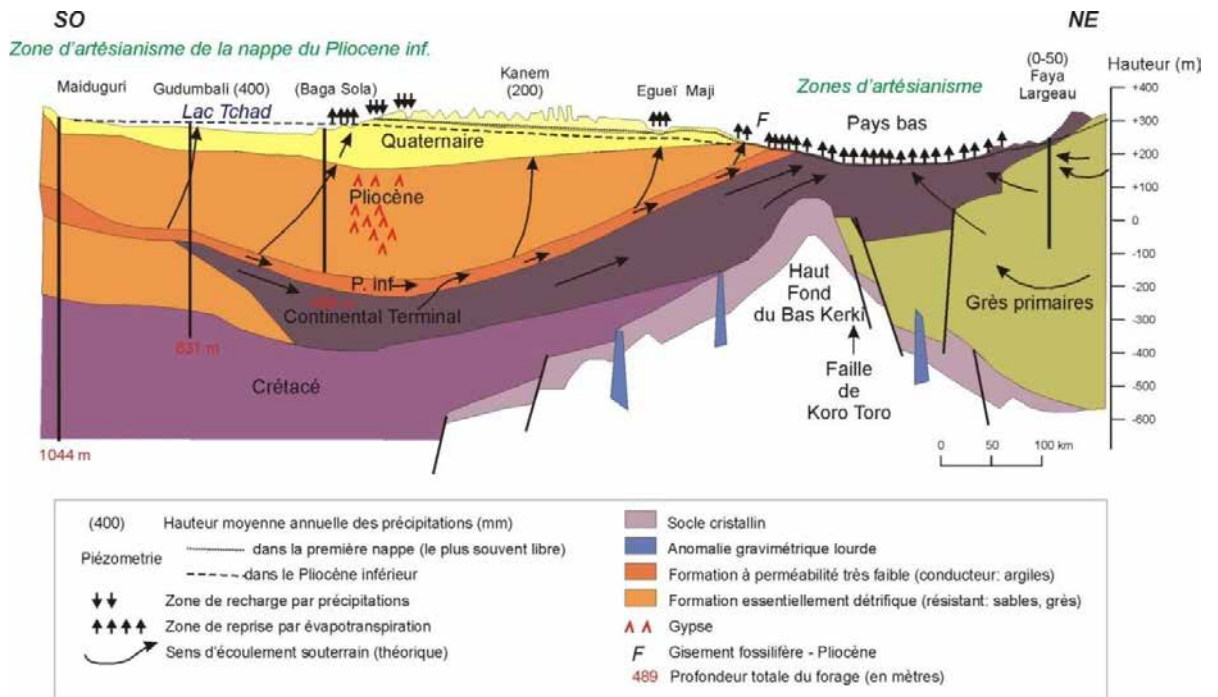


Figure 2 – Hydrogéologie du Bassin du lac Tchad (Schneider, Wolf 1992)

Vu la géologie, il y a des ressources importantes en eau souterraine dans le bassin du lac Tchad. Le tableau 1 résume les estimations quantitatives en réserves exploitables et renouvelables pour la nappe des formations du Quaternaire.

Tableau 1 – Valeurs estimées des ressources en eau de l'aquifère du Quaternaire

|  | Reserve exploitable (milliards de m <sup>3</sup> ) | Réserve renouvelable (milliards m <sup>3</sup> ) | Infiltration (mm) | Méthode d'estimation                  |
|--|--|--|-------------------|---------------------------------------|
| Tchad (BRGM, 1987)                     | 66 à 141   | 3,5  | 15                | Pluie efficace modulé à la lithologie |
| Niger (PNUD, 1991)                     | 500  | 0,05   | 5                 |                                       |
| Cameroun (Ngounou Ngatcha, 1993, 2007) | 0,9 à 1,08   | 0,1 à 0,5  | 25 à 125          | Thornwaite, bilan hydrologique        |
| Nigeria (Edmunds <i>et al.</i> , 2002) |  | 0,25-0,88  | 4-49              | Bilan des chlorures                   |
| <b>Total</b>                           |  | <b>4</b>   |                   |                                       |

## 2. Une nappe phréatique alimentée par le Lac : un processus original qui détermine une faible salinité des eaux du Lac

Le lac Tchad est en relation directe avec la nappe et sa position haute (cote 281 m pendant le Moyen Tchad) par rapport à la nappe devrait favoriser l'infiltration de ses eaux (figure 3).

