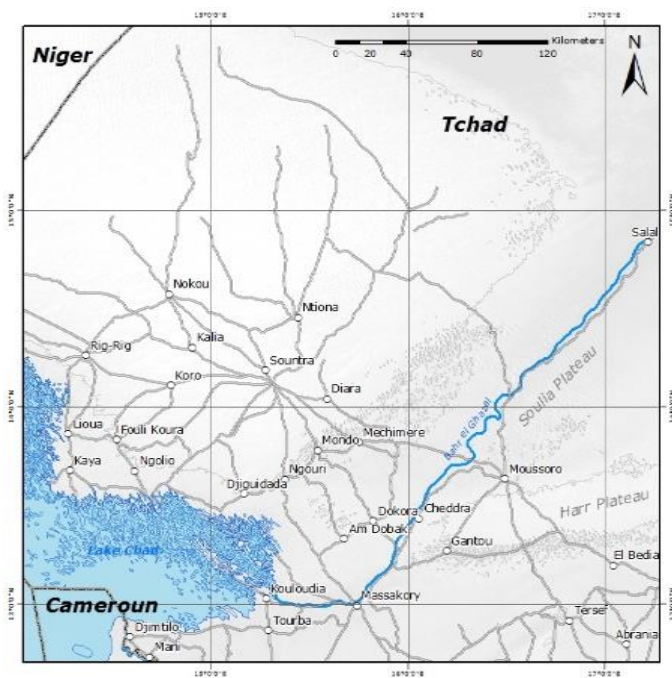


Bassin du Lac Tchad: Gestion Durable de l'Eau

Enquêtes sur la qualité des eaux souterraines dans les régions du Kanem et Bahr el Ghazal, Tchad



Hanovre, Décembre 2014

Rapport N° 8



Au nom de:



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe



Auteurs: Sara Vassolo, Kristin Seeber, Charlotte Wilczok

Co-Auteurs: Djoret Daïra, Aminu Magaji Bala, Abderramane Hamit

Commissionné par: Ministère Fédéral de la Coopération Economique et du Développement
(Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und
Entwicklung, BMZ)

Projet: Gestion Durable de l'eau du Bassin du Lac Tchad

BMZ-No.: 2010.2274.8

BGR-No.: 05-2355

ELVIS-link:

BGR-Archive No.:

Date: Décembre 2014

Table des Matières

| | |
|--|----|
| Résumé..... | 1 |
| 1. Introduction | 2 |
| 2. Zone d'étude | 3 |
| 2.1 Climat..... | 3 |
| 2.2 Géologie..... | 4 |
| 2.3 Cadre Hydrogéologique | 4 |
| 2.4 Utilisation des terres et population..... | 5 |
| 3. Méthodologie..... | 7 |
| 4. Résultats et Discussion | 8 |
| 4.1 Niveau statique des eaux souterraines | 8 |
| 4.2 Hydrogéochimie | 9 |
| 4.2.1 Total Solides Dissous – TDS (mg/l) | 9 |
| 4.2.2 Diagramme de Piper..... | 10 |
| 4.2.3 pH | 12 |
| 4.2.4 Sodium – Na (mg/l)..... | 13 |
| 4.2.5 Chlorure – Cl (mg/l)..... | 14 |
| 4.2.6 Sulfate – SO ₄ (mg/l)..... | 16 |
| 4.2.7 Fer – Fe (mg/l)..... | 17 |
| 4.2.8 Manganèse – Mn (mg/l)..... | 18 |
| 4.2.9 Fluorure – F (mg/l)..... | 20 |
| 4.2.10 Arsenic – As (mg/l) | 22 |
| 4.2.11 Aluminium – Al (mg/l) | 23 |
| 4.2.12 Cartographie de la pollution naturelle des eaux souterraines..... | 25 |
| 4.3 Composés d'azote | 26 |
| 4.3.1 Nitrate – NO ₃ (mg/l) | 26 |
| 4.3.2 Nitrite – NO ₂ (mg/l) | 27 |
| 4.3.3 Ammonium – NH ₄ (mg/l)..... | 27 |
| 4.3.4 Cartographie de la pollution induite par L'homme | 28 |
| 4.4 Evaluation de l'aptitude de l'eau souterraine pour l'irrigation | 29 |
| 4.4.1 Pourcentage de Sodium (Na%) | 29 |
| 4.4.2 Sodium Adsorption Ratio (SAR) | 31 |
| 4.4.3 Cartographie de l'aptitude des eaux souterraines à l'Irrigation..... | 32 |
| 4.5 Analyses Isotopiques | 33 |
| 4.5.1 Deutérium (² H) et Oxygen-18 (¹⁸ O)..... | 33 |
| 4.5.2 Tritium – ³ H (TU) | 35 |
| 4.5.3 Direction d'écoulement des eaux souterraines | 36 |

| | |
|---|----|
| 5. Conclusions et Recommandations | 38 |
| 6. Références..... | 40 |

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure 1. Bassin du Lac Tchad et la localisation de la zone d'étude | 3 |
| Figure 2. Canal et vanne pour l'irrigation avec l'eau du lac Tchad dans le polder de Bol (Photo: BGR) | 5 |
| Figure 3. Elevage des animaux par les nomades (Photos: BGR) | 6 |
| Figure 4. Localisation des points d'échantillonnages. Les points rouges correspondent aux échantillons de la première phase du projet, les triangles pour la seconde phase du projet. . | 7 |
| Figure 5. Les courbes équipotentielles des eaux souterraines sont tracées à l'aide des mesures in-situ du niveau statique et des altitudes à partir du modèle numérique du terrain ASTER | 8 |
| Figure 6. Distribution des solides dissous totaux (mg/l) dans les eaux souterraines de la zone d'étude | 9 |
| Figure 7. TDS en fonction des concentrations en sodium et sulfate..... | 10 |
| Figure 8. Diagramme de Piper pour les régions du Kanem et du Bahr el Ghazal. Les anions incluent le nitrate | 11 |
| Figure 9. Diagramme de Piper pour les régions du Kanem et du Bahr el Ghazal sans tenir en compte le nitrate dans l'analyse | 11 |
| Figure 10. Distribution des valeurs de pH des eaux souterraines dans la zone d'étude..... | 12 |
| Figure 11. Distribution de sodium (mg/l) dans la zone d'étude..... | 13 |
| Figure 12. Corrélation entre sodium et calcium au Kanem (gauche) et Bahr el Gazal (droite) | 14 |
| Figure 13. Distribution de chlorure (mg/l) dans la zone d'étude | 15 |
| Figure 14. Corrélation entre sodium et chlorure dans le Kanem (gauche) et Bahr el Gazal (droite)..... | 15 |
| Figure 15. Distribution de sulfate (mg/l) dans la zone d'étude..... | 16 |
| Figure 16. Corrélation entre calcium et sulfate dans le Kanem (gauche) et Bahr el Gazal (droite)..... | 17 |
| Figure 17. Distribution de Fer (mg/l) dans la zone d'étude au Kanem (gauche) et Bahr el Gazal (droite)..... | 18 |
| Figure 18. Distribution de manganèse (mg/l) dans la zone d'étude..... | 19 |
| Figure 19. Corrélation entre manganèse et pH au Kanem (gauche) et Bahr el Gazal (droite) . | 19 |
| Figure 20. Distribution de fluorure (mg/l) dans la zone d'étude | 20 |
| Figure 21. Distribution statistique des concentrations de fluorure dans les régions du Bahr el Ghazal et du Kanem..... | 21 |
| Figure 22. Corrélation entre les concentrations de fluorure et le ratio sodium/calcium au Kanem (gauche) et Bahr el Ghazal (droite)..... | 22 |

| | |
|--|----|
| Figure 23. Distribution de l'arsenic (mg/l) dans la zone d'étude | 23 |
| Figure 24. Aluminium dissous en relation avec le pH (Houben & Treskatis, 2007) | 24 |
| Figure 25. Distribution de l'aluminium (mg/l) dans la zone d'étude | 24 |
| Figure 26. Indicateurs de contamination des eaux souterraines | 25 |
| Figure 27. Distribution de nitrate (mg/l) dans la zone d'étude | 26 |
| Figure 28. Distribution de nitrite (mg/l) dans la zone d'étude | 27 |
| Figure 29. Distribution d'ammoniac (mg/l) dans la zone d'étude..... | 28 |
| Figure 30. Pollution azotée humaine des eaux souterraines..... | 29 |
| Figure 31. Le diagramme de Wilcox pour évaluer la pertinence des eaux souterraines pour l'irrigation..... | 30 |
| Figure 32. Ratio d'Absorption du Sodium (SAR) pour évaluer la pertinence des eaux souterraines pour l'irrigation au Kanem (gauche) et Bahr el Gazal (droite) | 31 |
| Figure 33. Classification des eaux souterraines en ce qui concerne l'aptitude à l'irrigation...33 | |
| Figure 34. Résultats de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ pour la zone d'étude comparés avec la ligne d'eau à N'Djamena (ligne en noir)..... | 34 |
| Figure 35. Distribution de $\delta^{18}\text{O}$ dans la zone d'étude | 34 |
| Figure 36. Distribution de tritium (TU) dans la zone d'étude | 35 |
| Figure 37. Détermination de l'écoulement des eaux souterraine à l'aide des courbes équipotentiellles, isotopes environnementaux et valeurs de tritium | 36 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Anions et cations dominants pour Kanem et Bahr el Ghazal..... | 11 |
| Tableau 2: Classification des eaux souterraines sur la base de Na% pour la région du Kanem | 30 |
| Tableau 3: Classification des eaux souterraines sur la base de Na% pour la région de Bahr el Ghazal..... | 31 |

Liste des Annexes

- Annexe 1: Liste des points d'eau inclus dans l'étude
- Annexe 2: Analyse statistique des résultats chimiques

Abréviations

| | |
|---------|---|
| ASTER | Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer |
| BGR | Institut Fédéral des Géosciences et Ressources Naturelles <i>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe</i> |
| BMZ | Ministère Fédéral de la Coopération Economique et du Développement <i>Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung</i> |
| BP | Before Present <i>Avant présent</i> |
| GIZ | Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit |
| IAEA | International Atomic Energy Agency <i>Agence Internationale pour l'Energie Atomique</i> |
| IC | Ionic Chromatography <i>Chromatographie Ionique</i> |
| ICP-MS | Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry <i>Spectrométrie de Masse à Plasma Inductif</i> |
| ICP-OE | Inductively Coupled Plasma Optical Emission <i>Emission Optique à Plasma Inductif</i> |
| CBLT | Commission du Bassin du Lac Tchad |
| masl | meter above sea level <i>mètres au-dessus du niveau de la mer</i> |
| meq/l | milliequivalent per liter <i>milliéquivalent par litre</i> |
| Na% | Sodium in percentage <i>Pourcentage de Sodium</i> |
| SAR | Sodium Adsorption Ratio <i>Ratio d'Absorption de Sodium</i> |
| TDS | Total Dissolved Solid <i>Solides Dissous Totaux</i> |
| WHO/OMS | World Health Organisation <i>Organisation Mondiale de la Santé</i> |

Résumé

Mots-clés: Bassin du Lac Tchad, Région du Kanem, Région du Bahr el Ghazal, Qualité des eaux souterraines, Analyse Isotopique, Tritium

Entre Novembre 2009 et Décembre 2013, le projet BGR-CBLT « Gestion durable de l'eau du bassin du lac Tchad », a réalisé une série de missions de terrain hydrogéologiques dans les régions du Kanem et du Bahr el Ghazal, au nord du lac Tchad. Le but principal des enquêtes était d'obtenir des informations sur la qualité des eaux souterraines et des directions d'écoulement dans l'aquifère quaternaire de la région.

Les enquêtes sur le terrain comprenaient la localisation des points d'eau et des mesures in-situ telles que la température, le pH et la conductivité électrique de l'eau. Autant que possible, les niveaux d'eau ont été enregistrés et des échantillons pour des analyses complètes des anions et des cations, ainsi que pour les isotopes environnementaux (^{18}O et ^2H) et les analyses de tritium ont été pris. Un total de 195 points d'eau ont été visités à partir desquels 185 échantillons ont été prélevés au cours des quatre dernières années.

Les courbes équipotentielles des eaux souterraines ont été produites à l'aide de 175 niveaux d'eau enregistrés et le modèle numérique de terrain ASTER (Advanced Spaceborne Emission and Reflection Radiometer) pour des données d'élévation (résolution spatiale de 30 m). Les lignes équipotentielles montrent la présence d'un dôme au nord du lac d'où les eaux souterraines s'écoulent vers le sud et sud-est en direction du lac Tchad. Un deuxième haut local apparaît au sud-est du lac, situé dans le seuil du Bahr el Ghazal (Durand et Mathieu, 1980). Ce haut empêche l'eau du lac Tchad de couler dans la vallée fossile du Bahr el Ghazal, si la hauteur du lac est inférieure à 286 m d'altitude.

Les résultats des analyses chimiques montrent que les eaux souterraines dans la région du Kanem sont généralement de bonne qualité pour la consommation humaine. Cependant, il faut prendre garde au sujet des concentrations élevées en fer et en manganèse. Bien que cela ne soit pas un souci hygiénique, les précipitations de fer et de manganèse donnent à l'eau un goût métallique, produisent des taches brunes sur les vêtements et causent l'obstruction des installations et en tant que tel ne sera pas acceptée par la population pour la consommation. L'aluminium est également un problème dans certains endroits, en particulier à Royono et Belte.

Les eaux souterraines sont impropres à la consommation humaine dans la région du Bahr el Ghazal, en raison des concentrations élevées en fluorure et en arsenic. Il est recommandé que des sources d'eau potable alternatives soient étudiées. En plus, les concentrations de composés de sodium, chlorure, sulfate, fer, manganèse, aluminium et d'azote dépassant les limites de l'OMS respectives sont très répandus dans la région du Bahr el Ghazal.

En outre, la mauvaise gestion et / ou le manque d'hygiène des points d'eaux conduisent à une présence généralisée de composés azotés (ammonium, nitrites et nitrates) à des concentrations supérieures à la limite fixée par l'OMS. Il est recommandé que les stratégies de gestion dans l'ensemble de la zone d'étude soient améliorées pour éviter la pollution ponctuelle par des matières fécales animales ou humaines qui donnent lieu aux ammoniums, nitrites et nitrates. Sensibilisation de la population pourrait être nécessaire pour atteindre les effets désirés.

L'analyse des isotopes environnementaux a montré que les eaux souterraines dans la région du Kanem sont directement rechargées par précipitation. En outre, les eaux souterraines le long de la rive du lac et dans les régions du Bahr el Ghazal sont rechargées par des eaux de précipitations qui subissent l'effet d'évaporation.

Les résultats de tritium indiquent des recharges d'avant les années 1950 dans la plupart de la région du Kanem. Une recharge de quelques 40 ans à partir de maintenant est mesurée le long de la rive du lac Tchad. Elle correspond à 1970, quand le lac occupait une superficie d'environ 23.000 km² et la surface de l'eau atteignait le rivage.

1. Introduction

Le programme « Gestion durable de l'eau du bassin du lac Tchad » est un programme de coopération technique entre la Commission du Bassin du Lac Tchad (CBLT) et le Ministère Fédéral allemand de la Coopération Économique et du Développement (BMZ). Le programme se compose de trois éléments différents: « Développement organisationnel » et « Adaptation au Changement Climatique » réalisés par la Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) et « Gestion des Eaux Souterraines » exécuté par l'Institut Fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles (BGR).

L'objectif principal du projet technique du BGR est de renforcer les fonctions d'analyse et de surveillance de la CBLT concernant les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin. La coopération technique a commencé en 2007 avec une première phase du projet qui a duré jusqu'à Août 2011. Le projet actuel a débuté en Septembre 2011 et devrait se terminer en Décembre 2014.

Afin d'améliorer la connaissance de la CBLT en ce qui concerne les caractéristiques des eaux souterraines dans le bassin du lac Tchad, le projet a réalisé plusieurs missions de terrain dans différentes régions du bassin du lac Tchad. Le présent rapport examine la région du Kanem et du Bahr el Ghazal située au nord et au nord-ouest du lac Tchad, en République du Tchad.

Diverses enquêtes dans les régions ont été effectuées pour des mesures in-situ et échantillonnage en 2009 et 2010 au cours de la première phase du projet, et en 2013 au cours de la seconde. Les activités in-situ comprenaient la localisation des points d'eau et les mesures du niveau statique de la température, du pH et de la conductivité électrique de l'eau. Les échantillons recueillis ont été analysés au laboratoire du BGR en Allemagne pour les anions et les cations totaux ainsi que des oligo-éléments. Les isotopes stables (oxygène-18 - ^{18}O and deutérium - ^2H) ont également été mesurés au laboratoire du BGR. Les mesures de tritium ont été effectuées à l'Université de Brême en Allemagne. Un total de 195 points d'eau ont été visités parmi lesquels 185 échantillonnés par le projet jusqu'à présent. Les résultats des analyses obtenues sont présentés ci-dessous.

2. Zone d'étude

La zone d'étude est située au nord du lac Tchad entre les latitudes 13° et 15.5° Nord et les longitudes 14° 17.5° Est et couvre une superficie d'environ 105260 km² (Figure 1). Au nord-ouest, la région est caractérisée par la présence d'un système de dunes fixes en direction NW-SE. Elles sont situées transversalement à la direction principale du vent du nord-est (harmattan) et peuvent atteindre des hauteurs allant jusqu'à 80 m. Le système de dunes atteint une altitude maximale de 475 m. Ce système dunaire continu vers le sud de la région d'étude, définissant le plateau Harr à des hauteurs de 300 m sur le niveau de la mer.

Des plateaux de sable généralisés définissent les parties centrale et orientale de la zone d'étude. Le plateau Soulia à l'est est occupée par la vallée fossile du Bahr el Ghazal, qui est la sortie du lac Tchad lorsque son niveau dépasse 286 m asl et se décharge dans le "Pays Bas" à une hauteur de 180 m asl au nord-est (Schneider, 1969; Durand et Mathieu, 1980).

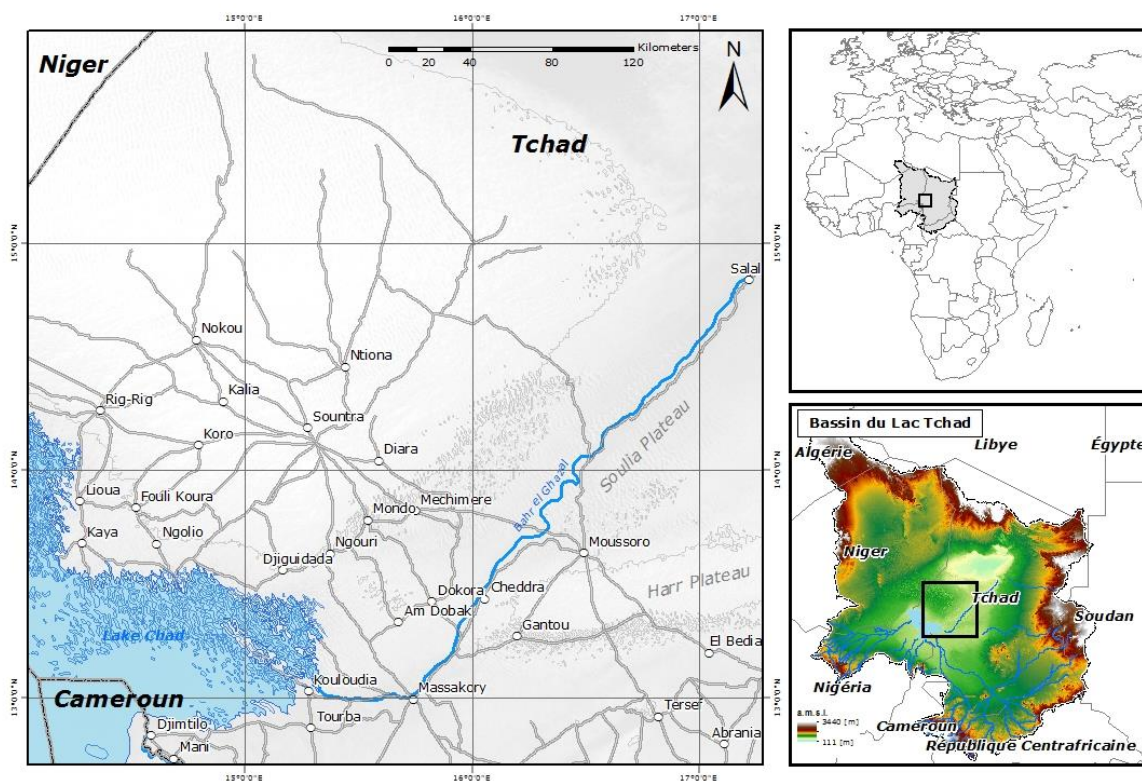


Figure 1. Bassin du Lac Tchad et la localisation de la zone d'étude

2.1 Climat

La zone d'étude s'étend d'un climat sahélien subaride au sud à un climat saharien nord de la latitude 15° (Schneider, 1969). La moyenne des précipitations annuelles varie de 300 mm dans le sud à moins de 100 mm dans le nord (9^{ème}FED, 2011). La saison des pluies dure de 3-4 mois (de Juin à Septembre) avec de très fortes variations interannuelles. L'humidité varie entre 25 % en Février-Mars et 77 % en Août.

La température moyenne annuelle est de 29 °C et se situe entre 7,3 °C en Janvier et 47,2 °C en Mai (9^{ème}FED, 2011).

L'évaporation potentielle annuelle de plus de 2000 mm/a est très élevée (une valeur de 2320 mm/a a été mesurée pour la surface de l'eau du Lac Tchad à Bol). Maglione (1968) signale une évaporation potentielle de l'ordre de 3200 mm/a pour la région adjacente au Lac Tchad entre 13,5° et 14° latitude Nord.

2.2 Géologie

Selon Schneider (1969), le bassin du lac Tchad dans la zone d'étude est composé d'une succession de couches de différents âges et épaisseurs. La couche la plus profonde connue est le Continental Terminal (Oligocène / Miocène) composée de grès d'une épaisseur d'environ 200 m et situé à des profondeurs comprises entre 400 m et 600 m sous la surface. En étalage, le Pliocène inférieur composé de sables fluvio-lacustres est rencontré. Le Pliocène supérieur suit, une couche massive des argiles de 200-300 m d'épaisseur. La couche supérieure est composée de sables quaternaires avec différentes sous-formations comme suit:

- Séries Moji (début du Pléistocène): une série fluvio-lacustre argileuse avec évaporites (gypse) au nord du Kanem sous adjacent aux
- Dunes de sables éoliennes de l'âge "Ogolien", un terme français qui définit la période de formation des dunes de 20000 à 13000 ans BP (Swezey, 2001). Ces dunes apparaissent principalement au nord du lac Tchad et sont essentiellement composées de sable quartzitique (Eugster & Maglione, 1979). Les vallées entre les dunes, jusqu'à une distance de 30 km de l'ancienne rive du lac, sont souvent occupées par des évaporites contenant du sodium-carbonate connues sous le nom de "natronières" ($\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), qui sont exploitées comme du sel de carbonate de sodium spécialement dans les environs de Lioua (Liwa) et Kaya (Maglione, 1968; Maglione, 1969; Eugster & Maglione, 1979).

Servant & Servant (1970) décrivent le Quaternaire récent dans la région, plus précisément le long du plateau Soulia, qui est traversé par le Bahr el Ghazal. Ils considèrent deux différentes formations:

- La série Soulia (d'âge pléistocène, typique pour le plateau Soulia) avec une épaisseur moyenne de 80 m composée de sables éoliens formant la plupart des dunes dans le domaine, avec des couches d'origine lacustre au bas qui indiquent les périodes climatiques plus humides au début de la sédimentation. Il a été daté à 41 000 à 22 000 ans BP.
- Série Labdé (holocène, contemporaine de la fin de la période glaciaire et postglaciaire, en Europe de l'Ouest), une formation relativement mince composée de sables éoliens en bas couverts par des sables lacustres (12000 ans BP) et par quelque 10 m d'argile (9 000 ans BP).

La description du Quaternaire reflète les variations climatiques avec de longues périodes sèches intercalées avec des phases humides. En conséquence, l'extension du lac Tchad a fluctué énormément, pour atteindre divers stades qui varient d'un maximum d'environ 330 000 km² à la taille actuelle de 3000 km² pendant la saison sèche (IRD, 2014).

2.3 Cadre Hydrogéologique

Du point de vue hydrogéologique, le Continental Terminal est un aquifère artésien dans les environs du lac Tchad. L'eau souterraine est du type sodium-bicarbonate avec une concentration moyenne de solides dissous totaux (TDS) de 600 mg/l (Schneider, 1969). La présence d'une concentration élevée en fer est très commune en raison de conditions anaérobiques dans l'aquifère.

Le Pliocène inférieur contient de l'eau douce du type sodium-calcium-bicarbonate. Cet aquifère est aussi artésien dans les environs du lac Tchad (Schneider, 1969).

Le Quaternaire forme un aquifère régional caractérisé par différents environnements de déposition. Les dunes éoliennes qui occupent la partie centrale de la région du Kanem donnent lieu à un aquifère libre composé uniquement du sable quartzitique. Le plateau Soulia et la région à proximité des rives du lac sont d'origine fluviale et lacustre et donc, composés d'une superposition des couches de sable et d'argile. Les nappes sont soit semi-confinées ou confinées en fonction de leur position par rapport aux couches d'argile.

Les couches les plus profondes comme la série Moji contiennent des eaux souterraines de type sodium-sulfate. Les sables du Pléistocène supérieur et contemporains se caractérisent par une bonne conductivité hydraulique et par des eaux souterraines d'une bonne qualité. Le TDS est généralement très faible (<400 mg/l) indicatif d'une recharge directe à partir des précipitations (Schneider, 1969).

Peu de données concernant la transmissivité des aquifères dans la région sont disponibles, mais tous montrent une bonne conductivité. Selon Schneider (1969), la transmissivité des sables Ogoliens varie de $E-2$ m²/s à $E-2$ m²/s. Massuel (2001) a publié une valeur de $2E-2$ m²/s pour les sables du Pléistocène.

2.4 Utilisation des terres et population

La population de la région du Kanem est principalement sédentaire avec Mao comme capitale du Département. Dans la région du Bahr el Ghazal, la population est majoritairement nomade. Cette région abrite plus d'un tiers de la population nomade du Tchad (9^{ème} FED, 2011).

Les principales activités économiques sont l'agriculture et l'élevage. La production agricole a lieu dans les vallées de dunes ou le long des lacs locaux, ainsi que le long de la rive du lac Tchad au moyen de polders (Figure 2). Il s'agit des vallées de dunes inondées par le lac qui sont fermés avec des barrages pour les séparer du lac et donc pour permettre une lente entrée et sortie de l'eau du lac.



Figure 2. Canal et vanne pour l'irrigation avec l'eau du lac Tchad dans le polder de Bol (Photo: BGR)

L'élevage est toujours basé sur la transhumance. Le Kuri, un bétail endémique, est élevé dans les environs du lac. Les chameaux et les chèvres sont élevés dans toute la région du Kanem (Figure 3).



