

Projet AGES – Appui à l’Autorité du Bassin du
Fleuve Niger pour la Gestion des Eaux
Souterraines

Caractérisation des eaux souterraines de la région de Niamey, Niger



Rapport N° 2

Niamey, Mai 2015



Autorité du Bassin du Fleuve Niger (ABN)

BGR Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe


coopération
allemande
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Auteur: Sara Vassolo, Philip Schuler, Abdou Guero, Sanoussi Rabé,
Maimouna Mounkaila, Sven Menge

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

Projet: Appui à l'ABN pour la Gestion des Eaux Souterraines (AGES)

BMZ-N°: 2009.2470.4

BGR-N°: 05-2346

BGR-Archive N°:

ELVIS-lien:

Date: Mai 2015

Table de matières

1.	Justification et objectifs.....	1
2.	Situation	2
2.1	Situation géographique et topographique.....	2
2.2	Situation climatique	3
2.3	Régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey.....	4
2.4	Géologie.....	5
2.5	Hydrogéologie.....	9
3.	Méthodologie	10
3.1	Inventaire des points d'eau et sélection d'un réseau piézométrique	10
3.2.	Types de points d'eau	10
3.3.	Définition du réseau piézométrique	11
3.4.	Réhabilitation des forages et élargissement du réseau piézométrique	13
3.5.	Pompages d'essai.....	15
3.6	Campagnes de suivi trimestrielles.....	16
4.	Résultats	17
4.1.	Niveau statique	17
4.2.	Paramètres physico-chimiques	24
4.3.	Paramètres bactériologiques.....	39
4.4.	Isotopie	42
5.	Résumé.....	47
6.	Recommandations.....	48
7.	Références	49

Liste de figures

Figure 1.	Localisation de la zone d'étude	2
Figure 2.	Végétation naturelle au sud-ouest de Niamey, décembre 2012.....	3
Figure 3 :	Précipitation moyenne mensuelle pour la période 1960 – 1990 à Niamey.....	3
Figure 4 :	Températures maximales moyennes et minimales moyennes pour la période 1960 – 1990 à Niamey	4
Figure 5 :	Niveau d'eau journalier du fleuve Niger à Niamey de 2012 à 2014 (Station Pont Kennedy).....	5
Figure 6 :	Le fleuve Niger à Niamey vu du Quartier Terminus.	5
Figure 7.	Distribution des formations géologiques dans la zone d'étude.....	7
Figure 8.	Coupe schématique représentative de la situation géologique générale à Niamey.	8
Figure 9.	Distribution des aquifères dans la zone d'étude.....	9
Figure 10 :	Prélèvement d'eau d'un puits ouvert (N°16, quartier Lamordé).....	10

Figure 11 : Prélèvement d'eau souterraine d'un forage équipé (N°33) avec une pompe de motricité humaine « India » (Quartier Kouara Mé)	11
Figure 12 : Carte de la zone d'étude avec la distribution des points d'eau sélectionnés pour le suivi en décembre 2012 et en juin 2013.....	12
Figure 13 : Soufflage d'un forage abandonné (N°25, quartier Route Filingué / Église Garbado).....	13
Figure 14 : Carte de la zone d'étude avec la distribution des points d'eau sélectionnés pour le suivi en juillet 2014	14
Figure 15 : Différentes méthodes de prélèvement et mesures in situ.....	16
Figure 16 : Niveau piézométrique dans le socle en comparaison avec le niveau journalier du fleuve Niger à la station Point Kennedy pour la période de décembre 2012 à décembre 2014	17
Figure 17 : Niveau piézométrique mesuré à N°07 Kossey Dgerma et précipitation mensuelle mesurée à Niamey aéroport	18
Figure 18. Variation de niveau statique	19
Figure 19 : Niveaux piézométriques des nouveaux piézomètres installés sur la rive droite du fleuve Niger	19
Figure 20 : Carte piézométrique pour l'aquifère socle.....	20
Figure 21 : Niveau piézométrique dans le CT pour la période décembre 2012 – décembre 2014.....	21
Figure 22 : Carte piézométrique pour l'aquifère CT en décembre 2014.....	22
Figure 23 : Niveau piézométrique dans l'aquifère alluvial pour la période décembre 2012- mars 2014 en relation avec les hauteurs du fleuve Niger	23
Figure 24 : Niveau piézométrique dans l'aquifère alluvial pour la période décembre 2012- décembre 2014 en relation avec la précipitation.....	23
Figure 25 : Statistique des valeurs de pH mesurés pendant la période rapportée	25
Figure 26 : pH mesurés pour l'eau de surface dans des différentes stations	25
Figure 27. Carte de distribution du pH dans la zone d'étude en juin 2013	26
Figure 28 : Statistique des valeurs de conductivité électrique mesurées pendant la période rapportée.....	27
Figure 29 : Carte montrant la distribution des conductivités électriques en juin 2013	28
Figure 30 : Variation saisonnière de la conductivité électrique dans l'eau de surface	28
Figure 31 : Diagramme Piper pour l'aquifère socle avec nitrate et sans nitrate.....	29
Figure 32 : Diagramme Piper pour l'aquifère CT avec nitrate et sans nitrate	30
Figure 33 : Diagramme Piper pour l'aquifère alluvial avec nitrate et sans nitrate	30
Figure 34 : Diagramme Piper pour les eaux de surface et la précipitation	31
Figure 35 : Statistique des concentrations en Fe mesurées pendant la période reportée	31
Figure 36 : Variation saisonnière de la concentration en Fe pour les eaux de surface mesurées pendant la période de suivi	32
Figure 37 : Statistique des concentrations en manganèse mesurées dans la période rapportée.....	33

