

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

**Analyse microbienne et
chimique de l'eau potable à
N'Djamena
Mai-Juin 2013**



Hanovre, Décembre 2014

Rapport N°9



Au nom de:

BGR Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe


german
cooperation
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Auteurs: Kristin Seeber, Charlotte Wilczok
Co-Auteurs: Djoret Daïra, Aminu Magaji Bala
Commissionné par: Ministère Fédérale pour la Coopération Economique et le Développement (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, BMZ)
Projet: Gestion Durable des Eaux du Bassin du Lac Tchad
BMZ-No.: 2010.2274.8
BGR-No.: 05-2355
ELVIS Link: <https://elvis/fsc/mx/COO.2164.100.5.82354>
BGR-Archive No.:
Date: Décembre 2014

Table des Matières

Résumé.....	1
1 Introduction	2
2 Principes d'utilisation des indicateurs d'organismes fécaux pour l'analyse microbienne de l'eau potable.....	4
2.1 Coliformes Totaux.....	4
2.2 Coliformes Thermotolérants.....	4
2.3 Escherichia Coli (E. coli)	5
2.4 Entérocoques.....	5
3 Zone d'étude	6
3.1 Emplacement de la zone d'étude	6
3.2 Climat	7
3.3 Paramètres Géologiques	8
3.4 Cadres Hydrogéologiques.....	10
4 Matériels et Méthodes	12
4.1 Analyses Chimiques	12
4.2 Analyses Microbiennes	13
5 Résultats et Interprétation.....	16
5.1 Analyses hydrogéochimiques de l'eau	16
5.2 Microbiologie.....	25
6 Conclusions et Recommandations	30
Annexe 1 Points d'eau échantillonnés	32
Annexe 2 Méthodes d'analyses	34
Annexe 3 Statistique des données hydrogéochimique et physiques.....	35
Annexe 4 Résultats des analyses chimiques.....	36

Table des Figures

Figure 1 Emplacement de la zone d'étude dans le Bassin du Lac Tchad.	7
Figure 2 Précipitation moyenne mensuelle dans la zone d'étude (1980-2010).	7
Figure 3 Températures moyennes mensuelles de 1991-2003 à N'Djamena.....	8
Figure 4 Profil géologique du bassin du Lac Tchad de Rig Rig dans le Nord du Lac Tchad à Goré (au sud du Tchad)	8
Figure 5 Coupes des forages de N'Djamena	9
Figure 6 Coupes des forages de N'Djamena. Données fournies par la STE en 2014.	10
Figure 7 Ecoulement des eaux souterraines à N'Djamena créé à partir des données de niveau d'eau moyenne (2001 à 2004).....	11
Figure 8 Lieux de prélèvement pour l'analyse microbienne et chimique de l'eau potable à N'Djamena	12
Figure 9 Titrage in-situ des espèces de carbone inorganiques.....	13
Figure 10 Cellule d'écoulement utilisé pour les mesures des paramètres in-situ	13
Figure 11 Installation de la cellule d'écoulement à un puits tubulaire à N'Djamena et mesure des paramètres in-situ avec le multi-détecteur WTW-Multi 3430	13
Figure 12 Stérilisation de l'embouchure d'un forage par une flamme avant l'échantillonnage pour analyse microbienne	14
Figure 13 Échantillonnage pour analyse microbienne dans des bouteilles stériles de 100ml	14
Figure 14 Principe de métabolisation du nutriment indicateur Colilert-18's par bactérie coliforme.....	14
Figure 15 Principe de métabolisation du nutriment indicateur Colilert-18 par E. coli.	14
Figure 16 Remplissage du mélange d'échantillon et substrat dans sacs en plastique Quanti-Tray.....	15
Figure 17 Sceller le Quanti-Tray dans le Quanti-Tray Sealer avant incubation de l'échantillon	15
Figure 18 Comptage des creux positifs (jaune) pour coliformes totaux et se référer à la table MPN.....	15
Figure 19 Comptage de puits fluorescent pour E. coli and entérocoques sous lumière UV 365nm et se référer à la table MPN.....	15
Figure 20 Corrélation de TDS avec le bicarbonate.	16
Figure 21 Diagramme Piper pour les 64 échantillons d'eau sans considérer l'anion nitrate. .	17
Figure 22 Histogramme des valeurs de pH détectées dans les eaux souterraines de l'aquifère quaternaire à N'Djamena 2013.	18
Figure 23 Box-Whisker-diagramme des valeurs de pH détectées dans l'aquifère quaternaire à N'Djamena 2013.....	18
Figure 24 Distribution du pH des eaux souterraines à N'Djamena, analysée en 2013.	19
Figure 25 Le pourcentage de distribution de dureté totale des eaux souterraines (°dGH) de 64 échantillons à N'Djamena en 2013.	20
Figure 26 Distribution de l'ammoniac des eaux souterraines à N'Djamena, analysée en 2013.	21
Figure 27 Distribution du nitrate des eaux souterraines à N'Djamena, analysée en 2013.....	22

Figure 28 Distribution de nitrite des eaux souterraines à N'Djamena, analysée en 2013.	23
Figure 29 Distribution de fer des eaux souterraines à N'Djamena, analysée en 2013.....	24
Figure 30 Distribution de manganèse des eaux souterraines à N'Djamena, analysée en 2013.	24
Figure 31 Distribution de fluorure dans les eaux souterraines à N'Djamena, analysée en 2013.	25
Figure 32 Diagramme circulaire avec la proportion de coliformes totaux détectés dans 52 forages à N'Djamena.....	26
Figure 33 Diagramme circulaire avec la proportion d'E. coli détectée dans 52 forages à N'Djamena.	26
Figure 34 Diagramme circulaire avec la proportion de coliformes totaux détectés dans l'eau brute de 13 forages de la STE.....	26
Figure 35 Diagramme circulaire avec la proportion d'E. coli détecté dans l'eau brute de 13 forages de la STE.....	26
Figure 36 Diagramme avec la proportion des entérocoques détectés dans 52 forages à N'Djamena.	27
Figure 37 Diagramme avec la proportion des entérocoques détectés dans 13 forages de la STE à N'Djamena.....	27
Figure 38 Carte révélant la détection des coliformes totaux, E. coli et entérocoques à N'Djamena.	27
Figure 39 Forage non-protégé Milezi (NDJ 32) de la STE, où des coliformes totaux ont été détectés. La flèche rouge indique une activité agricole à proximité du forage.....	28
Figure 40 Forage non-protégé GD 8 (NDJ 36) de la STE, où E. coli et entérocoque ont été détectés.....	28
Figure 41 Forage (NDJ 60) près d'une fosse à ordures avec une détection positive des coliformes totaux.	28
Figure 42 Forage (NDJ 4) à Moursal à proximité des ménages avec drainage des eaux grises fortement contaminées par les bactéries fécales.	28
Figure 43 Forage (NDJ 24) à Ndjari contaminé par bactéries fécales.....	29
Figure 44 Forage (NDJ 19) dans une cour privée à Chagua avec détection positive d'entérocoques.....	29

Liste des Tables

Table 1 Classification des sources améliorées et non améliorées d'eau potable pour le JMP développés par l'OMS et l'UNICEF.....	2
Table 2 Classification de l'eau dure et douce d'après Klut-Olzewski.....	19

Liste des Annexes

Annexe 1 Points d'eau échantillonnés
Annexe 2 Méthodes d'analyses
Annexe 3 Statistique des données hydrogéochimique et physiques
Annexe 4 Résultats des analyses chimiques

Abréviations

BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe <i>Institut Fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles</i>
CBLT	Commission du Bassin du Lac Tchad
JMP	Joint Monitoring Program <i>Programme de Suivi Conjoint</i>
GPS	Global Positioning System <i>Système de Positionnement Global</i>
MPN	Most Probable Number <i>Nombre le Plus Probable</i>
OMS	Organisation Mondiale de la Santé <i>World Health Organisation</i>
PET	Polyéthylène
STE	Société Tchadienne des Eaux
UNICEF	United Nation Children's Fund <i>Fonds des Nations Unies pour l'Enfance</i>
WASH	Water, Sanitation and Hygiene <i>Eau, Assainissement et Hygiène</i>

Résumé

Mots-clés: Bassin du Lac Tchad, eau potable, l'analyse microbienne, entérocoques, Escherichia Coli

De mai à Juin 2013, au cours de la saison sèche, le projet CBLT-BGR a réalisé une analyse des eaux souterraines de 52 forages équipés de pompes manuelles situées dans la ville de N'Djamena. En outre, l'eau brute de 13 forages de la compagnie d'approvisionnement local en eau (STE) a été testée. Les objectifs principaux de la campagne d'échantillonnage ont été le renforcement des capacités en analyse microbienne du personnel de la CBLT dans le bassin du lac Tchad et l'analyse de l'aptitude des eaux souterraines dans N'Djamena à être utilisées comme eau potable. Ce dernier couvre la question fondamentale du Programme de Suivi Conjoint (JMP) de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et le Fond des Nations Unies pour l'Enfance (UNICEF), qui visait à évaluer l'Objectif du Millénaire pour le Développement N° 7C: réduire de moitié la proportion de personnes sans accès durable à l'eau potable et à l'assainissement de base d'ici à 2015.

L'enquête a révélé que 40% des 52 forages équipés de pompes à main, classées par le JMP comme sources améliorées, sont contaminés par des bactéries fécales (E. coli et/ou entérocoques). En outre, 23% des échantillons de l'eau brute de la STE, qui distribue l'eau aux ménages, contenait des bactéries fécales.

En plus de la contamination microbienne, quelques 65 échantillons montrent également de fortes concentrations de composés azotés, soit du nitrite (23%), de l'ammonium (17%), et/ou du nitrate (4.6%), qui sont aussi un indicateur de la pollution d'origine humaine. Selon la norme de l'eau potable de l'OMS la concentration de nitrates et de nitrites dans l'eau potable ne doit pas dépasser respectivement 50 mg/l et 0.2 mg/l pour l'exposition à long terme. De fortes concentrations de nitrates et nitrites sont considérés comme cause de mort par asphyxie chez les nourrissons en raison de méthémoglobinémie. Ils sont également considérés comme cancérigènes par l'exposition à long terme. Dans N'Djamena quatre échantillons montrent une concentration de nitrate élevée entre 25 mg/l et 50 mg/l, mais ne dépassent pas la limite de l'OMS. Cependant, la concentration de nitrite, qui est plus puissante que le nitrate par rapport à la méthémoglobinémie, dépasse la limite d'exposition à long terme dans 25% des forages.

Une forte concentration de fluorure dans l'eau potable est un autre risque pour la santé en cas d'exposition à long terme. Il peut causer la fluorose dentaire et l'ostéoporose squelettique. Comme il a déjà été montré dans d'autres études sur la qualité des eaux souterraines dans le bassin du lac Tchad (voir chapitre 5.1.8), un risque grave en raison de la concentration en fluor élevée existe. Dans N'Djamena, 40% des échantillons présentent une concentration de fluorure élevée au-dessus de 0.5 mg/l, mais aucun d'eux ne dépasse la limite OMS de 1.5 mg/l.

Un risque santé en raison d'une forte concentration de métaux lourds tels que l'aluminium, l'arsenic, le plomb, le cadmium, le cuivre, le nickel, le zinc n'a pas été détecté dans l'eau potable. Cependant, 44,6% des échantillons présentent des concentrations élevées de fer (> 0.3 mg/l) et/ou du manganèse (> 0.2 mg/l), ce qui produit un mauvais goût de l'eau, la coloration de la lessive et l'obstruction des tuyaux.

Selon les résultats de cette étude, il est fortement recommandé aux autorités nationales, la STE et la CBLT, de propager une meilleure gestion et la protection des forages fournissant de l'eau à N'Djamena ainsi que la protection des eaux souterraines contre la pollution potable. En outre, une sensibilisation de la population dans le traitement domestique de l'eau, l'assainissement et l'amélioration de l'hygiène pour réduire le risque pour la santé, est fortement recommandée

1 Introduction

Le programme «Gestion durable des eaux 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: «Le développement organisationnel» et «l'adaptation au changement climatique» réalisée par le GIZ et la «gestion des eaux souterraines» exécuté par l'Institut Fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles (BGR).

L'objectif principal du projet BGR est de renforcer les capacités de la CBLT dans les domaines de l'analyse des eaux et du suivi concernant les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin. La coopération technique a commencé en 2007 avec un premier projet qui a duré jusqu'en Juin 2011. Le deuxième projet a débuté en Septembre 2011 et a pris fin en Décembre 2014

Afin d'améliorer la connaissance de la CBLT sur la qualité des eaux souterraines dans le bassin du lac Tchad, les projets ont réalisés des collectes de données ainsi que des analyses dans les différentes régions de la République du Tchad et du Cameroun. Le présent rapport porte sur l'analyse de l'eau potable échantillonnée de Mai à Juin 2013 à N'Djamena, la capitale du Tchad, avec un accent sur la contamination microbienne. Il a été envisagé comme étude de cas pour les analyses futures dans le bassin du lac Tchad.

L'Objectif du Millénaire pour le Développement N° 7C vise à réduire de moitié la proportion de personnes sans accès à l'eau potable jusqu'à la fin de 2015. Afin de mesurer cet objectif, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et le Fonds des Nations Unies pour l'Enfance (UNICEF) ont développé le Programme de Suivi Conjoint (JMP) pour l'approvisionnement en eau et l'assainissement. Le JMP a classé les sources d'eau dans les «non amélioré» et «amélioré» comme une mesure provisoire de sécurité de l'eau potable (voir le tableau 1). Selon ce tableau, les 65 puits ou forages mesurés lors de cette étude sont donc considérés comme des sources «améliorées» et devraient être comptés comme source d'eau potable. Malheureusement, ce type de classification évalue l'accès à des types de sources d'eau, mais pas à la qualité de ces sources d'eau. En conformité avec l'OMS, «sûr» signifie «pas de risque significatif pour la santé pendant toute une durée de vie de consommation» (OMS, 2011).

Table 1 Classification des sources améliorées et non améliorées d'eau potable pour le JMP développés par l'OMS et l'UNICEF (OMS et UNICEF, 2006).

Sources d'eau potable "améliorées"	Sources d'eau potable "non-améliorées"
Eau courante en habitation , aussi appelé une connexion des ménages, est défini comme un tuyau de service d'eau relié à la plomberie de la maison à un ou plusieurs robinets (par exemple dans la cuisine et salle de bains).	Sources non protégées. Ceci est une source qui est soumise au ruissellement, les fientes d'oiseaux, ou l'entrée des animaux. Les sources non protégées, généralement, n'ont pas une boîte collectrice.
L'eau courante à la cour/parcelle , appelée aussi une connexion de jardin, est définie comme une connexion d'eau courante à un robinet placé dans la cour ou le terrain à l'extérieur de la maison.	Puits creusé non protégé. Ceci est un puits creusé pour lequel l'une des conditions suivantes est remplie: 1) le puits n'est pas protégé contre les eaux de ruissellement; ou 2) le puits n'est pas protégé contre les fientes des oiseaux et des animaux. Si au moins une de ces conditions est vraie, le puits n'est pas protégé.
Une borne fontaine est également connue comme une fontaine publique ou robinet public à partir duquel la population peut collecter de l'eau. Les fontaines publiques peuvent avoir un ou plusieurs robinets et sont généralement fait de briques, maçonnerie ou en béton	
Forage est un trou profond qui a été perforé ou percé dans le but d'atteindre l'eau souterraine. Les forages sont construits avec des tuyaux qui empêchent l'éboulement dans le trou de petit diamètre et protègent des eaux de ruissellement. L'eau d'un forage est fournie par une pompe tournée par des moyens humains, animaux, éoliens,	Charette avec petit réservoir/tambour. Ceci se rapporte à l'eau vendue par un fournisseur qui transporte l'eau dans une communauté. Les types de transport utilisés comprennent des charrettes à ânes, les véhicules motorisés et d'autres moyens.

