

**Bassin du Lac Tchad:
Gestion Durable de l'Eau**

Interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans les plaines inondables du Bas-Logone



Hanovre, Mars 2016

Rapport N° 10



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

Au nom de:



Auteurs: Sara Vassolo, Charlotte Wilczok, Djoret Daïra and Aminu Magaji Bala

Commissionné par: Ministère Fédérale pour la Coopération Economique et le Développement (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, BMZ)

Projet: Gestion Durable des Eaux du Bassin du Lac Tchad

BMZ-No.: 2010.2274.8

BGR-No.: 05-2355

BGR-Archive No.:

ELVIS link:

Date: Mars 2016

Table des Matières

Résumé.....	1
1 Introduction	2
2 Zone d'étude	3
2.1 Climat	3
2.2 Hydrologie.....	5
2.3 Sol, Végétation, et Agriculture.....	9
2.5 Cadre géologique.....	13
2.6 Cadre hydrogéologique.....	14
3 Cartographie des zones inondables	16
3.1 Données utilisées.....	16
3.1 Méthodologie Appliquée.....	16
3.2 Résultats.....	18
4 Hydrogéologie	22
4.1 Méthodologie	22
4.2 Mesure des hauteurs des puits et forages.....	23
4.3 Type d'aquifère	24
4.4 Niveau des eaux souterraines.....	25
4.5 Hydrogéochimie	28
4.6 Analyse Isotopique.....	32
5 Conclusions.....	39
6 Recommandations	40
7 Références.....	41
Annexes	43

Table des Figures

Figure 1. Zone d'étude dans le bassin du lac Tchad sur la gauche (Vassolo & Daïra, 2012) et les zones inondées sur la droite	3
Figure 2. Répartition des précipitations dans la zone d'étude (Source: données DREM)	4
Figure 3. Ecart cumulatif des précipitations moyennes à N'Djamena et Bongor for 1937-2010.....	4
Figure 4. Bassin hydraulique du fleuve Logone.....	6
Figure 5. Carte hydrologique de la zone d'étude.....	7
Figure 6. Représentation schématique du système du fleuve Bas- Logone (après Seeber, 2013)	8
Figure 7. Valeurs de décharge dans Bongor et Logone Gana pour la période 2001-2008	9
Figure 8. Pendant la saison sèche les sols rétrécissent et forment des fissures profondes (Foto: Djoret Daïra, Avril 2013).....	10
Figure 9. Paysage marécageux dans la plaine inondable (Photo: Aminu Magadji, Septembre 2013).....	10
Figure 10. Plaine herbeuse Naga pendant la saison sèche (Photo: Djoret Daïra, Avril 2013)	10
Figure 11. L'élevage bovin (Photo: Djoret Daïra, Avril 2013)	10
Figure 12. L'agriculture de subsistance (Photo : Djoret Daïra, Avril 2013)	10
Figure 13. Les zones irriguées avec de l'eau du barrage de Maga au Cameroun et du fleuve Logone au Tchad.....	11
Figure 14. Canaux de pêche construit pendant la saison sèche à Dialo, Tchad (Photo : Djoret Daïra, Avril 2013)	12
Figure 15. Activités de pêche dans la rivière du Logone et ses affluents, Cameroun (Photo : Djoret Daïra, Décembre 2014)	12
Figure 16. Les canaux de pêche sont largement distribués au Cameroun et au Tchad, malgré le fait que ce type de pêche soit interdit.....	12
Figure 17. Géologie de la zone d'étude (après Biscaldi (1970) pour la partie camerounaise, Schneider (1969) et Torrent (1966) pour la région tchadienne)	13
Figure 18. Gamme de valeurs de perméabilité publiées pour la zone d'étude (en m / s).....	14
Figure 19. Dépressions des eaux souterraines dans l'extrême nord du Cameroun (après Ngatcha et al., 2007).....	15
Figure 20. Compilation de l'ampleur de l'inondation annuelle moyenne (pour l'année 2000).....	17
Figure 21. Série des zones inondées pour la période 2000-2014 spatialement différenciée	18
Figure 22. Zones inondées minimale, moyenne et maximale pour la période 2000-2014	20
Figure 23. Répartition des points de prélèvement dans la zone d'étude.....	22
Figure 24. Enregistrement du niveau d'eau dans un piézomètre (Photo: Djoret Daïra, Avril 2013)	23
Figure 25. Utilisation de la pompe COMET pour l'échantillonnage à partir d'un puits (Photo: Djoret Daïra, Avril 2013).....	23
Figure 26. Pompage à travers une cellule de flux et application de la WTW-Multi 3430 (Photo: Djoret Daïra, Mai 2013)	23
Figure 27. Comparaison entre les hauteurs de puits mesurées avec DGPS et celles extraites du modèle d'élévation global SRTM3.....	24
Figure 28. Puit creusé dans le Yaéré sur la gauche et à Naga sur la droite (Photos Aminu Madadji, 2014).....	25

Figure 29. Profondeur des eaux souterraines en 2013 et 2014 pour les 33 puits ouverts et 2 piézomètres	26
Figure 30. Les changements saisonniers du niveau des eaux souterraines et les zones d'inondation	27
Figure 31. Carte des équipotentielles des eaux souterraines et les points d'échantillonnage dans la zone d'étude	28
Figure 32. Distribution des valeurs de TDS (in mg/l) dans la zone d'étude	29
Figure 33. Distribution de concentration de fer (in mg/l) dans la zone d'étude	30
Figure 34. Répartition de la concentration de manganèse (en mg / l) dans la zone d'étude	31
Figure 35. Ligne locale d'eau pour N'Djaména	33
Figure 36. Ligne d'eau définie par les eaux de surface (rivières, canaux, lacs)	33
Figure 37. Conduite d'eau pour les eaux souterraines dans les plaines Yaéré et Naga	34
Figure 38. Distribution et ligne d'eau de points d'échantillons dans la plaine Naga. Les diamants ouverts indiquent les points d'échantillonnage dans la partie sud de la plaine, les diamants bleus, ceux dans le nord.	35
Figure 39. Distribution et ligne d'eau pour les eaux souterraines le long du fleuve Logone	36
Figure 40. Ligne d'eau pour les eaux souterraines dans la plaine Yaéré.....	37

Liste des Tableaux

Tableau 1. Moyenne annuelle de l'étendue de l'inondation en km ² pour chacune des zones différenciées et la superficie totale.....	19
Tableau 2. Résumé des résultats des zones inondées estimés dans km ²	21
Tableau 3. Hauteur de puits mesurée au moyen d'un DGPS par rapport aux valeurs extraites STRM3.....	24
Tableau 4. Comparaison de profondeur en eaux souterraines dans les puits creusés et forés localisés à proximité (valeurs double montrent les résultats pour 2013 and 2014)	25
Tableau 5. Pollution rencontrées dans la zone d'étude par rapport aux limites fixées par l'OMS	32
Tableau 6. Résumé de recharge dans la zone d'étude	37
Tableau 7. Résumé du montant de la population qui peut être approvisionnée par chaque volume de recharge	38

Liste des Annexes

Annexe 1. Liste des points de mesure de niveau piézométrique visités pendant la première mission de terrain (2013).....	43
Annexe 2. Liste des points de mesure de niveau piézométrique visités pendant la deuxième mission de terrain (2014).....	45
Annexe 3. Statistiques des paramètres chimiques mesurés dans les forages, puits, piézomètres, et eau de surface pour la première mission de terrain (2013).....	48
Annexe 4. Statistiques des paramètres chimiques mesurés dans les forages, puits, piézomètres, et eau de surface pour la deuxième mission de terrain (2014)	49

Abréviations

amsl	above mean sea level
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe <i>Institut Fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles</i>
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung <i>Ministère Fédérale pour la Coopération Economique et le Développement</i>
CBLT	Commission du Bassin du Lac Tchad
DEM	Digital Elevation Model <i>modèle numérique de terrain</i>
DREM	Direction de Ressources en Eau et de la Météorologie
GIZ	Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit
DGPS	Differential Global Positioning System <i>GPS différentiel</i>
EVI	Enhanced Vegetation Index <i>Amélioration de l'indice de végétation</i>
IAEA	International Atomic Energy Agency <i>Agence Internationale de l'Energie Atomique</i>
LST	Land Surface Temperature
m amsl	Meter above mean sea level
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer <i>Radiomètre spectral pour imagerie de résolution moyenne</i>
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index <i>Indice de végétation normalisé</i>
NIR	Near Infrared <i>Proche Infrarouge</i>
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration <i>Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique</i>
OMS	Organisation Mondiale de la Santé <i>World Health Organisation</i>
SD	Standard Deviation <i>Ecart type</i>
SEMRY	Société d'Expansion et de la Modernisation de la Riziculture de Yagoua
SWIR	Short Wave Infrared <i>Infrarouge à ondes courtes</i>
TDS	Total Dissolved Solids (mg/l) <i>Solides Totaux Dissous</i>
USGS	United States Geological Survey

Résumé

Mots-clés: bassin du lac Tchad, plaines inondables, zones humides, Logone, Yaéré, interaction de l'eau souterraine et l'eau de surface, analyse isotopique

Les plaines inondables le long du Bas Logone, la plaine Yaéré dans la partie camerounaise et la plaine Naga au Tchad, sont importantes pour la recharge des eaux souterraines dans le bassin du lac Tchad. Des études antérieures ont montré que la recharge provient de l'eau stagnante dans les plaines inondables et se déroule à travers les dépôts fluvio-lacustres, mais la quantification est toujours manquante.

La série chronologique des débits fluviaux mesurés par la Direction de Ressources en Eau et de la Météorologie (DREM) à Bongor, Katoa et Logone Gana ont été analysés pour comprendre le système des eaux de surface dans la zone d'étude. Les tailles des plaines inondées chaque année ont été cartographiées à l'aide d'images satellite MODIS. Plusieurs missions de terrain comprenant des mesures de niveau des eaux souterraines, des enregistrements de paramètres in situ et d'échantillonnage pour l'analyse chimique et isotopique ont été menées pendant les saisons sèches en 2013 et 2014 visant à classer les eaux souterraines à partir du point de vue chimique et isotopique. Toutes ces données ont été utilisées pour comprendre les mécanismes de recharge dans la zone d'étude.

L'analyse des mesures de débit de la rivière indiquent un débordement de l'eau de la rivière à Bongor vers la plaine Naga lorsque la décharge dépasse 1.055 m³/s. Les inondations de Yaéré ont lieu à chaque fois que le débit de la rivière Logone dépasse 356 m³/s.

La cartographie des plaines inondées avec des séries temporelles MODIS montre que leurs tailles varient considérablement d'année en année. Bien qu'ils dépendent de la précipitation d'une certaine année, ils semblent garder en mémoire le précédent, car ils sont beaucoup plus larges après deux années consécutives de riches précipitations. La précipitation à l'amont de la rivière Logone est très importante en ce qui concerne l'estimation du volume des eaux de crue, mais la quantité de précipitations sur les zones inondées jouent également un rôle important dans leur développement.

Les niveaux d'eau mesurés dans 35 puits en 2013 et 2014 montrent des changements insignifiants. Ainsi, on peut conclure que les eaux souterraines dans la zone d'étude sont dans un état stationnaire.

Les courbes équipotentielles des eaux souterraines tirées en utilisant des mesures du niveau des eaux souterraines et des hauteurs des piézomètres à partir d'un modèle numérique d'élévation (DEM) indiquent un flux régional du sud au nord le long du fleuve Logone vers le lac Tchad. Cependant, dans les environs de Bongor au sud du barrage Maga l'eau souterraine écoule localement vers le nord-est dans la plaine Naga. Plus au nord l'eau souterraine dévie vers le nord-ouest dans la plaine Yaéré.

Les analyses chimiques ont prouvé la bonne qualité générale des eaux souterraines dans la plaine inondable. Des concentrations élevées de fer se trouvent dans la plaine Naga et dans les environs de Bongor. En outre, les concentrations de manganèse dangereuses pour la santé humaine se rencontrent très souvent dans la zone d'étude, la plupart du temps dans des puits creusés. Des pollutions géogéniques avec le fluorure, le baryum et le plomb sont également mesurées, mais très rarement. Des concentrations de nitrates supérieures à la limite de l'OMS qui est de 50 mg/l ne se trouvent que dans 4 échantillons. Que la pollution soit causée par l'abreuvement du bétail directement à partir du puits ou en raison de l'utilisation excessive d'engrais azotée dans l'agriculture n'a pas encore été clarifiée.

Les analyses isotopiques montrent que l'eau d'inondation des plaines Yaéré et Naga sont des sources d'alimentation des nappes souterraines. L'eau d'inondation repose trois à cinq mois dans les plaines au cours de laquelle elle subit l'évaporation avant d'infiltrer le sous-sol ou refluer dans le fleuve Logone. La recharge annuelle est estimée à 14 mm / an à partir de la plaine Naga et 9 mm / an à partir de la plaine Yaéré. Une combinaison de recharge directe et de l'évaporation de l'humidité du sol à une hauteur de 25 mm / an a lieu le long du fleuve Logone. Des eaux souterraines moins lourdes apparaissent dans l'aquifère profond situé dans le sud-ouest de la zone d'étude sur les contreforts des monts Mandara indiquant une eau plus vieille.

1 Introduction

Le programme «Gestion durable des eaux du bassin du lac Tchad» est un programme de coopération technique allemande avec la Commission du Bassin du Lac Tchad (CBLT). Il est financé par le Ministère Fédéral allemand de la Coopération Économique et du Développement (BMZ) et se compose de trois composants: «Développement Organisationnel» et «Adaptation aux Changements Climatiques», réalisés par la Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ), et «Gestion des Eaux Souterraines» exécuté par l'Institut Fédéral allemand des Géosciences et des Ressources Naturelles (BGR). L'objectif principal de la composante BGR est de renforcer les fonctions d'analyse et de surveillance de la CBLT concernant les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin. La coopération technique entre la CBLT et BGR a commencé en 2007. Deux projets ont déjà eu lieu, l'actuel devrait se terminer en Juin 2018.

Les derniers projets CBLT / BGR ont mis en évidence l'importance des nombreuses zones humides dans le bassin du lac Tchad et de leur contribution au renouvellement des ressources en eaux souterraines du bassin (Vassolo & Daïra, 2012; Seeber et al, 2014.). En outre, ils sont des importants écosystèmes soutenant la biodiversité et les activités économiques clés comme la pêche, l'agriculture de décrue, et l'élevage. Compte tenu du fait qu'ils ont rejoint la liste Ramsar, ces zones sont d'importance internationale en termes d'écologie, botanique, zoologie, limnologie ou hydrologie. Les sites Ramsar au Tchad sont le lac Fitri depuis 1990, Massenya depuis 2008, Salamat depuis 2006, Naga-Mayo Kebi-Tandilé depuis 2005, et la partie tchadienne du lac Tchad depuis 2001. Au Cameroun, le Waza Logone et la partie camerounaise du lac Tchad appartiennent à la convention de Ramsar depuis 2010. La partie nigérienne du lac Tchad a été définie comme site Ramsar en 2001. La plaine Baturiya et la partie nigériane du lac Tchad appartiennent à la convention de Ramsar depuis 2008.

Afin de comprendre l'interaction entre l'eau de surface et les eaux souterraines, les plaines d'inondation le long du fleuve Logone ont été choisies comme zone d'étude. Ces plaines sont connues comme Yaéré ou Waza Logone au Cameroun et Naga au Tchad. Selon Jung et al. (2011), ils fournissent les moyens de subsistance à plus de 20 millions de personnes. Pêche, agriculture et le pâturage du bétail sont les activités communes des communautés locales dans la région.

Il est d'une grande importance d'estimer la zone qui est inondée chaque année et la combiner avec la qualité des eaux souterraines et de la composition isotopique afin de mieux comprendre les mécanismes de recharge et de quantifier le volume de recharge.

Ce rapport présente la zone d'étude et décrit le système des eaux de surface. L'extension des zones inondées est cartographiée à l'aide de la télédétection afin d'analyser la variation de la taille le long des années. Les analyses chimiques des eaux souterraines et la composition isotopique permet la caractérisation des eaux souterraines en termes d'origine et de la qualité ainsi que l'estimation de la recharge totale qui a lieu dans la région.

2 Zone d'étude

La zone d'étude est située le long du fleuve Bas Logone au sud du lac Tchad. Elle s'étend des latitudes 10°00'0"N à 12°50'0"N et les longitudes 14°20'0"E à 15°50'0"E (Figure 1, à droite) et comprend la plaine Yaéré au Cameroun et la plaine Naga du côté tchadien du fleuve Logone. Les zones inondables sont limitées dans le nord / nord-ouest par le lac Tchad et à l'est par le fleuve Chari. Dans le sud / sud-ouest de la zone d'étude, ce sont les soulèvements du sous-sol sous la forme des monts Mandara qui délimitent la zone d'inondation (Figure 1, à gauche).

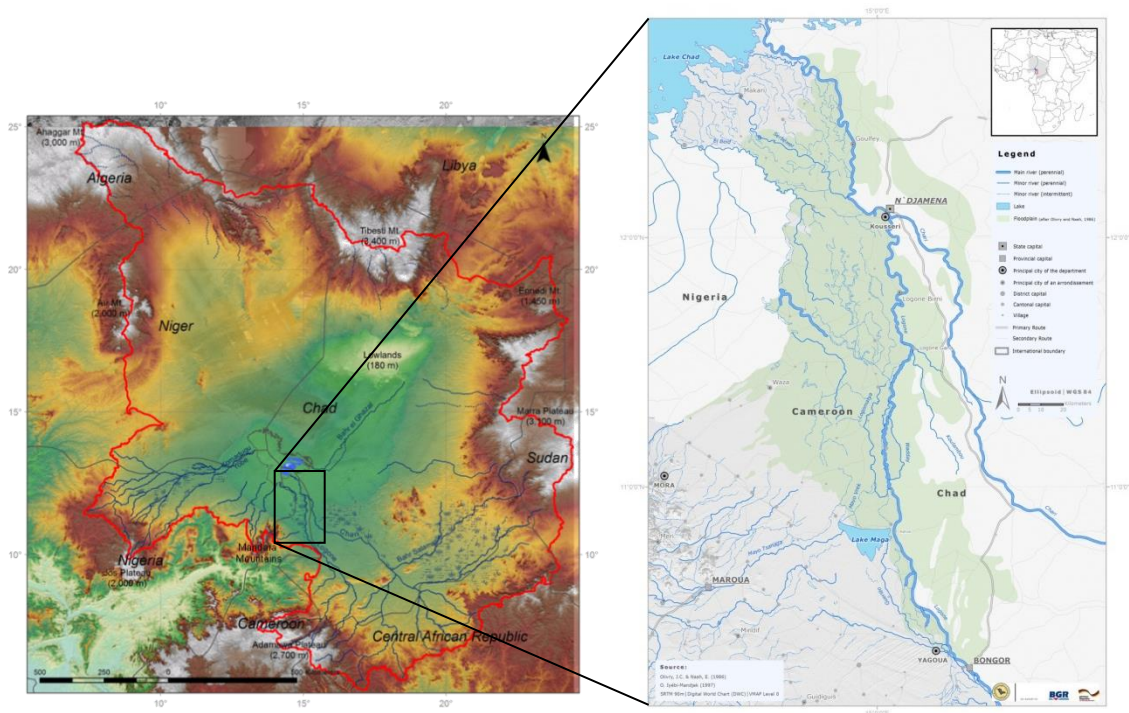


Figure 1. Zone d'étude dans le bassin du lac Tchad sur la gauche (Vassolo & Daïra, 2012) et les zones inondées sur la droite

2.1 Climat

Le climat dans la zone d'étude est influencé par deux forces motrices climatiques différentes. Un vent sec (harmattan) du nord et un vent humide du sud (la mousson ouest-africaine) conduisant à un climat sahélo-soudanien dans le nord et un climat soudanien au sud.

Le climat sahélo-soudanien dans la partie nord de la zone d'étude est caractérisé par une saison des pluies qui commence en Juin pour prendre fin en Septembre (Scholte, 2005), et une saison sèche qui dure d'Octobre à Mai. La précipitation annuelle moyenne pour la période 1931-2010 à N'Djamena est 573 mm (données DREM) (Figure 2).

Le climat soudanien de la partie sud de la zone d'étude est caractérisé par une saison des pluies de cinq mois, de mai à Septembre, et une saison sèche de sept mois d'Octobre à Avril. Selon les données de la DREM, la moyenne annuelle des précipitations à Bongor pour la période 1937-2007 équivaut à 807 mm.

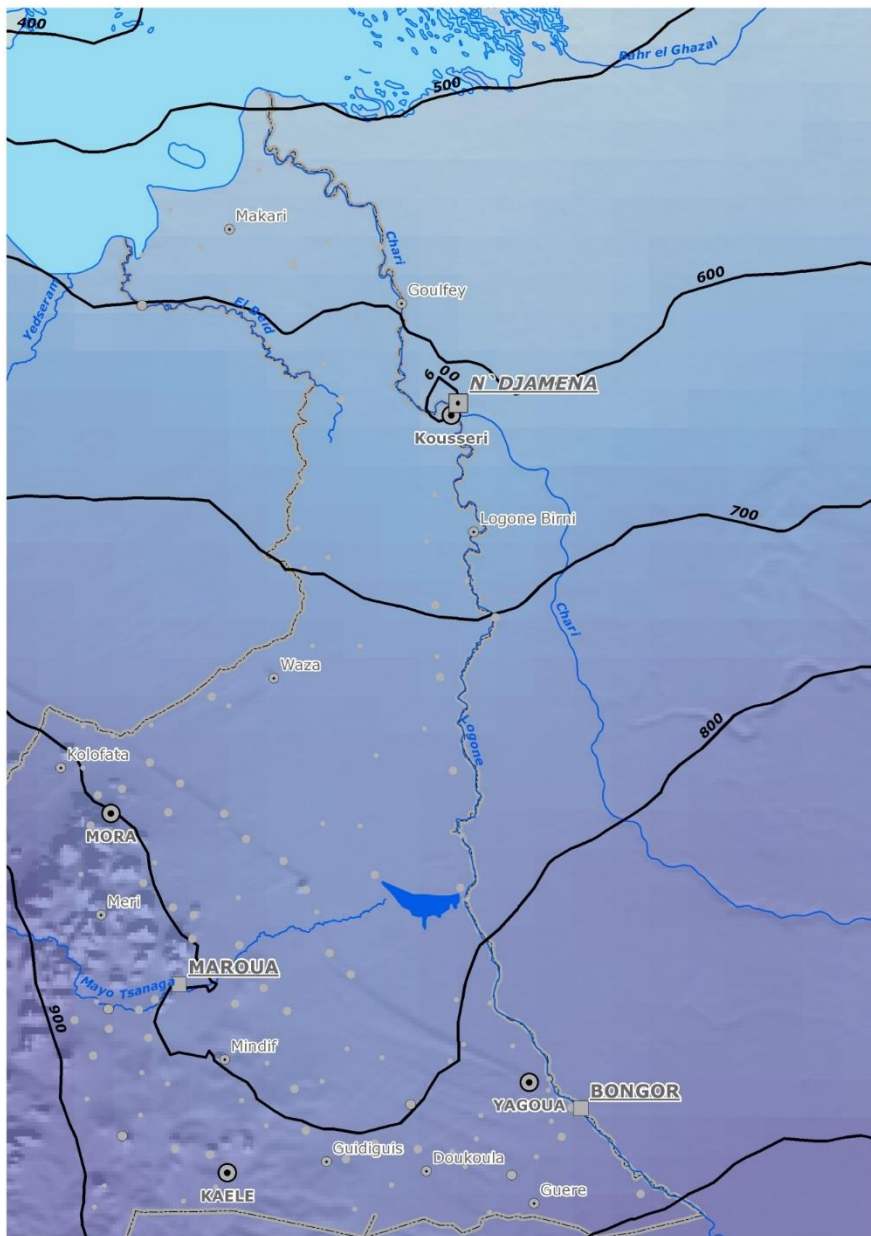


Figure 2. Répartition des précipitations dans la zone d'étude (Source: données DREM)

La précipitation à long terme dans les deux forces motrices climatiques peut être expliquée par la déviation cumulative de la moyenne des précipitations à N'Djaména et Bongor (Figure 3).