Figure 38 : Variation de la concentration en manganèse dans les points d'eau de l'aquifère socle et du CT. Seuls les points d'eau avec au moins une concentration supérieure à 0,05 mg/l sont représentés.	33
Figure 39 : Distribution des concentrations en nitrate en juin 2013.....	34
Figure 40 : Statistique des concentrations en nitrate mesurées dans la période rapportée...35	35
Figure 41. Variation de la concentration en nitrate dans le socle, l'aquifère alluvial et le CT. Seuls les points d'eau avec au moins une concentration supérieure à 25 mg/l sont représentés	35
Figure 42 : Le forage N°40 (Gamkallé Sebangué) en pleine ville à gauche et les environs du puits ouvert N°20 (Sagua) en pleine utilisation à droite.....	36
Figure 43 : Distribution des concentrations en nitrite en juin 2013	37
Figure 44 : Statistique des concentrations en nitrite mesurés dans la période rapportée.....	37
Figure 45. Variation de la concentration en nitrite dans l'aquifère socle, alluvial et CT. Seuls les points d'eau avec des concentrations supérieures aux limites OMS sont représentés	38
Figure 46 : Concentrations en arsénique mesurées dans le point d'eau N°16 (Lamordé) dans l'aquifère alluvial.....	39
Figure 47. Coliformes totaux sur l'aquifère socle. Seul 10% des échantillons ne sont pas pollués.....	40
Figure 48. E. coli sur l'aquifère socle. Seul 48% des échantillons ne sont pas contaminés ..	41
Figure 49. Contamination par Entérocoques dans la zone de Niamey.....	42
Figure 50 : Ligne météorique globale pour les précipitations globales, ligne météorique locale pour la précipitation de Niamey et ligne correspondant aux eaux du fleuve Niger à Niamey	43
Figure 51 : Variation saisonnière de la composition isotopique pour le fleuve Niger mesurée au point Kennedy	44
Figure 52 : Composition isotopique de l'eau du socle comparée avec la ligne météorique locale et la ligne de l'eau du fleuve Niger	45
Figure 53 : Composition isotopique du CT comparée avec la ligne météorique locale et la ligne du fleuve Niger.....	45
Figure 54. Composition isotopique de l'aquifère alluvial comparée avec la ligne météorique locale et la ligne du fleuve Niger.....	46

Liste de tableaux

Tableau 1. Caractéristiques des points d'eau du réseau piézométrique

Tableau 2. Résultats des pompages d'essai

Tableau 3. Synthèse statistique des résultats chimiques

Liste d'annexes

Annexe 1 : Fiches des piézomètres (CD adjoint)

Annexe 2 : Résultats des analyses chimiques

Annexe 3 : Résultats des analyses isotopiques

Liste des abréviations

ABN	Autorité du Bassin du Fleuve Niger
AEP	Approvisionnement d'Eau Potable
AGES	Appui à l'ABN pour la Gestion des Eaux Souterraines
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe = Institut Fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles de l'Allemagne
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
CE	Conductivité électrique
CFU	Colony Forming Units = Unité qui forme une colonie
CT	Continental Terminal
DRH	Direction Régionale Hydraulique
DT	Direction Technique
DTW	Deutsche Trinkwasserverordnung (= Règlement allemand d'eau potable)
ES	Eaux souterraines
EdS	Eaux de surface
FE	Forage équipé
GPS	Global Positioning System
MFT	Marteaux fond du trou
MHE	Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement
m NN	mètres sur le niveau de la mer
NS	Niveau statique
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PMH	Pompe à Motricité Humaine
PO	Puits ouvert
POB	Puits d'observation
PT	Profondeur totale
PVC	Polychlorure de vinyle
SFN	Structure Focale Nationale
UE	Union Européenne
US EPA	United States Environmental Protection Agency

1. Justification et objectifs

Le projet AGES (« Appui à l'Autorité du Bassin du Fleuve Niger pour la Gestion des Eaux Souterraines ») est un projet partenariat entre l'Autorité du Bassin du Fleuve Niger (ABN) et l'Institut Fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles de l'Allemagne (BGR). Il a pour but d'appuyer l'ABN dans la gestion des eaux souterraines au niveau régional.

