

# *LAC TCHAD*

## *GESTION DURABLE DES RESSOURCES EN EAU*



### Activités du projet - Rapport N° 4

### Mars 2012



Lake Chad Commission  
Rond Point des Grandes Armes,  
N'Djamena



Institut Fédéral de Géosciences et  
Ressources Naturelles  
Hanovre, Allemagne

# Qualité de l'eau dans la partie Tchadienne du Bassin du Lac Tchad

Sara Vassolo, Djoret Daïra

20.03.2012

## Contenu

1. Généralités.....	1
2. Résultats .....	2
2.1. L'équilibre ionique .....	2
2.2. Qualité des eaux souterraines .....	2
2.3. pH .....	7
2.4. Solides Dissous Totales (SDT).....	8
2.5. Fluorure.....	10
2.6. Sodium.....	12
2.7. Aptitude de l'eau à l'irrigation.....	14
2.8. Nitrate .....	17
2.9. Sulfate.....	18
3. Résumé et conclusions .....	19
4. Recommandations .....	20
5. Références.....	20

## Figures

Figure 1. Localisation des 441 échantillons d'eau prélevés au cours de la première phase du projet CBLT/BGR.

Figure 2. Balance ionique de 441 échantillons d'eau. Un total de 22 échantillons présentent un déséquilibre ionique, probablement en raison de la présence de carbone dissous dans les eaux souterraines.

Figure 3. Répartition de la qualité des eaux souterraines. La salinité des eaux souterraines augmente avec l'intensité de la couleur. Les points indiquent l'emplacement de l'échantillonnage d'eau.

Figure 4. Diagramme de Piper pour la représentation de la qualité des eaux.

Figure 5. Diagramme de Piper pour les eaux de surface. Comme prévu, tous les points tombent dans la zone « bicarbonatée calcique ».

Figure 6. Diagramme de Piper pour les forages profonds qui prélèvent de l'eau du Pliocène Inférieur. L'eau souterraine est du type "carbonate sodique" avec une faible minéralisation (STD < 1500 mg/l).

Figure 7. Diagramme de Piper pour la région du Kanem en tenant compte du nitrate (à gauche) et sans nitrate (à droite). En supposant que la présence du nitrate est le résultat d'une pollution humaine, le diagramme de Piper peut être tracé sans cet anion pour mieux percevoir la composition naturelle des eaux souterraines.

Figure 8. Diagramme de Piper pour les régions du quaternaire: Kanem, Bahr el Ghazal, Harr, la dépression, le paléo delta du Chari et la région du Chari-Logone. L'anion nitrate a été éliminé de tous les diagrammes. Les eaux au Kanem, Bahr el Ghazal et dans la dépression montrent un échange d'anions du bicarbonate au sulfate et du calcium au sodium. Des STD élevées sont mesurées au Bahr el Ghazal et dans la dépression.

Figure 9. La bonne corrélation entre chlorure et nitrate dans la zone du Chari Logone indique une contamination des eaux souterraines par l'agriculture causée par l'excès d'engrais chlorés qui s'infiltrent dans la nappe avec la recharge.

Figure 10. Distribution spatiale du pH. Les valeurs se situent généralement dans les limites proposées par l'OMS, bien que 8 échantillons montrent de l'eau légèrement acide (pH au dessous de 6,5). Toutefois, seulement à Royono l'eau souterraine est acide (pH = 4), les autres 7 échantillons ont des valeurs supérieures à 6.

Figure 11. Distribution spatiale de SDT (mg/l). Généralement les eaux présentent des faibles teneurs en SDT et donc aptes pour la consommation humaine. Seuls 4 échantillons présentent une concentration en SDT supérieure à 5000 mg/l.

Figure 12. Corrélations entre SDT et les principaux cations et anions dissous. La corrélation est très bonne avec le sodium et le sulfate, bonne avec le magnésium et le bicarbonate, relativement bonne avec le calcium et le chlorure et faible avec le potassium.

Figure 13. Distribution spatiale des concentrations en fluorure. Des concentrations supérieures au 1,5 mg/l apparaissent dans 12 échantillons, en particulier le long du Bahr el Ghazal, au sud du Lac Tchad, dans le voisinage du Lac Fitri et dans la région du Mayo-Kebbi. Des concentrations élevées entre 0,5 mg/l et 1,5 mg/l sont rencontrées le long du fleuve Logone et le long du fleuve Chari au nord du parallèle 11° nord.

Figure 14. Distribution spatiale des concentrations en lithium. Valeurs élevées apparaissent au Bahr el Ghazal, au SE du Lac Tchad et dans la région entre le Lac Tchad et le Lac Fitri. Les concentrations les plus élevées se trouvent à Moyto et dans la région du Mayo-Kebbi (intrusion granitique post-tectonique) ainsi qu'à Royono.

Figure 15. Corrélation entre sodium et chlorure (molaire). Le sodium apparaît généralement en excès comparé au chlorure. Il est dû à l'échange de cations ou à l'absence des sels NaCl.

Figure 16. Distribution spatiale des concentrations en sodium. Les concentrations les plus hautes apparaissent tout le long du Bahr el Ghazal, vers le SE du Lac Tchad et dans les alentours du Lac Fitri.

Figure 17. Diagramme Wilcox pour définir l'aptitude de l'eau souterraine pour l'irrigation.

Figure 18. Diagramme SAR pour l'estimation de l'aptitude de l'eau pour l'irrigation.

Figure 19. Carte d'aptitude des eaux souterraines pour l'irrigation. Elle montre que les eaux souterraines à l'est et l'ouest du Bahr el Ghazal, au sud du Lac Tchad et dans les alentours du Lac Fitri ne doivent pas être utilisées pour l'irrigation, principalement en raison de la forte salinité et de la teneur élevée en sodium.

Figure 20. Distribution spatiale de la concentration en chlorures. Un total de 6 échantillons dépasse les 350 mg/l et l'eau ne peut pas être utilisée pour l'irrigation à cause de sa toxicité élevée pour plantes. Douze échantillons présentent des concentrations entre 150 mg/l et 350 mg/l. L'eau ne devrait pas être utilisée pour une irrigation à longue durée en raison de la toxicité modérée. Tous les autres échantillons présentent des concentrations basses en chlorure.

Figure 21. Distribution spatiale des concentrations en nitrate. Un total de 59 échantillons (soit 13%) montre des concentrations supérieures à la limite de 50 mg/l autorisée par l'OMS. La pollution a des sources différentes. Au nord de la latitude 12° nord, la pollution provient des matières fécales du bétail qui abreuve directement de l'eau du puits. Dans le sud la pollution vient d'un usage agricole, à la suite de l'utilisation excessive d'engrais azotés.

Figure 22. Distribution spatiale du sulfate. Des concentrations supérieures à 1000 mg/l sont présentes dans 14 échantillons; 18 échantillons ont des concentrations entre 500 mg/l et 1000 mg/l. Tous ces échantillons se trouvent à l'est et l'ouest du Bahr el Ghazal, au SE du Lac Tchad et dans les alentours du Lac Fitri.

## 1. Généralités

Ce rapport résume les résultats obtenus dans le cadre d'un projet du BGR en collaboration avec la Commission du Bassin du Lac Tchad (CBLT). Le projet "Lac Tchad: gestion durable des ressources en eau" a été financé par le Ministère Fédéral pour la Coopération Economique et le Développement (BMZ) et sa première phase s'est étendue sur 4 ans à partir du Mai 2007 à Juin 2011.

Au cours de cette première phase du projet, un total de 441 échantillons d'eau ont été pris (Figure 1) à partir des eaux de surface (19) et les eaux souterraines (422) pour analyser leur composition chimique. L'eau souterraine est prélevée surtout dans l'aquifère quaternaire supérieur (417), mais 5 échantillons ont été prélevés dans des forages profonds du pliocène inférieur. Les échantillons ont été analysés au laboratoire du BGR en Allemagne. Les analyses englobent les anions et les cations majeurs ainsi que les éléments traces. In-situ paramètres (température, pH et la conductivité électrique) ont été mesurés avec un multi-capteur de la Wissenschaftlich-Technische Werkstätten (WTW). La teneur en oxygène n'a pas été mesurée à cause de la méthode d'échantillonnage employée (écopie).

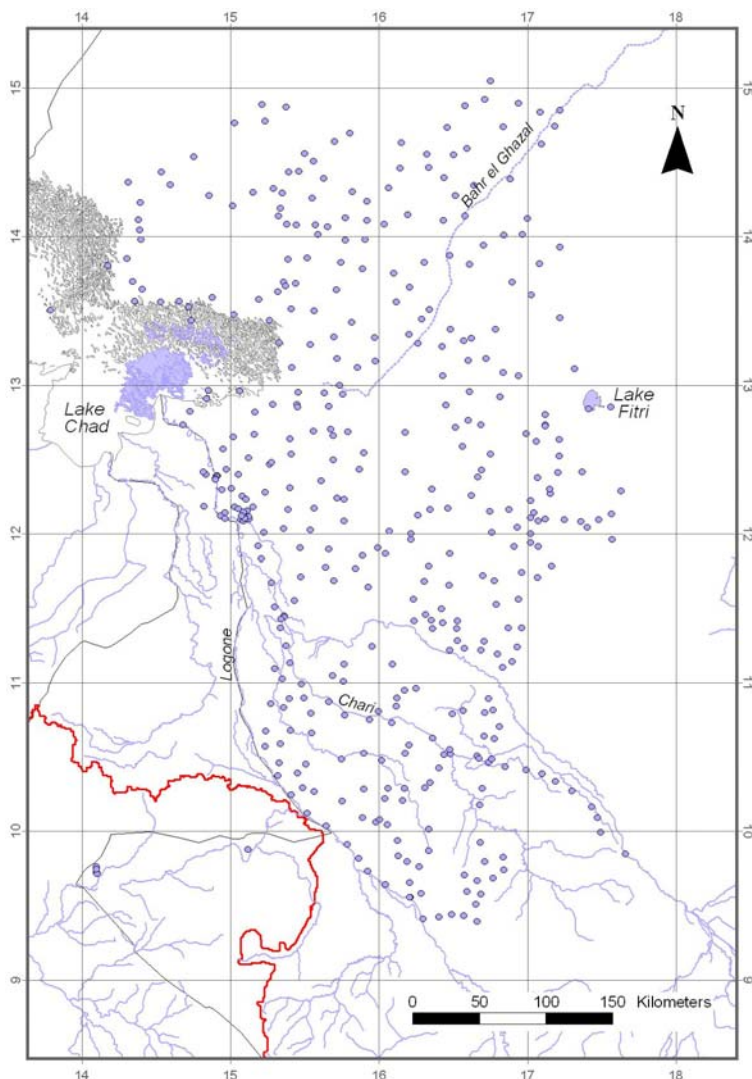


Figure 1. Localisation des 441 échantillons d'eau prélevés au cours de la première phase du projet CBLT/BGR.

Des campagnes d'échantillonnage ont eu lieu en trois périodes différentes: de novembre 2008 à avril 2009, de novembre 2009 à mars 2010 et de novembre 2010 à février 2011. L'objectif de l'échantillonnage était d'évaluer la qualité des eaux souterraines. Les résultats ont été utilisés pour étudier la répartition spatiale des caractéristiques chimiques de l'aquifère et pour définir les régions de recharge.

## 2. Résultats

### 2.1. L'équilibre ionique

L'un des façons faciles d'évaluer la qualité des analyses chimiques est le calcul de l'équilibre des ions. Pour qu'une analyse soit acceptable, l'équilibre des ions doit être inférieur à 1% pour des échantillons avec un total des cations ou anions de moins de 1 mmol(eq)/l. Pour des teneurs en sel plus fortes, il doit être inférieur à 5% (Figure 2).