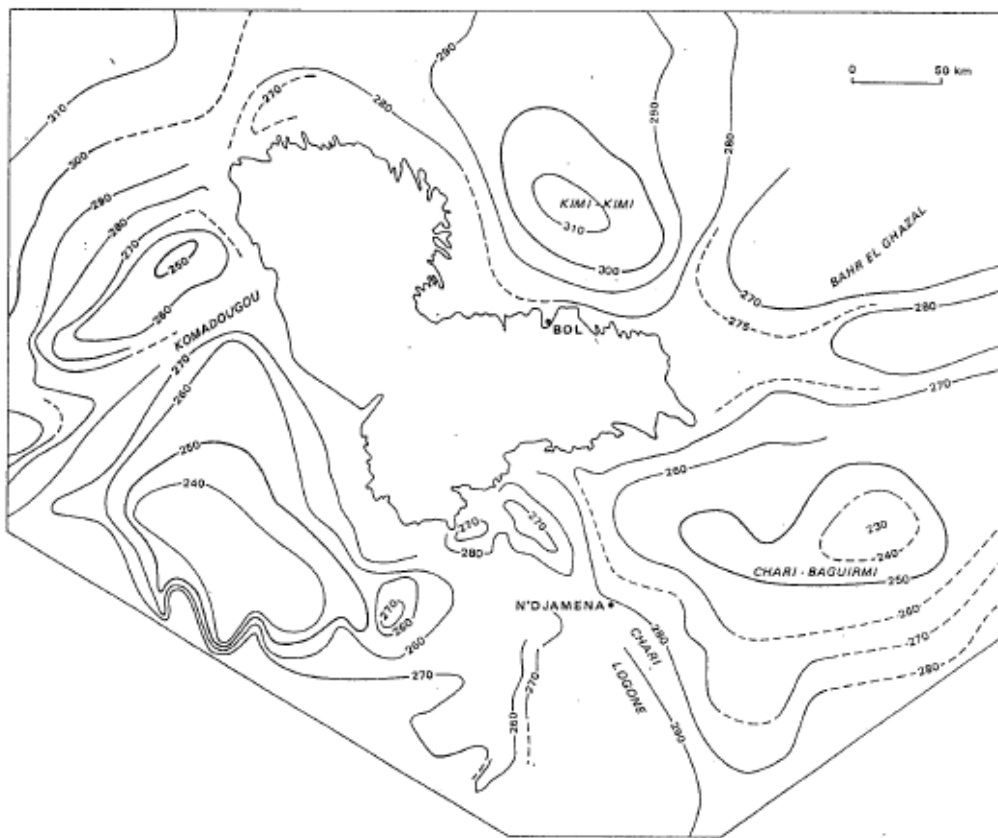


Figure 3 – Courbes isopièzes de la nappe phréatique autour du lac Tchad, année 1966, d'après Olivry *et al.*, 1996)

En réalité, celle-ci se limite à la frange littorale et n'affecte que la partie superficielle de la nappe. Des analyses isotopiques (Fontes *et al.*, 1969) ont montré que la teneur en oxygène-18 des eaux du Lac est voisine de celle des eaux de la nappe près du littoral. Plus loin à l'intérieur des

terres, les compositions isotopiques diffèrent (+10 ‰ pour les eaux du Lac et -5 ‰ pour la nappe).

En phase de Moyen Tchad, la nappe des dunes du littoral nord-oriental du Lac est alimentée à la fois par les précipitations pendant l'hivernage et par le Lac en hautes eaux (figure 4). Pendant la saison sèche et lors de l'étiage du Lac, l'eau stockée dans les dunes s'écoule vers le Lac et vers les creux inter-dunaires où elle s'évapore pour donner des natronières. Ce schéma permet aussi d'expliquer la régulation saline des eaux du lac en phase de Moyen Tchad (Fontes *et al.*, 1969 ; Carmouze, 1983).

