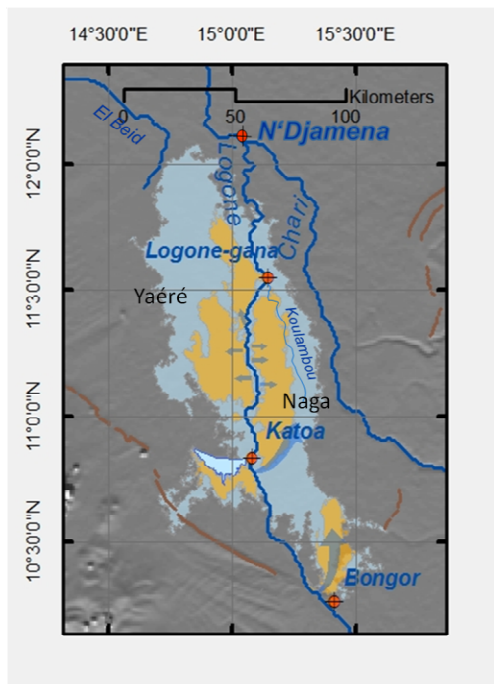


Bassin du Lac Tchad : Gestion Durable des Ressources en Eaux

Études de la qualité des eaux souterraines dans la plaine d'inondation du Logone inférieur en avril – mai 2013



Hanovre, mars 2014

Rapport N° 7



Au nom de:

Auteurs: Kristin Seeber, Djoret Daïra, Aminu Magaji Bala et Sara Vassolo

Financé 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 lien: B4.1/B80123-09/2013-0005 Rapports Techniques

Date: mars 2014

Table des Matières

Sommaire.....	7
1 Introduction	9
2 Zone d'Étude.....	10
2.1 Climat	10
2.2 Hydrologie.....	11
2.3 Cartographie des Inondations avec Méthodes SIG	15
2.4 Sol, Végétation et Agriculture.....	18
2.5 Milieu Géologique	20
2.6 Milieu Hydrogéologique.....	20
3 Méthodologie.....	22
4 Résultats et Discussion	24
4.1 Hydro-Isohyse des Eaux Souterraines	24
4.2 Hydrogéochimie	26
4.2.1 Matières Dissoutes Totales	26
4.2.2 Diagramme de Piper.....	26
4.2.3 pH	28
4.2.4 Fluorure	29
4.2.5 Nitrate.....	30
4.2.6 Sulfate	31
4.2.7 Baryum.....	31
4.2.8 Aptitude à l'Irrigation	31
4.3 Analyse Isotopique.....	35
5 Conclusion et Recommandations	40
Références.....	42
Annexes	44

Table des Figures

Figure 1 Modèle numérique du terrain du Bassin du Lac Tchad, compilé à partir des données SRTM30 (Vassolo, 2012)	10
Figure 2 Zone d'étude, zone d'inondation du fleuve inférieur Logone, modifiée après (Vassolo, 2012). Les points rouges indiquent les stations de jaugeage	10
Figure 3 La répartition des précipitations dans la zone d'étude. Les lignes vertes sont des isohyètes à long terme pour la période 1973-2007 (Source: Base de données de la CBLT).	11
Figure 4 Carte Hydrologique de la zone d'étude (Source : Olivry, J.C. & Naah, E. (1986), O. Iyébi-Mandjek (1997) et modifiée par Wilzcok, Ch. 2014).....	12
Figure 5 Valeurs du Débit à Bongor et Logone Gana pour la période 2002-2008 (Source : DREM)	13
Figure 6 Ecoulement dans les plaines de Yaéré et du Naga par rapport au débit à Bongor .	14
Figure 7 Ecoulement dans les plaines du Yaéré et du Naga, débit relatif à Katoa	14
Figure 8 Débit moyen journalier pour le fleuve Logone à Bongor pour différentes périodes..	15
Figure 9 Variation des plaines de Yaéré et du Naga pour 2011 (gauche) et 2012 (droite) (Geerken et al., 2012).....	16
Figure 10 Les images diurnes satellites MODIS de la température maximale de la surface terrestre (TST) montrant la plus haute étendue de la zone d'inondation en novembre 2011 (à gauche) et en novembre 2012 (à droite).....	16
Figure 12 Paysage marécageux dans la plaine d'inondation de Naga près de Logone Gana (11,55 °N 15,19 ° E) (Photo: Aminu Magadji, CBLT Nov. 2013)	18
Figure 13 Plaine de Naga herbeuse près de Yama (~11,20°N 15,20°E) pendant la saison sèche (Photo: Djoret Daïra, CBLT Avril 2013)	18
Figure 11 La plaine de Naga près de Dialo (~10,9°N 15,1°E) pendant la saison sèche. Sols à partir de fissure de retrait (Photo: Djoret Daïra, CBLT Avril 2013)	18
Figure 14 Elevage à la rivière Loumia (tributaire dans la plaine de Naga 11,40°N 15,30°E) (Photo: Djoret Daïra, CBLT Avril 2013).....	19
Figure 15 Jardin à Saka, Tchad (10,38°N 15,35°E) (Photo: Djoret Daïra, CBLT Avril 2013).	19
Figure 16 Canal à poisson construit pendant la saison sèche, près de Dialo, Tchad (~10,90°N 15,10°E) (Photo: Djoret Daïra, CBLT Avril 2013)	19
Figure 17 Carte des lieux des échantillons et les types de puits	22
Figure 18 Enregistrement du niveau de l'eau dans un piézomètre, King King, Tchad (11,50°N 15,20°E) (Photo: Djoret Daïra, CBLT avril 2013)	23
Figure 19 Pompage par une cellule et l'application de la WTW-Multi 3430 à Woulki, Cameroun (12,48°N 14,62°E) (Photo: Djoret Daïra, CBLT mai 2013).....	23
Figure 20 Utilisation du pompe COMET pour l'échantillonnage à partir d'un puits ouvert Biliam Oursi, Tchad (10,55°N 15,23°E) (Photo: Djoret Daïra, CBLT avril 2013).....	23
Figure 21 Carte des hydro-isohypses des eaux souterraines et les points d'échantillonnage dans la zone d'étude	25
Figure 22 Carte de distribution de MDT dans la zone d'étude	26
Figure 23 Diagramme de Piper d'échantillons d'eau souterraine sans considérer le nitrate..	27
Figure 24 Diagramme de Piper pour les échantillons d'eau de surface	27
Figure 25 Diagramme de Stiff pour les échantillons YC 22 and YC 25	28

Figure 26 Carte de distribution du pH dans la zone d'étude.....	28
Figure 27 Carte de concentrations de fluore en mg/l dans la zone d'étude.....	29
Figure 28 Carte de concentrations de nitrate en mg/l dans la zone d'étude.....	30
Figure 29 Carte de Wilcox pour évaluer la convenance pour l'irrigation des eaux souterraines	32
Figure 30 Tableau SAR pour évaluer la convenance pour l'irrigation des eaux souterraines	33
Figure 31 Carte de pertinence des eaux souterraines pour l'irrigation prenant en compte les trois indexes d'aptitude à l'irrigation (Wilcox, SAR et MH indexes)	34
Figure 32 Résultats pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ d'eau souterraine, l'eau de surface et l'eau pluviale ...	36
Figure 33 Résultats pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ de tous les échantillons d'eau souterraine.....	37
Figure 34 Cartes des teneurs $\delta^{18}\text{O}$ mesurées dans la zone d'étude.....	38
Figure 35 Carte montrant les cycles de végétation en 2012 par les moyens de données satellite MODIS (Geerken et al., 2012) et les teneurs $\delta^{18}\text{O}$ mesurées dans la zone d'étude	39

Liste des Tableaux

Table 1 Indexes d'aptitude à l'Irrigation	32
---	----

Liste des Annexes

Annexe 1 Liste des points de mesures du niveau d'eau souterraine.....	44
Annexe 2 Liste des points d'échantillons	46
Annexe 3 Statistique des paramètres chimiques mesurés en échantillons d'eaux souterraines	48
Annexe 4 Statistique des paramètres chimiques mesurés en échantillons d'eau de surface	49

Abréviations

ASTER	Advanced Space Borne Thermal Emission and Reflection (Radiomètre spatial perfectionné pour la mesure de la réflexion et des émissions thermiques terrestres)
BGR	Institut Fédérale des Géosciences et des Ressources Naturelles
BMZ	Ministère Fédérale pour la Coopération Economique et le Développement
MNT	Modèle Numérique du Terrain
APE	Agence pour la Protection de l'Environnement
UE	Union Européenne
AIEA	Agence Internationale pour l'Energie Atomique
CBLT	Commission du Bassin du Lac Tchad
EC	Conductivité Electrique
TST	Température de la Surface Terrestre
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Radiomètre spectral pour imagerie de résolution moyenne)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Indice de végétation)
DREM	Direction des Ressources en Eau et de la Météorologie du Tchad
Q	Débit [m ³ /s]
GPS	Global Positioning System (Système de Positionnement Global)
MH	L'Indice de Risque de Magnésium
SAR	L'Indice de Risque Sodium de l'Eau d'Irrigation
SEMRY	Société d'Expansion et de Modernisation de la Riziculture de Yagoua (Projet Riz à l'Extrême Nord Cameroun financé par la Banque Mondiale)
MDT	Matières Dissoutes Totales [mg/l]
UT	Unité Tritium
OMS	Organisation Mondiale de la Santé

Sommaire

Mots clés: Bassin du Lac Tchad, plaine d'inondation, zone humide, Logone, Yaéré, analyse de la qualité des eaux souterraines, analyse isotopique

De mars à mai 2013, pendant la saison sèche, le projet BGR-CBLT a mené des études sur la qualité des eaux souterraines dans la plaine d'inondation du fleuve inférieure Logone, connue sous le nom de Yaéré au Cameroun et la Naga au Tchad. L'ancien projet BGR-CBLT a souligné ces zones humides comme une importante zone d'alimentation pour l'aquifère du Bassin du Lac Tchad, par conséquent, le projet en cours a décidé d'étudier intensivement l'origine des eaux souterraines, les voies d'écoulement, la qualité, ainsi que l'interaction entre le Logone et sa plaine inondée.

Les études de terrain comprenant les mesures de niveau des eaux souterraines et des enregistrements de paramètres in situ ainsi que l'échantillonnage pour l'anion, la cation et les analyses isotopiques ont été menées.

Les courbes de niveau des eaux souterraines ont été établies à l'aide de 55 mesures de niveau des eaux souterraines et des élévations d'un modèle numérique. Elles montrent l'écoulement des eaux souterraines de Bongor au nord-est dans la plaine. Toutefois, une meilleure répartition et plusieurs mesures sont nécessaires, pour élaborer une carte des hydro-isohypses pour toute la zone d'étude.

Les analyses chimiques montrent que les eaux souterraines dans la plaine d'inondation sont en général de bonne qualité. Tout au long de diagramme Piper de 76 échantillons d'eaux souterraines, principalement deux types d'eaux souterraines peuvent être distingués: Tout d'abord, l'eau de type bicarbonate de calcium et magnésium. Cette eau est faiblement minéralisée, ce qui est vrai pour les eaux souterraines rencontrées près de la zone d'alimentation de l'aquifère. Les échantillons correspondants ont été pris dans le nord et le nord-est de Bongor et entre Katoa et Logone Gana, donc dans la Plaine d'inondation du fleuve Logone. Deuxièmement, une ancienne eau de type bicarbonate de sodium et potassium a été trouvée dans la partie sud de la zone d'étude sur les pieds des monts Mandara au Cameroun, le long du fleuve Logone et dans l'Extrême Nord du Cameroun. Cette eau est fortement minéralisée. En raison du fait que le calcium a été remplacé par du sodium, il peut être conclu qu'elle a été rechargée relativement longtemps et a coulé une certaine distance à l'intérieur de l'aquifère. Il est supposé que les eaux souterraines au nord-ouest et au sud du barrage de Maga appartiennent à une aquifère différente, qui est probablement rechargée par l'eau provenant des monts Mandara. Pour une compréhension claire de la situation des eaux souterraines dans l'Extrême Nord du Cameroun, plus de points d'échantillonnage doivent être analysés. En ce moment, il est supposé que l'eau souterraine est un mélange de l'eau de la zone inondable de Yaéré, du Logone et Chari, ainsi que du lac Tchad.

Les concentrations d'anions et de cations dans l'ensemble de la région sont en dessous des limites de la norme de l'eau de boisson prônée par l'OMS. Seulement, dans les régions périphériques, à l'Extrême Nord du Cameroun et à l'ouest et au sud du barrage de Maga, les concentrations de nitrate et de fluorure au-dessus des limites respectives de l'OMS ont été mesurées. Les concentrations élevées de fluorure sont considérées comme géogénique et sont liées à la présence de minéraux riches en fluorure comme le Mica et le Fluorapatite dans l'aquifère du socle cristallin.

A l'intérieur de la zone d'étude, trois échantillons dans le nord du Cameroun montrent des concentrations de nitrates supérieures à la limite de l'OMS. Il n'a pas encore été clarifié si la pollution est causée par l'abreuvement du bétail directement à partir du trou de forage ou en raison de l'utilisation excessive d'engrais azotés dans l'agriculture.

Selon les indices SAR, Wilcox et MH, les eaux souterraines dans la zone humide sont généralement appropriées pour l'irrigation. Seulement dans la région périphérique (nord du Cameroun) l'aptitude à l'irrigation est discutable.

Les analyses isotopiques montrent que les eaux souterraines dans les plaines de Yaéré et de la Naga sont rechargées par l'eau de surface qui a été exposée à l'évaporation, ou en d'autres termes, par l'eau des inondations qui repose trois à cinq mois dans les plaines avant de se jeter de nouveau dans le fleuve Logone, s'infiltrer dans les eaux souterraines ou évapotranspire. Les indications pour la recharge directe du fleuve Logone peuvent être trouvées dans les puits et les forages au nord de Bongor. Les eaux souterraines appauvries apparaissent dans l'aquifère profond situé dans le sud-ouest de la zone d'étude sur les contreforts des monts Mandara indiquant la présence d'une eau ancienne.

1 Introduction

Le Projet «Gestion Durable de l'Eau du Bassin du Lac Tchad» est un projet de Coopération Technique entre la Commission Bassin du Lac Tchad (CBLT) et l'Institut Fédéral Allemand des Géosciences et des Ressources Naturelles (BGR) et est financé par le Ministère Fédéral de la Coopération Economique et du Développement. L'objectif principal est de renforcer les fonctions d'analyse et de suivi de la CBLT concernant les eaux souterraines et de surface dans le bassin. Le projet actuel a commencé en Septembre 2011 et devrait se terminer en août 2014.

Les zones humides dans le Bassin du Lac Tchad (Massenya et Salamat dans le sud du Tchad, la plaine d'inondation le long du fleuve inférieur Logone, Komadougou-Yobé à la frontière entre le Nigeria et le Niger, et le Lac Tchad lui-même) sont d'une importance particulière pour la région, car ils sont connus pour contribuer au renouvellement des ressources en eaux souterraines dans le bassin. En outre, ils sont des grands écosystèmes soutenant la biodiversité et les activités économiques clés tels que la pêche, l'élevage et l'agriculture de décrue. Outre l'importance régionale, ces zones sont d'importance internationale en matière d'écologie, la botanique, la zoologie, la limnologie ou l'hydrologie (sites Ramsar).

Au cours de l'atelier de planification du projet réalisé en novembre 2012 à N'Djamena, les participants (composé de: personnel de la CBLT, hydrogéologues des pays membres et le personnel BGR) ont décidé d'intensifier la recherche sur les eaux souterraines dans l'une des zones humides du Bassin du Lac Tchad. Sélectionnée pour davantage de recherche approfondie (zone pilote) est la zone d'inondation du fleuve inférieur Logone connu sous le nom de Yaéré au Cameroun et la Naga au Tchad, qui prend en charge plus de 20 millions de personnes (Jung et al., 2011). L'objectif de la recherche est d'étudier intensivement l'origine des eaux souterraines et les voies d'écoulement, la qualité des ressources en eau, ainsi que l'interaction entre le Logone et sa plaine d'inondation.

Les résultats de la première étude d'échantillonnage qui a été menée d'avril à mai 2013, avant le début de la saison des pluies, par les experts de la CBLT Djoret Daïra (hydrogéologue) et Aminu Magaji Bala (Écologiste, expert des zones humides) sont présentés ci-dessous. En 27 jours de mission sur le terrain un total de 83 échantillons d'eau ont été recueillis, 49 au Tchad et 34 au Cameroun. Les échantillons ont été analysés au laboratoire BGR en Allemagne pour les espèces complètes d'anions et de cations, les oligo-éléments et les isotopes stables deutérium (^2H) et oxygène-18 (^{18}O). Les paramètres tels que la température de l'eau, le pH et la conductivité électrique (CE) sont mesurées in situ.

2 Zone d'Étude

La zone d'étude s'étend des latitudes 10°00'0"N to 12°50'0"N et longitudes 14°20'0"E à 15°50'0"E (Figure 2) et comprend la plaine inondée de Yaéré dans le nord du Cameroun, d'une superficie d'environ 8000 km, et la plaine Naga du côté tchadien avec quelques 4500 km. Les plaines sont périodiquement inondées par des fortes pluies et le débordement du fleuve inférieur Logone entre Bongor et N'Djamena et plus au nord, dans une large mesure selon l'intensité de la pluie.

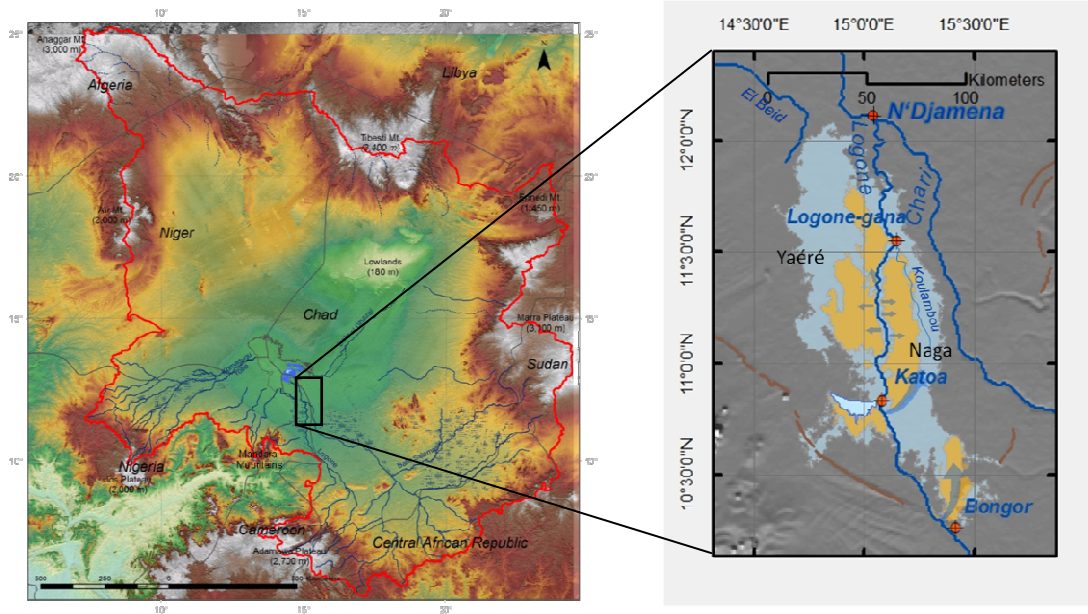


Figure 1 Modèle numérique du terrain du Bassin du Lac Tchad, compilé à partir des données SRTM30 (Vassolo, 2012)

Figure 2 Zone d'étude, zone d'inondation du fleuve inférieur Logone, modifiée après (Vassolo, 2012). Les points rouges indiquent les stations de jaugeage

Les zones d'inondation sont limitées dans le nord/nord-ouest par les eaux de surface du 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).