L'équilibre ionique est basé sur l'équilibre entre les anions et les cations. Selon la norme DIN DEV A0-5, l'équilibre des ions peut être calculé comme suit:

$$\text{balance ionique (\%)} = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions (mmol(eq)/l)}}{(\sum \text{cations} + \sum \text{anions (mmol(eq)/l)}) * 0,5} * 100$$

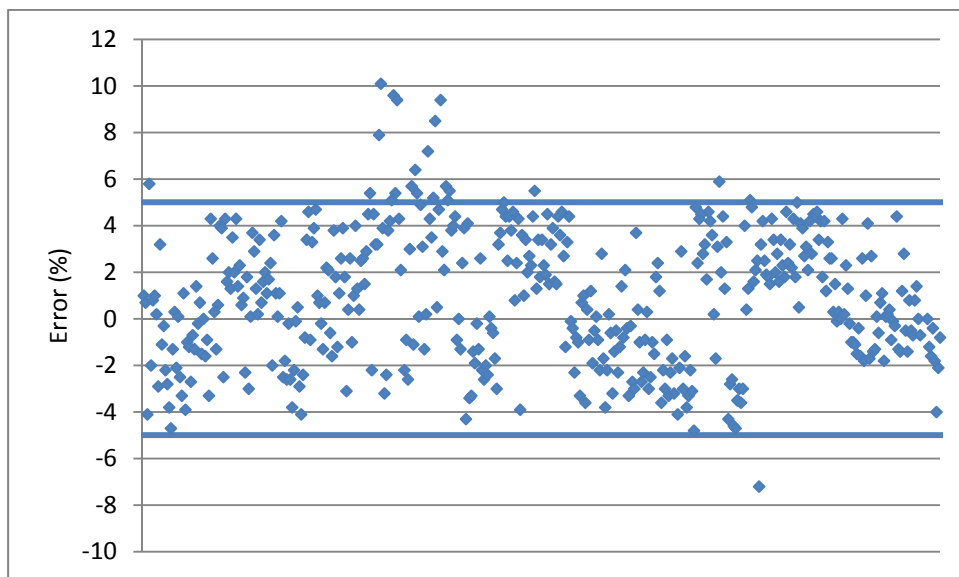


Figure 2. Balance ionique de 441 échantillons d'eau. Un total de 22 échantillons présentent un déséquilibre ionique, probablement en raison de la présence de carbone dissous dans les eaux souterraines.

Bien que 22 échantillons (5% du total) présentent un déséquilibre ionique, probablement en raison de la présence de carbone dans les eaux souterraines, il est conclu que le laboratoire a travaillé de manière adéquate.

### 2.2. Qualité des eaux souterraines

La qualité des eaux souterraines régionale dépend entre autres des processus suivis par la recharge lors de l'infiltration. La minéralisation de l'eau de recharge est contrôlée par les propriétés d'écoulement et l'épaisseur de la zone non saturée. La précipitation dans les zones éloignées des océans n'ont presque pas de minéraux, mais elle peut devenir minéralisée le long de l'écoulement dans la zone non saturée pour atteindre l'aquifère comme une eau plus au moins salée.

Dans le cas des aquifères à nappe phréatique peu profonde, l'eau récemment rechargée aura une faible teneur en minéraux, car d'un côté elle percole rapidement à travers la zone non saturée et d'autre part elle n'a pas eu le temps d'acquérir les minéraux du sous-sol. L'eau souterraine récemment rechargée est toujours du type Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>.

La qualité des eaux souterraines dépend de la composition de l'aquifère, la quantité de recharge et la vitesse d'écoulement. La minéralisation des eaux souterraines augmente avec le temps de séjour dans l'aquifère si le milieu contient des matériaux réactifs. L'eau souffre d'un échange d'anions et cations selon leur abondance dans le sous-sol. Ca et Mg seront échangés par Na (ou vice versa); HCO<sub>3</sub> par SO<sub>4</sub> et/ou Cl, bien que l'échange d'anions soit plutôt rare. Des eaux souterraines de type Na-HCO<sub>3</sub>, Na-SO<sub>4</sub>, ou Na-Cl (ce dernier cas pour

des aquifères éloignés des océans) sont toujours le résultat de très long séjour, quand l'eau a eu du temps suffisant pour absorber les minéraux des roches environnantes.

Les eaux souterraines dans la région du Lac Tchad affichent des compositions chimiques régionales différentes comme le montre la Figure 3. L'eau souterraine du type Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> (couleur claire) apparaît dans les proximités des fleuves Chari et Logone au sud de la région, comme résultat d'une recharge directe de l'eau de surface ou de la précipitation. En outre, de l'eau peu minéralisée est présente au Kanem, sans doute en raison d'une recharge directe des précipitations dans les dunes car la région manque d'eau de surface.

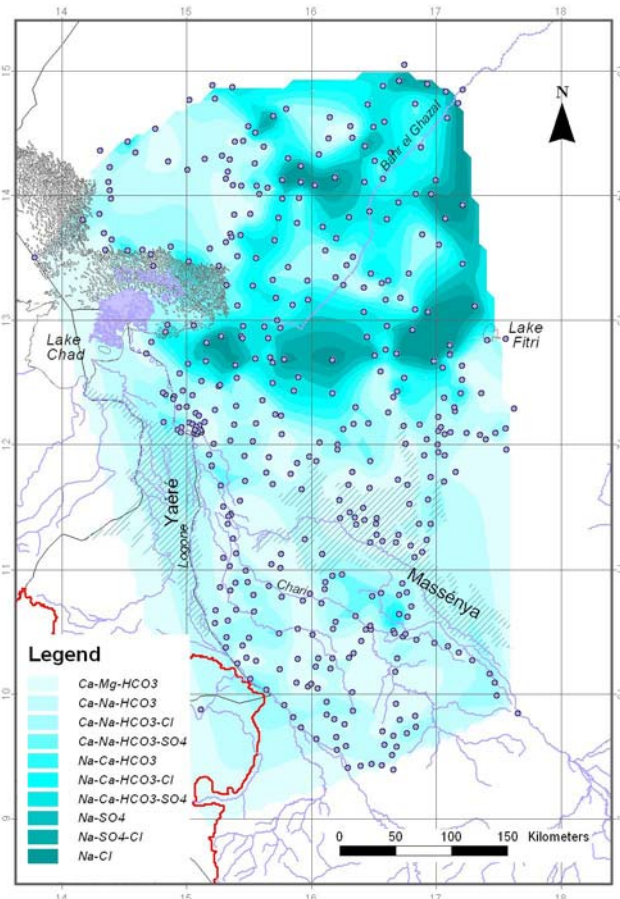


Figure 3. Répartition de la qualité des eaux souterraines. La salinité des eaux souterraines augmente avec l'intensité de la couleur. Les points indiquent l'emplacement de l'échantillonnage d'eau.

L'eau souterraine du type Na-SO<sub>4</sub>-Cl apparaît au sud-est du Lac Tchad et à l'est et l'ouest du Bahr el Ghazal. Ces régions sont caractérisées par une conductivité hydraulique très faible qui conduit à une vitesse d'écoulement extrêmement basse ou, en d'autres termes, au temps de séjours très long. Il est supposé que cette eau souterraine est très ancienne (a été rechargé il y longtemps) et qu'elle a eu du temps pour se minéraliser.

Une autre façon de visualiser la qualité de l'eau est avec le diagramme de Piper (Figure 7). La composition chimique de l'eau le long d'une voie d'écoulement, de la zone de recharge au point de décharge, est décrite principalement par quatre zones dans le diagramme.

- Si le résultat se situe dans le secteur défini comme « bicarbonaté calcique », l'eau a une minéralisation faible typique pour une eau souterraine près de la zone de recharge. Quand l'eau de surface est produite par précipitation, elle a cette qualité.
- Le secteur « carbonaté sodique » est défini par des eaux rechargées il y a relativement longtemps qui ont déjà parcouru une certaine distance dans l'aquifère. Le calcium a été remplacé par le sodium. Ces eaux présentent une minéralisation plus élevée.
- Le secteur « chloruré sodique et potassique » (ou « sulfaté sodique ») montre des eaux très minéralisées. Elles se trouvent loin de la zone de recharge et ont parcouru une



longue distance dans l'aquifère. Dans ce processus, le bicarbonate a été remplacé par le sulfate et l'eau s'est enrichie en chlorure.

- Les eaux du type « chloruré et sulfaté calcique et magnésien » sont soit affectés par l'évaporation, stagnantes ou emmagasinées dans des sédiments contenant du gypse.

Les flèches dans la figure montrent la direction de minéralisation, du bleu au rouge, ou du bicarbonaté-calciqye au chloruré sodique à travers carbonaté sodique.

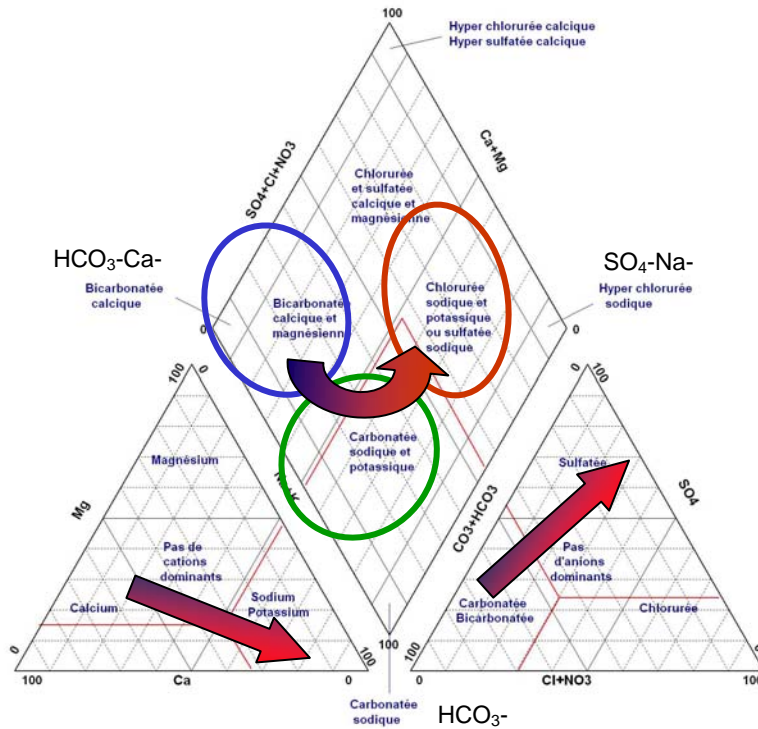


Figure 4. Diagramme de Piper pour la représentation de la qualité des eaux.

La Figure 5 montre la qualité des eaux de surface. Tous les échantillons ont une très faible minéralisation avec des solides dissous totaux (SDT) inférieurs à 1500 mg/l (voir chapitre 2.4) et tombent dans la zone « bicarbonatée calcique ». Ces eaux sont produites directement par précipitation.