La région de Niamey a été choisie comme une première zone pilote pour mieux comprendre le rôle des différents aquifères de la région, leurs problèmes et leur relation avec les eaux de surface du fleuve Niger. Les objectifs du projet dans cette région sont :

- 1) Former du personnel de l'ABN dans le suivi des eaux souterraines
- 2) Développer les outils pour le suivi des eaux souterraines au niveau du Secrétariat exécutif de l'ABN
- 3) Améliorer la connaissance en référence des différentes aquifères à Niamey et leur échange éventuel avec les eaux de surface
- 4) Créer une base de données comme appui à une postérieure modélisation de l'écoulement des eaux souterraines pour chaque aquifère
- 5) Identifier des problèmes relatifs aux eaux souterraines quant à leurs utilisations par la population
- 6) Améliorer la connaissance des aquifères pour arriver au développement des mesures d'amélioration de la gestion des eaux souterraines par les institutions responsables.

Le projet AGES, en coopération avec la Structure Focale Nationale (SFN) nigérienne de l'ABN, a effectué d'abord un inventaire des puits et forages de Niamey et ses alentours. Par la suite, un réseau piézométrique a été désigné, basé sur les résultats de l'inventaire. Ce réseau est suivi trimestriellement depuis décembre 2012 avec des mesures piézométriques et des analyses physico-chimiques ainsi que des mesures des isotopes.

Ce rapport présente les résultats des huit campagnes de suivi effectuées entre décembre 2012 et décembre 2014 et analyse les effets de la pression humaine sur les différents aquifères.

2. Situation

2.1 Situation géographique et topographique

La zone d'étude, la région de Niamey, est située dans le sud-ouest de la République du Niger en Afrique de l'ouest (Figure 1). Elle couvre une surface d'environ 275 km². Le fleuve Niger traverse la zone d'étude en direction nord-ouest sud-est. Les coordonnées géographiques de la ville de Niamey, au centre de la zone d'étude, sont N 13,5° et E 2,0°.

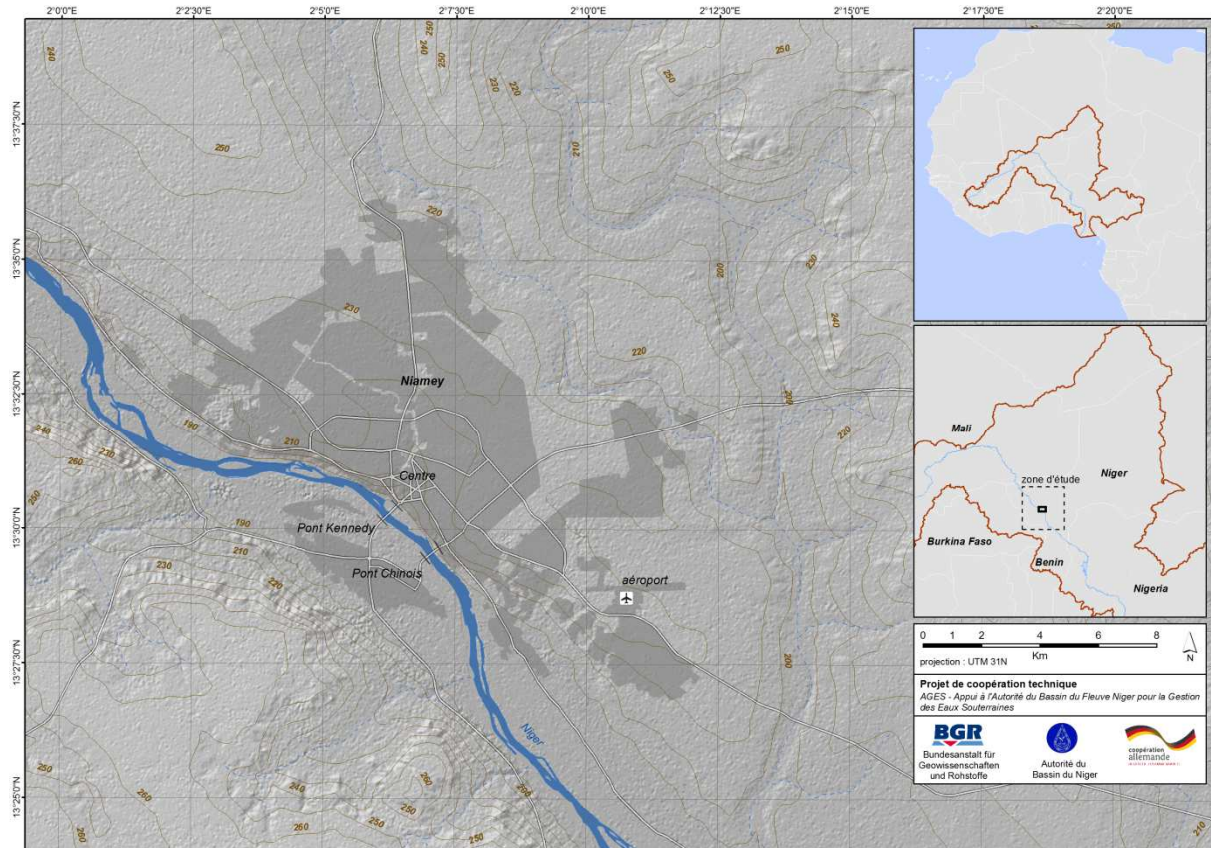


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

Niamey fut fondée sur la rive gauche du fleuve Niger, où encore aujourd'hui se trouve la plupart de la ville (5 parmi 6 communes) ; seule la commune de « Harobanda » s'étend sur la rive droite. D'après l'Institut National de la Statistique du Niger, la population de la ville en 2012 était de 1.388.682 habitants.