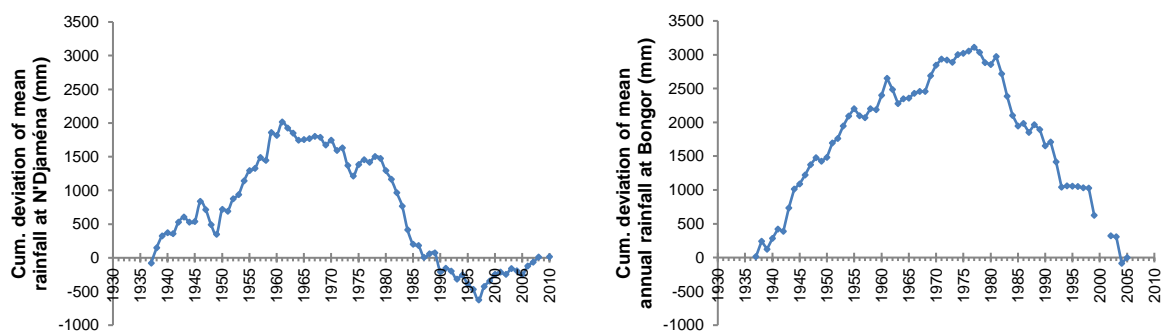


Figure 3. Ecart cumulatif des précipitations moyennes à N'Djaména et Bongor for 1937-2010

À N'Djamena, une longue période relative des années humides s'étend de 1937 à 1961 qui est peu interrompue par une période sèche de 1946 à 1951 et suivie d'une période moyenne de précipitations jusqu'en 1979 interrompue par 4 années sèches de 1972 à 1975. Par la suite, les précipitations diminuent et une longue période de sécheresse jusqu'en 1997 s'installe. Depuis lors, une période humide prévaut.

Dans le cas de Bongor, la précipitation semble suivre un schéma différent. La période humide initiale se poursuit sans interruption à partir de 1937 jusqu'en 1971 suivie d'une période de moyenne précipitation jusqu'en 1981. La période sèche subséquente continue jusqu'en 2004 avec une courte interruption de pluviométrie moyenne entre 1993 et 1997. Une période humide semble suivre, mais malheureusement, les données s'arrêtent en 2005.

Selon les données de la DREM, les températures annuelles moyennes varient entre 28,4 °C à N'Djaména dans le nord et 27,1 °C à Moundou dans le sud. La moyenne mensuelle pour Avril, le mois le plus chaud, peut atteindre jusqu'à 34,5 °C à N'Djaména et 32,7 °C à Moundou.

L'évaporation totale annuelle moyenne pour la période 1987-1991 à Kousséri dans le climat sahélo-soudanien a été estimée à 3944 mm tandis que dans Yagoua dans le sud, il atteint une valeur de 2614 mm (Ngatcha, 1993). Les évaporations mensuelles augmentent de Septembre à Mars et est à son minima en Août pendant les plus lourdes chutes de pluie.

2.2 Hydrologie

Le fleuve Logone, le principal affluent du Chari, est un long fleuve pérenne de 1000 km, qui a ses sources dans le plateau volcanique Adamawa situé dans l'ouest de la République Centrafricaine et le nord du Cameroun (Figure 4). L'un de ses principaux affluents est la rivière Pendé avec sa source à une hauteur supérieure à 1.400 m dans la partie orientale du plateau qui devient le Logone Oriental après la confluence avec la rivière Eréké avec source dans la République Centrafricaine. Les fleuves Vina et Mbéré avec des sources à environ 1000 m dans la partie nord du plateau de l'Adamawa au Cameroun se joignent à la frontière entre le Cameroun et le Tchad pour former le Logone Occidental. Le Logone Oriental et le Logone Occidental se rencontrent pour instituer la rivière Logone environ 180 km au sud-est de Bongor (Figure 4).

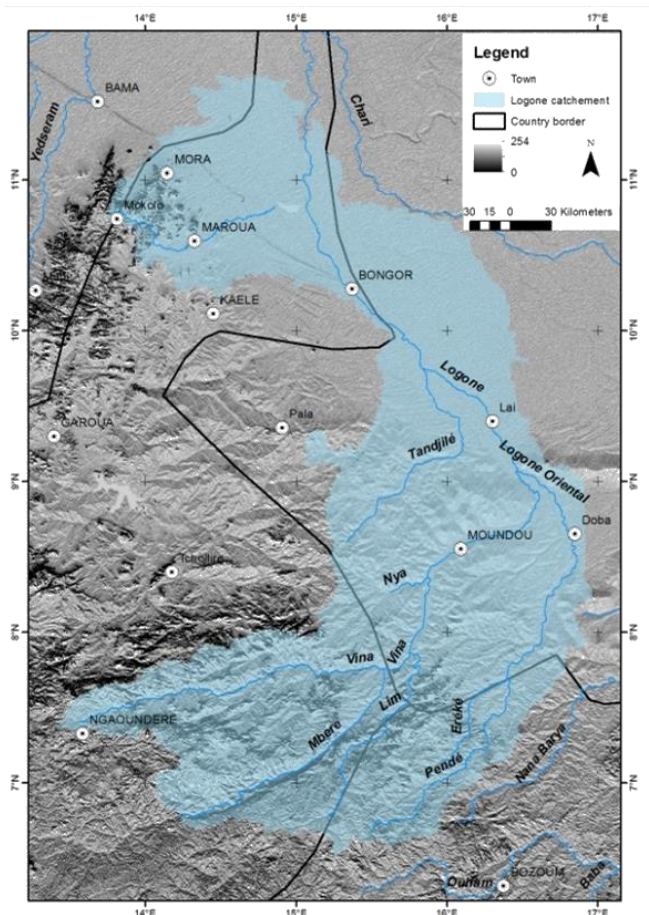


Figure 4. Bassin hydraulique du fleuve Logone

Le cours du fleuve Logone se divise en trois tranchées: le Haut Logone entre le confluent du Logone Oriental et Occidental et Lai, le Moyen-Logone entre Lai et Bongor (Figure 4), et le Bas Logone de Bongor à la confluence avec la Chari sud de N'Djamena (Figure 5). Ce dernier est d'une importance particulière pour la zone d'étude.

La planéité de la zone d'étude (gradient $\sim 0,2 \text{ m / km}$ (Ngatcha, 1993) empêche la formation d'un réseau fluvial hiérarchique (Scholte, 2005). Cependant, plusieurs petits canaux sinueux apparaissent pendant la saison des pluies, mais ne coulent que de courtes distances. Ils disparaissent habituellement avant qu'ils atteignent un rôle plus important.

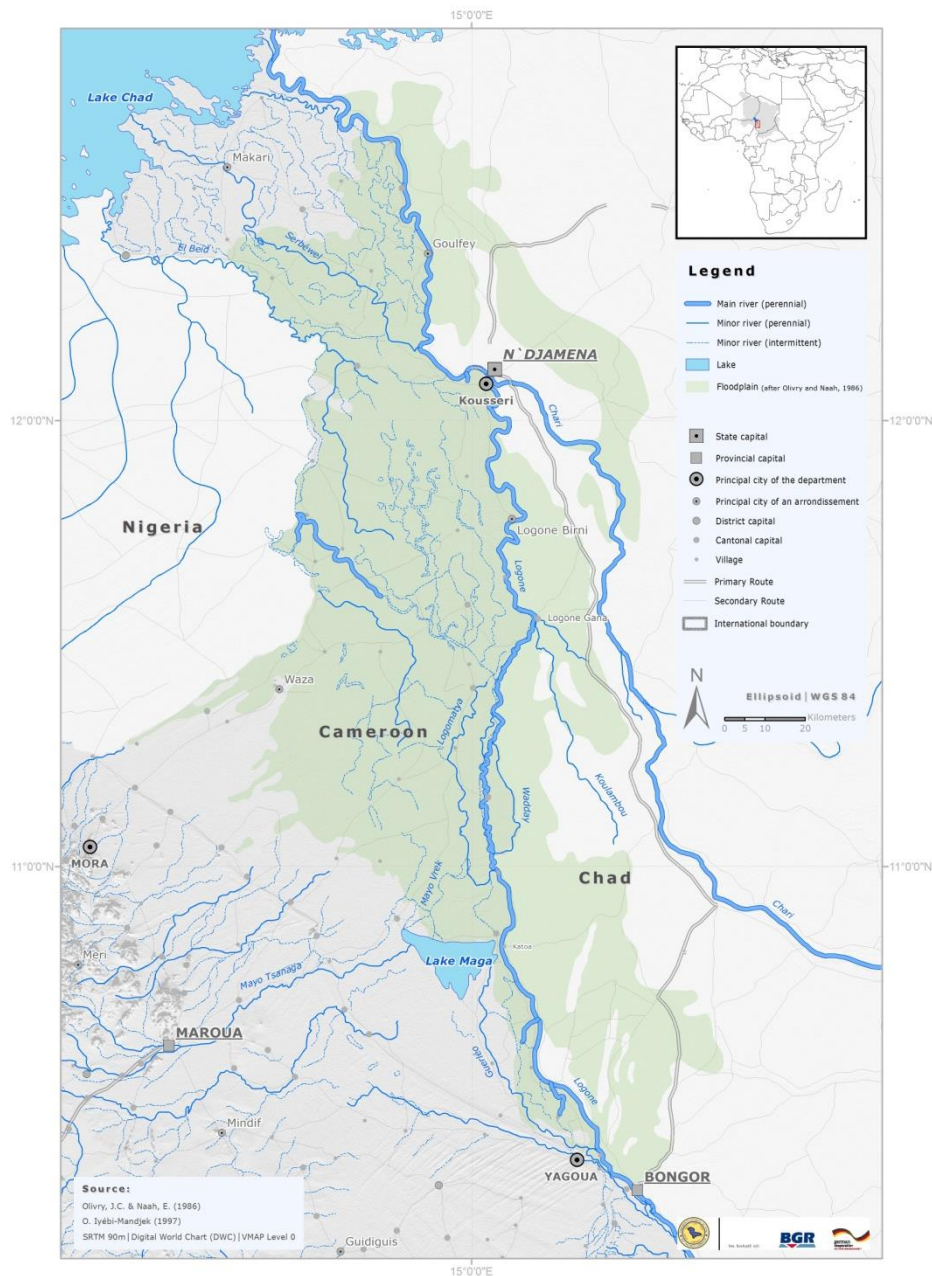


Figure 5. Carte hydrologique de la zone d'étude

L'une des principales rivières de la zone d'inondation est le Koulambou, qui a sa source dans la plaine Naga et rejoint le fleuve Logone au Logone Gana (Figure 5). Son débit mesuré pendant la saison des pluies en Octobre 2013 compte de $306 \text{ m}^3 / \text{s}$ (Figure 6). L'eau sortant du lit du fleuve Logone le long de la rive gauche inonde le Yaéré, d'où il est drainé par des rivières comme Guerléou et Logomatya qui coulent parallèlement au fleuve Logone. La plupart de ces rivières débouchent dans le fleuve Logone (Ngatcha, 1993).

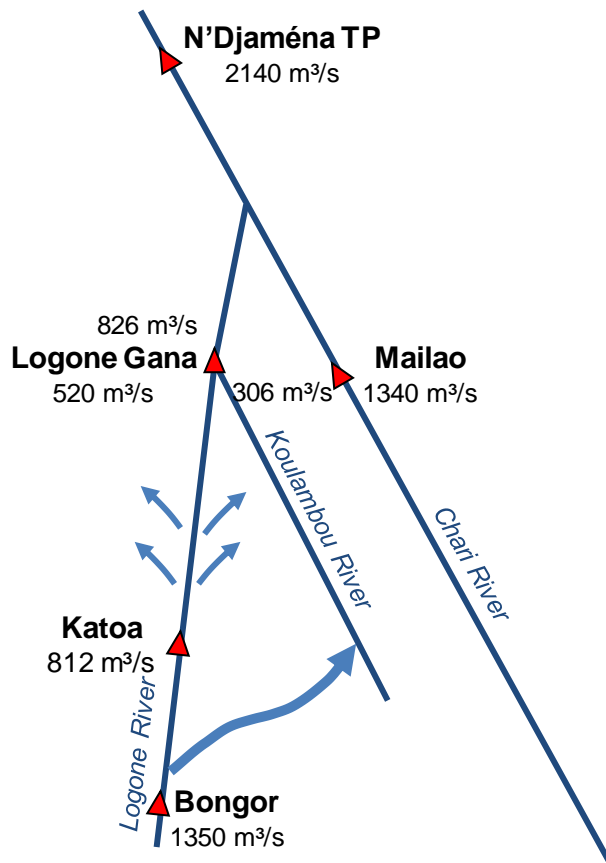


Figure 6. Représentation schématique du système du fleuve Bas-Logone (après Seeber, 2013)

Les plaines Yaéré et Naga sont inondées de façon saisonnière pendant la saison des pluies, généralement d'août à janvier, en fonction de l'intensité des précipitations et donc sur le débit de la rivière. Les premières pluies en mai / juin saturent le sol et remplissent les plus profondes dépressions topographiques, mais la principale source de l'inondation semble être le flux lors des crues. Il commence en septembre à Bongor vers l'est dans la plaine Naga et atteint une hauteur d'eau comprise entre 0,7 m et 1,5 m. Les hauteurs maximales d'inondation sont atteintes à la fin d'octobre / début novembre.

Le barrage Maga construit en 1979 a changé l'inondation de la région. Avant la construction, le sud Yaéré était régulièrement inondé et utilisé pour l'agriculture de décrue. Depuis la construction du barrage, l'inondation est rare et une désagréable végétation de roseaux s'est développée. La situation s'améliore à chaque fois que les inondations artificielles à travers les sorties du barrage ont lieu (Scholte, 2005). Malheureusement, la gestion du barrage est mauvaise et ces inondations artificielles sont très rares.

La DREM gère des stations limnimétriques dans la zone d'étude: Bongor, Katoa et Logone Gana sur le fleuve Logone, ainsi que Guelendeng sur le Chari et N'Djaména-TP en aval de la confluence entre le Logone et le Chari. Les débits sont estimés quotidiennement en fonction de la mesure de la hauteur de l'eau et de la courbe de tarage correspondant à la station.

Une analyse de la décharge du fleuve Logone pour la période 2001-2008 (Figure 7) révèle un débit moyen mensuel de 404 m³ / s à Bongor et 265 m³ / s à Logone Gana. Le débit minimal a lieu en avril pendant la saison sèche avec une valeur moyenne de 65 m³ / s à Bongor et 14 m³ / s dans le Logone Gana. Le débit augmente rapidement pendant la saison des pluies. Des pics de décharge sont observés à la fin de la saison des pluies à la fin septembre avec une valeur moyenne de 1.525 m³ / s à Bongor, et un mois plus tard, en fin octobre, avec une valeur moyenne de 765 m³ / s à Logone Gana.

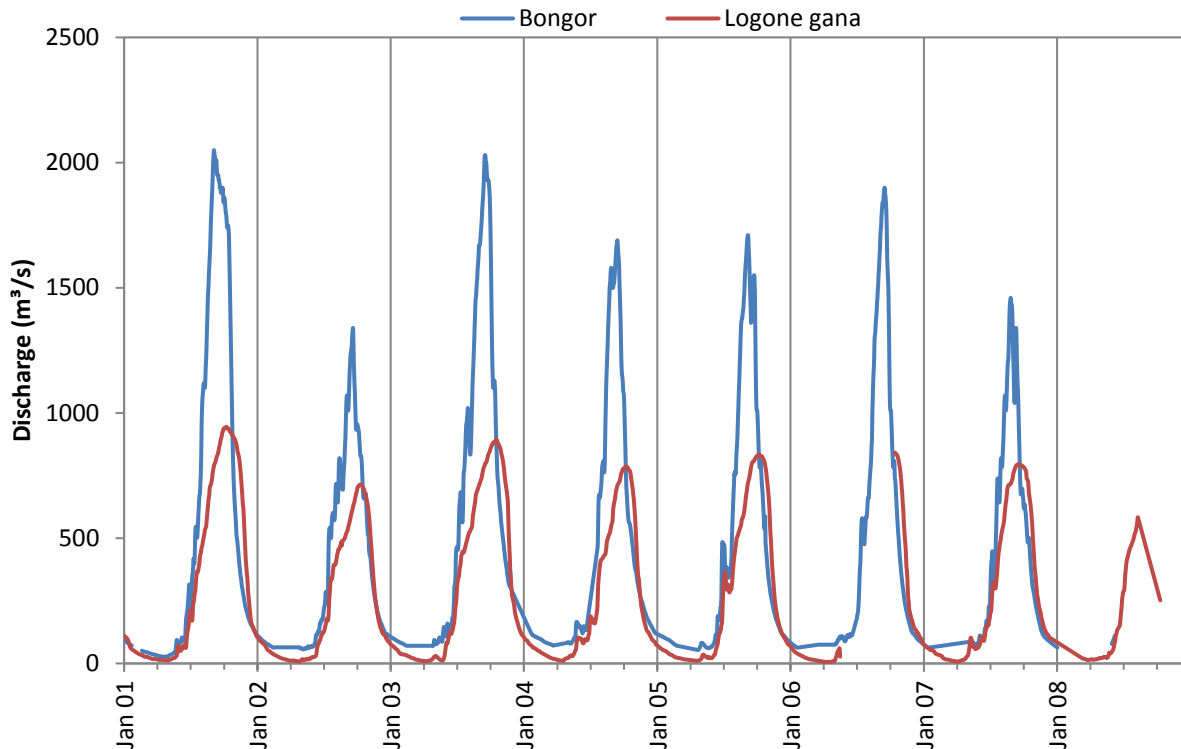


Figure 7. Valeurs de décharge dans Bongor et Logone Gana pour la période 2001-2008

La perte d'eau entre Bongor et Logone Gana est principalement due à l'écoulement lors de crues dans la plaine Naga au Tchad (Figure 6). La plupart des eaux de crues évapotranspirent ou infiltrent le sol pour recharger l'aquifère sous-jacent. Les restes coulent dans le fleuve Logone ou des canaux mineurs et des rivières comme Serbéwel ou El Beid, qui déchargent dans le lac Tchad (Figure 5).

Les taux de décharge auxquels le débordement a lieu dans les plaines Yaéré et Naga dans les stations Bongor et Katoa, respectivement, ont été calculées dans l'ancien projet BGR-CBLT (Seeber et al., 2014). Il a été constaté que le débordement à Bongor commence lorsque la décharge dépasse $1.055 \text{ m}^3 / \text{s}$, ce qui est de l'ordre de $1,100 \text{ m}^3 / \text{s}$ rapporté dans Ngatcha et al. (2007). Le débordement dans Katoa commence lorsque la décharge dépasse $356 \text{ m}^3 / \text{s}$.

Olivry (1986) a indiqué que, si le débit à Bongor dépasse $1.500 \text{ m}^3 / \text{s}$, le Yaéré est fortement inondé et les eaux de crue atteignent le lac Tchad par la rivière El Beid à un débit moyen de $38,9 \text{ m}^3 / \text{s}$. Le régime d'écoulement dans la région a changé depuis la dernière série de sécheresses dans les années 80. Actuellement, les débits du fleuve Logone dépassent rarement $1.500 \text{ m}^3 / \text{s}$ et le El Beid flux sporadiquement. De grandes quantités d'eau de l'El Beid n'atteignent presque jamais le lac Tchad.

2.3 Sol, Végétation, et Agriculture

Les types de sols dominants dans les plaines Yaéré et Naga sont vertisols et argiles noires hydromorphes (Brabant & Gavaud, 1985) composées de montmorillonite (argiles gonflantes). Ce type de sols est caractéristique pour des climats humides ou soumis à des sécheresse et inondations erratiques.

Pendant la saison sèche, ces sols rétrécissent considérablement et forment des fissures qui peuvent être aussi profond que 50 cm (Figure 8). Au début de la saison de pluie l'eau pénètre à travers les fissures conduisant à un gonflement des argiles. En raison du gonflement les fissures se referment et la perméabilité réduite du sol favorise l'inondation de la zone.



Figure 8. Pendant la saison sèche les sols rétrécissent et forment des fissures profondes (Foto: Djoret Daïra, Avril 2013)

La végétation dans les plaines Yaéré et Naga dépend de la disponibilité de l'eau de surface. Un paysage marécageux prévaut pendant la saison des pluies (Figure 9), mais la savane arbustive, plaines herbeuses, et les sols nus dominant pendant la saison sèche (Figure 10).



Figure 9. Paysage marécageux dans la plaine inondable (Photo: Aminu Magadji, Septembre 2013)

Figure 10. Plaine herbeuse Naga pendant la saison sèche (Photo: Djoret Daïra, Avril 2013)

Économiquement, la région est principalement utilisée pour l'élevage des animaux et de l'agriculture de décrue telle que le sorgho et le millet. En outre, le riz, le maïs, les arachides et les légumes sont cultivés principalement à des fins de subsistance (Figure 11 et Figure 12).



Figure 11. L'élevage bovin (Photo: Djoret Daïra, Avril 2013)

Figure 12. L'agriculture de subsistance (Photo : Djoret Daïra, Avril 2013)

Sur la plaine Yaéré, le projet de la Société d'Expansion et de la Modernisation de la Riziculture de Yagoua (SEMRY), dont la première phase a débuté en 1954, irrigue actuellement 5500 ha en utilisant l'eau du barrage de Maga (Figure 13). SEMRY gère plus de 7000 ha sans contrôle de l'eau d'inondation (Charte de l'Eau, 2010). Du côté tchadien, il y a de grands projets d'irrigation près de Laiï (1300 ha) et à Bongor (2000 ha) (Charte de l'Eau, 2010).