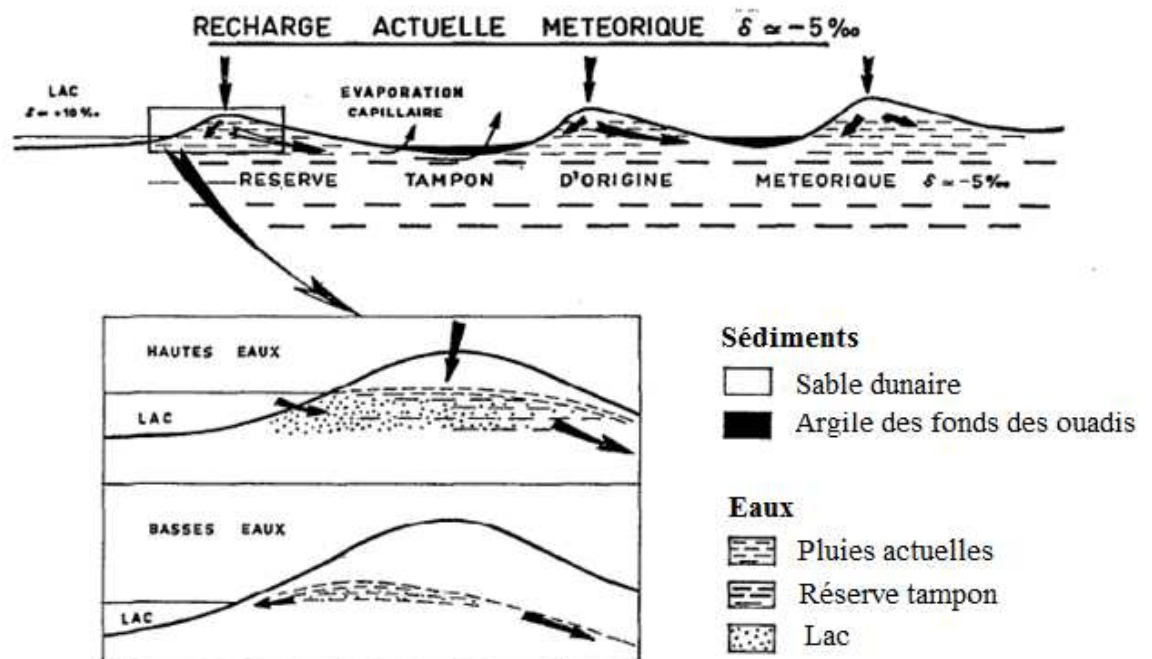


Figure 4 – Relation entre le lac Tchad, la nappe bordière, les apports météoriques et l'évapotranspiration (Fontes *et al.*, 1969).

Des travaux récents (CBLT/BGR, 2012 ; Vassolo, 2012) dans la partie tchadienne de la nappe quaternaire indiquent la direction des flux d'eau souterraine en phase de Petit Tchad. La carte (400 points mesurés) montre que le transfert d'eau se fait des zones humides de Massénya vers le Nord, du Logone vers le lac Tchad, du lac Tchad vers l'Est et du Kanem vers le Sud-ouest (figure 5). En considérant que les hauts niveaux résultent d'une zone de percolation favorable, la recharge est donc causée par les zones humides, le lac Tchad et le Logone. Il y a aussi la recharge dans les

dunes du Kanem par percolation directe des pluies. Le Chari semble déconnecté de l'aquifère. En réalité, le Chari recharge la nappe, mais ce transfert n'est pas mesurable au delà 15 km des bords du Chari (Djoret, 2000). En phase de Petit Tchad, la cuvette nord du Lac s'est asséchée certaines années. Le sens du transfert, s'il existe, entre le Lac et la nappe du Kanem, n'est pas connu (Lemoalle *et al.*, 2005).

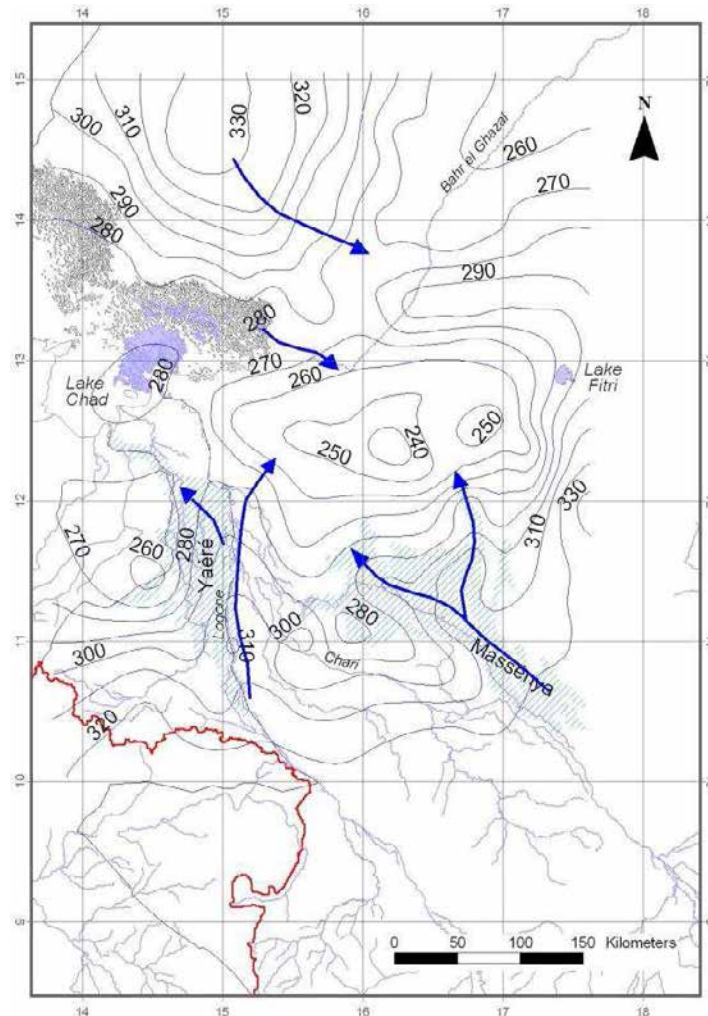


Figure 5 – Direction des écoulements dans la nappe quaternaire dans la partie tchadienne du bassin du lac Tchad (Vassolo, 2012)