Sources d'eau potable "améliorées"	Sources d'eau potable "non-améliorées"
électriques, diesel ou solaires. Les forages sont généralement protégés par une plate-forme qui conduit l'eau déversée loin du forage et empêche son infiltration à la tête du forage.	Camion-citerne L'eau est transportée par camion dans une communauté et vendue du camion.
Puits protégé est un puits creusé protégé des eaux de ruissellement par un revêtement ou un tuyau qui s'élève au-dessus du niveau du sol et une plate-forme qui détourne l'eau déversée loin du puits. Un puits protégé est également couvert, de sorte que les excréments des oiseaux et animaux ne tombent pas dans le puits.	L'eau de surface est toute eau située au-dessus du sol et comprend les rivières, les barrages, les lacs, les étangs, les ruisseaux, les canaux et les canaux d'irrigation.
Source protégée. La source est généralement protégée contre les eaux de ruissellement, les fientes d'oiseaux et d'animaux par une "boîte de ressort" construite en brique ou en béton autour de la source de telle sorte que l'eau coule directement hors de la boîte dans un tuyau ou une citerne, sans être exposés à la pollution extérieure.	
L'eau embouteillée est considérée comme une source d'eau potable améliorée seulement s'il y a une autre source d'eau améliorée pour d'autres usages tels que l'hygiène personnelle et la cuisine. La production d'eau en bouteille devrait être supervisée par un organisme national de surveillance compétent.	
L'eau de pluie se réfère à la pluie recueillie ou récoltée à partir de surfaces (toit ou au sol) et stockée dans un récipient, un réservoir ou d'une citerne jusqu'à utilisation.	

2 Principes d'utilisation des indicateurs d'organismes fécaux pour l'analyse microbienne de l'eau potable

L'eau potable doit être adéquate et sans danger pour la consommation humaine, afin de minimiser les risques pour la santé publique en raison par exemple d'agents pathogènes. Il est bien connu que plusieurs maladies telles que la typhoïde, l'entérite, le choléra, l'hépatite, la giardiase ou lambliaose et la diarrhée sont causés par l'infection par des bactéries, virus, protozoaires et parasites vivants/survivants dans l'eau.

Jusqu'à présent, il est technologiquement impossible de détecter tous ces agents pathogènes en temps réel et de manière économiquement raisonnable, mais puisque la plupart des agents pathogènes atteignent l'eau en raison de la contamination fécale, l'eau qui n'est pas en contact avec des matières fécales humaines et/ou animales ne devraient pas avoir des agents pathogènes transmis par les selles.

Dans l'analyse microbienne de l'eau potable le principe des indicateurs d'organismes fécaux a été établi. Cela signifie que les indicateurs spécifiques de bactéries qui indiquent une contamination fécale sont représentatifs des autres micro-organismes. Plusieurs critères pour ces organismes indicateurs fécaux existent. Ils devraient être:

- une partie de la flore intestinale normale des humains et des animaux
- non reproductif hors du tube digestif
- plus résistants dans la nature et contre la désinfection que les agents pathogènes
- présents en nombre plus élevé que les agents pathogènes dans l'eau contaminée
- en bonne corrélation avec les agents pathogènes
- analysés d'une manière facile, rapide et peu coûteuse
- interprétés avec précision d'une manière quantitative

Jusqu'à présent, aucun indicateur n'a été trouvé qui remplisse la liste complète des critères. Mais quelques-uns des organismes répondent suffisamment aux critères et sont utilisées depuis plusieurs années. Les bactéries les plus courantes indicatrices de contamination par des eaux usées sont les suivantes:

- Coliformes totaux,
- Coliformes fécaux,
- *Escherichia coli*, et
- Entérocoques.

2.1 Coliformes Totaux

Les coliformes totaux sont définis comme des bactéries gram-négatives non-sporogènes qui peuvent être trouvés partout en grand nombre, dans le sol et la végétation, ainsi que les matières fécales des animaux à sang chaud, y compris les humains (OMS, 2011). Les bactéries suivantes appartiennent aux genres de bactéries coliformes:

- *Escherichia*: selles humaines et animales
- *Enterobacter*: environnement
- *Klebsiella*: environnement
- *Citrobacter*: environnement
- *Serratia*: environnement

2.2 Coliformes Thermotolérants

Coliformes thermotolérants, également décrits comme des coliformes fécaux, sont un sous-ensemble du groupe des coliformes. Ils sont définis comme des bactéries coliformes qui peuvent croître à 44.5 ° C. Ils se composent des espèces suivantes:

- *Escherichia coli*
- *K. pneumoniae*
- *Enterobacter* spp.

Bien que les coliformes fécaux se trouvent principalement dans le tractus intestinal des humains et d'autres animaux à sang chaud, ils constituent un groupe hétérogène d'organismes et certaines des bactéries appartenant à ce groupe peuvent être dérivées d'autres sources environnementales. Ils peuvent aussi se multiplier dans l'eau par occasion pour donner une fausse impression de contamination fécale (OMS, 2011).

2.3 Escherichia Coli (E. coli)

Escherichia coli (E. coli) est une bactérie en forme de bâtonnet de la famille des entérobactéries qui sont généralement trouvées dans les intestins des animaux à sang chaud, y compris les humains. Elle est relativement simple et peu coûteuse à mesurer. Contrairement au groupe général des coliformes, cette bactérie ne se produit pas naturellement dans le sol et la végétation. Elle est trouvée presque exclusivement dans les matières fécales et, par conséquent, si trouvée dans l'eau, c'est une confirmation effective d'une contamination fécale. Elle peut survivre de quatre à six semaines dans l'eau de rivière non traitée (température et la disponibilité des nutriments dépendant) et est donc une indication précise de la contamination fécale récente (Flint, 1987).

La bactérie E. coli peut être distinguée de la plupart des autres coliformes par sa capacité à fermenter le lactose à 44° C et par son accroissement et sa réaction colorée sur certains types de milieux de culture. Comme mentionné précédemment la plupart des souches de E. coli ne sont pas nuisibles eux-mêmes, mais ils peuvent agir en tant que supports de micro-organismes qui provoquent des maladies humaines. Il est peu probable que E. coli se multiplie dans l'eau, sauf dans certaines conditions spécifiques tropicales et sub-tropicales, de sorte que le nombre détecté peut être interprété de façon quantitative (MFE, 2009 et Ashbolt et al., 2001).

L'avantage d'utiliser E. coli au lieu des coliformes fécaux comme indicateur de risque pour la santé humaine est que certaines souches de coliformes (Klebsiella, Enterobacter et Citrobacter), qui sont dérivés de sources végétales, sont capables de croître dans les conditions définies pour les coliformes thermotolérants (coliformes fécaux). Par conséquent, au total le nombre de coliformes fécaux peut être très élevé même lorsque le risque de maladie pathogène réelle, comme indiqué plus précisément par le nombre d'E. coli, est en dessous des niveaux indicatifs (MFE, 2009).

2.4 Entérocoques

Les entérocoques sont des bactéries intestinales des humains et des animaux et appartiennent à la famille de Streptococcaceae placée dans l'ordre de lactobacilles. Ce sont des bactéries gram-positives qui se produisent souvent en paires ou en courtes chaînes. Elles sont capables de respiration cellulaire dans des environnements riches ou pauvres en oxygène. En outre, elles tolèrent un large éventail de conditions environnementales: températures extrêmes (10-45° C), pH (4.5-10.0) et concentrations de chlorure de sodium élevées, ils sont donc capables de survivre dans l'eau salée (OMS, 2011).

En raison de l'excrétion, elles peuvent atteindre l'environnement où elles peuvent déclencher des blessures graves, la méningite et les infections des voies urinaires, en particulier chez l'homme avec un système immunitaire faible.

Puisque les entérocoques sont plus résistants contre la désinfection et d'autres impacts environnementaux que E. coli, la détection des entérocoques peut indiquer une contamination fécale beaucoup plus ancienne.

Pour résumer, les coliformes totaux, E. coli et entérocoques ont été analysés pour indiquer la présence de contamination fécale (Ashbolt et al., 2001). Selon l'OMS les trois bactéries devraient être absentes dans l'eau potable.

3 Zone d'étude

3.1 Emplacement de la zone d'étude

La zone d'étude couvre la ville de N'Djamena, la capitale de la République du Tchad, qui est situé au sud du lac Tchad entre les latitudes 12° et 12.2° Nord et les longitudes 14.9° et 15.13° Est (Figure 1) au confluent du Chari et fleuve Logone. N'Djamena est peuplée d'environ 1.174.531 habitants en 2012 (STE, 2013). Selon la STE, 30% de la population de N'Djamena est connectée au réseau d'eau potable alimenté par 22 forages maintenus par la STE (STE, 2013). A l'exception d'un forage, ils exploitent tous l'aquifère Quaternaire avec une profondeur allant jusqu'à 60 m. L'eau brute extraite par ces forages est traitée avec de l'hypochlorite de calcium ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) avant la distribution dans la canalisation reliant les ménages. Nonobstant, l'équipement de traitement souvent ne parvient pas à fonctionner en raison des coupures d'électricité. Fréquemment, la demande est trop élevée et il n'y a pas suffisamment de temps disponible pour un traitement efficace avant la distribution. En outre, le système de distribution de la STE dans certains quartiers est assez vieux et la perte d'eau due aux fuites en 2012 a compté jusqu'à 20% (STE, 2013).

La population qui n'a pas de connexion à l'eau domestique courante obtient son eau potable principalement des forages équipés de pompes manuelles. Ces forages sont forés plus ou moins de façon incontrôlée, soit dans les cours privés ou dans les espaces publics (rues, places et écoles). Souvent, ils ne respectent pas le positionnement concernant les latrines, ils ne sont pas correctement construits, et ils sont percés généralement à une faible profondeur d'environ 20-40 m.

La ville de N'Djamena ne dispose pas d'un système d'assainissement centralisé fonctionnel. L'eau des toilettes est dirigée vers les latrines traditionnelles qui, pour des raisons économiques, sont souvent construites sans une protection adéquate pour empêcher la contamination des eaux souterraines par des bactéries fécales. Cette contamination et une mauvaise pratique d'hygiène de la population provoquent des maladies graves telles que la diarrhée, l'amibiase, la typhoïde, le choléra et l'hépatite A et E. Les statistiques de 2004 révèlent que 16,7% des décès étaient liés au secteur de l'eau, des eaux usées et de l'hygiène (Abdel-Nassir Cherif, 2012). En outre, les eaux grises des ménages sont souvent directement versées dans de petites tranchées ou fossés situés à proximité des propriétés. Ces eaux usées non traitées infiltrent, s'évaporent ou s'accumulent dans des mares de différentes tailles, détectables tout autour de la ville. En outre, un canal d'une longueur d'environ 10 km, connu localement comme Bouta d'ardebjournal, situé dans le centre-ville le long d'un axe nord-sud, reçoit les eaux usées non traitées et les eaux grises des ménages et des industries.

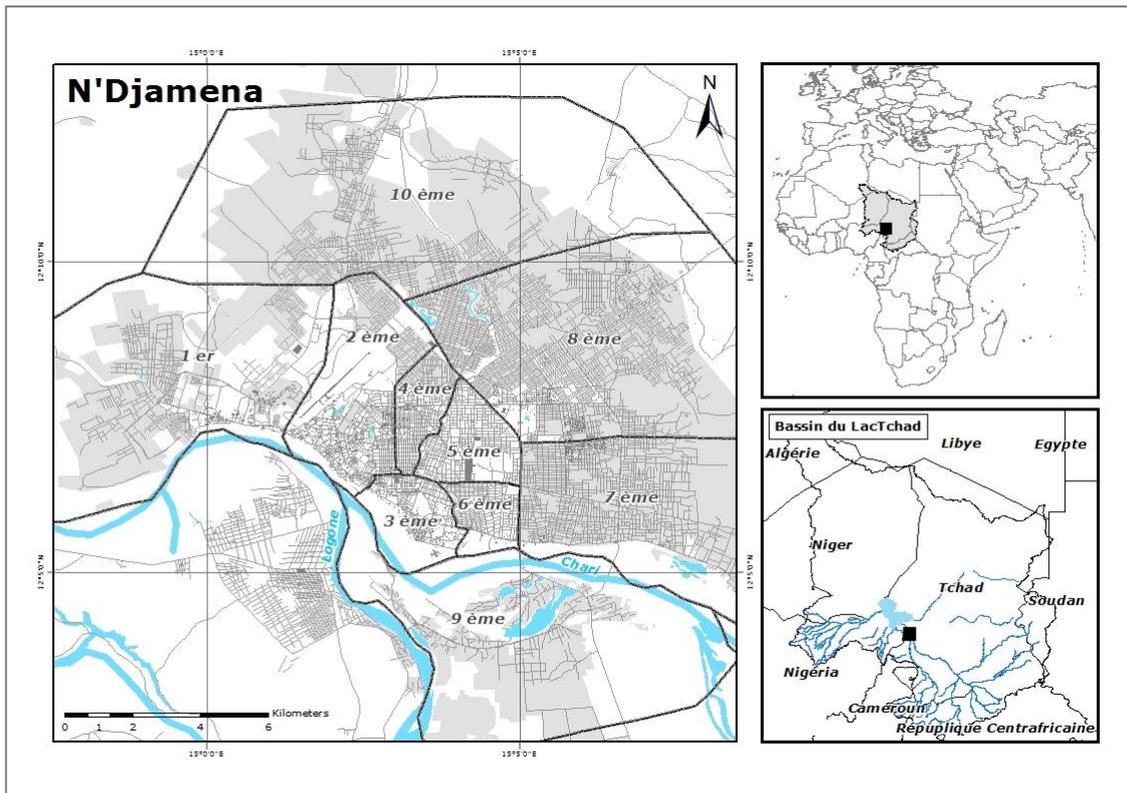


Figure 1 Emplacement de la zone d'étude dans le Bassin du Lac Tchad.

3.2 Climat

Le climat de N'Djamena répond à deux forces motrices climatiques: le Harmattan, un vent sec venant du nord, et la mousson ouest-africaine du sud. Cela conduit à un climat sahélo-soudanien dans la zone d'étude, qui se caractérise par une saison des pluies de Juin à fin Septembre et une saison sèche qui dure d'Octobre à Mai (Figure 2). La précipitation moyenne annuelle pour la période 1980-2010, mesurée à la station météorologique de l'aéroport de N'Djamena (latitude 12,3° Nord et la longitude 15,03° Est) est de 580 mm.

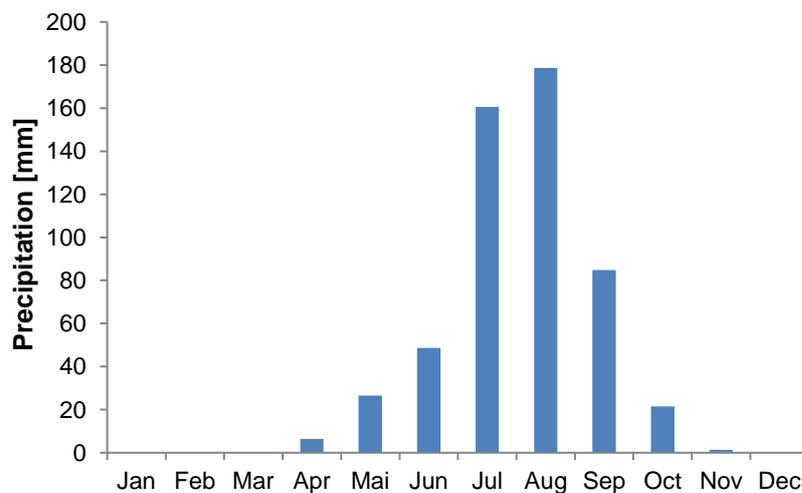


Figure 2 Précipitation moyenne mensuelle dans la zone d'étude (1980-2010).

La figure 3 présente la température moyenne mensuelle pour la période de 1991-2003 à N'Djamena. La température annuelle moyenne à long terme est de 28° C avec une valeur maximale de 33,5° C en Avril et la valeur minimale de 23,4° C en Janvier (Kadjangaba, 2007).

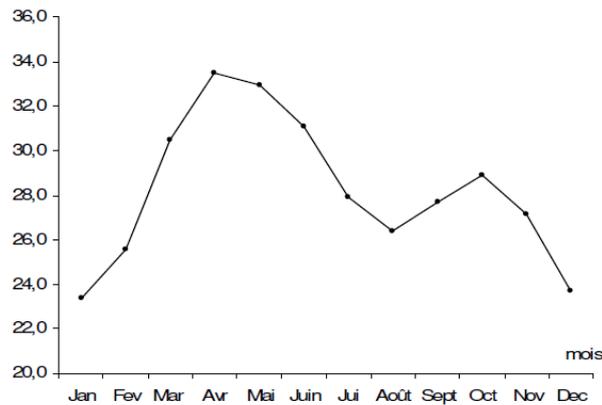


Figure 3 Températures moyennes mensuelles de 1991-2003 à N'Djamena (Kadjangaba, 2007).