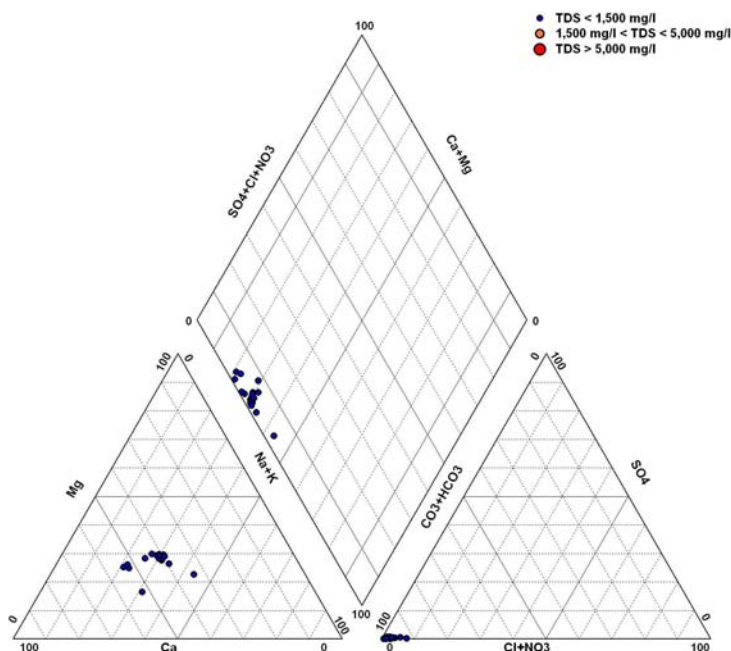


Figure 5. Diagramme de Piper pour les eaux de surface. Comme prévu, tous les points tombent dans la zone « bicarbonatée calcique ».



Le diagramme de Piper pour les 5 forages profonds du Pliocène Inférieur est présenté dans la Figure 6. La minéralisation de l'eau est relativement faible avec STD au dessous de 1500 mg/l. De plus, l'eau souterraine est du type « carbonaté sodique » qui indique un long passage dans le sous-sol pendant lequel le calcium a été remplacé par le sodium.

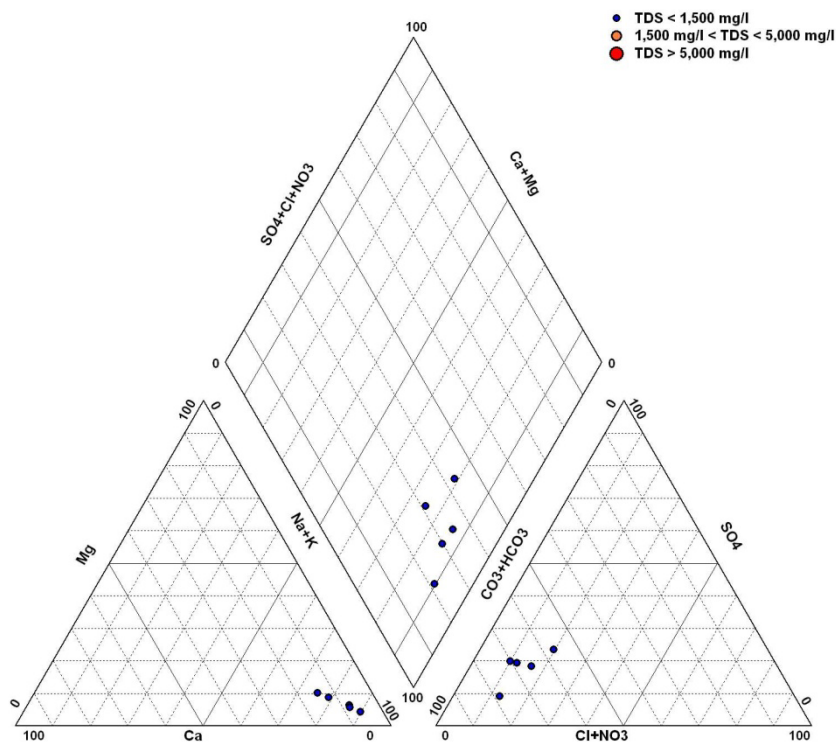


Figure 6. Diagramme de Piper pour les forages profonds qui prélèvent de l'eau du Pliocène Inférieur. L'eau souterraine est du type "carbonate sodique" avec une faible minéralisation (STD < 1500 mg/l).

Les eaux souterraines de l'aquifère quaternaire présentent souvent de grandes quantité de nitrates. Considérant que le nitrate est une pollution d'origine humaine, les diagrammes de Piper peuvent être tracés sans cet anion pour avoir une meilleure idée des caractéristiques naturelles de l'eau (comparer les valeurs pour la région du Kanem dans la Figure 7).

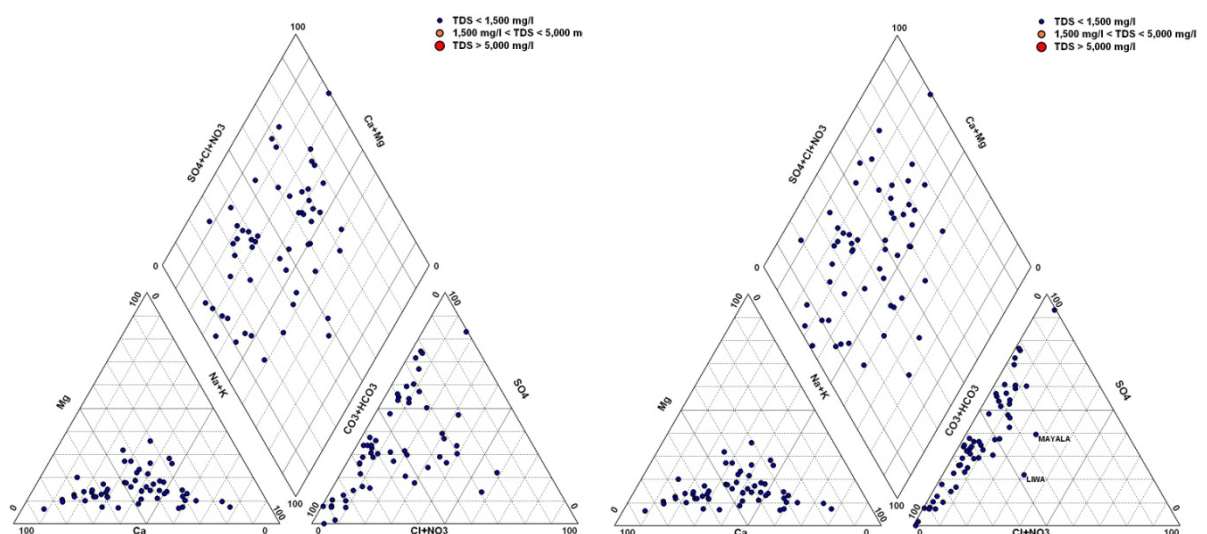


Figure 7. Diagramme de Piper pour la région du Kanem en tenant compte du nitrate (à gauche) et sans nitrate (à droite). En supposant que la présence du nitrate est le résultat d'une pollution humaine, le diagramme de Piper peut être tracé sans cet anion pour mieux percevoir la composition naturelle des eaux souterraines.

Pour mieux comprendre ce qui se passe dans l'aquifère quaternaire, les résultats ont été distribués selon les zones d'échantillonnage: le Kanem, Bahr el Ghazal, Harr, la dépression, le paléo delta de Chari et la région Chari-Logone. Les digrammes de Piper pour chacune de ces régions, toujours sans inclure le nitrate, sont représentés dans la Figure 8.

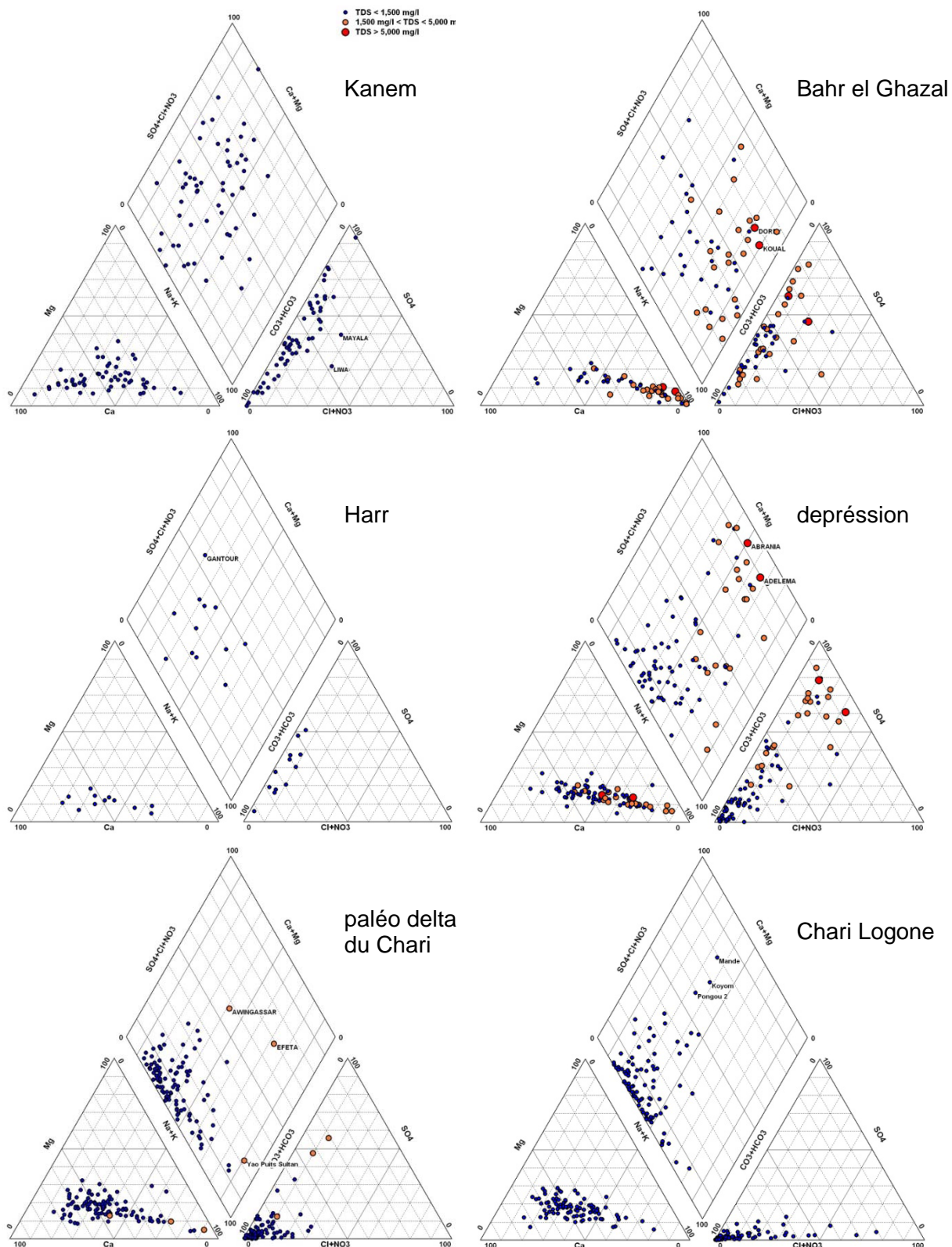


Figure 8. Diagramme de Piper pour les régions du quaternaire: Kanem, Bahr el Ghazal, Harr, la dépression, le paléo delta du Chari et la région du Chari-Logone. L'anion nitrate a été éliminé de tous les diagrammes. Les eaux au Kanem, Bahr el Ghazal et dans la dépression montrent un échange d'anions du bicarbonate au sulfate et du calcium au sodium. Des SDT élevés sont mesurées au Bahr el Ghazal et dans la dépression.

Selon les graphiques, les eaux souterraines dans l'aquifère quaternaire échangent des ions, surtout dans le Kanem, le Bahr el Ghazal et la dépression. Dans tous les cas, le calcium a été remplacé par le sodium et le bicarbonate par le sulfate.