Quelques études dans les pays riverains du lac Tchad ont permis d'évaluer les quantités d'eau transférées à la nappe par le Lac en phase de Moyen Tchad. Roche (1970) estime à 9,5 % des apports liquides au Lac les pertes par infiltration et abandon superficiel sur l'ensemble du front côtier. Ce qui équivaut à 3,8 km<sup>3</sup>/an dont 3,08 km<sup>3</sup>/an (soit 7,7%) pour la bordure orientale du Lac entre N'guigmi et le delta du Chari. Cette évaluation a été précisée ensuite pour la seule infiltration, qui a été estimée entre 4,2 et 7,2 des apports totaux en eau au Lac (Roche, 1980). Carmouze (1983) a estimé la perte totale par infiltration à 3,85 km<sup>3</sup>/an pour un Moyen Tchad.

Des modèles de fonctionnement des nappes d'eaux souterraines dans le bassin du lac Tchad ont été proposés. Tous confirment la recharge des nappes bordières par le Lac et les ergs sableux. Le BRGM (1993) a simulé la piézométrie de la nappe quaternaire et des nappes captives du bassin (Pliocène et Continental terminal). Cette simulation montre que la recharge de la nappe quaternaire a lieu dans les ergs sableux même si la pluie est faible. Le déficit au niveau des creux piézométriques est dû à l'exfiltration. Les nappes captives se rechargent au niveau des affleurements au sud du bassin et au contact avec le socle granitique.

Quelques estimations de la recharge ont été faites par des modèles. Le modèle de Leblanc (1997) montre que l'aquifère se caractérise par de faibles écoulements avec de faibles gradients hydrauliques. Le débit transféré vers les pays bas du Tchad est inférieur à 100 millions de m<sup>3</sup>/an et celui transféré vers l'aquifère superficiel est compris entre 40 millions et 100 millions de m<sup>3</sup>/an (Leblanc, 2002), beaucoup moins que celui estimé par Carmouze (1983) et Roche (1970). Dans les zones de creux piézométrique, un prélèvement de 1 mm/an suffit à recréer la dépression. Dans le Manga au Niger oriental, la recharge est de l'ordre du mm/an (Leduc *et al.*, 2000) ; Gaultier (2004) montre qu'il y a une évapotranspiration dominante et de faibles perméabilités dans la nappe en creux du Kadzell dans le Manga. La recharge est uniquement latérale avec 50% des apports depuis la rivière et seulement 7% depuis le Lac. Par ailleurs, le régime transitoire montre l'impact limité sur la nappe libre de la sécheresse de ces dernières décennies malgré l'assèchement prolongé du lac Tchad.

En utilisant les données de suivi des niveaux de la nappe à Ngouri et Djermaya (Schneider, Thiery, 2002), le modèle Gardena permet d'estimer respectivement une recharge de 68 mm/an et 5,7 mm/an.

### **3. Utilisation des ressources en eau souterraine autour du lac Tchad**

#### **3.1. Utilisation domestique, utilisation pour l'élevage et l'irrigation**

Dans le bassin du lac Tchad, l'eau souterraine est surtout utilisée pour les besoins domestiques et l'élevage (Leduc, 1997 ; HCNE, PNUD, 2003). L'irrigation à partir des eaux souterraines est moins pratiquée (voir I-1). Seuls quelques hectares sont irrigués dans les ouadis (zones de dépression) (PNUD, 1991 ; Pallas *et al.*, 2012). Les ouvrages d'exhaure utilisés pour ce faire sont des motopompes. Les agriculteurs cultivent surtout des légumes (laitues, carottes, piments, poivrons etc.).

Pour l'usage domestique et l'élevage, il y a plusieurs types d'ouvrages de captage dans le bassin. Ce sont des puits ouverts cimentés (figure 6), des puits ouverts traditionnels non cimentés, des forages à pompes manuelles et à pompes immergées, ou des stations à pompes solaires alimentant des bornes fontaines dans les villages.

La population autour du lac est estimée à 2,1 millions d'habitants (voir II-2), ce qui équivaut à une consommation annuelle d'environ 23 millions de m<sup>3</sup>/an sur la base de 30 l/jour/personne. Ce qui paraît négligeable par rapport à la réserve disponible (tableau 1) de la nappe quaternaire qui est de loin la plus exploitée. La part consommée par le bétail n'a pas été estimée faute de données sur le cheptel de la zone autour du lac Tchad. Elle peut-être aussi forte, voire plus importante, que la consommation humaine. Si, au total, ces prélèvements restent modérés par rapport à la ressource estimée, il peut néanmoins exister localement des surexploitations.