La zone d'étude se trouve à une altitude de 180 à 260 m au dessus du niveau de la mer (m NN). Le paysage est caractérisé par un plateau vaste d'une altitude d'environ 260 m NN dans lequel le fleuve Niger a creusé une vallée d'environ 5 km de large jusqu'à une altitude de 180 m. L'axe du fleuve se trouve dans la partie la plus profonde de la vallée à une altitude de 174 m (Source : ABN, Niamey). Des nombreuses vallées étroites perpendiculaires au fleuve (couris) composent un réseau hydrologique seulement actif dans les périodes de fortes précipitations.

La végétation naturelle – au-delà de la vallée du fleuve Niger – peut être considérée comme « steppe sèche avec des petites acacias » (WWF, 2009) (Figure 2) qui est typique du Sahel.

Dans la zone d'étude il y a des activités agricoles. Dans la vallée du fleuve ce sont des légumes qui sont cultivés et, dans les zones d'inondations, du riz. Au-delà, c'est principalement le mil qui est cultivé, mais aussi le maïs.

Dans la zone d'étude il y a également des activités d'élevage (bovins, chèvres et moutons), pratiquées principalement en dehors de la vallée du fleuve Niger.



Figure 2. Végétation naturelle au sud-ouest de Niamey, décembre 2012 (Photo : BGR)

2.2 Situation climatique

La région de Niamey est située dans la zone climatique du Sahel qui s'étend comme une bande d'ouest en est à travers le continent africain.

Du point de vue climatologique, le Sahel est considéré comme une zone de transition climatique entre le désert de Sahara au nord et les savanes du Soudan au sud. Les précipitations moyennes annuelles varient entre 200 mm et 600 mm (WWF, 2009).

La saison des pluies dépend du régime de mousson que s'approche par le sud-ouest. Elle commence en fin mai et continue jusqu'à septembre, mais les pluies sont plus abondantes entre juillet et août (Figure 3). D'après Boubakar Hassane (2010), la moyenne annuelle pour la période 1979-1999 est de 506 mm. La moyenne à long terme pour la station de Niamey ville (1960-1990) est de 591 mm (Figure 3).

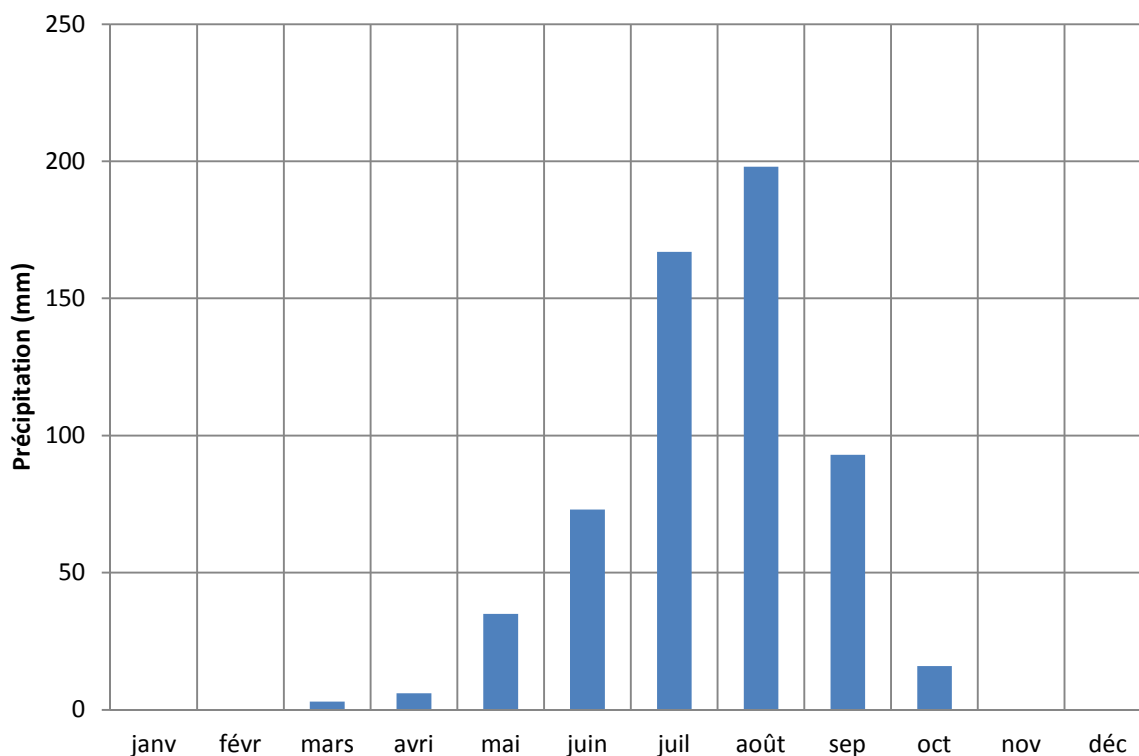


Figure 3 : Précipitation moyenne mensuelle pour la période 1960 – 1990 à Niamey

Les précipitations sont essentiellement reçues sous forme d'orages violents donnant lieu à un fort ruissellement pendant la saison des pluies (juillet – septembre).