2.1 Climat

La situation climatique dans la zone d'étude répond à deux forces motrices climatiques différentes. Un vent sec (harmattan) du nord et un vent humide du sud (de la mousson ouest-africaine) conduisant à un climat soudanien au sud et un climat sahélo-soudanienne dans le nord. 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 à partir d'octobre à avril. La quantité de précipitation annuelle moyenne est de 800 mm (Figure 3). Le climat sahélo-soudanien dans la partie nord de la zone d'étude est caractérisée par une saison des pluies qui commence environ un mois plus tard en juin pour finir en septembre, et une saison sèche qui dure d'octobre à mai. La moyenne annuelle des précipitations diminue à 400 mm.

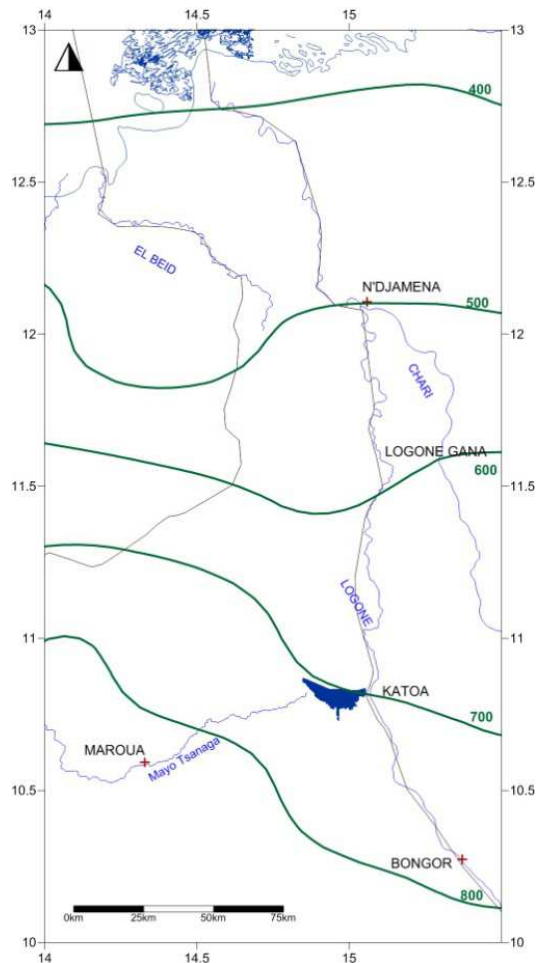


Figure 3 La répartition des précipitations dans la zone d'étude. Les lignes vertes sont des isohyètes à long terme pour la période 1973-2007 (Source: Base de données de la CBLT)

Les températures moyennes annuelles dans la zone d'étude varient entre 26°C et 28°C. La moyenne mensuelle pour avril peut atteindre jusqu'à 34°C (Ngounou Ngatcha et al., 2007). L'évaporation moyenne annuelle totale (1987-1991) à Kousseri (située au Cameroun face à N'Djamena) est de 3944 mm et 2614 mm à Yagoua (située au Cameroun en face de Bongor, (Ngatcha, 1993). L'évaporation mensuelle augmente d'octobre à mars et est à son minima en août lorsque la pluviométrie est la plus forte.

2.2 Hydrologie

Le fleuve Logone, principal affluent du fleuve Chari, est un fleuve pérenne long de 1000 km qui a ses sources dans le plateau volcanique de l'Adamaoua situé à l'ouest de la République Centrafricaine et dans le nord du Cameroun (voir Figure 4). Ses principaux affluents sont la Pendé, avec un cours supérieur à 1400 m dans la partie orientale du plateau en République Centrafricaine qui devient le Logone oriental en entrant au Tchad, et les rivières Vina et Mbéré avec des sources à environ 1000 m dans la partie nord du plateau de l'Adamaoua au Cameroun, qui confluent pour former le Logone occidental. Le Logone Oriental et le Logone Occidental se croisent pour former le fleuve Logone (Figure 4).

Le cours d'eau est divisé en trois tranchées: le Logone supérieur entre le confluent du Logone oriental et occidental et Lai, le Moyen-Logone entre Lai et Bongor, et le Logone inférieur de Bongor à N'Djamena, où le Logone joint le fleuve Chari (Figure 4). Cette dernière est d'une importance particulière pour la zone d'étude. Le système fluvial Logone/Chari compte pour environ 90% de l'eau du Lac Tchad.

La planéité de la région d'étude (gradient d'environ 0.6 m/km) empêche la formation d'un réseau fluvial hiérarchique. Cependant, plusieurs petits canaux sinueux apparaissent pendant la saison des pluies, mais disparaissent habituellement avant qu'ils n'atteignent un plus important affluent.

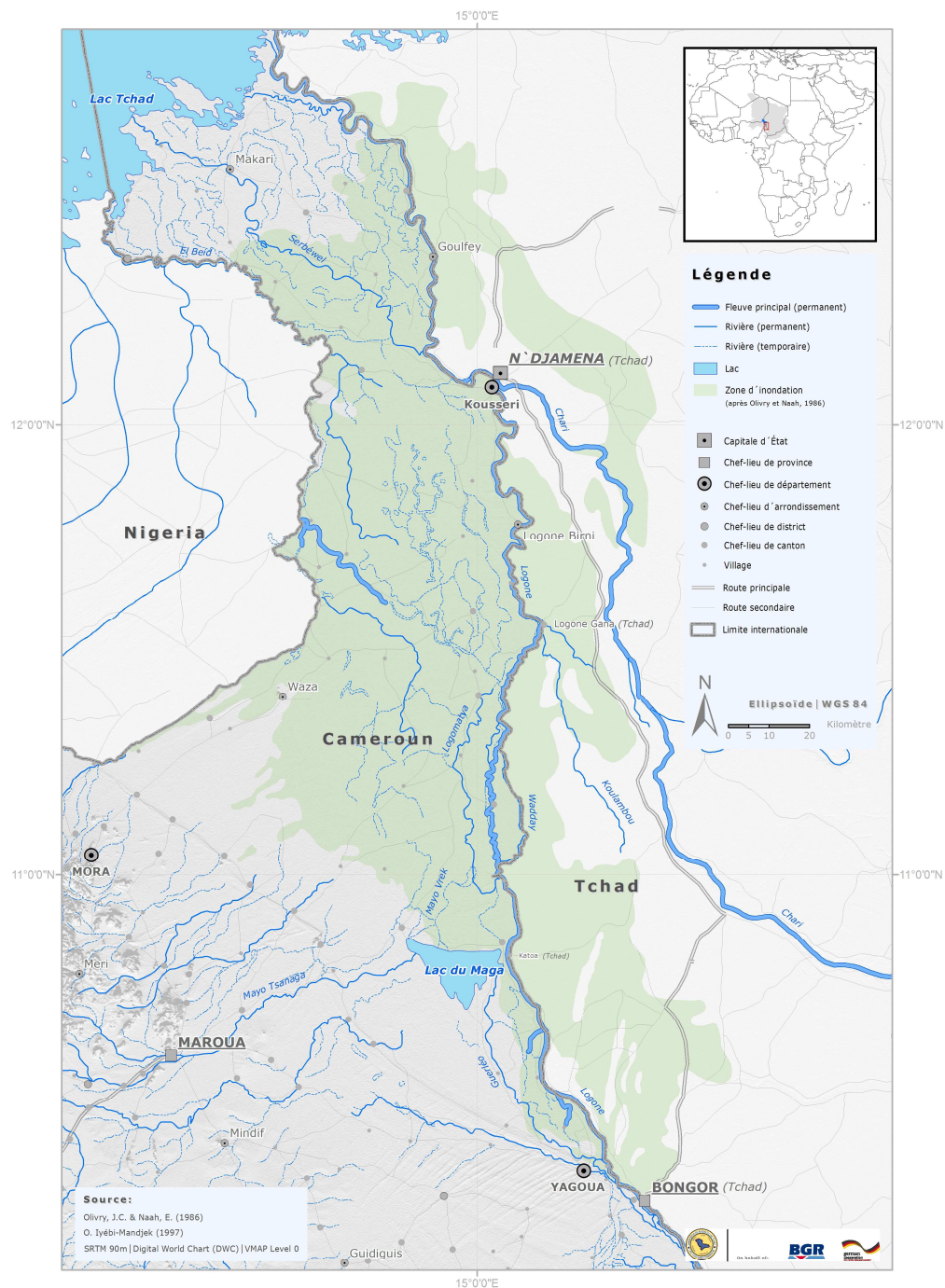


Figure 4 Carte Hydrologique de la zone d'étude (Source : Olivry, J.C. & Naah, E. (1986), O. Iyébi-Mandjek (1997) et modifiée par Wilzcok, Ch. 2014)

Un important affluent est le fleuve Koulambou, qui a sa source dans la Plaine de Naga et rejoint le fleuve Logone à Logone Gana (Figure 4). Le débit mesuré pendant la saison des pluies en octobre 2013 compte pour 306 m³/s (Seeber, 2013). L'eau qui déborde le Logone le long de la rive gauche se jette dans la Plaine de Yaéré et est drainée par les affluents

comme Guerléou et Logomatya. Le dernier se soulève dans le nord de Yagoua et l'autre entre Pouss et Tekele. Ces rivières coulent parallèlement au fleuve Logone. La plupart de ces affluents retombent dans le Logone à Logone Gana (Ngatcha, 1993). Le cours de la rivière Guerlou a été interrompu par la construction du barrage de Maga en 1979 pour créer un réservoir de 40.000 ha pour l'irrigation du riz vers la partie nord du barrage. La sortie du barrage de Maga (appelé Canal de Vrick) a été construite pour contrôler l'évacuation du fleuve Logomatya vers le nord du barrage qui prend en charge la Plaine d'inondation du Yaéré avec de l'eau. Malheureusement, le bon fonctionnement/gestion de barrage est un défi sérieux de l'heure.

Les Plaines de Yaéré et de la Naga sont saisonnièrement inondées pendant et peu après la saison des pluies, généralement d'août à janvier, selon l'intensité des précipitations et donc le débit. Les premières pluies en mai / juin saturent le sol et remplissent la plus profonde dépression. L'écoulement du surplus d'eau sur le lit du fleuve, qui contribue le plus à l'inondation des plaines, commence à l'est du fleuve Logone en septembre. Le niveau d'eau dans la plaine d'inondation au cours de la période d'inondation varie entre 0,7 et 1,5 m au-dessus de la surface et est à son maximum à la fin octobre/début novembre.

Une analyse du débit du fleuve Logone pour la période 2001-2008 (Figure 5) révèle un débit moyen mensuel de 404 m³/s à Bongor et 265 m³/s à Logone Gana. Le débit minimal est atteint 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 durant la saison des pluies de juin à septembre. Les plus hauts niveaux de débit sont observés à la fin de la saison des pluies, à la fin septembre avec une valeur moyenne de 1525 m³/s à Bongor et un mois plus tard, à la fin octobre, avec une valeur moyenne de 765 m³/s à Logone Gana. La perte d'eau entre Bongor et Logone Gana est principalement causée par l'eau du fleuve qui fait éclater son lit et s'écoule dans les plaines de Yaéré ou de Naga (Seeber, 2013). Le flux annuel des crues réduit les débits et le total des volumes d'eau dans le fleuve Logone. L'eau stockée dans la plaine d'inondation soit se reflue dans le fleuve Logone au cours de la période de récession, est exposée à l'évaporation et à l'évapotranspiration dans les plaines, s'infiltre dans la nappe souterraine ou coule plus au nord pour former des petites rivières qui transportent l'eau dans le Lac Tchad.

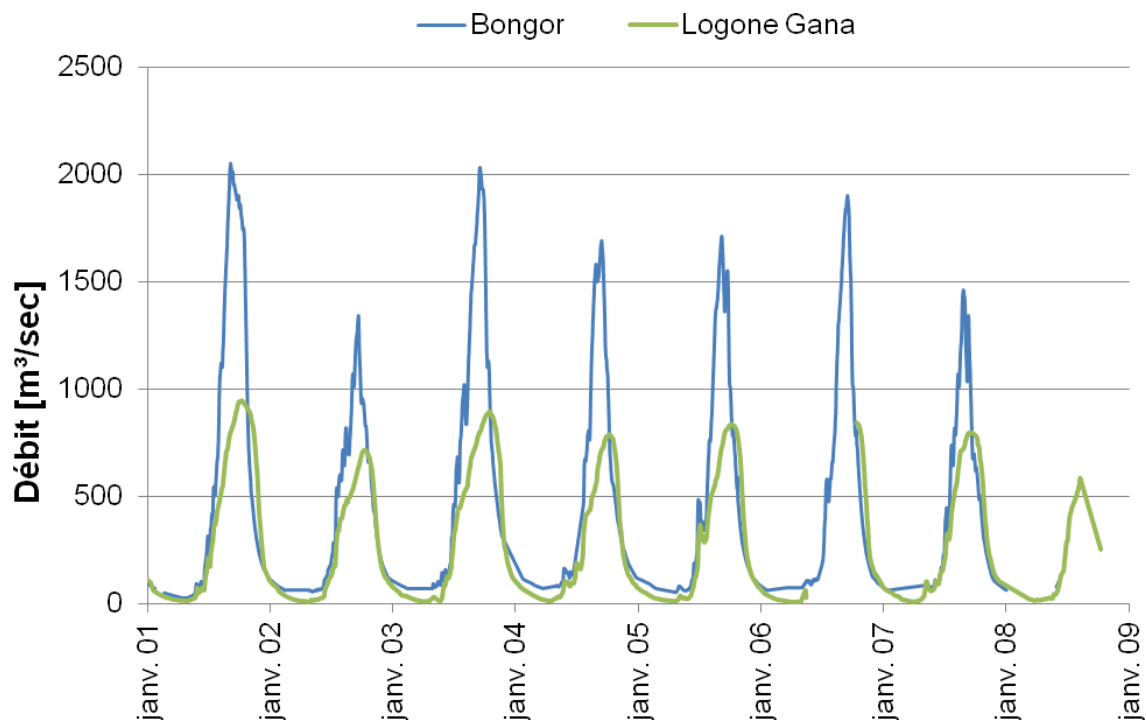


Figure 5 Valeurs du Débit à Bongor et Logone Gana pour la période 2002-2008 (Source : DREM)

Le débit en m^3/s auquel le débordement intervient dans les plaines du Yaéré et de Naga dans les stations de Bongor et Katoa, respectivement, a été calculé dans l'ancien Projet BGR-CBLT (voir Figure 6 et Figure 7 ci-dessous).

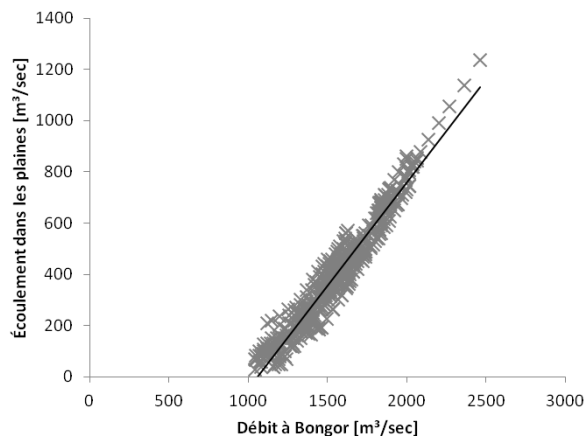


Figure 6 Ecoulement dans les plaines de Yaéré et du Naga par rapport au débit à Bongor

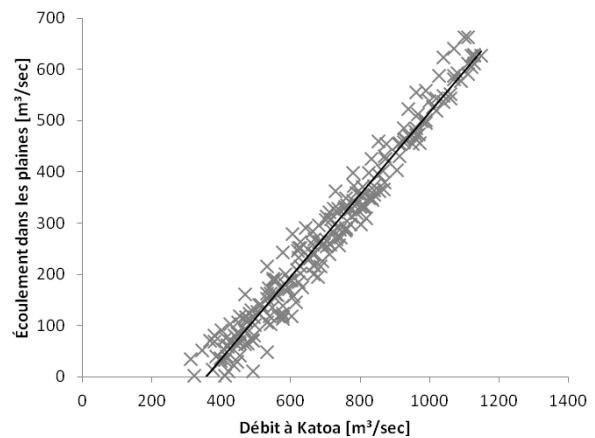


Figure 7 Ecoulement dans les plaines du Yaéré et du Naga, débit relatif à Katoa

Dans la Figure 6, les différences entre les débits à la station de Bongor et Katoa figurent pointées contre la valeur de décharge à la station de Bongor. L'image montre le surplus d'écoulement dans les plaines de Naga et Yaéré à Bongor a lieu lorsque le débit du fleuve Logone dépasse $1055 m^3/s$. Une décharge semblable de $1,100 m^3/s$ a été signalée par Ngounou Ngatcha et al., (2007). La même analyse peut être faite pour estimer le débit à partir de laquelle l'inondation a lieu dans la station de Katoa. Le surplus d'écoulement dans les Plaines de Yaéré et de la Naga commence lorsque le débit dépasse $356 m^3/s$ à la station de Katoa (Figure 7). Figure 7).

Olivry (1986) a analysé le régime d'écoulement du Logone pour la période 1953-1973 et a démontré un lien entre les débits à Bongor et le débit de l'El Beid situé dans l'extrême nord du Cameroun (Figure 4). Il a conclu que lorsque le débit à Bongor dépassait $1,500 m^3/s$, la plaine alluviale du Yaéré a été fortement inondée et, de janvier à avril, l'eau de la plaine est drainée par l'El-Beid dans le Lac Tchad avec une valeur médiane de $38,9 m^3/s$.

Toutefois, en raison de plusieurs périodes de sécheresse entre 1972 et 1983, le régime d'écoulement dans la région a changé (voir Figure 8). Alors que la courbe de décharge quotidienne moyenne pour la période 1953-1973 montre des valeurs supérieures à $1500 m^3/s$ sur presque 2 mois (du 4 septembre au 21 octobre), la courbe correspondant à la période 1974-1994 n'a jamais atteint une telle décharge. La courbe verte indique que les rejets quotidiens ont augmenté pour la période 1995-2007 arrivant à la moyenne à long terme pour la période 1953-2007, mais pas encore aux valeurs des années 60. Les rejets quotidiens moyens sont maintenant à nouveau au-dessus de $1500 m^3/s$, mais seulement sur une période de moins d'un mois (du 2 septembre au 11 octobre).

