



Section : *Environmental and Water Sciences*
Publication type : *Full paper*

Estimation of recharge and evapotranspiration of groundwater during wet or dry periods according to the fluctuation of the dynamic level of the free water tables in the Lake Chad area (Chad) **Estimations des recharges et évapotranspirations des eaux souterraines pendant les périodes humides ou sèches par fluctuation du niveau dynamique des nappes libres de la région du lac-Tchad (Tchad)**

Received 04 May 2017
Accepted 22 June 2017
On line 30 June 2017

A.M. BADA¹, R. MALOU¹, C.D. OUSMANE¹, M.M. KODI² & A.W.SOUK²

(1) Département de Géologie

Université Cheikh Anta Diop de Dakar/ Faculté des Sciences et Techniques
Dakar, Sénégal

B.P : 5005 Dakar, Fann

Email : raymondmsouar@gmail.com & ouscolydiouf@yahoo.fr

(2) Département de Géologie

Université Polytechnique de Mongo/Institut Polytechnique de Mongo
Mongo, Tchad

B.P: 4377 N'Djamena, Tchad

Email : kodimahamat@yahoo.fr

Key words: Quaternary Aquifers, Release, Equation, Estimation, Lake Chad, Free Water Tables, Statistic and Refill Levels.

Abstract: The evolution of lake of Chad during the last millennium saw a change in the hydrodynamic of the phreatic water table.

The collection of the dynamic monitoring of the Quaternary phreatic aquifers over four years provided data on the changes in the dynamic levels of the free water table due to the height of the lake water levels and to the rain infiltrations [1].

That allowed an estimation of the refill (wet periods) and the release (dry periods) of free surface water tables of the region.

MOTS CLES

Aquifères du Quaternaire, décharge, équation, estimation, lac-Tchad, nappes libres, niveaux statistiques et recharge.

Résumé : L'évolution du lac Tchad durant ces dernières décennies a vu aussi varier l'hydrodynamique de la nappe phréatique.

La collecte des suivis dynamiques des aquifères phréatiques du Quaternaire sur quatre ans ont permis d'avoir des données sur les variations des niveaux dynamiques des nappes libres dues à la variation des niveaux d'eaux du lac et l'infiltration de la pluie [1].

Cela a permis d'estimer la recharge et la décharge des nappes libres de la région.



1. Introduction

La région du lac-Tchad qui est un territoire aride à subaride à climat sahélo-saharien, où les formations géologiques sont à majorités des sables grossiers à moyens, des limons et des argiles parfois mélangés d'un site à l'autre et en profondeur, où les eaux de surface sont sous pression climatiques et anthropiques donc les nappes souterraines constituent une source d'eau fiable. Elles ont une fonction régulatrice pendant les périodes où les précipitations sont insuffisantes [2].

Le rapport entre le lac Tchad et les nappes aquifères des bas-fonds inter-dunaires dans la région dépend des apports des tributaires et des eaux météoriques qui sont à la base de plusieurs problèmes qu'il faut chercher à résoudre pour sauvegarder la cuvette tchadienne. Parmi ces problèmes nous avons la question de l'alimentation et de la diversité des nappes aquifères qu'alimente le lac Tchad.

La formation Quaternaire de la région repose sur les dépôts argileux du Pliocène supérieur, ce qui forme le mur imperméable de l'aquifère du Quaternaire a des profondeurs de 60 à 70 mètres.

Compte tenu des contextes hydrologique et hydrogéologique, le fonctionnement hydrologique du lac est régi par les apports (entrée) et sortie (perte).

Les apports (entrée) sont représentés par :

- Les volumes d'eau apportés par les cours d'eau superficiels ;
- Les précipitations reçues par le lac ;
- Le retour des eaux souterraines dans le lac.

Les sorties (pertes) représentées par :

- L'évapotranspiration (évaporation à partir de la surface du lac + transpiration des plantes aquatique) ;
- Les infiltrations (pertes vers le sous-sol alimentant la nappe d'eau souterraine).

L'équation générale du bilan de ce hydrosystème peut s'écrire : **$R + P = ETP + I + DS$ (1)**

Avec R : Apports de surface; P: Précipitations; ETP: Evapotranspiration; I : Pertes vers la nappe souterraine (recharge) ; DS : Variation du stock du lac.

On note que les apports superficiels au lac (R) sont bien maîtrisés. Ces apports sont constitués principalement par le système Chari-Logone-El-Beïd (90% statistique de 2001) ; et celui de Komadougou (1%) et les précipitations (8,9%).

Il en est de même des termes ETP et DS du bilan, les données permettant de les quantifier étant suffisamment nombreuses [3]. Les pertes par infiltrations (I) par contre seront mesurées sur les points d'observations (forages et puits) par la recharge des aquifères phréatiques sur les quatre ans (2013-2016) des mesures, cela seulement du côté cuvette sud du lac Tchad qui constitue le site d'étude (Bol, Baga-sola, Guittè et Dandi).

L'objectif de ce travail vise aux estimations des évapotranspirations des nappes phréatiques et les recharges par infiltration des eaux du lac et de la pluie des aquifères du Quaternaire de la région du lac Tchad.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériels

Pour cette étude le matériel utilisé consiste en une sonde piézométrique et un GPS.

Il importe donc, tout d'abord, dans une étude hydrogéologique, de préciser le niveau d'eau dans l'aquifère. Les niveaux d'eau mesurées sont rarement constants sur une longue période; ils subissent des variations à cause de:

- La précipitation, de l'infiltration et de l'évaporation ;
- La variation du niveau de contrainte (charges) ;
- L'écoulement saisonnier alimenté par la variation saisonnière des niveaux de rivières ou de lacs avoisinants ;
- Le pompage ou recharge en eau ;
- Les effets du gel et de dégel ;
- L'humidité.

On utilise généralement les dispositifs tels : les forages, les puits et les piézomètres pour effectuer les mesures [1]. Ainsi, la surveillance des dynamiques des nappes, qui est indispensable pour la connaissance quantitative de la ressource en eau souterraine. Cette mesure se fait de deux manières :

- Mesure ponctuelle par une sonde manuelle ; c'est ce qui est effectuée dans le cadre de cette d'étude ;
- Mesure régulière à l'aide d'enregistrement automatique, avec données télétransmises pour le plus perfectionné.

2.2. Conception d'un modèle mathématique empirique des fluctuations des niveaux dynamiques des nappes

Un modèle mathématique est une présentation analytique (sous forme d'un ensemble d'équations) de la complexité observée ou supposée d'un phénomène physique, qui permet d'avoir une meilleure compréhension des différentes composantes et d'analyser l'influence qu'elles exercent

entre elles. Dans cette optique, il est constitué d'une ou plusieurs relations entre des variables, jugées caractéristiques, de tout ou partie du phénomène représenté [4] [5].

A ce sujet, l'échange dynamique de la nappe libre de la région d'étude sur un temps donné s'observe par l'infiltration correspondant à la recharge et l'évapotranspiration de la nappe correspondant à l'exfiltration (décharge), qui seront déterminer à travers les équations mathématiques déjà établies par les scientifiques [5][6].

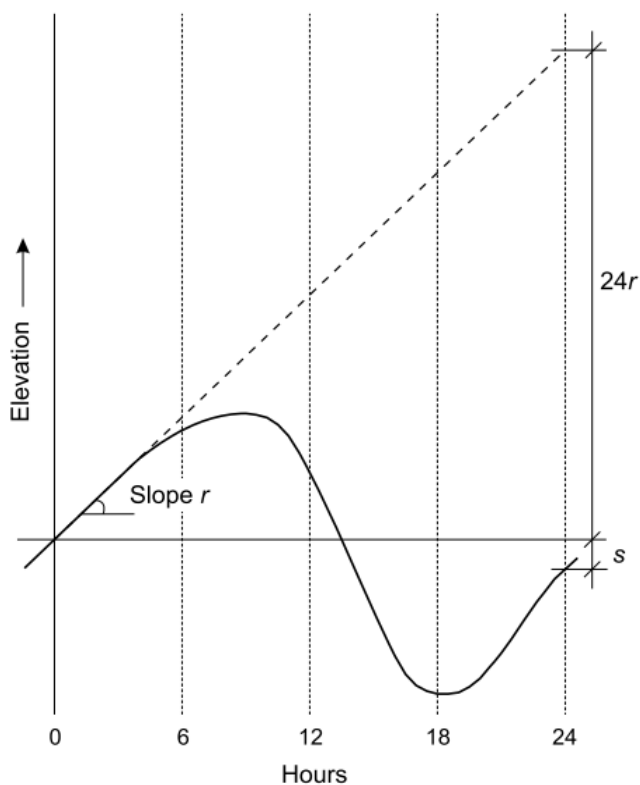


Fig. 1: Représentation graphique de variation pour l'estimation de l'évapotranspiration de la nappe aquifère par fluctuation en utilisant la méthode White de Healy
Source : [6]

Selon la méthode White [6]

$$ET_G = Sy (24r \pm s) \quad (2) \quad ET_G \text{ (mm/h ou mm/an).}$$

s: recharge nette sur 24 heures ;

r: recharge les quatre premières heures de la journée ;

ET_G : évapotranspiration de l'eau souterraine (décharge).