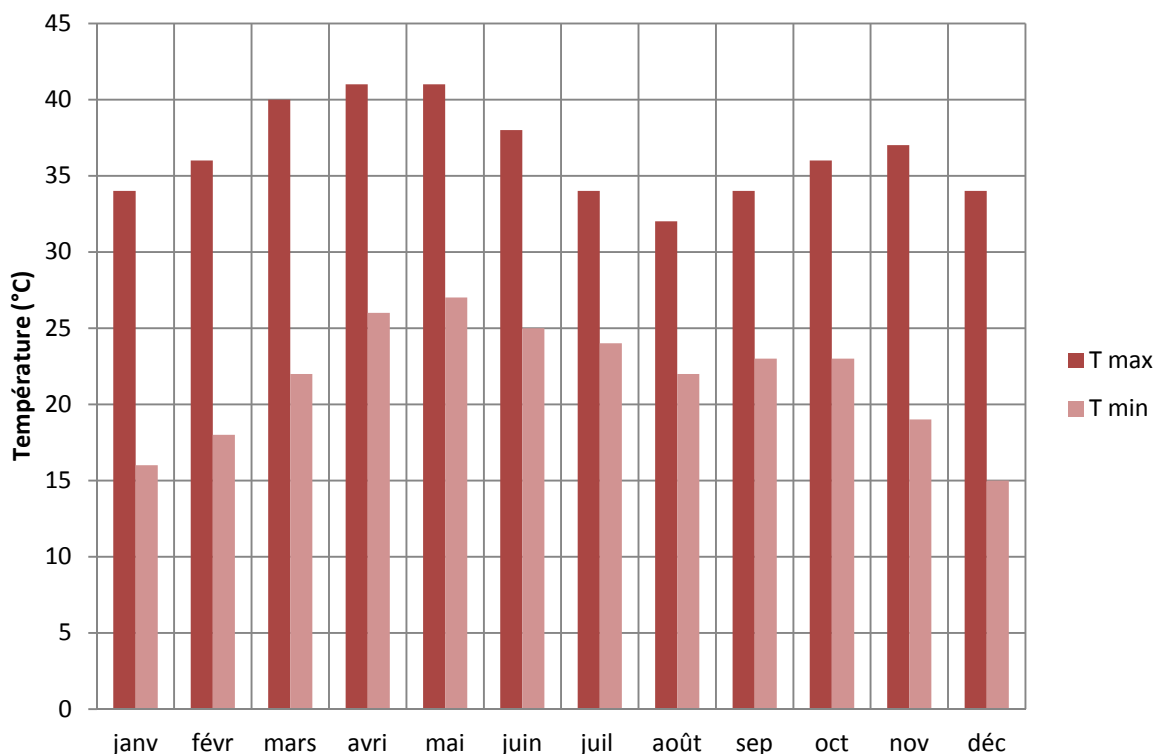


Figure 4 : Températures maximales moyennes et minimales moyennes pour la période 1960 – 1990 à Niamey

La Figure 4 montre que les températures maximales moyennes sont supérieures à 30 degrés pendant toute l'année avec un premier pic en avril-mai avant la saison des pluies et un deuxième en novembre. Les températures minimales varient entre 15 (de novembre à février) et 26 degrés (en avril-mai).

2.3 Régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey

En général dans un climat semi-aride tropical, les cours d'eaux pérennes augmentent sensiblement leur débit pendant la saison des pluies, quand ils sont alimentés directement par des précipitations abondantes.

Dans le cas de fleuve Niger à Niamey, la situation est plus compliquée. Son régime est déterminé non seulement par les précipitations locales, mais aussi par celles du bassin supérieur à travers le delta intérieur situé au centre du Mali. Le delta intérieur est un vaste marécage plein de lacs et de petits cours d'eau qui fonctionne comme un amortisseur pour les masses d'eau du bassin supérieur.

Dans la période mai à septembre, la saison des pluies à Niamey, les précipitations locales produisent une crue locale. Vers la fin de la saison des pluies, les masses d'eau provenant du bassin supérieur, qui étaient accumulées dans le Delta Intérieur, se versent dans le fleuve et donnent lieu, à partir d'octobre, à une deuxième crue à Niamey connue comme la « Crue de Guinée » (Figure 5).

L'ensemble des deux crues est responsable de hautes eaux quasiment ininterrompues d'août à février à Niamey (Figure 5). La variabilité annuelle des creux est évidente dans le graphique de la Figure 5. Les hautes eaux étaient très importantes dans la période 2012-2013, mais elles ont diminuées petit à petit jusqu'à la période 2013-2014. En plus, l'effet de

la saison des pluies n'existe pas en 2014, probablement à cause du régime de précipitation. Les événements ont été plus sporadiques.