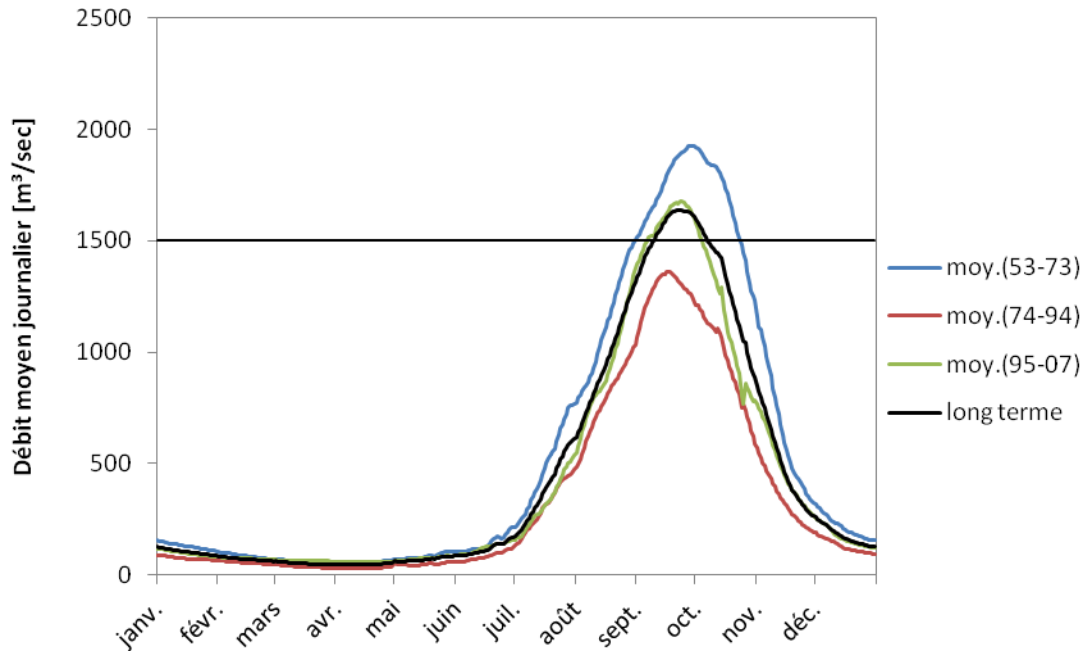


Figure 8 Débit moyen journalier pour le fleuve Logone à Bongor pour différentes périodes.

2.3 Cartographie des Inondations avec Méthodes SIG

La disponibilité croissante des données satellitaires a augmenté les possibilités pour la cartographie des zones d'inondation dans les plaines inondables. Différentes méthodes ont été appliquées dans la zone étudiée à cet effet. Jung et al. (2011) a déterminé les zones inondées à l'aide de données ondes-courtes infrarouges avec l'application d'une analyse de données auto-organisé itérative s'accrochant par endroit aux différentes eaux libres. À l'aide d'une série de 33 multi-temporelle images Landsat ETM+, ils ont cartographié les zones inondées des plaines pour les années 2006 à 2008. Geerken et al. (2012) a suivi le cycle de végétation capturé par les données satellite MODIS, qui permet de faire la distinction entre la végétation pluviale, la végétation irriguée et la végétation qui pousse dans les zones inondées. En traitant les images du satellite MODIS de la température terrestre (TT) diurnes maximales, Bila (2013) a également cartographié l'extension des zones inondées dans la région. Cette méthode se fonde sur le fait que l'évaporation des zones inondées est à son maximum pendant les températures les plus élevées journalières. Ainsi, les zones inondées sont plus froides que des zones non inondées et peuvent facilement être distinguées.

La Figure 9 ci-dessous montre l'extension des zones d'inondation du Logone inférieur pour 2011 et 2012 (Geerken et al., 2012). La végétation est classée à partir de l'indice de végétation (NVDI) selon la forme du cycle temporel de la végétation (Geerken, 2009). Les zones bleues foncées dans les plaines de Yaéré et de Naga correspondent aux inondations saisonnières intensives (surfaces des eaux libres), tandis que les zones de couleurs bleues claires sont également des zones à inondations saisonnières, mais plus mélangées à la végétation. Les couleurs vertes foncées représentent la végétation dans les zones où l'humidité du sol est élevée, où les cycles de végétation sont en quelque sorte plus longs que ceux de la végétation obtenue par la pluie. L'éclaircissement de la couleur verte est en corrélation avec le raccourcissement du cycle de végétation. Les périodes de végétation plus courtes apparaissent dans le nord de la zone d'étude. La couleur rouge indique les zones irriguées, typiquement caractérisées par deux cycles de végétation (deux récoltes) et la couleur blanche visible dans le lac Maga montre des eaux de surface toute l'année.

La Figure 9 montre qu'en 2011 seule une inondation mineure a eu lieu comparée à 2012.

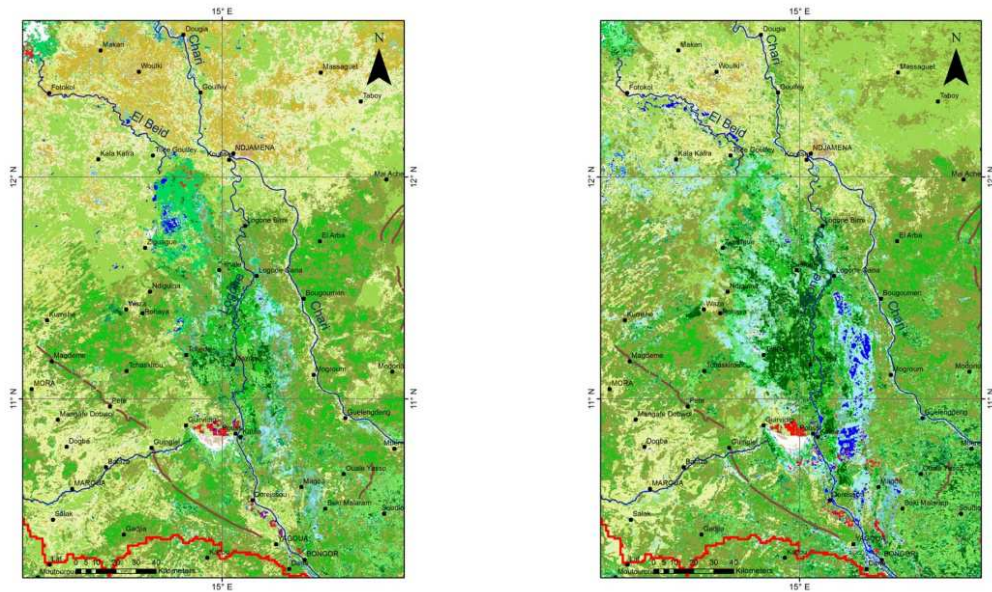


Figure 9 Variation des plaines de Yaéré et du Naga pour 2011 (gauche) et 2012 (droite) (Geerken et al., 2012)

Les images satellites MODIS diurnes de la température maximale de la surface terrestre (TST) ont été analysées pour la période 1999-2012 par l'expert en télédétection de la CBLT, à l'aide d'images composites de 16 jours (Bila, 2013). Les résultats pour les années 2011 et 2012 sont présentés à la Figure 10, montrant à nouveau une plus petite zone d'inondation en 2011 qu'en 2012.

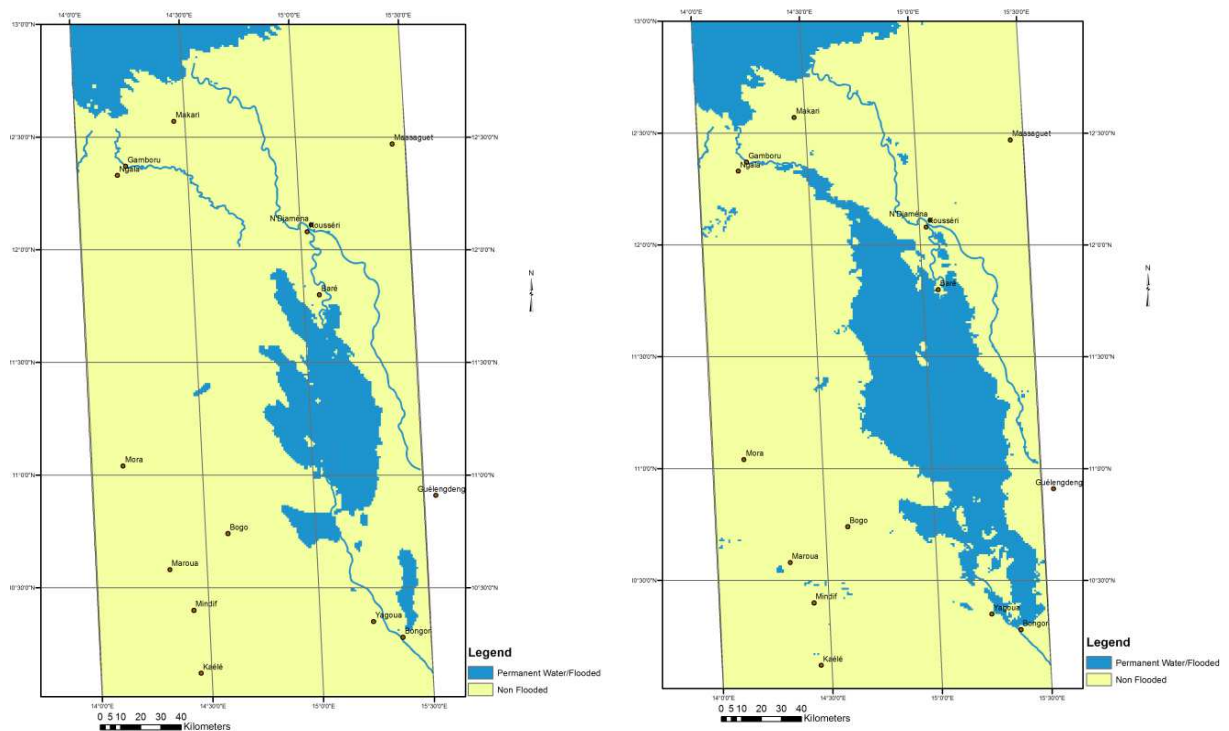


Figure 10 Les images diurnes satellites MODIS de la température maximale de la surface terrestre (TST) montrant la plus haute étendue de la zone d'inondation en novembre 2011 (à gauche) et en novembre 2012 (à droite)

En comparant les Figure 9 et Figure 10, surtout les images de l'année 2012, on peut conclure que l'analyse de la NVDI permet de distinguer entre l'eau libre, l'eau mélangée avec la végétation et la couverture végétale ainsi que l'humidité élevée du sol. Afin de calculer la zone inondée, toutes ces trois surfaces doivent être additionnées. En revanche, cartographier l'étendue des plaines du Yaéré et la Naga à l'aide de la température de surface ne distingue pas entre les zones d'eau libre, la végétation sous l'eau et la végétation avec humidité élevée du sol. Néanmoins, il montre les zones où les températures de surface sont plus froides en raison de l'évaporation de l'eau de surface libre et l'évapotranspiration des plantes.

Les différentes méthodes de télédétection contribuent à une meilleure compréhension de la dynamique de la Plaine d'inondation du Logone, avec les détails concernant la relation entre la zone d'inondation et les hauteurs d'eau aux stations de jaugeage, ainsi que le modèle spatial et la taille de la zone inondée. En outre, ils permettent la création des cartes de probabilité mensuelle des zones inondées. Il a été démontré qu'en septembre, la plupart des zones inondées sont situées dans la plaine de Naga. En octobre et novembre, les zones inondées s'étalent sur les deux côtés du fleuve en se déplaçant d'est en ouest. La zone maximale inondée en fin octobre 2008 a atteint jusqu'à 5800 km². En décembre et janvier, les eaux de crue se déplacent vers le nord avec une diminution de taille de la zone inondée. Le nord du barrage de Maga est la plupart du temps non inondé, même pendant les mois de décharge maximale d'octobre et de novembre, en raison de la protection par la digue le long du fleuve Logone qui a été construite pour protéger les champs de riz, mais aussi le barrage de Maga contre l'inondation (Jung et al., 2011).

2.4 Sol, Végétation et Agriculture



Les types de sols dominants dans la plaine de Yaéré sont les Vertisols et l'argile noire hydromorphe (Brabant & Gavaud 1985). Pendant la saison sèche, ces sols forment des fissures de retrait (Figure 11) dans lequel l'eau peut pénétrer au début de la saison des pluies. Le gonflement des argiles qui en découle conduit à une fermeture des fissures et diminue la perméabilité du sol et, ainsi, favorise l'inondation de la zone

La végétation dans les plaines du Yaéré et du Naga est tributaire de saison. La région se caractérise par un paysage marécageux pendant la saison des pluies (Figure 13) par la savane arbustive et la plaine herbeuse, pendant la saison sèche (Figure 13).

Figure 11 La plaine de Naga près de Dialo (~10,9°N 15,1°E) pendant la saison sèche. Sols à partir de fissure de retrait (Photo: Djoret Daïra, CBLT Avril 2013)



Figure 12 Paysage marécageux dans la plaine d'inondation de Naga près de Logone Gana (11,55 °N 15,19 ° E) (Photo: Aminu Magadji, CBLT Nov. 2013)



Figure 13 Plaine de Naga herbeuse près de Yama (~11,20°N 15,20°E) pendant la saison sèche (Photo: Djoret Daïra, CBLT Avril 2013)

Economiquement parlant, la zone d'inondation est principalement utilisée pour l'agriculture de récession comme le sorgho et pour l'élevage. En outre, le riz, le maïs, les arachides et les produits maraichers sont en partie cultivés (Figure 14 et Figure 15). Il y a des grandes rizières irriguées autour du barrage de Maga avec ~ 3 200 ha (Projets SEMRY I et II) au Cameroun et ~ 800 ha au nord de Bongor au Tchad (Casier B).



Figure 14 Elevage à la rivière Loumia (tributaire dans la plaine de Naga 11,40°N 15,30°E) (Photo: Djoret Daïra, CBLT Avril 2013)



Figure 15 Jardin à Saka, Tchad (10,38°N 15,35°E) (Photo: Djoret Daïra, CBLT Avril 2013)



Figure 16 Canal à poisson construit pendant la saison sèche, près de Dialo, Tchad (~10,90°N 15,10°E) (Photo: Djoret Daïra, CBLT Avril 2013)

Pendant la période de crue, la plaine d'inondation est également utilisée pour la pêche avec des canaux de poissons spécialement construits qui coupent dans les plaines (Figure 16). Ils mesurent environ 70 m à 2000 m de long, vif de 2 m à 10 m, 1,5 m à 2,5 m de profondeur (Sambo, 2010) et sont jusqu'à plus de 2000. Quand la récession commence (écoulement retour), les poissons vivant et se reproduisant dans la zone d'inondation recherchent leur chemin de retour dans le fleuve Logone à travers ces canaux. Avant leur confluent avec le fleuve Logone, les filets de pêche sont installés à travers les canaux et tous les poissons en dépit de leur âge sont capturés. Malheureusement, ce mode de pêche n'est pas durable et conduit à un déclin et la disparition des espèces de poissons. Bien que théoriquement ce type de pêche soit interdit au Cameroun, il est encore largement pratiqué dans ce pays et au Tchad.

2.5 Milieu Géologique

La Plaine d'inondation Logone-Chari se trouve sur les bords des dépôts Quaternaires dans le Bassin du Lac Tchad et se compose de formations Quaternaires récentes et anciennes. L'épaisseur peut être très faible, mais varie généralement entre 50 et 70 m (Schneider et al., 1992 et Biscaldi, 1970).

Sur le côté camerounais du Logone inférieur des dépôts peuvent être distingués (Biscaldi, 1970) :

- l'argile sablonneuse alluvionnaire et le sable limoneux déposés par le fleuve Logone et ses affluents, les rivières temporaires, qui se jettent dans le Lac Tchad
- Des dépôts alluviaux récents dans le Bassin du Tchad avec d'abondant mica
- Dépôts alluviaux à grains grossiers transportés par les rivières apparues sur les Monts Mandara (Cameroun)
- argiles lacustres et vase de faible épaisseur (en moyenne 1,5 m dans la plaine de Yaéré) déposés par le Lac Tchad durant des conditions climatiques plus humides, lorsque le niveau du lac était au moins 320 m au-dessus du niveau de la mer
- dépôts de sable de périodes arides
- dépôts sableux limoneux avec des graviers calcaires avec une épaisseur moyenne de 10 à 20 m, très constant dans la partie méridionale de la Yaéré, mais moins continue au nord du 12 °parallèle
- sables éoliens qui forment une chaîne de dunes appelé Limani-Yagoua (Cameroun)

2.6 Milieu Hydrogéologique

Les anciennes études sur l'écoulement des eaux souterraines et des paramètres hydrogéologiques des aquifères situés dans la plaine du Yaéré se trouvent dans la carte hydrogéologique 1/200 000 par Biscaldi (1970) et dans la carte hydrogéologique de Detay et al. (1989) au sein de l'Atlas de la province de l'Extrême-Nord du Cameroun.

Des rares informations concernant la plaine de Naga sont présentées dans les cartes hydrogéologiques 1/500,000 par Torrent (1966), qui furent plus tard incluses dans la carte Hydrogéologique du Tchad 1/1.500,000 par Schneider (1969).

L'altitude au-dessus du niveau de la mer de niveau statique régionale à l'intérieur du Quaternaire dans le Yaéré varie entre 320 m à Yagoua et 265 m à l'extrême nord. Dans l'extrême nord du Cameroun, vers le Lac Tchad, trois zones de dépression d'eaux souterraines locales ont été détectées. Ngounou (2007) a étudié une quatrième dépression d'eaux souterraines située à l'axe entre Tagawa et Yagoua, nord-est de la chaîne de dunes. Avec l'aide des données géologiques, l'analyse des isotopes stables, les données tritium et hydro-chimiques, il a identifié un aquifère du Quaternaire composé de deux couches superposées. Le Quaternaire ancien est séparé de celui plus jeune, par une couche argileuse d'une moyenne de 2 m à 5 m d'épaisseur

Dans le projet SEMRY II quelques échantillons de sédiments autour du barrage de Maga ont été recueillis afin d'évaluer la perméabilité. Une teneur de 10^{-8} m/s a été observée pour les limons, les sables limoneux présentaient des teneurs variant de 4 à 5×10^{-6} m/s (Ngounou, 1993)

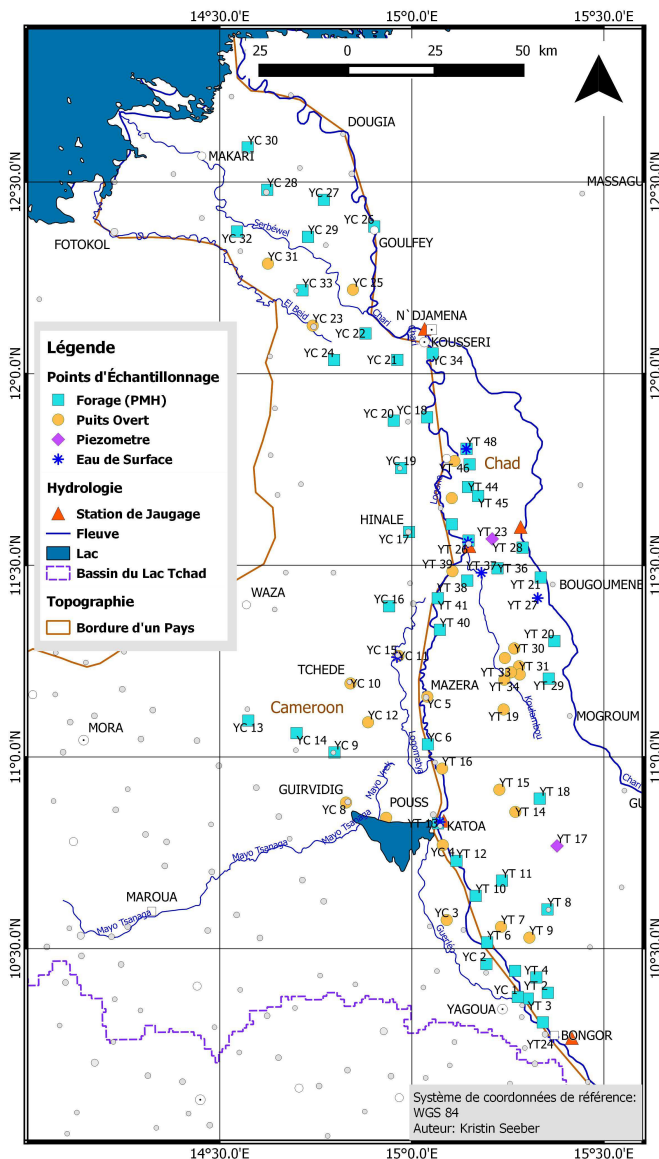
Biscaldi (1970) a signalé que la majorité des échantillons des eaux souterraines dans la région est du type bicarbonate-calcium, la plupart d'entre eux correspondent aux eaux souterraines peu profondes et, à l'exception de certains teneurs dans l'extrême nord près du Lac Tchad, ils sont adaptés pour l'irrigation. La transmissivité moyenne est de 3 à 4×10^{-5} -m²/s.