D'après [7] on a :

$$G_{rec} = S_y (dh/dt) \quad (3) \quad G_{rec} \text{ (mm/h ou mm/an)}$$

G_{rec} : recharge (infiltration) ;

S_y : specific yield, valeurs calculées beaucoup des fois et standardisées ;

Dh : variations des niveaux dynamiques des nappes phréatiques ;

Dt : Temps correspondant aux périodes des recharges (humides) et périodes des évapotranspirations des eaux souterraines (sèches).

Tab.1 : Propriétés hydrauliques et textures moyennes de quatre profils types des sédiments et leurs valeurs de specific yield (S_y)

Sédiment texture	Θ_r	Θ_s	α 1/cm	n	K_s cm/day	S_y
Sand	0,045	0,43	0,145	2,68	710	0,32
Loam	0,078	0,43	0,036	1,56	25	0,075
Silt	0,034	0,46	0,016	1,37	6,0	0,026
Sandy clay	0,1	0,38	0,027	1,23	2,9	0,015

Source : [7]

S_y : Specific yield, Θ_r : saturated moisture content, Θ_s : residual moisture content, K_s : Épaisseurs exfiltration.

2.3. Présentation de la région d'étude

2.3.1. Localisation géographique de la région du lac Tchad

Située entre le 13^{ème} et le 14^{ème} parallèle, la région du lac couvre environ 22.320 km². Elle est encadrée par les départements du Kanem et de Hadjar Lamis et à des frontières communes avec le Cameroun au Sud, le Nigeria au Sud-ouest, le Niger à l'Ouest (Cf. Fig. 2). Le chef-lieu du département de Mamdi, Bol, se trouve à vol d'oiseau à 150 km de N'Djamena, 80 km des frontières Nigériennes et 100 km de chef-lieu de département de Wai (Mao).

La région occupe le versant Sud du massif dunaire ancien du Kanem située à une altitude moyenne de 350 mètre, qui se caractérise par l'alternance de dunes alignées dans la direction Nord-ouest/Sud-est et de dépression qui leur sont parallèles.

Ce réseau de dunes se trouve au Nord dans le lac Tchad lui-même ou il constitue un archipel composé d'une multitude d'îles.

La zone englobe en effet la quasi-totalité de la partie tchadienne du lac qui constitue, grâce aux îles qui l'occupe, le lac « utile » [8].

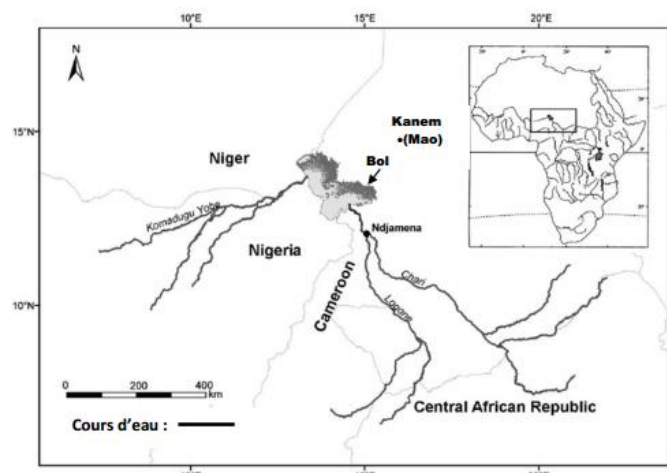


Fig. 2 : Localisation géographique de la région du lac
Source : [8]

2.3.2. Situation climatique actuelle de la région du lac Tchad

La région de notre étude est soumise à un régime aride à subaride. De novembre à mars, le FIT (front intertropical) est situé bien loin au Sud du Tchad : l'harmattan règne et la saison sèche est absolue.

A partir d'avril, le FIT commence à remonter nettement vers le Nord. Il atteint sa position la plus septentrionale en juillet et août, puis rétrograde rapidement vers le Sud et la saison sèche s'installe de nouveau à la fin du mois de septembre. Ce schéma général, relativement simple, subit de très fortes variations dans l'espace et dans le temps (Cf. Fig. 3). Vers le Nord et vers l'Est, le gradient climatique traduit une accentuation vers l'aridité ; les précipitations diminuent, les températures augmentent, l'évaporation croît et s'accompagne d'une baisse importante de l'humidité relative [8].

A cela s'ajoute aussi le vent local du secteur d'étude, qui fonction en régime des vents principaux et est lié aux déplacements du front intertropical :

- L'harmattan qui souffle en saison sèche, en provenance du Nord, Nord-est et Est, transporte des fines particules qui créent une brume sèche. La moyenne de la vitesse de l'harmattan ; enregistrée à la station météo de Bol, est d'environ 2 m/s mais entre décembre et février, période la plus fraîche, elle atteint 3 m/s. c'est au cours de cette période que l'on observe les brumes sèches constituées de nuages de très fines particules sableuses qui vont se déposer sur les cultures dans les ouadis ou/et les polders.
- La mousson, venant du Sud-ouest et de l'Ouest, domine entre mai et septembre (Cf. Fig. 3) [9].

Il existe également des vents locaux secondaires entre le lac et la zone continentale dont le sens change entre le jour et la nuit.

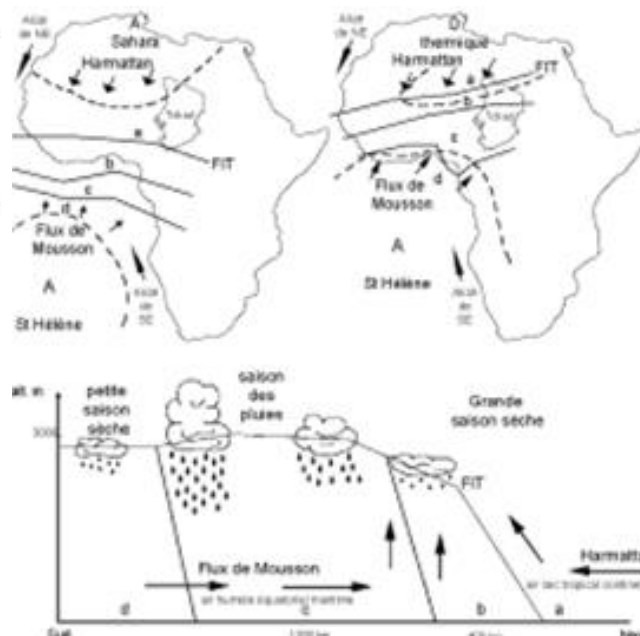


Fig. 3 : Principaux flux de masse d'air déterminant la saison de pluie en Afrique de l'Ouest jusqu'à l'Afrique central et coupe Nord-sud, en janvier-février (A) et en juillet-août (D)
Source : [9]

2.3.3. Situation géologique

La formation précambrienne constitue le soubassement des formations sédimentaires (Cf. Fig. 4). Elle est marquée par une forte empreinte de l'orogénèse panafricaine qui aurait eu lieu entre -700 et -600 Ma. Cette formation primaire affleure dans les massifs du pourtour du Bassin du Lac Tchad au sud, sud-ouest et sud-est comme elle couvre de vastes surfaces dans le Nord du Tchad (Cf. Fig. 5). Elle est marquée par des plissements de vaste amplitudes engendrant de grandes failles d'effondrement orientées S.SW- N.NE.

Le phénomène géologique suivant correspond à l'ouverture de grands fossés au Jurassique supérieur-Crétacé inférieur (vers -150-120 Ma) sur des directions panafricaines. Ces fossés peuvent atteindre des profondeurs de plusieurs milliers de mètres. La sédimentation dans ces bassins a commencé au Crétacé inférieur (Cf. Fig. 4).