3.3 Paramètres Géologiques

La ville de N'Djamena est située dans le bassin du lac Tchad dans la région du Chari-Baguirmi. Pour la suite, seul un résumé des aspects lithologiques dans la zone d'étude sera donné. Pour plus d'informations, consultez BRGM (1988), Schneider et al. (1992) et Daira (2000). La figure 4 montre un profil géologique du bassin du lac Tchad illustrant la lithologie à rencontrer dans la région de N'Djamena.

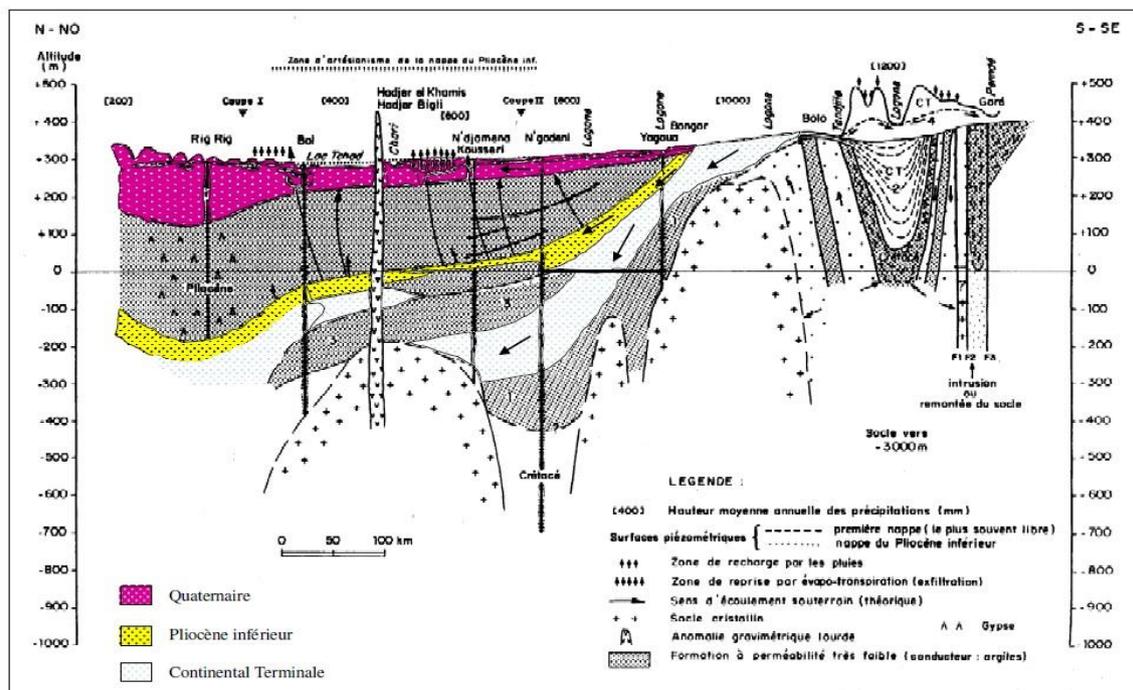


Figure 4 Profil géologique du bassin du Lac Tchad de Rig Rig dans le Nord du Lac Tchad à Goré (au sud du Tchad) (Source : Schneider & Wolff, 1992).

La profondeur du socle à N'Djamena ne peut pas être déterminée avec précision puisque le forage le plus profond réalisé en 1950 (avec une profondeur de 356 m) ne l'a pas atteint. Cependant, avec l'aide d'études sismologiques, il a été estimé à environ 550 m (BRGM, 1988).

La plus ancienne et plus profonde couche sédimentaire connue au-dessus du socle est le Continental Terminal (Oligocène/Miocène) composé de grès qui, selon certains forages dans le Chari-Baguirmi, a une épaisseur de 80 m à 100 m. Mais, à la hauteur de N'Djamena de l'autre côté de la rivière Chari au Cameroun, le Continental Terminal a une épaisseur d'environ 200 m et est composé à deux couches successives (Kushnir 1993) comme suit:

- 100 m de la série de grès argileuse intercalée avec trois différents types de sables et
- environ 100 m série détritique de grès

Recouvrant le Continental Terminal, le Pliocène inférieur de plusieurs mètres d'épaisseur est rencontré. Il est composé de sables fluvio-lacustres. Recouvrant se trouve le Pliocène moyen, également composé de sables mais inter-stratifiés avec de l'argile sableuse, et le Pliocène supérieur composé d'une couche d'argile massive imperméable avec 200 à 300 m d'épaisseur.

La couche supérieure est constituée de sable quaternaire ayant une épaisseur d'environ 60 m jusqu'à 70 m de N'Djamena.

Huit profils lithologiques (Figure 5 et Figure 6) des forages dans l'aquifère du Quaternaire dans l'Ouest et l'Est de N'Djamena (voir endroits indiqués avec BH sur la carte de la Figure 7) montrent des couches alternant du sable et d'argile à une profondeur de 60-75 m, ainsi que la présence de faciès intermédiaires (limon sableux ou sable limoneux). Une variation spatiale de l'épaisseur de la couche d'argile supérieure entre 2 et 20 m peut jouer un rôle important pour la recharge de la nappe aquifère sous-jacente et la protection des eaux souterraines.

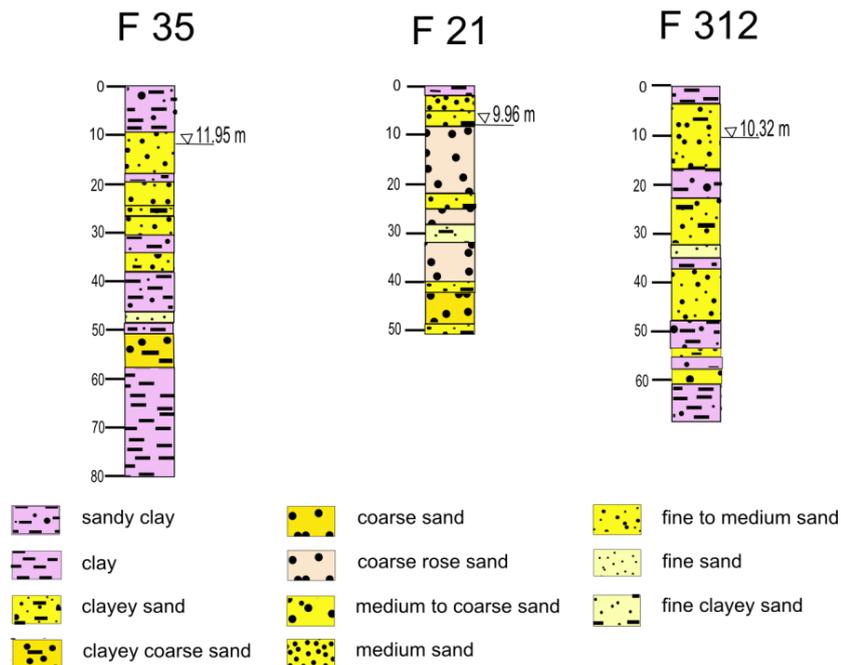


Figure 5 Coupes des forages de N'Djamena (in Schneider & Wolff, 1992).

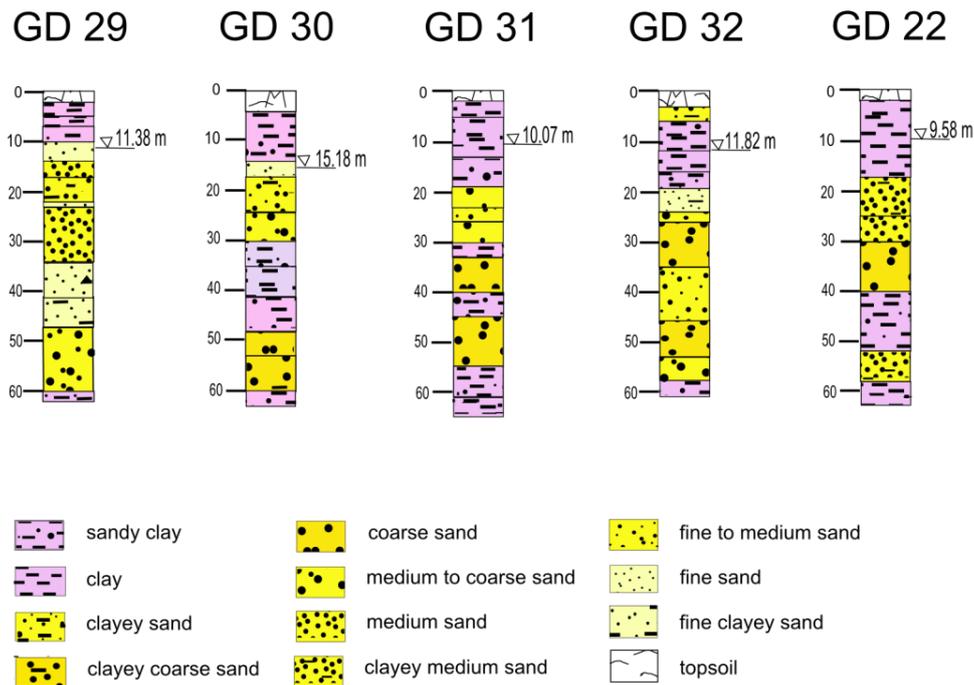


Figure 6 Coupes des forages de N'Djamena. Données fournies par la STE en 2014.

3.4 Cadres Hydrogéologiques

Le Quaternaire est un aquifère régional libre composé de sables moyens à fins localement entremêlés par l'argile conduisant à des aquifères superposées de caractère semi-confiné. En revanche, Kadjangaba (2007) mentionne que l'ensemble de l'aquifère Quaternaire à N'Djamena est divisé par une couche argileuse imperméable à semi-imperméable dans un aquifère superficiel exploité par des puits traditionnels, et un aquifère inférieur exploité par des forages. Cette couche d'argile a été détectée localement à une profondeur d'environ 20 m et présente une épaisseur allant jusqu'à 40 m (BRGM, 1967). Cependant, trois profils géologiques GD 29 et GD 32 de la STE et F21 dans Schneider & Wolff (1992) ne confirment pas la présence d'une couche intermédiaire d'argile (Figure 5 et Figure 6). Ainsi, la séparation dans un aquifère superficiel et un inférieur mentionné par Kadjangaba (2007) existe seulement au niveau local et l'échange des eaux de l'aquifère Quaternaire supérieur et inférieur peut être supposé.

Informations sur les caractéristiques hydrogéologiques comme la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère Quaternaire à N'Djamena sont rares. Elles ont été estimées au niveau régional pour l'aquifère supérieur dans une ancienne étude menée dans le bassin du lac Tchad (UNESCO/PNUD, 1970). Après cette étude, la valeur de la transmissivité est comprise entre 2×10^{-4} and $1,3 \times 10^{-3}$ m²/s et le coefficient d'emmagasinement est d'environ 0,14, ce qui indique un aquifère libre. Cependant, les caractéristiques hydrogéologiques des couches quaternaires plus profondes mesurées en 1967 au niveau de six forages (Schneider et al., 1992) et en 1991 dans cinq autres forages (Kadjangaba 2007) montrent des transmissivités entre $3,1 \times 10^{-3}$ m/s et $5,5 \times 10^{-2}$ m/s et un coefficient d'emmagasinement entre 4×10^{-4} et 10^{-3} . Cela correspond à un aquifère confiné à semi-confiné.

Des études antérieures sur l'écoulement des eaux souterraines à N'Djamena se trouvent entre autres dans les thèses de Kadjangaba (2007) et Daïra (2000) et dans l'étude menée par le BRGM (1988). La profondeur moyenne de la nappe phréatique à proximité du fleuve Chari est d'environ 7 m sous la surface et augmente vers le nord à environ 16 m sous la surface. En outre, il a été démontré que l'aquifère à N'Djamena est rechargée principalement par le fleuve

Chari et par l'infiltration des précipitations pendant la saison des pluies. Des observations de la nappe phréatique près de la rivière (~200 m) ont révélé des fluctuations saisonnières de 2 m à 4 m, mais à une distance de 3,4 km du fleuve Chari ces fluctuations sont minimales. Les écoulements des eaux souterraines dans la frontière nord-est de N'Djamena est du nord-est au sud-ouest vers le centre de la ville, où se situe une dépression de la nappe. Cependant, à partir du Chari à la frontière sud de la ville, la direction de l'écoulement est du sud-ouest au nord-est (Figure 7). Ici l'eau souterraine circule également vers la zone de dépression.

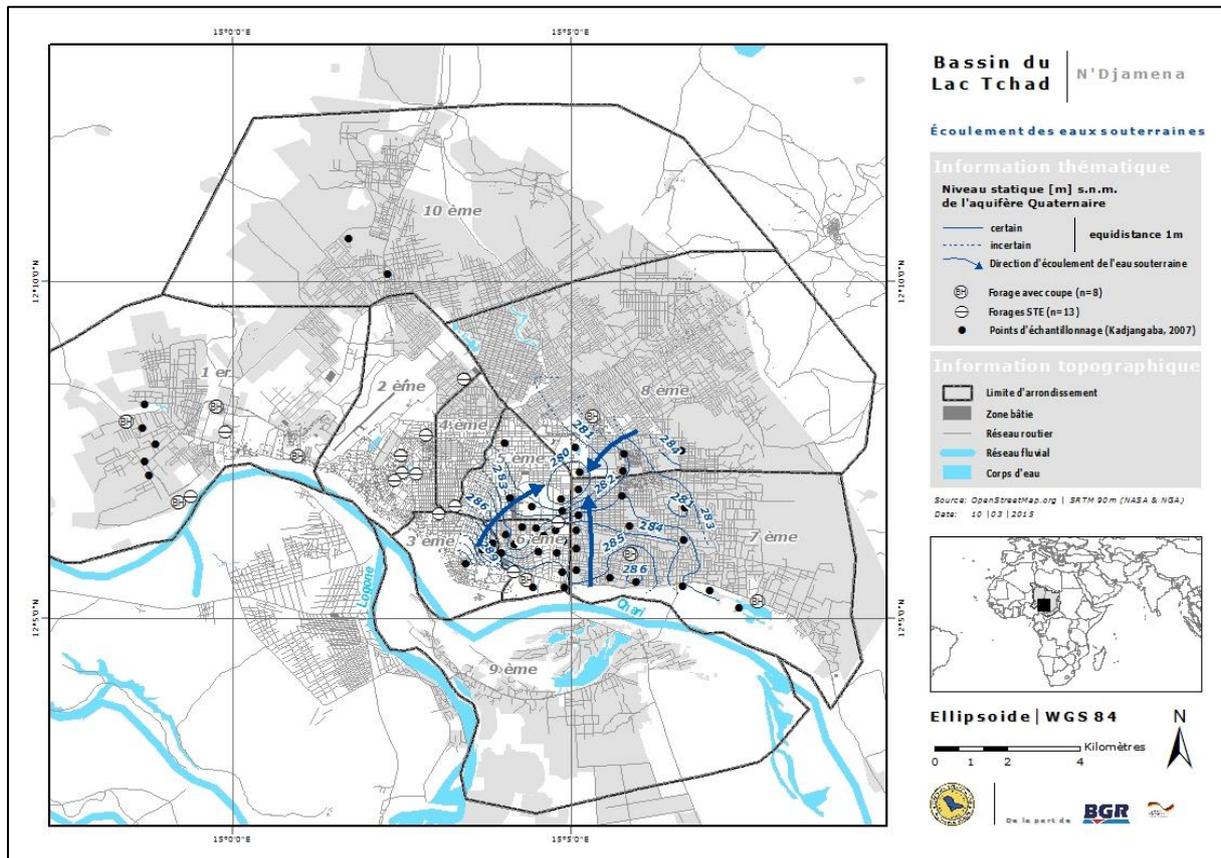


Figure 7 Ecoulement des eaux souterraines à N'Djamena créé à partir des données de niveau d'eau moyenne (2001 à 2004) (Kadjangaba, 2007).

Kadjangaba (2007) a rapporté que trois types d'eaux souterraines pourraient être détectés à N'Djamena à partir d'échantillons prélevés dans des puits ouverts et forages répartis sur la ville. La plupart des eaux souterraines est de type bicarbonaté calcique avec une conductivité électrique que varie entre 197 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1535 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et des concentrations parfois élevées de nitrate, chlorure et potassium. Le deuxième groupe est de type bicarbonaté sodique et potassique, qui a été détecté près du canal, le fleuve et quelques points arbitraires répartis sur la zone de la ville. Ils montrent une conductivité électrique entre 172 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 2450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de sorte que la majorité des valeurs élevées sont détectées dans les puits ouverts. La conductivité électrique dans les forages variait entre 205 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 540 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Les valeurs de pH mesurées pour les forages varient entre 6,88 et 7,35 (Kadjangaba, 2007). Outre les contaminations de chlorure et nitrate, principalement en raison d'un système d'égout manquant et des pratiques agricoles, il a également été signalé que certains points de mesure ont montré des concentrations élevées de métaux lourds (mercure, baryum, manganèse, nickel) qui dépassent la limite suggérée par l'OMS pour l'eau potable. Ces concentrations élevées sont causées par des métaux, des tanneries, des thermomètres et des batteries, qui sont arbitrairement jetés en raison de manque des installations adéquates pour l'élimination des déchets.