Dans la plaine de Naga, les altitudes au-dessus du niveau de la mer des eaux souterraines se situent entre 320 m à Bongor à 280 m à N'Djamena. Schneider & Wolff (1992) a signalé que les eaux souterraines de l'aquifère Quaternaire dans cette région sont généralement peu minéralisées. En outre, ils ont noté que la présence de lentilles de sable de 2 à 15 m d'épaisseur se traduit en aquifères locaux. Ces aquifères locaux ont été également mentionnés par Ngounou (1993) pour la plaine d'inondation du Yaéré. Un essai de pompage à un forage de 1969 situé à Bongor, qui a une profondeur de 95 m, une longueur de filtre de 7,8 m de 83,2 à 91 m et capture l'aquifère quaternaire, a donné une transmissivité de $2,5 \times 10^{-2}$ m²/s. En supposant une épaisseur moyenne de 60 m pour l'aquifère quaternaire, cette transmissivité équivaut à une teneur de perméabilité de 4×10^{-4} m/s et est donc assez élevée par rapport à la perméabilité mesurée autour du Barrage de Maga.

3 Méthodologie

Les premières études menées par l'ancien Projet BGR-CBLT montrent que les zones d'inondation du fleuve inférieur Logone ont une contribution significative à la recharge des nappes phréatiques (5mm/a) à l'intérieur du Bassin du Lac Tchad (Vassolo (2011) et Vassolo (2012)). Par conséquent, il a été décidé d'intensifier la recherche en eau souterraine dans cette zone afin d'étudier l'origine des eaux souterraines et les voies d'écoulement, la qualité des eaux souterraines et les eaux de surface, ainsi que l'interaction des eaux souterraines entre le Logone et sa plaine d'inondation.

Les résultats de la première campagne d'échantillonnage, menée d'avril à mai 2013 avant le début de la saison de pluies, sont présentés ci-dessous.



Au cours d'une campagne de terrain de 27 jours, un total de 83 échantillons d'eau ont été prélevés. Sur les 83 échantillons d'eau, 76 appartiennent aux eaux souterraines, prises soit à partir de puits tubés équipés de pompes à main (48), de puits ouverts (26) ou de piézomètres (2). Une liste de points d'échantillonnage avec le nom et les coordonnées de l'emplacement est donnée en annexe 1.

Bien que les profondeurs exactes des puits tubés équipés de pompes à main soient inconnues, on peut supposer qu'ils extraient l'eau à partir du quaternaire, puisque l'épaisseur de cette couche aquifère comprend 50 à 70 m et la couche subjacente se compose de ~180m d'argiles pliocènes imperméables (voir chapitre 2). Cependant, on sait que la couche aquifère quaternaire se compose de couches de sable intercalées par de couches d'argiles, donc il est difficile d'établir une corrélation stratigraphique entre les puits ouverts et les puits tubés.

Le fleuve Logone a été échantillonné à Bongor et Katoa. De plus, le fleuve Koulambou (affluent du fleuve Logone dans la plaine du Naga) et

quatre autres cours d'eaux situés dans les plaines du Yaéré et du Naga ont été échantillonnés (Figure 17).

Figure 17 Carte des lieux des échantillons et les types de puits

Pendant la campagne de terrain les niveaux d'eau et les profondeurs totales des puits ouverts ont été enregistrés à l'aide d'une sonde (Figure 18). Les coordonnées des points d'échantillon ont été recueillies au moyen d'un dispositif GPS Garmin.

Les paramètres In-Situ (température [°C], la conductivité électrique [$\mu\text{S}/\text{cm}$], le pH, l'oxygène [mg/l], le potentiel d'oxydoréduction [mV] et le HCO_3^- [mg/l]) ont été mesurés au moyen d'un ensemble de capteurs multiples numériques (3430 WTW-Multi) et un appareil de titrage. L'eau était pompée à l'aide d'une pompe submersible (Set COMET-COMBI 12-4 t) (Figure 20). Lorsque les forages équipés de pompes à main ont été échantillonnés, une cellule a été utilisée afin d'atteindre le flux laminaire et éviter tout contact des eaux souterraines avec l'oxygène (Figure 19).

Les espèces complètes d'anions et de cations ainsi que les oligo-éléments et les isotopes stables oxygen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) et le deutérium ($\delta^2\text{H}$) ont été mesurées au laboratoire BGR à Hanovre en Allemagne.



Figure 18 Enregistrement du niveau de l'eau dans un piézomètre, King King, Tchad (11,50°N 15,20°E) (Photo: Djoret Daïra, CBLT avril 2013)



Figure 19 Pompage par une cellule et l'application de la WTW-Multi 3430 à Woulki, Cameroun (12,48°N 14,62°E) (Photo: Djoret Daïra, CBLT mai 2013)



Figure 20 Utilisation du pompe COMET pour l'échantillonnage à partir d'un puits ouvert Biliam Oursi, Tchad (10,55°N 15,23°E) (Photo: Djoret Daïra, CBLT avril 2013)

4 Résultats et Discussion

4.1 Hydro-Isohypse des Eaux Souterraines

Les niveaux statiques d'eaux souterraines ont été mesurés à 56 puits ouverts peu profonds et cinq piézomètres (données énumérées à l'annexe 1). Les puits ouverts qui se trouvent dans les plaines inondables sont rarement développés. Très souvent juste environ 0,5 m à 1 m d'épaisseur et de 2 m à 4 m de trous profonds sont creusés dans le sol à la main par les nomades. Tout d'abord, cela indique que la plaine d'inondation est rarement occupée par les villageois, en raison de l'inondation annuelle récurrente, et deuxièmement qu'un aquifère d'eau souterraine peu profonde peut être rencontré, qui est directement alimenté par l'eau de crue qui tient sur trois à cinq mois dans les plaines.

Le modèle de numérisation de terrain ASTER (résolution 30 m x 30 m) a été utilisé pour estimer les hauteurs des puits ouverts parce qu'ils n'ont pas été mesurés. L'altitude au-dessus du niveau de la mer des niveaux statiques des eaux souterraines va de 326 m à Marao près de Bongor (15.27 E et 10.37 N) dans le sud de la zone d'étude à 265 m à Woulki (14,62 E et 12,48 N) près du Lac Tchad. L'écoulement général des eaux souterraines part du sud vers le nord en suivant le gradient de surface (Figure 21).

En raison d'une répartition non homogène des puits, de grandes distances entre les puits (parfois > 20 km), l'indisponibilité des hauteurs d'élévation des puits et l'extrême platitude de la région (~0.6 m/km), il est très difficile de dessiner une carte hydro-isohypse de l'ensemble de la zone d'étude. En outre, le modèle de numérisation de terrain utilisé pour estimer les élévations de surfaces des puits, contient quelques erreurs (tracés allant du nord à l'est non naturel illustrés à la Figure 21). Les hydro-isohypses démontrent l'écoulement des eaux souterraines de Bongor du nord vers l'est dans la plaine de Naga, suivant la direction de l'éclatement de l'eau du fleuve. Selon le gradient la vitesse d'écoulement semble être élevée.

Il est évident que plus de données dans la plaine du Yaéré et dans le nord du Cameroun, ainsi qu'autour de Logone Gana sont nécessaires pour pouvoir établir une carte adéquate des hydro-isohypses des eaux souterraines. En outre, il est important de mesurer la hauteur exacte des puits, car le DEM utilisé pour leur évaluation a une faible résolution et ne donne ainsi qu'une estimation brute.

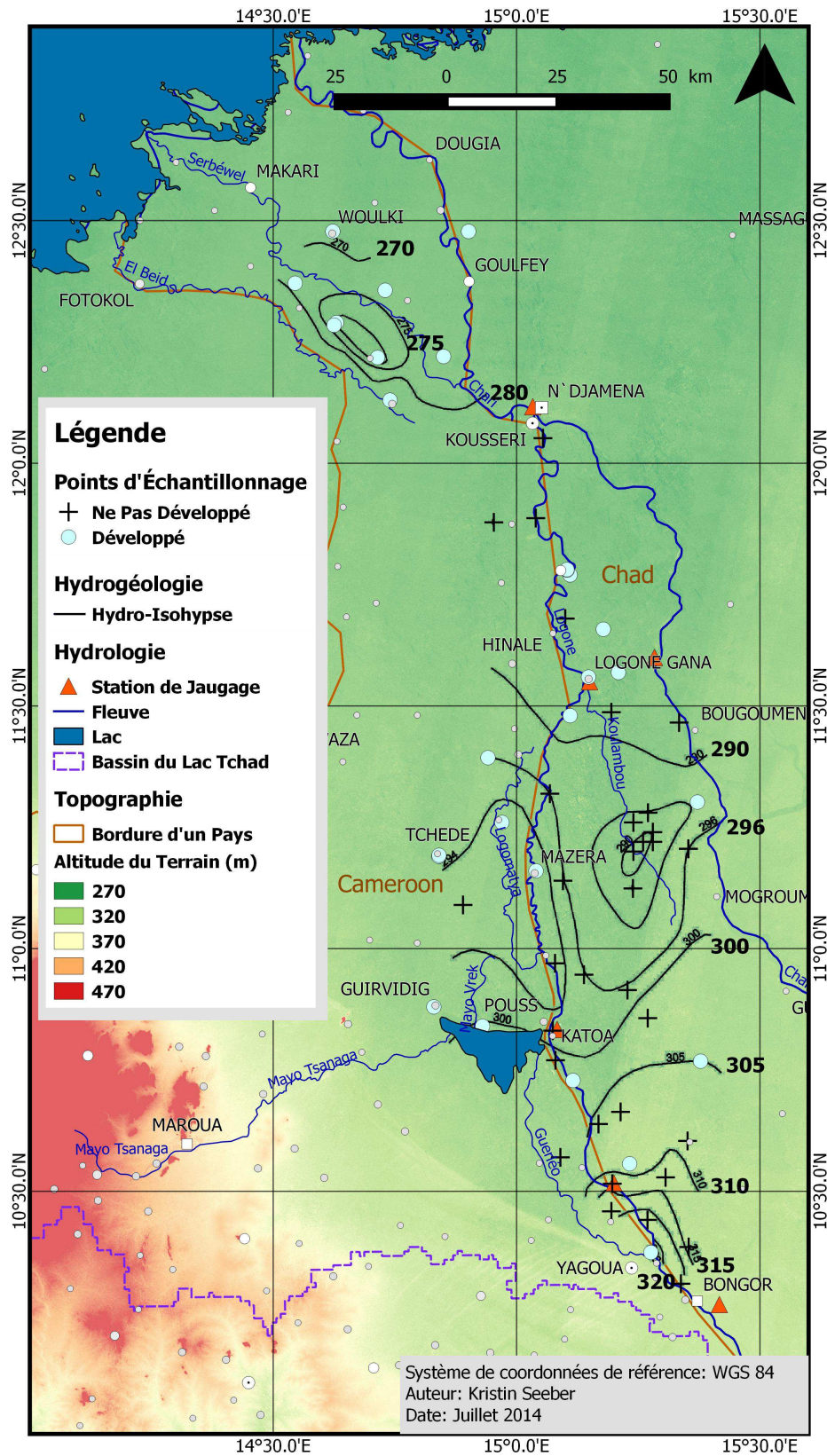


Figure 21 Carte des hydro-isohypses des eaux souterraines et les points d'échantillonnage dans la zone d'étude

4.2 Hydrogéochimie

L'échantillonnage d'eau s'est déroulé à 83 points (voir Annexe 2). Les statistiques descriptives comme moyenne, minimum, maximum et l'écart-type des paramètres analysés des échantillons des eaux souterraines et les eaux de surface sont signalées dans les Annexes 3 et 4. De plus, les limites de la Norme de Potabilité de l'Eau de Boisson de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) sont énumérées.

4.2.1 Matières Dissoutes Totales

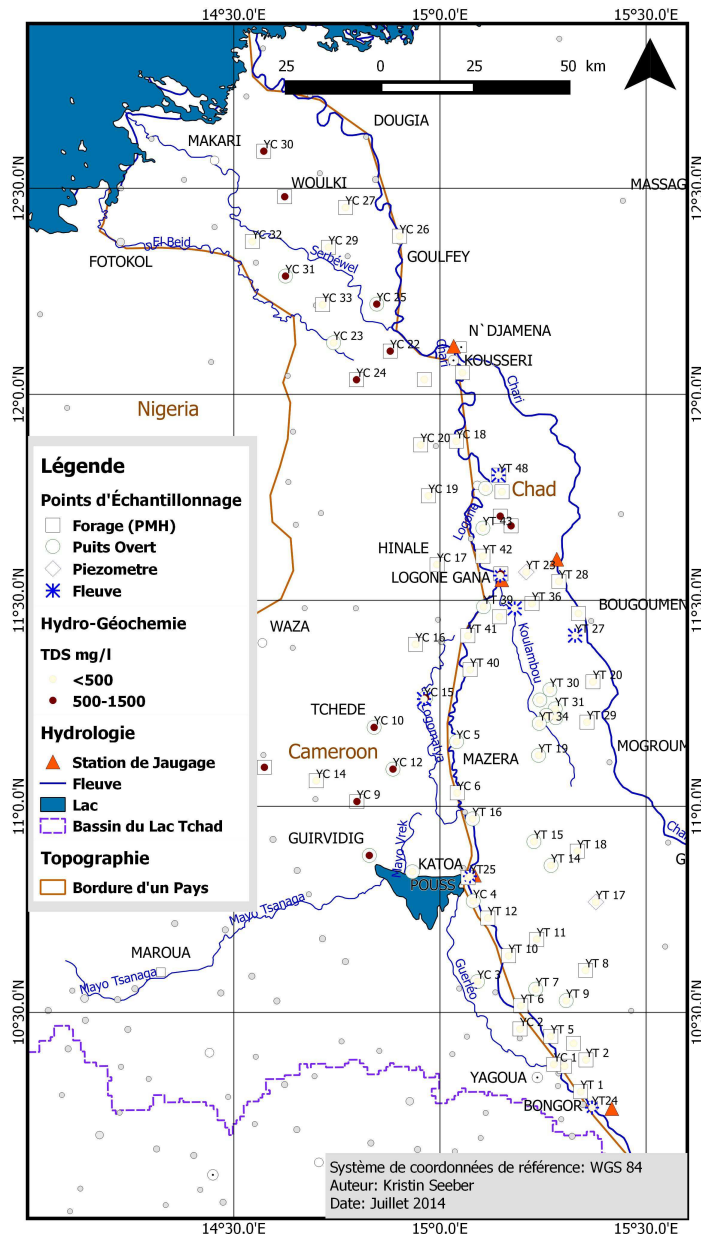


Figure 22 Carte de distribution de MDT dans la zone d'étude

Les Matières Dissoutes Totales (MDT) sont un indicateur de la minéralisation de l'eau (montant total d'ions mobiles chargés). Bien que des teneurs plus élevées de MDT ne semblent pas poser de problèmes de santé, l'OMS suggère que l'eau potable (classifiée en tant qu'eau douce) ne doit pas avoir plus de MDT que 1.500 mg/l. L'eau contenant > 5.000 mg/l de MDT est trop salée même pour abreuver le bétail.

Dans la zone d'étude, aucune concentration de MDT au-dessus de 1.500 mg/l n'a été détectée (figure 22). Il y a seulement un puits ouvert situé dans le nord du Cameroun à Amfara (YC 25) avec une teneur en MDT de 1.470 mg/l (une CE de 1.898 μ S/cm) près de la limite suggérée par l'OMS.

En générale les teneurs en MDT détectées dans la zone d'étude sont relativement basses (figure 22) avec une concentration moyenne de 354 mg/l. Les plus basses MDT sont mesurées dans les zones d'inondation nord-est de Bongor, et entre Katoa et Logone Gana des deux côtés du fleuve Logone (moyenne 279 mg/l). Les valeurs plus élevées sont trouvées dans le nord du Cameroun (moyenne 598 mg/l) et dans la zone adjacente aux monts Mandara dans le sud et le nord-ouest du lac Maga (moyenne 432 mg/l).

4.2.2 Diagramme de Piper

Une manière de visualiser la composition chimique (anions principaux) des échantillons d'eau est au moyen d'un Diagramme de Piper. Ce diagramme permet de classer le type

d'eau selon son chemin d'écoulement à partir des zones d'alimentation pour les points de décharge principalement par trois (quatre) zones du diagramme.

Trois des échantillons d'eaux souterraines montrent des concentrations de nitrate au-dessus de 50 mg/l, un au-dessus de 100 mg/l et quatre au-dessus de 10 mg/l. Considérant que la pollution en nitrate est induite par l'homme et non pas naturellement produite, cet anion peut être écarté. Le Diagramme de Piper résultant pour les 76 échantillons d'eaux souterraines sans prendre en compte la concentration en nitrate est présenté sur la Figure 23, celui pour les sept échantillons d'eau de surface sur la Figure 24.

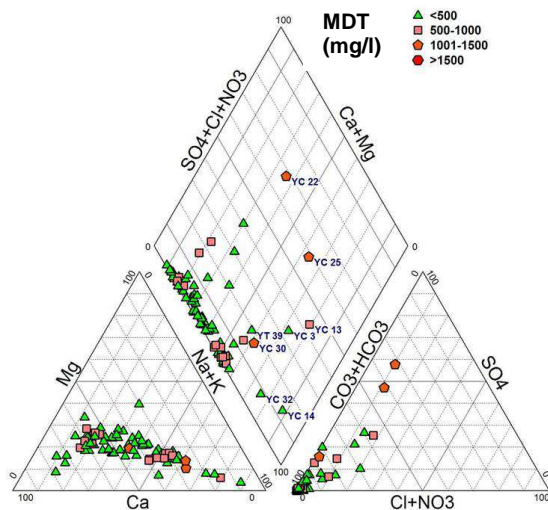


Figure 23 Diagramme de Piper d'échantillons d'eau souterraine sans considérer le nitrate.