Des sédiments à faciès continental se sont déposés pour constituer la série gréseuse et argileuse du Continental Intercalaire. Des incursions marines, par transgression de la Téthys au nord du Niger et de l'Atlantique par le fossé de la Bénoué au sud du Bassin du Lac Tchad, y ont été également mises en évidence. L'ensemble lithologique de la période crétacée a des âges variables suivant les localités mais un faciès continental similaire [10].

Le début de l'ère tertiaire est marqué par l'amorce de la régression et le dépôt, généralement en discordance sur les terrains crétacés, d'une puissante série de sédiments détritiques, le Continental Terminal, qui de par sa nature, induit une grande variabilité sédimentologique.

La fin de cette période continentale correspond à une récurrence de mouvements tectoniques conduisant à une subsidence du centre de la cuvette tchadienne et l'amorce d'une intense érosion des dépôts et l'accumulation d'une séquence détritique dans la partie centrale du bassin [11].

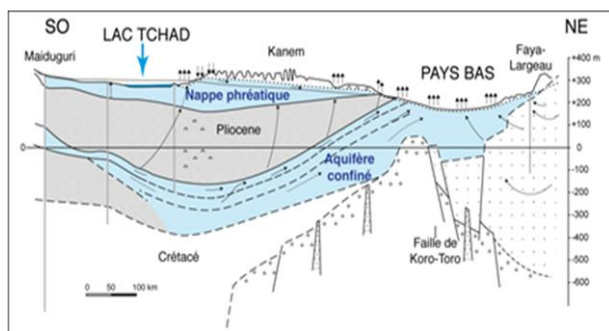


Fig. 4 : Coupe géologique SW-NE dans le bassin du lac Tchad
Source : [10]

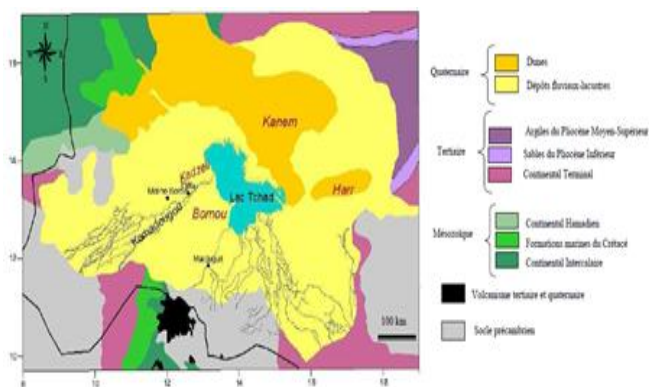


Fig. 5 : Carte géologique simplifiée du bassin du lac Tchad
Source : [10]

2.3.4. Situation hydrogéologie

La région du lac bénéficie de conditions hydrogéologiques exceptionnellement favorables. Si l'on considère l'aire climatique de tendance désertique, les eaux souterraines sont les plus stables.

L'aridification n'a pas eu d'incidence majeure sur les ressources de l'aquifère des sables dunaires malgré une longue période de sécheresse. La nappe de sable de la région, par sa porosité élevée, est alimentée, rechargée directement par l'eau météorique et la remontée des eaux du lac.

Enfin, avec les sécheresses, ce sont les eaux de surface qui ont subi une réduction sévère, le lac faisant place à une nappe d'eau souterraine semblable à celle des polders qui permettra une survie de la région si les conditions d'existence du lac s'aggravent [10].

Il faut souligner que ces nappes superficielles des bas-fonds n'ont qu'un intérêt local. Pour des programmes d'irrigation, l'exploitation de débits élevés demande une réflexion préalable car le renouvellement de la ressource dépend des apports d'eaux.

Les différentes aquifères dans la région du lac se répartissent comme suit :

Aquifère des bas-fonds inter-dunaires

Les bas-fonds sont classés en polders, en ouadis et en périodes d'assèchement du lac, le fond du lac. Ces bas-fonds ont une constitution semblable, mais une origine et un comportement hydraulique différents.

Aquifère des polders

Le bas-fond des polders correspond à un diverticule du fond du lac. Il se différencie d'un bras du lac par l'assèchement souvent provoqué (digue) et le maintien du niveau de l'eau à 1 ou 2 mètres sous la surface du bas-fond.

Les aquifères des polders sont longilignes, digités, d'une largeur variant de quelques centaines de mètres à 1.500 ou 2.000 mètres. L'épaisseur de l'aquifère saturé, varie de 1 à 7 mètres, selon la saison, le cycle climatique dominant, les relations avec le lac et la morphologie locale du polder (surface non plane). Le fond d'un polder n'est pas nécessairement plat et le point le plus bas n'est pas toujours au centre du polder.

Aquifère des ouadis

Dans la région du lac, on appelle ouadis une dépression inter-dunaire fermée, sans relation actuelle avec le lac.

A l'origine, l'ouadis a pu être un polder (lorsque le lac était plus étendu) ou un simple bas-fond dans les dunes avec des mares temporaires permanentes en période pluviale.

Les nappes sont plus profondes sur les zones de raccordement avec la dune mais l'eau est plus douce qu'au centre de la dépression.

Le niveau de l'eau est plus profond que dans les polders (4 à 7 mètres), ce qui explique que certains ouadis sont abandonnés faute d'aquifère en eau, la nappe des argiles est à une cote inférieure à celle de la nappe des sables. Cette dernière est en charge sous le bas-fond.

Aquifère du fond du lac

Pendant le cycle sec, les terres exondées contenaient une nappe semblable à celle des polders, exploitée avec quelques puits temporaires creusés par les pasteurs. Au-delà des îles émergées, le fond du lac est recouvert d'argile grise sans sable apparent. Par analogie avec les polders, on admet que l'épaisseur des argiles est de 7 à 10 mètres. La nappe se trouvait en 1987-1988 entre 0 et 2 mètres de profondeur. Cette nappe, dont on ne mentionne jamais l'existence, peut jouer un rôle majeur dans l'économie du lac si, à terme, le lac se desséchait. Il faudrait alors la protéger contre la salinisation par un drainage et un aménagement appropriés. La nappe se transforme en lac avec la montée des eaux.

Aquifère des sables dunaires

La masse sableuse n'est pas homogène. Des niveaux limoneux-argileux soulignent des coupures dans la sédimentation éolienne selon des repères vers 20, 36, 45, 60, 80 mètres de profondeur. Par analogie avec les observations faites sur les bordures du lac, il est possible que le niveau de 60 mètres représente la base du Quaternaire moyen. Les niveaux argileux-limoneux ne forment pas des horizons continus à l'échelle du massif dunaire. Ils peuvent correspondre à d'anciens bas-fonds inter-dunaires.

La profondeur de la base des sables augmente du sud-est vers le nord-ouest et du sud-ouest vers le nord-est formant un sillon profond de 110 mètres (pays de Fouli) à 140 mètres au nord-ouest de la région.

Il faut signaler que l'épaisseur de l'aquifère saturé, les épaisseurs maximales s'observent sur la limite nord-est de la région (100 à 140 mètres). Elles se réduisent vers le sud-ouest à 80 mètres, à moins de 60 mètres à l'ouest de Kouloudia et à 40 mètres à l'est d'un méridien N'Gouri-Kouloudia [11], [12], [15].

Profondeur de l'eau des aquifères des bas-fonds

Une confusion règne sur la profondeur du niveau de l'eau selon que l'on considère les points d'eau creusés au voisinage ou dans les bas-fonds ou les puits et forages implantés dans les sables dunaires.

La morphologie d'une dune implique des dénivellations d'une dizaine de mètres dans l'archipel.

Dans les zones lacustres et l'archipel et dans l'optique de la création d'ouvrages modernes dans les sables dunaires près des villages situés au sommet des îlots, la profondeur est relative au sommet de la dune.

En terre ferme, la profondeur de l'eau se rapporte au niveau des zones basses en général.

D'une façon générale, la surface de l'eau de la nappe des sables dunaires est peu profonde dans l'aire de la région du

Lac. Ainsi la nappe est en charge sous les argiles des bas-fonds (polders et ouadis) et sous la surface colmatée du Lac [13], [14].

Les aquifères profonds

PNUDF-FAO 1973 ont réalisé des forages profonds à Bol, Baga-sola, N'Gouri, Rig-Rig, Tourba-Kalinganga ou ces forages recoupent des formations aquifères du pliocène inférieur du Continental Terminal et du crétacé (Bol).