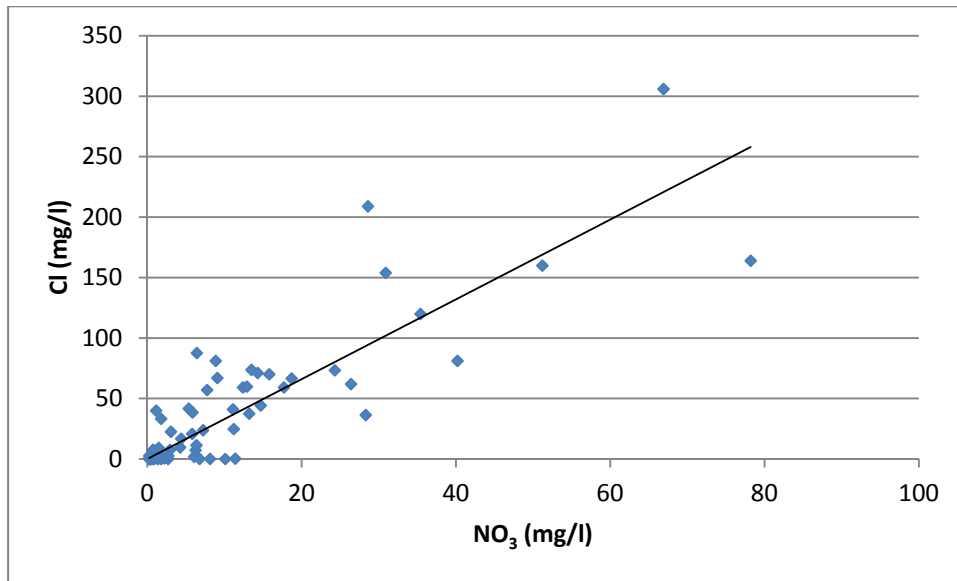


Figure 9. La bonne corrélation entre chlorure et nitrate dans la zone du Chari Logone indique une contamination des eaux souterraines par l'agriculture causée par l'excès d'engrais chlorés qui s'infiltrent dans la nappe avec la recharge.

Le diagramme de Piper de la région Chari Logone montre des teneurs élevées de chlorure. Cette région a également des teneurs élevées de nitrate. Une comparaison entre les deux anions montre une bonne corrélation (Figure 9), ce qui conduit à la conclusion que l'utilisation intensive d'engrais azotés chlorés dans l'agriculture contamine les eaux souterraines pendant le processus de recharge.

### 2.3. pH

Le pH est l'un des paramètres les plus souvent mesurés, bien que les valeurs habituelles aient peu d'implication sur la santé humaine. Selon les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2008), l'eau potable doit avoir valeurs de pH entre 6,5 et 8,5. Ces limites sont basées sur des considérations techniques (corrosion), mais l'intervalle peut être étendu à 9,5 si on n'a pas des systèmes de distribution.

La carte de la Figure 10 montre que la plupart des échantillons sont conforme aux recommandations de l'OMS à l'exception de 7 échantillons (ou 1,6%) où l'eau est légèrement acide (pH < 6,5). Toutefois, seulement à Royono l'acidité de l'eau pourrait être source de préoccupation (pH = 4), car les autres échantillons montrent des valeurs de pH supérieur à 6.

De l'eau plutôt alcaline est trouvée dans 12 échantillons (ou 2,7%) avec valeurs de pH supérieurs à 8,5 mais toujours inférieur à 9,5. Toutefois, comme aucun de ces échantillons n'appartient pas à un système de distribution, l'eau est encore dans les limites recommandées par l'OMS.

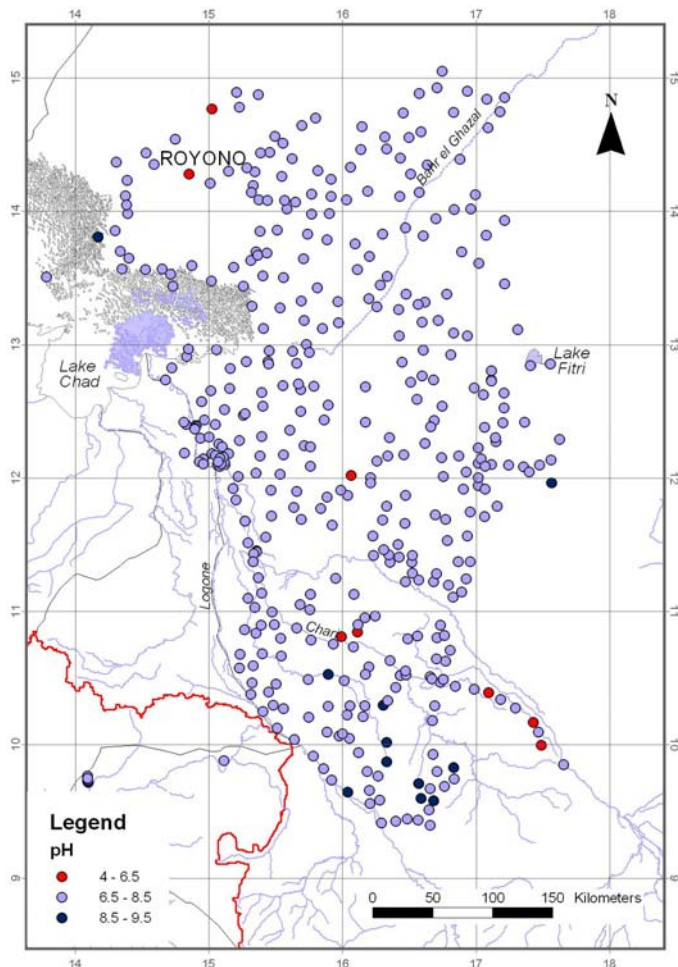


Figure 10. Distribution spatiale du pH. Les valeurs se situent généralement dans les limites proposées par l'OMS, bien que 8 échantillons montrent de l'eau légèrement acide (pH au dessous de 6,5). Toutefois, seulement à Royono l'eau souterraine est acide (pH = 4), les autres 7 échantillons ont des valeurs supérieures à 6.

#### 2.4. Solides Dissous Totales (SDT)

SDT est un indicateur de la minéralisation des eaux et implique principalement les sels inorganiques (calcium, magnésium, potassium, sodium, bicarbonate, chlorure et sulfate). L'OMS suggère que les concentrations de SDT supérieures à 1500 mg/l porteraient atteinte à la saveur de l'eau et des valeurs faibles feraient l'eau fade. Bien que les valeurs plus élevées de SDT ne semblent pas causer des problèmes de santé, les eaux avec des concentrations de 5000 mg/l sont trop salées pour la consommation humaine, mais elles peuvent encore être utilisées pour l'alimentation du bétail.

Les eaux peuvent être classées par la quantité de SDT en mg/l comme:

- Potable < 1500 mg/l
- Saumâtre 1500 à 5000 mg/l
- Saline > 5000 mg/l

Les eaux dans la zone d'étude présentent généralement des faibles concentrations en SDT (Figure 11) avec 90% des échantillons qui montrent SDT de moins de 1500 mg/l. Quarante-trois échantillons (10%) ont SDT entre 1500 mg/l et 5000 mg/l et seulement 4 échantillons (moins de 1%) ont SDT supérieur à 5000 mg/l (à Dorby, Koual, Adelema et Abrania).



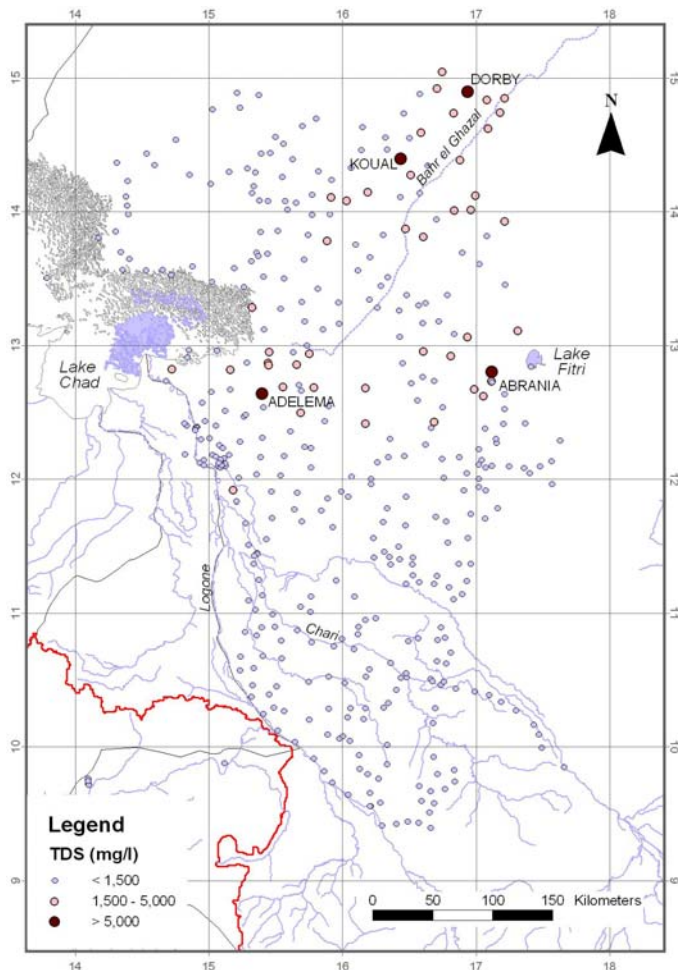


Figure 11. Distribution spatiale de SDT (mg/l). Généralement les eaux présentent des faibles teneurs en SDT et donc aptes pour la consommation humaine. Seuls 4 échantillons présentent une concentration en SDT supérieure à 5000 mg/l.

Une étude sur la corrélation entre SDT et les principaux anions et cations dissous ( Figure 12) montre:

- Une très bonne corrélation avec le sodium et le sulfate,
- Bonne corrélation avec le magnésium et le bicarbonate,
- Une corrélation moins prononcée avec le calcium et le chlorure,
- Faible corrélation avec le potassium.

Il peut être conclu que les teneurs élevées de SDT sont dus principalement aux concentrations élevées de sodium et de sulfate.