**Figure 6 – Puits cimenté ouvert pour l’usage domestique et l’élevage**  
**(photo D. Djoret)**

### **3.2. Description de la répartition des ouvrages**

Les puits cimentés sont creusés depuis plusieurs décennies. Certains sont actuellement dans un état vétuste. En certains endroits, surtout au niveau des creux piézométriques autour du lac Tchad, les niveaux d'eau baissent depuis plusieurs décennies si bien que certains puits sont secs de nos jours. Actuellement, des programmes d'hydraulique villageoise installent des forages à pompes solaires et manuelles. Il y a aussi des forages profonds artésiens dans le bassin, surtout au Nigeria.

Certaines stations solaires sont équipées de châteaux d'eau qui permettent d'alimenter des bornes fontaines. Ces stations solaires sont surtout visibles au Tchad. Malgré les efforts pour améliorer la situation, beaucoup de villages ne sont pas alimentés en eau potable.

La CBLT n'intervient pas dans le domaine de l'hydraulique villageoise, qui est une prérogative des États membres. Elle oriente ses actions pour la résolution des problèmes transfrontaliers. Elle est actuellement engagée dans la mise en œuvre du PAS (Programme d'Action Stratégique) à travers les cinq objectifs qui y sont définis (GEF, UNDP, UNOPS, 2012). Parmi ces cinq objectifs, l'amélioration de la qualité et de la quantité des ressources en eau dans le bassin du lac Tchad est primordiale. Les eaux souterraines font l'objet de la cible 2 du premier Objectif de la qualité de l'environnement et des ressources en eau: élaborer et initier des stratégies de gestion des eaux souterraines. Ces stratégies sont :

- évaluer les connaissances actuelles sur la disponibilité, l'écoulement et la qualité des eaux souterraines et leurs interactions avec le Lac ;
- réviser le cadre légal et institutionnel ;
- concevoir un programme régional de suivi des eaux souterraines ;
- renforcer le réseau d'observations ;
- faire des démonstrations sur la gestion des eaux souterraine.

Quelques projets ont été alors proposés dans le plan d'investissement quinquennal.

### 3.3. Tendances

Les mesures piézométriques de 1963 à 1989 dans la partie tchadienne montrent que le niveau d'eau de la nappe quaternaire baisse (Bichara *et al.*, 1989). Une analyse des données de 1963 à 1990 et quelques mesures effectuées par la CBLT en 2011 sur un transect allant du lac Tchad au centre du creux piézométrique de la nappe du Chari Baguirmi au Tchad (figures 7, 8), montre que la nappe continue à baisser, surtout au niveau du creux piézométrique (Djoret, Vassolo, 2012). La nappe est sensible à la sécheresse, mais elle réagit avec retard. Une augmentation de la pluviométrie peut améliorer la recharge de la nappe quaternaire. A l'inverse, une péjoration climatique peut conduire à son épuisement progressif. Il est donc important de suivre l'évolution des niveaux d'eau de la nappe autour du lac Tchad pour une gestion raisonnable.

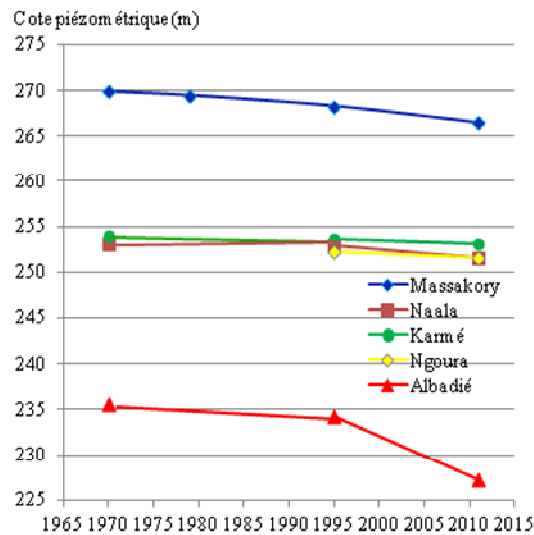


Figure 7 – Évolution des niveaux d'eau dans quelques puits près du lac Tchad (1963–2011) (d'après Djoret, Vassolo, 2012).

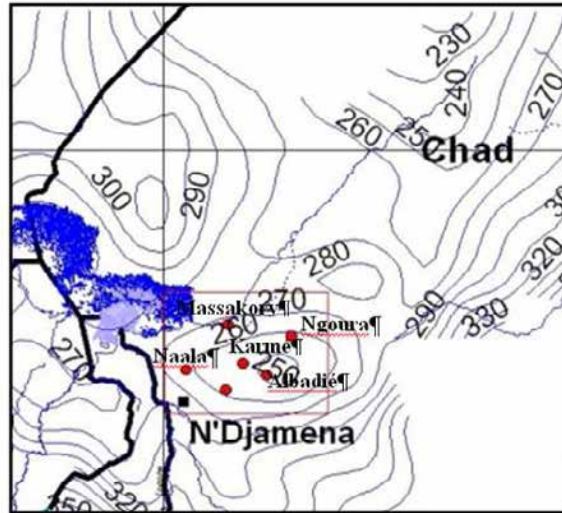


Figure 8 – Carte de localisation des points étudiés.