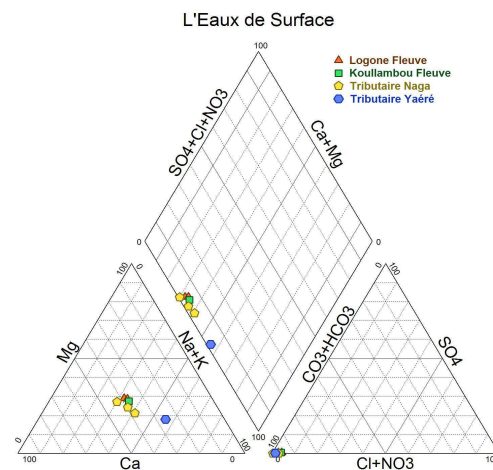


Figure 24 Diagramme de Piper pour les échantillons d'eau de surface

La Figure 23 montre que la plupart des échantillons (64%) sont de type calcium et magnésium de bicarbonate. Cette eau est faiblement minéralisée, ce qui est vrai pour les eaux souterraines obtenues près de la zone d'alimentation. Les échantillons correspondants ont été pris dans les zones nord de Bongor et entre Katoa et Logone Gana, où le fleuve Logone éclate au-dessus de ses lits dans les plaines de Yaéré et de la Naga. La basse minéralisation en eaux souterraines est le résultat de la recharge directe de l'eau de surface.

En outre 16 échantillons (21%) situés près du Logone et dans la Plaine d'inondation sont à la lisière entre le type bicarbonate-calcium-magnésium et le type bicarbonate-sodium-potassium.

Neuf échantillons (12%) s'étendent dans le secteur de soude bicarbonatée et de potassium du Diagramme de Piper. Cette eau est rechargée relativement il y a bien longtemps et a parcouru une certaine distance dans la couche aquifère pour permettre au sodium de remplacer le calcium. Des échantillons ont été pris à l'ouest et au sud du barrage de Maga au Cameroun (YC 3 Dama, YC 13 Badadaye, et YC 14 Andirni), le long du fleuve Logone près de Logone Gana (YT 22 Logone Gana Hôpital, YT 39 Douvoul), et dans l'extrême nord du Cameroun (YC 27 Kiniboya, Al-Krenic de YC 30, Al-Alak II de YC 32).

Les eaux de surfaces du fleuve Logone et de la Kouilambou aussi bien que l'eau de surface à l'intérieur de la plaine de Naga (voir figure 24) sont de type calcium et magnésium de bicarbonate avec des quantités insignifiantes de sodium et de potassium. L'eau de surface dans la plaine de Yaéré diffère des autres échantillons d'eau de surface puisqu'une partie du calcium a été échangée par le sodium. La raison de cet échange sera étudiée plus loin.

Un échantillon d'eau (YC 25 Amfara) est de type sulfate-bicarbonate-sodium-potassium (voir figure 25) et correspond à l'eau fortement minéralisée dans les régions situées loin de la

zone de recharge. Le long du chemin dans le sous sol l'échange ionique s'est produite et le calcium a été remplacé par le sodium tandis que le bicarbonate par le sulfate.

Il y a également un échantillon (YC 22 Lacta) de type sulfate-calcium (voir figure 25) pour lequel seul le bicarbonate a été changé par le sulfate.

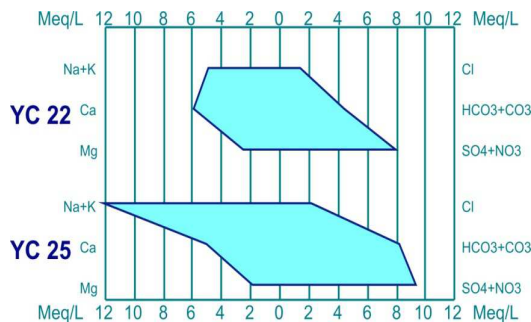
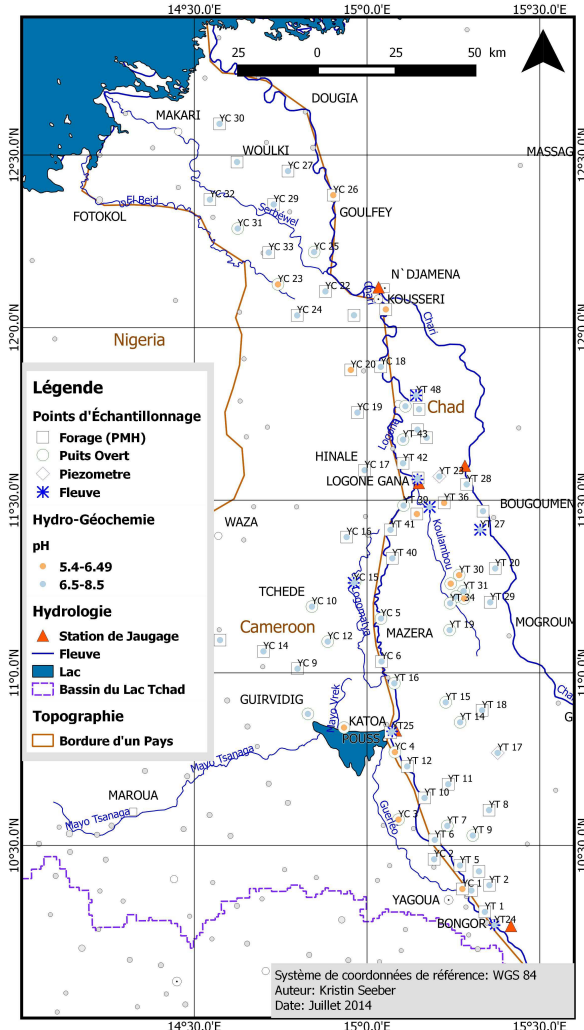


Figure 25 Diagramme de Stiff pour les échantillons YC 22 and YC 25

4.2.3 pH



Selon les normes de l'OMS, l'eau de boisson devra avoir une teneur en pH entre 6.5 et 9.5, bien que le pH n'ait pas d'impact sur la santé des consommateurs (OMS, 2008).

Les teneurs pH moyennes des échantillons d'eaux souterraines et d'eau de surface sont autour de la neutralité. Ils s'étendent entre 5.4 et 8 pour les eaux souterraines et 7.2 à 8.2 pour l'eau de surface. La teneur la plus basse de 5.4 a été observée dans YC 3 un puits ouvert dans Dama situé au sud du barrage de Maga au Cameroun. Un total de 13 échantillons d'eaux souterraines (26%) montre une teneur pH plus basse que 6.5, bien que seul YC 3 une teneur en-dessous de 6.

La Figure 26 montre la distribution en pH dans la zone d'étude.

Figure 26 Carte de distribution du pH dans la zone d'étude

4.2.4 Fluorure

Le fluor est exigé en petites quantités (1 à 3 mg/jour) pour la prévention de caries dentaires et du bon développement des os (OMS, 2008). La plupart du fluor est ingéré dans l'eau potable comme ion de fluorure dissocié. Pourtant, l'ingestion élevée de fluorure est la cause des maladies endémiques comme la fluorose dentaire et la fluor-ostéosclérose. Donc, en supposant qu'un adulte consomme 2ltrs d'eau potable par jour, l'ingestion du fluorure ne devrait pas excéder 3 mg/jour (signifiant que l'eau ne devrait pas avoir une concentration au-dessus de 1.5 mg/l) (OMS, 2008).

Comme rapporté dans les études précédentes Vassolo et Daïra (2012), les concentrations élevées entre 0.5 mg/l et 1.5 mg/l de fluorures dans la cuvette tchadienne ont été observées, parmi d'autres, le long du fleuve Logone (au sud de Bongor) et le long du fleuve Chari au nord de 11° parallèle Nord. Ces concentrations élevées ont été expliquées par un soulèvement du bas vers le haut de l'eau du sous-sol dans l'aquifère quaternaire peu profond, puisque le fleuve Logone coule le long des caractéristiques structurales.

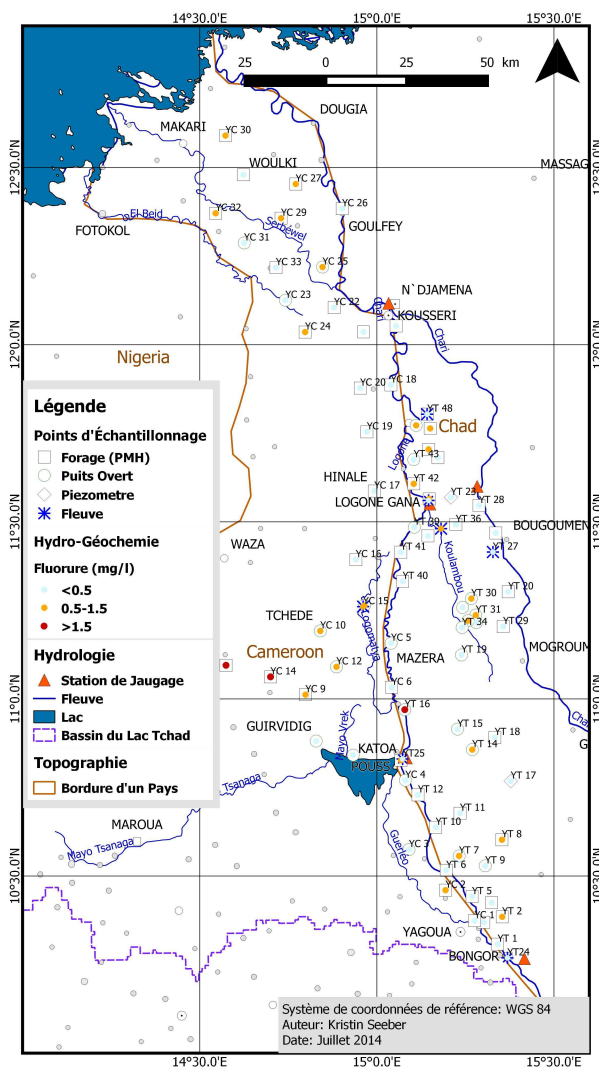


Figure 27 Carte de concentrations de fluore en mg/l dans la zone d'étude

Fantong et al. (2010) ont étudié la concentration de fluorure dans le bassin versant des eaux souterraines du fleuve Mayo Tsanaga, qui est adjacent à la présente zone d'étude. Ils ont trouvé des concentrations de fluorure en dessus de la limite de l'OMS dans environ 26.7 % (n=26) des puits échantillonnés, qui ont été reliés à la présence de minéraux enrichis de fluorure comme le Mica et la Fluorapatite dans l'aquifère du socle cristallin. Sur la base du fait que la consommation d'eau potable est plus élevée dans des régions arides, Fantong et al. (2009) ont proposé pour le bassin versant du Mayo Tsanaga avec une température moyenne de l'air de 28,7°C, une dose optimale de fluorure dans l'eau de boisson de 0,6 mg/l à 0,7 mg/l.

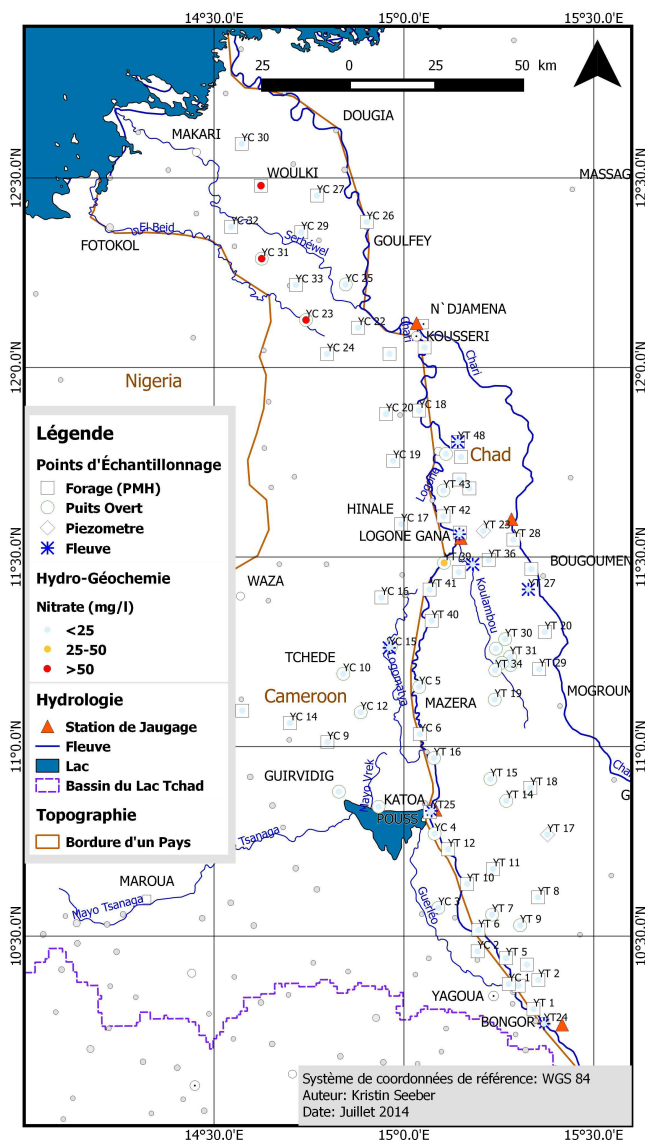
Pour plus d'informations sur l'origine de fluorure dans les eaux souterraines se référer à Vassolo et à Daïra (2012).

Excepté pour trois échantillons des eaux souterraines, les concentrations de fluorure mesurées dans la zone d'étude sont en dessous de la limite de l'OMS (figure 27). Une teneur de 1.9 mg/l a été détectée à Badadaye au Cameroun (YC13). Les teneurs de 1.68 mg/l et de 1.54 mg/l ont été trouvées à Andirni (YC14) et à Dabloum (YT16), respectivement. Néanmoins, les concentrations au-dessus de 0.5 mg/l ont été détectées dans 31% des échantillons des eaux souterraines.

4.2.5 Nitrate

Les concentrations élevées de nitrate dans les eaux souterraines sont généralement un indicateur de contamination de la nappe à cause de l'utilisation inadéquate d'engrais, de structures d'hygiène défectueuses ou l'évacuation directe des eaux usées ou le dépôt des fèces humaines et animales. Jusque là, les concentrations élevées de nitrate naturellement induites, à cause de la minéralisation de matières organiques du sol accumulées durant les périodes humides par le passé, ont été rapporté de régions arides et semi-arides en Afrique aussi (Stadler et al., 2008).

La haute concentration de nitrate est considérée comme cancérigène pour les personnes adultes, si l'exposition est permanente. Il est aussi connu comme la cause pour la soi-disant «maladie de bébé bleu», en raison de la capacité de transport d'oxygène diminuée d'hémoglobine chez les bébés qui cause l'asphyxie à cause du manque d'oxygène dans le sang. Pour cette raison, la limite supérieure acceptée par la norme de l'OMS est fixée à 50 mg/l (exprimé comme le nitrate NO_3^-). Pourtant, la norme de l'UE considère une concentration de 25 mg/l comme la figure à partir de laquelle les mesures de protection des eaux souterraines devraient être adoptées (Vassolo et Daïra, 2012).



Les enquêtes précédentes BGR ont rapporté différentes sources de contamination par les nitrates dans le Bassin du Lac Tchad (Vassolo et Daïra 2012). Vers le nord de 12° de latitude nord, la pollution est probablement due à l'abreuvement du bétail directement du puits conduisant à l'accumulation de déjections animales à proximité de celui-ci. Dans le sud du Tchad, l'agriculture est la principale activité, en particulier la culture du coton et du riz. La pollution élevée pourrait être un effet de l'utilisation excessive d'engrais azotés.

Dans la zone d'étude, seule trois échantillons montrent des concentrations de nitrate supérieures à la limite de l'OMS (voir Figure 28). Ils ont été trouvés dans le nord du Cameroun YC28 (forage à Woulki), YC31 (puits ouvert à Goulmi Haran) et YC23 (puits ouvert à Tilde). Au nord de Bongor, à proximité du champ de riz Casier B, de concentrations élevées de nitrate n'ont pas été détectées. Malheureusement, aucun échantillon n'a été prélevé dans les zones agricoles irriguées près du barrage de Maga (zone du projet SEMRY).

Figure 28 Carte de concentrations de nitrate en mg/l dans la zone d'étude

4.2.6 Sulfate

Le Sulfate dans l'eau ne cause pas de problème sérieux de santé, mais des concentrations de sulfate supérieures à 250 mg/l donnent un goût amer à l'eau. De très fortes concentrations au delà de 1000 mg/l, pourraient avoir d'effets laxatifs sur des consommateurs inhabituels. L'OMS n'a placé aucune limite sur les effets de santé pour cet anion, mais une concentration de 500 mg/l est suggérée comme limite supérieure.

Dans cette étude, les concentrations élevées de sulfate de 250 mg/l, mais en dessous de 500 mg/l, ont été détectées dans deux échantillons dans le nord Cameroun (dans un forage YC22 à Lacta et dans un puits ouvert YC25 à Amfara). Les deux échantillons présentent des concentrations élevées de chlorure et de sodium.

Dans des études antérieures, des concentrations élevées de sulfate dans les échantillons des eaux souterraines ont été entre autres trouvées au sud est et à l'est du Lac Tchad, les régions sont aussi caractérisées par des concentrations élevées de chlorure et de sodium qui est le résultat d'une faible conductivité hydraulique de l'aquifère qui conduit à une faible vitesse de débit ou à un temps élevé de séjour des eaux souterraines dans l'aquifère (Vassolo & Daïra, 2012). Des études supplémentaires sont en cours pour identifier la source de hautes concentrations de sulfate dans ces zones.

4.2.7 Baryum

Le baryum dans les eaux souterraines vient principalement des sources naturelles telles que les roches plutoniques de type granit, les roches ignées et volcaniques alcalines et les roches riches en manganèse. La solubilité des composés de baryum augmente avec la diminution de teneurs en pH. Il n'y a aucune preuve que le baryum est cancérigène, mais il a été démontré qu'il possède un effet potentiel sur la tension artérielle de l'homme à faible concentration. Ainsi, une directive en teneur de 0,7 mg/l a été mise sur pied par l'OMS pour l'eau potable (OMS 2008).

Les analyses dans cette étude révèlent deux échantillons avec des concentrations de baryum au delà de la limite suggérée par l'OMS. L'un peut être trouvé à Malfana (YT46), qui est situé dans la plaine de Naga à l'est de Logone Gana. L'eau de ce puits ouvert montre aussi une concentration élevée de manganèse de 1.1 mg/l. L'autre teneur a été détectée à Tchede (YC10) un village situé à l'intérieur de la plaine de Yaéré.

4.2.8 Aptitude à l'Irrigation

Les aspects de qualité de l'eau pour l'irrigation qui méritent une attention comprennent entre autre la teneur en sel, la concentration en sodium, la présence et l'abondance des macro- et micro élément nutritifs et les oligo-éléments, l'alcalinité, l'acidité, et la dureté de l'eau (pour plus d'information détaillée se référer à Vassolo & Daïra, 2012).

Pour définir l'eau souterraine convenable à l'irrigation, trois différents indexes ont été utilisés: Wilcox (Wilcox, 1948), Le Taux d'Absorption de Sodium (TAS) (Richards, 1954) et le Risque de Magnésium (RM) (Szabolcs & Darab, 1964).