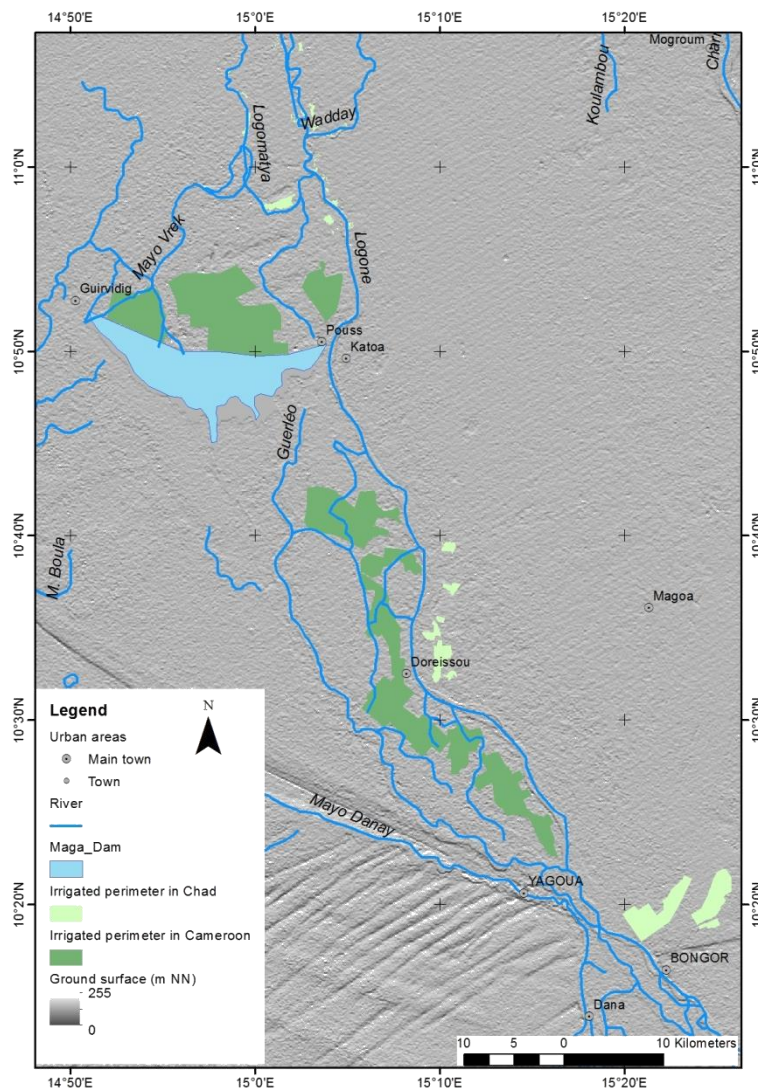


Figure 13. Les zones irriguées avec de l'eau du barrage de Maga au Cameroun et du fleuve Logone au Tchad

Au cours de la période de crue. La pêche à lieu dans des canaux de pêche spécialement construits à cette fin qui coupent les plaines (Figure 14). Les quelques 200 canaux varient entre 70 m et 9.000 m de longueur, de 2 m à 10 de largeur, et de 1,5 m à 2,5 m de profondeur (Sambo, 2010). Lorsque la récession commence (reflux), les poissons vivants dans la zone d'inondation nagent de retour dans le fleuve Logone par ces canaux. Avant leur confluence avec le fleuve Logone, les canaux sont fermés avec des filets de pêche et tous les poissons malgré leur âge sont capturés (Figure 15). Ce type de pêche conduit à un déclin et disparition d'espèces et est pourtant non soutenable. Bien que ce type de pêche soit interdit au Cameroun, il est encore largement pratiqué au Tchad et au Cameroun (Figure 16).



Figure 14. Canaux de pêche construit pendant la saison sèche à Dialo, Tchad (Photo : Djoret Daïra, Avril 2013)



Figure 15. Activités de pêche dans la rivière du Logone et ses affluents, Cameroun (Photo : Djoret Daïra, Décembre 2014)

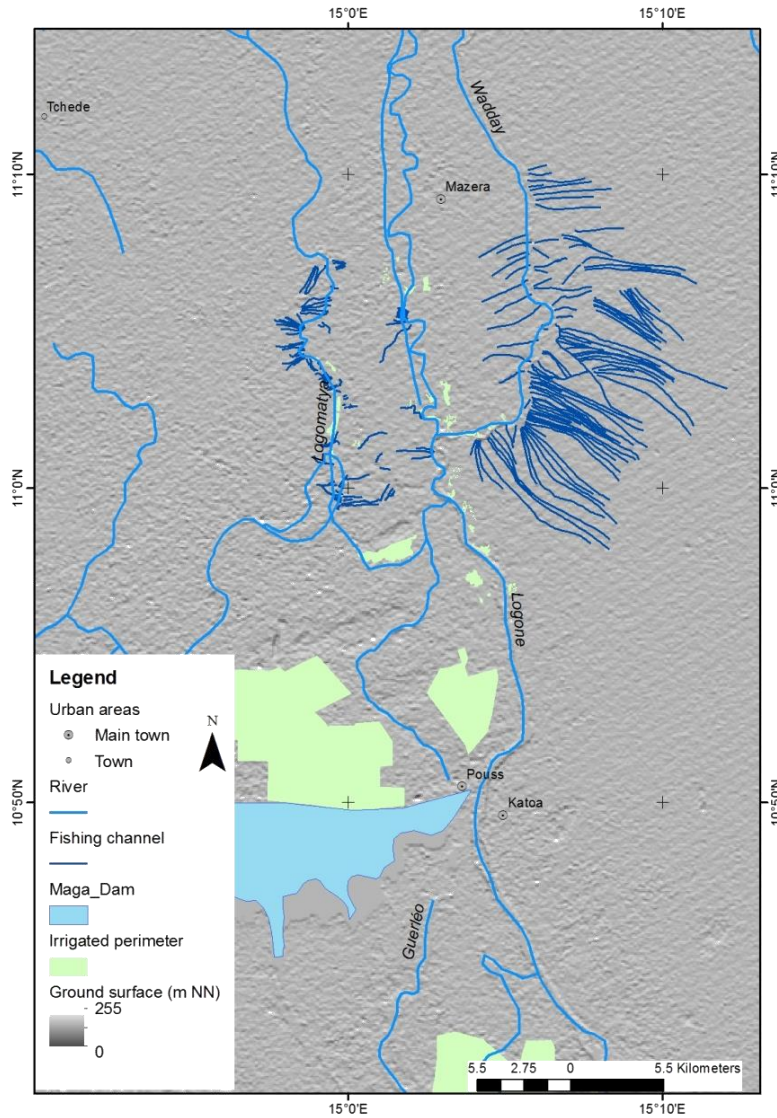
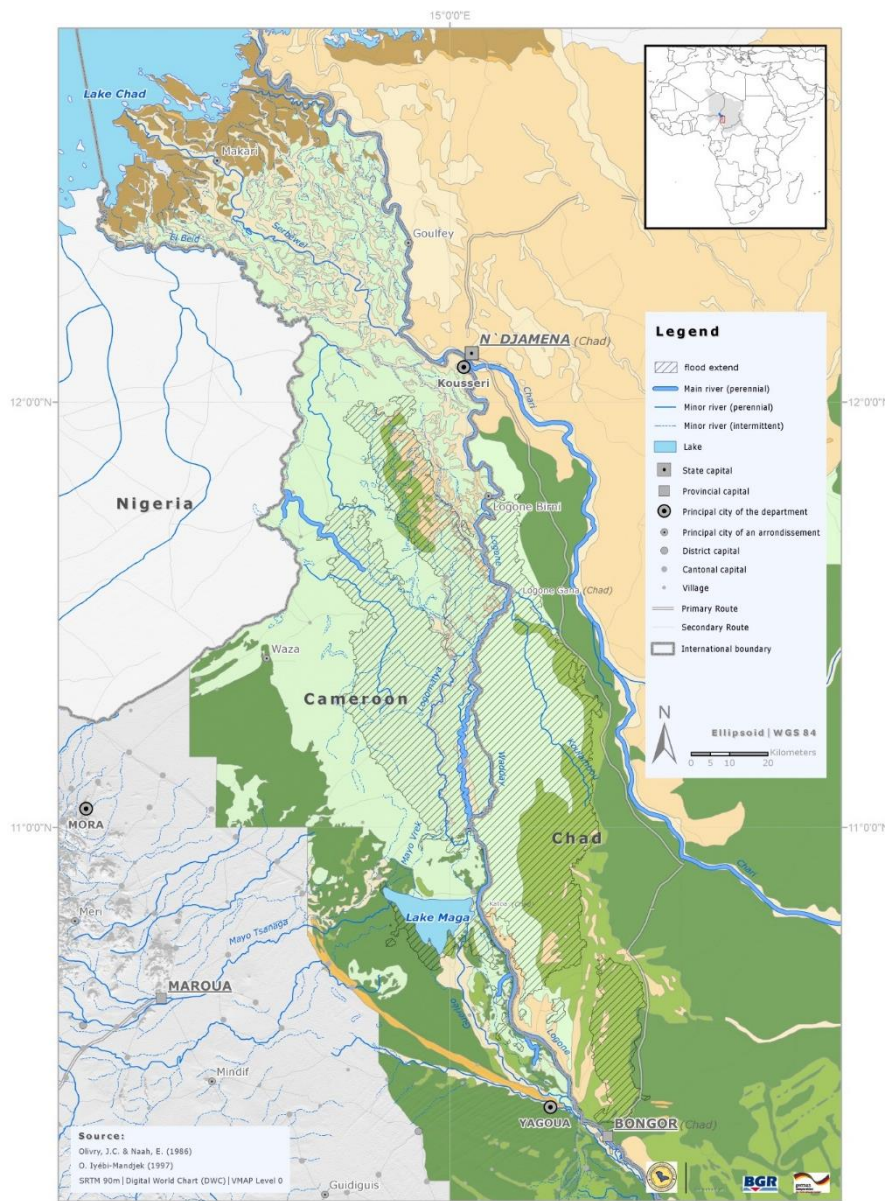


Figure 16. Les canaux de pêche sont largement distribués au Cameroun et au Tchad, malgré le fait que ce type de pêche soit interdit.

2.5 Cadre géologique

Les plaines Yaéré et Naga se trouvent à l'extrémité sud des dépôts quaternaires du bassin du lac Tchad (Figure 17). Dans cette partie du bassin, l'épaisseur des dépôts quaternaires varie généralement entre 50 m et 70 m (Schneider et al., 1992 et Biscaldi, 1970).

Le type de dépôts rencontrés dans la zone d'étude reflète l'environnement de déposition. Les couches de sable sont un indicateur des conditions arides du passé, tandis que les couches argileuses soit lacustre ou fluviale sont le résultat de la période plus humide, lorsque la taille du lac a augmenté et les lits des fleuves Logone et Chari étaient beaucoup plus large.



- Gravelly and sandy, fluvial or lacustrine deposits, with alluvial fans
- Gravelly and sandy, fluvial or lacustrine deposits, locally covered by less permeable layers
- Band of sandy, lacustrine deposits
- Dune sand
- Clays and sandy clays
- Clays, sandy clays, clayey sands with post-genetic calcium carbonate inclusions
- Sandy fluvial or lacustrine deposits: alternation of sand and clay

Figure 17. Géologie de la zone d'étude (après Biscaldi (1970) pour la partie camerounaise, Schneider (1969) et Torrent (1966) pour la région tchadienne)

2.6 Cadre hydrogéologique

L'information principale de la plaine Yaéré au Cameroun est compilée dans la carte hydrogéologique 1 / 200.000 par Biscaldi (1970) et la carte hydrogéologique par Detay et al. (1989). La carte hydrogéologique 1 / 500.000 par Torrent (1966), qui a ensuite été incluse dans la carte hydrogéologique du Tchad 1 / 1.500.000 par Schneider (1969), présente les données disponibles pour la plaine Naga au Tchad.

Les valeurs de la conductivité hydraulique varient considérablement en fonction de la composition de la nappe (Figure 18). Elles vont de $1\text{E-}07$ m / s pour les forages pompant l'eau de limons dans les voisinages du barrage de Maga à $4\text{E-}04$ m / s pour les sables dans un puits à Bongor. Boronina et al. (2005) a recueilli des données de conductivité hydraulique du bassin du Tchad comme base pour un modèle numérique. Pour la zone d'étude, ils ont obtenu une valeur de conductivité moyenne de $2\text{E-}04$ m / s, ce qui met en évidence le caractère général sableux de l'aquifère.

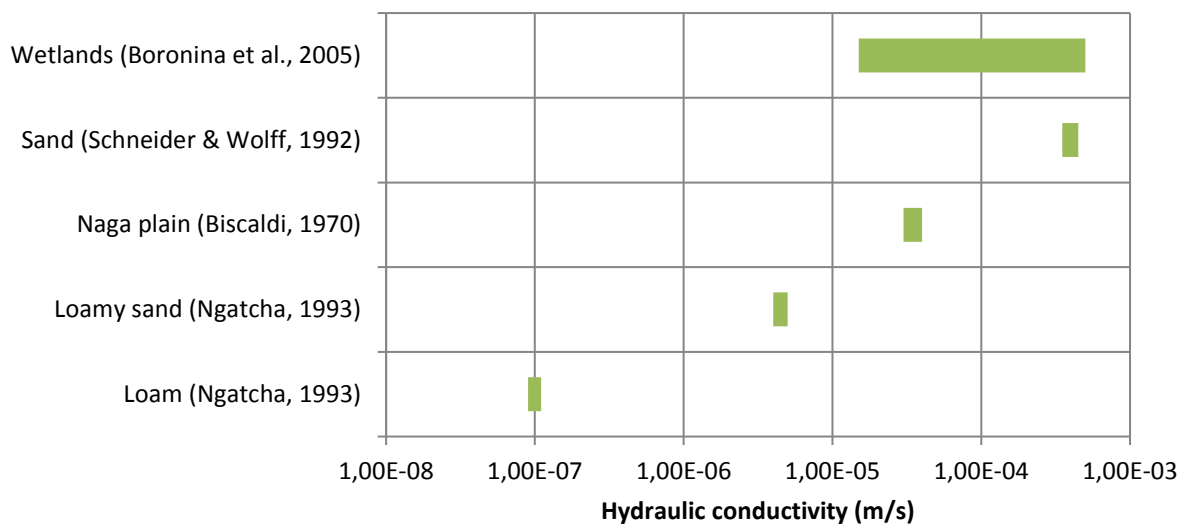


Figure 18. Gamme de valeurs de perméabilité publiées pour la zone d'étude (en m / s)

Selon les cartes hydrogéologiques, la nappe phréatique régionale du Quaternaire dans le Yaéré varie entre 320 m amsl à Yagoua et 265 m amsl au lac Tchad. Dans l'extrême nord du Cameroun, vers le lac Tchad (Figure 19), trois zones de dépression locales des eaux souterraines ont été détectées. Ngatcha et al. (2007) ont étudié une quatrième dépression située au nord-est de la chaîne des dunes qu'ils ont interprété comme l'effet de deux couches superposées. La table profonde de l'eau à 60 m sous la surface se trouve dans le Quaternaire ancien qui est séparée de la plus récente par un aquitard limoneux de 2 m à 5 m d'épaisseur.

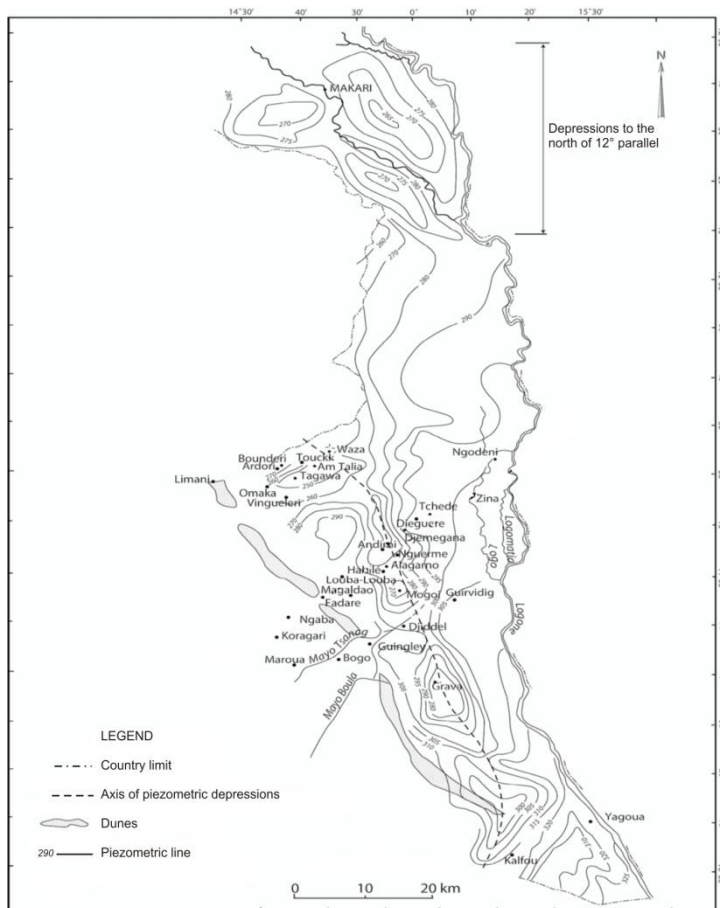


Figure 19. Dépressions des eaux souterraines dans l'extrême nord du Cameroun (après Ngatcha et al., 2007)

Dans la plaine Naga, la nappe phréatique se situe entre 320 m amsl à Bongor et 280 m amsl à N'Djamena. Schneider & Wolff (1992) ont signalé que l'eau souterraine de l'aquifère Quaternaire dans cette région est généralement faible en minéraux. En outre, ils ont noté que les lentilles de sable étalé de 2 m à 15 m d'épaisseur forment des aquifères locaux. Des aquifères locaux similaires ont été mentionnés par Ngatcha (1993) pour la plaine d'inondation Yaéré.

3 Cartographie des zones inondables

3.1 Données utilisées

Le 16-jours composite spectre-radiomètre imageur à résolution moyenne (MODIS) MOD13Q1 (Justice et al., 2002) a été utilisé pour cartographier l'étendue annuelle des inondations dans les plaines Naga et Yaéré. Les ensembles de données pour la période 2000-2014 comprennent les produits suivants:

- Réflectances bleu (bande 3, longueur d'onde de 470 μm), rouge (bande 1, longueur d'onde 648 μm), et le proche infrarouge (NIR, bande 2, longueur d'onde 848 μm) sont utilisés pour la détermination des indices de végétation MODIS quotidienne
- Indice de végétation normalisé (NDVI) qui complète les produits NDVI de la NOAA et assure la continuité historique
- L'amélioration de l'indice de végétation (EVI) est exempte de contamination atmosphérique par la fumée et les nuages minces (VerMOTE et Vermeulen, 1999). Les variations canopées sont réduites au minimum tandis que les changements des rares aux denses végétations sont améliorés
- Infrarouge à ondes courtes (SWIR; bande 7, longueur d'onde de 2,105 à 2,155 μm)

Les images SWIR utilisées pour la cartographie (feuilles h19v7 et h19v8) ont été téléchargées à partir du site web de US Geological Survey (USGS). Parce que la période d'inondation commence en Juillet et continue jusqu'à Janvier de l'année suivante, images SWIR 161-017 de la prochaine année ont été choisies (225 images). Les images ont été projetées dans la projection géographique WGS84 qui est couramment utilisé dans la construction de cartes de la zone.

3.1 Méthodologie Appliquée

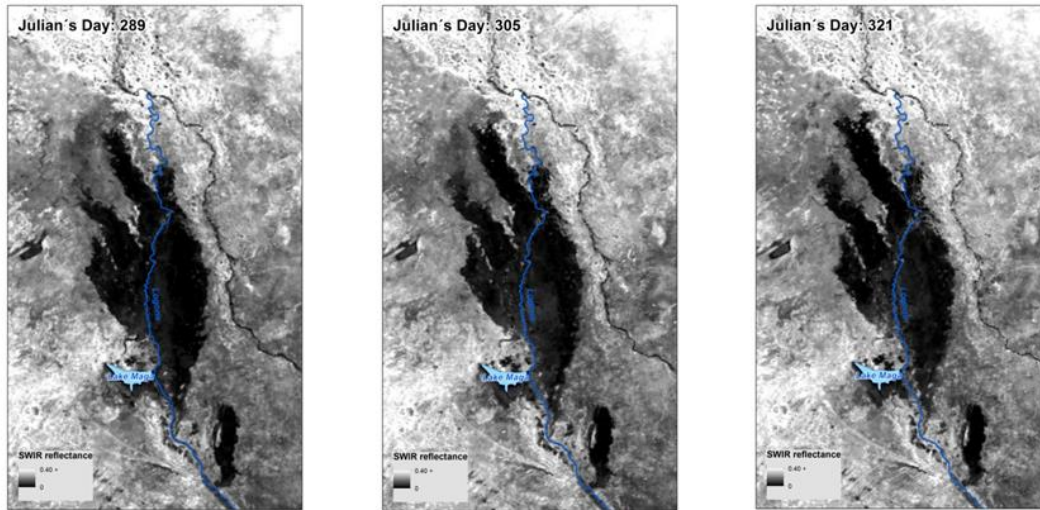
Traitement des données pour la délimitation de la zone inondée

L'étendue de la région inondée a été déterminée tous les 16 jours pour la période 2000-2014 en utilisant la bande 7 (SWIR) de l'image composite MODIS. La gamme de longueur d'onde à partir de cette image est fortement absorbée par l'eau, soit de l'eau libre ou eau contenue dans les plantes (Jensen, 2007; Lillesand et al, 2008; Sakamoto et al., 2007). La chaîne de traitement appliquée poursuit la méthodologie publiée par Westra et De Wulf (2009).

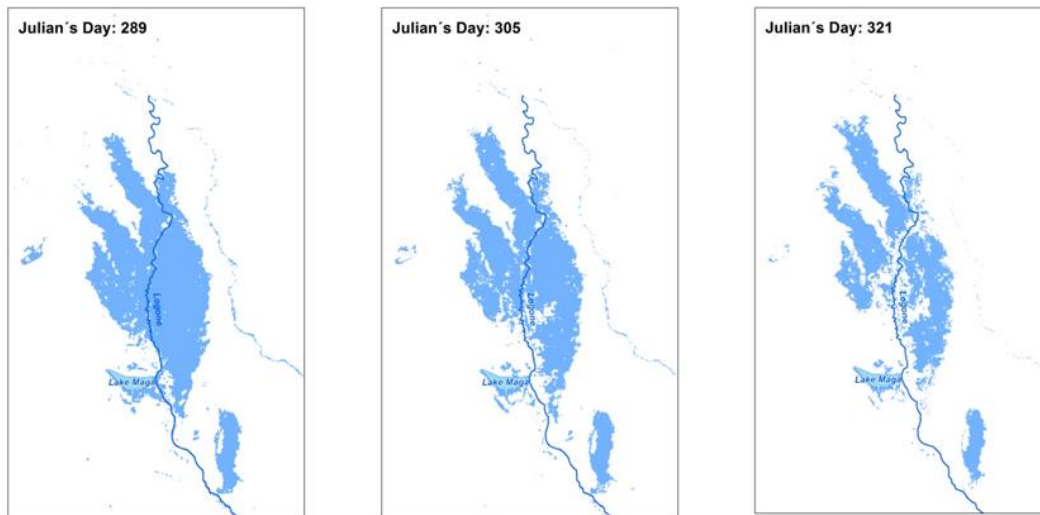
Chaque scène MODIS a été scannée en appliquant successivement les étapes suivantes (Figure 20):

- Pixels avec SWIR $< 0,08$ unité de réflexion ont été sélectionnés, ce qui signifie l'eau abondante
- Groupe de pixels couvrant au moins 25 pixels (1,56 km^2) sont reconnus comme zone inondée
- Les zones inondées à une distance de moins de 5 km du fleuve Logone sont considérées comme inondées par la rivière. Toutes les zones plus éloignées et isolées sont soit mal classés ou correspondent à des dépressions que collectent d'eau de pluie
- Le lac Maga est exclu des zones inondées, car il correspond à un barrage et est une inondation faite par l'être humain (artificielle)

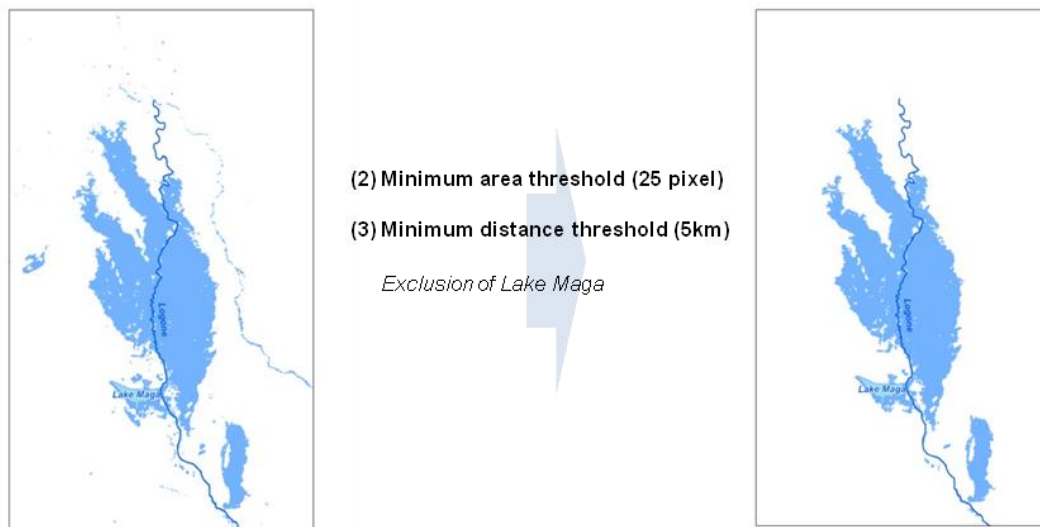
La figure 20 montre la méthodologie décrite ci-dessus appliquée sur trois images différentes pour l'année 2000. Les cartes supérieures indiquent en noir les pixels contenant réflectance en dessous de 0,08. Les cartes de la série de la ligne centrale montrent comme zones inondées ces groupes de pixels qui couvrent au moins 1,56 km^2 . La carte en bas à gauche illustre la zone inondée comme moyenne des trois images. La carte en bas à droite est résultant des zones inondées après l'élimination des régions éloignées que collectent de l'eau des précipitations ainsi que les rivières.