Figure 3. Elevage des animaux par les nomades (Photos: BGR)

3. Méthodologie

Diverses enquêtes sur le terrain dans les zones du Kanem et du Bahr el Ghazal ont été effectuées sur 4 ans du Novembre 2009 à Décembre 2013. L'objectif des campagnes de terrain était la localisation des forages, des puits creusés à la main et des piézomètres et, chaque fois que possible, l'enregistrement du niveau statique de l'eau et l'analyse des anions et des cations totaux et les oligo-éléments. La plupart des points d'eau ont également été échantillonnés pour les analyses de Deutérium (^2H), Oxygène-18 (^{18}O) (175 échantillons), ainsi que dans certains cas, le tritium (51 échantillons). Au total, 185 échantillons d'eau souterraine ont été analysés pour leur composition chimique et 175 mesures de niveau d'eau ont été enregistrées (Annexe 1). La distribution des échantillons est représentée sur la Figure 4.

Les coordonnées de points d'échantillonnage ont été enregistrées au moyen d'un GPS portable Garmin. La température ($^{\circ}\text{C}$), le pH et la conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ont été mesurées in situ en utilisant un ensemble multi-capteur (WTW-Multi 3430). Les niveaux d'eau ont été enregistrés à l'aide d'une sonde de niveau (WTW). Les échantillons provenant de puits creusés à la main ont été recueillis à l'aide d'un préleveur d'eau, ceux des forages en utilisant la pompe installée dans le forage.

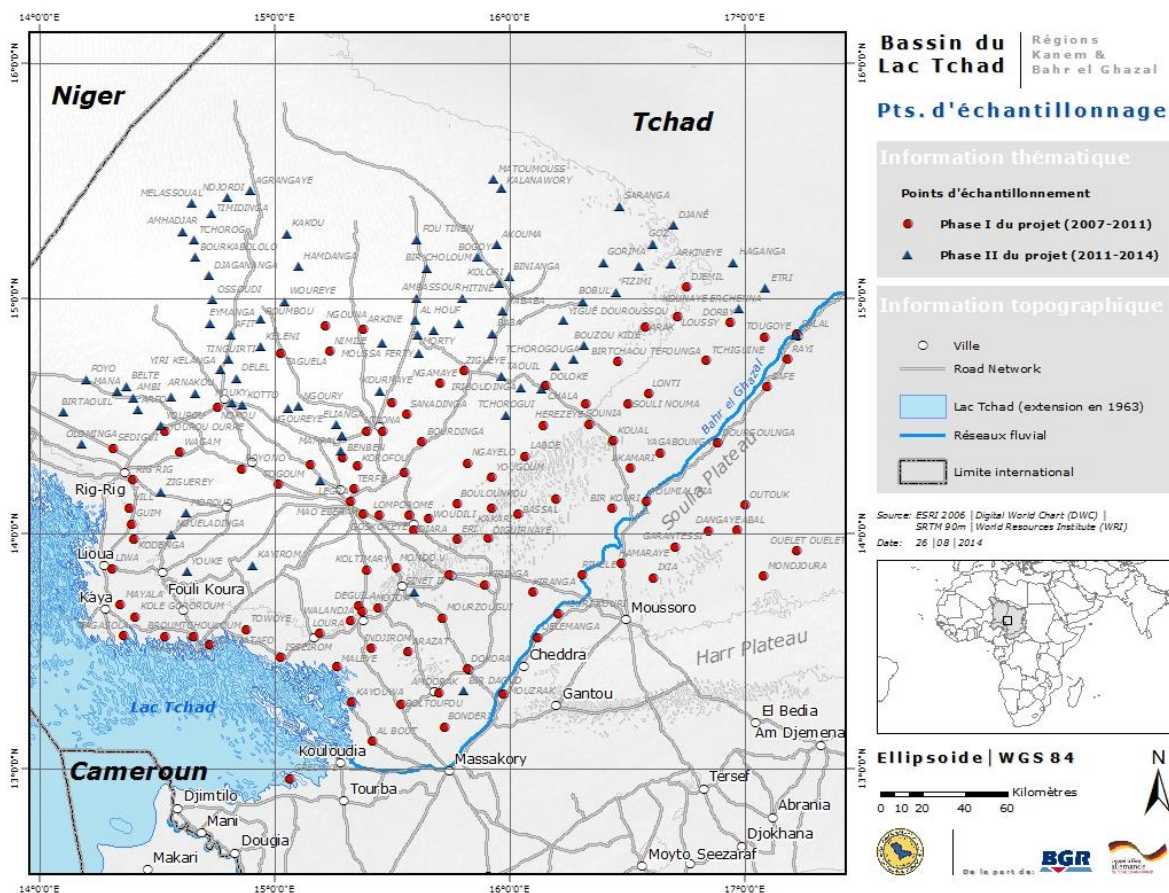


Figure 4. Localisation des points d'échantillonnages. Les points rouges correspondent aux échantillons de la première phase du projet, les triangles pour la seconde phase du projet.

Le total des anions et des cations, ainsi que des oligo-éléments ont été mesurés au laboratoire du BGR à Hanovre en Allemagne par chromatographie ionique (IC) et spectrométrie d'émission à plasma induit (ICP-OE). Le Deutérium (^2H) et l'Oxygène-18 (^{18}O) ont été déterminés au laboratoire du BGR en utilisant un instrument Picarro basé sur la spectrométrie de la cavité annulaire descendante. Les valeurs de tritium ont été mesurées à l'Université de Brême, en Allemagne.

Les sections suivantes présenteront les résultats obtenus à partir des différentes analyses.

4. Resultats et Discussion

4.1 Niveau statique des eaux souterraines

Bien que les mesures ont eu lieu sur une période de temps de 5 ans, les variations saisonnières du niveau statique des eaux souterraines sont très faibles (inférieures à 10 cm). Par conséquent, un total de 85 mesures de niveau statique de 2009 à 2011 et 90 mesures de niveau statique à partir de 2013 ont été utilisés pour produire une carte de courbes équipotentielles des eaux souterraines (Figure 5). Pour déterminer l'élévation de la nappe phréatique (m asl) à partir des mesures de la profondeur de l'eau (m), des informations sur l'élévation de surface sont indispensables. En raison du fait que des élévations triangulées de la surface du sol n'étaient pas disponibles, le modèle numérique d'élévation globale ASTER a été utilisé à sa place. Il a une résolution spatiale de 30 m x 30 m et est un produit de la NASA et METI.

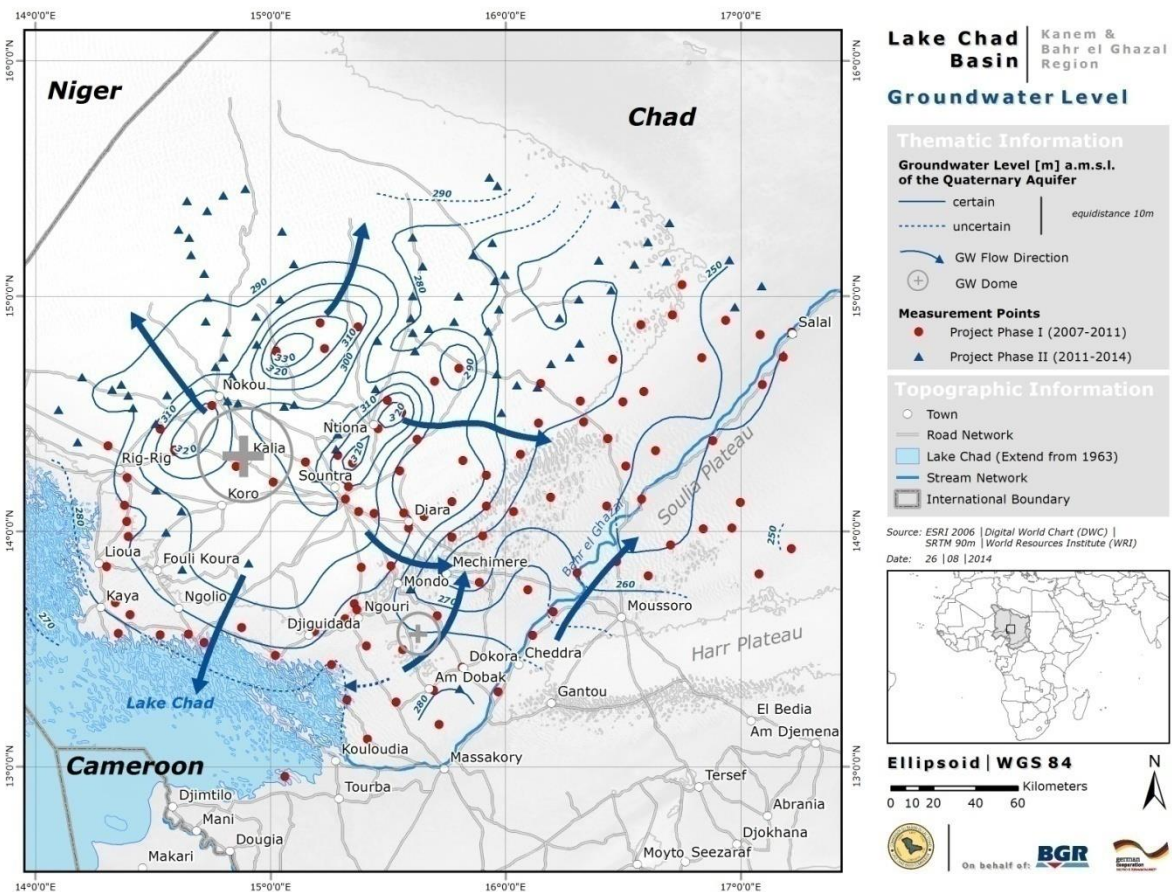


Figure 5. Les courbes équipotentielles des eaux souterraines sont tracées à l'aide des mesures in-situ du niveau statique et des altitudes à partir du modèle numérique du terrain ASTER

Bien que sans doute à faible taux, la recharge tien place dans la région du Kanem, comme indiqué par le dôme au nord du lac Tchad (Figure 5). L'eau souterraine est à une altitude de 330 m asl, et donc environ 50 m au-dessus du niveau actuel du lac (environ 283 m asl). Les zones de décharge sont le lac Tchad dans le sud et le Bahr el Ghazal dans le sud-est.

Un deuxième haut local apparaît au nord-ouest d'Am Dobak et est situé dans le seuil de Bahr el Ghazal (Durand & Mathieu, 1980). Ce seuil agit comme une sorte de barrière et empêche l'eau du lac Tchad d'écouler dans la vallée fossile du Bahr el Ghazal, si la hauteur du lac est inférieure à 286 m asl.

4.2 Hydrogéochimie

L'annexe 2 présente les résultats statistiques descriptifs des composants chimiques mesurés dans la région du Kanem (129 échantillons) et dans la région du Bahr el Ghazal (56 échantillons). Dans les cas adéquats, chaque fois les limites correspondantes selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS) (2011) sont données.

4.2.1 Total Solides Dissous – TDS (mg/l)

Les solides dissous totaux indiquent la quantité totale de sels contenus dans l'eau. Les valeurs inférieures à 1 500 mg/l sont considérées comme adéquates pour la consommation humaine. Les valeurs de TDS entre 1 500 mg/l et 3 000 mg/l indiquent une eau saumâtre qui est appropriée pour la consommation animale, mais ne devrait pas être utilisée pour l'irrigation. Si la concentration en TDS est supérieure à 3 000 mg/l, l'eau est généralement considérée comme trop salée pour tout type de consommation.

Les valeurs de TDS varient de 111 mg/l à 1 443 mg/l avec une moyenne de 328 mg/l dans la région du Kanem, et de 137 mg/l à 8 159 mg/l avec une moyenne de 1 860 mg/l dans la région du Bahr el Ghazal. La Figure 6 illustre la distribution de TDS.

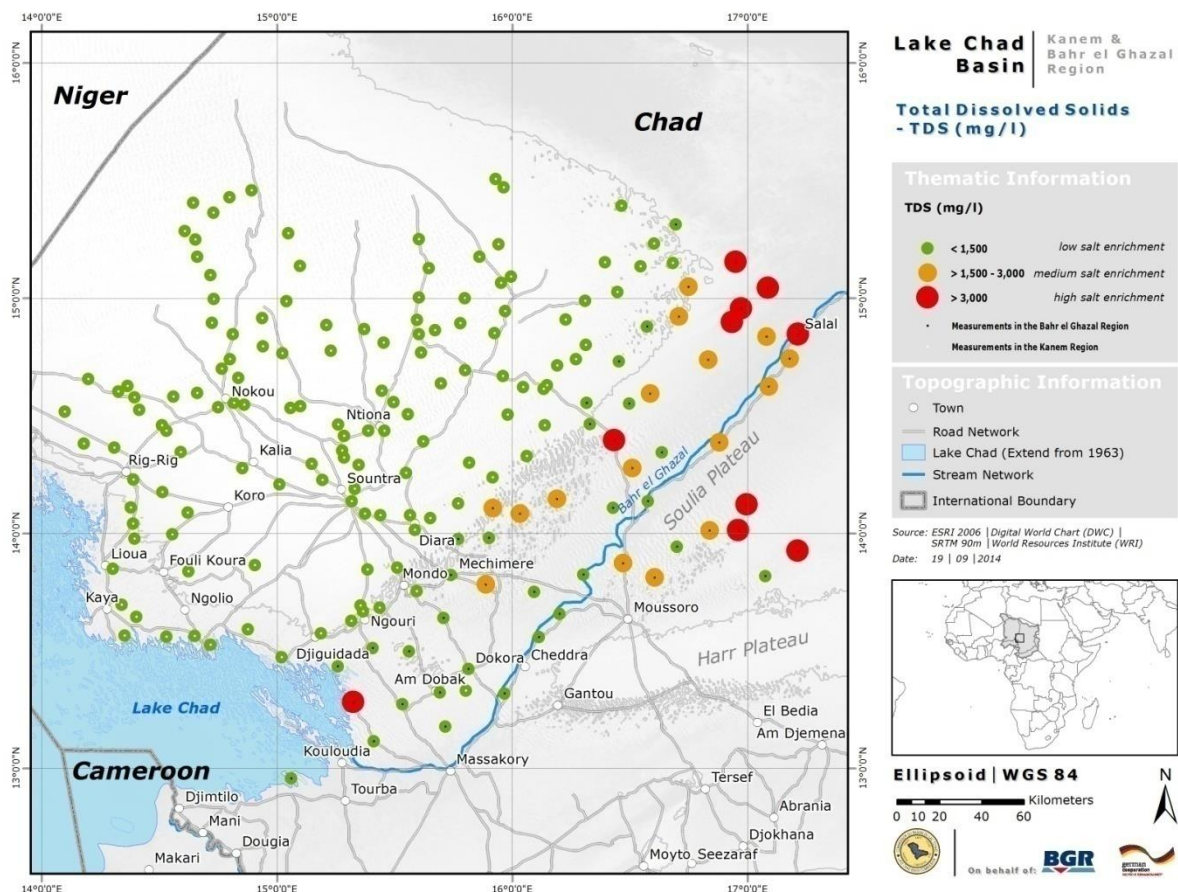


Figure 6. Distribution des solides dissous totaux (mg/l) dans les eaux souterraines de la zone d'étude

Les concentrations de TDS indiquent qu'en général l'eau souterraine est adéquate pour la consommation humaine, particulièrement dans la région du Kanem au nord-ouest de la zone d'étude. Dans la vallée fossile du Bahr el Ghazal, les valeurs de TDS sont plus élevées et les eaux souterraines ne peuvent être utilisées que pour la consommation animale. Cependant, dans le cas de dix puits creusés à la main, la concentration en TDS est supérieure à 3 000 mg/l et l'eau souterraine est donc inadéquate pour tout type de consommation.

Les TDS dans la zone d'étude montrent une très bonne corrélation avec le sodium et le sulfate, comme le montre la Figure 7, ce qui signifie que les TDS élevés sont le résultat de fortes concentrations de ces deux ions.

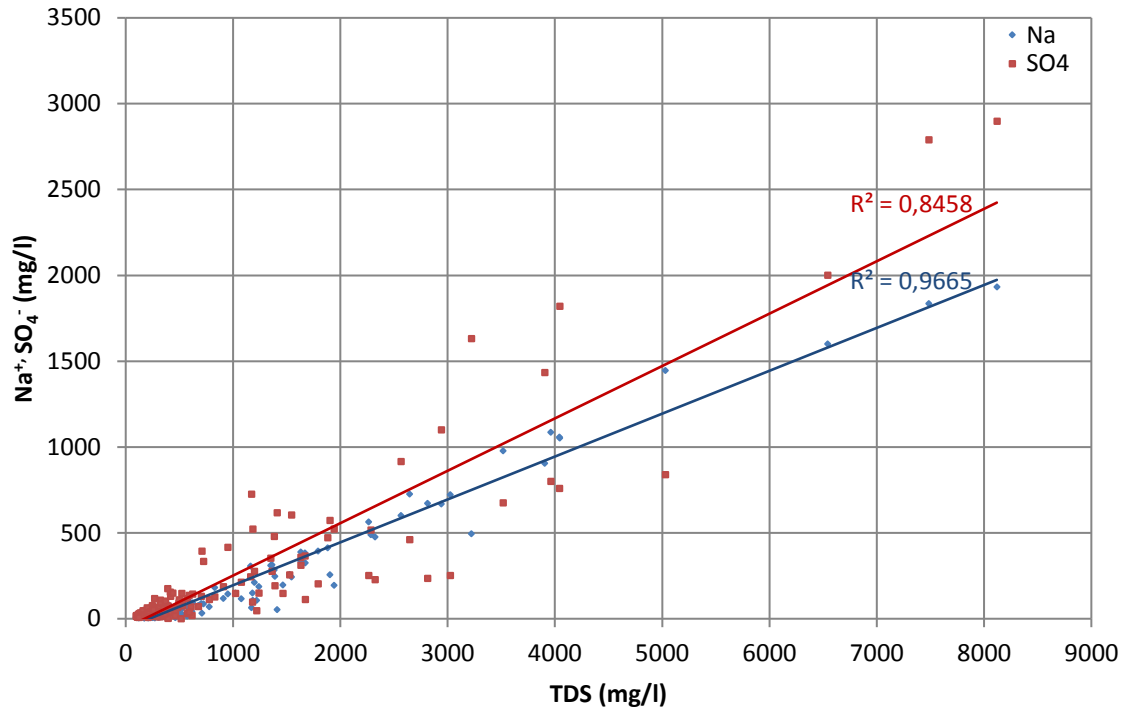


Figure 7. TDS en fonction des concentrations en sodium et sulfate

4.2.2 Diagramme de Piper

L'hydrochimie des eaux souterraines peut être interprétée rapidement au moyen d'un diagramme de Piper (Piper, 1944). Ce graphique illustre les teneurs cations et anions sous forme de triangles, respectivement à gauche et à droite. Le rhombe dans le centre de l'image représente la composition des deux, anions et cations.

La Figure 8 présente le diagramme Piper pour la région du Kanem à gauche et pour la région du Bahr el Ghazal à droite. L'eau de pluie dans le bassin du lac Tchad, et donc ainsi l'eau de la recharge, est du type bicarbonaté calcique magnésien, comme le montre la qualité de l'eau dans les rivières de la région (Vassolo & Daïra, 2012). La plupart des eaux souterraines dans le Kanem a une composition en cations soit calcique-magnésienne ou calcique, tandis que la composition de cations dans la région du Bahr el Ghazal est sodique-potassique à sodique.

Les triangles de cations dans les deux régions indiquent un échange de cations le long de l'écoulement des eaux souterraines comme indiqué par la flèche rouge. Le calcium et le magnésium sont remplacés par le sodium et le potassium.

Parce que l'échange d'ions est très rare, c'est probablement le mélange des eaux souterraines de différentes qualités le long de l'écoulement qui est observé (voir flèche verte). Bicarbonate sera échangé par le sulfate et/ou le chlorure. Cependant, cet échange n'est pas si évident en raison de l'inclusion de nitrate dans la représentation, en particulier pour la région du Kanem. Le nitrate dans la zone d'étude semble très dispersé et n'a pas une origine naturelle mais résulte de la contamination humaine. Par conséquent, il peut être rejeté du diagramme de Piper pour mieux comprendre la composition chimique naturelle de l'eau souterraine (Figure 9).

Les anions et cations dominants dans chaque région sont indiqués dans le Tableau 1.

Tableau 1. Anions et cations dominants pour Kanem et Bahr el Ghazal

| | Kanem | Bahr el Ghazal |
|--------|----------------------------------|----------------------------------|
| Cation | $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$ | $Na^+ > Ca^{2+} > K^+ > Mg^{2+}$ |
| Anion | $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$ | $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$ |

En tout, les effets décrits accentuent les indications que les eaux souterraines se rechargent dans la région du Kanem et se déchargent dans le Bahr el Ghazal, comme déjà discuté dans la section 4.1 au moyen des courbes équipotentielles des eaux souterraines et des lignes d'écoulement.

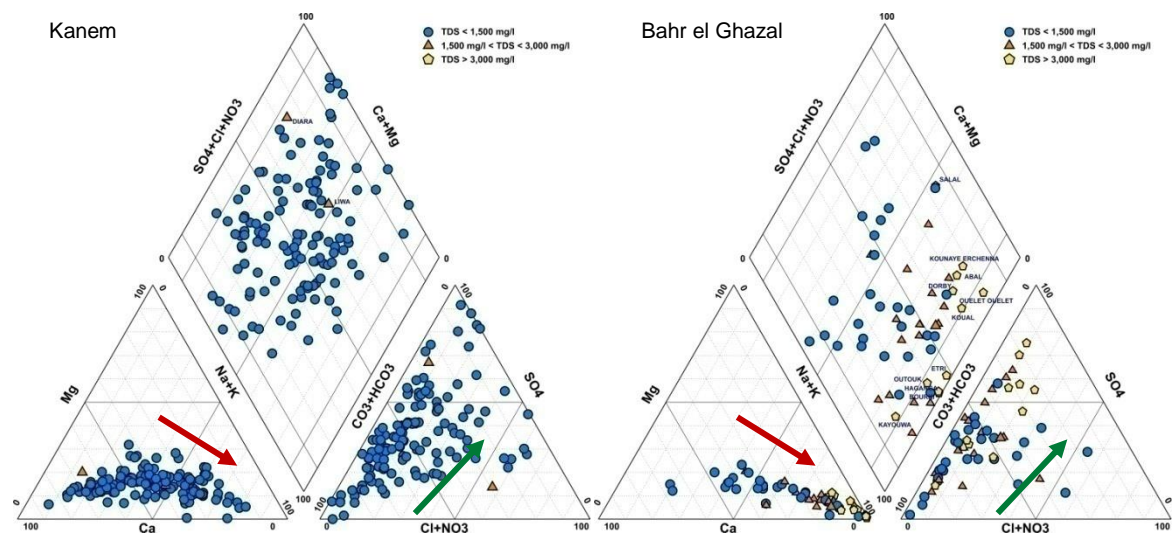


Figure 8. Diagramme de Piper pour les régions du Kanem et du Bahr el Ghazal. Les anions incluent le nitrate

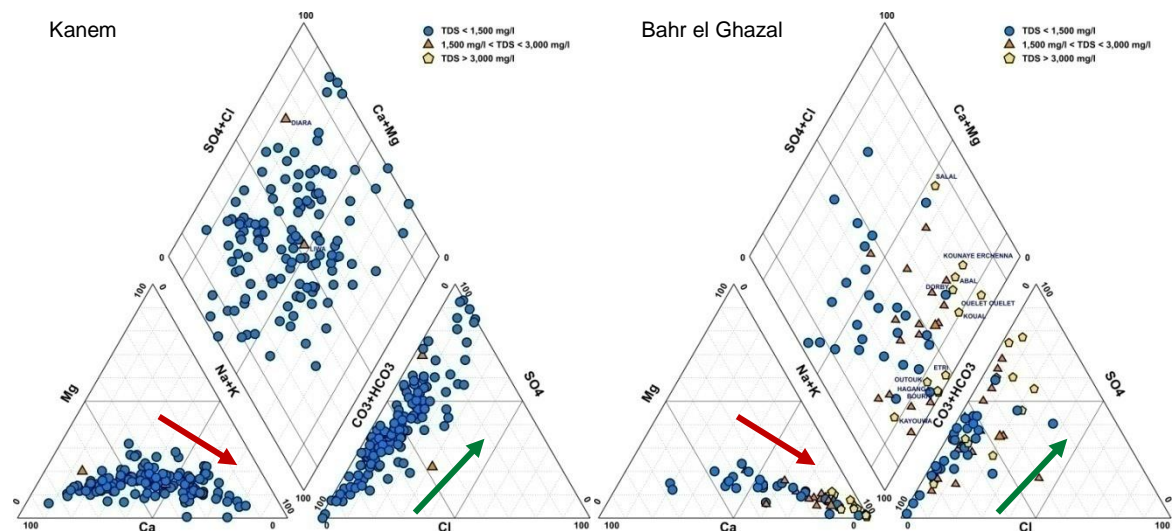


Figure 9. Diagramme de Piper pour les régions du Kanem et du Bahr el Ghazal sans tenir compte du nitrate dans l'analyse

4.2.3 pH

Pour le pH, l'OMS a établi une fourchette entre 6,5 et 8,5 qui est plus basée sur les aspects techniques que des raisons d'hygiène.

Les valeurs mesurées varient de 4,0 à 10,8 avec une moyenne de 7,3 dans la région du Kanem et entre 7,2 et 8,8 avec une moyenne de 7,9 dans la région du Bahr el Ghazal. La distribution est illustrée à la Figure 10.