Table 1 Indexes d'aptitude à l'Irrigation

Wilcox	TAS	MH
Le pourcentage du sodium dans les cations (comme Na en pourcentage) est calculé et relié au EC dans $\mu\text{S/cm}$.	Le <i>TAS</i> évalue le risque de sodium en relation à la concentration de calcium et du magnésium.	Le MH évalue le montant de magnésium comparé au calcium
$\text{Na}\% = \frac{\text{Na}^+ + \text{K}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+} * 100$	$\text{TAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}}$	$\text{MH} = \frac{\text{Mg}^{2+}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}} * 100$
	S1 (0-10) Risque de sodium faible S2 (10-18) haut risque sur les sols a fine textures S3 (18-26) effets nuisibles sur la plupart des sols S4 (>26) non satisfaisant pour l'irrigation	MH > 50 est considéré nuisible et inconvenable pour l'irrigation

Wilcox

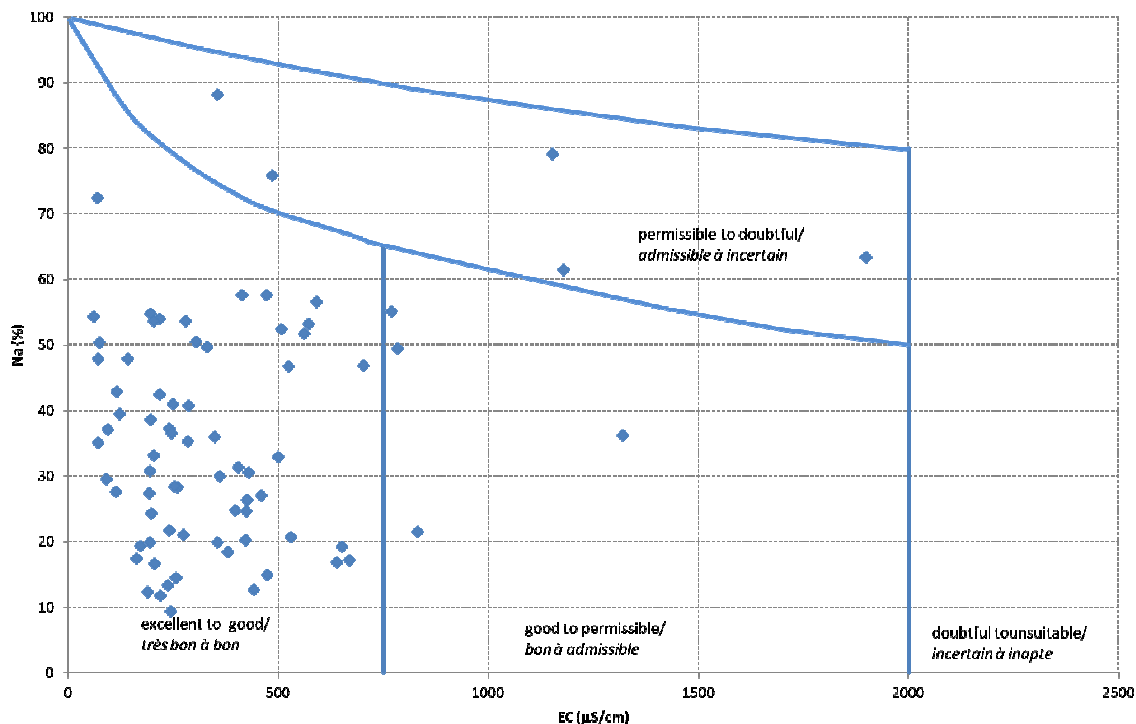


Figure 29 Carte de Wilcox pour évaluer la convenance pour l'irrigation des eaux souterraines

Après le risque d'irrigation Wilcox, 93.5% des échantillons d'eaux souterraines sont excellents à permmissible pour l'irrigation. Cinq échantillons sont permmissibles à douteux: YC13 à Badadaye et YC14 à Andirni sur les pieds des monts Mandara, aussi bien que YC25 à Amfara, YC30 à Al-Krenic, et YC32 à Al-Alak II, tous situés dans l'extrême nord du Cameroun près du Lac Tchad (Figure 29).

TAS

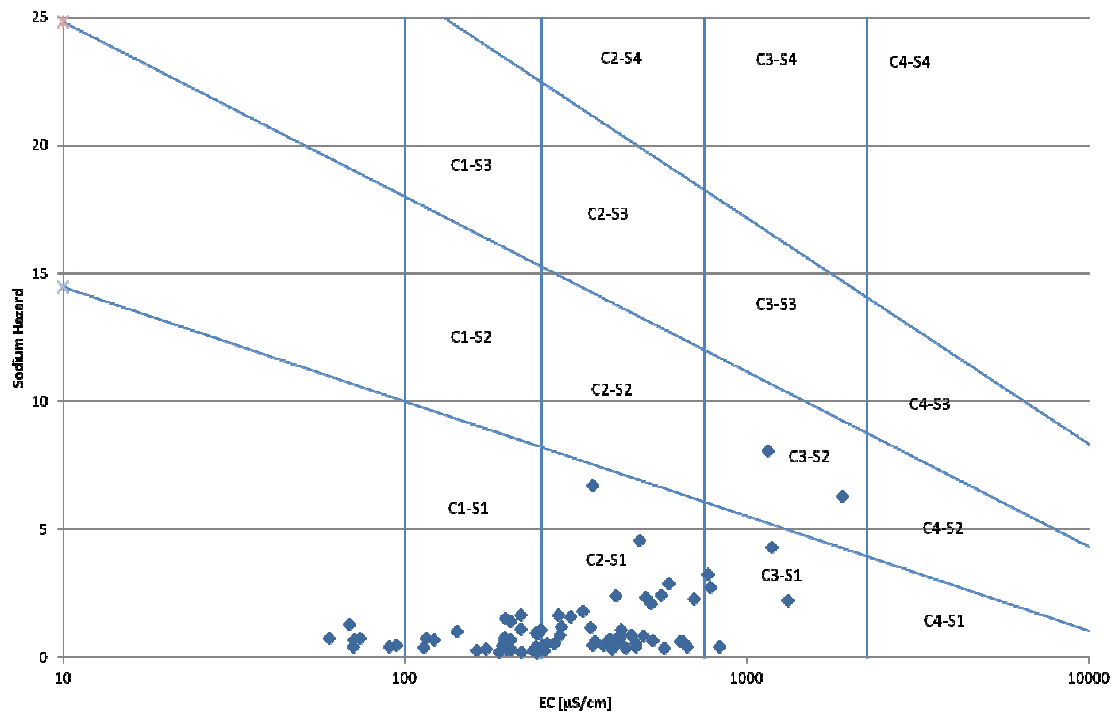


Figure 30 Tableau SAR pour évaluer la convenance pour l'irrigation des eaux souterraines

Le taux calculé d'absorption de sodium a indiqué que les eaux souterraines dans YC25 à Amfara et YC13 à Badaye montrent un risque moyen de sodium (Figure 30).

Risque de Magnésium

Seul un forage YT40, situé à Holom près du fleuve Logone, montre une teneur en MH de 56 (Mg = 11.7 mg/l) et est par conséquent considéré inapproprié pour l'irrigation.

Chlorure et Bore

Les concentrations de chlorure de tous les échantillons des eaux souterraines analysés sont tous en deçà de 150 mg/l et par conséquent non toxiques. Les concentrations de bore sont aussi en dessous de la limite de toxicité de 1 mg/l.

La Figure 31 présente une carte de pertinence des eaux souterraines pour l'irrigation prenant en compte tous les trois paramètres.

Les points bleus clairs indiquent les points d'eau où l'eau est idoine à l'irrigation pour trois indices prises en considération. Les points oranges correspondent aux points d'eau où l'eau est classifiée impropre par l'une des méthodes. Les points rouges montrent les points d'eau classés impropres par au moins deux des méthodes.

L'eau souterraine est impropre à l'irrigation à Badadaye (YC13) et à Amfara (YC25).

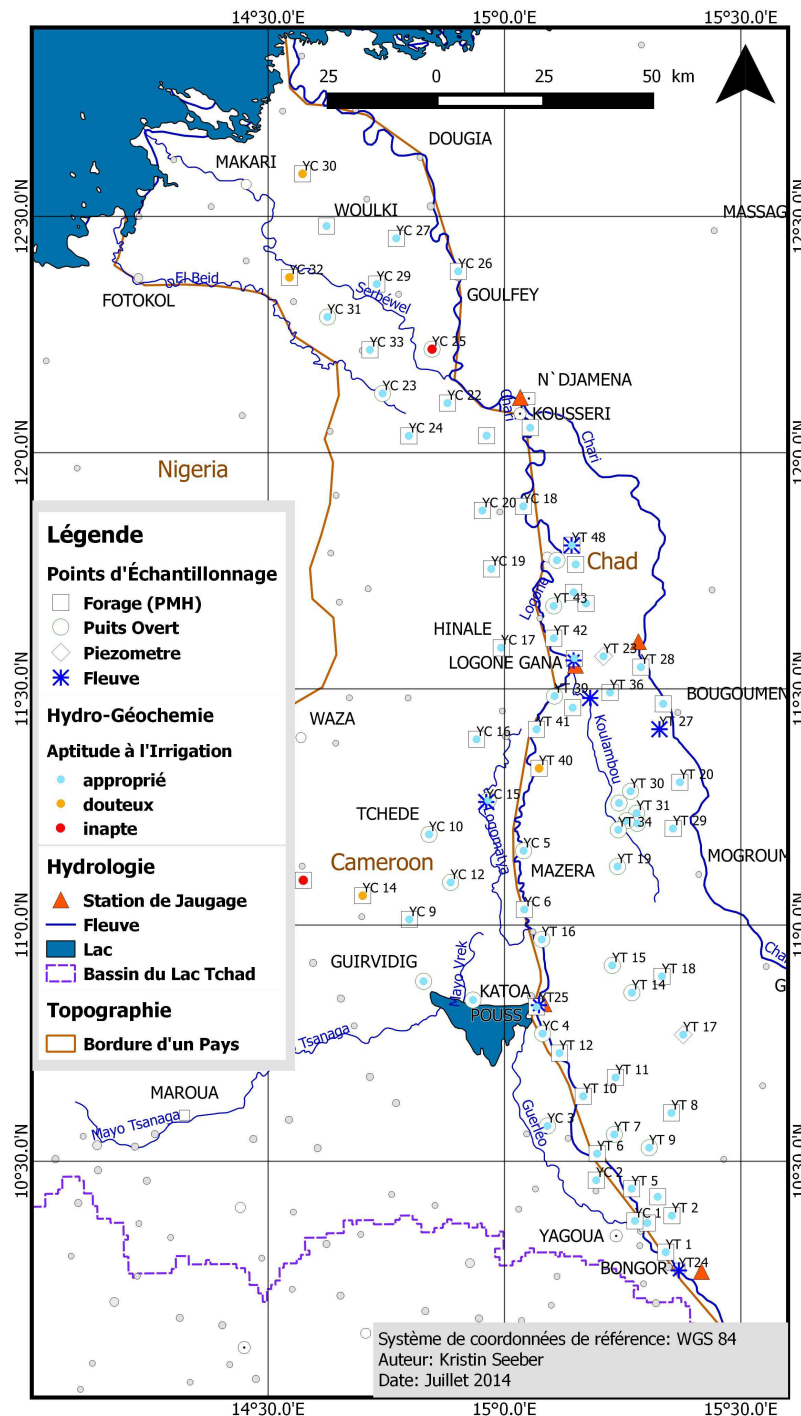


Figure 31 Carte de pertinence des eaux souterraines pour l'irrigation prenant en compte les trois indexes d'aptitude à l'irrigation (Wilcox, SAR et MH indexes)

4.3 Analyse Isotopique

La composition des isotopes environnementaux oxygène-18 (^{18}O) et deutérium (^2H) dans l'eau a été soumise à une modification par processus météorologiques. Par conséquent l'eau de recharge dans un environnement particulier possède une caractéristique signature isotopique qui sert comme traceur naturel pour la provenance de l'eau souterraine.

Une molécule d'eau est composée de deux atomes d'hydrogènes et d'un atome d'oxygène, écrit généralement H_2O . En raison de différents nombres de neutrons au noyau des ses atomes d'hydrogène et d'oxygène, la molécule d'eau possède différents poids atomiques ou la 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, particulièrement dans un événement de précipitation, généralement les gouttes avec des fortes molécules tendent à tomber plus tôt tandis qu'en revanche pendant l'évaporation, les molécules plus légères tendent à partir en premier. Ces effets peuvent être utilisés pour définir l'influence d'évaporation en eau de surface et en eau souterraine.

Comme précédemment décrit dans le rapport de Vassolo 2010 les mesures du rapport absolu des isotopes exigent un équipement sophistiqué de spectrométrie de masse et mesurer les valeurs absolues sur une base courante introduirait des difficultés dans la comparaison des résultats de différents laboratoires. C'est pourquoi les résultats sont toujours exprimés comme la différence entre les rapports mesurés pour l'échantillon donné et celui d'une référence au-dessus du rapport mesuré de la référence (la même procédure est valable pour l'hydrogène) :

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

Les valeurs δ sont normalement exprimées comme les parties pour mille (‰) les différences de la référence, puisque les processus de fractionnement ne révèlent de grandes variations dans les concentrations isotopiques (Clark & Fritz, 1997).

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

EMEM représente l'Etalon Moyen de l'Eau de Mer, la référence qui est employée dans ce cas. La valeur $\delta^{18}\text{O}$ qui est positive, ex. +5‰ signifie qu'il a 5 pour mille ou 0.5 % plus ^{18}O que la référence ou il est enrichi par 5‰. Un échantillon qui est épuisé de la référence par ce montant sera exprimé par $\delta^{18}\text{O} = -5\text{‰}$ EMEM (Clark & Fritz 1997).

Les résultats des compositions isotopiques de tous les échantillons d'eau souterraine et de surface sont présentés dans la Figure 32 ci-dessous. Ensuite, la ligne d'eau locale qui correspond à l'eau pluviale de N'Djamena fournie par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) est présentée. En plus, les trois compositions isotopiques d'au moins quatre événements d'eaux pluviales d'août à début septembre 2013 à N'Djamena ont été ajoutées.

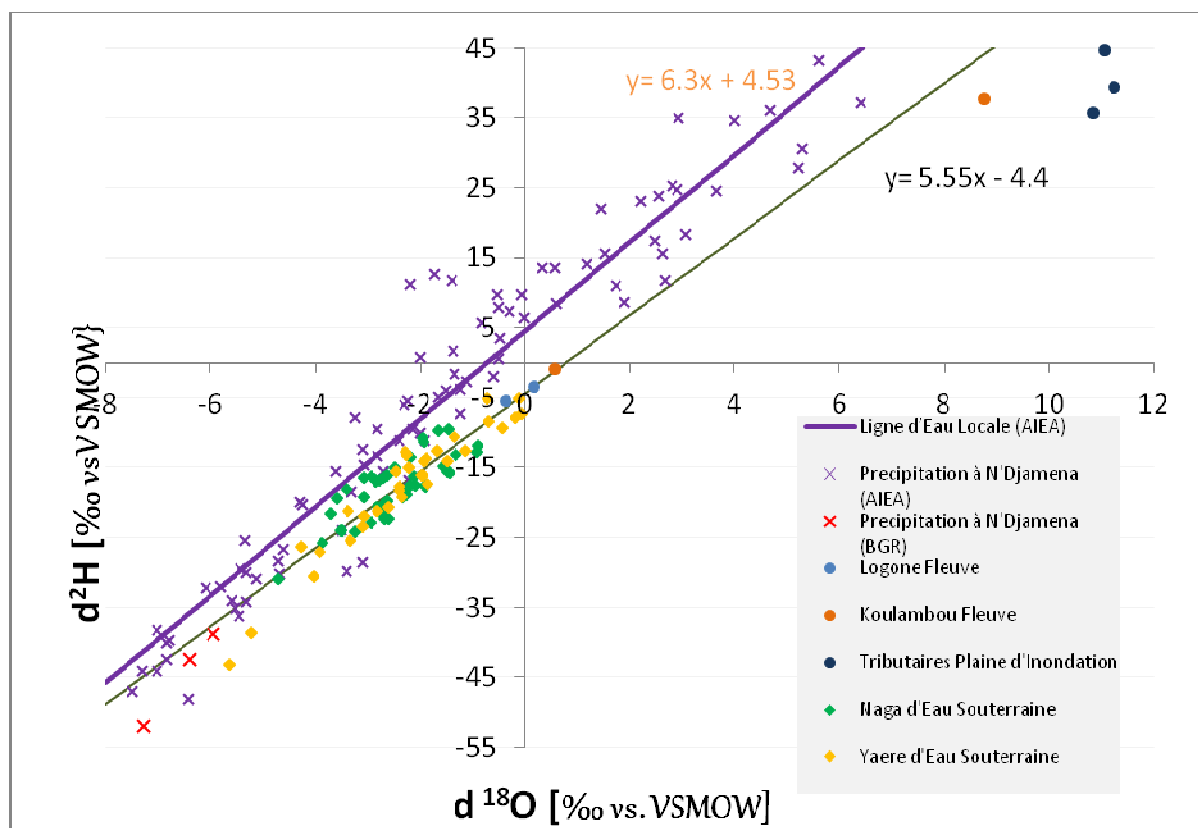


Figure 32 Résultats pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ d'eau souterraine, l'eau de surface et l'eau pluviale

Toutes les données en eau souterraine se trouvent au dessus de la ligne d'eau locale (ligne orange) et la droite de tendance des échantillons d'eaux souterraines a une pente plus petite que celle de ligne d'eau locale. C'est une indication de l'évaporation d'eau qui a lieu avant que l'eau pluviale recharge l'eau souterraine. Dans les plaines de Yaéré et de la Naga l'eau des crues et l'eau pluviale se reposent plus de trois mois dans la zone inondable et sont alors exposées à l'évaporation. En outre, il peut être identifié que les échantillons d'eau de surface des affluents situés à l'intérieur de la zone inondable possèdent des données isotopiques très enrichis (points bleus foncés sur le point supérieur droit du graphique), qui est une indication de lourds processus d'évaporation. Les compositions isotopiques du fleuve Logone à Bongor et Katoa (points bleus clairs) aussi bien que le fleuve Koulambou à Logone Gana (point orange) sont enrichies, bien que moins que les affluents, et montrent également des impacts d'évaporation. L'impact d'évaporation augmente avec l'augmentation de la voie d'écoulement de l'eau du Logone.

Les trois échantillons d'eau pluviale de N'Djamena (croix rouges) se trouvent dans la marge des échantillons d'eau pluviale obtenus de l'AIEA.