(1) Threshold: SWIR reflectance (band 7) < 0.08



Selection all pixels classified as flooded in at one of the three thresholded images



(2) Minimum area threshold (25 pixel)

(3) Minimum distance threshold (5km)

Exclusion of Lake Maga

Figure 20. Compilation de l'ampleur de l'inondation annuelle moyenne (pour l'année 2000).

3.2 Résultats

Les séries chronologiques des zones inondées pour la période 2000-2014 sont présentées dans la Figure 21. Les zones inondées varient considérablement d'année en année en fonction de l'interaction complexe de débit de la rivière, des régimes de précipitations et l'humidité du sol initial. Les plus grandes zones inondées correspondent à 2012, puis 2001 et 2010 (Tableau 1). La plus petite zone inondée correspond à 2009, où le Yaéré était à peine sous l'eau.

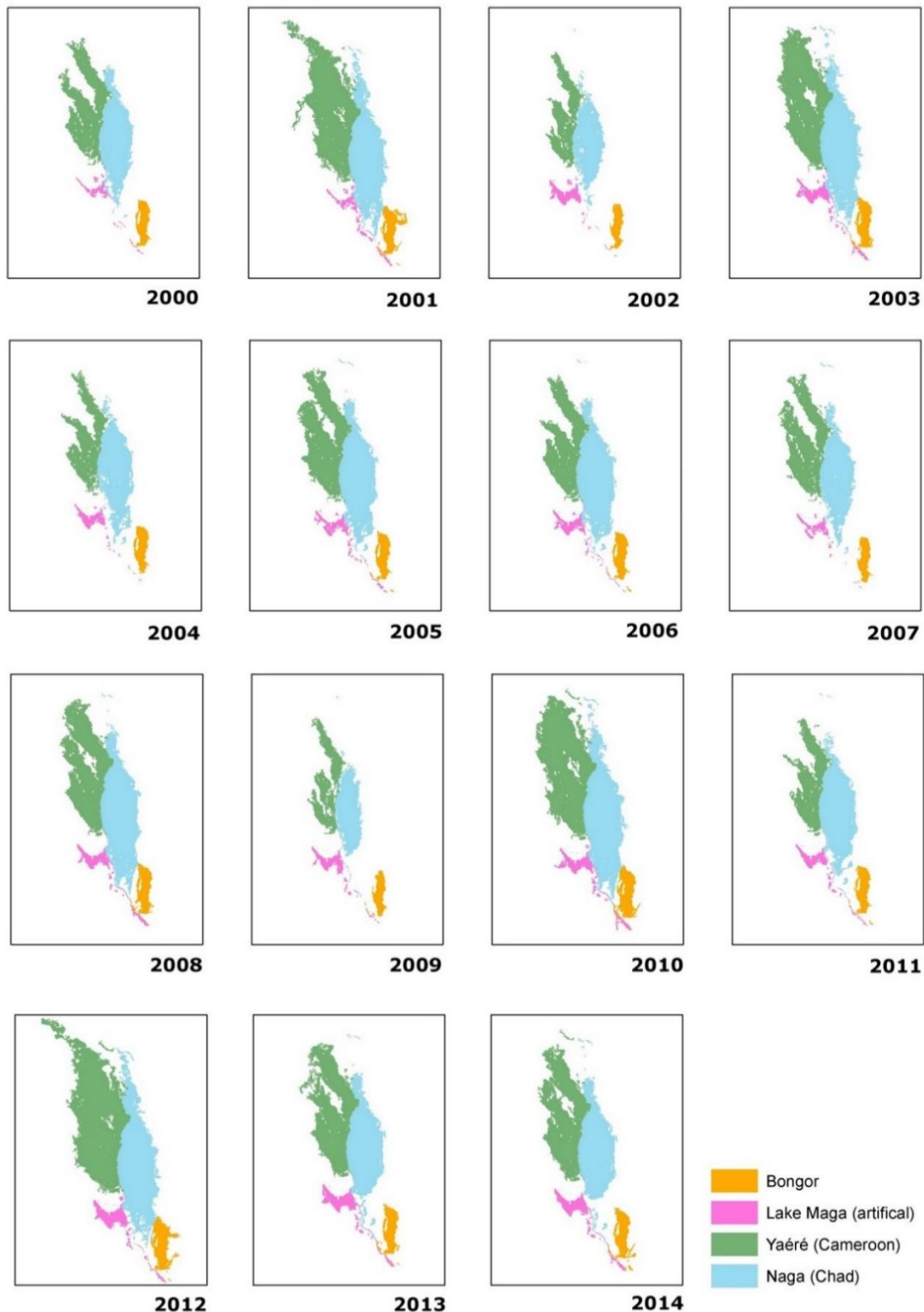


Figure 21. Série des zones inondées pour la période 2000-2014 spatialement différenciée

Tableau 1. Moyenne annuelle de l'étendue de l'inondation en km² pour chacune des zones différenciées et la superficie totale

Année	Yaéré	Naga	Lac Maga	Bongor	Total
2000	2,225	2,197	172	372	4,966
2001	4,426	3,302	298	565	8,591
2002	1,386	1,662	310	307	3,666
2003	3,407	3,210	402	479	7,499
2004	1,719	2,293	251	377	4,640
2005	2,888	2,744	320	403	6,355
2006	2,177	2,810	307	419	5,714
2007	2,433	2,170	207	328	5,139
2008	2,988	3,140	361	471	6,961
2009	1,278	1,406	312	317	3,312
2010	4,044	3,402	438	570	8,454
2011	1,691	2,532	307	420	4,951
2012	4,932	3,427	461	608	9,428
2013	2,982	2,506	455	449	6,393
2014	2,926	2,455	422	497	6,301
Moyenne	2,767	2,617	335	439	6,158
Écart type	1,094	617	88	94	1,796

Statistiques de l'étendue des inondations

Le maximum, le minimum et la moyenne des inondations étendues des zones spatialement différenciées pour la période 2000-2014 sont calculées comme suit:

- Pour chaque pixel, il est calculé combien de fois il est étiqueté comme inondé dans les 15 ans (il peut obtenir des valeurs comprises entre 1 et 15).
- La valeur résultante est ensuite divisée par 15 pour déterminer le pourcentage d'inondation. Si un pixel a été inondé 15 fois, il obtient 100%. De même, si un pixel n'a jamais été inondé, il obtient 0%.

De cette façon, il est possible de dériver la zone qui a été inondé 5% du temps (inondation maximale), 50% (moyenne des inondations) et 100% (inondation minimale) pour les 15 ans, comme le montre la Figure 22. Le très vert clair montre la zone inondée maximale pour toute la période, le vert moyen représente la surface moyenne, et le vert foncé indique la zone qui a été inondé chaque année pour la période 2000-2014.

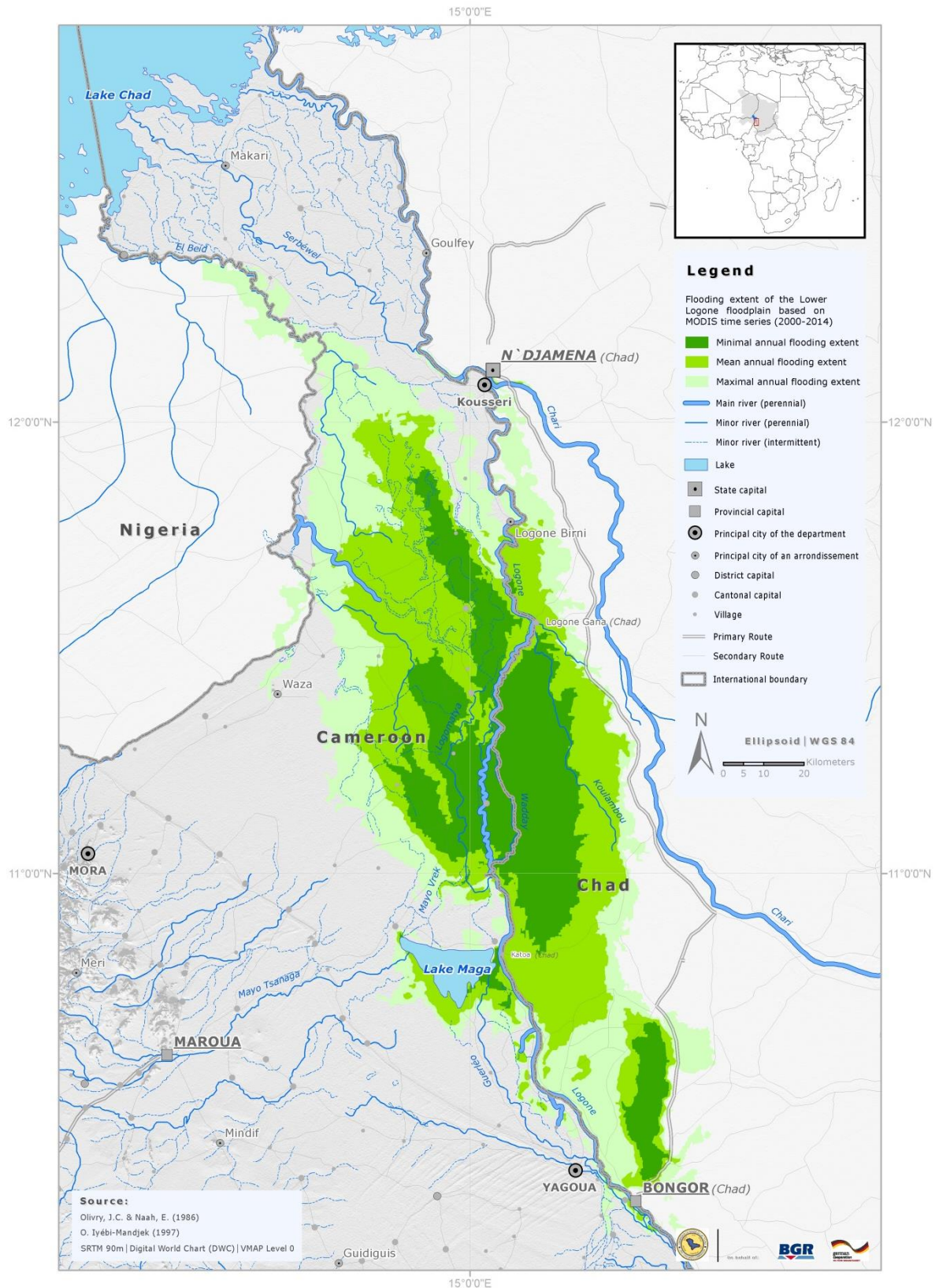


Figure 22. Zones inondées minimale, moyenne et maximale pour la période 2000-2014

La minimale, moyenne et maximale étendue des zones inondées pour chacune des plaines, la région autour de Bongor, et le barrage de Maga sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Résumé des résultats des zones inondées estimés dans km²

Plaine	Étendue minimale	Étendue moyenne	Étendue maximale
Yaéré	1,107	2,979	5,230
Naga	1,238	2,308	3,776
Bongor	250	433	852
Maga Dam	77	314	649
SOMME	2,717	6,529	10,507

4 Hydrogéologie

4.1 Méthodologie

Premières enquêtes menées par l'ancien projet BGR-CBLT montrent que les zones d'inondation du fleuve Bas- Logone ont une contribution significative à la recharge des eaux souterraines (en moyenne 5 mm / a) dans le bassin du lac Tchad (Vassolo, 2011; Vassolo, 2012). La plaine inondable de Waza Logone a été choisie comme zone d'étude pilote pour une quantification de recharge des eaux souterraines détaillées. Les investigations se sont concentrées sur la détermination de l'origine et les chemins d'écoulements, la qualité des eaux souterraines et de surface, ainsi que l'interaction entre les eaux souterraines et le fleuve Logone et sa plaine d'inondation.

Une mission de terrain a été effectuée au cours de la période sèche en 2013, où un total de 83 échantillons d'eau ont été pris (76 à partir des puits et des forages, et 7 à partir des rivières). Une deuxième mission pendant la saison sèche de 2014 comprenait un total de 71 échantillons, mais seulement 35 de la première campagne ont été revisités (Figure 23).

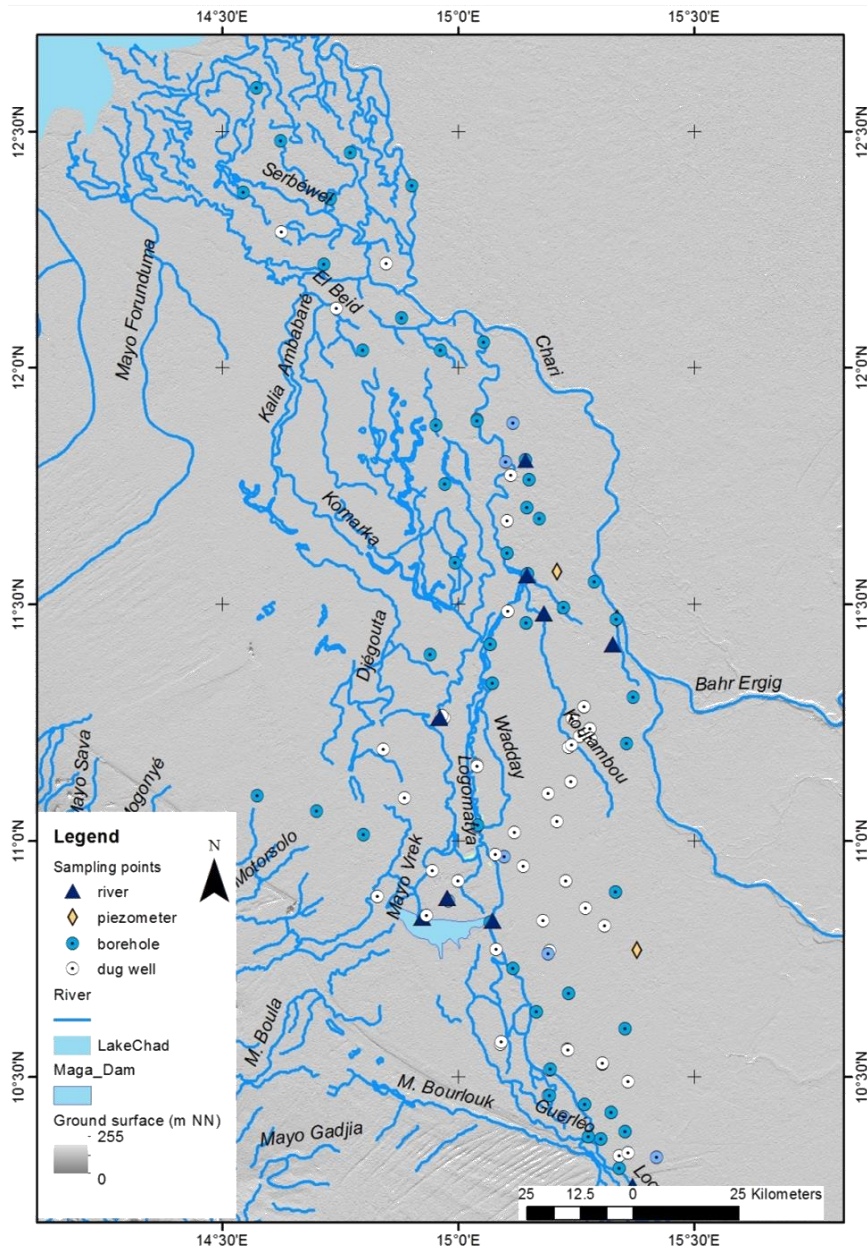


Figure 23. Répartition des points de prélèvement dans la zone d'étude

Au cours de ces missions de terrain, aussi les niveaux d'eau ont été enregistrés en utilisant une sonde (Figure 24). A cet effet, seul les puits ont été utilisés parce que tous les forages disponibles sont installés avec des pompes et ne prévoient pas pour l'introduction d'une sonde. Les coordonnées de tous les points visités ont été recueillies au moyen d'un dispositif GPS Garmin manuel.

La température ($^{\circ}\text{C}$), la conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$), le pH, l'oxygène dissout (mg/l), et le potentiel redox (mV) ont été mesurés in situ à l'aide d'un multi-capteur (WTW-Multi 3430). L'eau a été pompée à l'aide d'une pompe submersible (Set COMET-COMBI 12-4T) (Figure 25). Lorsque forages équipés avec des pompes manuelles ont été échantillonnés, une cellule de flux (Figure 26) a été utilisé afin d'atteindre l'écoulement laminaire et éviter le contact des eaux souterraines avec de l'oxygène. Les espèces d'anions et de cations complètes ainsi que des oligo-éléments et les isotopes stables $\delta^{18}\text{O}$ et deutérium $\delta^2\text{H}$ ont été mesurés dans le laboratoire du BGR à Hanovre.



Figure 24. Enregistrement du niveau d'eau dans un piézomètre (Photo: Djoret Daïra, Avril 2013)



Figure 25. Utilisation de la pompe COMET pour l'échantillonnage à partir d'un puits (Photo: Djoret Daïra, Avril 2013)



Figure 26. Pompage à travers une cellule de flux et application de la WTW-Multi 3430 (Photo: Djoret Daïra, Mai 2013)

4.2 Mesure des hauteurs des puits et forages

Les hauteurs des puits ont été mesurées au moyen d'un système de positionnement global différentiel (DGPS) dans 12 cas. Toutes les autres hauteurs ont été déterminées à l'aide du

modèle d'élévation de terrain global SRTM3 de la NASA. La résolution du modèle est de 3 arc min x 3 min arc, qui est d'environ 30 m x 30 m. Une comparaison entre les données mesurées et celles extraites à partir du modèle d'élévation est présentée dans le Tableau 3 et graphiquement à la Figure 27. Le graphique indique une relation linéaire entre les hauteurs mesurées et celles modélisées, mais SRTM hauteurs sont toujours inférieures que celles mesurées. Par conséquent, il est possible d'utiliser le modèle d'élévation aussi longtemps qu'ils sont augmentés de 8 m.

Tableau 3. Hauteur de puits mesurée au moyen d'un DGPS par rapport aux valeurs extraites STRM3

Nom	Hauteur mesurée (m amsl)	Hauteur SRTM3 (m amsl)	Différence (m)
Biliam Oursi	317.24	320	2.76
Loutou	312.01	318	5.99
King King	300.5	308	7.5
Malfana	300.34	302	1.66
Madoubou	307	309	2
Ouldou Borno	300.13	305	4.87
Magao	315.57	319	3.43
Moulkou	320.47	326	5.53
Mandelia	299.76	302	2.24
Delga	298.92	304	5.08
Marao	322.21	323	0.79
Balgam	317.75	319	1.25

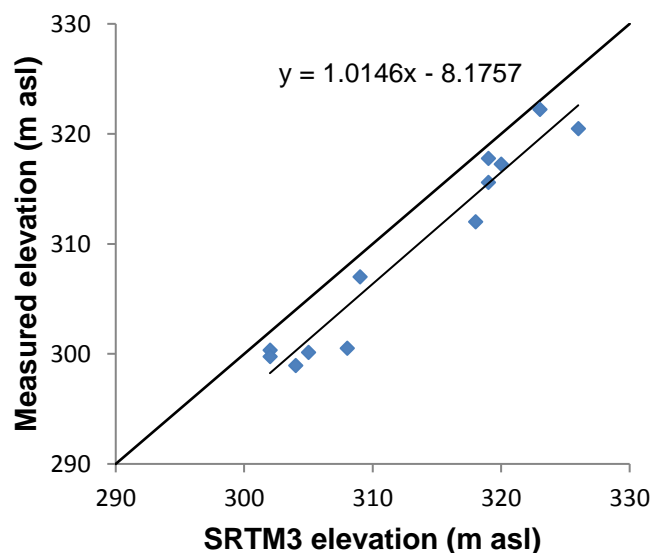


Figure 27. Comparaison entre les hauteurs de puits mesurées avec DGPS et celles extraites du modèle d'élévation global SRTM3

4.3 Type d'aquifère

Des publications rapportent sur l'existence de deux aquifères différents séparés par une couche d'argile qui agit comme un aquitard (Schneider & Wolff, 1992; Ngatcha, 1993). Dans notre zone d'étude, nous avons mesuré les niveaux d'eau dans les puits creusés et les forages séparés par des distances de moins de 1 km (Tableau 4).

Tableau 4. Comparaison de profondeur en eaux souterraines dans les puits creusés et forés localisés à proximité (valeurs double montrent les résultats pour 2013 and 2014)

Location puit	Location forage	Distance (m)	Puit		forage	
			Profondeur (m)	Niveau (m)	Profondeur (m)	Niveau (m)
	Katoa	300	4.3	2.36/3.74	26	2.86
Fadam	Goulmoun Bassi	1000	3.7	2.2/2.5	19	1.72
Koumi	Bougoudang	700	5.4	5.18/4.5	25	5.3
Biliam Oursi	Biliam Oursi Arabe/Biliam Oursi Morbokoye	800	11/12.4	8.77/9.94	29/25	10.1/9.2
Yangalaye	Yangalaye/Birem	1.2km/900	8.6/9	9.4	26/27	10.3/11.4

Les descriptions lithologiques disponibles pour des forages indiquent la présence d'une couche supérieure épaisse d'argile (≥ 10 m) reposant sur des sables ou limons sableux. En raison de la faible profondeur des puits (Tableau 4), leur eau est prélevée à partir de la couche d'argile supérieure. Les forages avec des profondeurs supérieures à 19 m pompent de l'eau à partir des sables sous-jacents. Cependant, les eaux souterraines sont rencontrées à des profondeurs similaires tant pour le puits que le forage. Ainsi, on peut conclure que, dans la zone d'étude l'argile dans la partie supérieure de l'aquifère est en quelque sorte perméable et nous avons affaire à un aquifère libre.