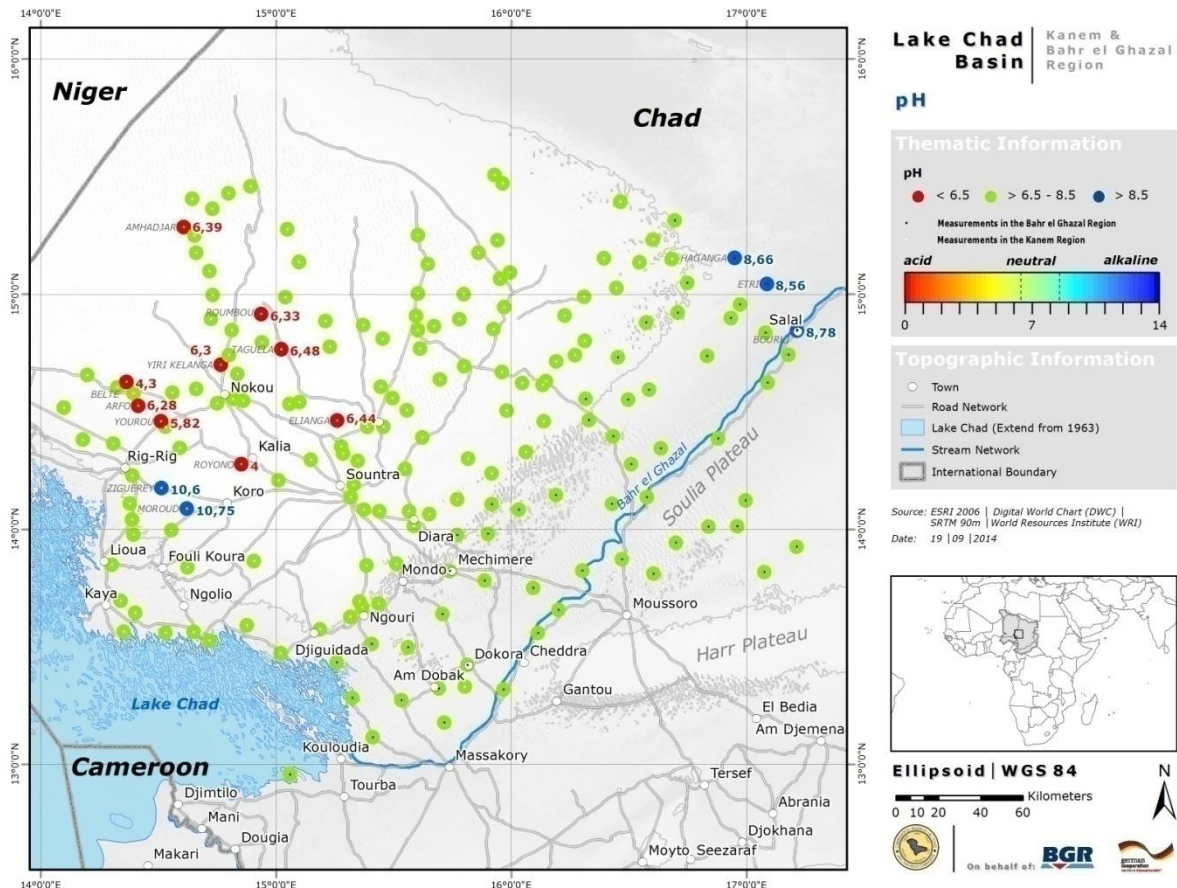


Figure 10. Distribution des valeurs de pH des eaux souterraines dans la zone d'étude

La plupart des valeurs de pH enregistrées sont dans la fourchette acceptable proposée par l'OMS. Dans neuf cas (points rouges dans la région du Kanem), le pH est inférieur à 6,5 et indique des eaux souterraines acides. Cependant, la plupart de ces échantillons sont légèrement acide avec des valeurs de pH dans la fourchette de 6,3 à 6,5. Seuls trois échantillons ont des valeurs de pH trop bas (Yourou = 5,8, Belte = 4,3, et Royono = 4,0).

Dans cinq cas (points bleus) des eaux souterraines révèlent des valeurs de pH supérieures à 8,5. Trois échantillons autour de Salal dans la région du Bahr el Ghazal montrent une eau légèrement alcaline (Etri = 8,56, Haganga = 8,66, et Bourki = 8,78). Une eau souterraine fortement alcaline a été rencontrée dans deux échantillons à proximité du lac Tchad (Zigerey = 10,6 et Moroud = 12,7). Forte alcalinité est typique pour les environnements où CO₂ dégagé (Eugster & Maglione, 1979), ce qui est confirmé par la complète absence de bicarbonate (HCO₃ = 0) dans les deux échantillons.

4.2.4 Sodium – Na (mg/l)

L'OMS a fixé la limite pour la concentration en sodium dans l'eau souterraine à 200 mg/l ce qui est le seuil habituel pour un goût salé.

Les concentrations en sodium mesurées dans la zone d'étude varient de 3,7 mg/l à 1933,0 mg/l avec une moyenne de 144,7 mg/l. La distribution est présentée dans la Figure 11.

Des concentrations élevées en sodium ont été rencontrées dans les environs de Lioua (Liwa), probablement en raison de la dissolution de trona ($\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{HCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) à partir des natronières dans la région (Maglione, 1968). Les concentrations en sodium supérieures à la limite de l'OMS sont rencontrées le long de la vallée fossile du Bahr el Ghazal.

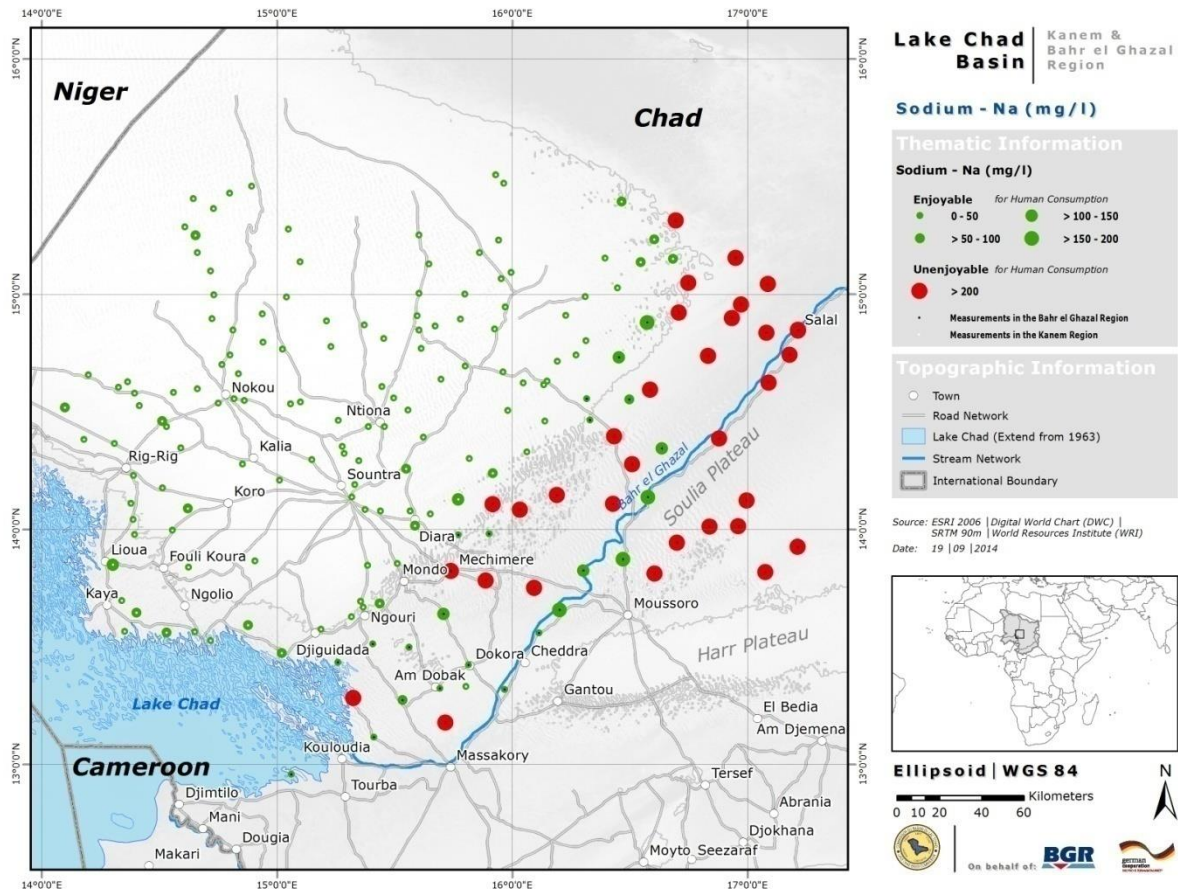


Figure 11. Distribution de sodium (mg/l) dans la zone d'étude

La Figure 12 révèle la relation entre calcium et sodium pour la région du Kanem à gauche ($R^2 = 0,42$) et la région du Bahr el Ghazal à droite ($R^2 = 0,18$).

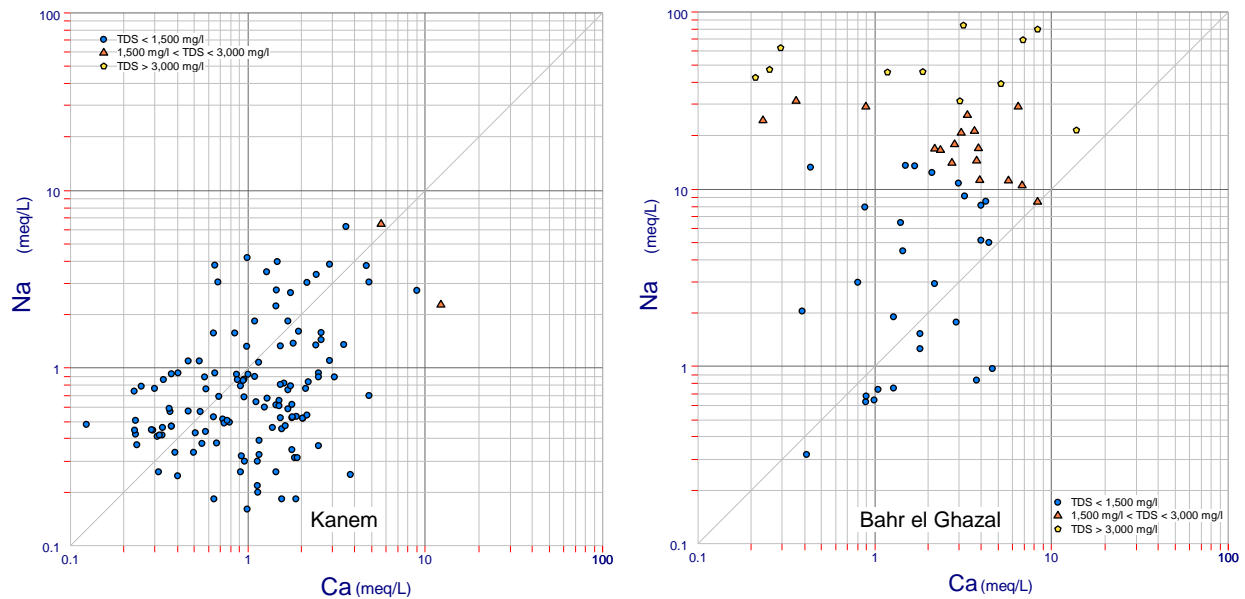


Figure 12. Corrélacion entre sodium et calcium au Kanem (gauche) et Bahr el Ghazal (droite)

Le rapport sodium/calcium dans la région du Kanem varie de 0,07 à 5,8 avec 62% des échantillons montrant une valeur inférieure à 1 ou un excès de calcium (échantillons en dessous de la ligne 1:1 line). Dans la région du Bahr el Ghazal, le rapport entre le sodium et le calcium est beaucoup plus élevé. Elle varie de 0,2 à 213,3 avec des valeurs supérieures à 1 (excès de sodium) dans 80% des échantillons. Un ratio supérieur à 1, ou un excès de sodium, pourrait être le résultat de l'adsorption du calcium et de libération du sodium contenu dans l'argile le long de l'écoulement (Hamit, 2012).

4.2.5 Chloride – Cl (mg/l)

L'OMS recommande des concentrations en chlorure inférieures à 250 mg/l. D'autre part, des concentrations élevées en chlorure sont toxiques pour les plantes (Morris & Devitt, 1991). L'eau avec des concentrations de chlorure supérieures à 150 mg/l est considérée comme avec une toxicité modérée pour des plantes et ne doit pas être utilisée pendant une longue période d'irrigation. Les valeurs supérieures à 350 mg/l sont sévèrement toxiques pour la végétation et l'eau avec cette concentration ne peut pas être utilisée pour l'irrigation. En outre, une concentration élevée en chlorure a des effets corrosifs, par exemple, pour des installations métalliques.

Les concentrations en chlorure varient de 0,9 mg/l à 101,0 mg/l avec une moyenne de 8,9 mg/l dans la région du Kanem et entre 1,6 mg/l et 810,0 mg/l avec une moyenne de 88,2 mg/l dans la région du Bahr el Ghazal. La distribution du chlorure est illustrée sur la Figure 13.

Les concentrations en chlorure d'eau souterraine dans la zone d'étude révèlent des valeurs générales inférieures à 150 mg/l. Dans quatre cas seulement des concentrations comprises entre 150 mg/l et 350 mg/l ont été rencontrés et dans quatre autres cas, les concentrations étaient supérieures au maximum autorisé pour l'irrigation. Toutes ces exceptions sont situées dans la vallée fossile du Bahr el Ghazal.

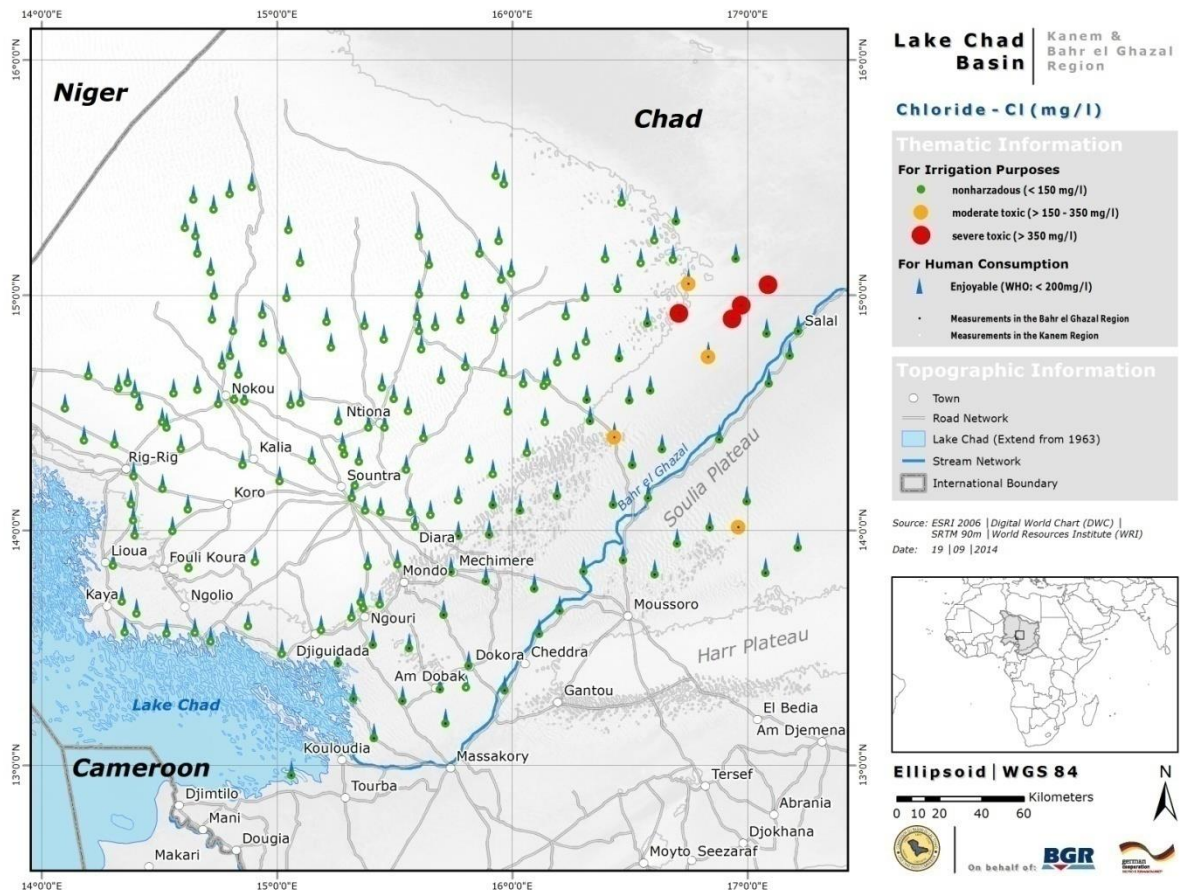


Figure 13. Distribution de chlorure (mg/l) dans la zone d'étude

En général, la présence de sodium et le chlorure dans les eaux souterraines peuvent être soit associée à une origine marine, comme dans les régions côtières, soit à une dissolution du sel, par exemple de halite (NaCl). Selon Arad & Kafri (1975), la dernière transgression marine connue dans la région a eu lieu au cours du Crétacé et depuis lors, le bassin a connu de longues périodes d'inondation d'eau fraîche. Par conséquent, le sodium et le chlorure réagiraient à la dissolution de l'halite, un possible produit d'évaporation dans une région très aride (Arad & Kafri, 1975).

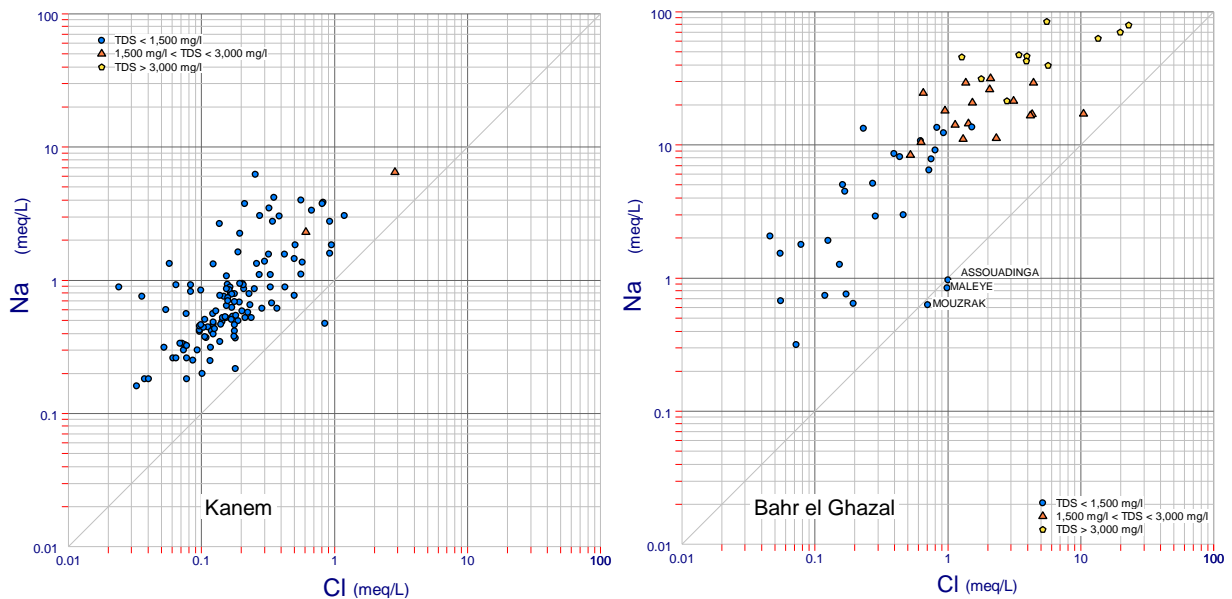


Figure 14. Corrélation entre sodium et chlorure dans le Kanem (gauche) et Bahr el Gazal (droite)

Pour évaluer la corrélation entre le sodium et le chlorure, les ions sont représentés sur un graphique bi-axial en meq/l (Figure 14) pour la zone Kanem ($R^2 = 0,65$) à gauche et pour le Bahr el Ghazal ($R^2 = 0,76$) à droite. Bien que pour tous les échantillons analysés un excédent de sodium avec des ratios plus élevés que l'eau de mer (0,858) soit visible dans les deux régions, il est beaucoup plus excessif dans la région du Bahr el Ghazal. Arad & Kafri (1975) attribuent la présence de sodium dans les eaux souterraines à l'altération de feldspath contenant du sodium dans les roches ignées du socle granitique complexe.

Il faut aussi mentionner qu'une valeur de 26 a été mesurée en tant que ratio du chlorure de sodium molaire pour l'eau du lac Tchad. Cela signifie déjà que l'eau du lac a un énorme surplus de sodium.

4.2.6 Sulfate – SO_4 (mg/l)

Des concentrations élevées en sulfate dans les eaux souterraines ne présentent pas d'effets sur la santé, même si elles peuvent agir comme laxatif pour les utilisateurs peu habitués. L'OMS a fixé la limite pour le sulfate à 500 mg/l en raison des problèmes de goût.

Les concentrations en sulfates varient de 0,2 mg/l à 725,0 mg/l avec une moyenne de 62,3 mg/l dans la région du Kanem, et entre 3,6 mg/l et 2 898,0 mg/l avec une moyenne de 480,4 mg/l dans la région du Bahr el Ghazal. La distribution des concentrations de sulfate est illustrée sur la Figure 15.

Les concentrations en sulfate supérieures à 500 mg/l sont rencontrées en 16 points d'eau, dont 5 avec des concentrations encore au-dessus de 1 000 mg/l. À l'exception d'un cas, toutes les concentrations élevées appartiennent à la vallée fossile du Bahr el Ghazal.

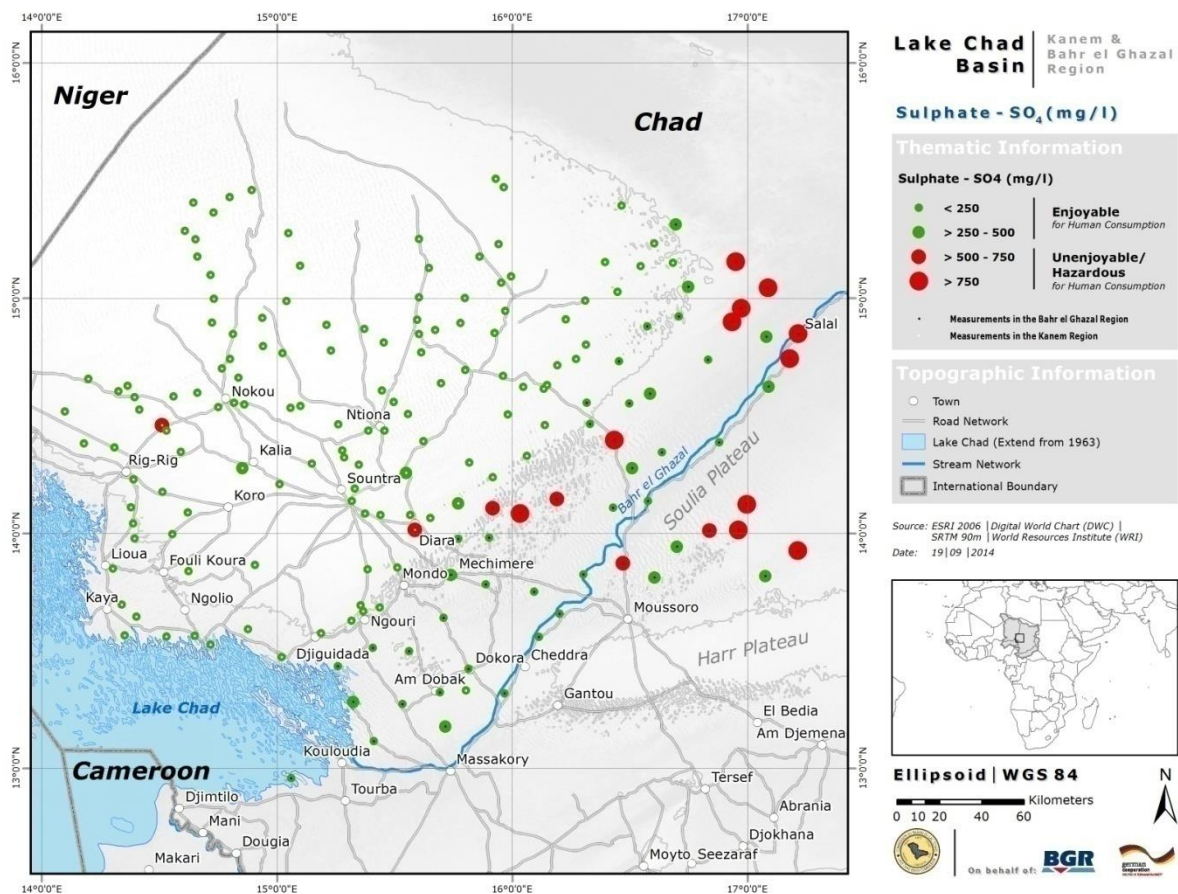


Figure 15. Distribution de sulfate (mg/l) dans la zone d'étude

Une source de sulfate pourrait être gypse ($Ca[SO_4] \cdot 2H_2O$). Si tel est le cas, il devrait y avoir une bonne corrélation entre le calcium et le sulfate dans les eaux souterraines.

Figure 16 révèle la relation entre le calcium et le sulfate pour la région du Kanem à gauche ($R^2 = 0,79$) et pour la région du Bahr el Ghazal à droite ($R^2 = 0,47$). La corrélation est bonne pour la région du Kanem, où la présence de gypse dans la série Moji a en effet été rapporté (Schneider, 1969). Cependant, le lopin de la région du Bahr el Ghazal révèle un excès de sulfate signifiant soit que l'échange de cations a eu lieu et le calcium a été remplacé par le sodium le long de l'écoulement ou qu'une source supplémentaire de sulfate est disponible.

La source supplémentaire de sulfate dans la vallée fossile du Bahr el Ghazal pourrait être l'existence d'un paléo lac Tchad. Semblable au Lac Tchad actuel, ce paléo lac doit avoir été peu profond permettant le développement d'une flore aquatique massive. L'assèchement du paléo lac a conduit à l'extinction des plantes qui sont restées sur la surface et couverts par le matériel fin (des sables argileux à l'argile) transportés par le Bahr el Ghazal dans de nombreux postérieurs cas d'écoulement. En conséquence, un milieu plutôt anaérobique s'est développé qui a permis la désagrégation de cette matière organique pour produire du sulfure qui est resté dans le sous-sol. L'oxydation ultérieure des sulfures dans l'eau souterraine conduit à la présence de sulfate dans l'eau.

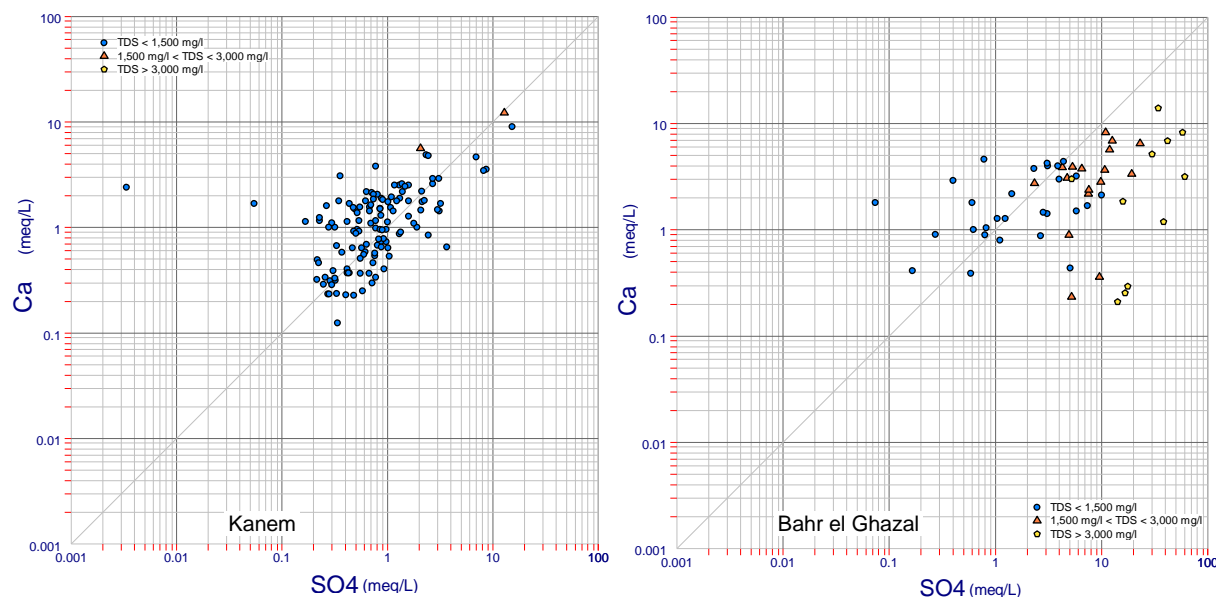


Figure 16. Corrélation entre calcium et sulfate dans le Kanem (gauche) et Bahr el Ghazal (droite)

4.2.7 Fer – Fe (mg/l)

Le fer peut se présenter sous forme de fer ferreux dans les eaux souterraines à des concentrations de plusieurs mg/l dans des conditions anaérobiques. Toutefois, lorsqu'il est exposé à l'atmosphère, le fer ferreux oxyde en fer ferrique donnant à l'eau une couleur brune rougeâtre indésirable. En plus, le fer promeut le développement de fer-bactéries. Ces bactéries gagnent de l'énergie provenant de l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique déposant dans le procédé d'enrobage sur les tuyaux. Par conséquent, bien que le fer ne soit pas dangereux pour la santé, l'OMS a fixé une limite de 0,3 mg/l en raison de la coloration de la lessive et le bouchage des tuyaux.