4 Matériels et Méthodes

Au cours d'une campagne de 13 jours sur le terrain qui a eu lieu entre Mai et Juin 2013, 65 points d'eau ont été visités. A l'exception d'un échantillon d'eau (NDJ 38 à partir d'un puits de forage STE plus profond qui s'alimente du Pliocène supérieur) tous les échantillons correspondent à l'aquifère Quaternaire (Figure 8). Les points d'échantillonnage avec coordonnées figurent à l'Annexe 1.

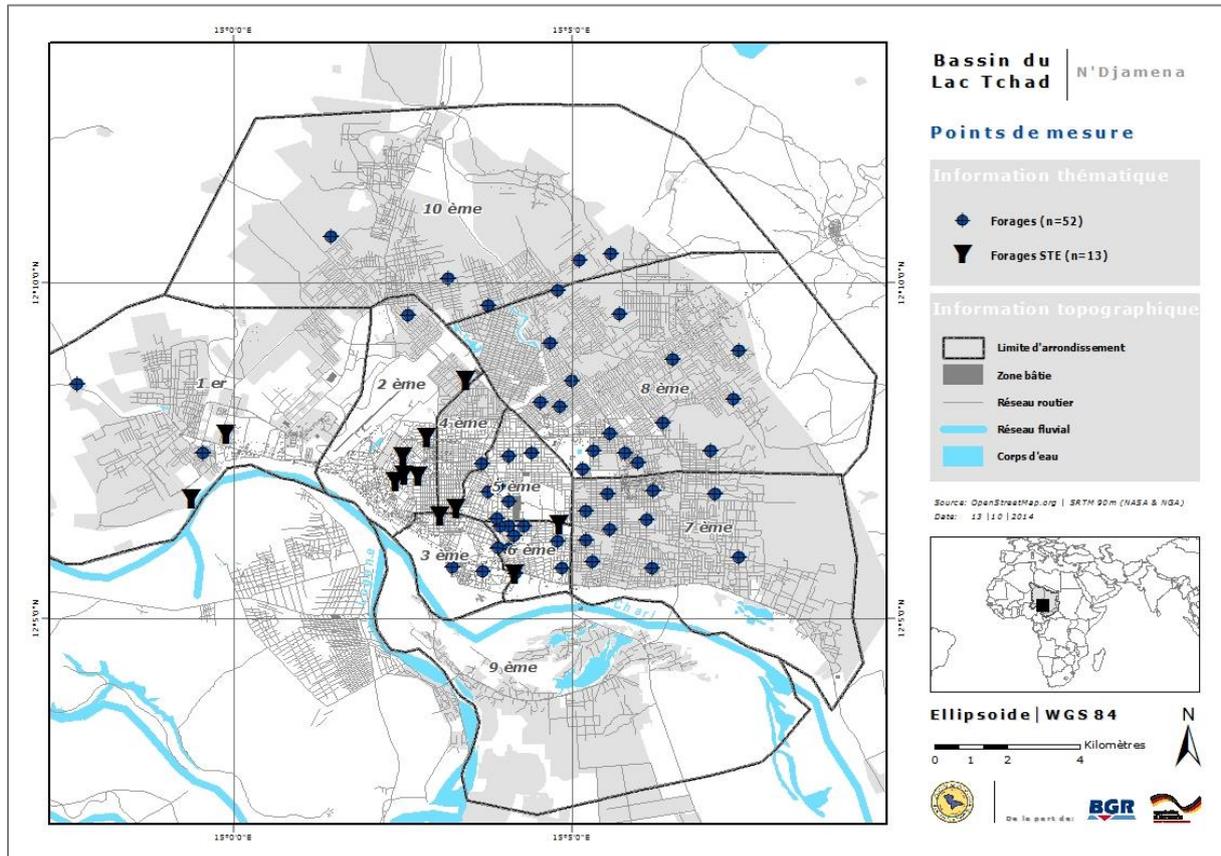


Figure 8 Lieux de prélèvement pour l'analyse microbienne et chimique de l'eau potable à N'Djamena.

4.1 Analyses Chimiques

Les échantillons pour les espèces complètes d'anions et de cations ont été pris respectivement dans des bouteilles en PET de 250 ml et 100 ml acidifiés. Des échantillons pour les isotopes stables (^{18}O) et deutérium (^2H) ont également été pris, mais leur interprétation ne fait pas partie du présent rapport. Les analyses complètes d'anion et cation et des métaux lourds ont été effectuées par le laboratoire BGR à Hanovre. Les méthodes d'analyses sont énumérées à l'Annexe 2.

Les paramètres in-situ tels que le pH, la température [$^{\circ}\text{C}$], la conductivité électrique [$\mu\text{S}/\text{cm}$], l'oxygène dissous [mg/l] et HCO_3^- [mg/l] ont été mesurés au moyen d'une cellule d'écoulement afin d'atteindre un écoulement laminaire et éviter le contact des eaux souterraines avec de l'oxygène (Figure 10). Les paramètres ont été calculés au moyen d'un appareil de titration (Figure 9) et un multi-détecteur digital (WTW-Multi 3430) (Figure 11) avec les détecteurs suivants:

- pH, température: Sentix 940
- conductivité électrique: TetraCon 925
- oxygène: FDO 925

Les coordonnées des puits et des forages de la STE ont été enregistrées par un GPS portatif.



Figure 9 Titrage in-situ des espèces de carbone inorganiques (Photo: Seeber, 2013).

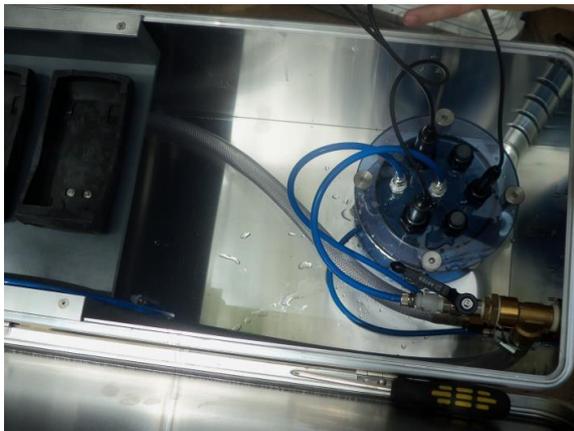


Figure 10 Cellule d'écoulement utilisé pour les mesures des paramètres in-situ (Photo: Seeber, 2013).



Figure 11 Installation de la cellule d'écoulement à un puits tubulaire à N'Djamena et mesure des paramètres in-situ avec le multi-détecteur WTW-Multi 3430 (Photo: Seeber, 2013).

4.2 Analyses Microbiennes

Le projet CBLT-BGR a fourni à la CBLT des équipements IDEXX Quanti-Tray afin d'effectuer une analyse microbienne de l'eau potable.

Pour éviter la contamination de l'équipement d'échantillonnage, des gants jetables et liquides de désinfection ont été utilisés lors de l'échantillonnage et de la préparation de l'échantillon. Tous les points de sortie d'eau ont été stérilisés par une flamme avant l'échantillonnage dans des bouteilles PET stériles de 100 ml (voir Figure 12 et Figure 13). Les bouteilles ont été analysées le même jour pour des coliformes totaux, E. coli, ainsi que des entérocoques avec Kits de tests IDEXX Colilert-18 et Enterolert dans le laboratoire de la CBLT à N'Djamena.



Figure 12 Stérilisation de l'embouchure d'un forage par une flamme avant l'échantillonnage pour analyse microbienne (Photo: Seeber, 2013).



Figure 13 Échantillonnage pour analyse microbienne dans des bouteilles stériles de 100 ml (Photo: Seeber, 2013).

4.2.1 IDEXX Colilert-18 et Système Enterolert

Le Colilert-18 détecte soit simultanément des coliformes totaux et *Escherichia Coli* ou des coliformes fécaux dans l'eau. Enterolert détecte les entérocoques, tels que *E. faecium* et *E. faecalis*. Un paquet de substrats spécifiques (Colilert-18 ou Enterolert) est ajouté à un échantillon de 100 ml d'eau et agité jusqu'à sa dissolution. Ces substrats suppriment l'apparition d'autre flore bactérienne pendant l'incubation et font que cette méthode soit plus robuste.

Lorsque les bactéries coliformes métabolisent le nutriment indicateur de Colilert-18 ONPG (o-Nitrophenyl- β -D-Galaktopyranosid) en o-Nitrophenol jaune et β -D-Galaktopyranosidrest, l'échantillon devient jaune (voir Figure 14). La substance supplémentaire MUG (4-Methylumbelliferyl- β -D-Glucuronide) présente dans le substrat ne peut être métabolisée que par *E. coli* avec β -Glukuronidase en β -D-Glucuronide et l'enzyme 4-methyl-umbelliferon fluorescente sous la lumière UV (voir Figure 15). Colilert-18 peut détecter simultanément les coliformes totaux et *E. coli* à 1 cfu/100 ml dans les 18 heures d'incubation à $35^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

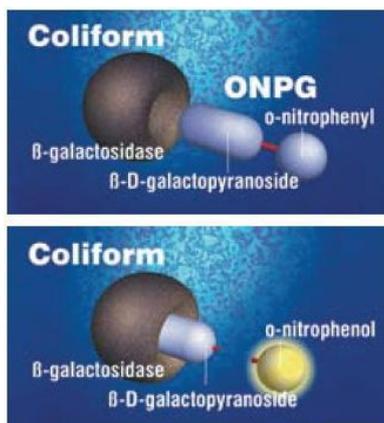


Figure 14 Principe de métabolisation du nutriment indicateur Colilert-18's par bactérie coliforme.

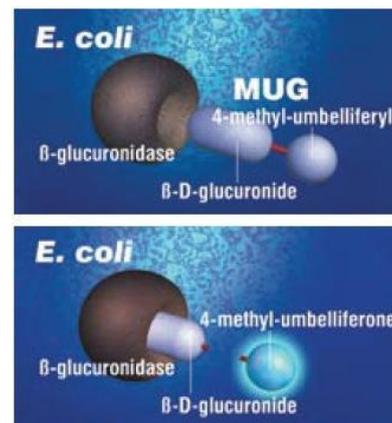


Figure 15 Principe de métabolisation du nutriment indicateur Colilert-18 par *E. coli*.

Quand les entérocoques utilisent leur enzyme β -glucosidase pour métaboliser l'indicateur de nutriment Enterolert en 4-methyl-umbelliferyl β -D-glucoside, l'échantillon est fluorescent. L'Enterolert détecte les entérocoques à 1cfu/100 ml dans les 24 heures d'incubation à $41^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

4.2.2 Procédure de quantification avec IDEXX Quanti-Tray

Pour quantifier les coliformes totaux, E. coli, et les bactéries entérocoques, le système Quanti-Tray-System IDEXX a été utilisé. Il est basé sur des sacs en plastique avec des creux qui prennent le mélange d'échantillon d'eau et du nutriment-indicateur (voir Figure 16). Après sceller les sacs en plastique (Figure 17) et l'incubation qu'en suit, les creux avec un changement de couleur ou qui fluorescent sont comptés et la quantité de coliformes totaux, E. coli ou entérocoques peut être déterminée par MPN «nombre le plus probable" suivant les valeurs données dans une table mise à disposition par IDEXX. Dépendant des creux dans le sac en plastique, on compte de 200 à 2419 dans 100 ml (Figure 18 et Figure 19).



Figure 16 Remplissage du mélange d'échantillon et substrat dans sacs en plastique Quanti-Tray.



Figure 17 Sceller le Quanti-Tray dans le Quanti-Tray Sealer avant incubation de l'échantillon.



Figure 18 Comptage des creux positifs (jaune) pour coliformes totaux et se référer à la table MPN.



Figure 19 Comptage de puits fluorescent pour E. coli and entérocoques sous lumière UV 365nm et se référer à la table MPN.

L'échantillon a besoin d'une incubation de 18/24 heures avant l'analyse. Des multiples coupures d'électricité ont eu lieu pendant l'incubation de telle sorte qu'un générateur devait être utilisé pour l'approvisionnement en électricité. Malheureusement, avec l'utilisation du générateur, il était difficile d'obtenir une température stable de l'incubateur probablement causée par la fluctuation de tension. Cette température instable pourrait avoir affecté les résultats des analyses microbiennes.

5 Résultats et Interprétation

5.1 Analyses hydrogéochimiques de l'eau

L'échantillonnage de l'eau a été effectué à 65 points. Tous les points, à l'exception d'un forage de la STE (NDJ 38), extraient l'eau de l'aquifère Quaternaire. Pour l'analyse et l'interprétation seul les eaux souterraines de l'aquifère Quaternaire ont été considérées ($n = 64$). Les mesures statistiques descriptives telles que la moyenne, minimum, maximum et l'écart type des paramètres analysés sont indiqués dans l'Annexe 3. En outre, les concentrations limites suggérées par l'Organisation Mondiale de la Santé pour l'eau potable sont répertoriées. Additionnel, deux échantillons d'eau de pluie prises en Juillet et Août 2014 à N'Djamena et un échantillon d'eau du fleuve Chari à la station N'Djamena TP (longitude 15,033° Est et latitude 12,1173° Nord), échantillonné en Septembre 2013 sont inclus dans l'interprétation. Les résultats des analyses sont présentés à l'Annexe 4.

5.1.1 Solides Dissous Totaux (TDS)

Les solides dissous totaux (TDS) indiquent la minéralisation de l'eau et incluent des sels inorganiques et petites matières organiques dissoutes dans l'eau. La sapidité de l'eau avec des valeurs de TDS de moins d'environ 1500 mg/l est généralement considérée comme bonne; l'eau potable devient de plus en plus désagréable à des niveaux supérieurs à 1500 mg/l de TDS. Bien que des valeurs TDS plus élevées ne semblent pas causer de problèmes de santé, l'OMS suggère que l'eau potable (classées comme eau douce) n'ait pas de TDS de plus de 1500 mg/l.

Dans la zone d'étude, les concentrations de TDS de l'aquifère Quaternaire varient entre 134 mg/l et 757 mg/l avec une valeur moyenne de 330 mg/l. Aucune valeur supérieure à 1500 mg/l n'a été détectée. Les points d'échantillonnage NDJ 28 et NDJ 53 situés dans Diguel (8ème arrondissement) montrent des TDS légèrement surélevées respectivement de 646 mg/l et 757 mg/l, NDJ 28 est situé à proximité d'une tranchée urbaine remplie par les ordures et les eaux usées et peut donc être influencée par cela.

Figure 20 montre que les TDS dans la zone d'étude sont bien corrélés avec du bicarbonate (HCO_3^-) ce qui signifie que les concentrations TDS sont principalement causées par cet ion.

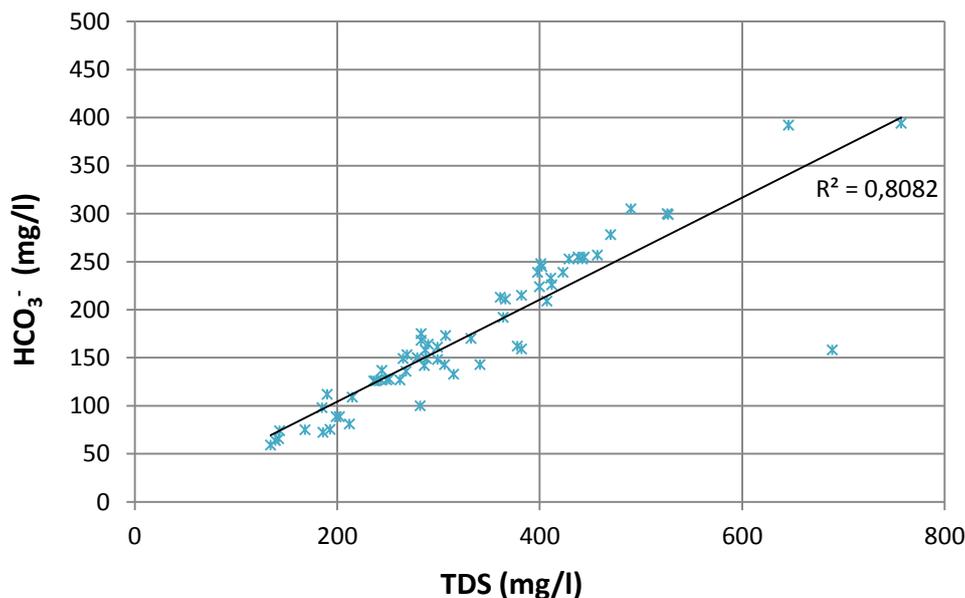


Figure 20 Corrélation de TDS avec le bicarbonate.