## 4. Des questions à résoudre

Malgré l'importance des ressources en eau souterraines autour du lac Tchad pour satisfaire les besoins de la population, beaucoup de problèmes subsistent. En certains endroits, surtout dans les creux piézométriques, la nappe phréatique est très minéralisée (jusqu'à 5g/L) avec des teneurs importantes en sulfates. Outre cette contamination naturelle, des études récentes (Ngounou Ngatcha, 1993 ; Djoret, 2000 ; Ngounou Ngatcha et Djoret, 2010 ; Vassolo, 2012) montrent qu'il y a parfois de fortes teneurs en nitrates (plus de 100 mg/L) dues à l'agriculture et au manque d'hygiène autour des puits ouverts villageois. La tendance actuelle est l'alimentation des communautés villageoises par des forages, mais tous les villages et villes ne sont pas servis. Il y a donc un problème d'alimentation en eau potable.

Il n'existe pas de mesures continues du niveau de l'eau souterraine autour du lac Tchad. Des données existent dans les pays membres de la CBLT, mais elles ne sont pas centralisées au niveau de l'organisation régionale. Il y a nécessité de collecter les données des pays pour constituer une base de données unique pour une bonne gestion des eaux souterraines suivant les objectifs projetés dans la vision 2025 et le Plan d'Action Stratégique (PAS) de la CBLT. Actuellement, l'observatoire du bassin de la CBLT constitue une base de données régionale (BDR) qui n'est pas encore opérationnelle.

## **Conclusion**

Les réserves en eaux souterraines douces sont assez importantes (tableau 1) autour du lac Tchad pour satisfaire les besoins domestiques, l'élevage et même de petites irrigations. Le renouvellement des eaux est cependant faible. Pour une bonne adéquation entre la réserve disponible et l'exploitation, il est nécessaire de suivre les niveaux de façon continue.

En outre, en certains endroits, l'eau est impropre à la consommation car elle est contaminée soit naturellement (eau très minéralisée avec des teneurs élevées en sulfates, Djoret, 2000 ; Vassolo, Djoret, 2012), soit par des actions anthropiques avec des teneurs en nitrates supérieures à 100 mg/l et au dessus des normes guide de l'OMS (Vassolo, 2012 ; Djoret, 2000, Ngounou Ngatcha et Djoret, 2010). Il serait opportun de développer les forages ou les puits fermés pour préserver l'eau de la pollution humaine, et d'orienter l'exploitation vers les nappes profondes lorsque la nappe phréatique est de mauvaise qualité.

Le potentiel en eau souterraine peut être aussi utilisé davantage pour l'environnement /agroforesterie, et l'agriculture. Les volumes destinés à cette utilisation ne doivent pas dépasser la réserve renouvelable.

## **Recommandations**

- Un suivi qualitatif et quantitatif des nappes, surtout celle des formations du Quaternaire et du Pliocène du Lac, est nécessaire pour une bonne gestion. Cette question concerne tout le bassin et pas seulement la région du Lac.
- L'évaluation quantitative de l'exploitation doit également être faite pour tout le bassin. Elle portera aussi bien pour les eaux utilisées pour l'irrigation que pour l'utilisation domestique et l'élevage. Il en est de même pour les retenues en aval des barrages.
- La nappe profonde du Pliocène, artésienne autour du lac Tchad, peut être exploitée pour l'alimentation en eau potable : en certains endroits, la nappe quaternaire est très minéralisée et les puits ouverts sont pollués par les activités anthropiques. Les populations de ces zones souffrent donc d'un problème d'approvisionnement en eau potable à partir de la nappe quaternaire. Par contre, la nappe profonde n'est pas très minéralisée et est protégée naturellement.
- Étude de la recharge des nappes : les études doivent porter surtout sur la recharge des aquifères par le Lac ou les rivières, ce qui permettra de produire des modèles de recharge avec les relations Lac - nappe et rivières - nappes.
- Les potentiels souterrains peuvent être utilisés davantage pour les usages environnementaux / agroforesterie, agriculture. Les volumes destinés à cette utilisation ne doivent pas dépasser la réserve renouvelable pour maintenir un équilibre exploitation/renouvellement.
- Les forages artésiens défectueux où l'eau coule en permanence depuis des décennies doivent être remis en état. Cet écoulement est l'une des causes de la baisse de la hauteur d'eau artésienne.