Les concentrations en fer varient de 0,004 mg/l à 12,8 mg/l avec une moyenne de 0,4 mg/l pour la région du Kanem et entre les valeurs inférieures à la limite de détection de 0,003 mg/l et 2,0 mg/l avec une moyenne de 0,1 mg/l dans la région du Bahr el Ghazal. La distribution des concentrations en fer est présentée en Figure 17.

Des concentrations très élevées en fer se produisent dans la région du Kanem, dans les environs de Koro, Kalia et Noukou, ainsi que le long de la rive nord du lac Tchad. Des sources probables de fer pourraient être des dépôts mafiques qui ont été signalés pour la zone (Hamit, 2012).

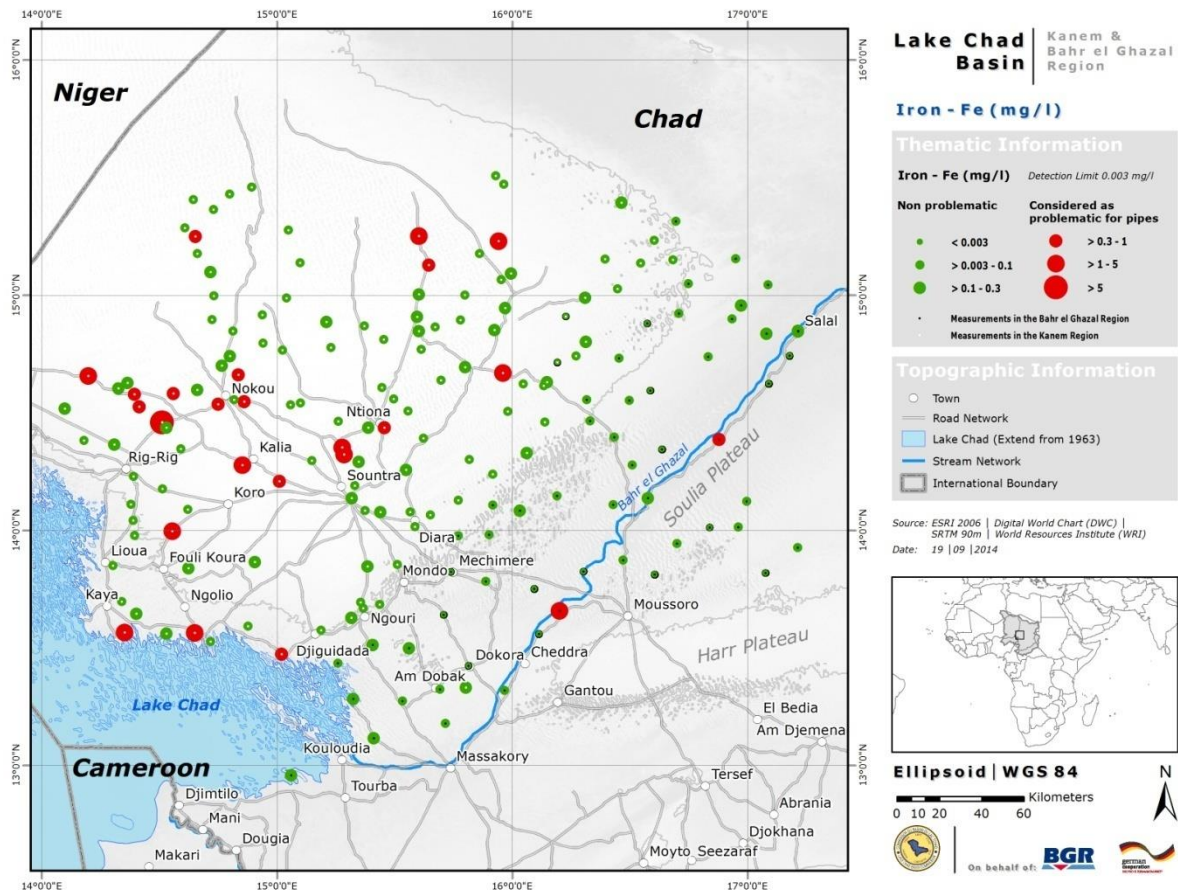


Figure 17. Distribution de Fer (mg/l) dans la zone d'étude au Kanem (gauche) et Bahr el Gazal (droite)

4.2.8 Manganèse – Mn (mg/l)

Des niveaux élevés de manganèse dissous se trouvent dans les eaux souterraines soumises aux conditions réductrices. Comme le fer, le manganèse produit une coloration de la lessive et le bouchage des tuyaux. L'OMS a fixé une limite à 0,1 mg/l pour le manganèse en raison du mauvais goût qu'il provoque dans l'eau.

L'exposition à long terme à des niveaux de manganèse élevés ont été associés à une déficience intellectuelle et un quotient intellectuel réduits chez les enfants d'âge scolaire (Bouchard et al, 2010). Lorsque la santé humaine est prise en compte, la limite OMS est fixée à 0,4 mg/l. Cependant, l'eau potable avec des concentrations de manganèse supérieure à 0,05 mg/l est déjà inacceptable pour les clients en raison de la coloration et le goût métallique.

Les concentrations en manganèse varient de 0,003 mg/l à 8,3 mg/l avec une moyenne de 0,2 mg/l dans la région du Kanem, ainsi que des valeurs inférieures à la limite de détection de 0,001 mg/l à 1,1 mg/l avec une moyenne de 0,2 mg/l dans la région du Bahr el Ghazal. La distribution des concentrations de manganèse est présentée en Figure 18.

La présence de manganèse à des concentrations supérieures à 0,1 mg/l est très répandue et distribuée de manière aléatoire dans l'ensemble de la zone d'étude. Des concentrations supérieures à 0,4 mg/l, pour lesquelles des problèmes de santé seraient attendus, sont rencontrées dans 15 points d'eau disséminés dans la région.

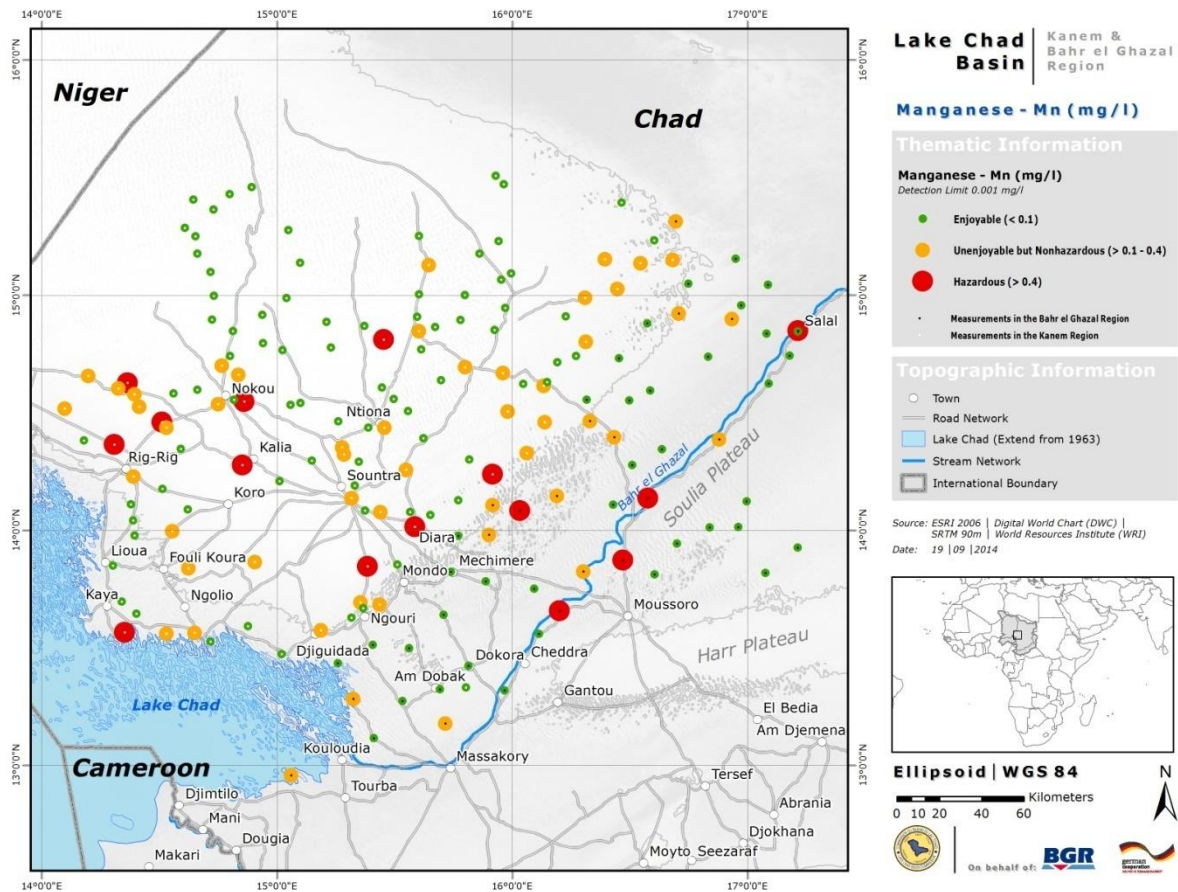


Figure 18. Distribution de manganèse (mg/l) dans la zone d'étude

Le manganèse est très commun par exemple dans les silicates. Des concentrations élevées de manganèse sont favorisées par des conditions réductrices dans les eaux souterraines. Concentrations jusqu'à 1,3 mg/l ont été rapportées pour neutre et aussi élevée que 9,6 mg/l dans les eaux souterraines acides (ATSDR, 2000). Ces effets sont également vrais pour la zone d'étude, comme le montre la Figure 19.

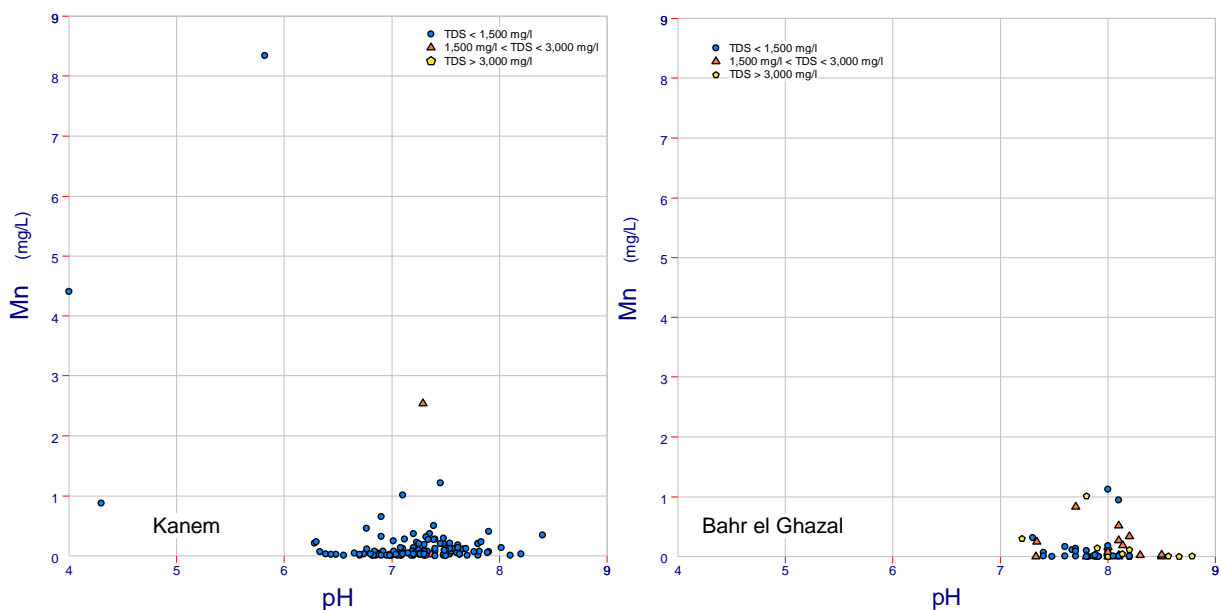


Figure 19. Corrélation entre manganèse et pH au Kanem (gauche) et Bahr el Ghazal (droite)

4.2.9 Fluorure – F (mg/l)

Le fluorure est nécessaire pour des dents saines. Toutefois, l'exposition de longue date à des concentrations supérieures à 0,5 mg/l peut conduire à des taches sur les dents (fluorose dentaire). L'exposition de longue durée à des concentrations supérieures à 1,5 mg/l peut causer des problèmes squelettiques (ostéosclérose-fluorurée). L'OMS a fixé la limite de concentration en fluorure dans l'eau souterraine à 1,5 mg/l.

Les concentrations en fluorure dans la zone d'étude varient de 0,003 mg/l à 1,6 mg/l avec une moyenne de 0,2 mg/l dans la région du Kanem et de 0,04 mg/l à 7,14 mg/l avec une moyenne de 1,00 mg/l dans la région du Bahr el Ghazal. La distribution du fluorure est présentée à la Figure 20.

Des concentrations supérieures à 0,5 mg/l sont rencontrées dans presque tous les échantillons provenant de la vallée fossile du Bahr el Ghazal. Avec seulement 7% des échantillons montrant des valeurs comprises entre 0,5 mg/l et 1 mg/l, les concentrations en fluorure sont généralement faibles dans la région du Kanem (Figure 21).

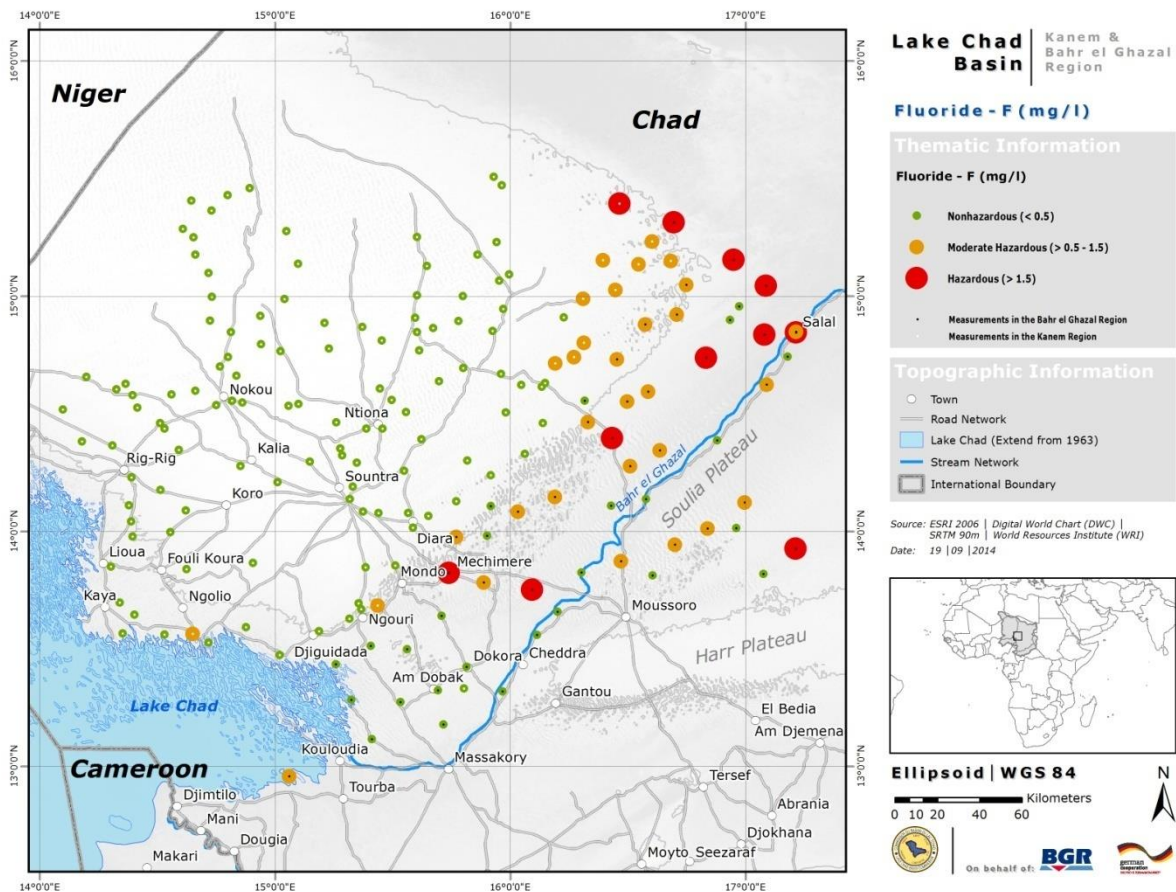


Figure 20. Distribution de fluorure (mg/l) dans la zone d'étude

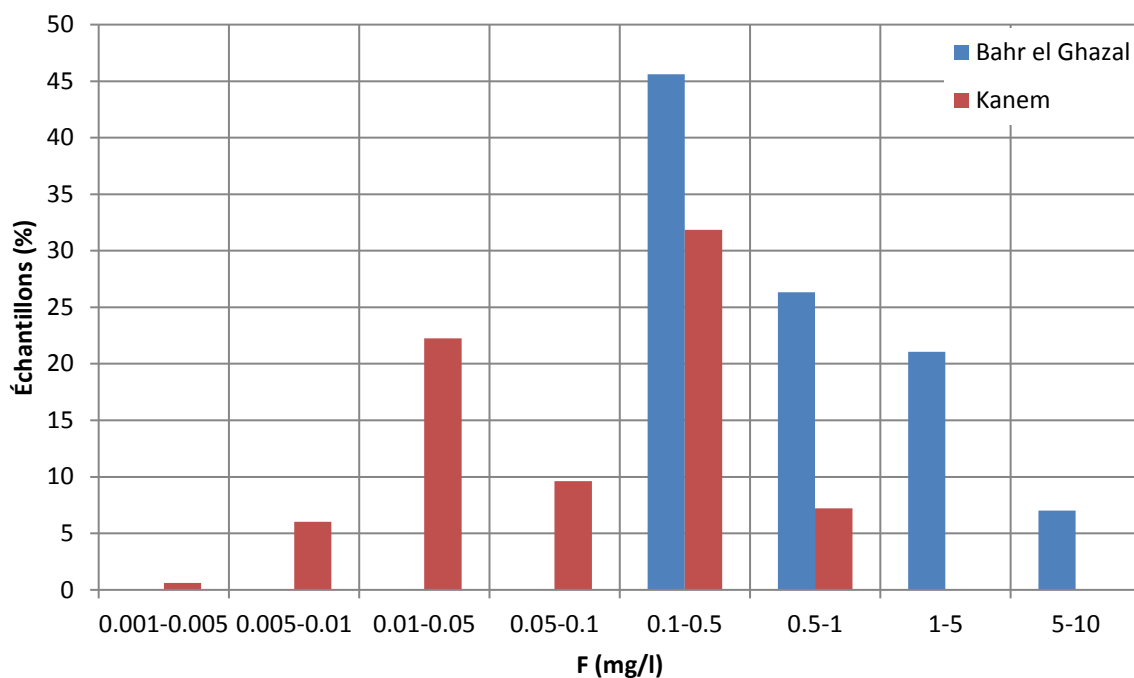


Figure 21. Distribution statistique des concentrations de fluorure dans les régions du Bahr el Ghazal et du Kanem

Des eaux souterraines très fluorurées sont rencontrées dans les zones volcaniques actives associées aux activités géothermiques et aquifères du socle (Fantong et al, 2009). Dans les bassins sédimentaires, les sources de fluorure sont généralement fluorite (CaF_2), fluorapatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) ou micas dérivés de roches granitiques mères.

La fluorite est difficilement soluble dans l'eau dans des conditions de pression et de température normales, bien que les taux de dissolution augmentent dans des conditions alcalines (pH supérieur à 7) et conductivité électrique entre $750 \mu\text{S}/\text{cm}$ et $1750 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Brinda & Elango, 2011). Ces deux conditions sont typiques pour les eaux souterraines dans la région du Bahr el Ghazal.

En outre, le fluorure est généralement associé à des eaux souterraines bicarbonatées sodiques avec des concentrations relativement faibles en calcium et magnésium. Plus la concentration en calcium est faible plus la concentration en fluorure est élevée. Ainsi, tout traitement impliquant une diminution des concentrations en calcium tel que l'échange de cations et l'évaporation favorise l'apparition de fluorure.

La Figure 22 illustre la concentration de fluorure en fonction du rapport sodium/calcium. Des ratios élevés sodium/calcium sont le résultat de l'échange de cations, où le calcium est remplacé par du sodium. Les concentrations en fluorure dans la région du Bahr el Ghazal (en bleu) révèlent une forte corrélation ($R^2 = 0,87$) avec le ratio sodium/calcium et on peut conclure que la présence de fluorite combiné avec échange de cations est la source des concentrations élevées en fluorure dans cette zone.

Dans le Kanem, l'eau souterraine a une faible concentration en sodium (Figure 11) et des concentrations élevées en calcium. Par conséquent, la corrélation entre le fluorure et le rapport sodium/calcium est très faible.

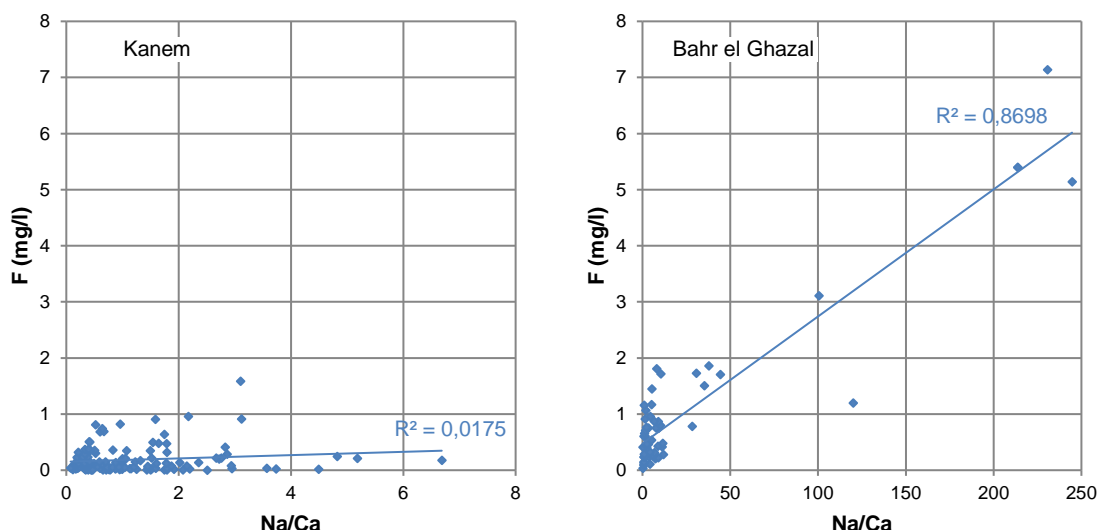


Figure 22. Corrélation entre les concentrations de fluorure et le ratio sodium/calcium au Kanem (gauche) et Bahr el Ghazal (droite)

4.2.10 Arsenic – As (mg/l)

Des lésions cutanées sont fréquentes après cinq années d'exposition à l'arsenic de l'eau potable. En outre, la consommation d'eau polluée avec d'arsenic peut conduire au cancer de la peau, de la vessie et du poumon et aux maladies vasculaires périphériques. L'OMS a fixé la limite supérieure de l'arsenic dans l'eau potable à 0,01 mg/l.

Le laboratoire du BGR a mesuré les concentrations d'arsenic dans la région du Bahr el Ghazal au moyen de couplage inductif de spectrométrie de masse à plasma (ICP-MS) avec une limite de détection de 0,0005 mg/l. Cependant, seuls les 54 échantillons du Kanem ont été mesurés à l'aide de cette méthode. Les 75 autres échantillons ont été mesurés à l'aide d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OE) avec une limite de détection de 0,02 mg/l, ce qui est supérieur à la limite 0,01 mg/l de l'OMS.

Les concentrations d'arsenic dans la région du Kanem sont très faibles. Un total de 19 échantillons (35%) des 54 mesurés avec le ICP-MS montrent des concentrations d'arsenic supérieures à la limite de détection avec un maximum de 0,0062 mg/l et une moyenne de 0,0017 mg/l. Tous les 75 échantillons mesurés au moyen de l'ICP-OE révèlent des concentrations en dessous de la limite de détection de 0,2 mg/l. Pour la région de Bahr el Ghazal, les concentrations d'arsenic varient entre les valeurs inférieures à la limite de détection de 0,0005 mg/l et 0,25 mg/l avec une moyenne de 0,03 mg/l. La concentration maximale en arsenic de 0,25 mg/l a été mesurée à Bourki. La distribution de l'arsenic est présentée en Figure 23.

Les concentrations d'arsenic mesurées au-dessus de la limite OMS de 0,01 mg/l sont rencontrées dans 18 échantillons, tous situés dans les flancs de la vallée fossile du Bahr el Ghazal. Toutefois, en raison de la limite de détection de 0,02 mg/l utilisée dans les analyses; d'autres échantillons peuvent avoir des concentrations d'arsenic supérieures à la limite de l'OMS (46% de l'ensemble des données d'échantillonnage restent sous la limite de détection de 0,02 mg/l).

L'arsenic naturel est présent dans quelques 200 espèces minérales avec la pyrite (sulfure de fer minéral) contenant de l'arsenic comme le plus commun (IPCS, 2001). Ces minéraux sont un problème particulier dans les régions dominées par des jeunes sédiments riches en matières organiques (Winkel et al., 2008) enterrés rapidement (Holocène). De là, la source la plus probable de la pollution de l'arsenic dans la région du Bahr el Ghazal serait la série Labdé (Serviteur & Servant, 1970), ce qui correspond à l'Holocène et est supposé être riche en

matière organique, en raison de l'influence du paléo lac Tchad, comme déjà expliqué dans la section 4.2.6. Cependant, sans la conclusion des enquêtes, cela reste une théorie.