5.1.2 Diagramme Piper

L'hydrochimie de l'eau peut être interprétée rapidement au moyen d'un diagramme Piper (PIPER, 1944). Ce graphique permet de visualiser les grandes teneurs en cations et anions sous forme respectivement de triangles à gauche et à droite. Le rhombe au centre représente la composition totale d'anions et cations. Le diagramme permet également de classer le type d'eau.

L'eau du fleuve Chari, et par conséquent l'eau de la recharge, est de type bicarbonaté calcique et magnésique. Ceci est cohérent avec analyses d'eau de surface par Vassolo & Daira (2010).

La Figure 21 présente le diagramme Piper pour les 64 points de N'Djamena échantillons.

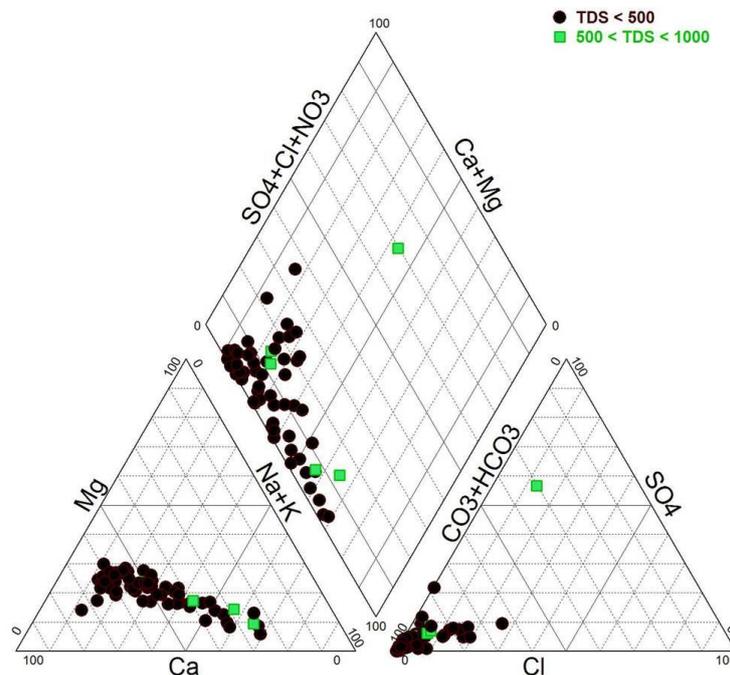


Figure 21 Diagramme Piper pour les 64 échantillons d'eau sans considérer l'anion nitrate.

La plupart des eaux souterraines à N'Djamena sont du type bicarbonaté calcique et magnésique avec une minéralisation inférieure à 500 mg/l.

Les échantillons qui présentent un remplacement de calcium et magnésium par du sodium et du potassium (NDJ 3, 6, 8, 9, 10, 11, 28, 34, 50, 53, 57, 61) sont situés principalement dans le centre de la ville aux alentours du canal décrit dans le chapitre 3.1 et confirme la conclusion de Kadjangaba (2007). On peut supposer que cette modification du type d'eau est due soit à une contamination du canal qui collecte les eaux usées des ménages et de l'industrie ou à un temps d'écoulement de l'eau souterraine plus long à partir du fleuve vers le centre de N'Djamena (où le canal est situé).

En outre, il y'a un échantillon (NDJ 64) montrant l'eau de type sulfaté-bicarbonaté sodique calcique, qui se situe dans le district de Zaraf dans la banlieue ouest de N'Djamena.

5.1.3 pH

Le pH n'a pas eu d'impact sur la santé des consommateurs. Cependant, il est un paramètre de contrôle essentiel pour de nombreuses réactions hydrochimiques. Le pH est l'un des

paramètres les plus importants de la qualité et toujours mesurée in-situ. De nombreuses réactions hydrochimiques dépendent du pH, par exemple l'équilibre chaux/acide carbonique, la dissolution des minéraux tels que le fer, le manganèse et l'aluminium, ainsi que la charge superficielle des nombreux minéraux et donc leur capacité d'absorption. Le contrôle du pH est nécessaire pour assurer la clarification et désinfection de l'eau (le pH doit être de préférence inférieur à 8 pour une désinfection efficace avec du chlore) et pour minimiser la corrosion des tuyaux (le pH ne devrait pas être inférieur à 7).

L'OMS a fixé une fourchette de validité de pH entre 6,5 et 8,5 (OMS, 2011), mais la gamme peut être étendue à 9,5 en l'absence de systèmes de distribution.

Les valeurs de pH de l'aquifère Quaternaire à N'Djamena varient de 5,7 à 7,8 avec une valeur moyenne de 7,0 (Figure 22 et Figure 23).

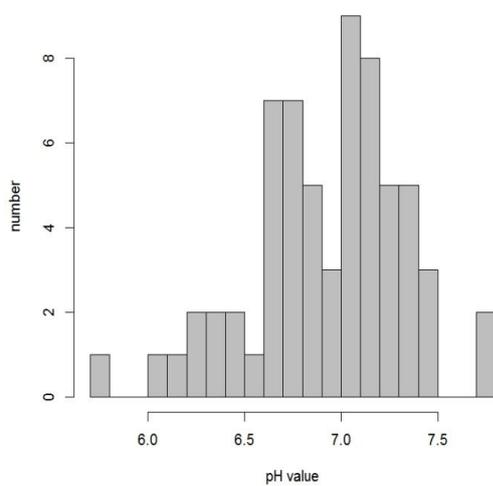


Figure 22 Histogramme des valeurs de pH détectées dans les eaux souterraines de l'aquifère quaternaire à N'Djamena 2013.

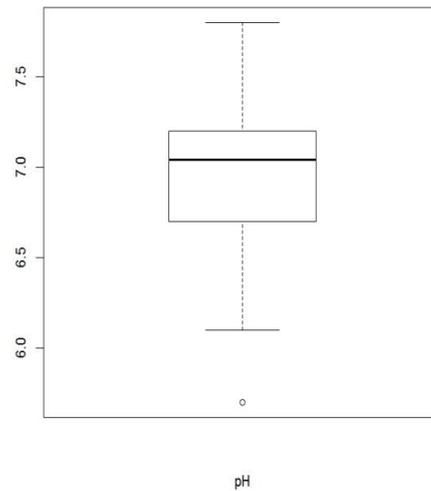


Figure 23 Box-Whisker-diagramme des valeurs de pH détectées dans l'aquifère quaternaire à N'Djamena 2013.

La répartition spatiale de pH dans la zone d'étude est présentée à la figure 24.

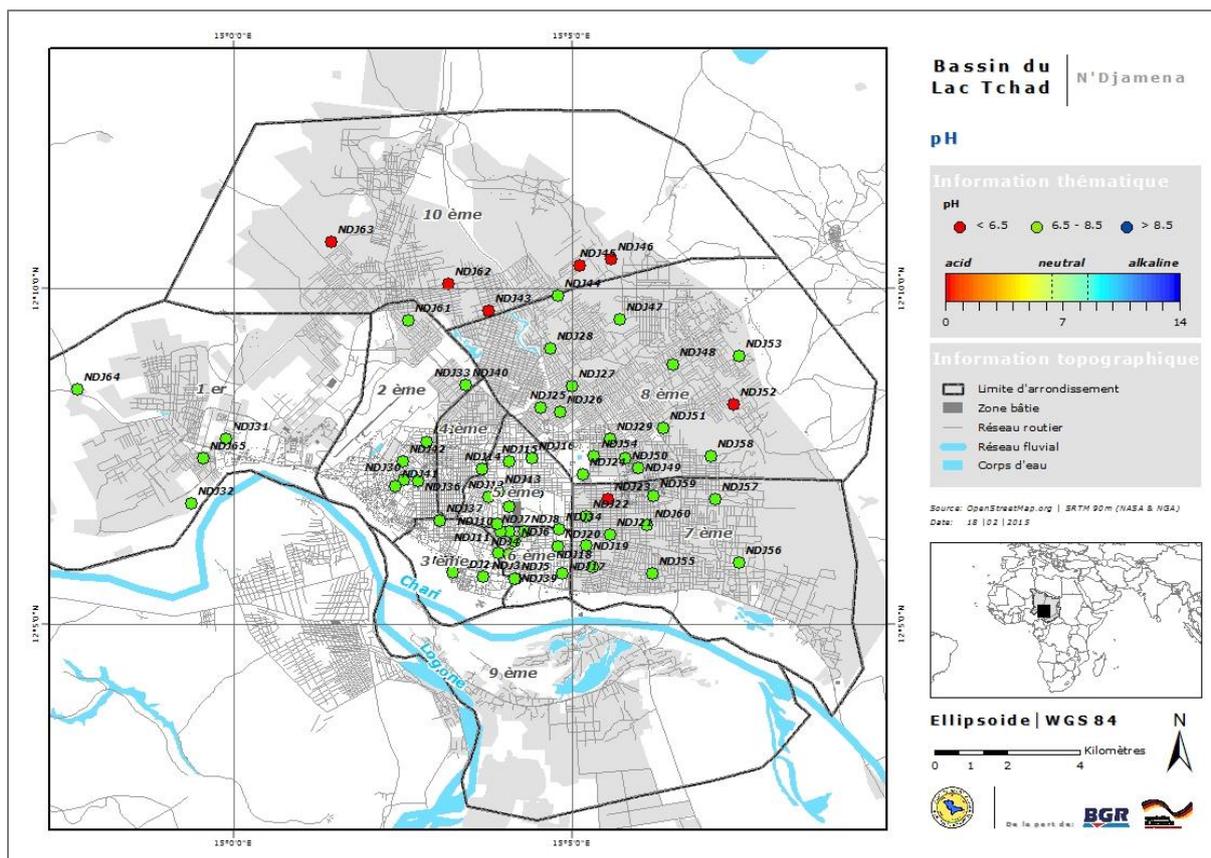


Figure 24 Distribution du pH des eaux souterraines à N'Djamena, analysée en 2013.

La majorité (86%) des valeurs de pH enregistrées sont dans la fourchette acceptable de 6,5 à 8,5. Dans sept cas (points rouges), principalement situés dans la périphérie nord de N'Djamena, le pH est inférieur à 6,5 et indique des eaux souterraines acides. Cette valeur rend les eaux souterraines plus sensibles à la mobilisation des métaux lourds à partir du sol et plus corrosif.

5.1.4 Dureté de l'eau

La dureté de l'eau est principalement causée par une teneur élevée en calcium et de magnésium. L'eau dure n'est pas nocive pour le corps humain, mais elle peut causer de graves problèmes techniques en raison de la précipitation des carbonates dans les tuyaux, les forages et les usines de traitement, et des appareils ménagers. D'autre part, l'acide carbonique agressif peut provoquer la corrosion du ciment et des matériaux métalliques dans des eaux sous-saturées en carbone. La dureté totale (GH) dans le degré de dureté allemande (°d) est mesurée en se basant sur les concentrations des sels de calcium et de magnésium avec la formule suivante:

$$GH [^\circ dGH] = (CaO + 1.4 * MgO) / 10 \quad [mg/l] \quad (F 1)$$

Les valeurs de dureté totale peuvent être classées d'après Klut-Olzewski (Langguth & Voigt, 2004) dans cinq gammes de dureté.

Table 2 Classification de l'eau dure et douce d'après Klut-Olzewski (Langguth & Voigt, 2004)

Classification	Dureté d°	mmol(eq)/l Ca ²⁺
très douce	0 < d° < 4	0 – 1,43
douce	4 < d° < 8	1,43 – 2,86
moyennement dure	8 < d° < 12	2,86 – 4,28
légèrement dure	12 < d° < 18	4,28 – 6,42
dure	18 < d° < 30	6,42 – 10,72

La Figure 25 ci-dessous montre la répartition en pourcentage de la dureté de l'eau souterraine à N'Djamena.

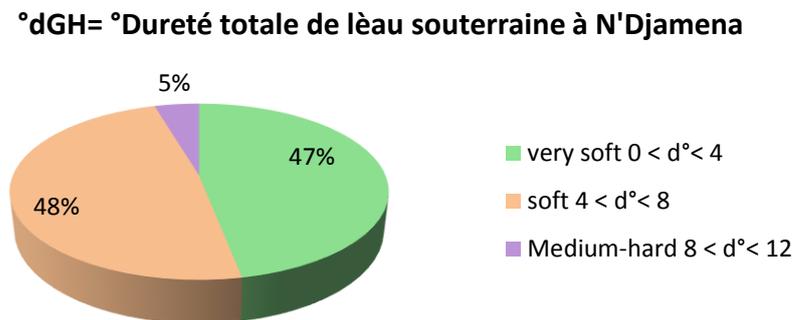


Figure 25 Le pourcentage de distribution de dureté totale des eaux souterraines (°dGH) de 64 échantillons à N'Djamena en 2013.

Plus de 90% des échantillons sont classés comme des eaux douces et très douces. Cette faible dureté de l'eau se réfère à une faible capacité tampon contre les dépôts acides

5.1.5 Composés d'azote (Nitrate/nitrite/ammoniac)

Les composés azotés nitrate, nitrite et ammoniac sont importants pour l'évaluation de l'hygiène de l'eau. Les composés azotés atteignent les eaux souterraines par l'utilisation inadéquate des engrais dans les activités agricoles et une pauvre élimination des eaux usées. L'apparition des différents composés est un bon indicateur d'un milieu d'oxydoréduction de l'eau souterraine. L'occurrence de nitrate montre des conditions réductrices d'oxygène et d'ammonium, tandis que le nitrite est un produit intermédiaire dans le processus de réduction du nitrate.

Ammoniac (NH₃ and NH₄⁺)

Le composé d'azote ammoniac qui comprend les espèces NH₃ (ammoniac) et NH₄⁺ (ammonium) sont généralement présents dans les eaux usées et les matières fécales animales. L'ammoniac est rapidement oxydé en nitrate dans des conditions aérobies. Parce que l'ammoniac ne représente pas un risque pour la santé, l'OMS n'a fixé aucune limite pour ce composé.

La répartition spatiale de la concentration d'ammonium dans la zone d'étude est présentée dans la figure 26. La concentration varie entre la limite de détection (0,001 mg/l) et 1,19 mg/l avec une valeur moyenne de 0,12 mg/l.