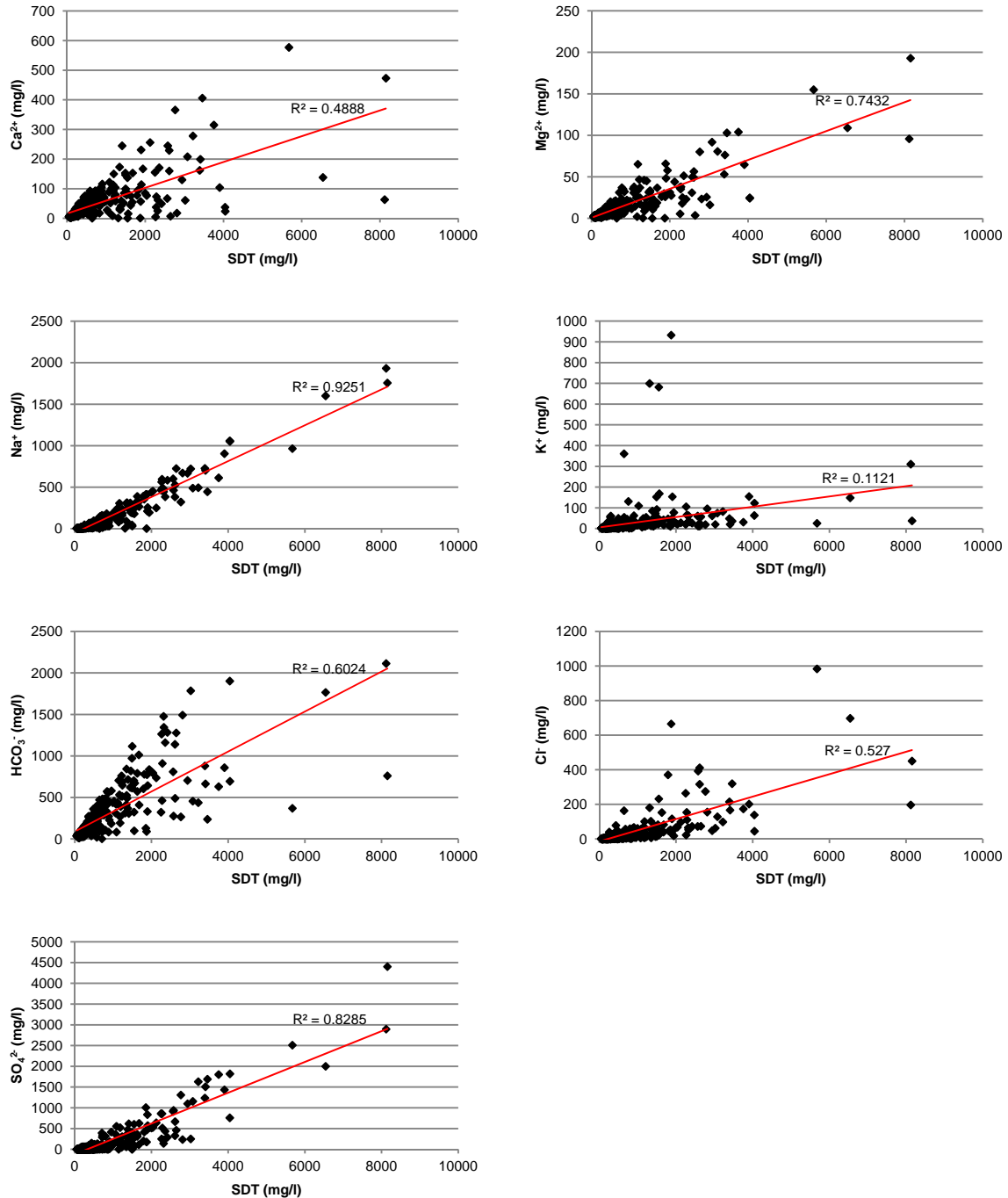


Figure 12. Corrélations entre SDT et les principaux cations et anions dissous. La corrélation est très bonne avec le sodium et le sulfate, bonne avec le magnésium et le bicarbonate, relativement bonne avec le calcium et le chlorure et faible avec le potassium.

## 2.5. Fluorure

L'absorption d'une certaine quantité de fluor est considérée comme nécessaire pour le corps humain afin d'éviter les caries. Toutefois, une exposition prolongée à des concentrations supérieures à 0,5 mg/l à 1 mg/l peut conduire à des tâches sur les dents (fluorose) qui peuvent affaiblir les dents et à des changements dans le squelette (fluorure-ostéosclérose).

Les eaux souterraines avec des hautes teneurs en fluorure apparaissent dans des zones volcaniques actives associées aux activités géothermiques, dans des aquifères du socle cristallin (Fantong et al, 2009) et dans des bassins sédimentaires arides (Pauwels & Ahmed, 2007). Fluorure est souvent associé avec des eaux carbonatées sodiques faibles en calcium



et magnésium, car les hautes teneurs en calcium limitent la mobilité du fluorure par précipitation de  $\text{CaF}_2$ . Les eaux carbonatées sodiques présentent des valeurs de pH hautes (supérieurs à 7). Par conséquent, l'information sur la composition chimique des eaux souterraines peut être utilisée comme un indicateur des problèmes potentiels de fluorure (Brunt et al, 2004).

Les minéraux les plus communs contenant du fluorure sont les suivants:

- (Fluor)Apatite ( $\text{Ca}_5[(\text{F},\text{Cl})(\text{PO}_4)_3]$ ).
- Fluorite ( $\text{CaF}_2$ ).
- Mica, avec la formule  $\text{X}_2\text{Y}_{4-6}\text{Z}_8\text{O}_{20}(\text{OH},\text{F})_4$  dans laquelle X est K, Na ou Ca, ou moins couramment Ba, Rb ou Cs; Y est Al, Mg ou Fe, ou moins couramment Mn, Cr, Ti, Li, etc.; et Z est essentiellement Si ou Al mais peuvent aussi inclure  $\text{Fe}^{3+}$  ou Ti.

Les eaux souterraines dans la zone d'étude montrent dans 12 sur 441 échantillons (3%) des teneurs de fluorure supérieures à la limite de l'OMS de 1,5 mg/l (Figure 13), surtout le long du Bahr el Ghazal, au sud du Lac Tchad, dans les alentours du Lac Fitri et dans la région Mayo-Kebbi. Concentrations élevées du fluorure entre 0,5 mg/l et 1,5 mg/l sont présentes tout le long du fleuve Logone et le long du fleuve Chari au nord du parallèle 11° nord.

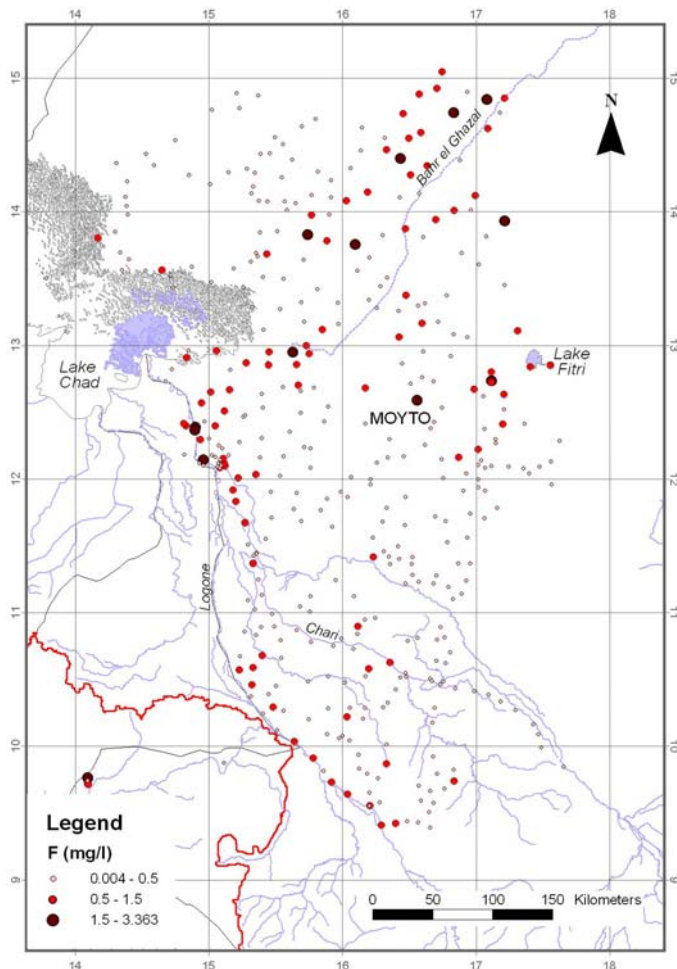


Figure 13. Distribution spatiale des concentrations en fluorure. Des concentrations supérieures au 1,5 mg/l apparaissent dans 12 échantillons, en particulier le long du Bahr el Ghazal, au sud du Lac Tchad, dans le voisinage du Lac Fitri et dans la région du Mayo-Kebbi. Des concentrations élevées entre 0,5 mg/l et 1,5 mg/l sont rencontrées le long du fleuve Logone et le long du fleuve Chari au nord du parallèle 11° nord.

Les zones au sud du Lac Tchad et à l'est et l'ouest du Bahr el Ghazal sont caractérisées par des eaux alcalines (pH supérieur à 7) et concentrations accrues de bicarbonate, potassium et sodium ainsi que magnésium et lithium (Figure 14). Donc, la présence de mica serait la cause de la teneur élevée en fluorure dans cette région.

Il y a des intrusions granitiques post-tectoniques à Moyto, dans les proximités du Lac Fitri, et dans la région Mayo Kebbi. L'écoulement des eaux souterraines à travers du granite effrité pourrait expliquer la présence de hautes concentrations en fluorure dans ces zones.

Le fleuve Logone écoule le long d'une structure géologique (zone de fractures). Donc, l'eau souterraine qui pousse du socle dans l'aquifère quaternaire serait la cause des hautes teneurs en fluorure.

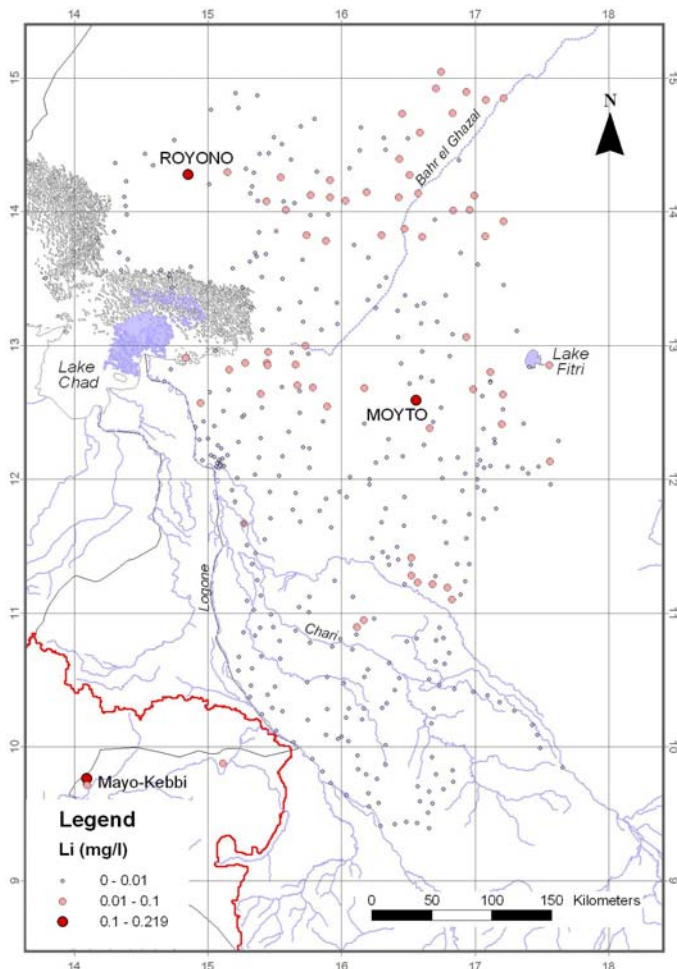


Figure 14. Distribution spatiale des concentrations en lithium. Valeurs élevées apparaissent au Bahr el Ghazal, au SE du Lac Tchad et dans la région entre le Lac Tchad et le Lac Fitri. Les concentrations les plus élevées se trouvent à Moyto et dans la région du Mayo-Kebbi (intrusion granitique post-tectonique) ainsi qu'à Royono.

## 2.6. Sodium

Selon les normes de l'OMS (2008), il n'y a pas une conclusion forte qu'un excès en sodium dans l'eau puisse causer l'hypertension. Pourtant, elle ne donne pas une limite basée sur la santé. En tout cas, les concentrations en chlorure de sodium supérieures à 200 mg/l peuvent changer la saveur de l'eau.

La présence des valeurs élevées en sodium dans la région sont dus à la température élevée et à l'importante évaporation que supporte la zone. Généralement, le sodium apparaît en excès comparé au chlorure indiquant l'effet d'échange de cations ou l'absence des sels NaCl (Figure 15). Seul 13 échantillons (0,03%) montrent plus de chlorure que de sodium et tous appartiennent à la région du Chari-Logone où on a déjà rapporté une pollution avec des engrais chlorurés (chapitre 2.2).