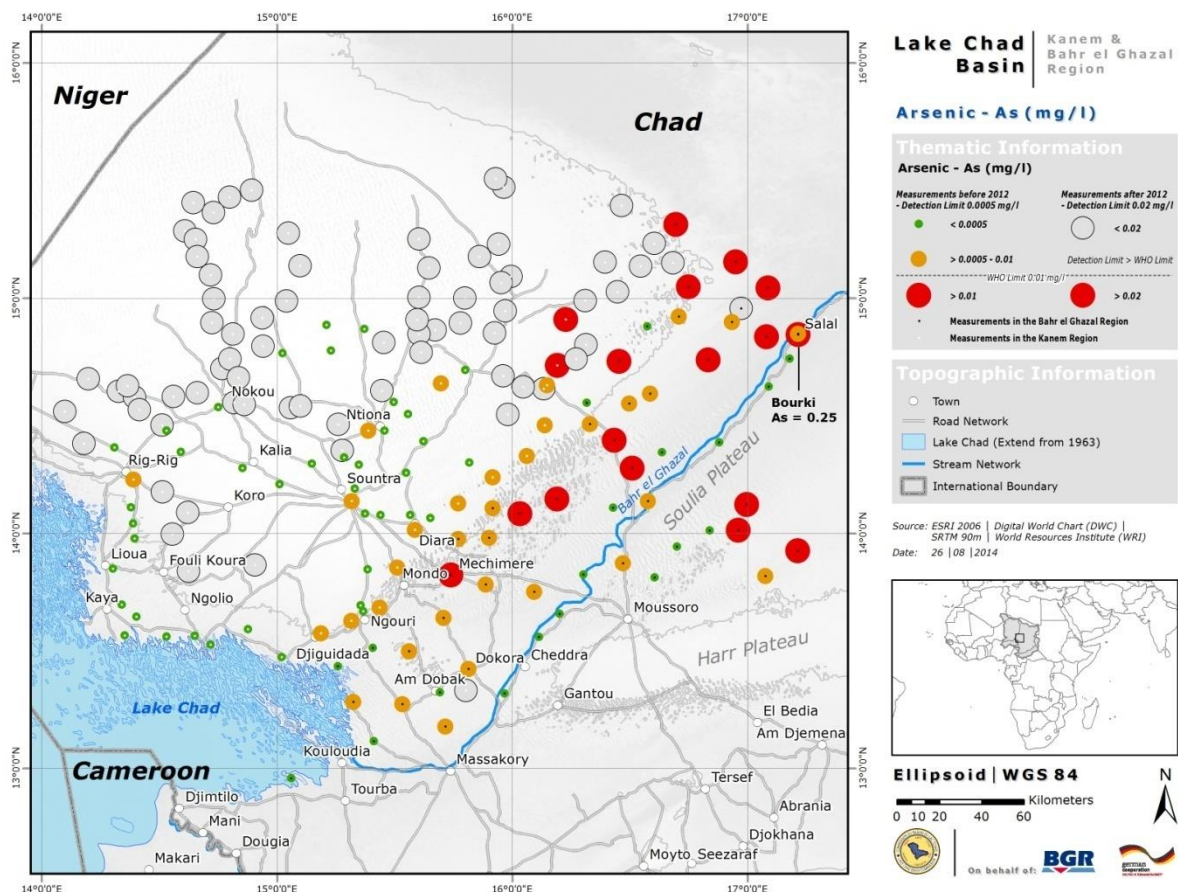


Figure 23. Distribution de l'arsenic (mg/l) dans la zone d'étude

En raison des effets dangereux sur la santé d'une concentration élevée d'arsenic dans l'eau potable, il est fortement recommandé que l'eau brute soit traitée avant consommation ou que d'autres sources d'approvisionnement en eau soient recherchées.

4.2.11 Aluminium – Al (mg/l)

Parce que les sels d'aluminium sont généralement utilisés comme coagulant dans le traitement d'eau pour réduire les matières organiques, la couleur, la turbidité, et les micro-organismes et ses concentrations résiduelles pourraient être élevées, l'OMS a fixé une limite pour l'aluminium à 0,2 mg/l pour les petites usines de traitement (0,1 mg/l pour les grandes installations de traitement). Dans la nature, la présence de concentrations élevées d'Al est généralement liée à un faible pH ($\text{pH} < 3,5$).

En général, les concentrations d'aluminium dans la région du Kanem varient de 0,008 mg/l à 0,409 mg/l avec une moyenne de 0,071 mg/l. Les deux valeurs extrêmes ont été mesurées dans des endroits avec l'eau souterraine très acide (Royono avec une concentration en aluminium de 10,5 mg/l et un pH de 4,0 et Belte avec une concentration en aluminium de 12,30 mg/l et pH 4,3). Cependant, pour les valeurs de pH mesurées, les concentrations en aluminium devrait être beaucoup plus faible (Figure 24). Les concentrations élevées en aluminium peuvent être expliqués par la présence de particules d'argile résiduels dans l'échantillon et la méthode de mesure (ICP-OE). Cette méthode ne peut pas distinguer entre les atomes d'aluminium de l'échantillon d'eau et ceux contenus dans l'argile.

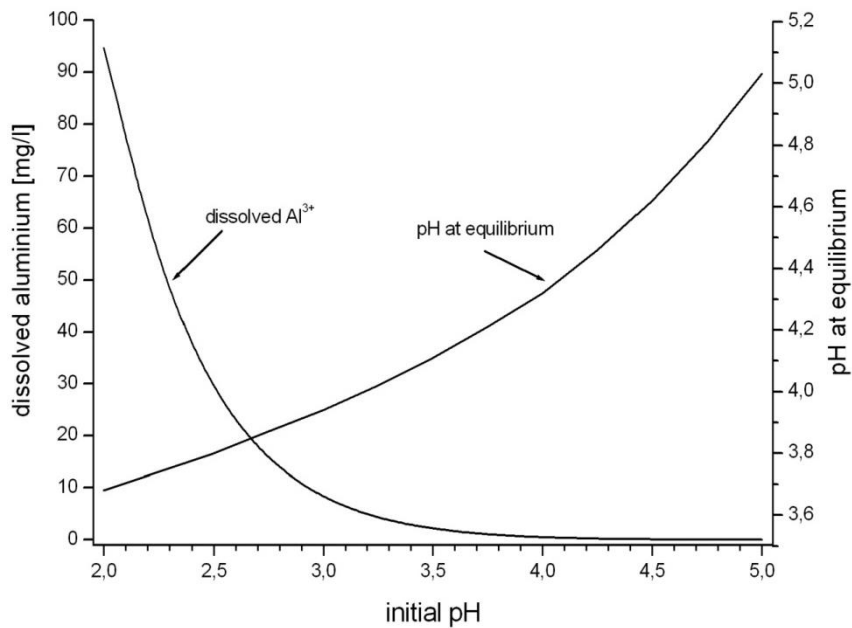


Figure 24. Aluminium dissous en relation avec le pH (Houben & Treskatis, 2007)

Dans la région du Bahr el Ghazal, les concentrations en aluminium varient de valeurs inférieures à la limite de détection de 0,003 mg/l à 1,20 mg/l, avec une moyenne de 0,10 mg/l. La distribution de la concentration en aluminium est présentée à la Figure 25.

Au total, 15 échantillons présentent des concentrations en aluminium supérieures à la limite de l'OMS. Ils sont principalement situés dans la partie sud-ouest du Kanem, à proximité du lac Tchad.

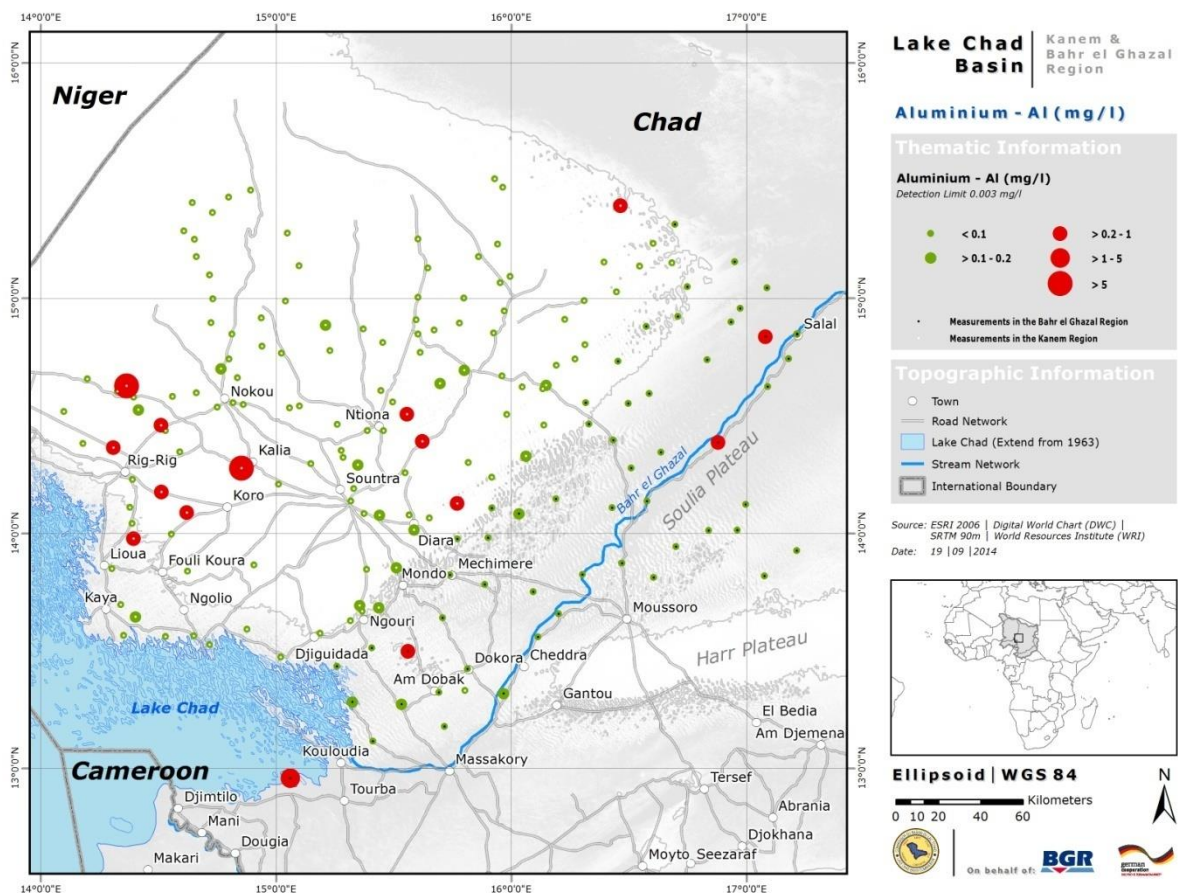


Figure 25. Distribution de l'aluminium (mg/l) dans la zone d'étude

4.2.12 Cartographie de lapollution naturelle des eaux souterraines

Afin d'évaluer l'aptitude des eaux souterraines pour la consommation humaine dans la zone d'étude, les concentrations d'arsenic, manganèse, fluorure et sulfate ont été considérés (Figure 26).

La plupart des échantillons, en particulier dans la région du Kanem, sont exemptes de contaminants et donc aptes à la consommation. Contamination au-dessus du seuil de l'OMS avec des composants simples se produit respectivement, pour le manganèse dans dix échantillons, pour le sulfate dans cinq et pour le fluorure et l'arsenic dans deux.

Contamination simultanée de l'arsenic et de fluorure se produit dans quatre échantillons, l'arsenic avec du sulfate dans trois, et le manganèse avec du sulfate dans trois. A l'exception de deux cas, la contamination simultanée d'au moins deux composants a lieu dans la région du Bahr el Ghazal.

Trois éléments apparaissent simultanément dans cinq échantillons concernant l'arsenic, le fluorure et le sulfate et une concernant l'arsenic, le manganèse et le sulfate. Tous ces cas correspondent à la région du Bahr el Ghazal.

Au total, 35 (19%) des 185 échantillons présentent des contaminations naturelles au-dessus du seuil de l'OMS. La zone la plus contaminée est située dans la région du Bahr el Ghazal au nord-est de Dokora. Sans mesures de purification, les eaux souterraines ne doivent pas être utilisées à des fins de consommation.

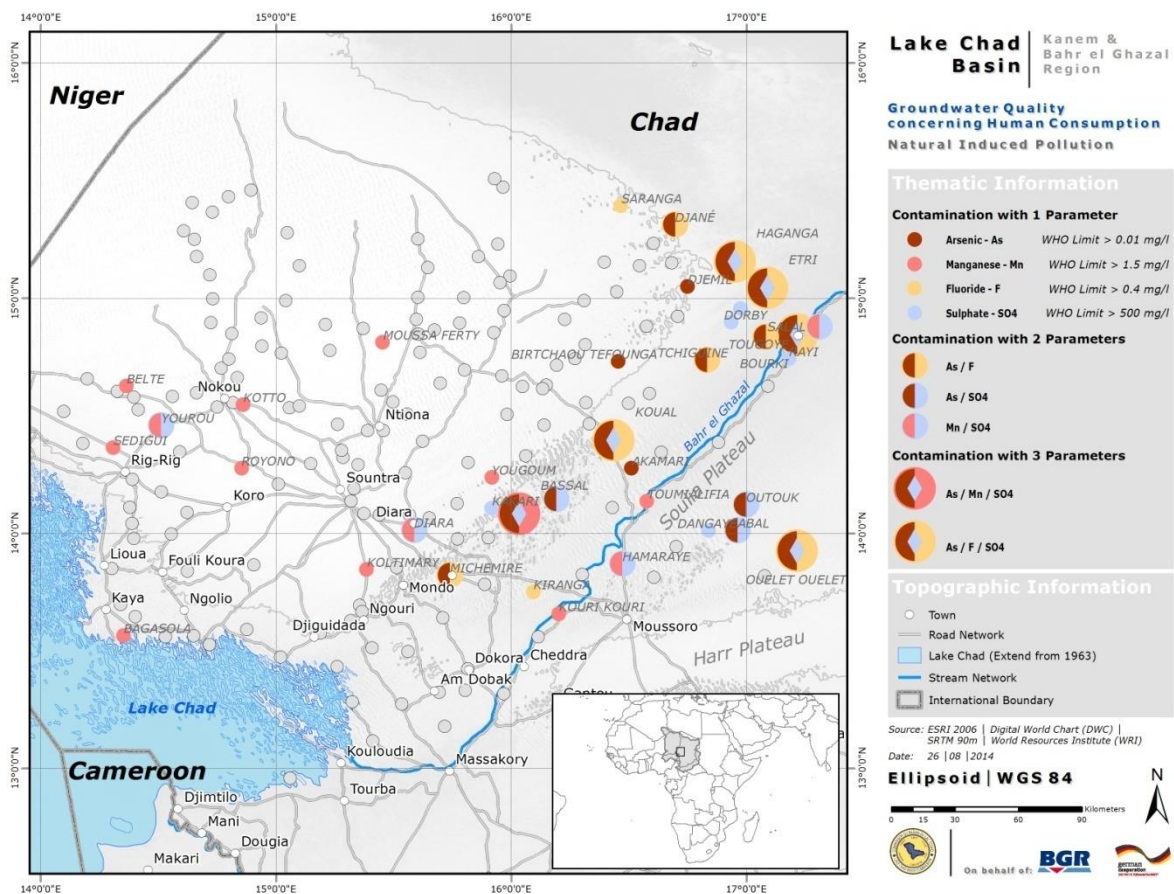


Figure 26. Indicateurs de contamination des eaux souterraines

4.3 Composés d'azote

4.3.1 Nitrate – NO₃ (mg/l)

Des niveaux élevés de concentration en nitrates dans les eaux souterraines sont un indicateur de la pollution par des matières fécales humaines et animales et/ou l'utilisation excessive d'engrais dans l'agriculture.

On considère que des concentrations élevées de nitrates peuvent causer la méthémoglobinémie (mort par asphyxie) chez les nourrissons. Il est également considéré comme cancérigène. L'OMS a fixé une limite pour la concentration de nitrates dans les eaux souterraines à 50 mg/l. Cependant, des concentrations supérieures à 25 mg/l indiquent déjà une pollution et des mesures doivent être prises pour éviter de nouvelles contaminations.

Les concentrations en nitrates varient de 0,05 mg/l à 353,0 mg/l avec une moyenne de 20,6 mg/l dans la région du Kanem et de 0,05 mg/l à 431,0 mg/l avec une moyenne de 38,1 mg/l dans la région du Bahr el Ghazal. La distribution des concentrations de nitrates dans la zone d'étude est présentée à la Figure 27

Des concentrations supérieures à la limite OMS de 50 mg/l se produisent dans 25 (13,5%) des 185 échantillons. Un autre 15 (8%) des échantillons ont une concentration en nitrates supérieure à 25 mg/l. Des concentrations élevées apparaissent principalement au nord-ouest de la zone d'étude dans la région du Kanem, le long de la rive du lac et le long de la vallée fossile du Bahr el Ghazal. On suppose que la pollution de nitrate est d'origine anthropique et répond à une mauvaise gestion des points d'eau et/ou le manque d'hygiène.

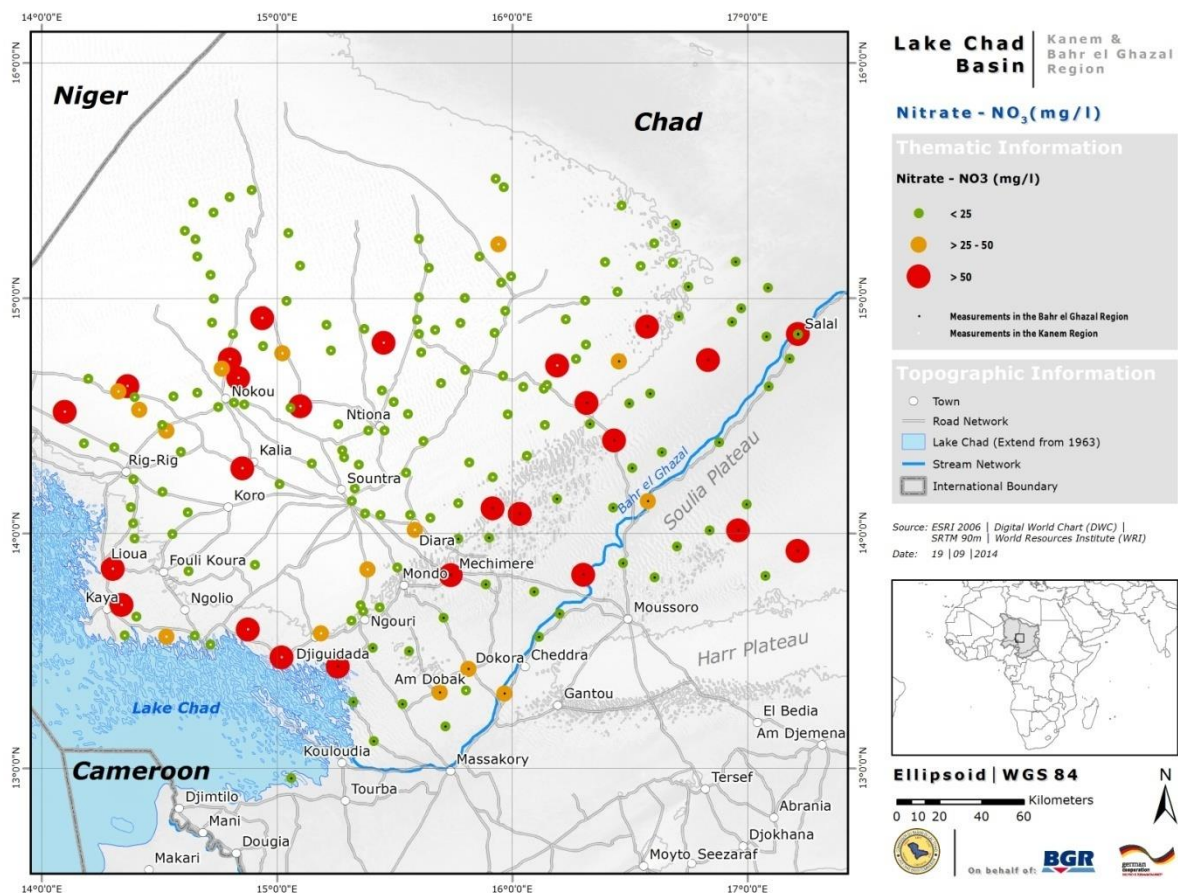


Figure 27. Distribution de nitrate (mg/l) dans la zone d'étude

4.3.2 Nitrite – NO₂ (mg/l)

Nitrite est 10 fois plus puissant que le nitrate par rapport à la méthémoglobinémie. L'OMS a fixé une limite de 0,2 mg/l pour l'exposition à long terme, et 3,0 mg/l pour un contact à court terme.

Les concentrations en nitrite varient entre des valeurs inférieures à la limite de détection de 0,003 mg/l et 26,3 mg/l avec une moyenne de 0,8 mg/l dans le Kanem et en dessous de la limite de détection et 0,9 mg/l, avec une moyenne de 0,13 mg/l dans le Bahr el Ghazal. La distribution du nitrite dans la zone d'étude est présentée à la Figure 28.

Des concentrations en nitrite au-dessus de 3 mg/l sont présentes dans seulement deux échantillons et en outre 18 (10%) des 185 échantillons ont des concentrations en nitrite supérieures à 0,2 mg/l. Des concentrations élevées apparaissent principalement au nord-ouest de la zone d'étude, dans la région du Kanem. Cette pollution est supposée être le résultat d'une mauvaise gestion des points d'eau et/ou le manque d'hygiène.

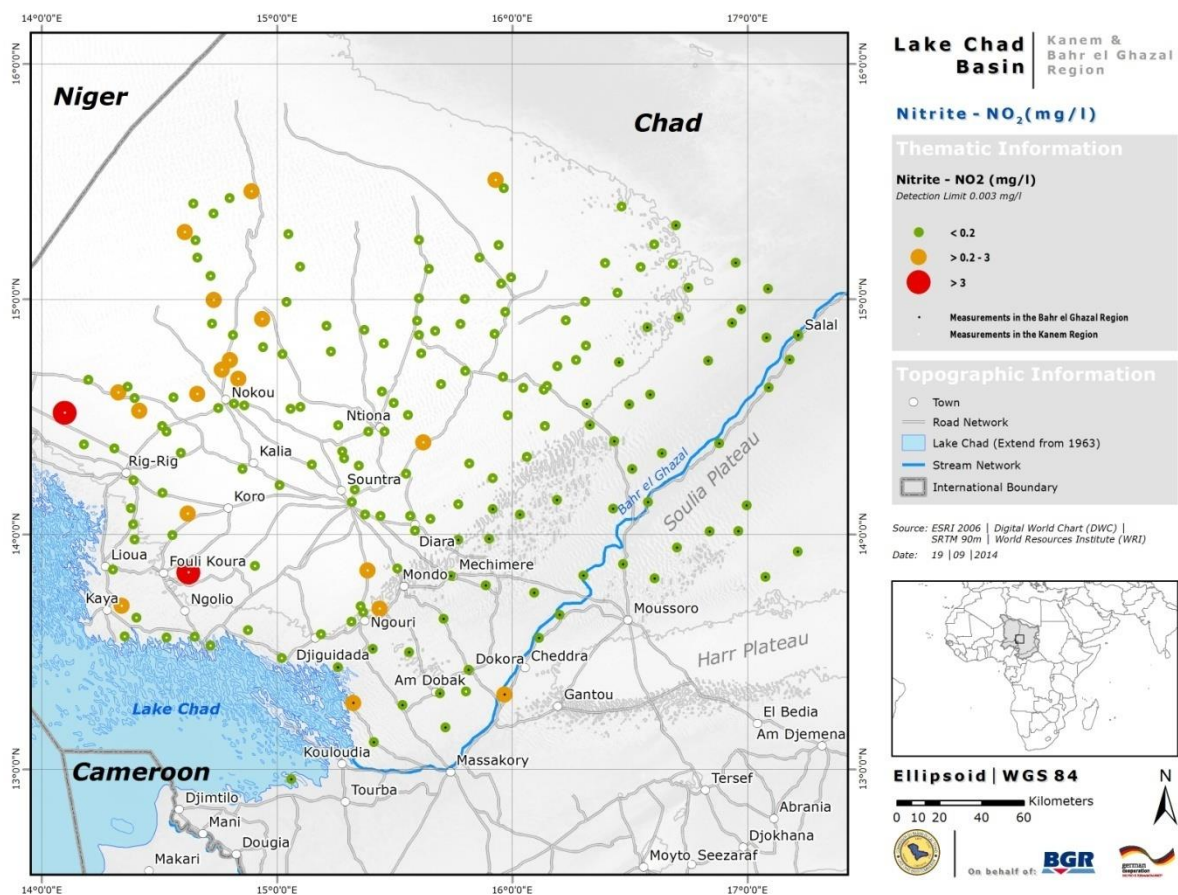


Figure 28. Distribution de nitrite (mg/l) dans la zone d'étude

4.3.3 Ammonium – NH₄ (mg/l)

La présence d'ammonium non ionisé NH₃ (ammoniac) ou ionisé NH₄⁺ (ammonium) dans l'eau est un indicateur de bactéries, eaux usées et pollution animale. En nature, les concentrations d'ammonium inférieures à 0,2 mg/l peuvent être rencontrées dans les eaux de surface et souterraines. Toutefois, dans des conditions anaérobiques, les concentrations d'ammonium peuvent augmenter sensiblement.

Parce que l'ammonium ne représente pas un risque pour la santé l'OMS n'a défini aucune limitation pour ce composé.

La concentration d'ammonium varie entre des valeurs inférieures à la limite de détection de 0,01 mg/l et 8,9 mg/l avec une moyenne de 0,4 mg/l dans la région du Kanem et des valeurs inférieures à la limite de détection à 24,1 mg/l avec une moyenne de 0,8 mg/l dans la région du Bahr el Ghazal. Leur répartition dans la zone d'étude est présentée dans la Figure 29.

Les valeurs élevées au-dessus de 0,2 mg/l sont rencontrées dans 27 (14,6 %) des 185 échantillons qui sont situées principalement dans le nord-ouest de la zone d'étude dans la région du Kanem et le long du Bahr el Ghazal. Dans quatre cas, la concentration d'ammonium mesurée se situe même au-dessus de 3 mg/l. Il est supposé que la pollution est ponctuelle et le résultat de la mauvaise gestion des points d'eau et/ou le manque d'hygiène.