Selon le schéma structural déjà énoncé, les aquifères sont de plus en profondeur du sud-est au nord-ouest. Le toit du pliocène inférieur passe de la côte + 14 à N'Gouri à +184 à Rig-Rig et -121 à Baga-sola. L'intérêt majeur de ces aquifères est l'artésianisme. Mais, dans la région du Lac, il est faible ou nul sur la limite nord. Par ailleurs, les eaux sont de qualité médiocre sur le pourtour du Lac [11], [13].

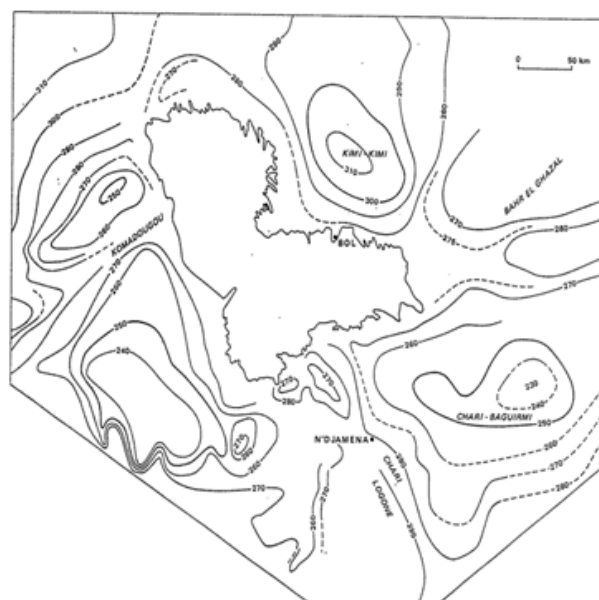


Fig. 6 : Courbes isopièzes de la nappe phréatique de la cuvette Tchadienne en 1966 d'après documents PNUD/UNESCO
 Source : [11]

2.3.5. Situation hydrologique

Le lac Tchad

Le lac Tchad est localisé entre 12° et 14°20 de latitude nord, 13° et 15°20 de longitude est, dans une zone au relief peu marqué correspondant à un erg submergé.

Du point de vue morphologique, le lac se subdivise en deux cuvettes nord et sud, de superficies inégales séparées par une ligne de hauts fonds (grande barrière) dont dépendent les variations des côtes du lac à l'état stationnaire (Cf. Fig. 7).

L'alimentation du lac est essentiellement assurée par les eaux du Chari-Logone (90%) qui prennent leurs sources respectives dans les massifs de Kagas en République Centrafricaine et dans les monts de l'Adamaoua dans la région de N'Gaoundéré au Cameroun [3].

Les débits des tributaires secondaires du lac Tchad (Komadougou Yobé ; El Beïd et Yedseram) sont très faibles quand on les compare à ceux du Chari-Logone.

Les précipitations, tombant directement à la surface du lac, sont fortement variables et ne représentent qu'une faible part du bilan hydrologique. Les fluctuations annuelles du niveau du lac suivent donc, avec un certain décalage, les variations de l'hydrogramme du Chari.

D'août à décembre, les apports excédentaires provoquent la remontée en janvier du niveau du lac et de sa superficie. La décrue s'amorce ensuite jusqu'à l'été en juillet.

L'inondation de la cuvette nord se produit uniquement lorsque le volume des eaux de la cuvette sud est suffisant pour franchir la grande barrière (Cf. Fig. 7 et Cf. Fig. 8) [11].

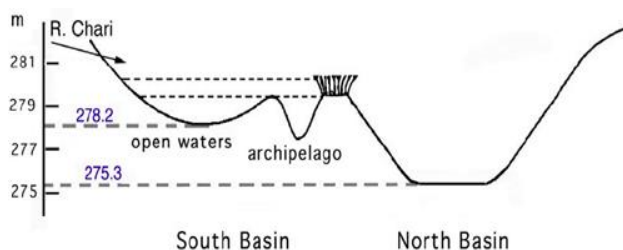


Fig. 7 : Coupe SE-NW du lac Tchad
Source : [11]

3.6. Description des formations Quaternaires de la région du lac Tchad

Le lac Tchad est partagé par quatre pays riverain à savoir le Cameroun, Niger, Nigeria et le Tchad. Du point de vue géomorphologique, il est subdivisé en deux grandes cuvettes séparées par un haut fond appelé la grande barrière.

La cuvette du bassin du lac est répartie en cuvette nord et sud, cette dernière constitue notre zone d'étude est situé dans le territoire Tchadien (Cf. Fig. 8).



Fig. 8 : Carte schématique montrant les deux cuvettes distinctes du lac Tchad en cuvette sud et cuvette nord
Source : [16]

La figure ci-dessus montre des sites d'observations des mesures : Bol, Baga-sola, Guitté et Dandi et cuvette nord séparées par la ligne grande barrière Baga kawa - Baga sola sur une largeur de 40 km.

Une campagne des mesures et des observations, menée en quatre sites des côtes : sud (Dandi et Guitté), nord (Baga-sola) et nord-est (Bol) de la cuvette sud du lac Tchad (Cf. Fig. 8), a permis d'étudier la nappe phréatique de la zone supérieure des formations du lac Tchad sur presque toute son épaisseur. L'aquifère du Quaternaire, d'une puissance de 20 à 80 mètres suivant les sites, apparaît constitué principalement par des sables grossiers, moyens et fins. Il peut contenir un ou plusieurs niveaux argileux lenticulaires de 1 à 7 mètres d'épaisseur et repose sur un mur argileux imperméable probablement Plio-Quaternaire.

De ce fait les aquifères concernés dans la zone d'étude sont identifiés comme suit: du côté nord et nord-est sites de Baga-sola et Bol, nous avons : l'aquifère des sables Ogoliens avec des épaisseurs variantes entre 20 et 80 mètres, d'âge Pléistocène supérieur et la nappe est libre, l'aquifère phréatique de la région est alimentée, rechargée directement par l'eau météorique beaucoup plus dans la terre ferme et lacustre en bordière du lac, car la perméabilité de l'aquifère est élevée ; la nappe de sable est renouvelée, cela a une grande importance dans la conservation des eaux de surfaces du lac Tchad, la décharge se fait vers le Nord-est.

Et du côté sud, sites de Guittè et Dandi c'est l'aquifères des sables fluviaux et intercalation argileuses, d'âge Pléistocène moyen et inférieur, avec des épaisseurs assez contant, la nappe est libre à semi-captif, ici la perméabilité est moyenne, la recharge de l'aquifère se fait par infiltration des eaux de surfaces et la pluie, l'écoulement piézométrique est vers la dépression Est à N'Djamena, l'évaporation et l'exploitation de la nappe entraînent la décharge de l'aquifère.

Ils existent en plus des aquifères citer, Les aquifères de polders différents, des natures lithologiques limoneuses, masses argileuses à diatomites, des couches friables (en creux dans les puits), marnes limoneuses et enfin des couches inférieures lacustres. Le remplissage des polders a pour origine unique le lac.

Les dépôts sont hétérogènes selon un mécanisme de mise en place obéissant au flux et au reflux du lac. Les aquifères des polders sont longilignes, digités, d'une largeur variant de quelques centaines de mètres à 1.500 jusqu'à 2.000 mètres.

Le niveau de la nappe libre des argiles fissurées varie en fonction de la pluviométrie, de l'influence du lac, alimentés par des mélanges d'eaux météoriques et lacustre, et aussi par l'évaporation saisonnière, du cycle climatique pluriannuel et de la structure des dépôts [11].

Les observations litho-stratigraphiques sommaires (Cf. Tab. 2, 3 et 4) permettent essentiellement de distinguer les différents aquifères et paramètres hydrodynamiques (la perméabilité et l'imperméabilité).

Tab.2 : Litho-stratigraphie observée à Dandi et Guittè

Épaisseurs (mètres)	Lithologies
0-6	Sable
6-7,5	Argile sableuse
7,5-19,5	Sable jaune
19,5-22,5	Argile sableuse
22,5-41	Sable blanc
41-41,5	Argile sableuse
41,5-50	Sable rose

Source [2]

Tab.3 : Litho-stratigraphie observée à Baga-sola

Épaisseur (mètre)	Lithologies
0-0,2	Matériau de structure très fine riche en MO
0,2-2,5	Argile gris-bleu craquelée, perméable en grand et aquifère
2,5-8,5	Argile limoneuse plastique brun-verdâtre ou gris-bleu
8,5-32	Sables fins aquifères
32-37	Mêmes sables fins aquifères à granulés calcaires blancs, pouvant atteindre 5mm
37-47	Sables fins aquifères
47-62,5	Sables moyens fluviaux, devenant de plus en plus grossiers vers le bas
62,5-65	Argiles dures, vert bleu, zonées de lits poudreux blancs à forte proportion de calcaire
65-77	Argiles vert clair blanchâtre, dure au sommet puis relativement molles. Probablement le substratum.