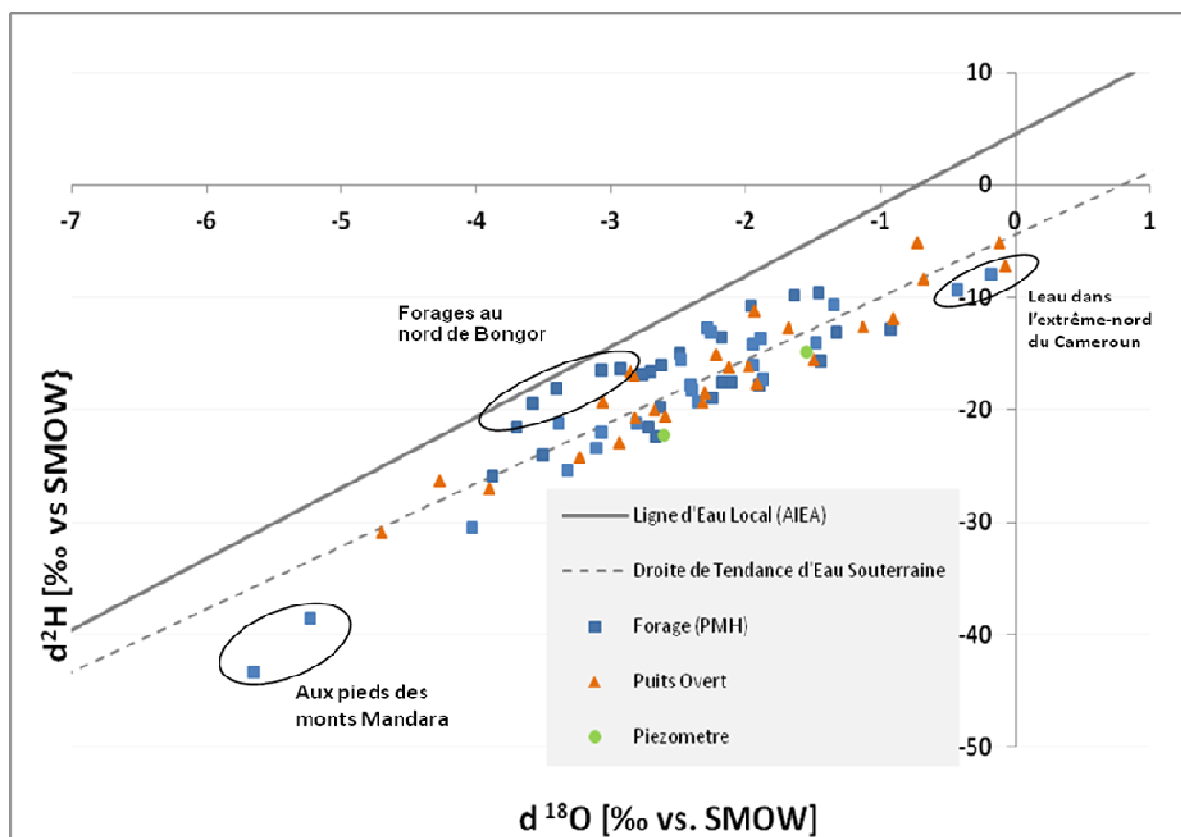


Figure 33 Résultats pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ de tous les échantillons d'eau souterraine

Les résultats pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ des échantillons d'eau souterraine sont présentés sur la Figure 33. Les eaux souterraines épuisées apparaissent à Badadaye YC13 et à Andirni YC14 dans la partie sud de la zone d'étude aux pieds des monts Mandara indiquant soit une recharge immédiate des eaux de précipitation ou d'une eau très ancienne. Dans une ancienne étude par Ngatcha et al., 2007 qui a étudié la dépression piézométrique dans le sud de la Plaine de Yaéré il a été démontré que les eaux souterraines plus profondes d'Andirni, situées dans l'axe de la zone de dépression, appartiennent à une ancienne eau souterraine avec une teneur en tritium en dessous de 4 UT. Au contraire l'eau dans les couches aquifères peu profondes à la lisière de la zone de dépression, par exemple à Guirvidig et Zina, montre des teneurs en tritium supérieur à 4 UT, elle est ainsi une eau récente.

De plus, on peut voir que les puits ouverts se trouvent le long de la droite de tendance et tous reçoivent ainsi la recharge par l'eau qui a connu d'évaporation. Les puits ouverts à l'intérieur de la plaine ont seulement une profondeur d'environ 2 à 12 m et l'eau analysée a été probablement rechargée par l'eau se tenant dans la zone inondable durant la saison des pluies. Dans le cas des forages on peut observer une combinaison de recharge avec et sans l'eau évaporée, ex. la recharge sans l'eau évaporée peut être trouvée au nord de Bongor près du fleuve Logone (YT 10, YT 3, YT 5, YT 1 et YT6). La recharge par l'eau qui connaît une évaporation dépend probablement de la distance des fleuves.

En outre, l'eau enrichie détectée dans YC 7 Maga. L'eau souterraine à Maga est sûrement rechargée par le lac de Maga qui connaît une évaporation due à la nappe d'eau libre.

La partie nord de la zone d'étude montre aussi une composition isotopique enrichie. Les eaux souterraines sont probablement le résultat d'un mélange de l'eau de la plaine d'inondation, du Lac Tchad et du fleuve Chari. Malheureusement, ni l'eau du Lac ni la zone adjacente au Lac Tchad n'ont été échantillonnées durant la période d'étude. Les anciennes études ont identifiés les teneurs $\delta^{18}\text{O}$ enrichies au sud du Lac Tchad dans la partie

tchadienne (à Guirbe) qui est probablement le résultat du recharge du Lac Tchad à l'aquifère.

Pour une meilleure compréhension des sources d'eau dans l'Extrême-Nord du Cameroun des études plus approfondies devront être menées.

La Figure 34 montre des teneurs de $\delta^{18}\text{O}$, par conséquent l'eau enrichie (rouge) ou épuisée (bleu) dans $\delta^{18}\text{O}$ de tous les lieux d'échantillon dans la zone d'étude.

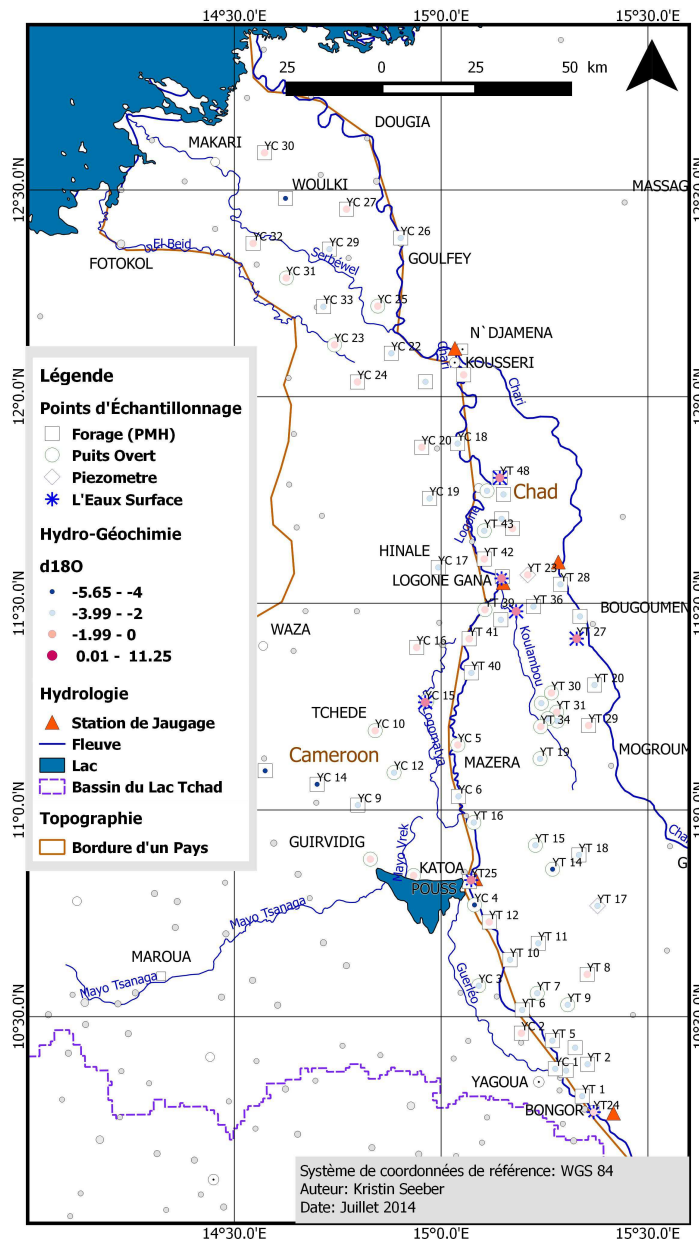


Figure 34 Cartes des teneurs $\delta^{18}\text{O}$ mesurées dans la zone d'étude

Les gros points rouges représentent les eaux de surface du fleuve Logone et ses affluents. Ainsi le Logone et ses affluents montrent de l'eau enrichie pendant la saison sèche à cause de l'influence de l'évaporation.

Les petits points bleus foncés représentent les eaux appauvries. Elles ont été mesurées dans la zone de dépression piézométrique qui jouxte les monts Mandara et indiquant la présence des eaux vieilles des profondes aquifères (voir Ngatcha et al., 2007).

En outre, les eaux appauvries dans $\delta^{18}\text{O}$ peuvent être détectées dans deux puits ouverts (YC3 Dama et YT14 Bizimou), situés vers Katoa et indiquant soit une recharge immédiate à partir de précipitations ou une très vieille eau probablement causée par l'eau ascendante à cause des structures géologiques. Les puits ouverts dans YT14 montrent aussi des hautes teneurs en fluorure lequel supporte cette hypothèse. Des investigations complémentaires sont nécessaires pour tirer une conclusion claire. L'échantillon appauvri dans l'Extrême Nord du Cameroun pourrait aussi être la raison des aquifères superposées et par conséquent l'eau vieillie.

Dans la Figure 35 qui suit, les teneurs $\delta^{18}\text{O}$ de la zone d'étude sont présentées avec la carte des cycles chronologiques des végétations obtenus par l'analyse de données satellite MODIS (voir chapitre 2).

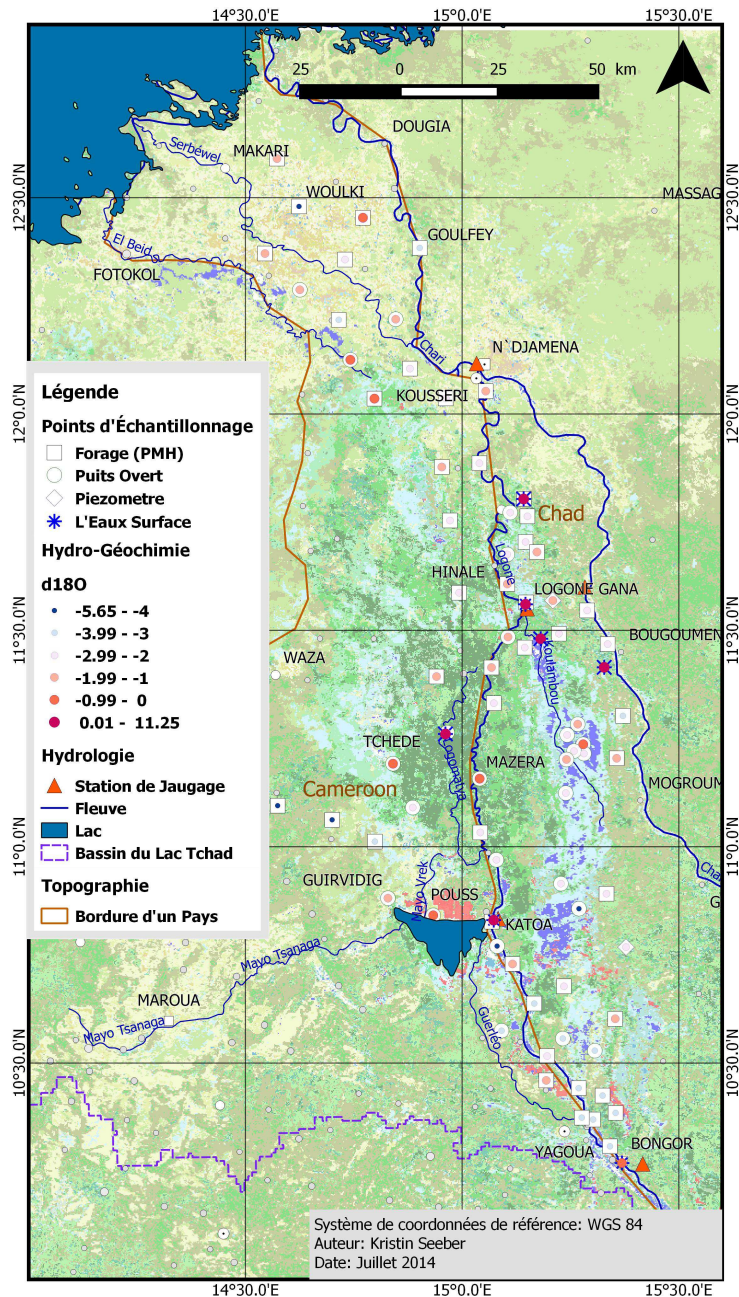


Figure 35 Carte montrant les cycles de végétation en 2012 par les moyens de données satellite MODIS (Geerken et al., 2012) et les teneurs $\delta^{18}\text{O}$ mesurées dans la zone d'étude

A partir de cette figure, on peut voir que les puits tubés et les puits ouverts situés dans la zone inondable vers le nord de Bongor montrent plus d'eau souterraine appauvrie que ceux situés dans la zone inondable entre Katoa et Bongor. Il est adopté comme hypothèse que les eaux souterraines près de et vers le nord de Bongor sont rechargées par la première inondation en septembre/octobre, tandis que les eaux souterraines entre Katoa et Logone Gana reçoivent la recharge en octobre à novembre de l'eau de surface exposée à l'évaporation en se tenant dans la zone inondable.

Les analyses isotopiques démontrent que le fleuve Logone interagit clairement avec les eaux souterraines adjacentes pendant la saison sèche. Dans le but de révéler un signal isotopique clair des eaux du Logone, des échantillonnages durant la saison des pluies seront nécessaires.

5 Conclusion et Recommandations

La recherche en eaux souterraines dans les plaines de Yaéré et de Naga visait à obtenir des informations sur l'origine des eaux souterraines et leurs circuits d'écoulement, la qualité de l'eau souterraine et l'eau de surface, ainsi que l'interaction des eaux souterraines entre le fleuve Logone et sa plaine d'inondation.

Les analyses hydro-chimiques montrent que la plupart des échantillons sont de type bicarbonate de calcium indiquant les eaux souterraines qui se trouvent à proximité de sa zone d'alimentation. En outre, les résultats hydro-chimiques et les courbes de niveau des eaux souterraines et l'information par satellite indiquent que l'eau de Logone recharge directement la région nord de Bongor. Il correspond à la zone où l'eau éclate sa bordure et se jette dans la plaine de Naga.

L'eau de type bicarbonate de sodium et de potassium et donc avec une certaine résidence au sein de l'aquifère permettant au sodium de remplacer le calcium, ont été détectés dans l'Extrême Nord du Cameroun, vers l'ouest et vers le sud du barrage de Maga et le long du fleuve Logone. Cela pourrait être le résultat des aquifères superposés qui sont différemment rechargés, tel que publié par Ngatcha et al., (2007) pour une région adjacente.

Les eaux souterraines dans l'Extrême Nord du Cameroun semblent être le résultat du mélange des eaux des fleuve Chari/Logone et du lac Tchad. Afin d'identifier clairement l'origine des eaux souterraines, plus d'études isotopes et hydrogéologiques doivent être menées. Il est nécessaire d'obtenir plus d'informations sur la géologie de la zone d'étude pour pouvoir établir une corrélation stratigraphique entre les eaux souterraines peu profondes extraites par puits ouverts et les plus profondes eaux souterraines extraites par forages.

L'analyse isotopique montre que la plupart des eaux souterraines dans la plaine d'inondation sont rechargées par l'eau de surface qui repose sur au moins 3 mois après la saison des pluies dans la plaine d'inondation, où elle connaît des processus d'évaporation.

En outre, les eaux souterraines du Quaternaire dans les plaines de Yaéré et de Naga sont de bonne qualité. L'indice Wilcox, MH et SAR montrent que les eaux souterraines, à l'exception de six endroits, sont adaptées pour l'irrigation.

La majorité des échantillons montrent la concentration de nitrate sous la limite de l'OMS, même si aucun échantillon le long des zones agricoles autour du Barrage de Maga n'ont été prises.

Il a été constaté que les puits tubés et ouverts sont mal protégés contre la pollution humaine et animale. Il est recommandé de sensibiliser la population au sujet des normes d'hygiène concernant les puits. Dans les 26 des villages visités aucun ne disposait de forage équipé de pompe à main et l'eau potable n'est que fournie par les puits ouverts. En outre, le village King King est uniquement équipé d'un piézomètre et l'eau de boisson doit être prélevée dans un ruisseau situé à une distance de quelques 3 km.

De fortes concentrations de fluorures ont été en partie détectées le long et à proximité du fleuve Logone. Du fait de graves problèmes de santé que peut causer le fluorure, il est recommandé que d'autres sources d'eau de boisson pour ces régions soient utilisées ou des unités de filtre soient installées pour réduire la teneur en fluorure.

Afin de produire une carte des courbes de niveau des eaux souterraines pour toute la zone d'inondation du Logone inférieur, les hauteurs de surface exacte de forages et des puits ouverts doivent être mesurées. En plus des informations déjà acquises concernant les eaux souterraines dans les plaines de Yaéré et de Naga, il est recommandé d'étendre les activités de recherche pour inclure les essais d'infiltration et les mesures de hauteurs des eaux dans la plaine d'inondation.

En résumé, ce rapport montre que le Logone inférieur interagit activement avec l'aquifère adjacent et par conséquent, il est recommandé de protéger les plaines de Yaéré et du Naga

vue la qualité et la quantité de ces eaux souterraines. Le fleuve Logone doit être préservé contre la pollution; et l'abstraction de l'eau par les deux pays membres devrait être réglementée de manière durable.

Références

- Biscaldi, R. 1970.** Carte Hydrogéologique de la plaine du Tchad Eaux souterraines Echelle: 1/200000 Notice Explicative. Yaoundé : BRGM, 1970.
- Brabant, P. et 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. et Fritz, P. 1997.** Environmental Isotopes in Hydrogeology. Florida, United States : Lewis Publisher, 1997.
- Detay, M.; Bernardi, A.; Emsellem, Y.; Pellegrini, G.; Vergnet, M.; Aubrac, G. et Borchellini, S. 2000.** Hydrogéologie - Atlas de la province extrême-nord Cameroun. Paris : IRD/MINRESI, 2000.
- Fantong, W.Y.; Satake, H.; Ayonghe, S.N.; Suh, E.C.; Adeana, S.M.A.; Fantong, E.B.S.; Banseka, H.S.; Gwanfogbe, C.D.; Woincham, L.N.; Uehara, Y. et Zhang, J. 2010.** Geochemical provenance and spatial distribution of fluoride in groundwater of Mayo Tsanaga River Basin, Far North Region, Cameroon: implications for incidence of fluorosis and optimal consumption dose. Environmental Geochemical Health 32. 2010, pp. 147-163.
- Geerken, R. 2009.** An algorithm to classify and monitor seasonal variations in vegetation phenologies and their inter-annual change. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2009, 64 (422-431).
- Geerken, R., Vassolo, S. et Schimmer, R. 2012.** Monitoring variations of Yaere Wetland to understand effects of inter-annual climate variations. IWRM Conference, Karlsruhe : s.n., 2012.
- Iyébi-Mandjek, O. 1997.** Carte Infrastructures - 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, 2000.
- Jung, H., Alsdorf, D., Moritz, M., Lee, H. et Vassolo S. 2011.** Analysis of the relationship between flooding area and water height in the Logone floodplain. Physics and Chemistry of the Earth. 2011, 36 (232-240).
- Ngatcha, N. 1993.** These: Hydrogéologie des aquifères complexes en zone semi-aride- Les aquifères quaternaires des Grandes Yaérés (Nord Cameroun). L'université Joseph Fourier - Grenoble I, 1993.
- Ngatcha, N.; Mudry, J.; Aranyossy, J.F.; Naah, E. et 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. 2007, pp. 29-43.
- Ngounou, N. 1993.** Thèse: Hydrogéologie d'aquifères complexes en zone semi-aride. Les aquifères quaternaires du Grand Yaéré (Nord Cameroun). I.R.G.M. Cameroun et U.J.F. Grenoble, 1993.
- Olivry, J.C. 1986.** Fleuves et rivières du Cameroun. coll. Monographies Hydrologiques n°9, 743p. Paris : Mesres-Orstom, 1986.
- Olivry, J.C. et Naah, E. 1986.** Carte Hydrologie - 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, 2000.
- Richards, L. A. 1954.** Diagnosis and improvement of saline alkali soils. Agriculture, . 1954, Washington D.C., Bde. Vol. 160, Handbook 60, US Department of Agriculture.
- Sambo, A. 2010.** Les cours d'eau transfrontaliers dans le Bassin du Lac Tchad: Accès, Gestion et Conflits (XIXe – XXe SIECLES); Chapitre IV Exploitation du fleuve Logone, Cooperation et Conflits entre le Cameroun et le Tchad. NGAOUNDERE, 2010.