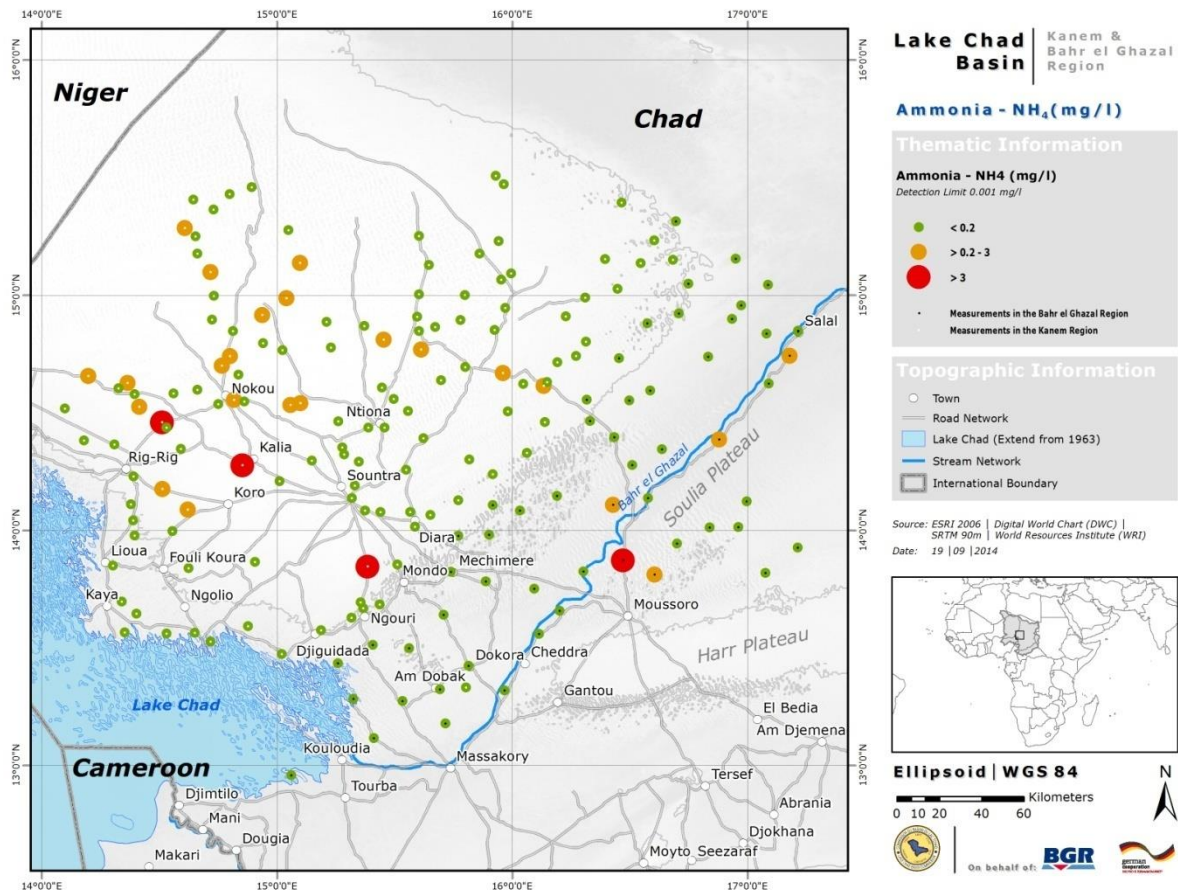


Figure 29. Distribution d'ammoniac (mg/l) dans la zone d'étude

4.3.4 Cartographie de la pollution induite par L'homme

Pour analyser la pollution induite par l'homme tous les trois composants d'azote sont considérés ensemble (Figure 30).

Un total de 32 (17 %) des 185 échantillons contiennent des eaux souterraines impropres par rapport à la pollution aux composants d'azote (au moins l'un des composants a une concentration au-dessus de la limite respective de l'OMS). Elles sont situées principalement dans le nord-ouest de la zone d'étude dans la région du Kanem, le long de la rive du lac et le long des flancs de la vallée fossile du Bahr el Ghazal.

Autre 37 (20%) des échantillons ont des eaux souterraines considérées comme douteuses car au moins l'un des composants a un taux élevé de contamination.

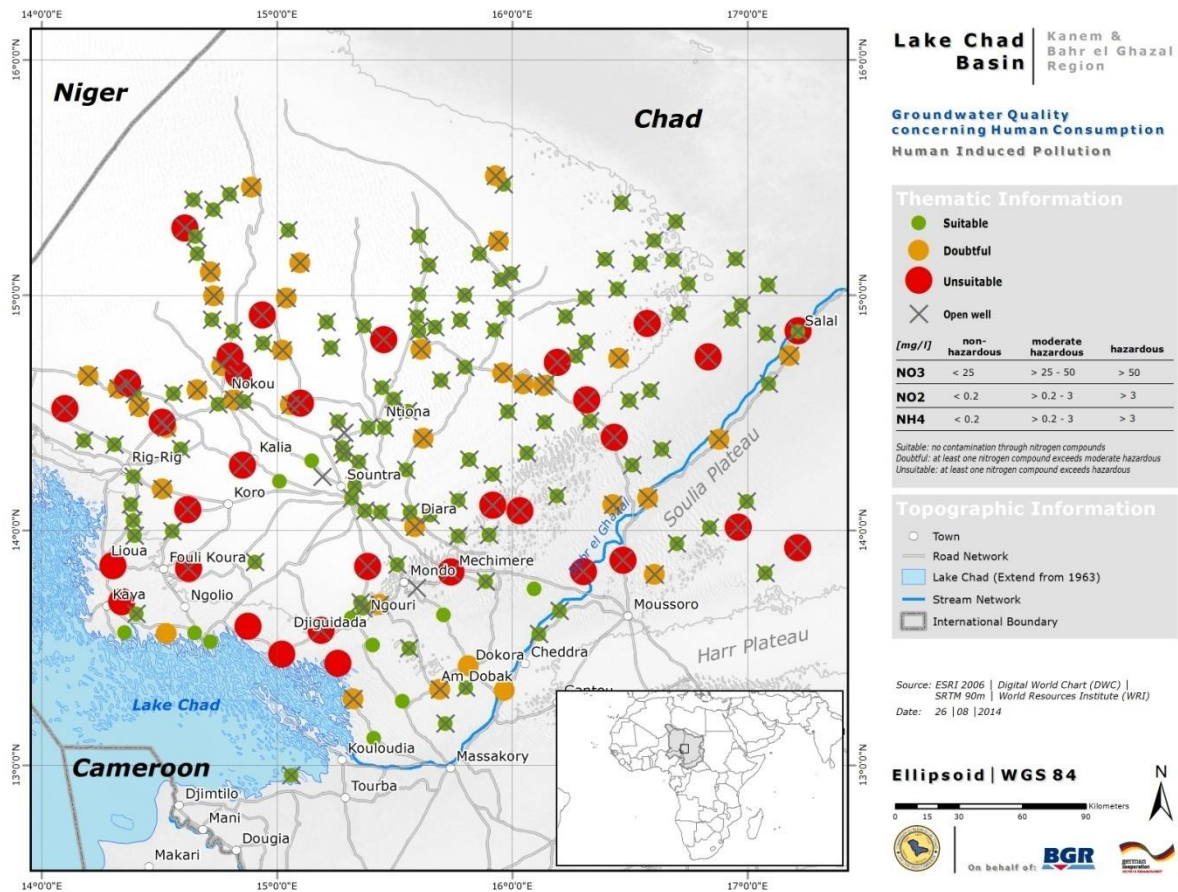


Figure 30. Pollution azotée humaine des eaux souterraines

4.4 Evaluation de l'aptitude de l'eau souterraine pour l'irrigation

L'aptitude des eaux souterraines à des fins d'irrigation dépend de l'effet des constituants minéraux de l'eau sur les plantes et les sols. Critères d'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation sont, entre autres, le risque de salinité ou de la teneur totale en sel soluble estimée au moyen de la conductivité électrique, la teneur en sodium exprimée en Na% (Wilcox, 1948), et le rapport d'adsorption du sodium (SAR) estimé tel que la proportion relative de sodium aux ions calcium et magnésium (Richards, 1954).

Des teneurs élevées de sel dans l'eau d'irrigation augmentent la pression osmotique dans la solution du sol (Thorne & Peterson, 1954) et inhibent la capacité de la plante à absorber l'eau. En outre, les sels affectent également la structure du sol, la perméabilité du sol, l'aération, la texture et l'agrégation (Trivedy et Geol, 1984).

De fortes concentrations en sodium limitent l'aptitude de l'eau pour l'irrigation. Sodium adsorbe dans le sol provoquant la décomposition des agrégats de certains sols (dispersion). Ainsi, les pores sont scellés et la perméabilité du sol réduit, en particulier dans le cas des argiles montmorillonite. Les sols argileux affectés deviendront soit anaérobique (oxygène manquant), salins, ou compactés (Saleh et al., 1999; Bauder et al., 2008).

4.4.1 Pourcentage de Sodium (Na%)

Wilcox, (1955) propose de tracer la teneur en sodium dans les cations (en pourcentage) par rapport à la conductivité électrique. Le pourcentage de la teneur en sodium doit être calculé en utilisant l'équation suivante:

$$Na\% = \frac{Na^+ + K^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} * 100$$

avec toutes les concentrations ioniques en milliéquivalents par litre (meq/l).

Le diagramme Wilcox pour la région du Kanem (Figure 31, à gauche) montre que 116 des 129 échantillons (90%) sont classés de très bon à bon. Sept échantillons (5%) se trouvent dans la fourchette de bon à autorisé et six autres (5%) dans la catégorie de permis à douteux. Aucun échantillon ne tombe dans la catégorie impropre à des fins d'irrigation.

Dans le cas de la région du Bahr el Ghazal, quatorze des 56 échantillons (25%) correspondent à la gamme très bon à bon et deux autres (4%) sont classés de bon à autorisé. Onze échantillons (20%) sont situés dans le champ de permis à douteux, treize (23%) dans le champ de douteux à impropre et les seize restants (28%) ne sont pas adaptés pour l'irrigation (Figure 31, à droite).

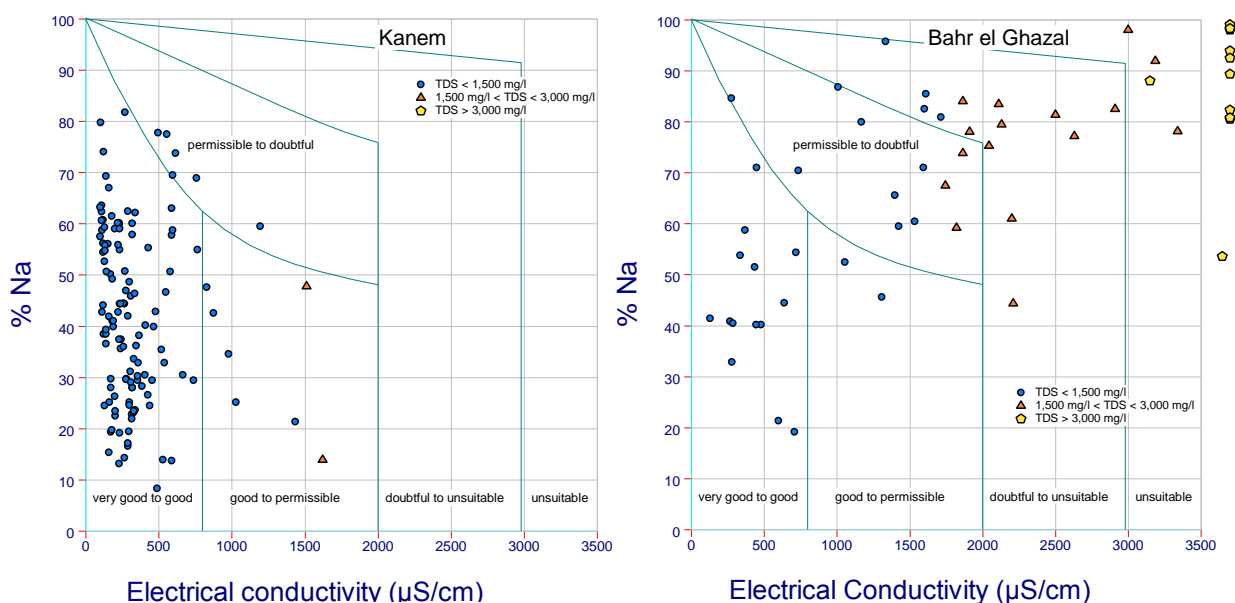


Figure 31. Le diagramme de Wilcox pour évaluer la pertinence des eaux souterraines pour l'irrigation

Si seulement le pourcentage de sodium est considéré, les classifications pour les régions du Kanem et du Bahr el Ghazal sont présentées respectivement dans le Tableau 3 et le Tableau 2. Dans la région du Kanem, les valeurs de Na% se situent entre 8,3 et 79,7. La plupart des échantillons se classent entre le bien (40%) et l'autorisable (41%). Un autre 10% des échantillons sont excellents à des fins d'irrigation et 9% sont douteux. Encore une fois, aucun des échantillons n'entrent dans la catégorie impropre.

Les valeurs de Na% dans la région du Bahr el Ghazal (Tableau 3) se situe entre 19,1 et 99. La plupart des échantillons (41,1%) se classent comme impropres à des fins d'irrigation. Seulement trois échantillons (6%) sont observés comme excellente et bon. Les 53% demeurant se situent dans les catégories autorisables (28%) ou douteux (25%).

Tableau 2: Classification des eaux souterraines sur la base de Na% pour la région du Kanem

| Qualité de l'eau | %Na | No des échantillons | [%] |
|------------------|-------|---------------------|-----|
| Excellent | <20 | 13 | 10 |
| Bon | 20-40 | 52 | 40 |
| Autorisable | 40-60 | 53 | 41 |
| Douteux | 60-80 | 11 | 9 |
| Impropre | >80 | 0 | 0 |

Tableau 3: Classification des eaux souterraines sur la base de Na% pour la région de Bahr el Ghazal

| Qualité de l'eau | %Na | No des échantillons | [%] |
|------------------|-------|---------------------|-----|
| Excellent | <20 | 1 | 2 |
| Bon | 20-40 | 2 | 4 |
| Autorisable | 40-60 | 16 | 28 |
| Douteux | 60-80 | 14 | 25 |
| Impropre | >80 | 23 | 41 |

4.4.2 Sodium Adsorption Ratio (SAR)

Le ratio d'adsorption de sodium (SAR) est une mesure du risque alcalin/sodium aux cultures et est estimée par la formule suivante (Richards, 1954):

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

avec sodium, calcium, et magnésium exprimé en meq/l.

Des valeurs SAR élevées dans l'eau résultent à un plus grand risque de Na%, ce qui entraîne à son tour le développement des sols alcalins (Todd, 1980). En outre, une concentration élevée en sel dans l'eau mesurée par la conductivité électrique conduit à la formation des sols salins. Pour les valeurs SAR au-dessus de 9, l'eau d'irrigation changera la perméabilité des sols argileux en raison de la diminution et du gonflement (Saleh et al., 1999).

Figure 32 ci-dessous représente les diagrammes SAR pour les régions du Kanem (à gauche) et le Bahr el Ghazal (à droite).

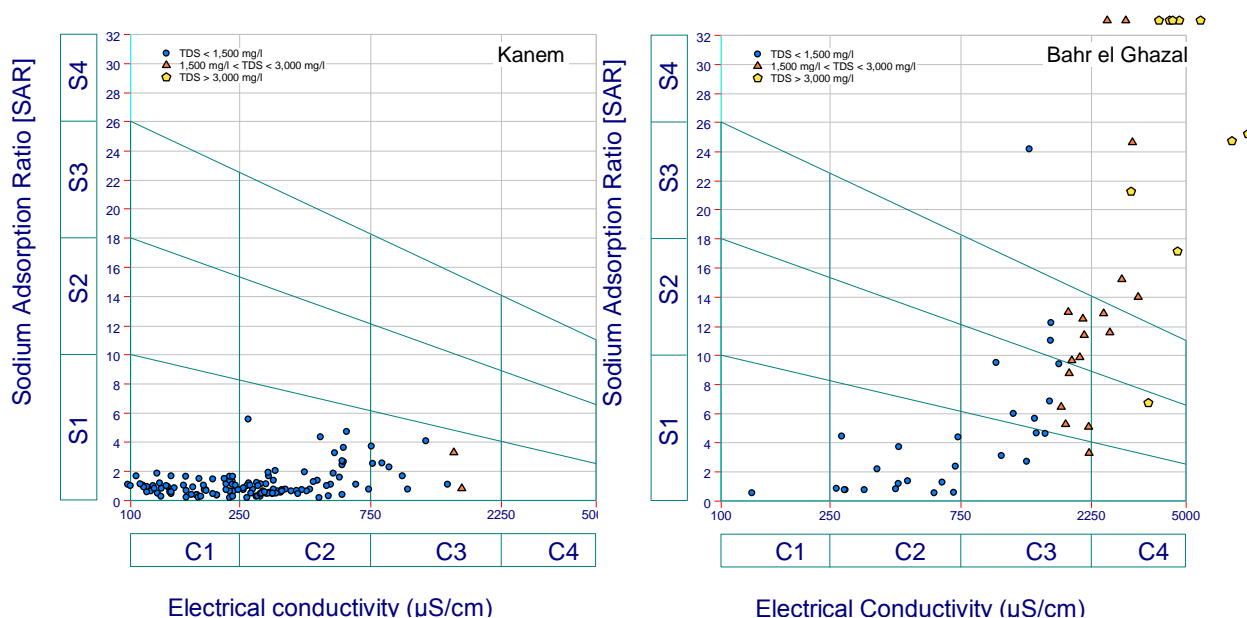


Figure 32. Ratio d'Absorption du Sodium (SAR) pour évaluer la pertinence des eaux souterraines pour l'irrigation au Kanem (gauche) et Bahr el Ghazal (droite)

Les valeurs SAR (S sur l'axe vertical) dans la région du Kanem varient de 0,2 à 5,7 (Figure 32, à gauche). Tous les 129 échantillons sont classés comme excellent pour des fins d'irrigation.

Dans la région du Bahr el Ghazal, les valeurs SAR varient de 0,5 à 87,5 (Figure 32, à droite) et sont réparties sur toutes les catégories. Parmi les 56 échantillons, 21 (38%) se classent

comme excellents, 10 autres échantillons (18%) chute sous la catégorie bon, 9 (16%) sous la catégorie douteuse, et 16 (28%) sous la catégorie impropre à des fins d'irrigation.

Le risque de salinité dans l'eau d'irrigation peut être exprimée en termes de conductivité électrique et sont classées dans l'axe x de la Figure 32. Les valeurs de conductivité mesurées dans la région du Kanem varient de 98 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 1 618 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A partir des 123 échantillons, 57 (44%) sont classés comme excellent, 62 (48%) en tant que bon et 10 (7%) comme douteux. Aucun échantillon ne se trouve dans la catégorie impropre.

Dans la région du Bahr el Ghazal, les valeurs de conductivité varient de 137 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 8 993 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Un seul (2%) des 56 échantillons relèvent de la catégorie excellente, 15 (27%) sous la bonne, 24 (43%) sous la douteuse et (16%) sous l'impropre.

Pour l'évaluation des eaux d'irrigation d'après Richards (1954), le rapport d'adsorption du sodium (SAR) et le risque de salinité sont à la fois pris en considération. Ceci peut être facilement réalisé à l'aide des diagrammes de salinité (Figure 31).

Le schéma correspondant à la région du Kanem (Figure 31, à gauche) indique que 44% des 129 échantillons chutent dans la catégorie C1S1 (faible salinité-faible teneur en sodium), 48% dans la C2S1 (moyenne salinité-faible teneur en sodium) et 7% C3S1 (faible salinité-teneur élevée en sodium). Par conséquent, la plupart des eaux souterraines peuvent être utilisé pour l'irrigation sur tous les types de sols avec un filtrage modéré.

Un total de 14 (25%) des 56 échantillons dans la région du Bahr el Ghazal sont distribués dans la catégorie C2S1, 5 (9%) dans le C3S1, 9 (16%) dans le C3S2, 7 (13%) dans la C3S3 et 16 (29%) dans le C4S4 (très haute salinité-sodium très élevé). Cette dernière catégorie est insatisfaisante à toutes fins d'irrigation.

4.4.3 Cartographie de l'aptitude des eaux souterraines à l'Irrigation

Une carte d'aptitude des eaux souterraines à des fins d'irrigation a été produite en prenant en considération le pourcentage des paramètres de sodium (Na%) et le taux d'adsorption du sodium (SAR) (Figure 33). Pour l'élaboration de la carte, on a supposé que les eaux souterraines sont aptes pour l'irrigation si aucun des indices indique que l'eau est impropre (points verts). Les points orange correspondent à des points d'eau, où l'eau souterraine a été classée comme impropre par l'un des indices et les points rouges représentent des points d'eau pour lesquels les eaux souterraines est classé comme impropre par les deux indices.

La qualité des eaux souterraines a été jugée appropriée pour l'irrigation dans 88% des échantillons. La plupart d'entre eux sont situés dans la région du Kanem et le long du lit de la rivière du Bahr el Ghazal. Autres 15 échantillons (9%) ont été classés comme douteux et sont répartis dans le nord-est de la zone d'étude dans la région du Bahr el Ghazal, ainsi que sur le contact nord-ouest entre le Kanem et les régions du Bahr el Ghazal. Les eaux souterraines sont impropres à l'irrigation dans huit endroits (4%), Haganga, Etri, Bourki, Tougoye, Koual, Akamari, Outouk et Ouelet Ouelet, qui sont principalement situés dans la partie nord de la région du Bahr el Ghazal.

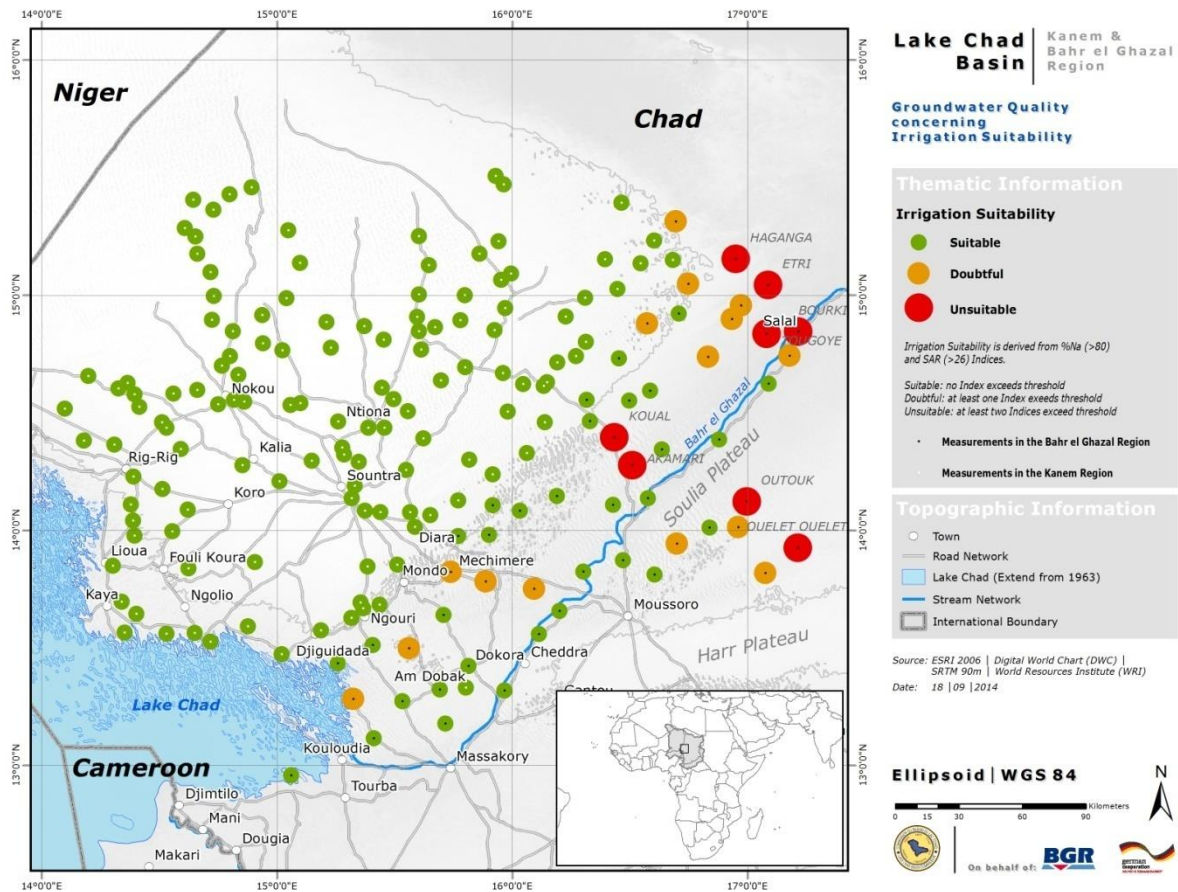


Figure 33. Classification des eaux souterraines en ce qui concerne l'aptitude à l'irrigation

En résumé, la carte montre que les eaux souterraines dans la zone d'étude sont en général aptes pour l'irrigation. Les exceptions sont la partie nord-est de la région du Bahr el Ghazal ainsi que la zone autour de Ouelet Ouelet et Outouk, Akanari et Koual.

4.5 Analyses Isotopiques

4.5.1 Deutérium (^2H) et Oxygen-18 (^{18}O)

Les isotopes environnementaux (^{18}O and ^2H) ont également été mesurés dans la zone d'étude. A l'aide de ces deux isotopes, il est possible de déterminer les effets de l'évaporation de l'eau de recharge.

La Figure 34 montre la ligne locale de l'eau de précipitation de N'Djaména (ligne noire) désignée à partir des données de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA). Les résultats mesurés pour les eaux souterraines dans la zone d'étude sont tracés en rhombes bleus. Ils définissent une ligne locale de l'eau pour la zone d'étude (en bleu) décrite par l'équation suivante:

$$\delta^2\text{H} = 5,8 \delta^{18}\text{O} - 6,5$$

En raison du fait que la pente de la ligne locale (5,8) est inférieure à la pente de la précipitation à N'Djaména (6,3), on peut conclure qu'en général l'eau de recharge dans la zone d'étude subit l'effet d'évaporation avant d'atteindre la nappe phréatique.

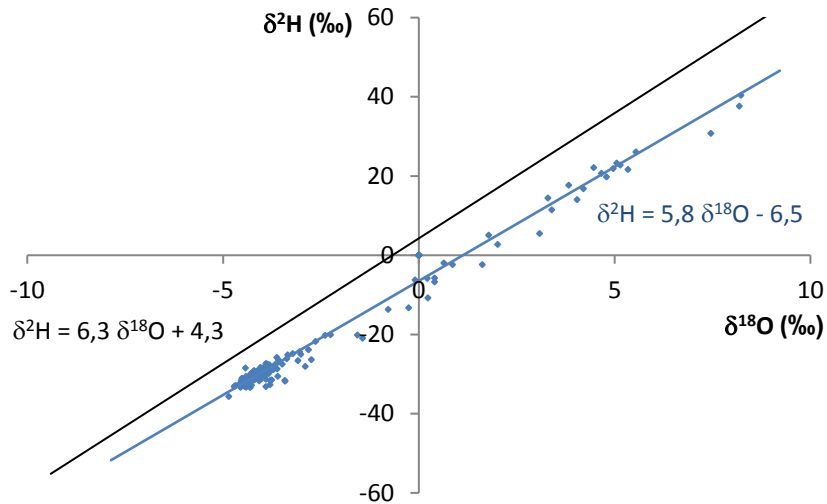


Figure 34. Résultats de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ pour la zone d'étude comparés avec la ligne d'eau à N'Djamena (ligne en noir)

La distribution de $\delta^{18}\text{O}$ dans la zone d'étude est présentée dans la Figure 35. La carte permet une différenciation des effets d'évaporation subis par l'eau de recharge. Les valeurs inférieures à -4 correspondent à la recharge avec de l'eau de précipitation directe. Les valeurs supérieures à -2 correspondent à la recharge produite par l'eau qui a connu une certaine évaporation, typique pour l'eau stagnante de la surface. Plus large est la valeur de $\delta^{18}\text{O}$, plus la quantité d'évaporation subie par l'eau de surface est élevée.