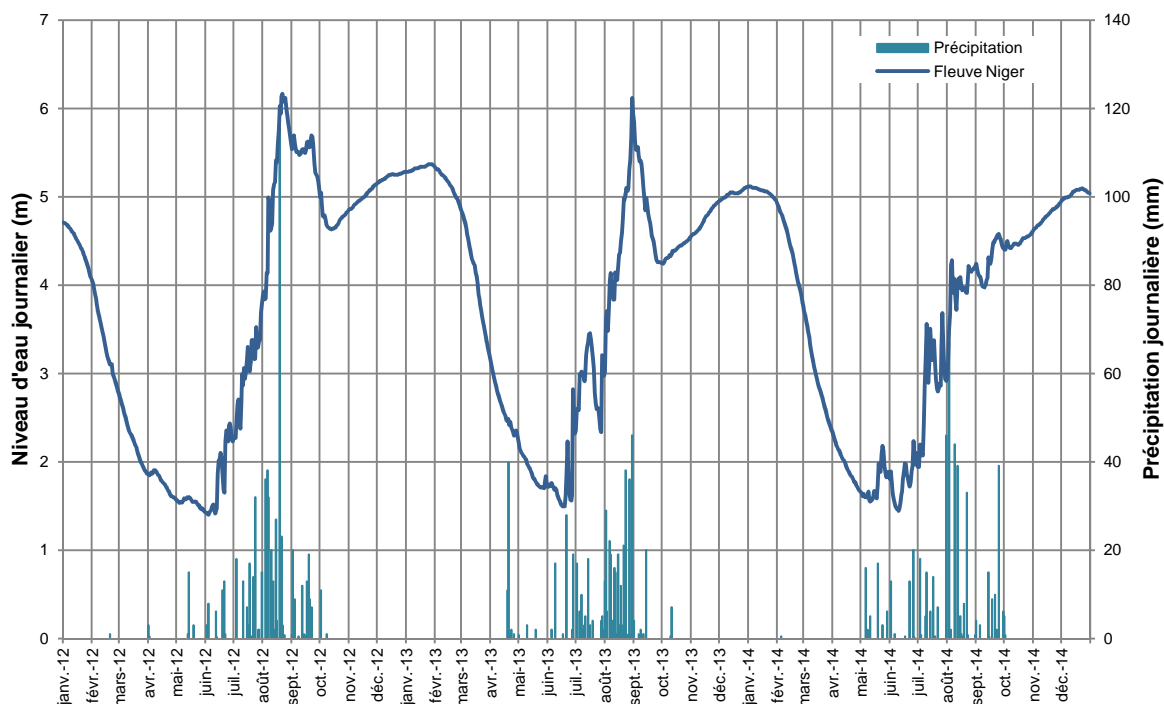


Figure 5 : Niveau d'eau journalier du fleuve Niger à Niamey de 2012 à 2014 (Station Pont Kennedy, Source : ABN)

D'après Bechler-Carmaux (1998), la largeur moyenne du lit du fleuve Niger varie de 300 m dans la saison de basses eaux à 750 m dans la saison des hautes eaux (Figure 6)



Figure 6 : Le fleuve Niger à Niamey vu du Quartier Terminus. La photo à gauche montre les basses eaux en juillet 2011, celle à droite les hautes eaux en août 2012 (Photos : BGR).

2.4 Géologie

La géologie dans la région de Niamey est groupée en trois (3) formations géologiques, à savoir :

- Socle « Méta-Liptako »
- Grès « Continental Terminal »
- Alluvions

Socle Méta-Liptako

Le socle Méta-Liptako est la formation géologique la plus profonde. D'âge protérozoïque inférieur (Vicat et al., 1994), il appartient à la province birimienne de l'Afrique de l'Ouest. Il est composé de roches plutoniques (granites, granulites) et métamorphiques (gneisses, quartzites, schistes verts) dans des états différents d'altération.

Dans la zone de Niamey, le socle Méta-Liptako consiste presque exclusivement de formations d'âge paléo protérozoïque moyen : le birimien/éburnéen (Bonnot, 1998). La partie ante-éburnéenne du socle est un ensemble méta volcano sédimentaire indifférencié. La partie tardif-éburnéenne est composée de syénogranites, monzogranites et granodiorites indifférenciés, riches en quartz, à biotite +/- amphibolite et localement à amphibole uniquement. La plus grande part des forages captant le socle a été creusé dans la partie tardif-éburnéenne.

Grès Continental Terminal

Le Grès Continental Terminal (CT), probablement d'âge mio-pliocène (Lang et al., 1990), est la formation la plus jeune du bassin des lullemeden. Dans ce bassin, qui comprend des sédiments paléozoïques et méso-cénozoïques, les aires de sédimentation se sont progressivement déplacées du NE vers le SO au cours des temps géologiques.

Dans la zone de Niamey, le CT correspond au Ct3 (Greigert, 1966) avec un âge Eocène moyen à Pliocène. Il est constitué d'une alternance de grès plus ou moins argileux et d'argiles versicolores avec intercalations de niveaux d'oolithes ferrugineuses (Carte Géologique du Niger, 1998 ; Wright, 1985) et repose directement sur le socle birimien du Liptako, ou localement, sur les grès du protérozoïque supérieur (Vicat et al., 1994).