4.4 Niveau des eaux souterraines

Les puits ouverts sont principalement creusés par des nomades pour l'approvisionnement en eau, en particulier pour les bovins. Ils sont constitués de trous ayant un diamètre compris entre 0,5 m et 1 m, et jusqu'à 15 m de profondeur (Figure 28). Cela indique tout d'abord que la plaine inondable est rarement habitée par les villageois, en raison de l'inondation annuelle récurrente.



Figure 28. Puit creusé dans le Yaéré sur la gauche et à Naga sur la droite (Photos Aminu Madadji, 2014)

Au cours de la première mission de terrain, les niveaux d'eau souterraine ont été mesurés dans 52 puits, ainsi que 2 piézomètres au Cameroun, et 34 puits plus 3 piézomètres au Tchad. La seconde campagne de terrain a indiqué 18 puits et 4 piézomètres au Cameroun, en plus de 57 puits et 1 piézomètre au Tchad (voir annexes 1 et 2). Les niveaux d'eau de 33 puits et deux piézomètres ont été mesurés dans les deux campagnes de terrain pour étudier la variation saisonnière (Figure 29).

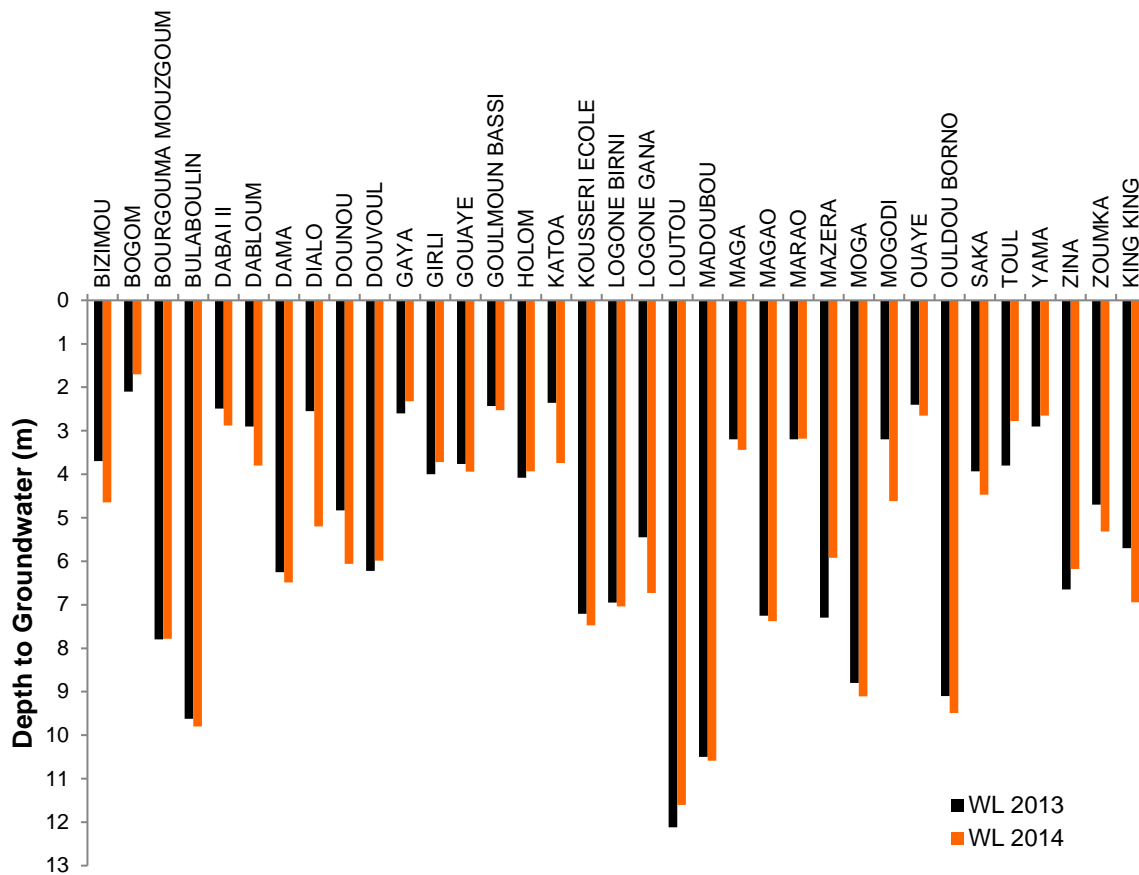


Figure 29. Profondeur des eaux souterraines en 2013 et 2014 pour les 33 puits ouverts et 2 piézomètres

Les différences de profondeur dans les eaux souterraines entre 2013 (colonnes en noir) et 2014 (colonnes en rouge) sont en général très faibles et indiquent un état stationnaire de l'aquifère Quaternaire.

Les puits avec une hausse du niveau d'eau en 2014 par rapport à 2013 sont situés le long du Logone et la rivière Cuolambou, tandis que ceux montrant une baisse sont situés en dehors de la zone inondée de 2013. La baisse pourrait être expliquée par le fait que la zone d'inondation dans 2012, qui a causé la recharge montrée en 2013, était beaucoup plus grande que celle de 2013. Ainsi, les puits montrant hausse ont reçu des recharges pendant les deux périodes d'inondations, mais ceux qui montrent une baisse ont été inondés seulement en 2012 (Figure 30).

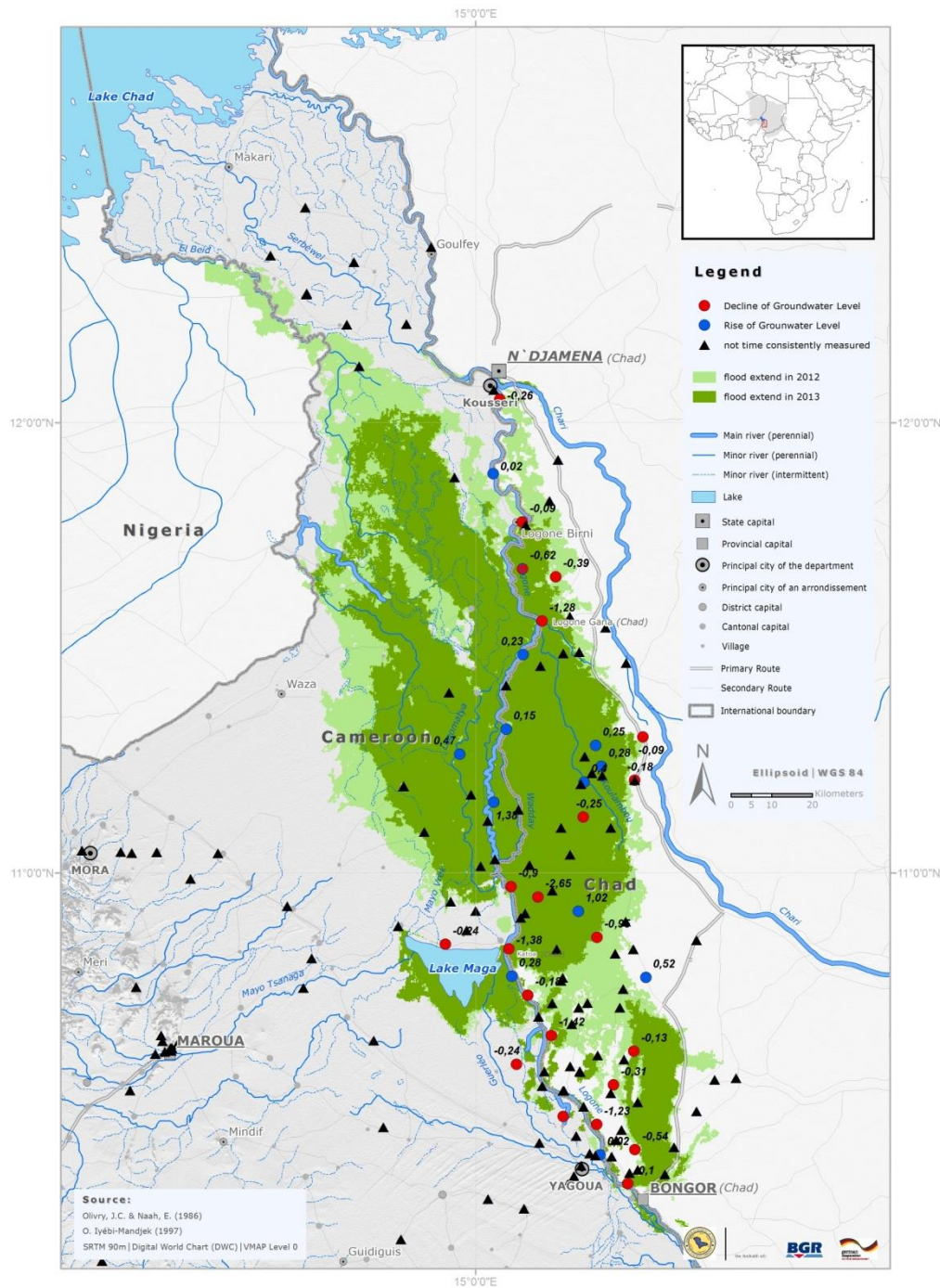


Figure 30. Les changements saisonniers du niveau des eaux souterraines et les zones d'inondation

En supposant une situation stationnaire, la carte des équipotentielles de l'eau a été produite en prenant les mesures des deux campagnes (Figure 31).

Les hauteurs de la nappe phréatique varient de 315 m amsl dans le sud de la zone d'étude à 270 m amsl à proximité du lac Tchad. L'écoulement des eaux souterraines en général est du sud vers le nord le long du fleuve Logone suivant l'inclinaison de surface (Figure 31). Cependant, à Bongor les eaux souterraines coulent vers la plaine Naga dans le nord-est à la suite de recharge directe du débordement de l'eau de la rivière.

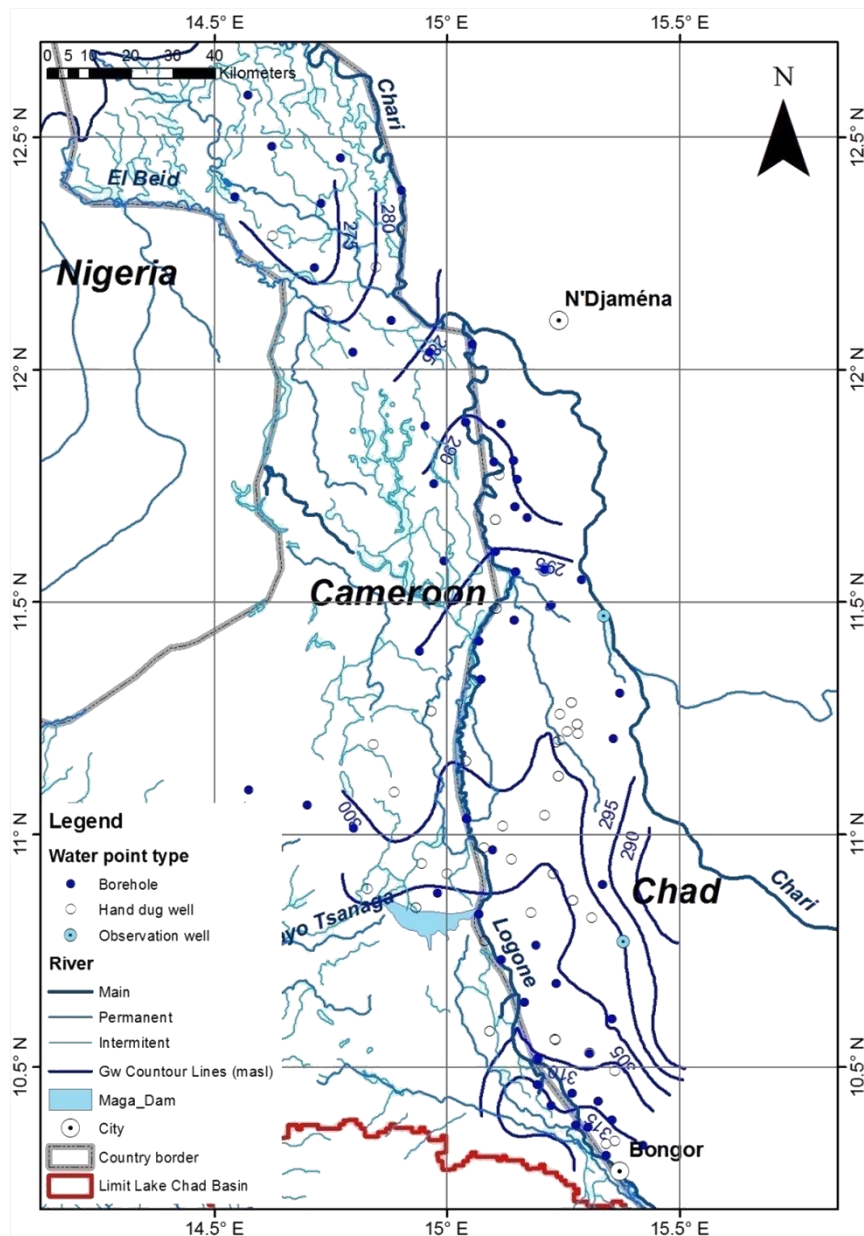


Figure 31. Carte des équipotentielles des eaux souterraines et les points d'échantillonnage dans la zone d'étude

4.5 Hydrogéochimie

Un total de 83 points d'eau ont été prélevés dans la première campagne de terrain (48 forages, 26 puits, 2 piézomètres, et 7 points de l'eau de surface). Les statistiques descriptives comme moyenne, minimum, maximum et écart-type des paramètres analysés, ainsi que les limites proposées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2011) pour certains de ces paramètres sont indiqués dans l'annexe 3. La deuxième campagne de terrain comprenait un total de 70 échantillons (34 forages, 26 puits, 2 piézomètres et 8 points d'eau de surface). Les statistiques descriptives correspondantes, sont présentées à l'annexe 4.

Bien que valeurs élevées de solides totaux dissous (TDS) semblent ne pas avoir un impact sur la santé humaine, il est très facile à déterminer et pourtant souvent utilisé comme un paramètre pour déterminer la minéralisation de l'eau. L'OMS (2011) suggère que l'eau potable ne devrait pas avoir de TDS au-dessus de 1500 mg / l. Dans la zone d'étude, les concentrations de TDS sont toujours inférieures à 1500 mg / l (Figure 32).

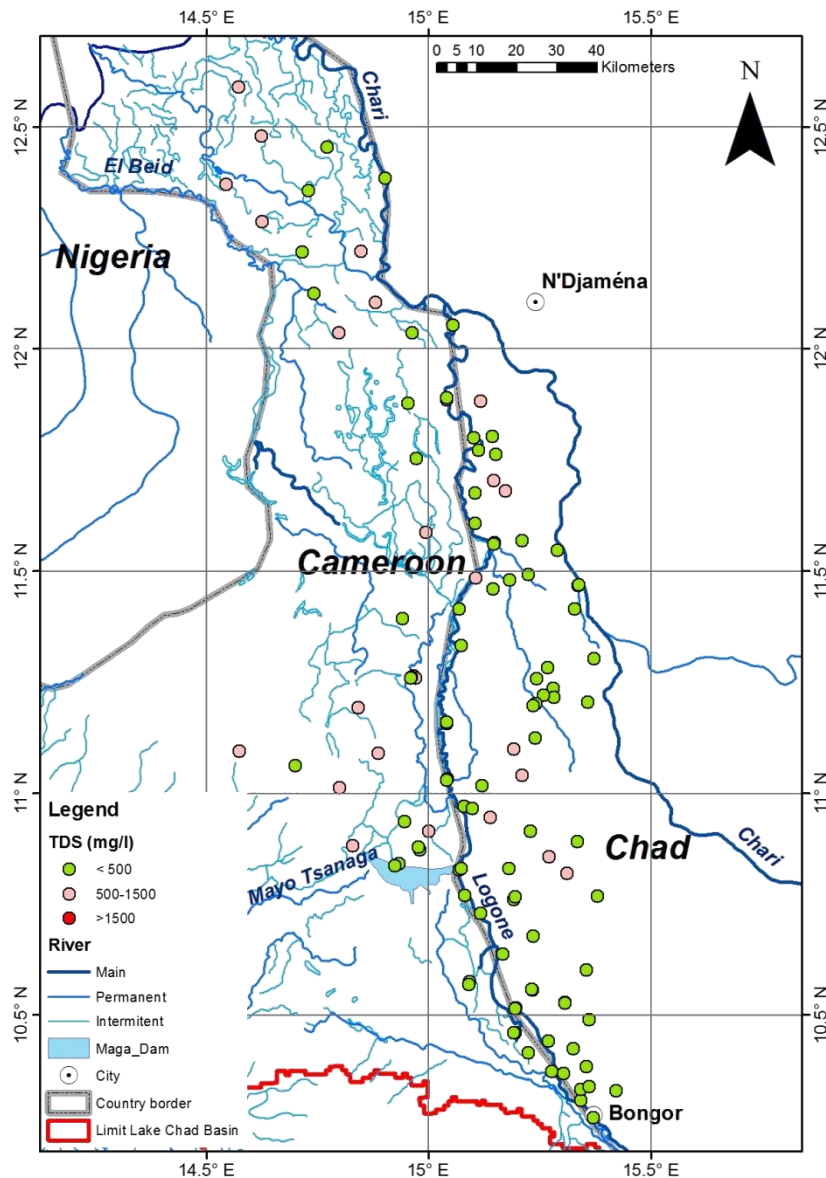


Figure 32. Distribution des valeurs de TDS (in mg/l) dans la zone d'étude

Fer et Manganèse

La présence de fer dans les eaux souterraines est un indicateur des conditions anaérobiques dans l'aquifère. Selon l'OMS (2011), le fer n'est pas dangereux pour la santé humaine. Cependant, si elle est présente à des concentrations élevées, la turbidité et la couleur peuvent se développer dans l'eau la rendant non acceptable. En outre, l'eau contenant du fer conduit souvent à un enrobage des tuyaux.

La distribution des concentrations de fer dans la zone d'étude est représentée sur la Figure 33. Les concentrations les plus élevées sont mesurées dans les environs de Bongor et dans la partie nord de la plaine Naga. En outre, des concentrations élevées apparaissent dans l'extrême nord de la plaine Yaéré au Cameroun.

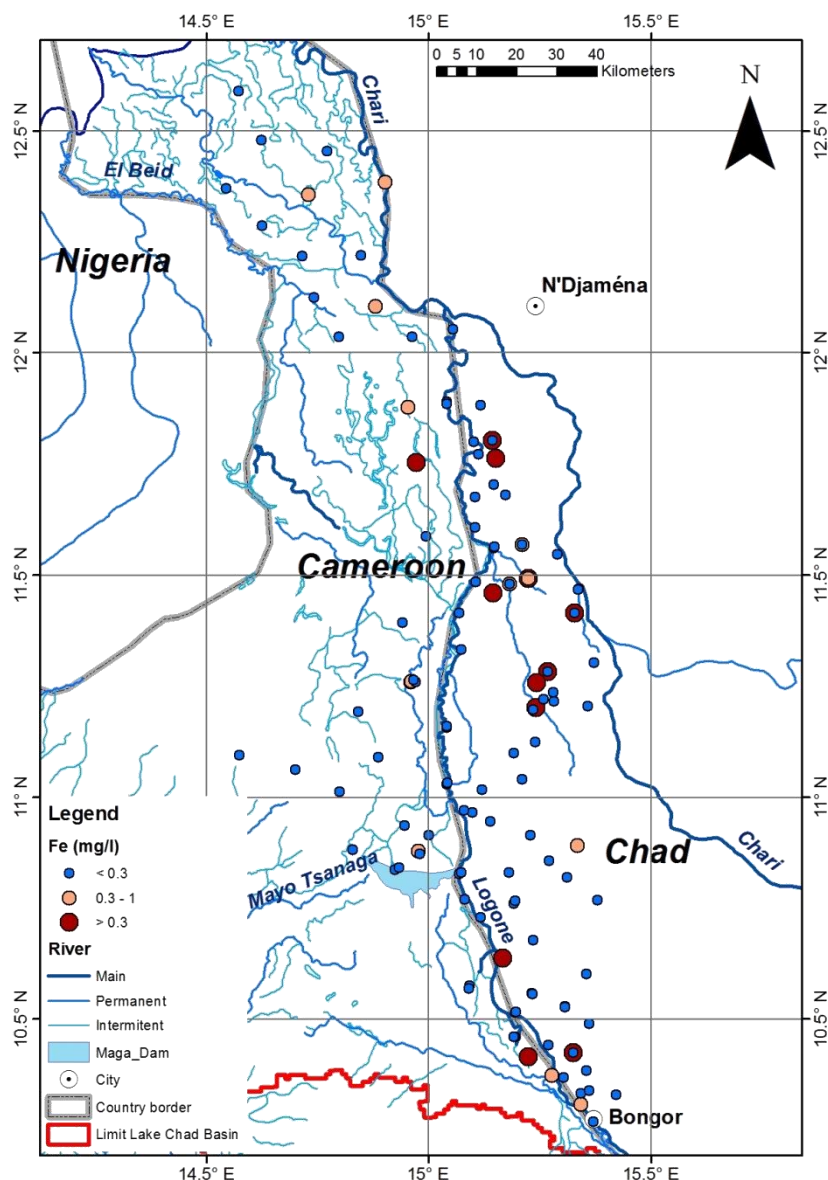


Figure 33. Distribution de concentration de fer (in mg/l) dans la zone d'étude

Le manganèse à des concentrations supérieures à 0,4 mg / l est dangereux pour la santé humaine (OMS, 2011). Cependant, à des concentrations beaucoup plus faibles (0,1 mg / l) eau se devient déjà désagréable. La distribution du manganèse dans la zone d'étude est présentée dans la Figure 34. Les concentrations supérieures à la valeur dangereuse pour la santé de 0,4 mg / l ont été mesurées dans 5 échantillons prélevés au Cameroun et 13 au Tchad. Ces concentrations extrêmement élevées doivent être confirmés par un nouveau prélèvement. Si elles restent élevées, des mesures devraient être prises pour éliminer le manganèse avant de consommer l'eau.