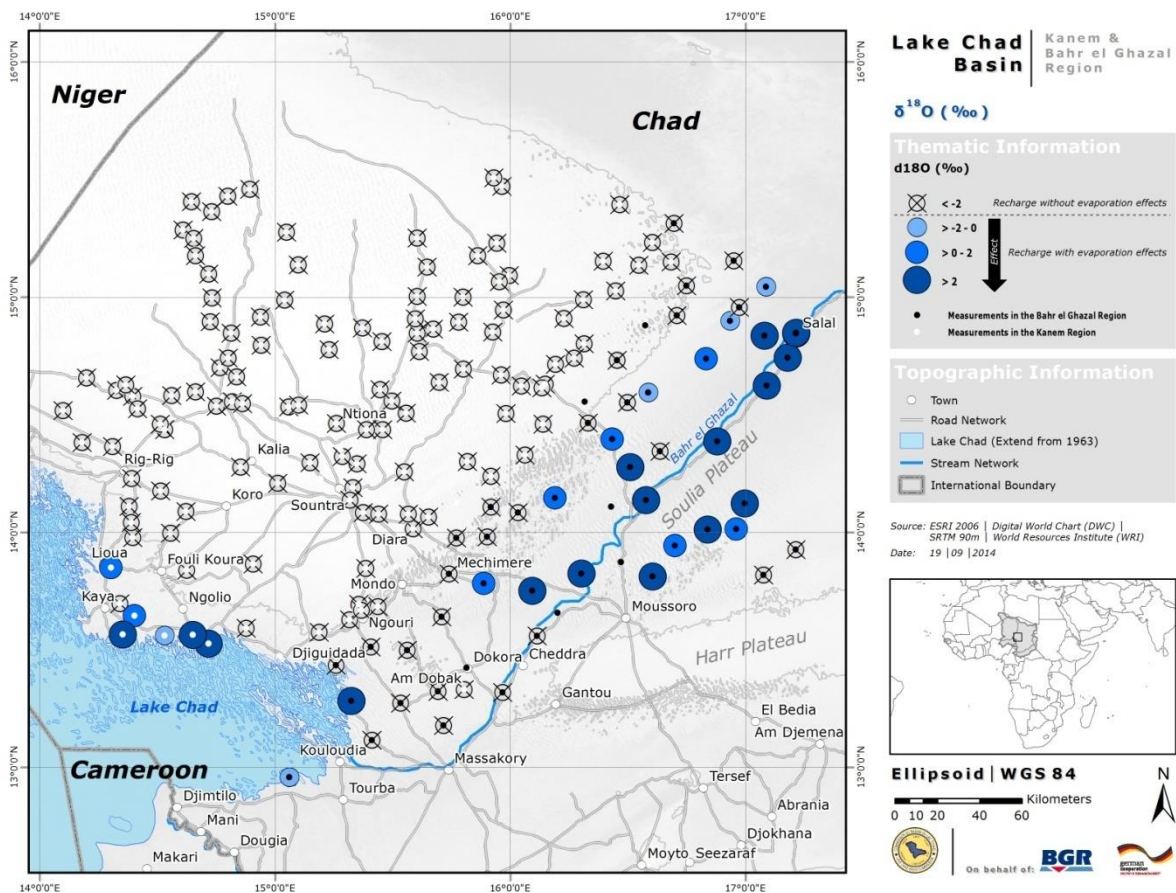


Figure 35. Distribution de $\delta^{18}\text{O}$ dans la zone d'étude

De très faibles valeurs (sous -4) sont rencontrées dans la région du Kanem et suggèrent la recharge directe avec l'eau des précipitations. Les valeurs élevées de $\delta^{18}\text{O}$ se produisent le long de la rive du lac et du Bahr el Ghazal et donnent des indications pour une recharge avec de l'eau du lac et/ou l'eau stagnante au Bahr el Ghazal après les inondations sporadiques ou averses.

4.5.2 Tritium – ^3H (TU)

Tritium dans l'atmosphère est produit naturellement par le rayonnement cosmique, mais une charge supplémentaire d'origine humaine a eu lieu au cours des essais de bombes thermonucléaires entre 1951 et 1981. Dans les années 1990, la plupart de ce tritium supplémentaire avait été emportée par les précipitations et dès ces années les niveaux dans l'atmosphère correspondent au rayonnement cosmique (Clark & Fritz, 1997).

Le tritium est incorporé dans la molécule d'eau des précipitations en tant que $^1\text{H}^3\text{HO}$ et peut donc être utilisée comme marqueur pour évaluer les récentes recharges. En raison de sa courte durée de vie (demi-vie de 12,43 ans), il ne peut être trouvé que dans les eaux souterraines qui ont été rechargées au cours des cinquante dernières années (Clark & Fritz, 1997).

Malheureusement, très peu de résultats de tritium sont disponibles pour la zone d'étude. Cependant, ces quelques mesures permettent une interprétation possible de la recharge (Figure 36). Selon une communication orale avec le Dr. Sültenfuß, un spécialiste du tritium de l'Université de Brême, les eaux souterraines par rapport au tritium dans l'hémisphère sud peuvent être considérées comme très vieille (rechargées avant 1951) pour des valeurs inférieures à 3 TU, comme rechargée il y a environ 40 ans pour des valeurs supérieures à 5 TU et récemment rechargée ou eau mélangée pour des valeurs comprises entre 3TU et 5 TU.

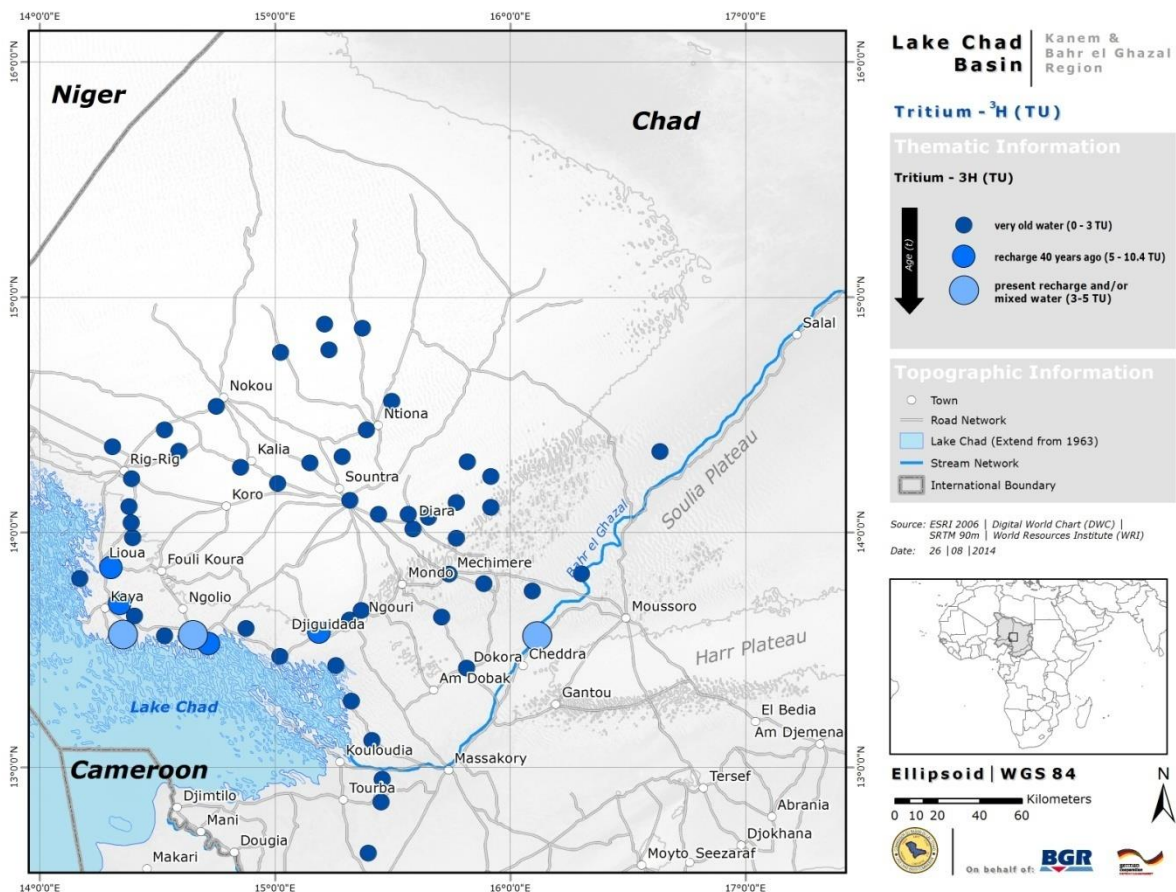


Figure 36. Distribution de tritium (TU) dans la zone d'étude

La Figure 36 révèle que les recharges dans la plupart des régions du Kanem ont eu lieu avant 1951. Le long de la rive du lac, les données de tritium indiquent une recharge d'il y a 40 ans. Ceci est le résultat d'une recharge de l'eau du lac (échantillons montrent aussi de grandes valeurs de ^{18}O) lorsque le lac Tchad avait une extension de 23 000 km² et les eaux libres atteint jusqu'à sa rive. Les recharges actuelles ou le mélange des eaux souterraines (anciennes et récentes) est très rare et a été mesurée dans trois échantillons seulement.

4.5.3 Direction d'écoulement des eaux souterraines

La direction de l'écoulement des eaux souterraines est généralement estimée à l'aide des courbes équipotentielles. Toutefois, l'évaluation des données isotopiques permet également la détermination des zones de recharge ainsi que les âges des eaux souterraines. Figure 37 ci-dessous montre toutes ces analyses disponibles ensemble.

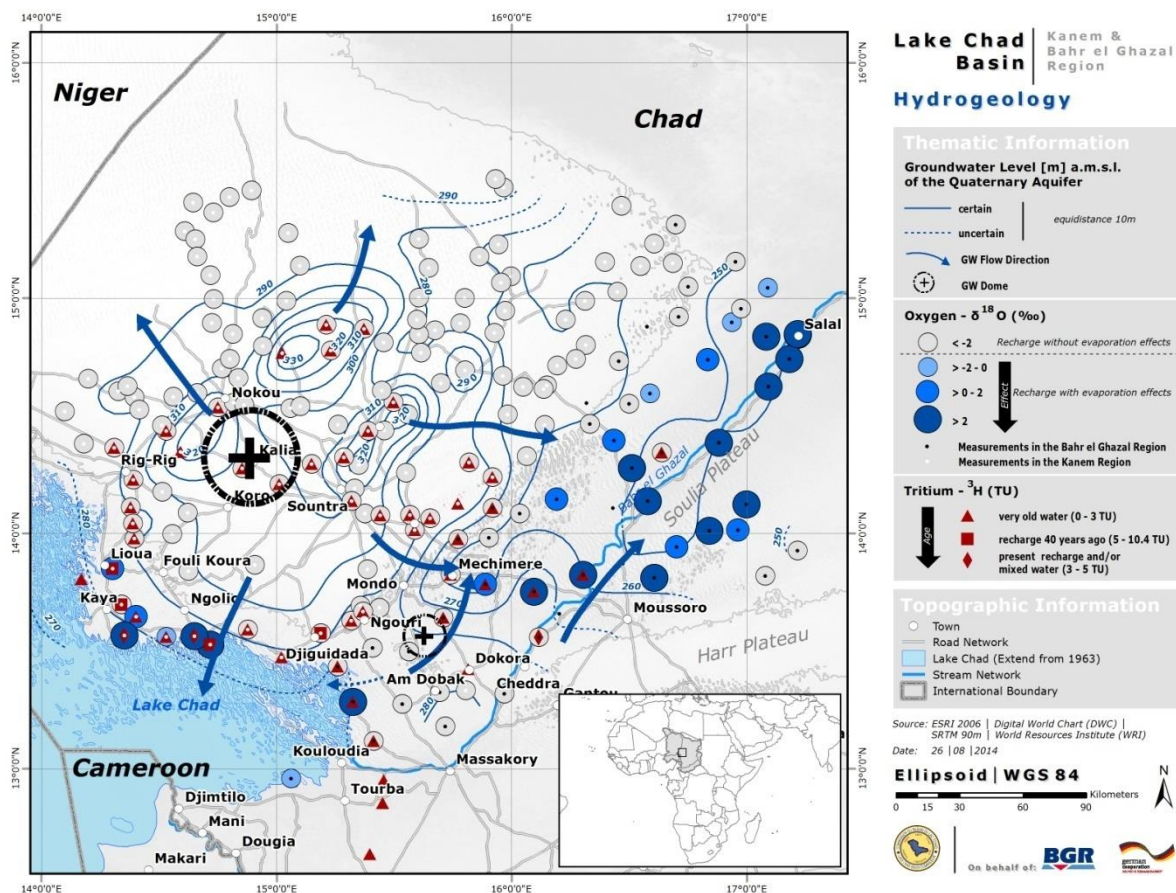


Figure 37. Détermination de l'écoulement des eaux souterraine à l'aide des courbes équipotentielles, isotopes environnementaux et valeurs de tritium

Selon la Figure 37, la région du Kanem se caractérise par un dôme des eaux souterraines rechargé à partir de la précipitation qui a eu lieu avant 1951.

Certains échantillons le long de la rive du lac (indiqué comme l'extension du lac en 1963 sur la Figure 37, mais aussi valable pour 1973), révèle une recharge avec de l'eau du lac il y a environ 40 ans. Toutefois, en raison du rétrécissement du lac, les eaux souterraines semblent couler maintenant plus loin vers le lac.

Les courbes équipotentielles des eaux souterraines indiquent la décharge à la fois du haut dans la région du Kanem et du lac Tchad dans la région du Bahr el Ghazal. En outre, les eaux souterraines le long de la vallée fossile du Bahr el Ghazal se caractérisent par être très vieilles avec de grandes valeurs de ^{18}O . Ces caractéristiques peuvent être expliquées par différents procédés comme suit:

- L'écoulement latéral des eaux souterraines du haut du Kanem est négligeable et l'afflux latéral du lac (actuel et élevé¹⁸O) est très lent, de sorte que l'eau devient plus âgée le long du chemin d'écoulement.
- L'apport latéral du lac est insignifiant, mais le débit latéral de l'eau souterraine du haut de Kanem (très vieux et très faible¹⁸O) éprouve de l'évaporation par capillarité dans la vallée fossile afin que ¹⁸O augmente.
- Les deux entrées latérales sont insignifiantes et l'eau souterraine a été rechargée dans le passé (très vieille) par de l'eau stagnante (¹⁸O élevée), ex. à partir du Paléo Lac Tchad.

Ce dernier processus explique aussi la présence d'excès de sulfate le long des flancs de la vallée fossile du Bahr el Ghazal, comme décrit dans la section 4.2.6, et semble être l'explication la plus adéquate.

5. Conclusions et Recommandations

Les différentes missions de terrain entre Novembre 2009 et Décembre 2013 dans les régions du Kanem et Bahr el Ghazal ont permis la mesure des niveaux statiques et l'échantillonnage des puits creusés à la main, piézomètres et forages pour analyses chimiques et isotopiques. Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit:

- La carte de courbes équipotentiels, les isotopes environnementaux (^{18}O and ^2H) et les valeurs de tritium donnent des indications que les eaux souterraines écoulent d'un haut principal dans la région du Kanem vers le nord-ouest et vers le lac Tchad dans le sud-ouest. L'eau souterraine écoule aussi du lac Tchad au nord dans le Bahr el Ghazal.
- En général, la qualité de l'eau dans la région du Kanem est acceptable pour la consommation humaine parce que :
 - le pH se situe généralement dans la marge autorisée, les exceptions ne sont d'aucune préoccupation hygiénique
 - le fer semble être un problème, en particulier pour le bouchage des tuyaux et la coloration de l'eau
 - le manganèse rencontré à des concentrations élevées dans de nombreux puits peut causer des bouchages de tuyaux et la coloration du linge. En outre, certains points d'eau autour de Rig-Rig et Nokou contiennent des concentrations supérieures à la limite proposée par l'OMS
 - l'aluminium supposé être la cause de la maladie d'Alzheimer, a été retrouvé à des concentrations supérieures à la limite de l'OMS dans onze points d'eau. Cependant, les concentrations extrêmes mesurées à Royono et Belte sont dues à la présence d'argile dans l'échantillon
 - composés azotés (ammonium, nitrites et nitrates) à des concentrations supérieures aux limites respectives de l'OMS sont observés dans toute la région. La pollution semble être d'origine anthropique et résultat d'une mauvaise gestion des points d'eau (présence d'animaux et/ou le manque d'hygiène (fosses septiques))
- Pour Bahr el Ghazal, les eaux souterraines sont considérées comme non aptes à la consommation humaine à cause de :
 - les concentrations en solides dissous totaux (TDS), comme indicateur de la teneur en minéraux de l'eau, sont trop élevées
 - les concentrations en sodium sont généralement élevées et dans de nombreux cas même au-dessus de la limite de l'OMS et peuvent rendre l'eau désagréable
 - le chlorure est présent dans certains points d'eau à une concentration supérieure à la limite de l'OMS
 - le sulfate, qui peut avoir des effets laxatifs sur les consommateurs peu habitués, à des niveaux supérieurs à la limite OMS est rencontré dans certains points d'eau
 - le fer, qui produit le bouchage des tuyaux et la coloration de l'eau, à des concentrations supérieures à la limite de l'OMS a été mesuré dans cinq cas
 - le manganèse à des concentrations élevées qui cause le bouchage des tuyaux et les taches sur la lessive a été rencontré dans plusieurs cas, particulièrement sur le flanc nord de la vallée fossile. Les valeurs supérieures à la limite de l'OMS en raison des effets sur la santé sont rencontrées le long du Bahr el Ghazal
 - le fluorure peut causer la fluorose dentaire ou des problèmes squelettiques à des concentrations de 0,5 mg/l après exposition à long terme. Les points d'eau au sein de la vallée fossile sont caractérisés par des niveaux élevés de fluorure
 - l'arsenic, qui est considéré comme cancérigène, a été rencontrée sur le flanc nord de la vallée fossile
 - l'aluminium, ce qui peut causer la maladie d'Alzheimer, a été mesurée dans trois cas à des concentrations supérieures à la limite de l'OMS
 - le Nitrate et ammonium à des concentrations supérieures aux limites respectives de l'OMS sont répartis de façon aléatoire dans la zone. Ces résultats indiquent la pollution anthropique due à une mauvaise gestion des points d'eau et/ou le manque d'hygiène

- Les eaux souterraines dans la région du Bahr el Ghazal ne sont pas aptes pour l'irrigation
- L'analyse des isotopes environnementaux a montré que les eaux souterraines le long de la rive du lac et dans la région du Bahr el Ghazal sont rechargées par de l'eau qui subit l'effet d'évaporation
- Les valeurs de tritium indiquent la recharge avant les années 1950 dans la plupart de la zone d'étude. Recharge à 40 ans à partir de maintenant est mesurée le long de la rive du lac Tchad. Elle correspond aux années 1970, quand le lac occupait une superficie d'environ 23 000 km² et la surface de l'eau libre arrivait à ce rivage
- Les résultats montrent que les eaux souterraines dans la région du Bahr el Ghazal ont été rechargées dans le passé (très vieux) par l'eau (haut ¹⁸O), par exemple à partir du paléo lac Tchad. Ce paléo lac est aussi la raison pour laquelle la présence de sulfate dans l'eau souterraine est très fréquente dans la région, en particulier le long des flancs de la vallée fossile

D'après les résultats discutés dans le présent rapport, on peut conclure que les eaux souterraines dans la région du Kanem est de bonne qualité pour la consommation humaine. Cependant, des mesures doivent être prises en ce qui concerne le manganèse et l'aluminium.

Dans le cas du Bahr el Ghazal, les eaux souterraines ne doivent pas être utilisées pour la consommation humaine, principalement à cause de concentrations trop élevées de fluorure et d'arsenic qui sont très dangereux pour la santé humaine. Il est recommandé de chercher des sources alternatives d'eau potable ou le traitement de l'eau. Certaines solutions de prévention et de contrôle sont énumérées dans le document de base sur l'arsenic comprenant des directives de l'OMS pour la qualité de l'eau de 2011.

En outre, la précipitation du fer et du manganèse peuvent rendre l'eau dégoûtante et brunâtre et en tant que tel ne sera pas accepté par la population pour la consommation humaine.

Il est recommandé que la gestion des puits dans l'ensemble de la zone d'étude soit améliorée pour éviter la pollution ponctuelle par des matières fécales animales ou humaines qui donnent lieu à la contamination des eaux souterraines avec de l'ammonium, nitrites et nitrates. La sensibilisation de la population pourrait être nécessaire pour atteindre les effets désirés.

6. Références

- ATSDR, 2000. Toxicological profile for manganese. Atlanta, GA, United State Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
- Bauder, J.W., T. A. Bauder, R. M. Waskom, T. F. Scherer, 2008. Assessing the Suitability of Water (Quality) for Irrigation – Salinity and Sodium.
- Bouchard, M.F., Sauv , S., Barbeau, B., Legrand, M., Brodeur, M.-E., Bouffard, Th., Limoges, E., Bellinger D.C. and Mergler, D., 2010. Intellectual Impairment in School-Age Children. *Environmental Health Perspectives* 119 (1): 138–143. Doi:10.1289/ehp.1002321.
- Brinda, K. and Elango, L., 2011. Fluoride in Groundwater: Causes, Implications and Mitigation Measures. In: Monroy, S.D. (Ed.), *Fluoride Properties, Applications and Environmental Management*, Pp. 111-136.
- Cheverry, C., 1974. Contribution à l'étude p dologique des polders du Lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans des sédiments argileux et organiques. PhD thesis at the Université Louis Pasteur, Strasbourg. O.R.S.T.O.M.
- Clark, I., Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press, 328 Pp.
- Durand A. and Mathieu P., 1980, Evolution paléogéographique et paléoclimatique du bassin tchadien au Pléistocène supérieur. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, Vol. 22, Fasc. 4-5, p. 329-341, Paris.
- Fantong, W.Y., Satake, H., Ayonghe, S. N., Suh, E. C., Adelana, S. M. A., Bi, E., Fantong, S., Banseka, H. S., Gwanfogbe, C. D., Woincham, L. N., Uehara, Y., Zhang, J., 2009. 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. *Environ Geochem Health* (2010) 32:147–163. DOI 10.1007/s10653-009-9271-4.
- 9 me FED, 2011, Accès à l'eau potable et appui à la politique sectorielle. Région du Kanem et du Bahr el Ghazal : Synthèse hydrogéologique. Ministère de l'Eau du Tchad, Delegation de la Commission Européenne. Projets FED/2005/017-076 & FED/2006/018-625.
- Hamit, H., 2012.  tude du fonctionnement hydrogéochimique de système aquifère du Chari Baguirmi (République du Tchad). PhD Thesis at the Université de Poitiers, France. 299 Pp.
- Houben, G. and Treskatis, C., 2007, *Water well rehabilitation and reconstruction*. 391 S.; New York (McGraw Hill Professional). ISBN: 0-07-148651-8.
- IPCS (International Programme on Chemical Safety), 2001. *Arsenic and Arsenic Compounds*. *Environmental Health Criteria* 224. 2nd Edition. World Health Organization. Geneva (<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc224.htm#1.2>, retrieved on 13th August 2014).
- IRD (Institut pour la Recherche et le Développement), 2014, *Le développement du Lac Tchad : situation actuelle et futurs possible*. Rapport de Synthèse. Février 2014.
- Maglione, G., 1968. Présence de gaylussite et de trona dans les « natronières » du Kanem (pourtour nord-est du Lac Tchad). *Bull. Soc. Fr. Minéral. Cristallogr.* (1968), 91, 388-395.
- Maglione, G., 1969. Premieres données sur le régime hydrogéochimique des lacs permanents du Kanem (Tchad). *Cah. O.R.S.T.O.M., s r. Hydrobiol.*, vol. III, N  1, 1969.
- Massuel, S., 2001. Modélisation hydrodynamique de la nappe phréatique quaternaire du bassin du lac Tchad. Diplôme d' tudes Approfondies (DEA) – Sciences de l'eau dans l'environnement continental. Universit  de Montpellier II, France.
- Morris, R. and Devitt, D., 1991. *Sampling and Interpretation of Landscape Irrigation Water*. University of Nevada, Reno, USA. Fact Sheet 02-91.

- Paliwal, K.V., 1972. Irrigation with saline water. Monogram No.2 (new series). IARI, New Delhi, p 198.
- Piper, A.M., 1944 : A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. Transactions American Geophysical Union (25) : 914-928.
- Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. U.S. Department of Agriculture Hand Book. p 60.
- Saleh, A., Al-Ruwaih, F., Shehata, M., 1999. Hydrogeochemical processes operating within the main aquifers of Kuwait. Journal of Arid Environments. Vol.: 42, pp. 195-209.
- Schneider, J.L., 1969, Carte Hydrogéologique de la République du Tchad. BRGM, France.
- Servant, M. and Servant, S., 1970, Les formations lacustres et les diatomées du Quaternaire récent du fond de la cuvette tchadienne. Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique (2), vol. XII, fasc. 1, pp. 63-76, Paris.
- Swezey, C., 2001, Eolian sediment responses to late Quaternary climate changes: Temporal and spatial patterns in the Sahara: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 167, p. 119–155.
- Thorne, D.W., Peterson, H.B., 1954. Irrigated soils. London: Constable and Company.
- Todd, D.K., 1959. Groundwater hydrology. Wiley, p 535.
- Trivedy, R.K., Geol, P.K., 1984. Chemical and biological methods for water pollution studies. Karad: Environ. Publications.
- Vassolo, S., Daïra, D., 2012. Water Quality in the Chadian Part of the Lake Chad Basin. Project Report N° 4, Hanover-N'Djamena.
- Wilcox, L.V., 1955. Classification and use of irrigation waters. USD Circular No. 969, p 19.
- Winkel, L., Berg, M., Amini, M., Hug., S.J., and Johnson, A., 2008. Predicting groundwater arsenic contamination in Southeast Asia from surface parameters. Nature Geosciences 1, 536-542 (2008). Published online: 11 July 2008, doi:10.1038/ngeo254.
- World Health Organisation (WHO), 2011. Guidelines for Drinking-water Quality. Fourth Edition.