Source [2] - MO : Matière organique

Tab.4 : Litho-stratigraphie observée à Bol

Épaisseur (mètre)	Lithologies
0- 0,3	Matériau de structure très fine riche en MO
0,3- 4	Argiles gris bleu craquelées. Constituent l'aquifère à perméabilité en grand de la nappe phréatique dans les polders
4- 5,5	Limons argileux mous très plastiques, gris brun
5,5- 9	Sables fins aquifères contiennent une nappe artésienne dans le polder
9-13	Argiles gris bleu, polyédrique ; imperméable
13-69,5	Sables fins et moyens. Aquifères, contiennent une nappe artésienne dans le polder. De 13 à 50 mètres environ : sables fins dans lesquels apparaissent vers 20 mètres des concrétions de sables à ciment carbonaté de quelques millimètres, à aspect de granulés de 50 à 69,5 : sables moyens
69,5-73	Argiles vertes, relativement dure, imperméables (couche argileuse inférieure), jouent le rôle de mur imperméable de la nappe phréatique.

Source [2] - MO : Matière organique



Formations argileuses : La nature lenticulaire de l'unité argileuse constituant le fond des bras et son recouvrement sur une courte distance par la dune a été mise en évidence.

Le matériau riche en matière organique, représentant le sol cultivable des polders, et les argiles craquelées, peuvent être séparés en bordure des dunes par mince couche de sable (Cf. Tab. 3 et 4).

Les argiles limoneuses qui forment le mur imperméable des argiles craquelées peuvent ne pas exister en bordure des bras, mettant ainsi en communication directe ces dernières avec les sables sous-jacents (Cf. Tab. 3 et 4).

La nature lenticulaire des couches argileuses intermédiaires, rencontrées, dans les sables par leur dispersion à différentes profondeurs à des épaisseurs variables (2 à 5 mètres). Ces formations sont les témoins d'anciennes cuvettes interdunaires qui ont existé au cours du Quaternaire à des périodes où le modelé de l'erg était dans ces régions plus accentué qu'actuellement [12].

La couche d'argile vert claire, plus ou moins dure, rencontrée à des profondeurs (63 à 70 mètres), représente le mur imperméable de l'ensemble aquifère (Cf. Tab. 3 et 4).

Sables : Les sables deviennent légèrement plus grossiers vers le bas. L'augmentation de la taille des grains semble se produire brusquement à Bol et Baga-sola (Cf. Tab. 3 et 4).

Il paraît possible de situer ces différentes formations dans l'histoire du bassin tchadien grâce aux travaux de M. Servant [12].

Les sables éoliens et les lentilles argileuses qui s'y trouvent disséminées correspondent à la séquence des Soulias. Les argiles sont les témoins d'épisodes lacustres dont certains sont compris entre 40.000 et 21.000 ans B.P.

L'unité argileuse supérieure des fonds de polders correspond à la série de Labdé. Dans cette dernière, les limons argileux se rapporteraient à la séquence lacustre L₁ (12.000-11.000 ans B.P), les argiles craquelées de la séquence L₂ (10.000-2.000 ans B.P) [12], [17].

Les conditions de gisement peuvent se résumer ainsi : la nappe souterraine repose sur des murs imperméables, situé à 69,5 mètres à Bol et 65 mètres à Baga-sola probablement, la profondeur des toits imperméables, la nappe phréatique se rencontre généralement entre 10 et 12 mètres. Celle des argiles craquelées est atteinte entre 0 et 2,5 suivant les sites (Cf. Tab. 3 et 4).

Les niveaux de la nappe phréatiques révèlent des variations journalières : la période de ces oscillations est très régulière avec un maximum se réalisant généralement entre 7 heures et 10 heures et un minimum entre 18 heures et 20 heures, toute fois ces oscillations peuvent être synchronisées avec la remontée des eaux du lac.

Les nappes sont contenues dans les aquifères des sables de taille moyenne, passant à des sables plus fins. Au moins deux ou trois couches lenticulaires d'argiles imperméables avec des épaisseurs variables, peuvent exister dans ces sables à différents niveaux. Ces formations argileuses isolent localement les eaux. Une fois soustraite l'épaisseur des argiles, la puissance de la nappe varie.

Cette nappe, qualifiée de phréatique à l'échelle du bassin, l'est réellement dans les dunes et dans les argiles craquelées des polders où elle est libre. Par contre, sous le polder, les eaux sont mises en charge sous les argiles limoneuses imperméables [18].

La nappe phréatique des argiles craquelées est elle-même en communication avec les sables dunaires sur le bord des cuvettes mais aussi probablement à travers les argiles limoneuses qui mettent en charge la nappe sous-jacente, bien que qualifiées d'imperméables, le débit qui les travers sur toute leur étendue n'est certainement pas négligeable [19].

Les eaux d'écoulements et du lac reposent donc directement sur cet ensemble aquifère [12].

3. Résultats et discussion

3.1. Résultats

Les suivis piézométriques à Bol, Baga-sola, Dandi et Guitté de 2013 à 2016 montrent une variation spatiotemporelle interannuelle de la nappe libre (Cf. Fig.9) [1].

Les gradients hydrauliques sont donc favorables à l'alimentation de la nappe libre en haute niveau d'eau par les eaux du lac et aussi l'infiltration des eaux météoriques.

L'évapotranspiration potentielle dans la région du lac est supérieure à la précipitation depuis la sécheresse de 1970 jusqu'à maintenant (Cf. Tab. 6), [18], [19].

La méthode d'analyse des fluctuations de l'eau souterraine utilisée dans le premier article [1] et les équations citées ci-dessus sont utilisées pour estimer la recharge (G_{rec}) (infiltration) (Cf. Eq. 3) et l'évapotranspiration de la nappe aquifère (ET_G) (exfiltration) (Cf. Eq. 2 et Fig. 1) dont les résultats sont établis dans les tableaux ci-dessous.

Tab.5 : Comparaison des résultats des recharges et exfiltrations des nappes (évapotranspirations de la nappe) sur une année des différents points d'observations à Bol

Ans		2013		2014		2015	
S	P.O	G _{rec} mm/ an	ET _G mm/ an	G _{rec} mm/ an	ET _G mm/ an	G _{rec} mm/ an	ET _G mm/ an
	F1	14,3	12,4	15,6	15,6	11,8	11,8
	F2	18,7	17,4	16,8	16,8	17,4	14,3
B	F3	16,8	16,8	18,7	15,6	23,1	15,6
O	F4	18,7	15,6	17,4	17,4	16,8	10,6
L	F5	24,9	21,8	14,9	19,9	17,4	17,4
	F6	17,4	14,3	16,2	12,4	18,7	11,8
	P1	1,3	1,9	2,9	3,1	1,7	1,98
	P2	1,1	1,3	1,1	1,6	0,7	1,32

Source : Travail personnel

S : site, P.O : Points d'observations, F : Forages, P : Puits, G_{rec} : recharge de la nappe, ET_G : évapotranspiration de la nappe aquifère (exfiltration), mm/an : millimètre par an, ETP : évapotranspiration potentielle.

Tab.6 : Comparaison des résultats de recharge et exfiltration de l'année 2016 avec l'évapotranspiration potentielle de la région à Bol

S	Ans	2016	ETP Potentielles (mm/an) par la formule de Penman à Bol (1965-1992)	
S	P.O	G _{rec} mm/an	ETP _G mm/an	
	F1	9,36	9,36	1965(2157mm/an) (Touchebeuf(1965)
B	F2	11,24	8,11	1969(2170mm/an) (Touchebeuf(1965)
O	F3	23,70	11,86	1972 (2820 mm/an)(Riou(1972)
L	F4	17,48	13,74	1986(3531mm/an)(Schneider(86)
	F5	12,49	14,36	1987(3534mm/an)(Schneider(87)
	F6	18,11	13,74	1992(2322mm/an)(Schneider(92)
	P1	1,6	1,65	
	P2	0,3	0,33	

Source : [10][19]

S : site, P.O : Points d'observations, F : Forages, P : Puits, G_{rec} : recharge de la nappe, ET_G : évapotranspiration de la nappe aquifère (exfiltration), mm/an : millimètre par an, ETP : évapotranspiration potentielle.