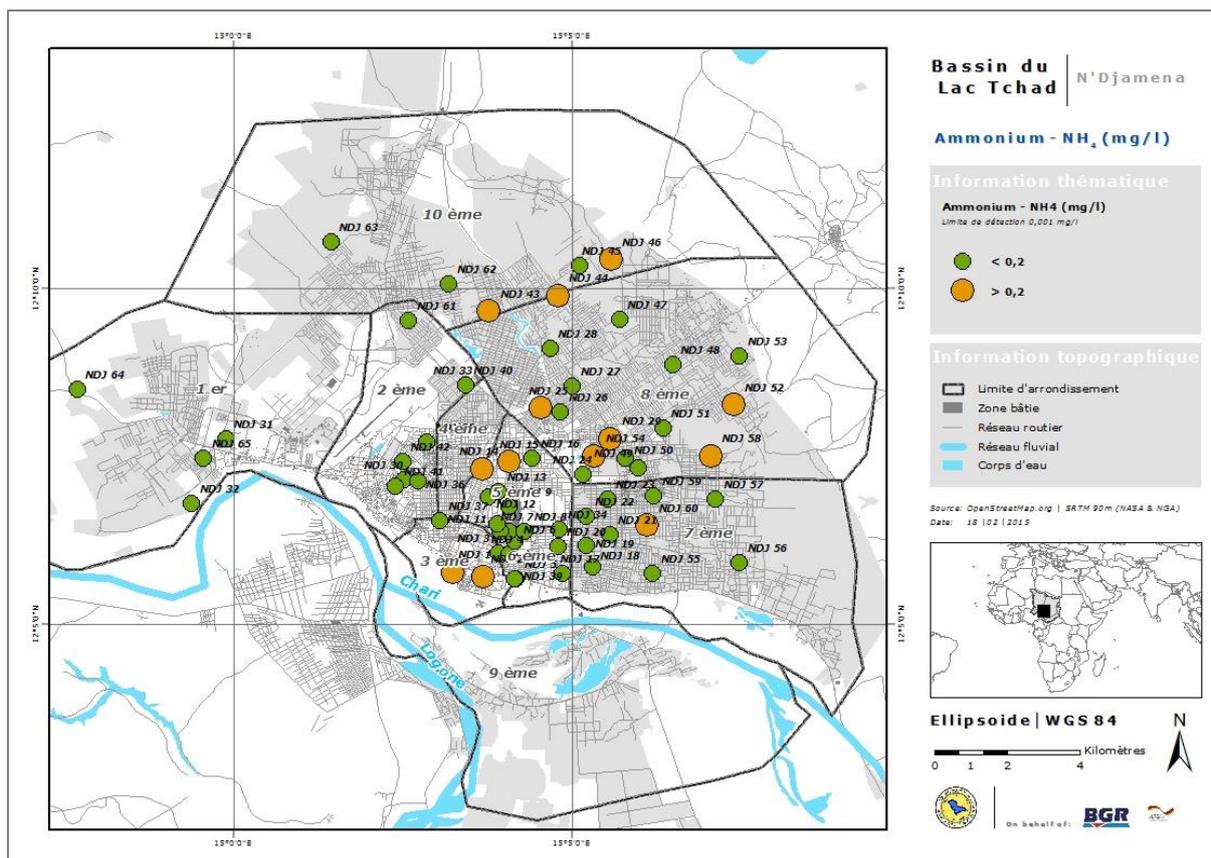


Figure 26 Distribution de l'ammoniac des eaux souterraines à N'Djamena, analysée en 2013.

Les valeurs élevées supérieures à 0,2 mg/l sont rencontrées dans 11 échantillons (17%) dispersés sur la zone d'étude, y compris deux forages dans le 3ème arrondissement, appelés Sabangali (un est situé à l'école du lycée technique), quatre à Diguel, deux à Ndjari, deux à Amtoukui, et un à Nagai. On peut supposer que ces puits sont influencés par infiltration des eaux usées en raison de latrines situés à proximité. En outre, la concentration d'ammonium élevée indique un milieu réducteur des eaux souterraines autrement l'ammonium aurait été oxydé en nitrate.

Nitrate NO_3

Naturellement, la concentration en nitrates dans les eaux souterraines est très faible et ne dépasse pas 10 mg/l (OMS, 2011 et le PNUE, 2004). Les concentrations plus élevées que les niveaux naturels sont causés par les activités humaines telles que l'agriculture, l'industrie et les effluents domestiques. Une forte concentration de nitrate est considéré comme cancérigène pour les personnes adultes, lorsque l'exposition est permanente. Il est également connu comme la cause de la soi-disant «maladie du bébé bleu», en raison d'une capacité diminuée de charge oxygène de l'hémoglobine chez les bébés qui conduit à l'asphyxie à cause du manque d'oxygène dans le sang. Par conséquent, la limite supérieure acceptée par les normes de l'OMS est fixée à 50 mg/l (exprimé en nitrate NO_3^-). Cependant, la valeur guide pour la concentration de nitrates dans la directive européenne sur l'eau potable de 1996-1998 est de 25 mg/l qui est considéré comme la valeur à partir de laquelle des mesures de protection devraient être prises (Vassolo & Daira, 2010).

La concentration en nitrates dans la zone d'étude varie entre la limite de détection et 48,3 mg/l, avec une moyenne de 5 mg/l. La Figure 27 suivante présente la répartition spatiale des concentrations de nitrates dans la zone d'étude.

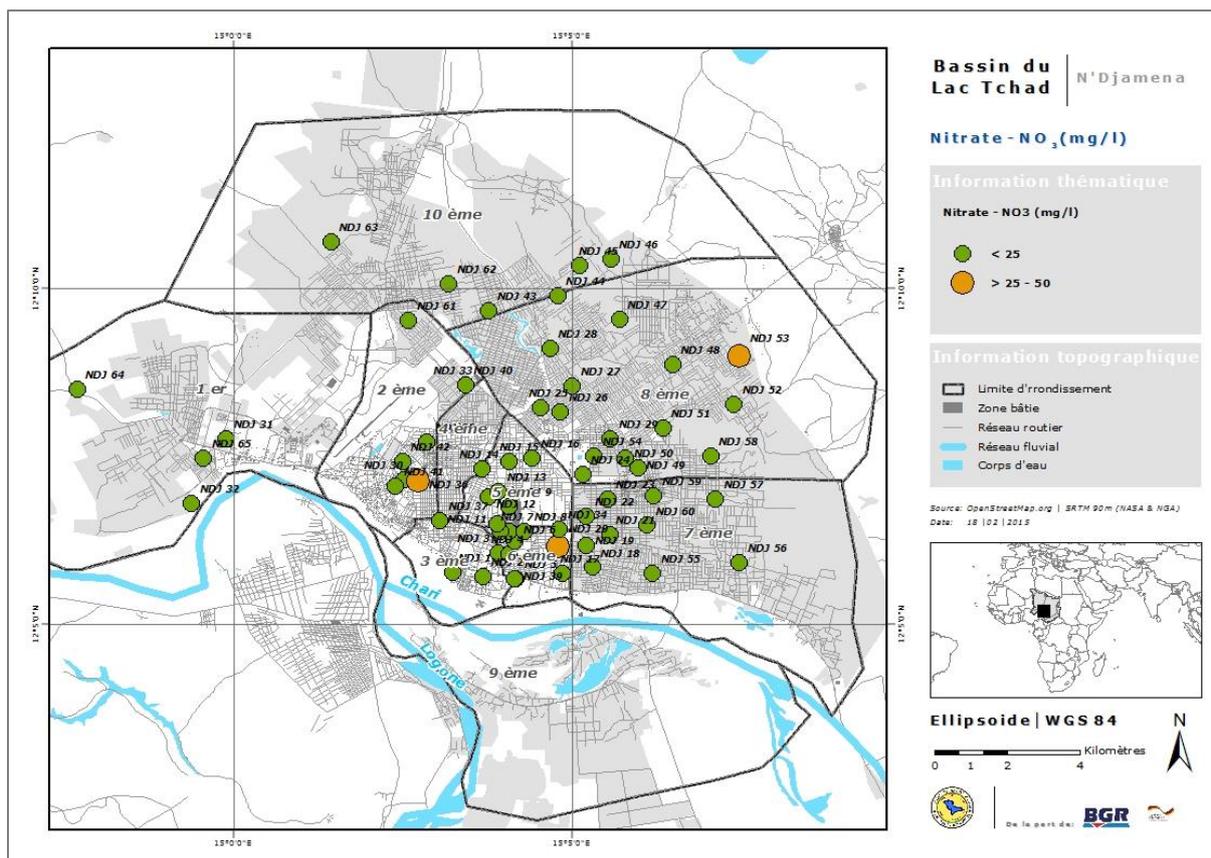


Figure 27 Distribution du nitrate des eaux souterraines à N'Djamena, analysée en 2013.

La plupart des échantillons d'eau montrent des concentrations de nitrates inférieures à la limite de l'OMS, mais dans trois cas (4,6%) des concentrations supérieures à 25 mg/l étaient mesurées. Ce sont un forage du fournisseur d'eau STE GD8 (NDJ 36) situé dans le 2ème arrondissement en N'Djamena centre, un forage à Diguel (NDJ 53) à la périphérie orientale, et un forage à Chagua (NDJ 20). La présence limitée des concentrations élevées de nitrates par rapport à des concentrations d'ammonium reflète un milieu plutôt réducteur au sein de l'aquifère

Nitrite NO₂

Comme mentionné précédemment, le nitrite apparaît en tant que produit intermédiaire dans le processus de réduction du nitrate. En ce qui concerne la santé humaine, le nitrite est 10 fois plus puissant que le nitrate par rapport à la maladie du bébé bleu. L'OMS a fixé une limite de 0,2 mg/l pour l'exposition à long terme, et 3 mg/l pour un contact à court terme.

À N'Djamena, les concentrations de nitrite de l'aquifère Quaternaire varient de la limite de détection jusqu'à 1,79 mg/l. La valeur moyenne est de 0,16 mg/l. Quinze échantillons (23,4%), dont sept appartiennent aux forages de la STE, montrent des concentrations élevées entre 0,2 et 3 mg/l.

La distribution spatiale de nitrite dans la zone d'étude est présentée à la Figure 28.

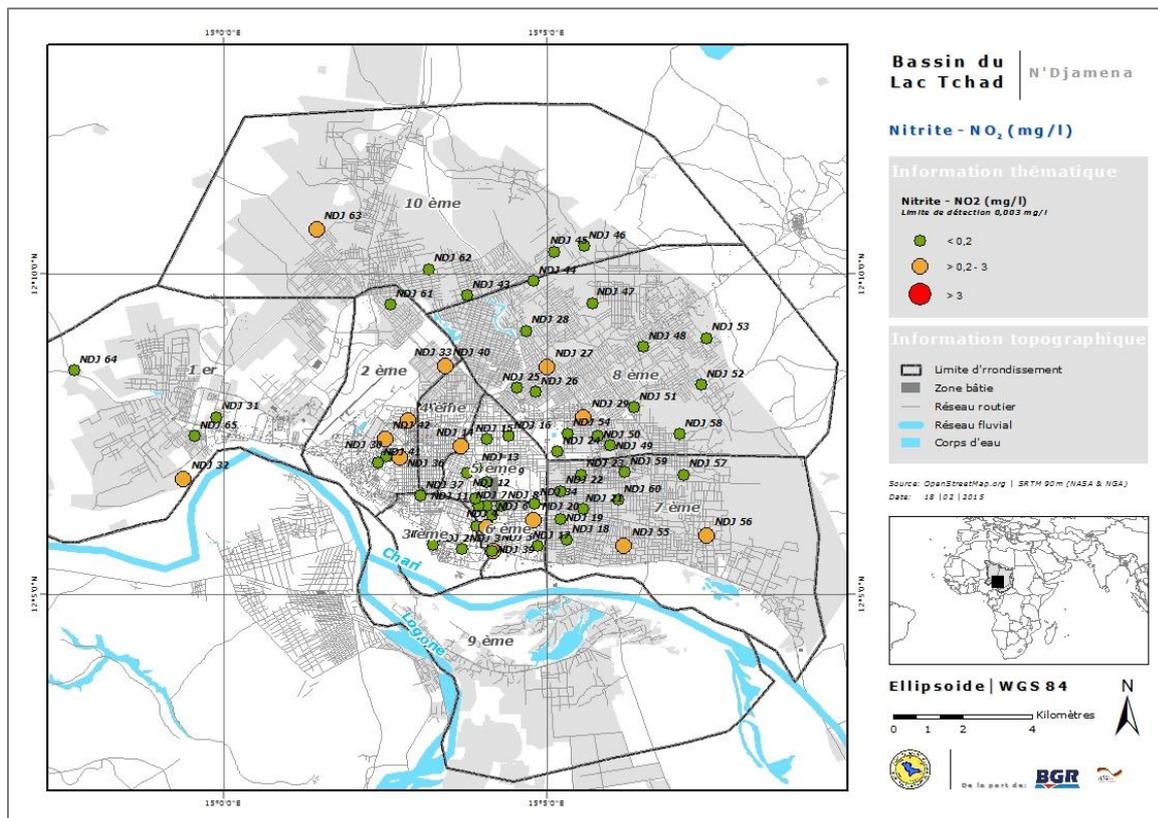


Figure 28 Distribution de nitrite des eaux souterraines à N'Djamena, analysée en 2013.

5.1.6 Métaux lourds

Un risque pour la santé en raison de la concentration élevée en métaux lourds tels que l'aluminium, l'arsenic, le plomb, le cadmium, le cuivre, le nickel et le zinc n'a pas été détecté dans l'eau potable.

En revanche, des fortes concentrations de fer (> 0,3 mg/l) et/ou de manganèse (> 0,2 mg/l) ont été détectées dans 44,6% des échantillons (Figure 29 et Figure 30). Dans une forme oxydée (Fe(III), Mn(III, IV)) du fer et du manganèse apparaissent comme des solides oxydés, mais dans les eaux souterraines avec un faible potentiel redox les oxydes sont dissous et le fer et le manganèse apparaissent sous forme soluble comme Fe²⁺ et Mn²⁺. Une fois en contact avec de l'oxygène, le fer et le manganèse sont précipités produisant une coloration brun rougeâtre, un mauvais goût de l'eau, la coloration de la lessive et le bouchage des tuyaux. Le mercure qui a été détecté dans les eaux souterraines de N'Djamena en 2003 (Kadjangaba, 2007) n'a pas été détecté au cours de cette étude.

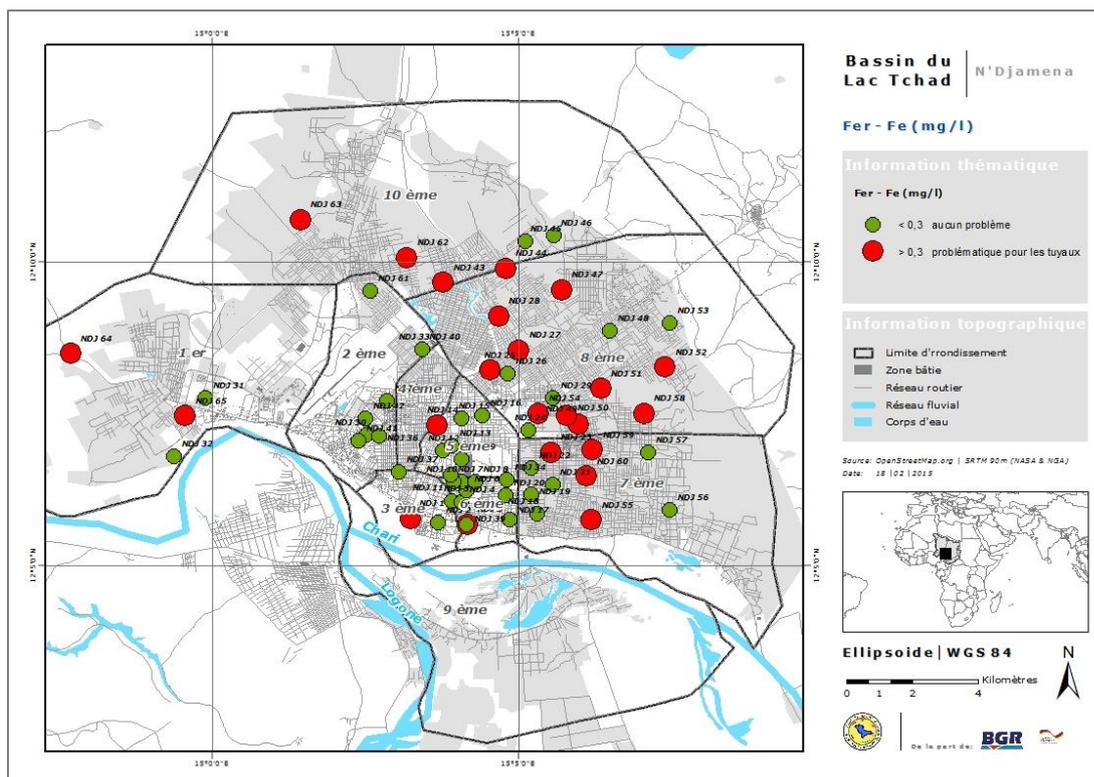


Figure 29 Distribution de fer des eaux souterraines à N'Djamena, analysée en 2013.