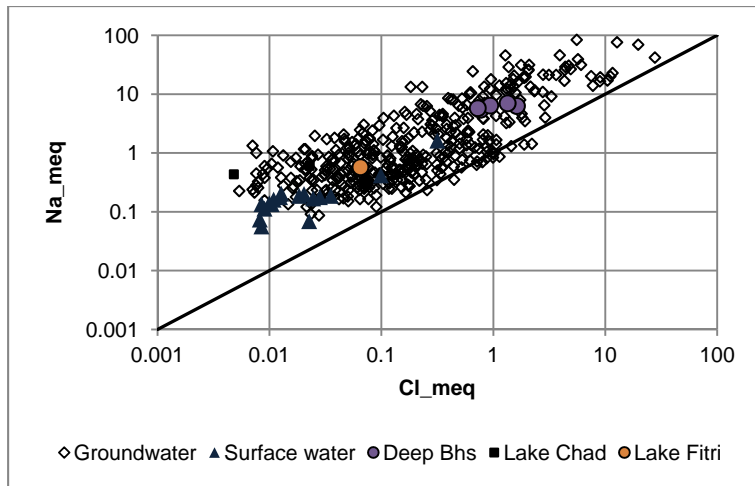


Figure 15. Corrélation entre sodium et chlorure (molaire). Le sodium apparaît généralement en excès comparé au chlorure. Il est dû à l'échange de cations ou à l'absence des sels NaCl.

Les concentrations de sodium les plus hautes sont rencontrées tout le long du Bahr el Ghazal et vers le SE du Lac Tchad ainsi que dans les alentours du Lac Fitri (Figure 16). Tous les autres échantillons ont des concentrations en sodium inférieures à 50 mg/l, probablement à cause d'une recharge directe de la précipitation avec un contenu très faible de sodium. Donc, ces zones peuvent être considérées comme zones de recharge et devraient être protégées pour éviter la contamination à partir de la surface.

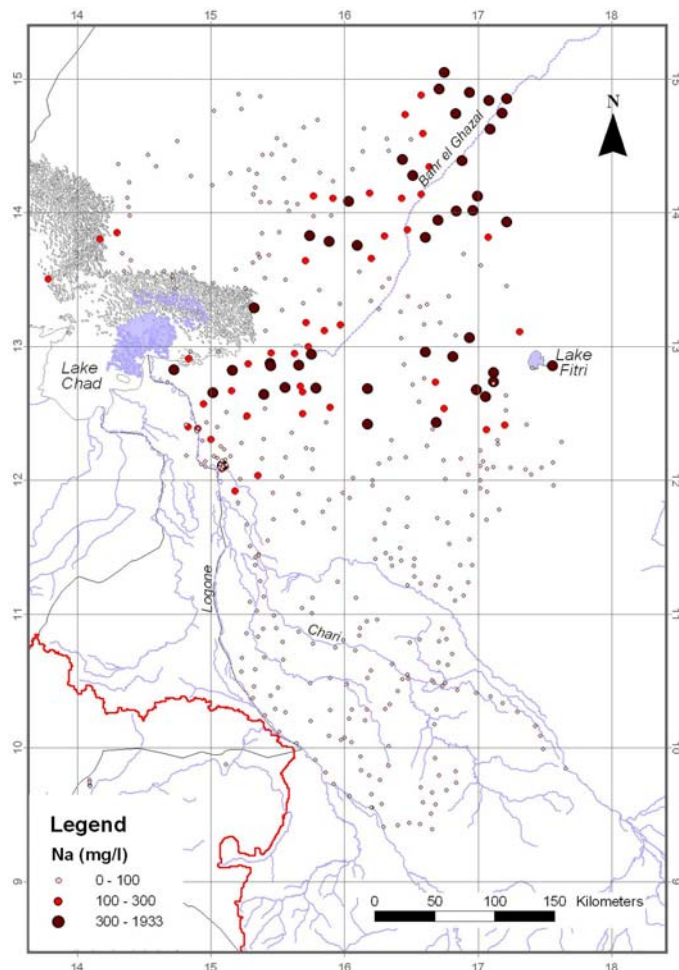


Figure 16. Distribution spatiale des concentrations en sodium. Les concentrations les plus hautes apparaissent tout le long du Bahr el Ghazal, vers le SE du Lac Tchad et dans les alentours du Lac Fitri.

## 2.7. Aptitude de l'eau à l'irrigation

Des concentrations élevées du sodium limitent l'utilisation de l'eau pour l'irrigation. Le sodium est adsorbé dans des sites d'échange des cations dans le sol et cause la dispersion des agrégats du sol. Ainsi, les pores sont scellés et, par conséquent, la perméabilité du sol réduite, en particulier dans le cas d'argiles montmorillonites. Les sols argileux affectés deviennent soit anaérobiques (manque d'oxygène), salines ou compactés (Bauder et al, 2008).

Aussi la salinité, comme conductivité électrique, limite l'aptitude de l'eau pour l'irrigation. Des conditions salines inhibent la capacité de la plante à absorber l'eau du sol, indépendamment si la salinité provient de l'eau d'irrigation ou de l'eau du sol qui tourne salin à cause de l'addition des sels, mauvais drainage, ou évaporation de la nappe phréatique peu profonde.

Pour cartographier les régions où l'eau souterraine est apte pour l'irrigation, trois différentes méthodes ont été appliquées : Wilcox (Wilcox, 1948), rapport d'adsorption du sodium (Sodium Adsorption Ratio - SAR) (Richards, 1954) et risque de magnésium (Magnesium Hazard) (Szabolcs & Darab, 1964).

*Wilcox*: calcule le pourcentage de sodium dans les cations (comme Na en pourcentage) selon la formule ci-dessous et fait une relation avec la conductivité électrique EC en  $\mu\text{S/cm}$  (Figure 17).

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

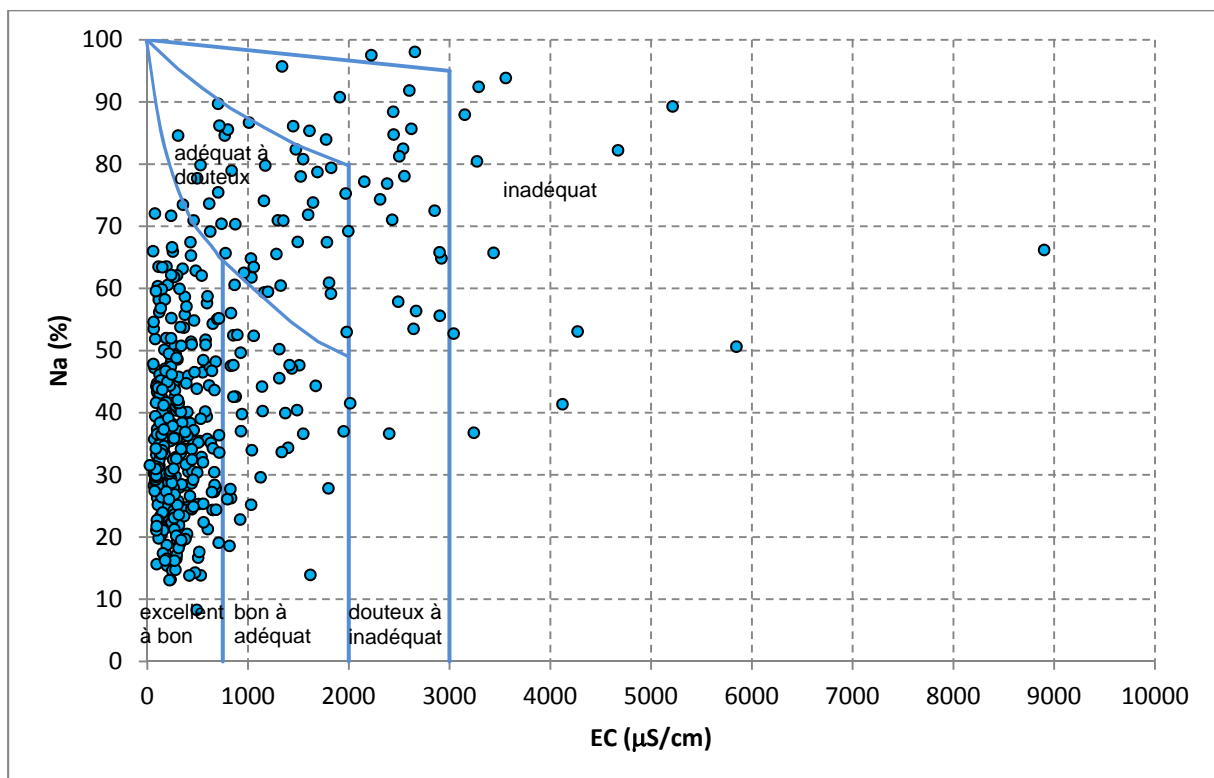


Figure 17. Diagramme Wilcox pour définir l'aptitude de l'eau souterraine pour l'irrigation.

Le SAR (*Sodium Adsorption Ratio*) évalue le risque de sodium par rapport aux concentrations de calcium et magnésium (Figure 18) et se calcule comme suit:

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

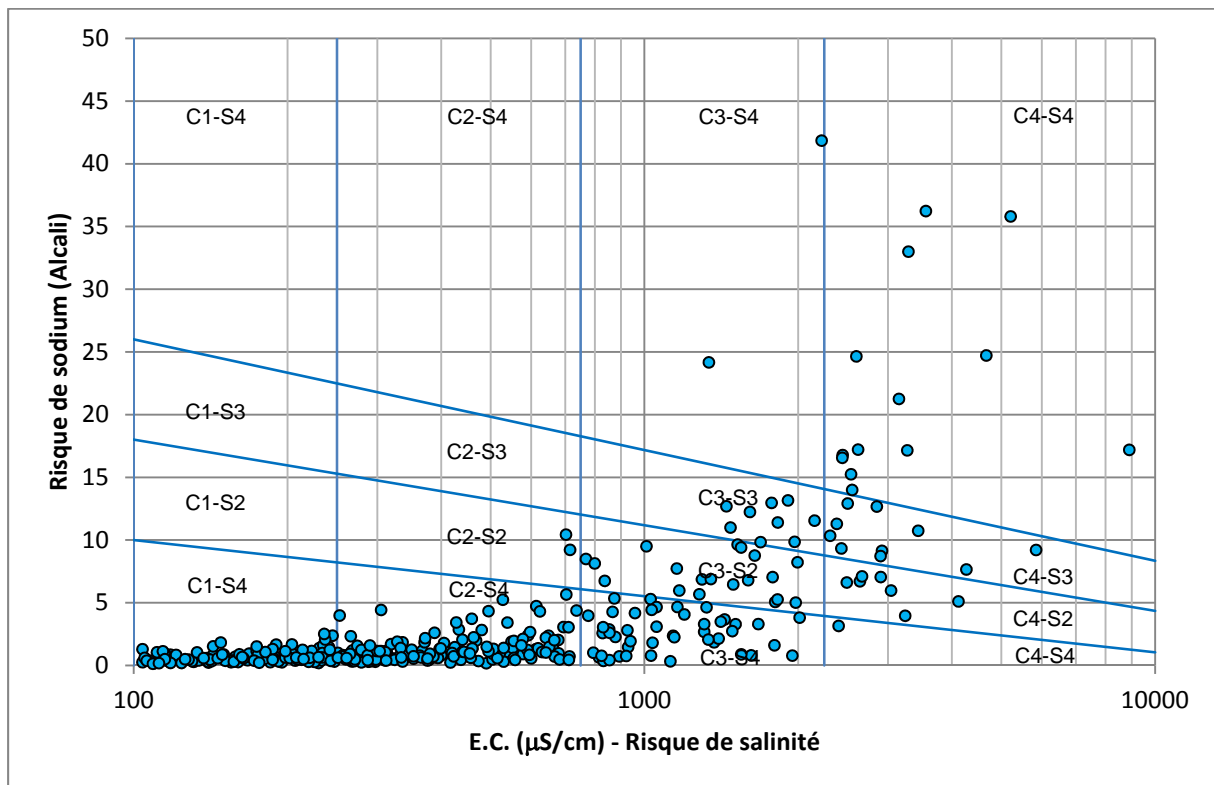


Figure 18. Diagramme SAR pour l'estimation de l'aptitude de l'eau pour l'irrigation.