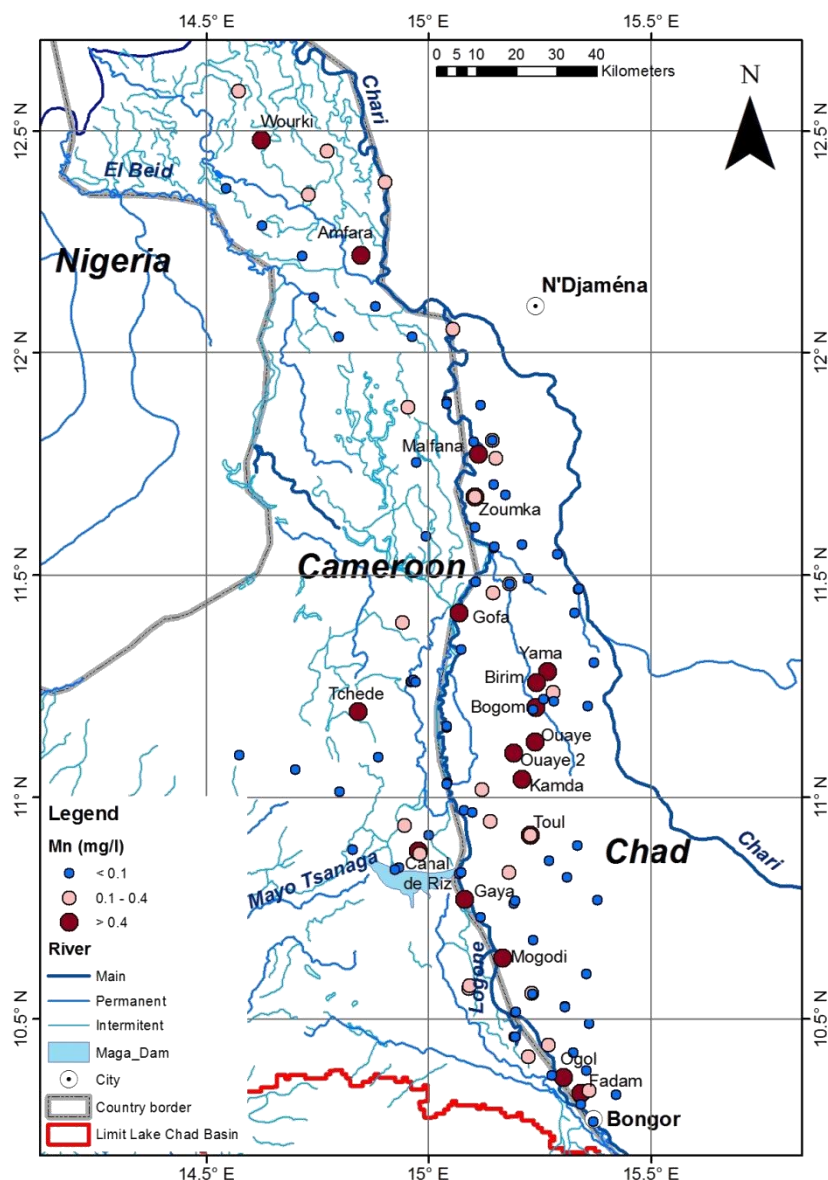


Figure 34. Répartition de la concentration de manganèse (en mg / l) dans la zone d'étude

Considérations générales

En général, les eaux souterraines dans la zone d'étude sont de qualité potable. Cependant, le fer et le manganèse au-dessus de respectives limites recommandées par l'OMS sont très souvent rencontrés. Le nitrate, qui est généralement un indicateur de la pollution d'origine humaine, soit due à des fuites de latrines ou de surutilisation des engrais azotés dans l'agriculture, a été rarement rencontré à des concentrations supérieures à la limite de l'OMS de 50 mg / l. Le fluor, le baryum et le plomb, qui sont d'origine géogénique, sont rarement présents à des concentrations respectives supérieures aux limites de l'OMS. Les problèmes de pollution rencontrés dans la zone d'étude sont résumés dans le Tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5. Pollution rencontrées dans la zone d'étude par rapport aux limites fixées par l'OMS

Paramètres	Première mission (2013)	Deuxième mission (2014)
Fer > 0.3 mg/l (eau désagréable)	14 forages 3 puits 2 eau de surface	10 forages 3 eau de surface
Manganèse > 0.1 mg/l (eau désagréable)	15 forages 12 puits 1 eau de surface	9 forages 16 puits 1 eau de surface
Nitrate > 50 mg/l	1 forage 2 puits	1 puit
Fluor > 0.05 mg/l	2 forages 1 puits	2 forages 1 piézomètre
Baryum > 0.7 mg/l	2 puits	3 puits
Plomb > 0.01 mg/l		1 puits

4.6 Analyse Isotopique

La composition des isotopes environnementaux ^{18}O and ^2H de l'eau est soumise à une modification (processus de fractionnement) par des procédés météorologiques. Dans un environnement particulier, l'eau de recharge a une signature isotopique caractéristique qui sert de traceur naturel pour la provenance des eaux souterraines.

Une molécule d'eau est composée de deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène, généralement écrites en tant que H_2O . En raison d'un nombre différent de neutrons dans le noyau des atomes d'hydrogène et d'oxygène, la molécule d'eau à différents poids atomiques ou masse moléculaire. Par exemple l'eau composée de $^2\text{H}_2^{16}\text{O}$ a une masse de 20 et est plus lourde qu'une molécule d'eau normale de $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ avec une masse de 18.

Dans le cycle hydrologique les gouttes avec les molécules plus lourdes ont tendance à tomber plus tôt pendant les précipitations, alors que lors de l'évaporation, les molécules les plus légères ont tendance à quitter en premier. Ces effets peuvent être utilisés pour définir l'influence de l'évaporation en surface et eaux souterraines. Comme décrit précédemment (Vassolo, 2010) des mesures de rapport absolu des isotopes nécessitent un équipement de spectrométrie de masse sophistiqué. La mesure des valeurs absolues conduirait à des difficultés lors de la comparaison des résultats de différents laboratoires. Par conséquent, les résultats sont exprimés relativement tels que:

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{reference}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{reference}}} \quad \text{Equation 1}$$

Puisque les processus de fractionnement ne révèlent pas d'énormes variations des concentrations isotopiques, les δ valeurs sont exprimées en parties par mille (‰) différences de la référence (Clark & Fritz, 1997):

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{sample}} = \left(\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{reference}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad \text{VSMOW} \quad \text{Equation 2}$$

VSMOW signifie standard moyen de l'eau d'océan, utilisé ici comme référence. Une valeur de $\delta^{18}\text{O}$ positive indique l'enrichissement par $\delta^{18}\text{O}$, par exemple +5‰ signifie qu'il a 5 pour mille ou 0,5% de plus $\delta^{18}\text{O}$ que la référence. La même procédure est valable pour un atome d'hydrogène.

Dans la zone d'étude, il est supposé que la principale source de recharge est la précipitation. La connaissance de sa composition isotopique est essentielle pour analyser les processus de recharge. Dans la base de données Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA), seuls les isotopes pour les précipitations à N'Djaména sont disponibles, donc le projet a mesuré 13 valeurs supplémentaires. La ligne locale de d'eau définie par toutes ces données est présentée dans la figure 35.

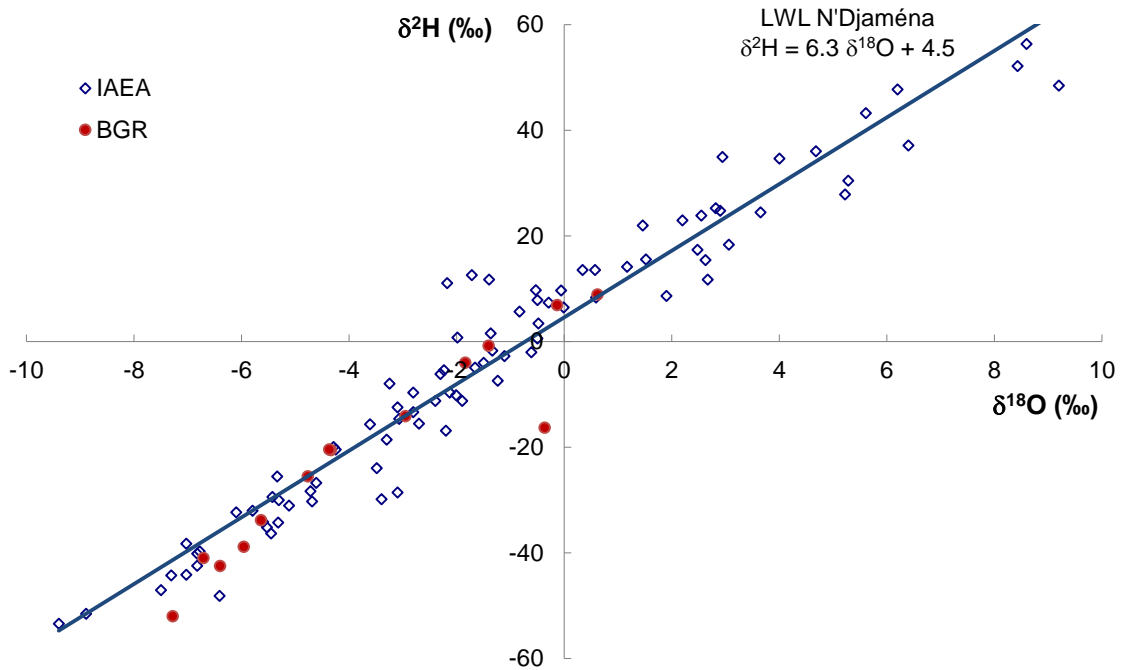


Figure 35. Ligne locale d'eau pour N'Djaména

L'eau de surface sous forme de rivières, canaux et lacs est également une source de recharge dans la zone d'étude. La figure 36 montre la ligne locale produite avec ce genre de données recueillies par le projet. L'eau de surface subit une évaporation qui enrichit sa composition par rapport à l'eau des précipitations. Cet effet mène à une ligne d'eau avec un gradient plus faible (à savoir 4,5 par rapport à 6,3 de l'eau de précipitation).

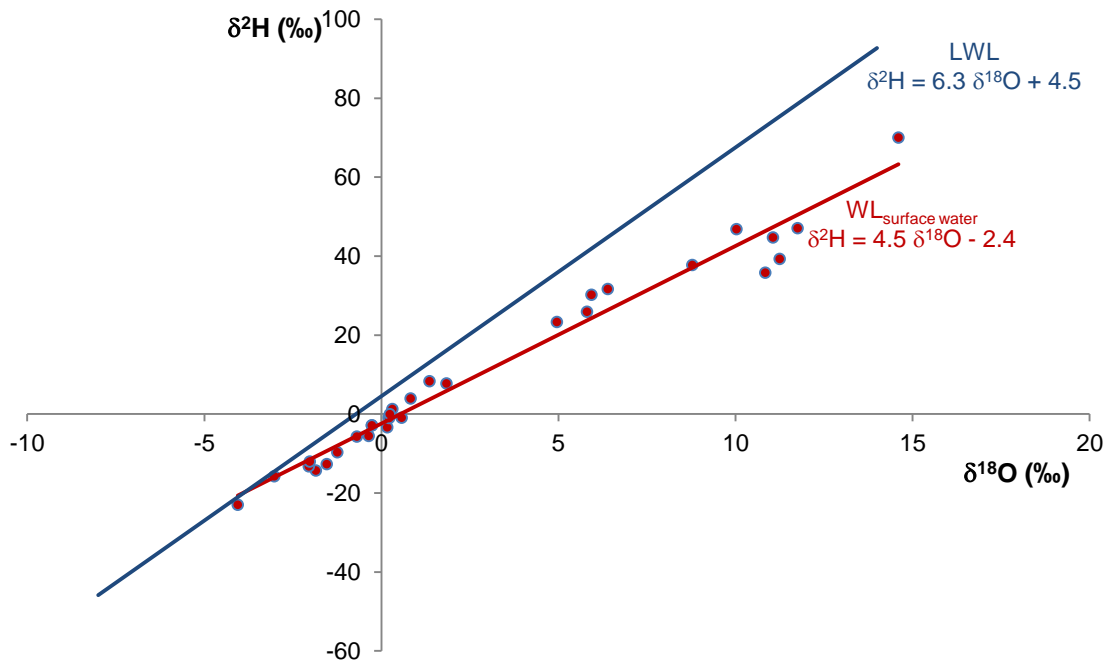


Figure 36. Ligne d'eau définie par les eaux de surface (rivières, canaux, lacs)

Une fois que les lignes d'eau pour les deux sources de recharge sont déterminées, il est possible de déterminer laquelle prévaut par rapport à la ligne d'eau de la nappe phréatique. La ligne d'eau pour les eaux souterraines dans les plaines Naga et Yaéré est dessinée en

utilisant les données isotopiques mesurées pour tous les forages et les puits ouverts correspondants (figure 37).

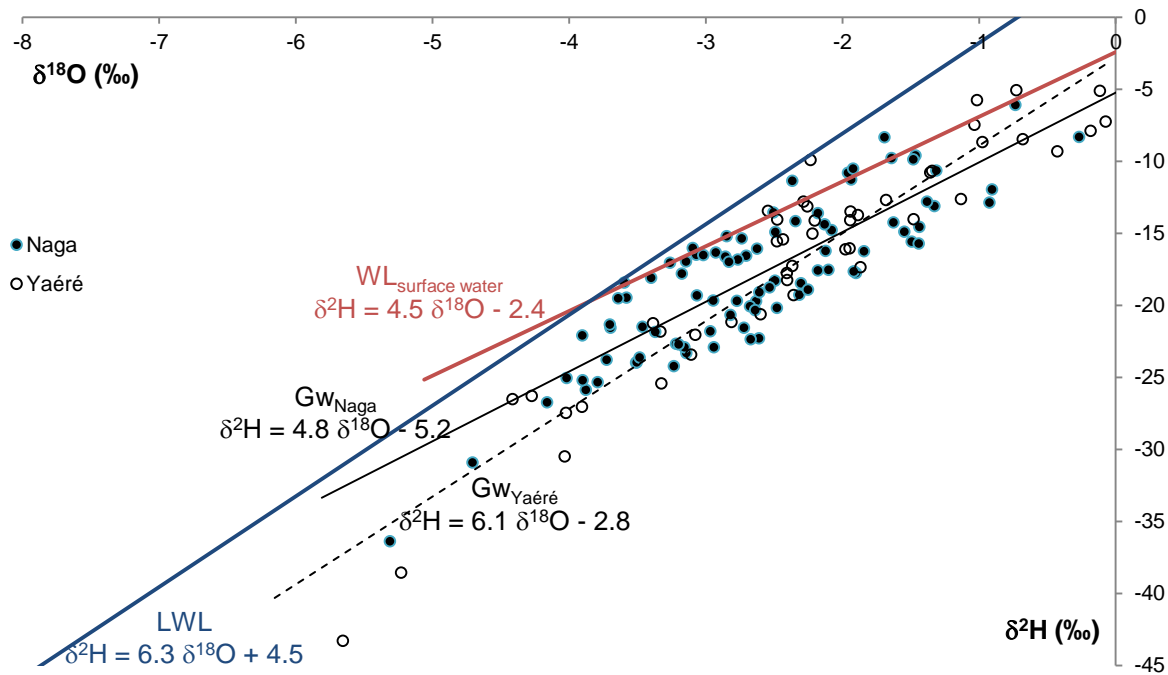


Figure 37. Conduite d'eau pour les eaux souterraines dans les plaines Yaéré et Naga

La figure 37 montre que la ligne d'eau de la nappe phréatique dans le Yaéré a un gradient similaire à celle de précipitation (6,1 contre 6,3). Cela signifie que la précipitation est la principale source de recharge dans la plaine Yaéré.

Dans le cas de la plaine Naga, la pente de la conduite d'eau pour les eaux souterraines a un gradient similaire à celle de l'eau de surface (4,8 contre 4,5). Dans cette plaine, c'est l'eau de surface ou d'inondation qui provoque la recharge.

Après un projet de recherche portant sur l'infiltration de l'eau dans des dépôts sableux en Australie, Allison et al. (1983) ont été en mesure de développer une formule empirique pour calculer le montant annuel de recharge en fonction de la déviation de la ligne des eaux souterraines par rapport à la ligne d'eau de la source de recharge. Les formules pour δ^2H (‰) et $\delta^{18}O$ (‰), respectivement, s'écrivent:

$$\delta^2H = \frac{22}{\sqrt{\text{Recharge} \left(\frac{mm}{a}\right)}} \quad \text{Equation 3}$$

$$\delta^{18}O = \frac{3}{\sqrt{\text{Recharge} \left(\frac{mm}{a}\right)}} \quad \text{Equation 4}$$

Ces formules supposent que les pertes d'eau du sol sont principalement causées par l'évaporation et non pas par l'apport de la végétation, ce qui est le cas dans notre zone d'étude (Herczeg & Leaney, 2010).

En utilisant les équations (3) et (4), le montant total de la recharge annuelle dans chacune des plaines peut être estimé, comme décrit dans les sections ci-dessous.

Recharge dans la plaine Naga

Considérant seulement les forages situés dans la plaine (Figure 38), le tracé de la ligne d'eau pour l'eau souterraine est présenté à la figure 38. Elle résulte parallèle à la ligne de l'eau de surface. Par conséquent, on peut conclure que l'eau des inondations est la principale source de recharge dans la plaine Naga.

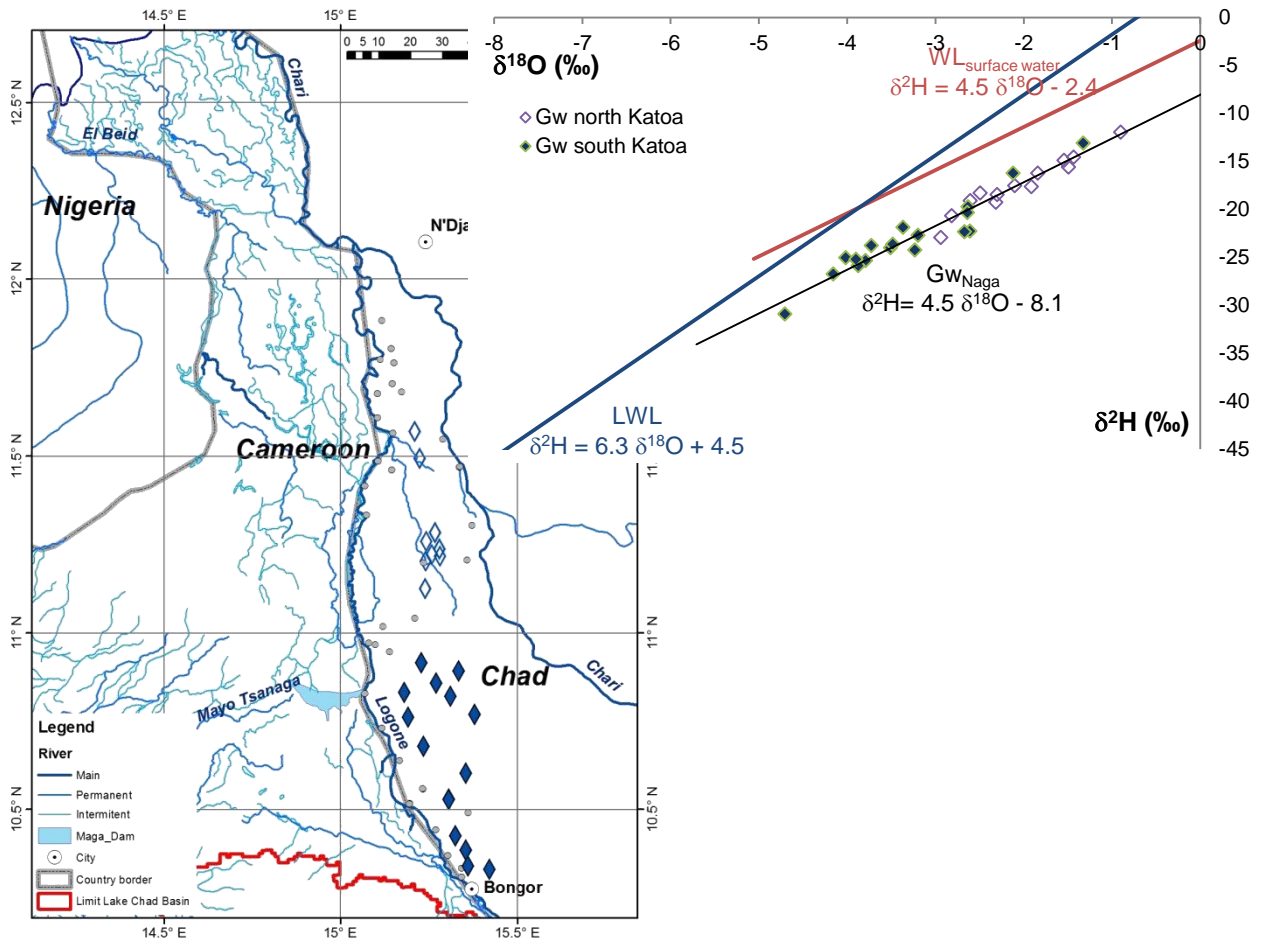


Figure 38. Distribution et ligne d'eau de points d'échantillons dans la plaine Naga. Les diamants ouverts indiquent les points d'échantillonnage dans la partie sud de la plaine, les diamants bleus, ceux dans le nord.

En appliquant les formules d'Allison et al. (1983), la recharge annuelle due à l'eau d'inondation est estimée à 16 mm. La cartographie des zones inondées en utilisant les données MODIS pour la période 2000-2014 estime une superficie minimale de 1.488 km² pour Naga. Par conséquent, la recharge annuelle reçue dans cette plaine est au moins 23,8 km³.

Recharge le long du fleuve Logone

Les isotopes des forages situés le long du fleuve Logone tracent une ligne d'eau qui est presque parallèle à la ligne locale de l'eau des précipitations à N'Djaména (Figure 39). Ces forages ne reçoivent pas une recharge directe de la précipitation, mais à partir de l'eau de la rivière au moment des hautes eaux. À ce moment, les rivières conduisent principalement eau des précipitations.

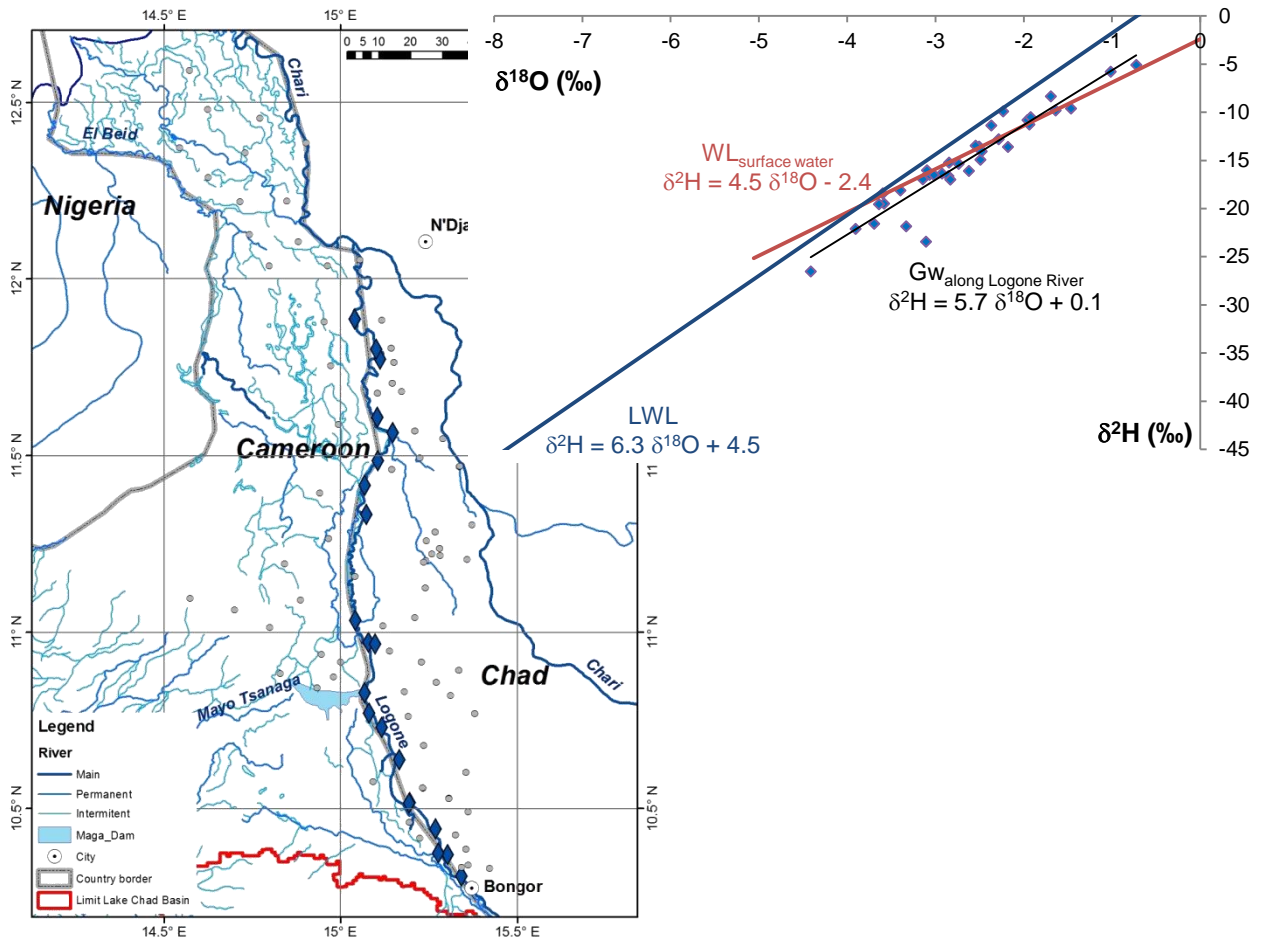


Figure 39. Distribution et ligne d'eau pour les eaux souterraines le long du fleuve Logone

En utilisant les formules d'Allison et al. (1983), la recharge annuelle moyenne de la rivière Logone est estimée à 25 mm / a.