## Références bibliographiques

BICHARA D.,SAFI A., SCHNEIDER J-C., 1989 – La précarité ou même l'absence d'alimentation de la nappe phréatique en zone nord sahélienne du Tchad. Résultats d'un quart de siècle de surveillance piézométrique. *C.R. Acad. Sci. Paris. Série II.* t 309 : 493-496.

BRGM, 1987 – *Actualisation des connaissances sur les ressources en eau de la République du Tchad. Deuxième partie : synthèse des données hydrogéologiques et carte à 1/500000.* Rapport BRGM N°87 TCD 246 EAU 116 p. multigr.

BRGM, 1993 – *Monitoring and management of groundwater resources in the Lake Chad Basin.* Final report. BRGM R35985 EAU/4S/93: 67 p.

CARMOUZE, J-P., 1983 – Hydrochemical regulation of the lake. In Carmouze J-P., Lévêque C., Durand J-R (eds.), *Lake Chad: Ecology and productivity of a shallow tropical system.* La Haye, Junk Pub : 95-122.

CBLT-BGR, (Commission du Bassin du Lac Tchad)/(Institut Fédéral de Géosciences et Ressources Naturelles), 2008 – *Lake Chad Sustainable Water Management, Project Activities.* - Internal Technical Report No 1, prepared by Lake Chad Commission (LCBC), N'Djamena & Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover 13 p. multigr.

CBLT-BGR (Commission du Bassin du Lac Tchad)/(Institut Fédéral de Géosciences et Ressources Naturelles), 2009 – *Lake Chad Sustainable Water Management, Project Activities.* - Internal Technical Report No 2, prepared by Lake Chad Commission (LCBC), N'Djamena & Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover 21 p. multigr.

CBLT-BGR (Commission du Bassin du Lac Tchad)/(Institut Fédéral de Géosciences et Ressources Naturelles), 2010 – *Lake Chad Sustainable Water Management, Project Activities.* - Internal Technical Report No 3, prepared by Lake Chad Commission (LCBC), N'Djamena & Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover 40 p. multigr.

CBLT-BGR (Commission du Bassin du Lac Tchad)/(Institut Fédéral de Géosciences et Ressources Naturelles), 2012 – *Lake Chad Sustainable*

*Water Management, Project Activities.* - Internal Technical Report No 4, prepared by Lake Chad Commission (LCBC), N'Djamena & Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover 24 p. multigr.

DJORET D., 2000 – *Étude de la recharge de la nappe du Chari Baguirmi (Tchad) par les méthodes chimiques et isotopiques.* Thèse Uni. Avignon et des pays de Vaucluse, 151 p.

DJORET D., VASSOLO S., 2012 – Effects of climate change on the groundwater resource in the Lake Chad Basin. *Proceedings of 5th conference on water and environment.* BALWOIS, 28 May to 2 June 2012 - Ohrid, Republic of Macedonia. Edition M. Morel, Faculty of Engineering Science, Skopje.

EDMUNDS W.M., FELLMAN C., GONI I-B., 2002 – Spatial and temporal distribution of ground water recharge in the Northern Nigeria. *Hydrogeology Journal*, 10, 205-215.

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, série Hydrologie.* 6 (1): 17-34.

GAULTIER G., 2004 – *Recharge et paléorecharge d'une nappe libre en milieu sahélien (Niger oriental) : approche géochimique et hydrodynamique.* Thèse de doctorat, Université Paris Sud.

GEF, UNDP, UNOPS, 2012 – *Inversion des tendances à la dégradation des terres et des eaux dans l'écosystème du bassin du lac Tchad. Programme d'action stratégique du bassin du lac Tchad.* CBLT/DRCISD mars, 2012. 58 p.

HCNE, PNUD, 2003 – Schéma Directeur de l'Eau et de l'Assainissement au Tchad. Document principal. N'Djaména, MEE, ONU-DAES, 236 p.

LEBLANC M., 1997 – *Modélisation numérique de la nappe quaternaire du Manga (Niger oriental).* Mem. DESS hydrogéologie et environnement. Univ. Montpellier 89 p.

LEBLANC M., 2002 – *Gestion des eaux des grands bassins semi-arides à l'aide de la télédétection et des SIG. Application à l'étude du bassin du lac Tchad, Afrique.* Thèse universités Poitiers et Glamorgan, 234 p.

LEDUC C., 1997 – Les ressources en eau du département de Diffa (partie nigérienne du bassin du lac Tchad) *In* Jungraithmayr H., Barreteau

D., Seibert U. (ed.): *L'homme et l'eau dans le bassin du lac Tchad = Man and water in the lake Chad basin*, Paris : Orstom : 63-71.