Le *Risque du magnésium (Magnesium hazard - MH)* se calcule comme:

$$MH = \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} * 100$$

MH > 50 est considéré comme nocif et impropre pour l'utilisation dans l'irrigation.

Une carte sur l'aptitude des eaux souterraines pour l'irrigation a été réalisée en prenant en considération les trois paramètres ici montrés (Figure 19). Les points bleus sur la carte indiquent les points d'eau où l'eau est adéquate pour l'irrigation selon les trois indices considérés. Les points en rouge claire correspondent aux points d'eau dont l'eau est classée comme inadéquate par l'un des indices. Les points rouges montrent les points d'eau classés comme inadéquate par au moins deux des méthodes. Enfin, les points rouge foncé sont des points d'eau où les trois méthodes classent l'eau comme inadéquate. Les eaux souterraines sont inadéquates pour l'utilisation dans l'irrigation à l'est et l'ouest du Bahr el Ghazal, au sud du Lac Tchad et dans les alentours du Lac Fitri.

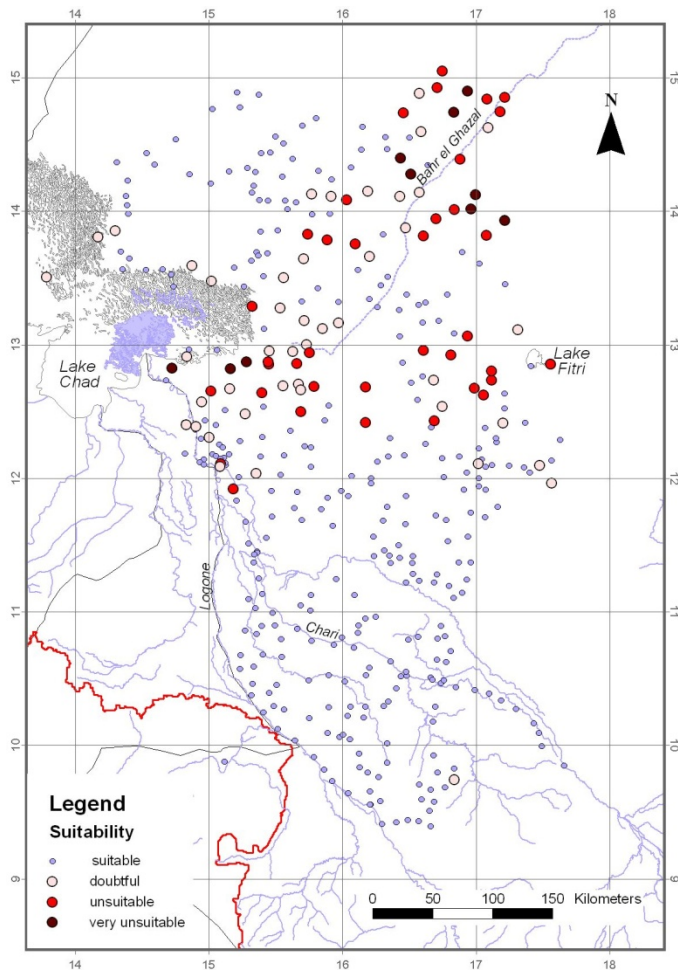


Figure 19. Carte d'aptitude des eaux souterraines pour l'irrigation. Elle montre que les eaux souterraines à l'est et l'ouest du Bahr el Ghazal, au sud du Lac Tchad et dans les alentours du Lac Fitri ne doivent pas être utilisées pour l'irrigation, principalement en raison de la forte salinité et de la teneur élevée en sodium.

Un autre problème pour l'eau d'irrigation est la présence du bore. La concentration du bore doit être inférieure ou égale à 1 mg/l pour que le bore ne s'accumule pas dans les feuilles des plantes pour atteindre des niveaux toxiques. Les concentrations en bore dans des échantillons analysés sont toujours inférieures à la limite.

Le chlorure est aussi un risque lorsqu'il est présent dans l'eau d'irrigation, car il peut être directement adsorbé dans les feuilles au cours de l'irrigation par aspersion (Morris & Devitt, 1991). La toxicité en chlorure pour les plantes est définie comme:

- $Cl < 150 \text{ mg/l}$  non toxique
- $150 \text{ mg/l} < Cl < 350 \text{ mg/l}$  toxicité modérée
- $Cl > 350 \text{ mg/l}$  toxicité sévère

Cependant, les eaux souterraines dans la région en général ne présentent pas des concentrations élevées en chlorure (Figure 20). Seul 6 échantillons (ou 1%) présentent plus de 350 mg/l de chlorure et 12 (ou 3%) ont des valeurs entre 150 mg/l et 350 mg/l. Tous coïncident avec des endroits déjà inadéquats en raison de la teneur en sodium.



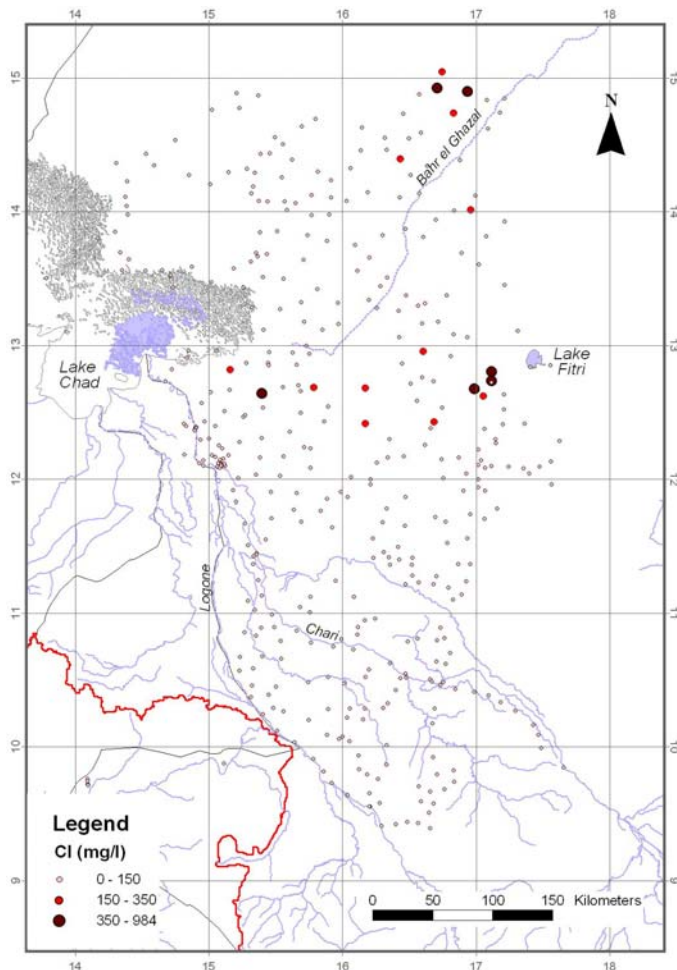


Figure 20. Distribution spatiale de la concentration en chlorures. Un total de 6 échantillons dépasse les 350 mg/l et l'eau ne peut pas être utilisée pour l'irrigation à cause de sa toxicité élevée pour plantes. Douze échantillons présentent des concentrations entre 150 mg/l et 350 mg/l. L'eau ne devrait pas être utilisée pour une irrigation à longue durée en raison de la toxicité modérée. Tous les autres échantillons présentent des concentrations basses en chlorure.

## 2.8. Nitrate

Le nitrate est généralement un indicateur de contamination des eaux souterraines, principalement à cause d'une utilisation inadéquate des engrais azotés, des plantes d'assainissement inefficaces ou défectueuse, ou même une pollution directe avec les matières fécales humaines ou animales. Toutefois, des hautes concentrations en nitrate d'origine naturelle ont été rapportées dans les régions arides à semi-arides en Afrique, probablement en raison de la minéralisation de la matière organique du sol accumulée pendant des périodes humides et détruite pendant des périodes sèches.

Hautes concentrations en nitrate sont considérées comme cancérigènes pour les personnes adultes, si l'exposition est permanente. Il est également connu comme la cause de la "maladie du bébé bleu" provoquée par un manque d'oxygène dans le sang. Pour ces raisons, la limite supérieure stipulée par les normes de l'OMS (ainsi que par les normes de la Communauté Européenne et l'EPA aux États Unies) est fixée à 50 mg/l (exprimée comme nitrate  $\text{NO}_3^-$ ). Nonobstant, les normes de la CE considèrent une concentration de 25 mg/l comme la valeur à partir laquelle des mesures de protection des eaux souterraines devraient être adoptées.

Un total de 59 échantillons (13%) présent des nitrates supérieurs aux 50 mg/l autorisés par les normes (Figure 21). Les sources de nitrate diffèrent selon les activités humaines de la région. Au nord de la 12° latitude nord, la pollution provient de l'abreuvement du bétail directement du puits, ce qui conduit à l'accumulation de matière fécale à la tête du puits.

Dans le sud de la région, l'agriculture est l'activité principale, en particulier la culture du riz. La forte pollution ici serait l'effet de l'utilisation excessive d'engrais azotés (voir chapitre 2.2).

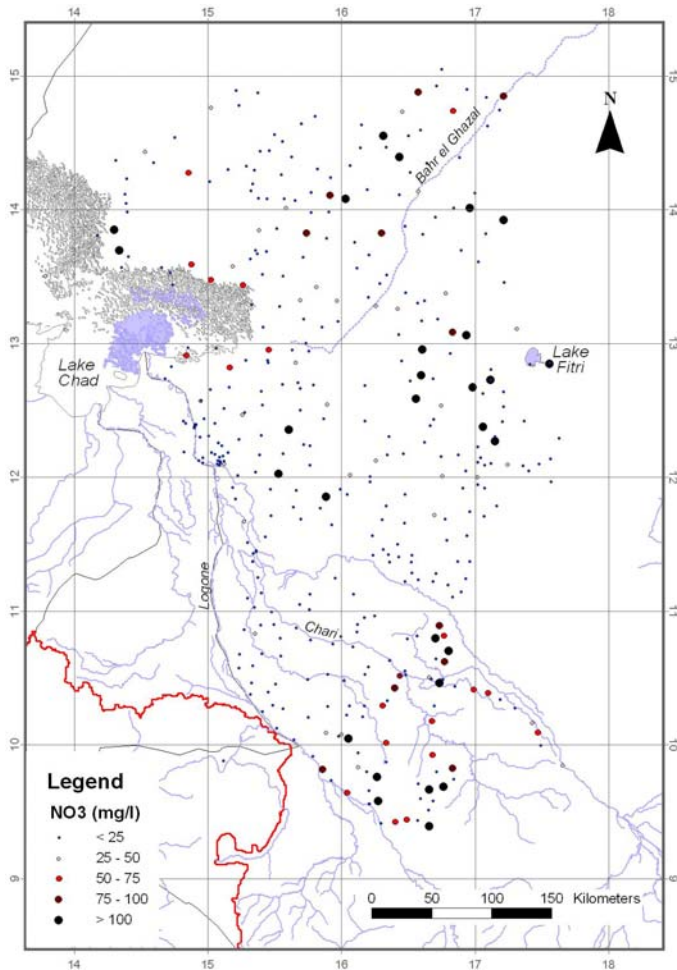


Figure 21. Distribution spatiale des concentrations en nitrate. Un total de 59 échantillons (soit 13%) montre des concentrations supérieures à la limite de 50 mg/l autorisée par l'OMS. La pollution a des sources différentes. Au nord de la latitude 12° nord, la pollution provient des matières fécales du bétail qui abreuvent directement de l'eau du puits. Dans le sud la pollution vient d'un usage agricole, à la suite de l'utilisation excessive d'engrais azotés.