Tab.7 : Comparaison des résultats des recharges et exfiltrations des nappes (évapotranspirations de la nappe) sur une année des différents points d'observations à Bagasola

Ans		2013		2014		2015		2016	
S	P.O	G _{rec} mm/ an	ET _G mm/ an	G _{rec} mm/ an	ET _G mm/ an	G _{rec} mm/ an	ET _G mm/ an	G _{rec} mm/ an	ET _G mm/ an
Ba	F7	18,7	13,7	13,7	10,6	18,7	13,7	13,7	10,6
ga	F8	14,9	17,4	12,4	14,9	14,9	17,4	12,4	14,9
s	F9	10,6	13,1	11,2	11,8	10,6	13,1	11,2	11,8
o	F10	20,6	16,8	20,1	24,3	20,6	16,8	20,1	24,3
la									

Source : Travail personnel

S : site, P.O : Points d'observations, F : Forages, G_{rec} : recharge de la nappe, ET_G : évapotranspiration de la nappe aquifère, mm/an : millimètre par an.

Tab.8 : Comparaison des résultats des recharges et exfiltrations des nappes (évapotranspirations de la nappe) sur une année des différents points d'observations à Dandi et Guittè

Ans		2013		2014		2015		2016	
S	P.O	G _{rec} mm/ an	ET _G mm/ an	G _{rec} mm/ an	ET _G mm/ an	G _{rec} mm/ an	ET _G mm/ an	G _{rec} mm/ an	ET _G mm/ an
	F11	18,7	19,6	15,6	23,7	16,8	21,8	16,2	20,6
	F12	17,4	18,7	14,9	11,8	7,4	6,2	7,00	8,7
D	F13	18,7	15,6	14,3	17,4	19,3	13,1	17,4	13,1
a	F14	18,7	20,6	13,7	19,3	18,7	13,7	16,8	13,1
n	F15	13,7	23,1	13,7	21,2	24,9	21,8	24,9	20,6
di	F16	18,1	19,3	13,1	19,3	24,9	22,4	24,9	21,2
	F17	23,7	18,7	18,7	21,8	20,6	18,7	23,7	21,2
	F18	9,99	24,3	13,7	25,6	23,1	21,2	18,7	15,6
G	F19	13,7	19,9	8,11	16,8	20,6	13,1	20	15,6
u									
t									
è									

Source : Travail personnel

S : sites, P.O : Points d'observations, F : Forages, P : Puits, G_{rec} : recharge de la nappe, ET_G : évapotranspiration de la nappe aquifère, mm/an : millimètre par an.

Tab. 9 : Interprétation des résultats à travers les influences des pluies, hauteurs d'eaux, natures des couches, niveaux statistiques, recharges et évapotranspirations des nappes aquifères aux sites d'observations à Bol et Bagasola

An	2013	2014	2015	2016						
P	244,8mm/an	288,2 mm/an	200,9 mm/an	198,2 mm/an	Inter Prétati ons					
H.E	278,8 cm	278,2 cm	279,9 cm	279,3 cm						
S	P.O	Grec mm /an	ET _G mm /an	G _{rec} mm /an	ET _G mm /an	G _{rec} mm /an	ET _G mm /an	Grec mm /an	ET _G mm /an	
B o l	F1	14,3	12,4	15,6	15,6	11,8	11,8	9,36	9,36	P, re V
	F2	18,7	17,4	16,8	16,8	17,4	14,3	11,2	8,11	H.E, re H
	F3	16,8	16,8	18,7	15,6	23,7	15,6	23,1	11,8	P, H.E, re V et H
	F4	18,7	15,6	17,4	17,4	17,8	10,6	17,4	13,7	H.E, re H
	F5	24,9	21,8	14,9	19,9	17,4	17,4	12,4	14,3	H.E, re H
	F6	17,4	14,3	16,2	12,4	18,7	11,8	18,1	13,7	P, H.E, re V et H
	P1	1,32	1,98	2,9	3,19	1,7	1,98	1,6	1,65	P, H.E, re V et H
Ba ga so la	P2	1,1	1,32	1,1	1,65	0,7	1,32	0,3	0,33	
	F7	18,7	13,7	16,2	16,8	18,7	13,7	13,7	10,6	H.E, re H
	F8	21,8	21,8	14,3	14,3	14,9	17,4	12,4	14,9	-/-
	F9	18,7	13,7	14,9	17,4	10,6	13,1	11,2	11,8	-/-
	F10	19,3	15,6	16,2	18,1	20,6	16,8	20,1	24,3	-/-

Source : Travail personnel

S : sites, An : ans, P : pluies, H.E : hauteurs d'eaux, re : recharges, mm/an : millimètre par an, P.O : Points d'observations, F : forages, P : puits, V : verticale, H : horizontale, G_{rec} : recharge de l'aquifère, ET_G : évapotranspiration de la nappe aquifère, -/- : même choses.

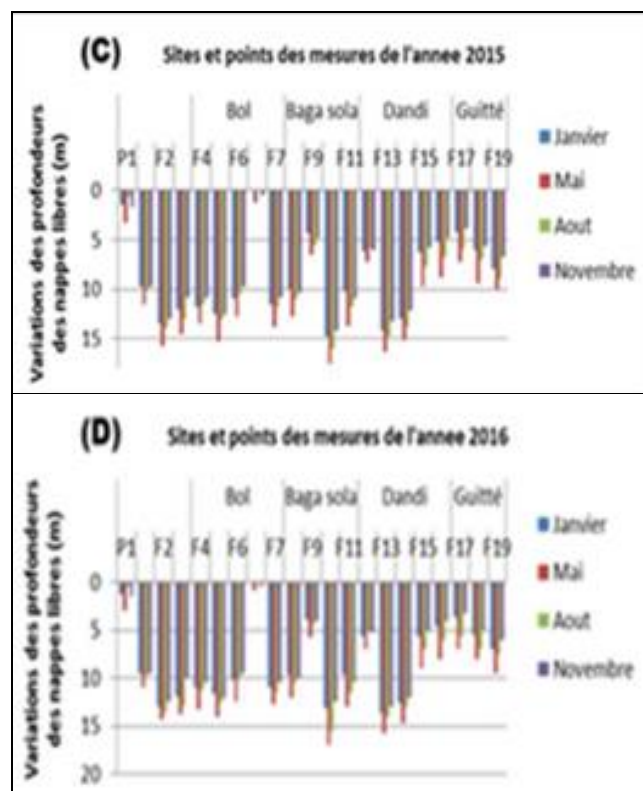


Fig. 9 : Variation spatiotemporelle interannuelle de la nappe libre dans la région du lac (secteur d'étude) - (C : 2015, D : 2016)

Source : [1]

Tab.10 : Interprétation des résultats à travers les influences des pluies, hauteurs d'eaux, natures des couches, niveaux statistiques, recharges et évapotranspirations de la nappe aquifère aux sites d'observations à Guitté et Dandi

An	2013	2014	2015	2016	Interpretation					
P	244,8 mm/an	288,2(mm/an	200,9 mm/an	198,2 mm/an						
H.E	278,8 cm	278,2 cm	279,9 cm	279,3 cm						
S	P.O	Grec mm /an	ET _G mm /an	G _{rec} mm /an	ET _G mm /an	G _{rec} mm /an	ET _G mm /an	Grec mm /an	ET _G mm /an	
Da	F11	18,7	19,6	15,6	23,7	16,8	21,8	16,2	20,6	H.E, re
n	F12	17,4	18,7	14,9	11,8	7,4	6,2	7,00	8,7	H
di	F13	18,7	15,6	14,3	17,4	19,3	13,1	17,4	13,1	-/-
	F14	18,7	20,6	13,7	19,3	18,7	13,7	16,8	13,1	-/-
G	F15	13,7	23,1	13,7	21,2	24,9	21,8	24,9	20,6	-/-
	F16	18,1	19,3	13,1	19,3	24,9	22,4	24,9	21,2	-/-
ui	F17	23,7	18,7	18,7	21,8	20,6	18,7	23,7	21,2	-/-
tt	F18	9,99	24,3	13,7	25,6	23,1	21,2	18,7	15,6	P, H.E, re V et
è	F19	13,7	19,9	8,11	16,8	20,6	13,1	20	15,6	H.E, re

Source : Travail personnel

S : sites, An : ans, P : pluies, H.E : hauteurs d'eaux, re : recharges, mm/an : millimètre par an, P.O : Points d'observations, F : forages, P : puits, V : verticale, H : horizontale, G_{rec} : recharge de l'aquifère, ET_G : évapotranspiration de la nappe aquifère, -/- : même choses.