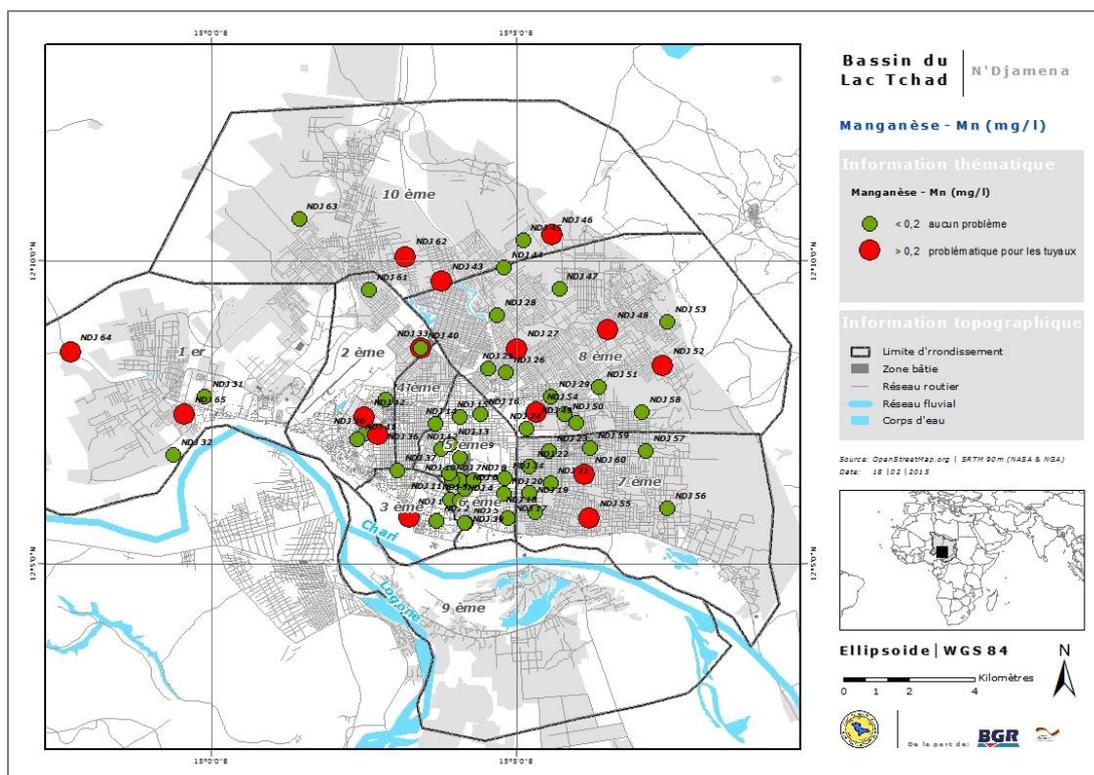


Figure 30 Distribution de manganèse des eaux souterraines à N'Djamena, analysée en 2013.

5.1.7 Sulfate

Une forte concentration de sulfate dans l'eau peut causer l'obstruction de l'appareil de chauffage (quand il vient de gypse) et d'autre part a des effets laxatifs chez les utilisateurs peu habitués. Par conséquent, l'OMS a fixé une limite de 500 mg/l dans l'eau potable.

Tous les échantillons d'eau souterraine testés, à l'exception d'un échantillon avec une concentration de sulfate de 232 mg/l dans la banlieue ouest de N'Djamena (NDJ 64), montrent plutôt une faible concentration et donc ne dépasse pas la limite de l'OMS.

5.1.8 Fluorure

Une forte concentration de fluorure dans l'eau potable peut causer un risque pour la santé en cas d'exposition à long terme. Comme il a déjà été montré dans d'autres études sur la qualité des eaux souterraines dans le bassin du lac Tchad, risque grave en raison de la concentration élevée en fluor existe dans la région (Fantong et al, 2010; Vassolo & Daira, 2012; et Vassolo et al, 2014).

La limite pour la concentration de fluorure d'eau potable recommandée par l'OMS de 1,5 mg/l n'a pas été dépassée, mais 23 échantillons (40%) montrent des concentrations élevées de fluorure supérieures à 0,5 mg/l qui peut causer la fluorose dentaire sous une exposition à long terme. La répartition de fluorure dans la zone d'étude est présentée à la figure 31.

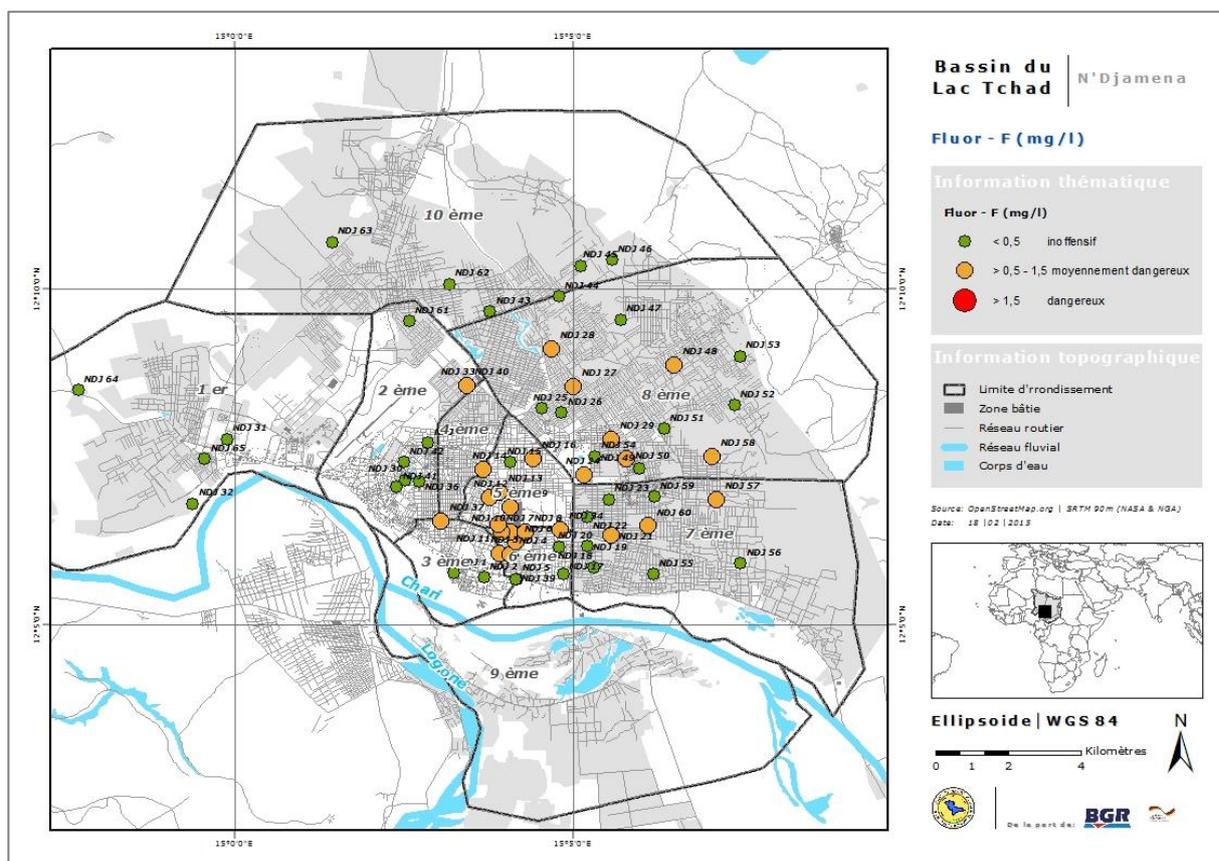


Figure 31 Distribution de fluorure dans les eaux souterraines à N'Djamena, analysée en 2013.

5.2 Microbiologie

5.2.1 Coliformes totaux et E. coli

Trente-sept forages sur un total de 52 testés (71%) étaient contaminés par des coliformes totaux, ce qui indique une contamination par des matières fécales humaines et animales (voir Figure 32). Étant donné que certaines bactéries coliformes proviennent aussi d'autres sources, E. coli est un meilleur indicateur de la pollution des points d'eau potable avec les matières fécales humaines et animales. Sur les 52 points d'eau, cinq (9,6%) montrent la présence d'E. coli (Figure 33).

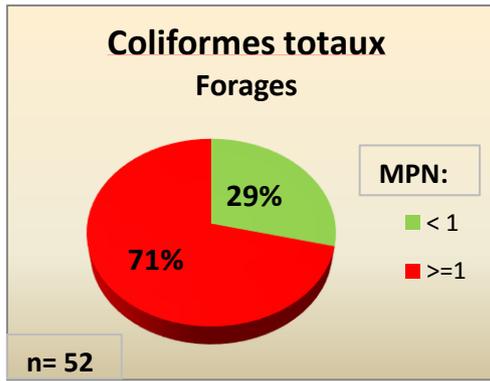


Figure 32 Diagramme circulaire avec la proportion de coliformes totaux détectés dans 52 forages à N'Djamena.

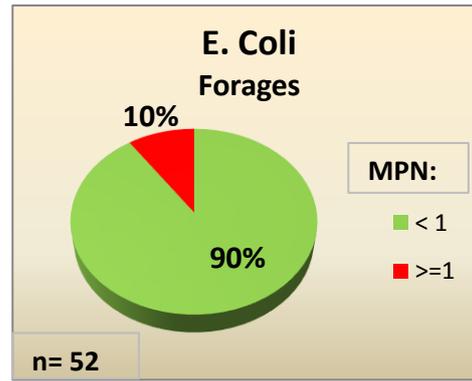


Figure 33 Diagramme circulaire avec la proportion d'E. coli détectée dans 52 forages à N'Djamena.

Des 13 puits d'eau potable testé de la STE le fournisseur d'eau, quatre puits (31%) indiquent la présence de coliformes totaux (figure 34) et un puits (8%) montre également la présence d'E. coli (Figure 35).

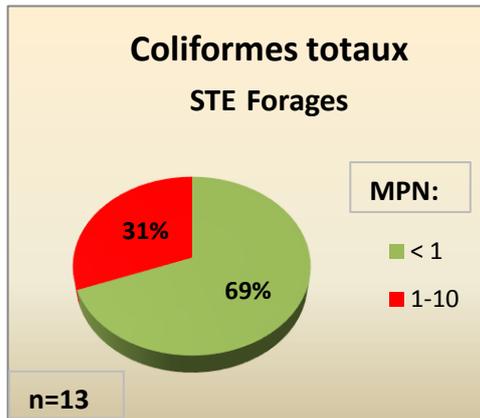


Figure 34 Diagramme circulaire avec la proportion de coliformes totaux détectés dans l'eau brute de 13 forages de la STE.

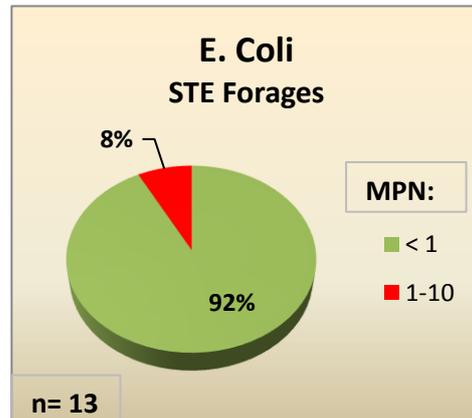


Figure 35 Diagramme circulaire avec la proportion d'E. coli détecté dans l'eau brute de 13 forages de la STE.

5.2.2 Entérocoques

Un total de 22 forages sur 52 (42%) a montré la présence d'entérocoques, qui est un indicateur clair pour la contamination de matières fécales humaines et animales (Figure 36). Dès 13 forages de la STE testés, trois (23%) montrent la présence d'entérocoques (Figure 37).

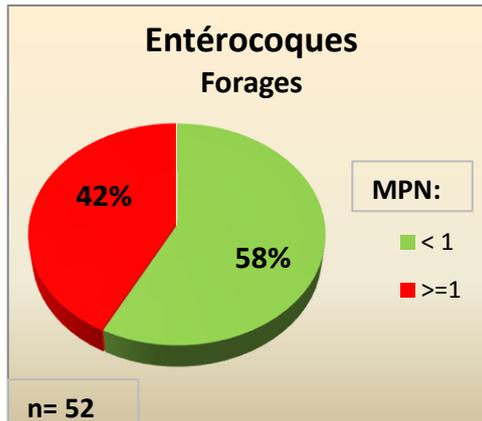


Figure 36 Diagramme avec la proportion des entérocoques détectés dans 52 forages à N'Djamena.

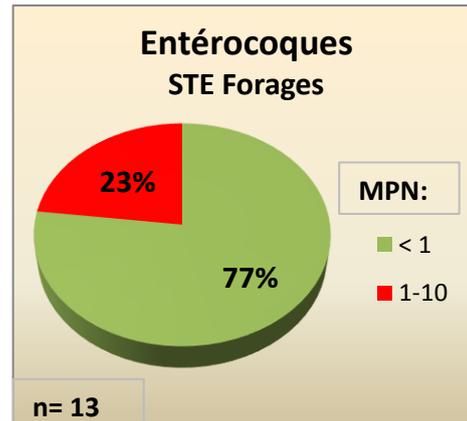


Figure 37 Diagramme avec la proportion des entérocoques détectés dans 13 forages de la STE à N'Djamena.

En général, la teneur en entérocoques était supérieure à celle des E. coli. On peut l'expliquer par le fait que les entérocoques sont plus résistantes à une large gamme de conditions environnementales que E. coli (Byappanahalli et al., 2012).

La Figure 38 ci-dessous montre la répartition spatiale de la contamination par des coliformes totaux et/ou bactéries fécales à N'Djamena.

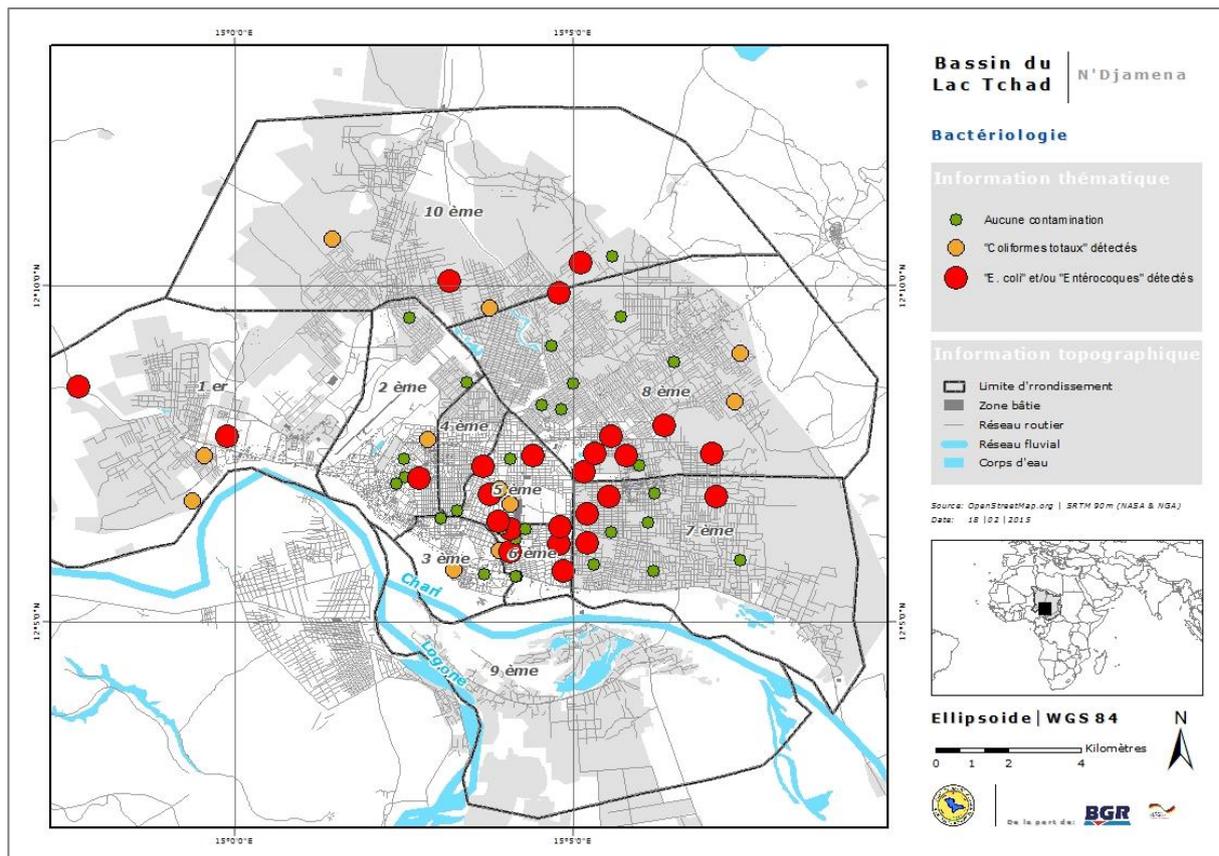


Figure 38 Carte révélant la détection des coliformes totaux, E. coli et entérocoques à N'Djamena.