- Schneider, J.L. 1969.** Carte Hydrogéologique de la république du Tchad 1/1500000. s.l. : BRGM, 1969.
- Schneider, J.L. et Wolff, J.P. 1992.** Carte Geologique et Carte Hydrogeologique 1/1500000 de la republique du Tchad Memoire Explicatif Vol. 1. Orléance, France : BRGM, 1992. N°209.
- Seeber, K. 2013.** 2nd Discharge Measurements at Chari, Logone and Koulambou Rivière, Chad Report N° 6. Hannover-N'Djamena : BGR-CBLT, 2013.
- Stadler, S.; Osenbrück, K., Knöller, K.; Suckow, A.; Sültenfuß, J.; Oster, H.; Himmelsbach, T. et Hötzi, H. 2008.** Understanding the origin and fate of nitrate in groundwater of semi-arid environments. Journal of Arid Environments. 2008, Bd. 72, 10.
- Szabolcs, I. et Darab, C. 1964.** The influence of irrigation water of high sodium carbonate content of soils. In: Proceedings of 8th International Congress of Isss. 1964, Bde. Trans, Vol.II, pp. 803-812.
- Torrent, H. 1966.** Carte Hydrogéologique de reconnaissance Bongor 1/500000. s.l. : BRGM, 1966.
- Vassolo, S. 2009.** Project Activities - Report N° 2. Hannover : BGR, 2009.
- Vassolo, S. 2010.** Project Activities - Report N° 3. Hannover, N'Djamena : BGR-CBLT, 2010.
- Vassolo, S. 2011.** Einfluss des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung im Tschadseebeckens. Warnsignal Klima, Kap. 3.1.4. Climate Service Center Germany, 2011. 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, 2012. 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. et Daira, D. 2012.** Project Activities - Report N° 4. Hannover-N'Djamena : BGR-CBLT, 2012. <http://www.bgr.bund.de/lcbc>
- WHO. 2008.** Guidelines for Drinking-water Quality - Third Edition Incorporating the First and Second Addenda. Geneva : World Health Organization, 2008.
- Wilcox, L.V. 1948.** The quality of water for irrigation use. . US Department of Agriculture Technology . 1948, Washington DC, Bd. Bulletin 962, vol. 40 pp. 1-40.

Annexes

Annexe 1 Liste des points de mesures du niveau d'eau souterraine

ID	Village	X	Y	Profondeur [m]	Niveau d'eau de la repère [m]	Repère [m]
YT 7	Biliam Oursi	15.2323	10.5567	11	9.2	0.43
YT 9	Moqa	15.3061	10.5287		8.8	0
YT 14	Bizimou	15.2695	10.8568	4	3.7	0
YT 15	Toul	15.2279	10.9146	4.5	3.8	0
YT 16	Dabloum	15.0790	10.9697	5.5	2.9	0
YT 17	Loutou Piezo	15.3781	10.7680	85	12.52	0.4
YT 19	Ouaye	15.2391	11.1240	3.1	2.4	0
YT 23	Kinq Kinq Piezo	15.2093	11.5689	62.3	6.2	0.5
YT 30	Yama	15.2700	11.2800	4.4	2.9	0
YT 31	Girli	15.2800	11.2400	4.5	4	0
YT 32	Kolomara	15.2800	11.2200	4.15	3.73	0
YT 33	Bayem	15.2600	11.2200	3.75	3.22	0
YT 34	Bogom	15.2400	11.2000	3.15	2.1	0
YT 35	Birim	15.2400	11.2600	4.73	4.18	0
YT 39	Douvoul	15.1100	11.4800	8.9	7	0.78
YT 43	Zoumka	15.1000	11.6800	4.9	4.7	0
YT 46	Malfana	15.1100	11.7700	11.7	8.45	0.7
1	Goulmoun Bassi	15.3376	10.3095		2.43	0
2	Saka	15.3536	10.3852		3.93	0
3	Dounou	15.2690	10.4411		4.83	0
4	Koumi	15.1966	10.5156		5.18	0
5	Magao	15.3513	10.6038		7.25	0
6	Moqodi	15.1683	10.6386	7.06	4	0.8
7	Ourkila	15.2137	10.6636	4.5	4.29	0
8	Gouaye	15.1160	10.7284	4.2	3.76	?
9	Katoa	15.0743	10.8309		2.36	0
10	dialo	15.1385	10.9463	3	2.55	0
11	Djambal	15.0953	11.1399	3.95	3.5	0
12	Madoubou	15.3716	11.3019	12.8	11.24	0.74
13	Bougoumene	15.3339	11.4658	9.65	8.75	0.93
15	Loqone qana	15.1479	11.5596	8.69	6.25	0.8
17	Bulaboulin	15.3528	11.2057		9.62	0.2
18	Balqe	15.1947	11.4871	3.62	2.52	0
19	Holom	15.0684	11.3192	6.1	5	0.92
20	Ouldou Borno	15.1782	11.6580	12.83	9.92	0.82
YC 3	Dama	15.0900	10.5700	7.5	6.45	0.2
YC 4	Gaya	15.0800	10.7700	3.88	3.4	0.8
YC 5	Mazera	15.0400	11.1600	9.7	8.1	0.8
YC 7	Maqa	14.9300	10.8400	4.5	3.95	0.75
YC 8	Guividig	14.8300	10.8800	13.8	12.92	0.84
YC 10	Tchede	14.8400	11.1900	9.32	8.4	0.9
YC 11	Zina	14.9700	11.2600	8.95	7.55	0.9
YC 12	Dafen	14.8900	11.0900	10	9.46	0
YC 23	Tilde	14.7400	12.1300	20.5	13.55	0.7
YC 25	Amfara	14.8500	12.2200	12.8	11.72	0.72
YC 31	Haran Goulmi	14.6300	12.2900	23.5	20.36	0.7
21	Marao	15.2760	10.3739	5.12	4.05	0.85
22	Dabai II	15.1948	10.4587	4.54	2.83	0.34
24	Mahe Piezo	14.9413	11.3934	7.93	6.82	0.89
25	Bourqouma Mouzqoum	15.0394	11.8869	8.6	8.45	0.65
26	Loqone Birni	15.1039	11.7799	10.9	7.67	0.72
27	Merd?	14.9533	11.8783	8.8	7.85	0.32
28	Wourki	14.6224	12.4777	28	25.2	0.7
29	Zalat Nawara	14.7300	12.3564	15.8	15.12	0.68
31	Al-Alak	14.5451	12.3709	15.12	12.78	0.82
32	Ngame II	14.7144	12.2179		17.53	0.7

ID	Village	X	Y	Profondeur [m]	Niveau d'eau de la repère [m]	Repère [m]
33	Kousseri Ecole	15.0542	12.0517	8.7	7.64	0.43
23	Tschede Piezo	14.8407	11.1922	29.17	8.8	0.8
16	Matasi	15.3531	11.2057	~1.34	1.27	0
30	Haran Goulmi Piezo	14.6250	12.2846	73.83	20.26	0.55
27A	Goulfey	14.9014	12.4777	11.60	10.4	0.7

Annexe 2 Liste des points d'échantillons

Echantillon-ID	Village	X	Y	Type d'échantillon	Profondeur [m]	Date
YT 1	Goulmoun Bassi	15.3411	10.3076	puits tubé (pompe à main)		09.04.13
YT 2	Saka	15.3541	10.3848	puits tubé (pompe à main)		09.04.13
YT 3	Ogol	15.3021	10.3695	puits tubé (pompe à main)		09.04.13
YT 4	Téléme	15.3241	10.4249	puits tubé (pompe à main)		09.04.13
YT 5	Dounou	15.2689	10.4420	puits tubé (pompe à main)		10.04.13
YT 6	Koumi	15.1961	10.5161	puits tubé (pompe à main)		10.04.13
YT 7	Biliam Oursi	15.2323	10.5567	Puits ouvert	11	10.04.13
YT 8	Magao	15.3532	10.6023	puits tubé (pompe à main)		10.04.13
YT 9	Moga	15.3061	10.5287	Puits ouvert	Non mesuré	10.04.13
YT 10	Mogodi	15.1665	10.6376	puits tubé (pompe à main)		11.04.13
YT 11	Ourkila	15.2349	10.6774	puits tubé (pompe à main)		11.04.13
YT 12	Gouaye	15.1163	10.7290	puits tubé (pompe à main)		11.04.13
YT 13	Katoa	15.0682	10.8268	puits tubé (pompe à main)		11.04.13
YT 14	Bizimou	15.2695	10.8568	Puits ouvert	4	12.04.13
YT 15	Toul	15.2279	10.9146	Puits ouvert	4.5	12.04.13
YT 16	Dabloum	15.0790	10.9697	Puits ouvert	5.5	12.04.13
YT 17	Loutou	15.3781	10.7680	Piézomètre	85	13.04.13
YT 18	Guiao 2	15.3331	10.8913	puits tubé (pompe à main)		13.04.13
YT 19	Ouaye	15.2391	11.1240	Puits ouvert	3.1	14.04.13
YT 20	Madoubou	15.3710	11.3024	puits tubé (pompe à main)		14.04.13
YT 21	Bougoumene	15.3358	11.4683	puits tubé (pompe à main)		14.04.13
YT 22	Logone gana Hôpital	15.1478	11.5645	puits tubé (pompe à main)		15.04.13
YT 23	King King	15.2093	11.5689	Piézomètre	62.3	15.04.13
YT24	Bongor	15.3688	10.2690	Fleuve Logone		10.04.13
YT25	Katoa	15.0729	10.8304	Fleuve Logone		11.04.13
YT 26	Logone Gana	15.1461	11.5602	Fleuve Kouloumbou		15.04.13
YT 27	Loumia	15.3278	11.4146	Rivière		14.04.13
YT 28	Djougotoli	15.2885	11.5461	puits tubé (pompe à main)		29.04.13
YT 29	Matasi	15.3566	11.2044	puits tubé (pompe à main)		29.04.13
YT 30	Yama	15.2667	11.2832	Puits ouvert	4.4	30.04.13
YT 31	Girli	15.2794	11.2367	Puits ouvert	4.5	30.04.13
YT 32	Kolomara	15.2810	11.2153	Puits ouvert	4.15	30.04.13
YT 33	Bayem	15.2581	11.2210	Puits ouvert	3.75	30.04.13
YT 34	Bogom	15.2408	11.2016	Puits ouvert	3.15	30.04.13
YT 35	Birim	15.2423	11.2583	Puits ouvert	4.73	30.04.13
YT 36	Oudiya	15.2232	11.4923	puits tubé (pompe à main)		01.05.13
YT 37	Yaouri	15.1813	11.4806	Rivière		01.05.13
YT 38	Dogofe	15.1443	11.4602	puits tubé (pompe à main)		01.05.13
YT 39	Douvoul	15.1059	11.4847	Puits ouvert	8.9	01.05.13
YT 40	Holom	15.0731	11.3318	puits tubé (pompe à main)		01.05.13
YT 41	Gofa	15.0677	11.4142	puits tubé (pompe à main)		01.05.13
YT 42	Aouri	15.1042	11.6072	puits tubé (pompe à main)		02.05.13
YT 43	Zoumka	15.1042	11.6755	Puits ouvert	4.9	02.05.13
YT 44	Mouzoul kotoko	15.1463	11.7044	puits tubé (pompe à main)		02.05.13
YT 45	Ouldou Arabe	15.1726	11.6810	puits tubé (pompe à main)		02.05.13
YT 46	Malfana	15.1110	11.7722	Puits ouvert	11.7	03.05.13
YT 47	Hille Ziki	15.1506	11.7635	puits tubé (pompe à main)		03.05.13
YT 48	Goni	15.1426	11.8040	puits tubé (pompe à main)		03.05.13
YT 49	Kolomata	15.1419	11.8036	Rivière		03.05.13
YC 1	Marao	15.2760	10.3739	puits tubé (pompe à main)		16.05.13

Echantillon-ID	Village	X	Y	Type d'échantillon	Profondeur [m]	Date
YC 2	Dabai II	15.1941	10.4600	puits tubé (pompe à main)		16.05.13
YC 3	Dama	15.0909	10.5748	Puits ouvert	7.5	16.05.13
YC 4	Gaya	15.0807	10.7703	Puits ouvert	3.88	16.05.13
YC 5	Mazera	15.0404	11.1573	Puits ouvert	9.7	17.05.13
YC 6	Arainaba	15.0419	11.0329	puits tubé (pompe à main)		17.05.13
YC 7	Maga	14.9333	10.8414	Puits ouvert	4.5	17.05.13
YC 8	Guividig	14.8288	10.8811	Puits ouvert	13.8	17.05.13
YC 9	Zina Blang	14.7987	11.0119	puits tubé (pompe à main)		18.05.13
YC 10	Tchede	14.8404	11.1919	Puits ouvert	9.32	18.05.13
YC 11	Zina	14.9653	11.2638	Puits ouvert	8.95	18.05.13
YC 12	Dafen	14.8861	11.0905	Puits ouvert	10	19.05.13
YC 13	Badadaye	14.5743	11.0949	puits tubé (pompe à main)		19.05.13
YC 14	Andirni	14.7000	11.0622	puits tubé (pompe à main)		19.05.13
YC 15	Boromo	14.9614	11.2605	Rivière		20.05.13
YC 16	Mahe kotoko	14.9409	11.3933	puits tubé (pompe à main)		20.05.13
YC 17	Hinale	14.9930	11.5869	puits tubé (pompe à main)		20.05.13
YC 18	Bourgouma	15.0398	11.8863	puits tubé (pompe à main)		22.05.13
YC 19	Nbekle	14.9721	11.7539	puits tubé (pompe à main)		22.05.13
YC 20	Merdé	14.9531	11.8775	puits tubé (pompe à main)		22.05.13
YC 21	Ouaditouna	14.9622	12.0360	puits tubé (pompe à main)		22.05.13
YC 22	Lacta	14.8795	12.1049	puits tubé (pompe à main)		23.05.13
YC 23	Tilde	14.7421	12.1253	Puits ouvert	20.5	23.05.13
YC 24	Sahaba	14.7977	12.0356	puits tubé (pompe à main)		23.05.13
YC 25	Amfara	14.8468	12.2191	Puits ouvert	12.8	24.05.13
YC 26	Goulfey	14.9022	12.3839	puits tubé (pompe à main)		24.05.13
YC 27	Kiniboya	14.7711	12.4536	puits tubé (pompe à main)		24.05.13
YC 28	Wourki	14.6236	12.4797	puits tubé (pompe à main)		24.05.13
YC 29	Zalat Nawara	14.7298	12.3569	puits tubé (pompe à main)		25.05.13
YC 30	Al-krenic	14.5728	12.5902	puits tubé (pompe à main)		25.05.13
YC 31	Haran Goulmi	14.6255	12.2871	Puits ouvert	23.5	26.05.13
YC 32	Al-Alak II	14.5451	12.3709	puits tubé (pompe à main)		26.05.13
YC 33	Ngame II	14.7153	12.2176	puits tubé (pompe à main)		26.05.13
YC 34	Kousseri Ecole	15.0544	12.0528	puits tubé (pompe à main)		27.05.13

Annexe 3 Statistique des paramètres chimiques mesurés en échantillons d'eaux souterraines

Paramètre	Unité	Limite OMS	Moyenne	Min	Max	Ecart Type
pH		>6.5<8.5	7.0	5.4	8.0	0.5
CE	µS/cm	<1500	382.8	55.0	1898.0	309.1
T	°C		30.4	27.3	32.7	1.2
K	mg/l		8.2	0.9	101.0	15.5
Na	mg/l		31.5	4.4	270.0	44.3
Mg	mg/l		8.4	0.5	32.2	6.1
Ca	mg/l		33.0	2.2	121.0	23.9
Cl	mg/l		5.2	0.1	80.4	13.7
SO₄	mg/l	500	18.1	0.0	448.0	69.0
HCO₃	mg/l		207.3	22.2	650.0	129.9
NO₃	mg/l	50	5.1	0.0	101.0	15.7
NH₄	mg/l		0.1	0.0	1.1	0.2
NO₂	mg/l	3	0.1	0.0	1.4	0.2
PO₄	mg/l		7.8	0.0	7.8	7.8
F	mg/l	1.5	0.5	0.1	1.9	0.4
Fe(II)	mg/l		0.5	0.0	10.7	1.6
Al	mg/l	0.9	0.0	0.0	0.6	0.1
Mn	mg/l		0.2	0.0	1.6	0.3
Cu	mg/l	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0
Br	mg/l		0.0	0.0	0.4	0.1
As	mg/l	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr	mg/l		0.2	0.0	1.1	0.3
Cd	mg/l	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	mg/l	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	mg/l	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	mg/l	0.7	0.2	0.0	0.9	0.2
Zn	mg/l		0.1	0.0	1.6	0.2
SiO₂	Mg/l		64.0	29.3	106.0	22.0

Annexe 4 Statistique des paramètres chimiques mesurés en échantillons d'eau de surface

Paramètre	Unité	Limite OMS	Moyenne	Min	Max	Ecart Type
pH		>6.5<8.5	7.7	7.2	8.2	0.3
EC	µS/cm		160.1	64.0	307.0	98.3
T	°C		29.0	24.1	33.1	2.7
K	mg/l		5.9	2.2	10.8	3.5
Na	mg/l		11.6	3.5	29.5	9.9
Mg	mg/l		4.7	2.3	9.4	2.7
Ca	mg/l		12.1	5.0	25.3	7.7
Cl	mg/l		1.0	0.3	2.1	0.6
SO₄	mg/l	500	0.1	0.0	0.2	0.1
HCO₃	mg/l		97.6	37.5	193.0	62.0
NO₃	mg/l	50	0.2	0.0	0.8	0.3
NH₄	mg/l		0.1	0.0	0.6	0.2
NO₂	mg/l	3	0.5	0.0	1.8	0.8
PO₄	mg/l		0.09	0.03	0.15	0.04
F	mg/l	1.5	0.4	0.1	0.9	0.3
Fe(II)	mg/l		0.2	0.1	0.4	0.1
Al	mg/l	0.9	0.1	0.0	0.3	0.1
Mn	mg/l		0.03	0.00	0.14	0.05
Cu	mg/l	0.2	0.02	0.00	0.04	0.02
Br	mg/l		0.003	0.000	0.005	0.003
As	mg/l	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr	mg/l		0.15	0.07	0.29	0.09
Cd	mg/l	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	mg/l	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	mg/l	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	mg/l	0.7	0.1	0.1	0.2	0.1
Zn	mg/l		0.004	0.000	0.006	0.002
SiO₂	Mg/l		26.9	21.3	40.8	8.1