Annexe 1: Liste des points d'eau inclus dans l'étude

| ID | Village | X | Y | Date | Niveau statique (m) |
|----|--------------------|-----------|-----------|---------|---------------------|
| 2 | HAMARAYE | 16.472444 | 13.872167 | Nov. 09 | 19,8 |
| 3 | BIR KOURI | 16.429778 | 14.108167 | Nov. 09 | 27,5 |
| 4 | AKAMARI | 16.511917 | 14.277333 | Nov. 09 | 26,8 |
| 5 | KOUAL | 16.435444 | 14.395167 | Nov. 09 | 20 |
| 6 | SOUNIA | 16.332028 | 14.465 | Nov. 09 | 35,7 |
| 7 | SOULI NOUMA | 16.499333 | 14.551472 | Nov. 09 | 34,3 |
| 8 | LONTI | 16.587639 | 14.594028 | Nov. 09 | 34 |
| 9 | TCHIGUINE | 16.833667 | 14.737639 | Nov. 09 | 31,15 |
| 10 | LOUSSY | 16.708639 | 14.920972 | Nov. 09 | 32,4 |
| 11 | DJEMIL | 16.749861 | 15.048694 | Nov. 09 | 31,3 |
| 12 | DORBY | 16.93525 | 14.898167 | Nov. 09 | 28,1 |
| 13 | TOUGOYE | 17.082583 | 14.836333 | Nov. 09 | 20,22 |
| 14 | SALAL | 17.217361 | 14.848278 | Nov. 09 | 18,4 |
| 15 | RAYI | 17.180167 | 14.742028 | Nov. 09 | 19 |
| 16 | SAFE | 17.091639 | 14.624306 | Nov. 09 | 21,5 |
| 17 | DOURGOULNGA | 16.881111 | 14.385944 | Nov. 09 | 21,8 |
| 18 | KOURI KOURI | 16.202639 | 13.658222 | Nov. 09 | 20,3 |
| 19 | TOUMIALIFIA | 16.577556 | 14.136889 | Nov. 09 | 25,1 |
| 20 | YAGABOUNGA | 16.637583 | 14.343639 | Nov. 09 | 25,9 |
| 21 | ARAK | 16.575778 | 14.8795 | Nov. 09 | 17 |
| 22 | BIRTCHAOU TEFOUNGA | 16.455111 | 14.731806 | Nov. 09 | 17,4 |
| 23 | ASSOUADINGA | 16.317556 | 14.554722 | Nov. 09 | 41,35 |
| 24 | DOLOKE | 16.148861 | 14.629222 | Nov. 09 | 43,6 |
| 25 | HEREZEYE | 16.14025 | 14.460083 | Nov. 09 | 20,1 |
| 26 | LABDE | 16.063 | 14.328528 | Nov. 09 | 18,2 |
| 27 | EREGUE BAYANGA | 16.191056 | 14.1455 | Nov. 09 | 17,3 |
| 28 | BASSAL | 16.033694 | 14.083778 | Nov. 09 | 17,8 |
| 29 | DIGUIRNAYE | 15.902944 | 13.980833 | Nov. 09 | 14,4 |
| 30 | MICHEMIRE | 15.740083 | 13.823194 | Nov. 09 | 18,3 |
| 31 | KIRINGA | 15.887917 | 13.782556 | Nov. 09 | 14,9 |
| 32 | KIRANGA | 16.094889 | 13.751889 | Nov. 09 | |
| 33 | RIMELE | 16.303222 | 13.82425 | Nov. 09 | 16,4 |
| 34 | MOURZOUGUI | 15.708889 | 13.640444 | Nov. 09 | |
| 35 | DOKORA | 15.815222 | 13.423083 | Nov. 09 | |
| 43 | GARANTESSI | 16.7015 | 13.942889 | Nov. 09 | 17,82 |
| 44 | DANGAYE | 16.839944 | 14.011472 | Nov. 09 | 15,6 |
| 45 | MONDJOURA | 17.077694 | 13.818444 | Nov. 09 | 14,85 |
| 46 | OUELET OUELET | 17.215806 | 13.926222 | Nov. 09 | 13,5 |
| 47 | ABAL | 16.9625 | 14.013389 | Nov. 09 | 19,8 |
| 48 | OUTOUK | 16.997778 | 14.123056 | Nov. 09 | 17,6 |
| 49 | IXIA | 16.606944 | 13.811806 | Nov. 09 | 15,2 |
| 61 | NGAMAYE | 15.698528 | 14.638 | Nov. 09 | 10,4 |
| 62 | MAO EBERAM | 15.374861 | 14.084222 | Nov. 09 | 4,5 |
| 63 | TERFE | 15.331944 | 14.18975 | Nov. 09 | 8,9 |
| 64 | SANADINGA | 15.557 | 14.50625 | Nov. 09 | 13,9 |

| ID | Village | X | Y | Date | Niveau statique (m) |
|-----|----------------|-----------|-----------|---------|---------------------|
| 65 | BOURDINGA | 15.623722 | 14.391139 | Nov. 09 | 15 |
| 66 | AMDOBAK | 15.693583 | 13.323583 | Nov. 09 | 7,4 |
| 67 | NTIONA | 15.457306 | 14.437 | Nov. 09 | 5,4 |
| 69 | MONDO V | 15.512528 | 13.853722 | Nov. 09 | 11,75 |
| 70 | MELEA KOUROURE | 15.55 | 14.257361 | Nov. 09 | 13,8 |
| 71 | ZIGUEYE | 15.801444 | 14.693369 | Nov. 09 | 10,8 |
| 72 | ARAZAT | 15.561556 | 13.497694 | Dec. 09 | 6,4 |
| 73 | MOUZRAK | 15.968694 | 13.318083 | Dec. 09 | |
| 74 | BOLTOUFOU | 15.534306 | 13.274222 | Dec. 09 | |
| 76 | KOROFOU | 15.348694 | 14.290917 | Dec. 09 | 6,4 |
| 77 | DEGUILA | 15.355833 | 13.693139 | Dec. 09 | 8,5 |
| 78 | INDJIROM | 15.408083 | 13.512639 | Dec. 09 | |
| 79 | KOLTIMARY | 15.385361 | 13.846778 | Dec. 09 | 13,6 |
| 85 | BONDERI | 15.717222 | 13.178639 | Dec. 09 | 14,5 |
| 86 | MOTOA | 15.437417 | 13.6835 | Dec. 09 | 13,1 |
| 102 | LOURA | 15.188194 | 13.575389 | Dec. 09 | 4,8 |
| 103 | BOL MATAFO | 14.717278 | 13.526472 | Dec. 09 | |
| 104 | TOWOYE | 14.876528 | 13.591389 | Dec. 09 | |
| 105 | MALEYE | 15.259778 | 13.433583 | Dec. 09 | |
| 106 | WALANDJA | 15.31775 | 13.6285 | Dec. 09 | |
| 108 | AL BOUT | 15.411833 | 13.116 | Dec. 09 | |
| 109 | WALARANG | 14.529944 | 13.560194 | Dec. 09 | |
| 170 | MAYALA | 14.339889 | 13.697139 | Dec. 09 | |
| 171 | KOLE GOROROU | 14.402389 | 13.644972 | Dec. 09 | 5,8 |
| 172 | RIG RIG | 14.389722 | 14.228528 | Dec. 09 | 4,8 |
| 173 | KODENGA | 14.395417 | 13.977778 | Dec. 09 | 2,2 |
| 174 | BAGASOLA | 14.352278 | 13.56575 | Dec. 09 | |
| 175 | BENBEN | 15.285167 | 14.322778 | Dec. 09 | 3,7 |
| 176 | NGOUNA | 15.210972 | 14.886472 | Dec. 09 | 22 |
| 177 | NOKOU | 14.750806 | 14.5355 | Dec. 09 | 5,7 |
| 178 | ERI | 15.77175 | 13.975611 | Dec. 09 | 15,7 |
| 179 | NGAYELO | 15.817417 | 14.300556 | Dec. 09 | 22 |
| 180 | KOURIDINGA | 15.497194 | 14.557778 | Dec. 09 | 15,3 |
| 181 | DIARA | 15.587833 | 14.014306 | Dec. 09 | 14,3 |
| 182 | BROUMTCHOULOU | 14.651028 | 13.563583 | Dec. 09 | |
| 183 | YOUGOU | 15.917944 | 14.238639 | Dec. 09 | 12 |
| 184 | YOUROU OURRE | 14.530778 | 14.435639 | Dec. 09 | 12,7 |
| 185 | LEGRA | 15.318944 | 14.137417 | Dec. 09 | 3,7 |
| 186 | GOSKOREYE | 15.567417 | 14.077778 | Jan. 10 | 26,9 |
| 187 | LIWA | 14.302417 | 13.849944 | Jan. 10 | |
| 188 | NIMILE | 15.22925 | 14.776667 | Jan. 10 | 33,5 |
| 189 | BOULOUNKOU | 15.770778 | 14.126556 | Jan. 10 | 15,4 |
| 190 | WOUNDILI | 15.652111 | 14.064694 | Jan. 10 | 15,7 |
| 191 | KAKARI | 15.917583 | 14.107139 | Jan. 10 | 16,9 |
| 192 | DELEMANGA | 16.114778 | 13.558917 | Jan. 10 | 10,4 |
| 193 | ARKINE | 15.371667 | 14.869389 | Jan. 10 | 28,3 |

| ID | Village | X | Y | Date | Niveau statique (m) |
|------|------------------|-----------|-----------|----------|---------------------|
| 194 | LOMPOROME | 15.43975 | 14.07725 | Jan. 10 | 12,2 |
| 195 | BOGOLEYE | 15.389444 | 14.435806 | Jan. 10 | 4,4 |
| 196 | VILL | 14.379139 | 14.110722 | Jan. 10 | 3,4 |
| 197 | TAGUELA | 15.023083 | 14.765778 | Jan. 10 | 17 |
| 198 | ISSEIROM | 15.020833 | 13.473028 | Jan. 10 | |
| 199 | KAYOUWA | 15.324222 | 13.283389 | Jan. 10 | 3,2 |
| KH1 | Bourki | 17.217 | 14.845056 | April 13 | 16,5 |
| KH2 | Etri | 17.088167 | 15.043806 | April 13 | 20,2 |
| KH3 | Kounaye Erchenna | 16.975222 | 14.955861 | April 13 | 28,7 |
| KH4 | Haganga | 16.951528 | 15.154861 | April 13 | 23,3 |
| KH5 | Arkineye | 16.683778 | 15.148944 | April 13 | 30,4 |
| KH6 | Goz | 16.605222 | 15.23175 | April 13 | 23 |
| KH7 | Djané | 16.696778 | 15.313444 | April 13 | 26,5 |
| KH8 | Saraga | 16.466389 | 15.392528 | April 13 | 21,7 |
| KH9 | Gorima | 16.395722 | 15.152778 | April 13 | 23,8 |
| KH10 | Sananga | 16.546611 | 15.136111 | April 13 | 23,5 |
| KH11 | Fizimi | 16.449167 | 15.026667 | April 13 | 24,1 |
| KH12 | Boboul | 16.310833 | 14.988611 | April 13 | 23,4 |
| KH13 | Yigue Douroussou | 16.228056 | 14.908889 | April 13 | 33,9 |
| KH14 | Bouzou kide | 16.314444 | 14.800833 | April 13 | 22,6 |
| KH15 | Tchorougounga | 16.271667 | 14.741389 | April 13 | 36,6 |
| KH16 | Dininga | 16.193056 | 14.713889 | April 13 | 44,3 |
| KH17 | Chala | 16.134722 | 14.613889 | April 13 | 21,6 |
| KH18 | Iriboudinga | 16.047694 | 14.622778 | April 13 | 20,5 |
| KH19 | Tchorogui | 15.981944 | 14.505278 | April 13 | 19,9 |
| KH20 | Taouil | 15.961111 | 14.669167 | April 13 | 28,6 |
| KH21 | Baba | 15.926 | 14.852222 | April 13 | 24,3 |
| KH22 | Tababa | 15.970444 | 14.945833 | April 13 | 31,4 |
| KH23 | Binianga | 15.995417 | 15.092556 | April 13 | 29,1 |
| KH24 | Bogoy | 15.861111 | 15.176389 | April 13 | 20,1 |
| KH25 | Kolori | 15.953444 | 15.065556 | April 13 | 23,7 |
| KH26 | Hitine | 15.799167 | 15.000444 | April 13 | 21,8 |
| KH27 | Chodoum | 15.781278 | 14.893056 | April 13 | 19,7 |
| KH28 | Mahdoud | 15.673611 | 14.863583 | April 13 | 17,1 |
| KH29 | Ambassour | 15.603889 | 15.002778 | April 13 | 19,5 |
| KH30 | Morty | 15.605 | 14.846528 | April 13 | 20,35 |
| KH31 | Mouno Ourere | 15.613056 | 14.768333 | April 13 | 17,1 |
| KH32 | Moussa Ferty | 15.454444 | 14.811528 | April 13 | 26,4 |
| KH33 | Kournaye | 15.446944 | 14.607222 | April 13 | 19,2 |
| KH34 | Bir Daoud | 15.804167 | 15.331944 | April 13 | 19,23 |
| KH35 | Fuom tinen | 15.603889 | 15.251389 | April 13 | 17,3 |
| KH36 | Akouma | 15.943611 | 15.228611 | April 13 | 29,3 |
| KH37 | Bir choloum | 15.645833 | 15.128333 | April 13 | 16,17 |
| KH38 | Al houf | 15.597222 | 14.908333 | April 13 | 28,1 |
| KH40 | NGUELADINGA | 14.555833 | 13.996639 | May 13 | 2,36 |
| KH41 | KAYIROM | 14.9065 | 13.865278 | May 13 | 2,3 |

| ID | Village | X | Y | Date | Niveau statique (m) |
|-------|---------------|-----------|-----------|----------|---------------------|
| KH42 | YOUKE | 14.623917 | 13.838639 | May 13 | 1,53 |
| KH43 | MOROUD | 14.621583 | 14.088056 | May 13 | 12,7 |
| KH44 | ZIGUEREY | 14.513389 | 14.175694 | May 13 | 13,9 |
| KH45 | OLOMINGA | 14.178917 | 14.381222 | May 13 | 13,4 |
| KH46 | BIRTAOUIL | 14.098639 | 14.517861 | May 13 | 14,9 |
| KH47 | FOYO | 14.197417 | 14.656611 | May 13 | 5,6 |
| KH48 | MANA | 14.326333 | 14.603889 | May 13 | 6,3 |
| KH49 | AMBI | 14.395417 | 14.579 | May 13 | 6,1 |
| KH50 | ARNAKOU | 14.662222 | 14.597056 | May 13 | 6,4 |
| KH51 | WOUNDJI | 14.56 | 14.581056 | May 13 | 14,2 |
| KH52 | BELTE | 14.365333 | 14.626722 | May 13 | 8,7 |
| KH53 | ARFO | 14.414417 | 14.525944 | May 13 | 10,9 |
| KH54 | YOUROU | 14.512167 | 14.459 | May 13 | 9,9 |
| KH55 | YIRI KELANGA | 14.766667 | 14.700861 | May 13 | 15,6 |
| KH56 | TINGUIRTI | 14.799722 | 14.741194 | May 13 | 28,45 |
| KH57 | AFIT | 14.812472 | 14.847417 | May 13 | 23,6 |
| KH58 | OSSOUDI | 14.731389 | 14.996222 | May 13 | 25,2 |
| KH59 | NOUKY | 14.817389 | 14.555333 | May 13 | 5,5 |
| KH60 | DELEL | 14.836583 | 14.660472 | May 13 | 13,6 |
| KH61 | KELENI | 14.941056 | 14.795444 | May 13 | 24,1 |
| KH62 | ROUMBOU | 14.937583 | 14.914917 | May 13 | 24,7 |
| KH63 | WOUREYE | 15.0415 | 14.988028 | May 13 | 20,6 |
| KH64 | HAMDANGA | 15.098972 | 15.137417 | May 13 | 19,4 |
| KH65 | KAKOU | 15.048806 | 15.276833 | May 13 | 14,8 |
| KH66 | KALANAWORY | 15.965 | 15.470972 | May 13 | 14,1 |
| KH67 | MATOUMOUSS | 15.929889 | 15.506806 | May 13 | 8,6 |
| KH68 | AGRANGAYE | 14.893167 | 15.458194 | May 13 | 13,4 |
| KH69 | NDJORDI | 14.7985 | 15.429333 | May 13 | 15,25 |
| KH70 | TIMIDINGA | 14.730556 | 15.363889 | May 13 | 15,2 |
| KH71 | MELASSOUAL | 14.643722 | 15.405667 | May 13 | 10,4 |
| KH72 | AMHADJAR | 14.608028 | 15.285389 | May 13 | 13 |
| KH73 | TCHOROG | 14.653417 | 15.249667 | May 13 | 9,3 |
| KH74 | BOURKABOLOLO | 14.662083 | 15.176222 | May 13 | 18,6 |
| KH75 | DJAGANANGA | 14.7185 | 15.097806 | May 13 | 18,8 |
| KH76 | EYMANGA | 14.724056 | 14.895056 | May 13 | 26,3 |
| KH77 | KOTTO | 14.860972 | 14.546944 | May 13 | 9,3 |
| KH78 | NGOUREYE | 15.057528 | 14.5325 | May 13 | 18,9 |
| KH79 | NGOURY | 15.1 | 14.540528 | May 13 | 24,7 |
| KH80 | ELIANGA | 15.2615 | 14.462722 | May 13 | 12,9 |
| KH81 | MAMPAL | 15.278389 | 14.351361 | May 13 | 6,48 |
| KH82 | KOULAKOULA | 15.286111 | 14.414667 | May 13 | 4 |
| KH83 | KOULAKOULA | 15.28625 | 14.414917 | May 13 | 3,4 |
| KH84 | BOUTATOUKOULI | 15.194556 | 14.226833 | May 13 | 3,5 |
| KH85 | SINET II | 15.594861 | 13.754306 | May 13 | 9,3 |
| AH201 | TOGOUN | 15.010833 | 14.208611 | March 10 | |
| AH202 | ROYONO | 14.854194 | 14.276389 | March 10 | 17,3 |

| ID | Village | X | Y | Date | Niveau statique (m) |
|-------|----------------|------------|------------|----------|---------------------|
| AH203 | SEDIGUI | 14.308306 | 14.363806 | March 10 | 19,5 |
| AH204 | GUIM | 14.388222 | 14.042028 | March 10 | 3,8 |
| AH205 | BOURKA BOLI | 15.148778 | 14.295361 | March 10 | |
| AH206 | BOUTOU/NGOURI | 15.366714 | 13.66775 | March 10 | 6,3 |
| AH207 | WAGAM | 14.591389 | 14.346417 | March 10 | 11,2 |
| AH209 | KISKRA | 14.17028 | 13.80472 | March 10 | |
| | TCHIDI BIREARI | 15.594861 | 14.07083 | Dec 13 | 5,81 |
| | NGOURI | 15.378194 | 13.6428889 | Dec 13 | 1,98 |
| | NGOURI | 15.378861 | 13.6429167 | Dec 13 | 5,23 |
| | KARNA | 15.644389 | 13.3432222 | Nov 13 | 6,57 |
| | KARNA | 15.648278 | 13.3411667 | Nov 13 | 6,39 |
| | KARNA | 15.6490278 | 13.3512222 | Nov 13 | 7,06 |

NOTE: Coordonnées mesurées en WGS 84

Annexe 2: Analyse statistique des résultats chimiques

Région du Kanem (129 échantillons)

| Paramètre | Unité | Limite de l'OMS | Moyenne | Min | Max | SD |
|-------------------|-------|-----------------|--------------|-------|--------------|--------------|
| pH | | 6,5 - 9,2 | 7,3 | 4,0 | 10,8 | 0,7 |
| TDS | mg/l | 1 500 | 328 | 111 | 1443 | 224,3 |
| EC | µS/cm | 1 500 | 350 | 98 | 1618 | 237,8 |
| K | mg/l | | 11,0 | 2,1 | 40,1 | 8,4 |
| Na | mg/l | 200 | 24,7 | 3,7 | 149,0 | 26,0 |
| Mg | mg/l | | 6,0 | 0,1 | 45,1 | 6,6 |
| Ca | mg/l | | 29,6 | 2,5 | 245,0 | 31,1 |
| Cl | mg/l | 250 | 8,9 | 0,9 | 101,0 | 11,1 |
| SO ₄ | mg/l | 500 | 62,3 | 0,2 | 725,0 | 98,9 |
| HCO ₃ | mg/l | | 90,9 | 2,4 | 352,0 | 77,1 |
| Fe (II) | mg/l | 0,3 | 0,4 | 0,004 | 12,8 | 1,3 |
| Mn | mg/l | 0,2 - 0,4 | 0,2 | 0,003 | 8,3 | 0,9 |
| NO ₃ | mg/l | 50 | 20,6 | 0,05 | 353,0 | 45,6 |
| Br | mg/l | | 0,1 | d.l. | 0,7 | 0,1 |
| NH ₄ | mg/l | 0,2 | 0,4 | d.l. | 8,9 | 1,4 |
| NO ₂ | mg/l | 0,2 - 3 | 0,8 | d.l. | 26,3 | 3,5 |
| PO ₄ | mg/l | | 0,6 | d.l. | 2,9 | 0,5 |
| F | mg/l | 1,5 | 0,2 | 0,003 | 1,6 | 0,2 |
| Al | mg/l | 0,2 | 0,25 | 0,008 | 12,30 | 1,42 |
| As | mg/l | 0,01 | 0,002 | d.l. | 0,006 | 0,002 |
| BO ₂ | mg/l | | 0,14 | 0,03 | 1,95 | 0,20 |
| Ba | mg/l | 0,7 | 0,97 | 0,01 | 0,31 | 0,07 |
| Be | mg/l | | 0,003 | d.l. | 0,032 | 0,007 |
| Cd | mg/l | 0,003 | 0,003 | d.l. | 0,003 | 0,003 |
| Co | mg/l | | 0,022 | d.l. | 0,054 | 0,023 |
| Cr | mg/l | 0,05 | 0,007 | d.l. | 0,010 | 0,004 |
| Cu | mg/l | 0,2 | 0,03 | d.l. | 0,09 | 0,02 |
| Li | mg/l | | 0,009 | d.l. | 0,172 | 0,020 |
| Ni | mg/l | 0,07 | 0,016 | d.l. | 0,203 | 0,079 |
| Pb | mg/l | 0,01 | | d.l. | d.l. | |
| Sc | mg/l | | 0,001 | d.l. | 0,001 | 0,001 |
| SiO ₂ | mg/l | | 46,7 | 21,9 | 113,0 | 18,3 |
| Sr | mg/l | | 0,19 | 0,01 | 1,16 | 0,18 |
| Ti | mg/l | | 0,001 | d.l. | 0,005 | 0,001 |
| V | mg/l | | 0,006 | d.l. | 0,023 | 0,004 |
| Zn | mg/l | | 0,14 | d.l. | 8,69 | 0,87 |
| δ ¹⁸ O | | | -3,8 | -4,7 | 8,2 | 0,9 |
| δ ² H | | | -28,1 | -33,3 | 37,7 | 10,0 |
| ³ H | (TU) | | - | - | - | - |

NOTE: d.l.: limite de détection

SD: écart type

Valeurs au-dessus de la limite de l'OMS correspondante sont indiquées en gras

Région Bahr el Ghazal (56 échantillons)

| Paramètre | Unité | Limite de l'OMS | Moyenne | Min | Max | SD |
|-------------------|-------|-----------------|--------------|-------|--------------|------------|
| pH | | 6,5 - 9,2 | 7,9 | 7,2 | 8,8 | 0,3 |
| TDS | mg/l | 1 500 | 1 860 | 139 | 8 159 | 1 791,8 |
| EC | µS/cm | 1 500 | 1 895 | 137 | 8 993 | 1 624,7 |
| K | mg/l | | 58,7 | 3,6 | 311 | 54,9 |
| Na | mg/l | 200 | 422,6 | 7,3 | 1933 | 467,0 |
| Mg | mg/l | | 23,6 | 0,6 | 144 | 27,6 |
| Ca | mg/l | | 58,0 | 4,2 | 278 | 50,7 |
| Cl | mg/l | 250 | 88,2 | 1,6 | 810 | 156,7 |
| SO ₄ | mg/l | 500 | 480,4 | 3,6 | 2 898 | 645,5 |
| HCO ₃ | mg/l | | 711,2 | 27,8 | 2115 | 572,5 |
| Fe (II) | mg/l | 0,3 | 0,1 | d.l. | 2,0 | 0,3 |
| Mn | mg/l | 0,2 - 0,4 | 0,2 | d.l. | 1,1 | 0,3 |
| NO ₃ | mg/l | 50 | 38,1 | 0,05 | 431 | 70,1 |
| Br | mg/l | | 0,6 | 0,004 | 4,1 | 0,8 |
| NH ₄ | mg/l | 0,2 | 0,8 | d.l. | 24,1 | 3,9 |
| NO ₂ | mg/l | 0,2 - 3 | 0,13 | d.l. | 0,9 | 0,2 |
| PO ₄ | mg/l | | 1,3 | 0,01 | 9,36 | 1,6 |
| F | mg/l | 1,5 | 1,0 | 0,036 | 7,14 | 1,3 |
| Al | mg/l | 0,2 | 0,1 | d.l. | 1,2 | 0,2 |
| As | mg/l | 0,01 | 0,03 | d.l. | 0,25 | 0,06 |
| BO ₂ | mg/l | | 0,6 | 0,02 | 3,68 | 0,8 |
| Ba | mg/l | 0,7 | 0,1 | 0,01 | 0,5 | 0,1 |
| Be | mg/l | | 0,0006 | d.l. | 0,0007 | 0,0001 |
| Cd | mg/l | 0,003 | 0,003 | d.l. | 0,004 | 0,001 |
| Co | mg/l | | | d.l. | d.l. | |
| Cr | mg/l | 0,05 | | d.l. | d.l. | |
| Cu | mg/l | 0,2 | 0,018 | d.l. | 0,037 | 0,015 |
| Li | mg/l | | 0,019 | d.l. | 0,098 | 0,018 |
| Ni | mg/l | 0,07 | 0,005 | d.l. | 0,007 | 0,001 |
| Pb | mg/l | 0,01 | | d.l. | d.l. | |
| Sc | mg/l | | | d.l. | d.l. | |
| SiO ₂ | mg/l | | 51,1 | 17,1 | 77,4 | 16,1 |
| Sr | mg/l | | 0,7 | 0,07 | 4,1 | 0,7 |
| Ti | mg/l | | 0,002 | d.l. | 0,011 | 0,002 |
| V | mg/l | | 0,01 | d.l. | 0,06 | 0,01 |
| Zn | mg/l | | 0,14 | d.l. | 4,4 | 0,6 |
| δ ¹⁸ O | | | -0,6 | -4,9 | 8,2 | 3,9 |
| δ ² H | | | -11,7 | -35,6 | 40,4 | 22,4 |
| ³ H | (TU) | | 1,4 | 0 | 10,4 | 2,2 |

NOTE: d.l.: limite de détection

SD: écart type

Valeurs au-dessus de la limite de l'OMS correspondante sont indiquées en gras