LEDUC C., SABLJAK S., TAUPIN J-D., MARLIN C., FAVREAU G., 2000 – Estimation de la recharge de la nappe quaternaire dans le Nord-Ouest du bassin du lac Tchad (Niger oriental) à partir de mesures isotopiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 01/2000; DOI:10.1016/S1251-8050(00)00162-2.

LEMOALLE J., G. FAVREAU, J.-L. SEIDEL, R. ZAÏRI. 2005 – Changes in Lake Chad water chemistry during a drought period. *Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 06285, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-06285*.

NGOUNOU NGATCHA. B., 1993 – *Hydrogéologie des aquifères complexes en zone semi aride. Les aquifères du Grand Yaéré (Nord Cameroun)*. Thèse Université Joseph Fourier-Grenoble, 352 p.

NGOUNOU NGATCHA. B., MUDRY J., SARROT R-J., 2007 – Groundwater Recharge from Rainfall in the Southern Border of Lake Chad in Cameroon. *World Applied Sciences Journal* 2 (2): 125-131, 2007 ISSN 1818-4952.

NGOUNOU NAGTCHA. B., DJORET D., 2010 – Nitrate pollution in groundwater in two selected areas from Cameroon and Chad in the Lake Chad basin. *Water Policy* 2 (5): 722-733.

OLIVRY J-C., CHOURET A., VUILLAUME G., LEMOALLE J., BRIQUET J-P., 1996 – *Hydrologie du lac Tchad*. Paris, ORSTOM Editions, 302 p.

PNUD, 1991– *Département de Diffa. Synthèse des ressources en eau souterraine*. Rapport du projet DTCD-NER86001, Niamey, 49 p.

PALLAS P., ANTONIO C., SUTTER P., 2012 – *Evaluation du potentiel de mise en valeur des ressources en eau dans le Kanem-Tchad*. Rapport FAO, 41 p.

ROCHE M.A., 1970 – Évaluation des pertes du lac Tchad par abandon superficiel et infiltration marginales. *Cah. ORSTOM, sér. Géol. II*: 1- 67-80.

Roche M-A., 1980 -*Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad*. Paris, ORSTOM, 391 p.

SCHNEIDER J-L., WOLF J-P., 1992 – *Carte géologique et hydrogéologique à 1/1500000 de la République du Tchad. Mémoire explicatif*. Document BRGM No 209, Vol.1, 302 p., Vol 2:387 p.

SCHNEIDER J-L., THIERY D., 2002 – Bilan d'eau en trois points de la nappe phréatique générale du Tchad. *Pangea* N°37/38, 42-52

VASSOLO S., DJORET D., 2012 – *Report lake Chad sustainable water management. Project activities. Internal technical report CBLT-BGR N°4.* 24 p. multigr.

VASSOLO S., 2012 – Ground water recharge in the Lake Chad basin. Borntraeger Science Publishers, *Proceedings of hydrology of arid environments*: 171-176.

# **Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles**

**Sous la direction de :**

Jacques LEMOALLE et Géraud MAGRIN

**Experts coordonnateurs :**

SAIBOU ISSA, Goltob Mbaye NGARESSEM,  
Benjamin NGOUNOU NGATCHA, Christine RAIMOND

**Experts du collège :**

Boureima AMADOU, Daira DJORET, Guillaume FAVREAU, Ibrahim Baba GONI,  
Hubert GUÉRIN, Frédéric REOUNODJI, Florence SYLVESTRE,  
Muhammad WAZIRI

**Avec les contributions de :**

Mouhamadou ABDOURAHAMANI, Marie BOUVAREL,  
Audrey Mbagogo, Ronan MUGELÉ, Hadiza Kiari FOUYOU, Charline RANGÉ

*Expertise collégiale réalisée par l'IRD  
à la demande de la Commission du bassin du lac Tchad*

**IRD Éditions**

INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT

Collection expertise collégiale

Marseille, 2014

**Responsable éditorial**

Sylvain ROBERT

**Coordination éditoriale**

Laure Vaitiare ANDRE

**Relecture scientifique des contributions intégrales**

Jean-Claude OLIVRY

Christian SEIGNOBOS

**Relecture technique des contributions intégrales et mise en forme**

Laure Vaitiare ANDRE

Danielle GRANIER

Eva LEGRAS

Sylvain ROBERT

**Coordination de fabrication**

Catherine PLASSE

**Duplication de la clé USB et interactivité :**

Digital Services/Poisson soluble

Cette clé USB regroupe la version numérique de la synthèse en français et en anglais, ainsi que l'ensemble des contributions intégrales des experts du collège.

Pour citer cet ouvrage :

Lemoalle J., Magrin G. (dir.), 2014 – *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles*. Marseille, IRD Editions, coll. Expertise collégiale, 218 p + clé USB.

© IRD, 2014

ISSN : 1633-9924

ISBN : 978-2-7099-1836-7