La Figure 38 montre que la contamination des forages par des bactéries fécales apparaît dispersée sur la zone de la ville. Dans l'ensemble, 21 des 52 forages (40%) équipés de pompes à main classées par le JMP comme sources améliorées sont contaminées par des bactéries fécales (E. coli et/ou entérocoques). En outre, trois des 13 (23%) forages de la STE contiennent des bactéries fécales. Il est supposé que la contamination de la nappe phréatique

à N'Djamena par E. coli et entérocoques est due à la pollution directe des points d'eau. Les raisons sont soit l'infiltration des eaux usées provenant des latrines situées à proximité ou le drainage des eaux grises, la mauvaise construction des forages (fuites), l'application de fumier sur les terres agricoles à proximité du forage, et les fuites d'eau de surface contaminée (par exemple, à proximité du canal ou des fosses à ordures) (voir Figure 39 à Figure 44).

Il doit être mentionné que la présence de coliformes totaux, E. coli et entérocoques est déterminé sur la base d'une campagne d'échantillonnage unique. Afin d'identifier une contamination systématique de l'aquifère Quaternaire de N'Djamena, les points d'eau doivent être échantillonnés à plusieurs reprises et à différentes saisons.



Figure 39 Forage non-protégé Milezi (NDJ 32) de la STE, où des coliformes totaux ont été détectés. La flèche rouge indique une activité agricole à proximité du forage.



Figure 40 Forage non-protégé GD 8 (NDJ 36) de la STE, où E. coli et entérocoque ont été détectés.



Figure 41 Forage (NDJ 60) près d'une fosse à ordures avec une détection positive des coliformes totaux.



Figure 42 Forage (NDJ 4) à Moursal à proximité des ménages avec drainage des eaux grises fortement contaminées par les bactéries fécales.



Figure 43 Forage (NDJ 24) à Ndjari contaminé par bactéries fécales.



Figure 44 Forage (NDJ 19) dans une cour privée à Chagua avec détection positive d'entérocoques.

6 Conclusions et Recommandations

Les résultats de cette étude montrent que 37% des 65 points d'eau testés à N'Djamena, sont contaminés par des bactéries fécales. La contamination a été détectée dans trois forages appartenant à la STE et dans 21 forages équipés de pompes à main. Les forages équipés de pompes manuelles fournissent 70% de la population de N'Djamena avec l'eau potable.

En outre, certains échantillons présentent des concentrations élevées d'ammonium (17%), de nitrate (4,6%) ou de nitrite (23%). Les deux derniers peuvent causer la mort par asphyxie chez les nourrissons et sont cancérigènes par l'exposition à long terme. L'ammonium n'est pas dangereux pour la santé humaine, mais peut être rapidement oxydé en nitrate dans des conditions oxygénées.

Une forte concentration de fluorure dans l'eau potable est un autre risque pour la santé en cas d'exposition à long terme. Dans N'Djamena 40% des échantillons présentent une concentration de fluorure élevée au-dessus de 0,5 mg/l, ce qui peut causer la fluorose dentaire par l'exposition à long terme.

La définition de la source d'eau améliorée par le JMP est basée sur l'hypothèse que certaines technologies, en raison de la nature de leur construction, sont plus capables de protéger la source de contamination extérieure. Toutefois, l'étude a montré que cette classification est incomplète. Le type d'accès à l'eau souterraine utilisé ne précise pas si la source d'eau est «sûr». D'autres aspects tels que la construction du forage et sa (protection)-gestion concernant le contexte géologique et hydrogéologique (inspection sanitaire) doivent être pris en compte lors de la définition d'un accès «sûr» à l'eau potable. De plus, si possible, la qualité de l'eau selon les normes de l'OMS devrait être contrôlée régulièrement.

Il est recommandé que la CBLT informe les autorités tchadiennes et la population sur les résultats de ce rapport. Des programmes d'intervention devraient être mis en œuvre visant à prévenir et à résoudre les problèmes de qualité de l'eau de consommation. Des mesures telles que l'amélioration de la construction de la tête de forage, la gestion de l'infrastructure, l'établissement et le contrôle des zones de protection pour chaque forage, amélioration de l'assainissement et de l'hygiène, et le traitement de l'eau domestique (instruction sur comment bouillir, désinfecter, et filtrer l'eau) avant la consommation devraient être introduites.

Cette étude a été basée sur une campagne d'échantillonnage unique. Afin d'identifier une contamination systématique de l'aquifère Quaternaire de N'Djamena, les points d'eau doivent être échantillonnés à plusieurs reprises et à différentes saisons, en particulier pendant et après la saison des pluies. Les précipitations peuvent augmenter la contamination microbienne dans les eaux de source et les épidémies d'origine hydrique sont souvent détectées après la pluie (OMS, 2011).

En outre, il est recommandé d'inclure l'eau du robinet dans l'échantillonnage pour la comparaison avec les forages.

8 Références

- ABDEL-NASSIR CHERIF, D. 2012. Profil Pays: Tchad (Préparé pour la Réunion de haut niveau 2012 d'Assainissement et eau pour tous). N'Djamena, Tchad : MHUR.
- ASHBOLT, N. J., GRABOW, W.O.K. et SNOZZI, M. 2001. Indicators of microbial water quality. Chapter 13. [auteur du livre] WHO. Water quality: Guidelines, standards and health. Assessment of risk and risk management for water-related infectious disease. s.l. : IWA Publishing.
- BRGM. 1988. Etude de la vulnérabilité des nappes aquifères superficielles de N'Djaména (Tchad) et recommandations pour les aménagements.
- DAIRA, D. 2000. Etude de la recharge de la nappe du Chari Baguirmi (Tchad) par les méthodes chimiques et isotopiques. Thèse de doctorat. Université d'Avignon.
- FANTONG, W. Y, et al. 2010. Geochemical provenance and spatial distribution of fluoride in groundwater of Mayo Tsanaga River Basin, Far North Region, Cameroon: implications for incidence of fluorosis and optimal consumption dose. *Environ Geochem Health*, 32, 147-163.
- FLINT, K.P. 1987. The long-term survival of Escherichia Coli in river water. *Journal of Applied Bacteriology*, 63, 261-270.
- KADJANGABA, Edith. 2007. Étude hydrochimique et isotopique du système zone non-saturée - nappe dans la zone urbaine de N'Djamena. Impact de la pollution. Thèse de doctorate. Université d'Avignon.
- KUSHNIR, I. 1993. Géologie, ressources minérales et ressources en eau au Tchad. Travaux et documents scientifiques du Tchad. Connaissance du Tchad I., 100 p.
- LANGGUTH, H.-R. and VOIGT, R. 2004. Hydrogeologische Methoden, 2. Auflage. Springer.
- MFE. 2009. Ministry for Environment. Manatu Mo Te Taiao. [En ligne] Ministry for Environment Wellington, New Zealand, 8 10 2009. <http://www.mfe.govt.nz/>.
- SCHNEIDER, J.L and WOLFF, J.P. 1992. Carte Géologique et Carte Hydrogéologique 1/1500000 de la république du Tchad Memoire Explicatif Vol. 2. BRGM. FRANCE.N° 209.
- STE. 2013. Information Sheet distributed by Société Tchadien d'Eaux (STE). N'Djamena.
- UNEP, DEWA -. 2004. Freshwater in Europe - Facts, Figures and Maps. Geneva : DEWA - UNEP.
- VASSOLO, S et DAIRA, D. 2010. Lake Chad Sustainable Water Management - Project Activity Report No 3. BGR. Hannover.
- VASSOLO, S, SEEBER, K. et WILCZOK, C. 2014. Groundwater Quality Investigations in the Kanem and Bahr el Ghazal Regions, Chad. - Technical Report No 8 - LCBC-BGR project. BGR. Hannover.
- VASSOLO, S. et DAIRA, D. 2012. Water Quality in the Chadian Part of the Lake Chad Basin - Project Report No 4. BGR. Hannover.
- WHO and UNICEF. 2006. Core questions on drinking-water and sanitation for household surveys. Geneva.
- WHO 2011. Guidelines for Drinking Water Quality. Fourth edition.
- WHO 2011. Nitrate and Nitrite in drinking water - Background document for development of WHO Guidelines for Drinking Water.

Annexe 1 Points d'eau échantillonnés

ID	District	X	Y	Conductivité électrique in-situ (µS/cm)	Température in-situ (°C)	pH in-situ
NDJ1	Sabangali1	15.0538	12.0962	251	30.1	6.77
NDJ2	Sabangali LyceeTechnique	15.0613	12.0951	239	31.2	7.4
NDJ3	Ardep Djournal	15.0652	12.101	248	32	7.5
NDJ4	Moursal	15.0679	12.1007	364	30.8	6.8
NDJ5	Sabangali 2	15.0693	12.0947	161.9	30.6	6.9
NDJ6	ParisCongo1	15.0691	12.104	186.8	30.9	7.4
NDJ7	ParisCongo 2	15.0679	12.1063	219	30.9	7.2
NDJ8	ParisCongo 3	15.0717	12.1063	186.9	30.6	7.1
NDJ9	Champ de fille	15.068	12.1125	211	31	7.3
NDJ10	Paris Congo 4	15.0656	12.1063	255	31.3	7.2
NDJ11	Ridina1	15.0649	12.1082	287	31	7.3
NDJ12	Ridina 2	15.0627	12.1148	383	30.7	7.1
NDJ13	Amriguebe Ecole Coranique	15.0651	12.1161	404	31.4	7.1
NDJ14	Nagail	15.0611	12.1219	467	30.5	6.7
NDJ15	Amriguebe Lycee Sanauia Allmi	15.0677	12.1236	459	31.1	7.2
NDJ16	Amriguebe Mosquée	15.0734	12.1246	461	31	7
NDJ17	Chagua 1	15.0809	12.0959	181.9	29.5	7.8
NDJ18	Chagua Ecole Primaire	15.0883	12.0976	261	30.9	7.5
NDJ19	Chagua 2	15.0868	12.1029	267	31.5	7.4
NDJ20	Chagua 3	15.0799	12.1027	320	31.6	7.8
NDJ21	Dembé 1	15.0926	12.1055	125	31.4	6.8
NDJ22	Dembé 2	15.0868	12.1102	271	31.5	7.1
NDJ23	Dembé 3	15.0921	12.1144	102.7	31.2	6.3
NDJ24	Ndjari	15.0859	12.1205	416	31.8	7.3
NDJ25	Diguel 1	15.0757	12.1371	437	29.8	6.6
NDJ26	Diguel Est 1	15.0805	12.1359	377	28.1	6.7
NDJ27	Diguel 2	15.0834	12.1426	404	30.9	6.7
NDJ28	Diguel Nord	15.0779	12.1519	636	31.2	7.2
NDJ29	Diguel Est 2	15.0928	12.1294	226	30.5	7.4
NDJ30	Station STE Forage GDB	15.0418	12.1192	346	29.7	6.8
NDJ31	Station STE Forage GD21	14.998	12.1294	219	32.6	6.8
NDJ32	Station STE Forage Milezi	14.9896	12.1134	216	28.3	7.3
NDJ33	Station STE GD26A	15.057	12.1426	544	30.3	6.9
NDJ34	Station STE GD25A	15.0802	12.107	361	31.3	7.5
NDJ35	Station STE Jumele	15.0476	12.1285	395	29.9	6.7
NDJ36	Station STE GD8	15.0453	12.1189	402	30.7	7.2
NDJ37	Station STE Marche Central	15.0508	12.109	404	30.1	7.2
NDJ39	Station STE GD22A	15.0692	12.0947	229	34.6	7.3
NDJ40	Station STE GD23	15.057	12.1426	546	31.3	7.1
NDJ41	Station STE Beguinage	15.0399	12.1175	297	29.4	6.9
NDJ42	Station STE GD1	15.0415	12.1236	298	30.3	6.9
NDJ43	Diguel Gozator	15.0629	12.1611	335	33	6.18

ID	District	X	Y	Conductivité électrique in-situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Température in-situ ($^{\circ}\text{C}$)	pH in-situ
NDJ44	Diguel Ngabo4	15.0798	12.1649	412	32.8	7.14
NDJ45	Diguel Ngabo3	15.0853	12.1725	233	33.8	6.3
NDJ46	Diguel Ngabo1	15.0928	12.1739	246	32	6.32
NDJ47	Diguel Ngabo2	15.095	12.1591	391	30.9	6.8
NDJ48	Ndjari Darassalam 5	15.1081	12.1477	474	33	7.08
NDJ49	Ndjari 1	15.0996	12.1222	124	31.3	6.5
NDJ50	Ndjari 2	15.0965	12.1246	152	30.7	6.9
NDJ51	Ndjari Darassalam4	15.1057	12.1319	260	33.2	6.7
NDJ52	Ndjari Darassalam4	15.1232	12.1378	373	31.3	6.4
NDJ53	Diguel Koudou	15.1245	12.1501	772	33	7.2
NDJ54	Ndjari 3	15.0888	12.1251	378	31.8	7.09
NDJ55	Abena	15.1031	12.0959	126.5	31.6	6.7
NDJ56	Atron	15.1246	12.0986	202	31	7.4
NDJ57	Amtoukoui	15.1186	12.1144	254	31	7.1
NDJ58	Amtoukoui	15.1175	12.125	444	30.4	7.1
NDJ59	Lycee Amtoukoui	15.1034	12.1151	121.5	32.2	6.5
NDJ60	Amtoukoui	15.1019	12.1078	109.7	31.8	6.7
NDJ61	Goudji	15.043	12.1587	241	31.3	6.8
NDJ62	Goudji	15.0529	12.1679	179.7	30.9	5.7
NDJ63	Amsemene	15.0239	12.1784	186.5	32.5	6.1
NDJ64	Zaraf	14.9614	12.1416	814	32.4	7
NDJ65	Farcha	14.9926	12.1245	344	32.2	7

Annexe 2 Méthodes d'analyses

Méthodes analytiques du Laboratoire de BGR B 2.3, Hanovre (02.2011)				
Nombre	Méthode Analytique	Producteur/Type d'instrument	Paramètres	Standards utilisés
1	Titration automatique	SCHOTT Titroline alpha plus	HCO ₃ , CO ₃ , OH	
2	Photomètre	UNICAM UV 300	NH ₄	DIN 38406-5
3	Ion chromatographie (IC)	DIONEX ICS - 3000	F, Cl, NO ₂ , Br, NO ₃ , SO ₄	EN ISO 10304-4
4	ICP-OES	SPECTRO Ciros CCD	K, Na, Mg, Ca, Cl, SO ₄ , Br, PO ₄ , Fe, Mn, Al, As, BO ₂ , Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Ni, Pb, Sc, SiO ₂ , Sr, Ti, V, Zn	DIN EN ISO 11885
5	TOC/TIC/TNb-Analyseur	ELEMENTAR TOCII élevé	TIC, TOC (NPOCLD), DOC, TNb	EN 1484 DIN 38409 H3 ISO 8245 EPA 415.1

Annexe 3 Statistique des données hydrogéochimique et physiques

Paramètre	Unité	Limite OMS	Concentration minimale mg/l	Concentration maximale mg/l	Concentration moyenne mg/l	Écart type
pH			5,7	7,8	7	0,4
EC	µS/cm		103	814	316	147
T	°C		28,1	34,6	31,2	1
K ⁺	mg/l		2	10,7	5,12	2
Na ⁺	mg/l		3,4	119	20,65	20
Mg ²⁺	mg/l		1,5	17,8	7,93	4
Ca ²⁺	mg/l		8,11	66,6	31,38	15
Cl ⁻	mg/l		0,022	39,2	5,51	8
SO ₄ ²⁻	mg/l		0,031	232	9,93	29
HCO ₃ ⁻	mg/l		59	394	173	76
NO ₃ ⁻	mg/l	50	DL	48,30	4,64	10
NH ₄	mg/l		DL	1,19	0,14	0
NO ₂ ⁻	mg/l	3	DL	1,79	0,16	0
PO ₄ ²⁻	mg/l		0,03	0,82	0,16	0
F ⁻	mg/l	1,5	0,016	1,210	0,490	0
Fe(II)	mg/l		0,003	7,86	0,73	1,30
Al ²⁺	mg/l	0,9	DL	0,049	0,007	0
Mn	mg/l		0,001	0,618	0,114	0,200
Cu	mg/l	0,2	DL	0,021	0,001	0
Br-	mg/l		DL	0,221	0,020	0,030
As	mg/l	0,01	DL	DL	DL	
Sr	mg/l		0,082	0,602	0,289	0,149
Cd	mg/l	0,003	DL	DL	DL	
Ni	mg/l	0,07	DL	0,006	0,000	0,001
Pb	mg/l	0,01	DL	DL	DL	
Ba	mg/l	0,7	0,030	0,446	0,167	0,098

NOTE: DL = Limite de détection