3.2. Interprétation

Pour les estimations des recharges (G_{rec}) et les évapotranspirations de la nappe aquifère (ET_G).

Les fluctuations périodiques du niveau de la nappe, qui sont souvent les résultats : d'exploitation et aussi de l'évapotranspiration de la nappe (ET_G) ; ces nappes ont été suivies dans la région des différents sites sur les points d'observations ; ces fluctuations ont une dynamique tous similaires dans tous les sites (Cf. Fig.9). Le début et la cessation des fluctuations de la nappe correspondent aux températures moyennes mensuelles et annuelles qui prévalent dans la région. Les différences spatiales étaient dues à la nature de la formation (perméabilité) et la profondeur des forages, aux types d'occupation du sol, rapprochement avec le lac, aux types des nappes aquifères de la région etc. ; tandis que les changements dans le temps étaient dus aux apports des affluents (hauteurs d'eaux) et la pluviosité de la région [13].

Les taux de l'évapotranspiration de la nappe sont influencés par l'évapotranspiration potentielle de la région. L'augmentation de l'évapotranspiration de la nappe entre les événements humides et secs laisse supposer une température externe forte et les plantes puisent plus d'eau dans la zone saturée lorsque l'humidité du sol diminue.

Au contraire l'évapotranspiration réelle décroît avec l'humidité du sol après les précipitations alors que l'évaporation devient de plus en plus limitée aux moins compensée par les rapports des affluents [14].

L'erreur sur l'évapotranspiration de la nappe est liée aux estimations de la specific yield (S_y), qui est difficile à quantifier dans les sédiments hétérogènes. Les valeurs de l'évapotranspiration de la nappe pourraient être plus fiables car l'échelle des valeurs de la specific yield (S_y) acceptable est plus restreinte que pour l'évapotranspiration réelle et la specific yield (S_y) ne varie pas avec le type de végétation ou l'humidité du sol [15].

L'interprétation des résultats, estimations des recharges et décharges des nappes aquifères du Quaternaire dans la région du lac Tchad se résument dans le tableau ci-dessus (Cf. Tab. 9 et 10) et sont interprétés en fonction de la lithologie, nature de la formation géologique, influences de la pluviosité et/ou hauteurs d'eaux, profondeurs des nappes aquifères, forages et puits, rapprochement des structures d'observations avec le lac etc.

F1 : La recharge se fait verticalement par la pluie, c'est une nappe de sable dunaire à perméabilité élevée, sans intercalation d'argile ni sur le toit de la couche, ce forage est loin du lac.

F2 : La recharge se fait horizontalement par la variation du niveau d'eau, c'est une nappe de bas fond du lac, trop sensible à une faible variation des hauteurs d'eaux, la formation géologique c'est du sable grossier à perméabilité élevée.

F3 et F6 : La recharge se fait par la pluie et la hauteur d'eau, c'est une nappe de sable dunaire proche du lac, le faciès de la formation constituée des sables grossier à perméabilité élevées, influence du lac et de la pluie.

F4, F5 et F7 : La recharge est horizontale, c'est la nappe du bas fond, influence du lac, la perméabilité de la couche est faible, constituée des couches sableuses avec intercalations d'argiles.

F8, F9 et F10 : La nappe du bas fond avec recharge horizontale et influence du lac, la formation géologique est du sable à perméabilité moyenne, constituée des sables avec peu d'argile.

F11, F12, F13, F14, F15, F16 et F17 : Influence des hauteurs d'eaux, la recharge est horizontale, la nappe, constitue celle de sable fluviatile à perméabilité moyenne à élever de faciès sableux sans intercalations d'argile, influence du lac.

F18 : Influence de la pluie et de la hauteur d'eau, la recharge se fait verticalement et horizontalement avec une perméabilité élevée, proche du lac, influence du lac et hauteurs d'eaux.

F19 : Influence des hauteurs d'eaux, la recharge se fait horizontalement, le faciès de la couche est du sable à perméabilité moyenne, influence du lac.

P1 et P2 : influence de la pluie et des hauteurs d'eaux, c'est la nappe de polder de couche argileuse craquelée, de faible profondeur de 0,5 à maximum 7, la venue d'eau du lac dans le polder est contrôlée par l'Homme à travers des barrages et digues.

3.3. Discussion

Les mesures depuis les côtes révèlent un gradient hydraulique généralement orienté vers l'intérieur des terres jusqu'aux dépressions piézométriques qui entourent le lac [13].

Le lac actuel dont l'existence est lié aux apports du bassin du Logone-Chari, sa profondeur des nappes libres de la région du lac est à moins de vingt mètres. Ce lac représente donc une superficie moyenne de 20.000 km², du reste d'une vaste étendue de 330.000 km² dont l'assèchement n'a demandé que quelques millénaires [15].

Les mesures piézométriques effectuées en juin, mai et août 1969 [2], [19] font que le niveau du lac a varié de 4 à 3,2 de janvier le maximum à juillet le minimum, soit autour d'une altitude moyenne annuelle de 281,6 mètres (281-282) [2],

Alors que Bader et al, 2011, donnent le niveau du lac qui a varié de 3,5 à 2,1 autour d'une altitude moyenne annuelle de 280,5 mètres (280-281) [16],

La dernière observation donne le niveau du lac qui varie entre 3,5 à 1,9 autour d'une altitude moyenne annuelle de 280 mètres (281-279) [1].

Beaucoup d'auteurs par des méthodes variées ont estimé les pertes lac-Tchad aquifère du Quaternaire en m³/an et l'apport total au lac en pourcentage résumé ainsi :

- Roche, 1980, par la méthode de bilan/sels, a estimé la perte en m³/an de 1,9 à 3,8.10⁹ m³/an et l'apport total au lac en pourcentage est de 4 à 8% [3] ;
- Carmouze, 1983, par la méthode de bilan/sels, a estimé la perte en m³/an de 3,8.10⁹ m³/an et l'apport total au lac en pourcentage est de 8%, [18] ;
- Isiorho, 1990, par la méthode mesure directe, a estimé la perte en m³/an de 8,8.10⁹ m³/an et l'apport total au lac en pourcentage est de 18% [3] ;
- Isiorho, 1996, par la méthode modélisation numérique, a estimé la perte en m³/an de 15.10⁹ m³/an et l'apport total au lac en pourcentage est de 32%, [19] ;
- Leblanc, 2002, par la méthode modélisation numérique, a estimé la perte en m³/an de 0,1.10⁹ m³/an et l'apport total au lac en pourcentage est de 0,2%. [19],

Alors, Roche 1980 a pu établir l'apport annuel de référence au lac comme suit : les rivières apportent 42.10⁹ m³/an, précipitation : 6.10⁹m³/an [2].

L'évapotranspiration potentielle est supérieure à la précipitation dans le lac Tchad depuis l'année 1970 jusqu'à maintenant, la persistance du lac est due aux apports très importantes des affluents Chari-Logone a plus de 90% (Cf. Tab. 6), [18] [19],

Concept de recharge des nappes aquifères dans le bassin tchadien, se réfère aux apports des affluents et à une période assez longue pour que le solde des variations de stock, soit nul ou négligeable; or dans le cas du lac Tchad, depuis 1970 l'évapotranspiration potentielle est supérieure à la précipitation, et que l'eau du lac, eau de surface persiste à l'existence, et recharge les nappes souterraines de bas fond du lac et celui des sables dunaires a la périphérie immédiate. Les apports par les cours d'eau superficiels deviennent « efficaces ».