Recharge dans la plaine Yaéré

La même méthode peut être utilisée pour estimer la recharge annuelle moyenne de précipitations qui est produite dans la plaine Yaéré. Les résultats des eaux souterraines dessinent une ligne parallèle à la ligne locale de l'eau des précipitations à N'Djaména (Figure 40). Cela signifie que la recharge dans la plaine Yaéré est causée principalement par les précipitations et non par les inondations. Une raison pourrait être la présence de vertisol, comme expliqué dans la section 2.3. Les fissures ouvertes dans le sol argileux permettent une percolation initiale de l'eau de pluie, mais en raison de l'expansion de l'argile, ces fissures ferment très tôt dans la saison des pluies et rendent le sol imperméable.

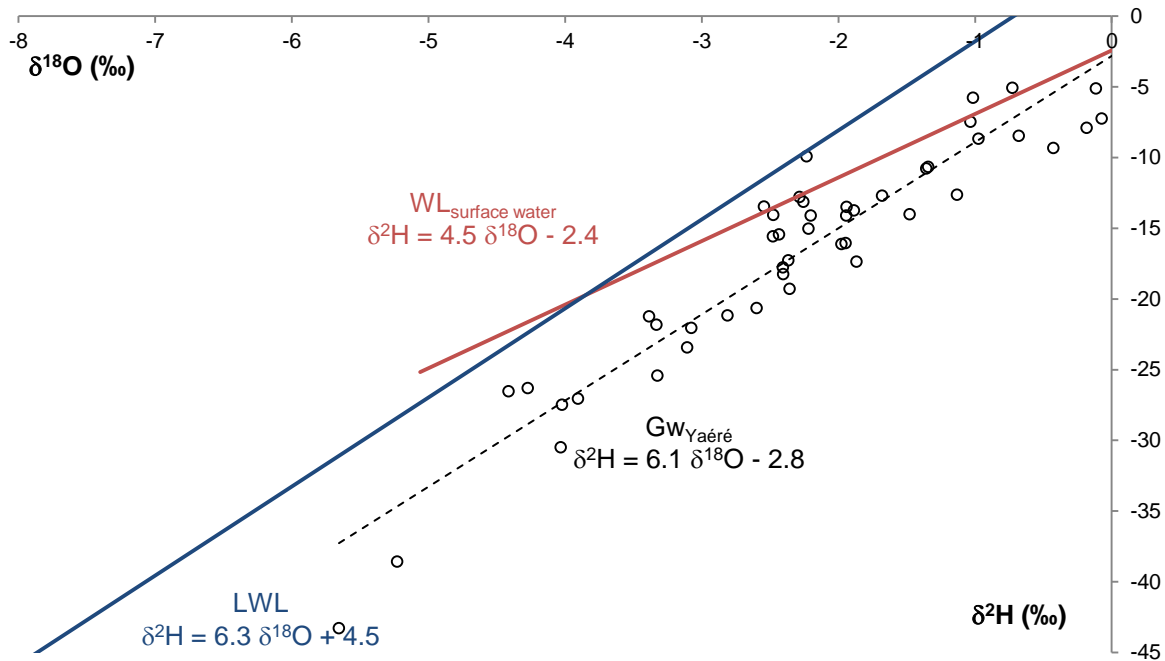


Figure 40. Ligne d'eau pour les eaux souterraines dans la plaine Yaéré

En appliquant les formules d'Allison et al. (1983), la recharge annuelle des précipitations est estimée à 9 mm pour la plaine Yaéré, ce qui est beaucoup moins que dans la plaine Naga. La cartographie des zones inondées en utilisant les données MODIS pour la période 2000-2014 estime une zone inondée minimale de 1.107 km² pour Naga. Par conséquent, la recharge annuelle totale reçue dans cette plaine est au moins 9,96 km³.

Tableau 6 ci-dessous résume les volumes de recharge estimés pour les plaines Naga et Yaéré par rapport au minimum, moyenne et maximale étendues.

Tableau 6. Résumé de recharge dans la zone d'étude

Plaine	Recharge (mm/a)	Etendue minimale (km ²)	Recharge minimale volume (m ³ /a)	Etendue moyenne (km ²)	Volume recharge moyenne (m ³ /a)	Etendue maximale (km ²)	Volume recharge maximale (m ³ /a)
Yaéré	9	1.107	9.963.000	2.979	26.811.000	5.230	47.070.000
Naga	16	1.238	19.808.000	2.308	36.928.000	3.776	60.416.000
Bongor	16	250	4.000.000	433	6.928.000	852	13.632.000
SOMME			33.771.000		70.667.000		121.118.000

En considérant l'eau comme droit humain (Scanlon et al, 2004), l'eau doit être:

- Suffisante: entre 50 l et 100 l par personne et par jour
- Inoffensive: exempte de pollution bactérienne et chimique
- Acceptable en couleur, odeur et goût
- Physiquement accessible: le point d'eau doit être à une distance de moins de 1000 m de la maison
- Abordable: le coût pour un litre d'eau doit être inférieure à 3% du revenu des ménages

Tableau 7 résume le nombre de personnes qui peuvent être approvisionné par chacun des volumes rechargé en supposant qu'une consommation de 50 litres par personne et par jour est suffisante pour la population rurale dans la zone d'étude.

Tableau 7. Résumé du montant de la population qui peut être approvisionnée par chaque volume de recharge

Volume de recharge (m³/a)	Nombre de personnes
Minimum: 33.771.000	1,8 million
Moyenne: 70.667.000	3,8 million
Maximum: 121.118.000	6,6 million

L'eau rechargée est physiquement accessible aux populations locales soit par des forages ou par des puits, qui sont nombreux dans la zone d'étude. Cependant, pour se conformer à la sécurité et l'acceptabilité, les plaines Yaéré et Naga doivent être protégées contre toute forme de pollution, en particulier des engrais pour l'agriculture et les matières fécales des humains et des animaux.

5 Conclusions

La recherche de l'eau souterraine dans les plaines Yaéré et Naga a été menée pour obtenir des informations sur l'origine des eaux souterraines et ses voies d'écoulement, la qualité des eaux souterraines et de surface, ainsi que l'interaction entre l'eau souterraine, le fleuve Logone et sa plaine d'inondation.

Il est possible de délimiter les zones inondées pour chaque année de la période 2000-2014 en prenant les points basse de réflectance des images SWIR. La superposition de toutes les zones calculées permet l'estimation de la superficie inondée maximale (inondé au moins pendant 5% de la série chronologique), zone inondée moyenne (inondés dans 50% des cas), et la zone inondée minimale (inondé dans tous les cas).

En général, les eaux souterraines sont de qualité potable. Cependant, des concentrations élevées de fer et de manganèse sont couramment rencontrés. Bien que le fer ne soit pas dangereux pour la santé, le manganèse apparaît à des concentrations qui sont considérés comme nuisibles. Les eaux souterraines de ces puits ne doivent pas être utilisées directement pour la consommation humaine. Des mesures telles que le mélange de l'eau ou de filtrage doivent être appliquées.

L'eau souterraine est rechargée dans les plaines Yaéré et Naga. L'analyse isotopique montre différentes sources de recharge. Bien qu'il soit principalement les précipitations qui renouvellent les eaux souterraines dans la plaine Yaéré, la recharge dans la plaine Naga est causée par l'eau des inondations.

Bien que les zones minimales inondées pour les deux plaines sont dans la même largeur, une recharge plus abondante a lieu dans la plaine Naga (16 mm / a par rapport à 9 mm / a dans le Yaéré). La recharge la plus élevée à un taux de 25 mm / a lieu le long du fleuve Logone.

6 Recommandations

L'étude a montré qu'une quantité importante d'eau souterraine est renouvelée chaque année à partir de l'eau d'inondation ou de la précipitation dans la région. Il est fortement recommandé que ces plaines soient protégées quantitativement et qualitativement pour se conformer à la sécurité et l'acceptabilité de l'approvisionnement en eau fixé par le droit humain à l'eau.

Protection quantitative

Toute mesure visant à réduire la taille de la zone d'inondation devrait être étudiée consciencieusement avant l'autorisation.

Protection qualitative

L'utilisation d'engrais doit être réduite au minimum et doit être appliqué au début de la période de végétation.

Les latrines doivent être construites sous une forme telle que la pollution des ressources en eau souterraine est évitée.

Des mesures devraient être prises pour éviter la pollution des eaux souterraines par les matières fécales des animaux lors de l'arrosage des animaux.

7 Références

- Allison, F.B.; Barnes, C.J.; Hughes, M.W.; Leaney, F.W. 1983.** Effect of Climate and Vegetation on Oxygen-18 and Deuterium Profiles in Soils. IAEA-SM-270/20. Published in Isotope Hydrology 1983 - Proceedings of a Symposium. IAEA, Vienna, 12-16 September 1983, pp. 105-123.
- Biscaldi, R. 1970.** Carte Hydrogéologique de la plaine du Tchad Nappe Phréatique Echelle: 1/200000 Notice Explicative. Yaoundé : BRGM.
- Boronina, A.; Favreau, G.; Coudrain, A.; Dieulin, C.; Zairi, R. 2005.** Data scarcity in the large semiarid Lake Chad basin: incorporating environmental tracers as a priori information for groundwater modelling. ModelCare 2005, Scheveningen, The Netherlands.
- Brabant, P. and Gavaud, M. 1985.** Les sols et les ressources en terres du Nord Cameroun (province du Nord et de l'Extreme-Nord). Orstrom-Mesres-IRA. 1985, p. 285.
- Clark, I. and Fritz, P. 1997.** Environmental Isotopes in Hydrogeology. Florida, United States : Lewis Publisher.
- Detay, M.; Bernardi, A.; Emsellem, Y.; Pellegrini, G.; Vergnet, M.; Aubrac, G. and Borchellini, S. 1989.** Carte Hydrogéologie - Atlas de la province Extrême-Nord Cameroun. Institut de Recherche pour le Développement; Yaoundé, Cameroun et Ministère de la Recherche Scientifique et Technique, Institut National de Cartographie, Paris.
- Herczeg, A. and Leaney, F.W. 2010.** Review: Environmental tracers in arid zone hydrology. DOI 10.1007/s10040-010-0652-7. Hydrogeology Journal (2011), Vol. 19, No. 1, pp. 17-29.
- Jensen, J. R. 2007.** Remote Sensing of the Environment - An Earth Resource Perspective, Second Edition. Pp. 585.
- Justice, C.O.; Townshend, J.R.G.; Vermote, E.F.; Masouka, E.; Wolfe, R.E.; Saleous, N.; Roy, D.P. and Morisette, J.T. 2002.** An overview of MODIS land data processing and product status. Remote Sensing of Environment, 83, pp. 3-15.
- Lillesand, T.; Kiefer, R.W.; Chipman, J.W. 2008.** Remote Sensing and Image Interpretation, Sixth Edition, International Edition, John Wiley & Sons, p.612, New York.
- Ngatcha, N. 1993.** Hydrogéologie des aquifères complexes en zone semi-aride- Les aquifères quaternaires des Grandes Yaérés (Nord Cameroun). Thèse du Doctorat. présentée à l'Université Joseph Fourier - Grenoble I.
- Ngatcha, N.; Mudry, J.; Aranyossy, J.F.; Naah, E. and Sarrot Reynault, J. 2007.** Apport de la géologie, de l'hydrogéologie et des isotopes de l'environnement à la connaissance des "nappes en creux" du grand Yaéré (nord Cameroun). Revue des Sciences de l'Eau (20) 1. Pp. 29-43.
- Olivry, J.C. 1986.** Fleuves et rivières du Cameroun. coll. Monographies Hydrologiques n°9, 743p. Paris : Mesres-Orstom.
- Sakamoto, T.; Nguyen, N.V.; Kotera, A.; Ohno, H.; Ishitsuka, N.; Yokozawa, M. 2007.** Detecting temporal changes in the extent of annual flooding within the Cambodian and the Vietnamese Mekong Delta from MODIS time-series imagery. Remote Sensing Environment, 109, pp.295-313.
- Sambo, A. 2010.** Les cours d'eau transfrontaliers dans le Bassin du Lac Tchad: Access(2005). , Gestion et Conflits (XIXe – XXe SIECLES); Chapitre IV Exploitation du fleuve Logone, Cooperation et Conflits entre le Cameroun et le Tchad. NGAOUNDERE.
- Scanlon, J.; Cassar, A.; Nemes, N. 2004.** Water as a Human Right? IUCN Environmental Policy and Law Paper No. 51, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. Pp. 53.

- Scholte, P. 2005.** Floodplain Rehabilitation and the Future of Conservation & Development. Tropical Resource Management Paper, ISBN 90-6754-953-3. Also published as thesis (2005) Leiden University, The Netherlands.
- Schneider, J.L. 1969.** Carte Hydrogéologique de la république du Tchad 1/1500000. s.l. : BRGM.
- Schneider, J.L. and Wolff, J.P. 1992.** Carte Géologique et Carte Hydrogéologique 1/1500000 de la république du Tchad Memoire Explicatif Vol. 2. FRANCE : BRGM. N° 209.
- Seeber, K. 2013.** 2nd Discharge Measurements at Chari, Logone and Koulambou River, Chad Report N° 6. Hannover-N'Djamena : BGR-CBLT.
- Torrent, H. 1966.** Carte Hydrogéologique de reconnaissance Bongor 1/500000. s.l. : BRGM.
- Vassolo, S. 2010.** Project Activities - Report N° 3. Hannover, N'Djamena : BGR-CBLT.
- Vassolo, S. 2011.** Einfluss des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung im Tschadseebeckens. Warnsignal Klima, Kap. 3.1.4. Climate Service Center Germany. http://www.hzg.de/science_and_industrie/klimaberatung/csc_web/012841/index_0012841.html
- Vassolo, S. 2012.** Groundwater need Assessment Lake Chad Basin. Hannover : BGR., http://www.splash-era.net/downloads/groundwater/9_LCBC_final_report.pdf
- Vassolo, S. 2012.** Résultats de la première phase du projet CBLT/BGR. Presentation during the BGR-CBLT project planning workshop in November 2012. N'Djamena, CBLT, 2012.
- Vassolo, S. and Daira, D. 2012.** Project Activities - Report N° 4. Hannover-N'Djamena : BGR-CBLT. <http://www.bgr.bund.de/lcbc>
- Vermote, E.F. and Vermeulen, A. 1999.** Atmospheric Correction Algorithm: Spectral Reflectances (MOD09). URL: http://mod09val.ltdri.org/publications/atbd_mod09.pdf
- Water Charter 2010.** Creation and Extension of the Lake Chad Basin Water Charter. Phase 1: Tangible commitment paving the way for the Lake Chad Basin Water Charter - Appendix - Water Usages: Irrigation. LCBC/BRLi.
- Westra, T. & De Wulf, R.R. 2009.** Modelling yearly flooding extent of the Waza-Logone floodplain in Northern Cameroon based on MODIS and rainfall data. International Journal of Remote Sensing. Vol. 30, Nos. 21-22, November 2009, 5527-5548.
- WHO. 2011.** Guidelines for Drinking-water Quality - Fourth Edition. Geneva : World Health Organization.

Annexes

Annexe 1. Liste des points de mesure de niveau piézométrique visités pendant la première mission de terrain (2013)

Type	Village	Pays	Date	X	Y	Profondeur (m)	hauteur de la margelle (m)	profondeur de l'eau (m)	profondeur de l'eau dès la surface du terrain (m)
Puits	Zibou	CAMEROON	04.04.2013	14.17211	10.13696		0	21.8	21.8
Puits	Maroua	CAMEROON	06.04.2013	14.28974	10.59729		0	5	5
Puits	Maroua	CAMEROON	06.04.2013	14.3057	10.62608		0	9.75	9.75
Puits	Maroua	CAMEROON	06.04.2013	14.30303	10.63856		0	10.48	10.48
Puits	Maroua	CAMEROON	06.04.2013	14.31051	10.60208		0	5.8	5.8
Puits	Maroua	CAMEROON	06.04.2013	14.3252	10.60479		0	8.5	8.5
Puits	Maroua	CAMEROON	06.04.2013	14.33855	10.61925		0	9.1	9.1
Puits	Maroua	CAMEROON	06.04.2013	14.32682	10.6107		0	8.45	8.45
Puits	Maroua	CAMEROON	06.04.2013	14.32656	10.61121		0	4.85	4.85
Puits	Maroua	CAMEROON	06.04.2013	14.32329	10.6103		0	6.4	6.4
Puits	Pitoea	CAMEROON	06.04.2013	14.2338	10.51598		0	8	8
Puits	Mora	CAMEROON	07.04.2013	14.12745	11.0495		0	3.75	3.75
Puits	Tchere	CAMEROON	07.04.2013	14.24718	10.74574		0	7.8	7.8
Puits	Kousseri	CAMEROON	08.04.2013	15.04047	12.07283		0	7.8	7.8
Puits	Bogo	CAMEROON	09.04.2013	14.61822	10.74385		0	11.6	11.6
Puits	Bougay	CAMEROON	09.04.2013	15.1074	10.25378		0	30	30
Puits	Danki	CAMEROON	09.04.2013	14.63684	10.80984		0	22	22
Puits	Djaoude	CAMEROON	09.04.2013	14.4288	11.04327		0	10	10
Puits	Djounde	CAMEROON	09.04.2013	14.29332	11.0455		0	18.1	18.1
Puits	Fadare	CAMEROON	09.04.2013	14.5824	10.92553		0	4.8	4.8
Puits	Goleldadi	CAMEROON	09.04.2013	14.23741	11.04349		0	11	11
Puits	Goudoum-Goudoum	CAMEROON	09.04.2013	14.77425	10.62727		0	9.8	9.8
Puits	Kaele	CAMEROON	09.04.2013	14.44991	10.10901		0	7	7
Puits	Kaola	CAMEROON	09.04.2013	15.02782	10.27518		0	35.5	35.5
Puits	Katare	CAMEROON	09.04.2013	14.79588	10.43433		0	36	36
Puits	Mahoula	CAMEROON	09.04.2013	14.2131	11.04593		0	9.7	9.7
Puits	Mangafe Aba Fadi	CAMEROON	09.04.2013	14.36777	10.98672		0	21.8	21.8
Puits	Touloum	CAMEROON	09.04.2013	14.83437	10.18566		0	13.7	13.7
Puits	Yagoua	CAMEROON	09.04.2013	15.23416	10.34911		0	5.3	5.3
Puits	Yagoua	CAMEROON	09.04.2013	15.21863	10.32581		0	15.7	15.7
Puits	Yagoua	CAMEROON	09.04.2013	15.20415	10.30799		0	22.5	22.5
Puits	Dabay 2	CAMEROON	16.05.2013	15.1948	10.45872	4.54	0.34	2.83	2.49
Puits	Dama	CAMEROON	16.05.2013	15.09094	10.57480	7.5	0.2	6.45	6.25
Puits	Gaya	CAMEROON	16.05.2013	15.08067	10.77030	3.88	0.8	3.4	2.6
Puits	Marao	CAMEROON	16.05.2013	15.2760	10.37389	5.12	0.85	4.05	3.2

Type	Village	Pays	Date	X	Y	Profondeur (m)	hauteur de la margelle (m)	profondeur de l'eau (m)	profondeur de l'eau dès la surface du terrain (m)
Puits	Guirvidig	CAMEROON	17.05.2013	14.8288	10.881056	13.8	0.84	12.92	12.08
Puits	Maga	CAMEROON	17.05.2013	14.9333	10.84144	4.5	0.75	3.95	3.2
Puits	Mazra	CAMEROON	17.05.2013	15.04036	11.157306	9.7	0.8	8.1	7.3
Puits	Tchidi	CAMEROON	18.05.2013	14.840417	11.19186	9.32	0.9	8.4	7.5
Puits	Zina	CAMEROON	18.05.2013	14.96525	11.26375	8.95	0.9	7.55	6.65
Puits	Dafen	CAMEROON	19.05.2013	14.886139	11.0905	10	0	9.46	9.46
Puits	Merdé	CAMEROON	22.05.2013	14.95328	11.878306	8.8	0.32	7.85	7.53
Puits	Logone Birni	CAMEROON	22.05.2013	15.10389	11.779917	10.9	0.72	7.67	6.95
Puits	Bourgouma Mouzgoum	CAMEROON	22.05.2013	15.039417	11.886917	8.6	0.65	8.45	7.8
Puits	Tilde Goulfey	CAMEROON	23.05.2013	14.742139	12.125306	20.5	0.7	13.55	12.85
Puits	Amfara	CAMEROON	24.05.2013	14.84675	12.21906	12.8	0.72	11.72	11
Puits	Woulki	CAMEROON	24.05.2013	14.62239	12.47769	28	0.7	25.2	24.5
Puits	Zalat Nawara	CAMEROON	25.05.2013	14.73039	12.356417	15.8	0.68	15.12	14.44
Puits	Al-Alak	CAMEROON	26.05.2013	14.54508	12.370917	15.12	0.82	12.78	11.96
Puits	Ngame 2	CAMEROON	26.05.2013	14.71444	12.217917		0.7	17.53	16.83
Puits	Haran Goulmi	CAMEROON	26.05.2013	14.6255	12.28708	23.5	0.7	20.36	19.66
Puits	Kousseri École	CAMEROON	27.05.2013	15.05417	12.05172	8.7	0.43	7.64	7.21
Piézomètre	Mahe Kotoko	CAMEROON	20.05.2013	14.94125	11.39344	7.93	0.89	6.82	5.93
Piézomètre	Haran Goulmi	CAMEROON	26.05.2013	14.625028	12.284611	73.83	0.55	20.26	19.71
Puits	Goulmoun Bassi	CHAD	09.04.2013	15.33761	10.3095	2.7	0	2.43	2.43
Puits	Saka	CHAD	09.04.2013	15.35356	10.38517	5.46	0	3.93	3.93
Puits	Biliam Oursi	CHAD	10.04.2013	15.232306	10.55672	11	0.43	9.2	8.77
Puits	Dounou	CHAD	10.04.2013	15.269	10.44111	6.2	0	4.83	4.83
Puits	Koumi	CHAD	10.04.2013	15.19658	10.515639		0	5.18	5.18
Puits	Magao	CHAD	10.04.2013	15.35133	10.6037778		0	7.25	7.25
Puits	Moga	CHAD	10.04.2013	15.30611	10.5287222		0	8.8	8.8
Puits	Gouaye	CHAD	11.04.2013	15.116	10.7284444	4.2	0	3.76	3.76
Puits	Katoa	CHAD	11.04.2013	15.07425	10.8309167		0	2.36	2.36
Puits	Mogodi	CHAD	11.04.2013	15.16828	10.6386389	7.06	0.8	4	3.2
Puits	Ourkila	CHAD	11.04.2013	15.21367	10.6636111	4.5	0	4.29	4.29
Puits	Adavouloum	CHAD	12.04.2013	15.0789722	10.9696667	5.5	0	2.9	2.9
Puits	Bizimou	CHAD	12.04.2013	15.2695	10.85675	4	0	3.7	3.7
Puits	Dialo	CHAD	12.04.2013	15.13847	10.9463056	3	0	2.55	2.55
Puits	Toul	CHAD	12.04.2013	15.22789	10.9146389	4.5	0	3.8	3.8
Puits	Bougoumene	CHAD	14.04.2013	15.33389	11.4657778	9.65	0.93	8.75	7.82
Puits	Madoubou	CHAD	14.04.2013	15.37158	11.3019167	12.8	0.74	11.24	10.5
Puits	Mandjour	CHAD	14.04.2013	15.095306	11.1398889	3.95	0	3.5	3.5
Puits	Ouaye	CHAD	14.04.2013	15.23911	11.1239722	3.35	0	2.4	2.4
Puits	Logone Gana	CHAD	15.04.2013	15.14789	11.5596111	8.69	0.8	6.25	5.45