La présence de nitrate suggère la nécessité urgente pour la protection des puits et des eaux souterraines dans la région. Des puits creusés à la main devraient être abandonnés au profit des forages bien construits et protégés. Si cette technique n'est pas applicable, alors une meilleure gestion des puits creusés à la main est recommandée.

## 2.9. Sulfate

La présence de sulfate dans l'eau potable à une concentration supérieure à 250 mg/l peut être détectée par un goût amer pendant que les concentrations supérieures à 1000 mg/l ont un effet laxatif aux personnes non habituées. Toutefois, sulfate dans l'eau ne provoque pas des conséquences graves pour la santé et l'OMS n'a pas fixé une limite pour cet anion, bien qu'une concentration de 500 mg/l est considérée comme la limite supérieure recommandée.

La carte de la Figure 22 montre la présence de concentrations élevées de sulfate dans la zone d'étude, en particulier à l'est et l'ouest du Bahr el Ghazal, au SE du Lac Tchad et dans les alentours du Lac Fitri. Comme déjà indiqué, toutes ces régions sont aussi caractérisées par des concentrations élevées de chlorure et sodium provoquées par une conductivité hydraulique très faible de l'aquifère qui mène à une vitesse d'écoulement très faible ou à un temps de séjour très élevé de l'eau souterraine dans l'aquifère.

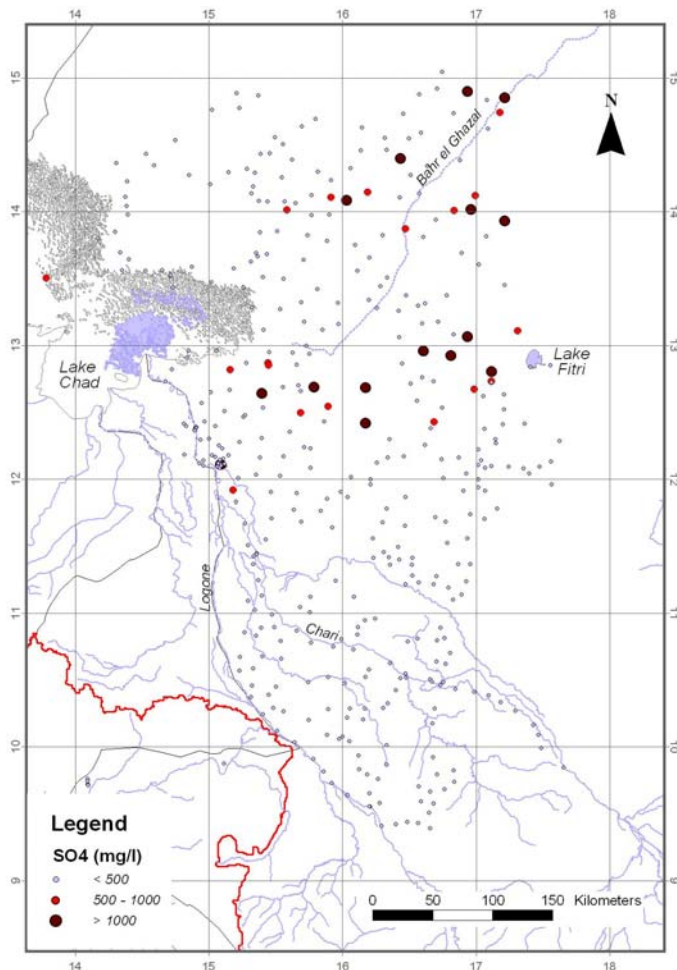


Figure 22. Distribution spatiale du sulfate. Des concentrations supérieures à 1000 mg/l sont présentes dans 14 échantillons; 18 échantillons ont des concentrations entre 500 mg/l et 1000 mg/l. Tous ces échantillons se trouvent à l'est et l'ouest du Bahr el Ghazal, au SE du Lac Tchad et dans les alentours du Lac Fitri.

Des concentrations entre 500 mg/l et 1000 mg/l sont présent dans 18 échantillons (soit 4%), et 14 échantillons (soit 3%) montrent des concentrations supérieures à 1000 mg/l.

### 3. Résumé et conclusions

Les résultats de 441 analyses chimiques des eaux souterraines (principalement de l'aquifère quaternaire) et de l'eau de surface de la partie tchadienne du Bassin du Lac Tchad peut être résumés comme suit:

- La plupart des valeurs de pH sont conformes avec les recommandations de l'OMS, sauf dans 7 échantillons (1,6%) où l'eau est légèrement acide ( $\text{pH} < 6,5$ ). Une eau plutôt alcaline a été trouvée dans 12 échantillons (2,7%) avec des valeurs de pH supérieures à 8,5. Cependant, seul à Royono l'acidité pourrait être préoccupante ( $\text{pH} = 4$ ).
- En général l'eau présente des SDT bas et 90% des échantillons ont une concentration de SDT de moins de 1500 mg/l. Toutefois, un haut SDT apparaît à l'est et l'ouest du Bahr el Ghazal, au SE du Lac Tchad et dans les proximités du Lac Fitri. Ils sont principalement le résultat de hautes concentrations en sodium et sulfate.
- L'eau souterraine montre des contenus en fluorure supérieurs aux limites de l'OMS avec 1,5 mg/l dans 12 échantillons (3%), en particulier le long du Bahr el Ghazal, au sud du Lac Tchad et dans les environs du Lac Fitri. Concentrations élevées de fluorure entre 0,5 mg/l et 1,5 mg/l sont présentes le long du fleuve Logone ainsi que le long du fleuve Chari au nord du parallèle 11° nord.
- Les concentrations en sodium plus élevées sont présent à l'est et l'ouest du Bahr el Ghazal et au SE du Lac Tchad ainsi que dans les environs du Lac Fitri. Tous les autres

échantillons ont des concentrations inférieures à 50 mg/l. En général, sodium apparaît en excès par rapport au chlorure indiquant soit l'échange de cations ou l'absence des sels NaCl dans la région.

- Un total de 59 échantillons (13%) présent des concentrations en nitrate supérieures à la limite de 50 mg/l autorisé par l'OMS. Les concentrations élevées de nitrate sont dues à la pollution liée aux activités humaines dans la région, l'élevage et l'agriculture.
- Les eaux souterraines sont localement caractérisées par la présence des teneurs élevées de sulfate, en particulier à l'est et l'ouest du Bahr el Ghazal, au SE du Lac Tchad et dans les alentours du Lac Fitri.

On peut conclure que les eaux souterraines de la zone sont généralement aptes pour la consommation humaine. Cependant, il y a des régions problématiques dispersées où l'eau est inappropriée, comme on conclut ci-dessous:

- La pollution par nitrate est ponctuelle en raison de l'abreuvement du bétail directement à partir du puits au nord du parallèle 12° nord. Dans le sud de la zone d'étude, la pollution par nitrate est régionale et résulte d'une application excessive des engrais azotés dans la production de riz.
- Les régions à l'est et l'ouest du Bahr el Ghazal, au SE du Lac Tchad et dans les alentours du Lac Fitri sont caractérisées par très hautes concentrations en chlorure, sodium et sulfate. Ceci est due au fait que dans ces régions une conductivité hydraulique très faible mène à une vitesse d'écoulement très basse et un très haut temps de séjour de l'eau souterraine dans l'aquifère.
- Hautes concentrations en sels à l'est et l'ouest du Bahr el Ghazal, au SE du Lac Tchad et dans les alentours du Lac Fitri suggèrent que ces régions ne sont pas aptes pour l'irrigation avec de l'eau souterraine.
- Les hautes concentrations en fluorure ont différentes genèses à savoir :
  - Les zones au sud du Lac Tchad et le long du Bahr el Ghazal sont caractérisées par des eaux souterraines neutres à légèrement alcalines (pH supérieur à 7) et par concentrations élevées de bicarbonate, potassium et sodium ainsi que magnésium et lithium. La présence de mica serait la cause de la haute teneur en fluorure dans ces régions.
  - Des intrusions granitiques post-tectoniques apparaissent à Moyto, la région Mayo-Kebbi et les alentours du Lac Fitri. Ici, l'écoulement des eaux souterraines à travers les granites effrités conduirait à des hautes concentrations en fluorure.
  - Il est connu que le fleuve Logone écoule tout le long d'une structure géologique (zone de fractures). Donc, l'eau souterraine qui pousse par cet endroit du socle dans l'aquifère quaternaire serait ici la cause des hautes teneurs de fluorure.

#### 4. Recommandations

Il est fortement recommandé que des mesures des eaux souterraines soient mises en œuvre pour préserver la ressource contre la pollution causée par les activités humaines (voir concentrations en nitrate et chlorure dans la région Chari Logone dans le chapitre 2.2 et la concentration de nitrate dans le chapitre 2.8).

Dans les régions avec hautes teneurs en nitrate, les puits creusés à la main devraient être abandonnés au profit des forages bien construits et protégés. Si cette technique n'est pas applicable, alors une meilleure gestion des puits creusés à la main est recommandée.

En outre, en raison de la concentration élevée en sels, les eaux souterraines ne devraient pas être utilisées pour l'irrigation à l'est et l'ouest du Bahr el Ghazal, au sud du Lac Tchad et dans les proximités du Lac Fitri.

#### 5. Références

Bauder, J.W., T. A. Bauder, R. M. Waskom, T. F. Scherer, 2008. Assessing the Suitability of Water (Quality) for Irrigation – Salinity and Sodium.

Brunt, R, L. Vasak, J. Griffioen, 2004. Fluoride in groundwater: Probability of occurrence of excessive concentration on global scale. Report Nr. SP 2004-2. IGRAC.

Fantong, W.Y., H. Satake, S. N. Ayonghe, E. C. Suh, S. M. A. Adelana, E. Bi S. Fantong, H. S. Banseka, C. D. Gwanfogbe, L. N. Woincham, Y. Uehara, J. Zhang, 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.

Morris, R., D. Devitt, 1991. Sampling and Interpretation of Landscape Irrigation Water. University of Nevada, Reno, Fact Sheet 02-91.

Pauwels, H., S. Ahmed, 2007. Fluoride in Groundwater: Origin and Health Impacts. *Géosciences* No. 5, Mars 2007. BRGM.

Richards, L. A., 1954. Diagnosis and improvement of saline alkali soils: Agriculture, Vol. 160, Handbook 60, US Department of Agriculture, Washington D.C.. Cited in: Khodapanah, L., Sulaiman, W.N.A. & Khodapanah, N., 2009. Groundwater Quality Assessment for Different Purposes in Eshterhard District, Tehran, Iran. *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X Vol.36, No. 4, (2009), pp. 543-553. EuroJournals Publishing, Inc. <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>.

Szabolcs, I. C. Darab, 1964. The influence of irrigation water of high sodium carbonate content of soils. In: Proceedings of 8<sup>th</sup> International Congress of Isss, Trans, Vol.II, pp. 803-812. Cited in: Khodapanah, L., Sulaiman, W.N.A. & Khodapanah, N., 2009. Groundwater Quality Assessment for Different Purposes in Eshterhard District, Tehran, Iran. *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X Vol.36, No. 4, (2009), pp. 543-553. EuroJournals Publishing, Inc. <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>.

Wilcox, L.V., 1948. The quality of water for irrigation use, vol. 40. US Department of Agriculture Technology Bulletin 962, pp. 1-40, Washington DC. Cited in Khodapanah, L., Sulaiman, W.N.A. & Khodapanah, N., 2009. Groundwater Quality Assessment for Different Purposes in Eshterhard District, Tehran, Iran. *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X Vol.36, No. 4, (2009), pp. 543-553. EuroJournals Publishing, Inc. <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>.

World Health Organization (WHO), 2008. Guidelines for drinking-water Quality incorporation 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> addenda. 3<sup>rd</sup> Edition, Geneva.