A partir de l'équation (1) (Cf. Eq.1) :

$$R + P = ETP + I + DS \quad (\text{Cf. Eq.1}).$$

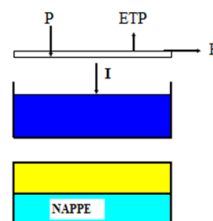


Fig. 10 : Représentation des différentes composantes de l'hydrosystème du lac Tchad et les transferts possibles entre ces composantes

Source : [3]

P : précipitation, ETP : évapotranspiration, R : ruissellement, I : infiltration

Deux cas se présentent :

- 1^{er} cas :

Le bilan dans le bassin s'exprime en termes d'apports extérieurs, les affluents, et que le bilan de l'hydrosystème du bassin du lac d'après l'équation (1) (Cf. Eq.1) est:

$$R + P = ETP + I + DS \quad (\text{Cf. Eq.1})$$

➡ **DS = 0**, on aura :

$$R = ETP + I - P = 0, ETP > P$$

R: apports des affluents (Chari-Logone-El-Beïd), **ETP > P** dans le bassin du lac Tchad depuis 1970 jusqu'à maintenant ;

R > 0, donc il y a recharge de l'aquifère pendant la période humide.

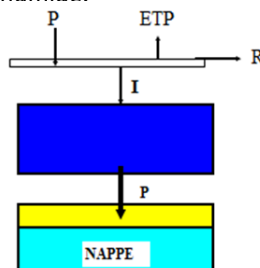


Fig. 11 : Représentation des différentes composantes de l'hydrosystème du lac Tchad et l'infiltration des eaux dans l'aquifère Quaternaire pendant la période humide

Source : [3]

P : précipitation, ETP : évapotranspiration, R : ruissellement, I : infiltration

- 2^{ème} cas :

$$R + P = ETP + I + DS \text{ (Cf. Eq.1).}$$

$$\Rightarrow DS = 0,$$

P - ETP - I < 0, ETP > P, R < 0 pas de ruissellement

R < 0, dans ce cas, il n'y a pas recharge de l'aquifère pendant la période sèche.

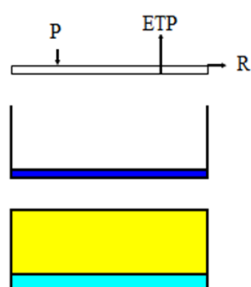


Fig. 12 : Représentation des différentes composantes de l'hydrosystème du lac Tchad et la non recharge de l'aquifère par l'eau de ruissellement pendant la période sèche

Source : [3]

P : précipitation, ETP : évapotranspiration, R : ruissellement

4. Conclusion

La nappe de la zone supérieure des formations de la région du lac Tchad, qualifiée de phréatique à l'échelle de la cuvette Tchadienne, a été examinée sur une épaisseur de 50 à 70 mètres en quatre sites ; des côtes nord et nord-est et sud de la cuvette sud du lac Tchad. Ses rapports avec les eaux de surface ont pu ainsi être précisés.

L'aquifère du Quaternaire repose sur un mur imperméable situé à 69,5 mètres à Bol, 70 mètres à Baga-sola et 50 mètres à Guittè et Dandi probablement avec aussi les mêmes genres des couches en des profondeurs encore plus (200 mètres peut être) [2].

La nappe circule dans des sables de granulométrie moyenne à élever, passant à des sables plus fins. Ces derniers constituent l'erg du Kanem.

Au moins deux ou trois couches lenticulaires d'argile imperméables (principalement de la série des Soulias), d'une épaisseur de (1) un à 7 mètres, peuvent exister à différents niveaux. L'épaisseur des sables aquifères est variable à des dizaines de mètres.

Une partie de l'eau des sables s'écoule dans les argiles craquelées, à perméabilité en grand, qui comblent les fonds des polders (série de Labdé) [17].

Le lac, dont le niveau moyen est de 280 mètre, s'étend sur cet ensemble [19].

Pour un tel niveau des eaux de surface, les gradients piézométriques moyens entre le lac et la nappe phréatique des argiles craquelées sont de l'ordre de 3‰ [2] et orientés vers la terre ferme. Compte tenu de l'épaisseur importante de la nappe, on peut penser que les mouvements d'eau ainsi engendrés s'effectuent surtout dans la partie supérieure. La nappe des sables est mise en charge sous les limons argileux et localement artésienne de plusieurs dizaines de centimètres. Le niveau piézométrique de la nappe phréatique des polders subit des oscillations, de deux à trois centimètres d'amplitude et de période journalière, provoquées par la marée barométrique [19].

La recharge des nappes aquifères du Quaternaire dans la région est supérieure à l'évapotranspiration de la nappe aquifère.

Seules les compositions isotopiques permettent de mettre en évidence des masses hydriques d'origines différentes et de préciser les rapports entre le lac et les nappes phréatiques, les échanges alimentations et drainance des eaux.

Remerciements

Je dis un grand merci au « Projet d'Appui à l'Enseignement Supérieur » qui a financé ce travail de thèse ou cet article fait partie de cette thèse ; pour mes déplacements sur le terrain, mes séjours à Dakar à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar.

Mon remerciement va aussi à la SODELAC (Société de Développement du Lac Tchad), les personelles administrations de N'Djamena qui ont toujours facilité mon déplacement pour Bol, ceux de Bol je suis très reconnaissant de leurs accueillent, orientation et surtout leur grande aident dans les collectes des données qui étaient si précieuses, sans eux ce travail ne sera pas finaliser

Je remercie particulièrement ma famille et mes parents de la confiance qu'ils m'ont accordée et qui ont crus en moi durant cette période.

Sans oubliés les enseignants et les personelles du Département de Géologie de la Faculté des Sciences et Technique de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar



Références bibliographiques

- [1] BADA Ali Malloum et al., Mai 2017, Study of the Dynamics of Quaternary Aquifers by Infiltration of Rainwater and/or Lake Chad 13p.
- [2] ROCHE Michel Alain, 1982, Hydrogeology of the coasts of Lake Chad at No, Tchingam and Soro (Kanem). 28p.
- [3] Passages 166, Sauver le lac Tchad 1er trimestre 2011. 52-53p.
- [4] Dezetter A., 1991. Modélisation globale de la relation pluie-débit. Application en zone de savanes soudanaises (nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat. Université Montpellier II. 422 p.
- [5] Petrescu Maftai C., 2002. Etudes concernant les écoulements superficiels. Modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de Voinesti - Roumanie. Thèse de doctorat, Univ. Ovidius de Constanta et de Montpellier II, 182p.
- [6] Felipe Orellana et al., 2012, Monitoring and modeling water-vegetation interactions in groundwater-dependent ecosystems. 24p.
- [7] M.E. Soyulu et al., 2011, Quantifying the impact of groundwater depth on evapotranspiration in a semi-arid grassland region. 20p.
- [8] Jacques Lemoalle*, Jean Claude Bader*, Marc Leblanc*, Ahmed Sedick*, 2011, L'évolution récente du lac Tchad : contexte général et données de base, 8p.
- [9] Leroux, M., 1996. La dynamique du temps et du climat. Paris, Milan, Barcelone. 310 p. Ed. Masson.
- [10] Schneider, J.L., 2004. Géologie - Archéologie - Hydrogéologie de la République du Tchad. 2 vol., Thèse. Ed BRGM, France.
- [11] PNUD-UNESCO-CBLT. 1972. Synthèse hydrologique du bassin du lac Tchad 1966-1970. Rapport technique UNESCO.
- [12] Servant, M., 1983. Séquences continentales et variations climatiques: évolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur. Travaux et documents de l'ORSTOM, 159, 567 p.
- [13] J.L SCHNEIDER, 1969, Relation entre le lac Tchad et la nappe phréatique, 122-131.
- [14] 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. C. R. Acad. Sci. Paris II a, 330: 355-361.
- [15] Maley, J., 1993. Chronologie calendaire des principales fluctuations du lac Tchad au cours du dernier millénaire. Le rôle des données historiques et de la tradition orale. In Barreteau D. and Von Graffenried C. (eds) Datation et Chronologie dans le Bassin du lac Tchad.. Paris, IRD, pp. 161-163.
- [16] Bader, J.C., Lemoalle, J. & Leblanc, M., 2011. Modèle hydrologique du Lac Tchad. Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences hydrologiques 56 (3): 1-15.
- [17] Carmouze, J.P., Cheverry, C., Gac, J.Y., Maglione, G. et Roche, M.A., 1975. Aspects sédimentologiques actuels d'un bassin continental endoréique : le bassin tchadien. IXème Congrès international de sédimentologie, Nice. 1975, 9 p.
- [18] Isiohro, S.A., Matisoff, G., When, K.S., 1996. Seepage relationships between Lake Chad and the Chad aquifers. *Ground Water*, 34: 819-826.
- [19] Lemoalle, J., 1989. Le fonctionnement hydrologique du lac Tchad au cours d'une période de sécheresse (1973-1989). Rapport ORSTOM 89-03, 27 p.