Alluvions

Les alluvions du fleuve Niger sont composées de sable peu compacté. Dans Bonnot (1998), ils sont décrits comme alluvions indifférenciés et colluvions de fond de vallée. Ils sont le produit de la sédimentation fluviatile quaternaire du fleuve Niger, notamment pendant ses hautes eaux.

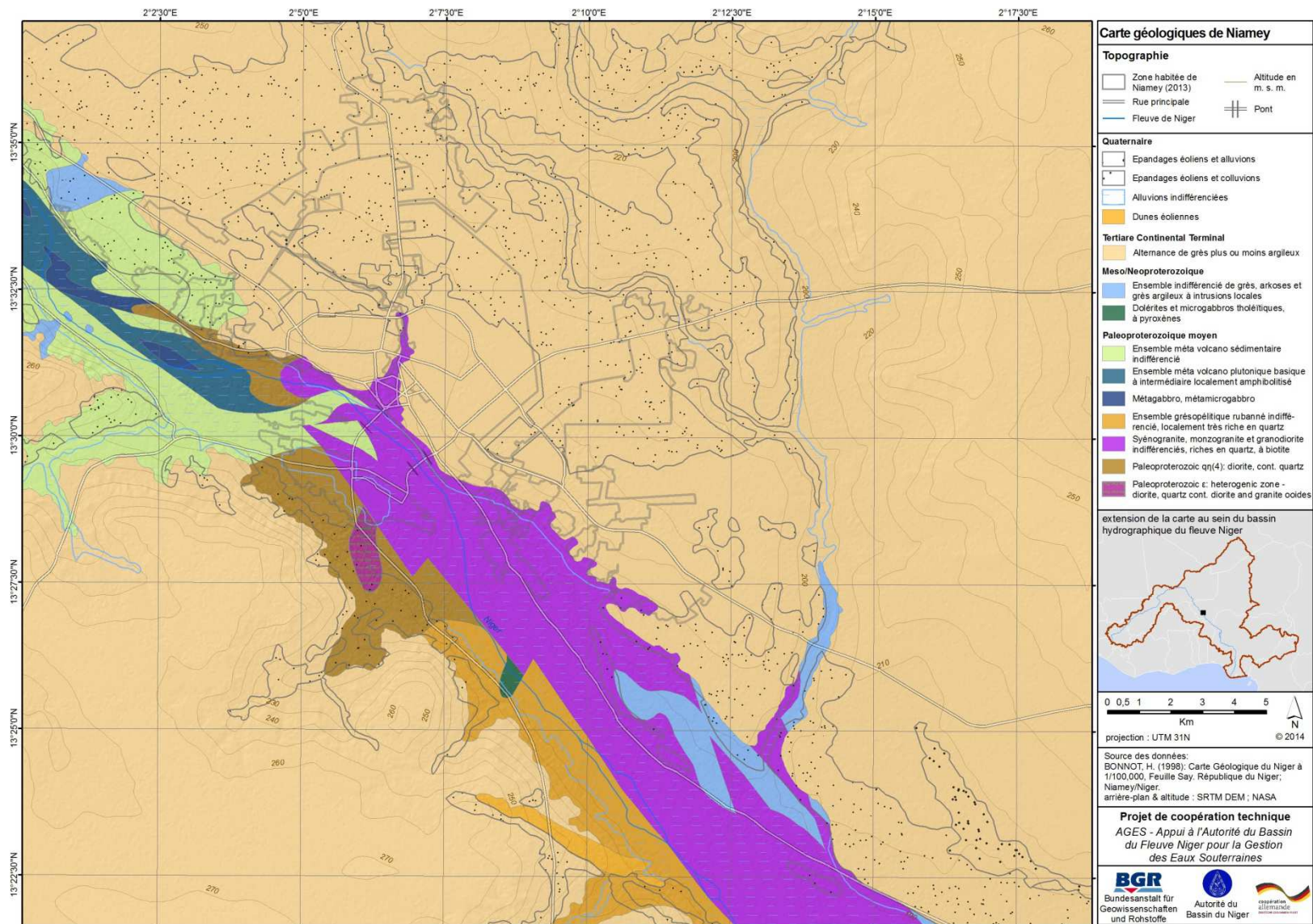


Figure 7. Distribution des formations géologiques dans la zone d'étude

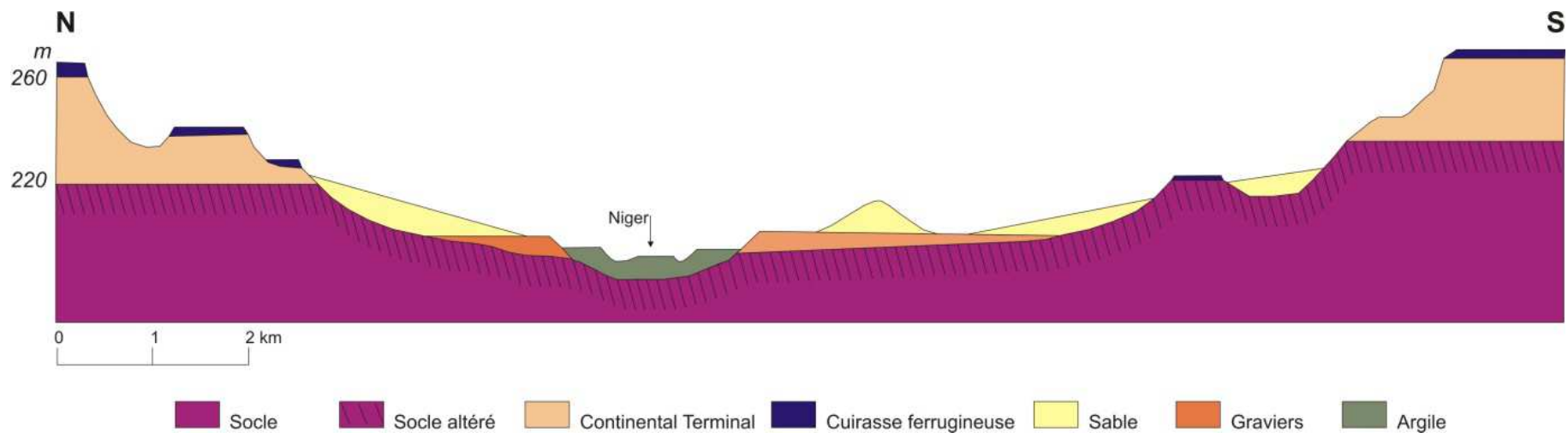