Type	Village	Pays	Date	X	Y	Profondeur (m)	hauteur de la margelle (m)	profondeur de l'eau (m)	profondeur de l'eau dès la surface du terrain (m)
Puits	Bulaboulin	CHAD	29.04.2013	15.35275	11.2056667		0.2	9.62	9.42
Puits	Matasi	CHAD	29.04.2013	15.353139	11.2056944	1.34	0	1.27	1.27
Puits	Bayem	CHAD	30.04.2013	15.25808	11.2210278	3.75	0	3.22	3.22
Puits	Birim	CHAD	30.04.2013	15.24233	11.2583056	4.73	0	4.18	4.18
Puits	Bogom	TCHAD	30.04.2013	15.24075	11.2016111	3.15	0	2.1	2.1
Puits	Girli	TCHAD	30.04.2013	15.2794444	11.2366944	4.35	0	4	4
Puits	Kelemera	TCHAD	30.04.2013	15.281	11.21525	4.15	0	3.73	3.73
Puits	Yama	TCHAD	30.04.2013	15.2667222	11.2831667	3.95	0	2.9	2.9
Puits	Balge	TCHAD	01.05.2013	15.1946667	11.4870833	3.62	0	2.52	2.52
Puits	Douvoul	TCHAD	01.05.2013	15.1058611	11.4846667	8.9	0.78	7	6.22
Puits	Holom	TCHAD	01.05.2013	15.0684444	11.3191944	6.1	0.92	5	4.08
Puits	Zoumka	TCHAD	02.05.2013	15.1041944	11.6755278	4.9	0	4.7	4.7
Puits	Ouldou Borno	TCHAD	02.05.2013	15.1781944	11.658	12.83	0.82	9.92	9.1
Puits	Malfana	TCHAD	03.05.2013	15.1110278	11.7722222	11.7	0.7	8.45	7.75
Piézomètre	Loutou	TCHAD	13.04.2013	15.3780833	10.7679722	85	0.4	12.52	12.12
Piézomètre	King King	TCHAD	15.04.2013	15.2093333	11.5688611	62.3	0.5	6.2	5.7
Piézomètre	Andalawa	TCHAD	19.11.2013	15.1179444	12.2748056	36.5	0.3	25.67	25.37

Annexe 2. Liste des points de mesure de niveau piézométrique visités pendant la deuxième mission de terrain (2014)

Type	Village	Pays	Date	X	Y	Profondeur (m)	hauteur de la margelle (m)	profondeur de l'eau (m)	profondeur de l'eau dès la surface du terrain (m)
Puit	Marao	CAMEROUN	17.05.2014	15.3	10.4	5.12	0.85	4.03	3.18
Puit	Dabai 2	CAMEROUN	17.05.2014	15.2	10.5	4.25	0	2.88	2.88
Puit	Dama	CAMEROUN	17.05.2014	15.09	10.57	7.5	0.2	6.69	6.49
Puit	Gaya	CAMEROUN	17.05.2014	15.08	10.77	3.88	0.8	3.12	2.32
Puit	Fada	CAMEROUN	17.05.2014	15.223	10.415	5.1	0	4.8	4.8
Puit	Balgam	CAMEROUN	17.05.2014	15.148	10.526	4.77	0.95	3.96	3.01
Puit	Maga	CAMEROUN	18.05.2014	14.93	10.84	4.5	0.75	4.19	3.44
Puit	Simato	CAMEROUN	18.05.2014	14.98	10.872	3.2	0.25	1.86	1.61
Puit	Pilmatokoye	CAMEROUN	18.05.2014	14.945	10.936	5.5	0.45	4.65	4.2
Puit	Goulmoun	CAMEROUN	18.05.2014	15	10.915	10.39	0.85	9.19	8.34
Puit	Mazera	CAMEROUN	19.05.2014	15.04	11.16	9.7	0.8	6.72	5.92
Puit	Arainaba	CAMEROUN	19.05.2014	15.043	11.03	5.6	0.85	3.5	2.65
Puit	Zina	CAMEROUN	19.05.2014	14.97	11.26	8.95	0.9	7.08	6.18
Puit	Alvakai 1	CAMEROUN	19.05.2014	15.011	11.0143	8.9	1	5.5	4.5

Puit	Sifna	CAMEROUN	19.05.2014	15.027	11.115	7.75	1	6.37	5.37
Puit	Bourgouma	CAMEROUN	20.05.2014	15	11.9	8.6	0.65	8.43	7.78
Puit	Logone Birni	CAMEROUN	20.05.2014	15.1	11.8	10.9	0.72	7.76	7.04
Puit	Kousseri	CAMEROUN	21.05.2014	15.1	12.1	8.7	0.43	7.9	7.47
Piézomètre	Marao	CAMEROUN	17.05.2014	15.266	10.372	7.2	0.65	5.2	4.55
Piézomètre	Soulla	CAMEROUN	17.05.2014	15.253	10.376	6.67	0.83	4.78	3.95
Piézomètre	Sara-Sara	CAMEROUN	19.05.2014	14.99	11.1736	6.6	1.2	4.38	3.18
Piézomètre	Logone Birni	CAMEROUN	20.05.2014	15.1	11.8	270	0.62	5.1	4.48
Puit	Raona	TCHAD	16.04.2014	15.36	10.34	4.7	0	3.38	3.38
Puit	Fadam	TCHAD	16.04.2014	15.34169	10.33299	3.7	0	2.53	2.53
Puit	Saka	TCHAD	16.04.2014	15.35356	10.385167	5.46	0	4.47	4.47
Puit	Goulmoun Bassi	TCHAD	16.04.2014	15.33761	10.3095	2.7	0	2.53	2.53
Puit	Kayam	TCHAD	17.04.2014	15.36	10.49	3.23	0	3	3
Puit	Yangalaye	TCHAD	17.04.2014	15.3	10.51	9.4	0	9	9
Puit	Dounou	TCHAD	18.04.2014	15.269	10.441111	6.2	0	6.06	6.06
Puit	Biliam Oursi	TCHAD	18.04.2014	15.23099	10.55856	12.4	0.6	10.54	9.94
Puit	Magao	TCHAD	18.04.2014	15.351333	10.603778	11.2	0.65	8.03	7.38
Puit	Moga	TCHAD	18.04.2014	15.306111	10.528722	9.23	0	9.11	9.11
Puit	Pont Morde	TCHAD	18.04.2014	15.27	10.59	4.7	0	4.63	4.63
Puit	Koumi	TCHAD	19.04.2014	15.1943	10.5155	5.41	0.2	4.69	4.49
Puit	Tusor Reve	TCHAD	19.04.2014	15.21	10.57	12.3	0.1	9.37	9.27
Puit	Ourkila	TCHAD	19.04.2014	15.14	10.4	8.24	0	7.9	7.9
Puit	Bedem Toumkou	TCHAD	19.04.2014	15.229	10.7	7.5	0	7	7
Puit	Bedem Sira 1	TCHAD	19.04.2014	15.24795	10.710383		0	8.1	8.1
Puit	Magouaye	TCHAD	19.04.2014	15.53539	11.237139	8.6	0	8.35	8.35
Puit	Mogodi	TCHAD	20.04.2014	15.16828	10.638639	7.1	0.8	5.42	4.62
Puit	Gouaye	TCHAD	20.04.2014	15.116	10.728444	5.7	0.45	4.39	3.94
Puit	Malam	TCHAD	20.04.2014	15.19	10.76	4.75		4.07	4.07
Puit	Wayanga	TCHAD	20.04.2014	15.15	10.55	6.57	0	5.6	5.6
Puit	Djindjoroum	TCHAD	20.04.2014	15.14	10.68	4.4	0	4.1	4.1
Puit	Oulouk	TCHAD	20.04.2014	15.17	10.71	3.54	0	3.32	3.32
Puit	Djarabou	TCHAD	22.04.2014	15.42	10.33	4.26		3.55	3.55
Puit	Bariam	TCHAD	22.04.2014	15.44	10.39	10.3	0.7	9	8.3
Puit	Doulboun	TCHAD	22.04.2014	15.49	10.47			20.9	20.9
Puit	Sanan	TCHAD	22.04.2014	15.53	10.54	>2	0.6	39	38.4
Puit	Moulkou	TCHAD	22.04.2014	15.57	10.54	20.32	0.7	14.82	14.12
Puit	Lebon	TCHAD	23.04.2014	15.12	11.017	4.15	0.45	2.93	2.48
Puit	Dialo	TCHAD	23.04.2014	15.138	10.946	6.7	0	5.2	5.2
Puit	Toul	TCHAD	23.04.2014	15.228	10.915	2.93	0	2.78	2.78
Puit	Adavouloum	TCHAD	23.04.2014	15.078972	10.96967	4.4	0	3.8	3.8
Puit	Makaroua	TCHAD	23.04.2014	15.11	10.91	4.81	0	3.4	3.4
Puit	Mirbidim	TCHAD	23.04.2014	15.1	10.9	4.9	0	3.5	3.5
Puit	Moulfoun	TCHAD	23.04.2014	15.17	10.96	2.5		2.3	2.3

Puit	Dewele	TCHAD	24.04.2014	15.18	10.83	4.4	0	3.42	3.42
Puit	Mbissi	TCHAD	24.04.2014	15.31	10.82	7.15	0	6.9	6.9
Puit	Bizimou	TCHAD	24.04.2014	15.193269	10.766639	4.75	0	4.23	4.23
Puit	Katoa	TCHAD	24.04.2014	15.07425	10.830917	4.3	0	3.74	3.74
Puit	Kamda	TCHAD	25.04.2014	15.21	11.04	4.1	0	2.78	2.78
Puit	Guiào 1	TCHAD	25.04.2014	15.35	10.83		0.55	11.98	11.43
Puit	Dabla Foulbe	TCHAD	25.04.2014	15.49	10.85		0	33.75	33.75
Puit	Yama	TCHAD	26.04.2014	15.266722	11.283167	3.95	0	2.65	2.65
Puit	Ouaye	TCHAD	26.04.2014	15.239111	11.123972	3.35	0	2.65	2.65
Puit	Ouaye 2	TCHAD	26.04.2014	15.19	11.1	4.1	0	4	4
Puit	Madoubou/Gambarou	TCHAD	26.04.2014	15.371583	11.301917	12.8	0.74	11.33	10.59
Puit	Abraya	TCHAD	26.04.2014	15.3	11.1	5.41	0	5.25	5.25
Puit	Girli	TCHAD	27.04.2014	15.279444	11.236694	4.35	0	3.72	3.72
Puit	Bougoum	TCHAD	27.04.2014	15.23363	11.19688	3.2	0	2.65	2.65
Puit	Bogom	TCHAD	27.04.2014	15.24075	11.201611	3.14	0	1.7	1.7
Puit	Matasi	TCHAD	27.04.2014	15.35275	11.205667	10.61	0.4	10.2	9.8
Puit	Douvoul	TCHAD	28.04.2014	15.1058611	11.484667	8.9	0.78	6.77	5.99
Puit	Holom	TCHAD	28.04.2014	15.068444	11.319194	5.84	0.92	4.85	3.93
Puit	Logone Gana	TCHAD	29.04.2014	15.147889	11.559611			6.73	6.73
Puit	Bougdang	TCHAD		15.24	10.48	4.9	0	4.35	4.35
Puit	Magalle	TCHAD		15.32	10.7	8.6	0	8.35	8.35
Puit	Maladoum	TCHAD		15.23	11.49	6.14		5.94	5.94
Piézomètre	Loutou	TCHAD	25.04.2014	15.378083	10.767972	85	0.4	12	11.6

Annexe 3. Statistiques des paramètres chimiques mesurés dans les forages, puits, piézomètres, et eau de surface pour la première mission de terrain (2013)

Paramètre	Unité	Limite WHO	forage				puits				piézomètre				eau de surface			
			moyenne	min	max	sd	moyenne	min	max	sd	moyenne	min	max	sd	moyenne	min	max	sd
EC	µS/cm		352	55	1319	293	444	69	1898	348	331	270	391	86	160	64	307	98
TDS	mg/l	1500	401	110	1118	250	453	117	1498	275	472	384	559	124	178	86	330	95
T	°C		30.6	27.9	32.6	1.1	29.8	27.3	32.7	1.4	31.5	30.6	32.3	1.2	29.0	24.1	33.1	2.7
pH	-		7.1	6.4	7.9	0.4	6.9	5.4	7.9	0.5	7.8	7.7	8.0	0.2	7.7	7.2	8.2	0.3
K ⁺	mg/l		6.3	1.2	47.9	9.3	11.8	0.9	101.0	23.2	5.0	3.9	6.0	1.5	5.9	2.2	10.8	3.5
Na ⁺	mg/l		31.0	4.4	199.0	41.3	33.3	5.4	270.0	52.1	20.1	14.1	26.0	8.4	11.6	3.5	29.5	9.9
Mg ²⁺	mg/l		7.6	1.2	32.2	6.2	9.4	0.5	23.7	6.0	12.6	7.6	17.7	7.2	4.7	2.3	9.4	2.7
Ca ²⁺	mg/l		28.9	3.0	121.0	22.8	40.1	2.2	101.0	25.3	40.8	23.4	58.2	24.6	12.1	5.0	25.3	7.7
Cl ⁻	mg/l		4.5	0.1	70.6	12.8	6.8	0.3	80.4	16.0	0.6	0.4	0.8	0.3	1.0	0.3	2.1	0.6
SO ₄ ²⁻	mg/l	500	17.7	0.02	383	60.0	20.1	0.01	448	87.4	0.6	0.1	1.1	0.7	0.1	0.01	0.2	0.1
HCO ₃ ⁻	mg/l		190.2	33.4	650.0	132.5	235.9	22.2	505.0	127.3	243.5	176.0	311.0	95.5	97.6	37.5	193.0	62.0
NO ₃ ⁻	mg/l	50	3.1	0.0	55.7	9.1	9.0	0.01	101	23.7	0.3	0.1	0.4	0.2	0.2	0.02	0.8	0.3
NH ₄	mg/l		0.17	d.l.	0.83	0.19	0.13	d.l.	1.09	0.24	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	0.15	0.01	0.57	0.19
NO ₂ ⁻	mg/l	3	0.07	d.l.	0.69	0.15	0.17	d.l.	1.42	0.31	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	0.81	0.00	1.84	0.94
PO ₄ ²⁻	mg/l		0.32	d.l.	5.80	0.90	0.55	d.l.	7.84	1.57	0.20	0.19	0.21	0.01	0.09	0.03	0.15	0.04
F ⁻	mg/l	1.5	0.43	0.06	1.94	0.39	0.52	0.07	1.54	0.34	0.38	0.30	0.45	0.11	0.37	0.11	0.86	0.28
Fe(II)	mg/l	0.3	0.62	0.00	10.70	1.73	0.44	0.01	6.81	1.38	0.14	0.03	0.25	0.16	0.21	0.09	0.43	0.14
Al ²⁺	mg/l	0.9	0.01	d.l.	0.03	0.00	0.06	d.l.	0.60	0.13	0.00	d.l.	0.00	-	0.12	0.03	0.26	0.08
Mn	mg/l		0.13	0.00	1.61	0.28	0.29	0.01	1.15	0.37	0.05	0.00	0.09	0.06	0.03	0.00	0.14	0.05
Cu	mg/l	0.2	0.027	d.l.	0.078	0.018	0.031	d.l.	0.053	0.019	0.052	0.040	0.063	0.016	0.036	0.030	0.044	0.006
Br ⁻	mg/l		0.035	d.l.	0.399	0.072	0.036	d.l.	0.414	0.081	0.007	0.005	0.008	0.002	0.005	0.004	0.005	0.001
Sr	mg/l		0.297	0.043	1.140	0.228	0.431	0.032	1.030	0.297	0.375	0.200	0.550	0.247	0.145	0.069	0.290	0.085
Ni	mg/l	0.07	0.003	d.l.	0.003	-	0.004	d.l.	0.004	0.004	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Pb	mg/l	0.01	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Ba	mg/l	0.7	0.18	0.02	0.52	0.10	0.33	0.03	0.90	0.23	0.24	0.20	0.28	0.06	0.11	0.05	0.21	0.06
Zn	mg/l		0.11	0.01	0.54	0.10	0.01	d.l.	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
SiO ₂	mg/l		68.9	29.3	106.0	22.0	52.7	31.3	96.7	17.9	92.2	90.5	93.9	2.4	26.9	21.3	40.8	8.1
BO ₂	mg/l		0.05	d.l.	0.20	0.03	0.04	0.01	0.06	0.02	0.06	0.05	0.06	0.01	0.04	0.02	0.09	0.02
Co	mg/l		0.01	d.l.	0.01	0.00	0.01	d.l.	0.01	-	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.

Note: sd: écart type
d.l.: limite de détection
'-': une seule valeur au-dessus de la limite de détection
Valeurs en gras: concentration au-dessus de la concentration limite de l'OMS

Annexe 4. Statistiques des paramètres chimiques mesurés dans les forages, puits, piézomètres, et eau de surface pour la deuxième mission de terrain (2014)

Paramètre	Unité	Limite OMS	forage				Puit				piézomètre				Eau de surface			
			moyenne	min	max	sd	moyenne	min	max	sd	moyenne	min	max	sd	moyenne	min	max	sd
EC	µS/cm		240	60	586	138	398	77	1284	246	315	283	346	45	164	59	296	97
TDS	mg/l	1500	270	91	585	129	392	112	1086	209	248	163	333	120	152	70	298	84
T	°C		30.5	28.4	32.4	1.0	29.1	25.5	32.0	1.6	31.7	30.4	32.9	1.8	30.0	26.2	33.6	2.5
pH	-		7.1	6.1	8.2	0.5	7.1	6.2	7.9	0.4	8.8	7.1	10.4	2.3	7.8	7.2	8.8	0.6
K ⁺	mg/l		5.2	1.4	52.6	2.0	16.4	1.4	231.0	47.5	4.1	4.0	4.1	0.1	4.8	2.4	10.8	3.1
Na ⁺	mg/l		18.1	4.1	76.8	16.6	20.4	6.2	63.7	12.3	41.1	24.1	58.0	24.0	13.1	3.6	23.3	8.6
Mg ²⁺	mg/l		6.1	1.4	16.2	3.7	10.7	1.2	27.6	7.3	3.8	0.0	7.7	5.4	4.3	2.1	9.2	2.6
Ca ²⁺	mg/l		22.3	3.6	57.1	13.7	41.6	5.0	104.0	23.9	13.3	0.7	25.8	17.7	10.8	3.8	27.1	8.4
Cl ⁻	mg/l		1.1	0.1	10.5	1.9	4.3	0.4	50.2	9.7	6.4	0.9	11.9	7.8	1.5	0.4	6.8	2.2
SO ₄ ²⁻	mg/l	500	3.0	0.01	38.8	8.4	2.5	0.04	40.4	7.8	1.0	0.8	1.3	0.3	0.2	0.02	0.4	0.1
HCO ₃ ⁻	mg/l		145.1	35.0	353.8	86.2	234.5	35.8	441.0	117.1	103.1	30.0	176.1	103.3	90.9	33.9	185.0	59.3
NO ₃ ⁻	mg/l	50	1.4	d.l.	12.1	3.1	8.1	d.l.	164	32.5	0.7	0.6	0.8	0.2	0.3	0.02	1.4	0.4
NH ₄	mg/l		0.13	d.l.	0.98	0.22	0.10	d.l.	0.33	0.11	0.94	d.l.	0.94	-	0.06	0.01	0.15	0.06
NO ₂	mg/l	3	0.01	d.l.	0.04	0.01	0.02	d.l.	0.13	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	d.l.	0.01	0.00
PO ₄ ²⁻	mg/l		0.17	d.l.	0.83	0.20	0.26	d.l.	1.62	0.33	0.26	0.24	0.27	0.02	0.26	0.06	0.93	0.28
F ⁻	mg/l	1.5	0.49	0.07	1.87	0.38	0.53	0.04	1.44	0.34	1.04	0.46	1.62	0.82	0.38	0.11	0.73	0.26
Fe(II)	mg/l	0.3	0.84	0.01	12.20	2.25	0.08	0.01	0.25	0.08	0.04	0.01	0.06	0.03	0.55	0.04	2.82	0.93
Al ²⁺	mg/l	0.9	0.01	d.l.	0.12	0.02	0.03	0.01	0.14	0.03	0.02	0.01	0.03	0.01	0.09	0.01	0.18	0.06
Mn	mg/l		0.14	0.00	1.73	0.33	0.31	0.01	1.33	0.36	0.00	0.00	0.01	0.00	0.07	0.00	0.45	0.15
Cu	mg/l	0.2	0.005	d.l.	0.007	0.002	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Br ⁻	mg/l		0.007	d.l.	0.036	0.007	0.015	d.l.	0.125	0.026	0.022	0.006	0.037	0.022	0.004	d.l.	0.007	0.002
Sr	mg/l		0.237	0.050	0.588	0.160	0.484	0.055	1.180	0.323	0.112	0.010	0.214	0.144	0.139	0.056	0.287	0.090
Ni	mg/l	0.07	0.01	d.l.	0.02	0.01	0.01	d.l.	0.01	'-	0.01	d.l.	0.01	-	0.00	d.l.	0.00	-
Pb	mg/l	0.01	0.00	d.l.	0.00	-	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	0.04	d.l.	0.04	-	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Ba	mg/l	0.7	0.17	0.05	0.36	0.09	0.43	0.11	1.27	0.25	0.20	0.11	0.28	0.13	0.14	0.05	0.22	0.07
Zn	mg/l		0.13	0.01	1.73	0.30	0.05	0.01	0.24	0.06	0.07	0.01	0.14	0.10	0.05	0.01	0.21	0.06
SiO ₂	mg/l		66.3	30.7	98.4	19.6	51.9	18.2	107.0	20.3	45.8	0.3	91.3	64.3	24.5	18.3	42.1	7.4
BO ₂	mg/l		0.02	d.l.	0.06	0.02	0.05	d.l.	0.11	0.03	0.10	d.l.	0.10	-	0.07	d.l.	0.28	0.09
Co	mg/l		0.00	d.l.	0.01	0.00	0.01	d.l.	0.01	0.00	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.

Note: sd: écart type
d.l.: limite de détection
'-': une seule valeur au-dessus de la limite de détection
Valeurs en gras: concentrations au-dessus de la concentration limite de l'OMS