Figure 8. Coupe schématique représentative de la situation géologique générale à Niamey (modifiée d'Ousseini et Morel, 1989)

2.5 Hydrogéologie

Les trois formations géologiques donnent lieu à des aquifères différents, tous présents dans la zone d'étude selon les descriptions des fiches de forage qui ont été inventoriées par le projet. La Figure 9 montre la distribution des aquifères dans la zone de Niamey.

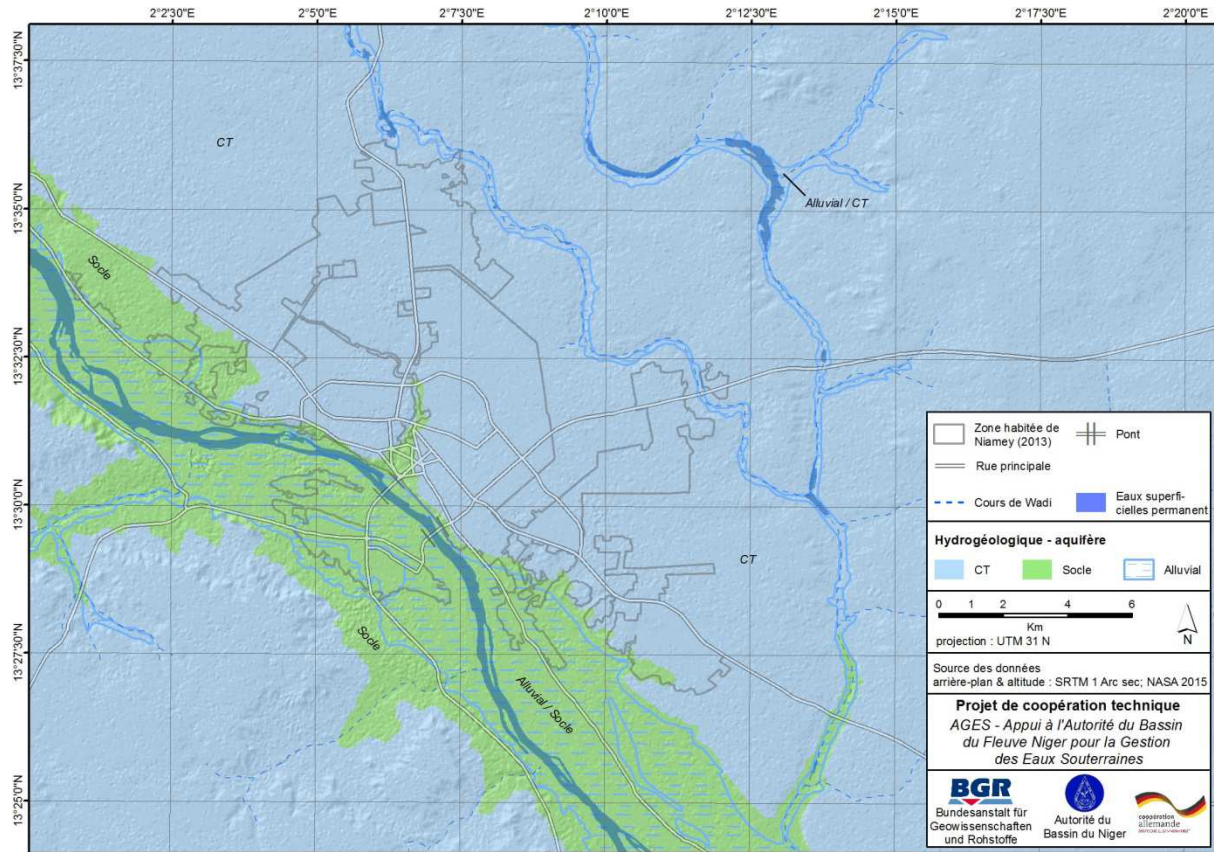


Figure 9. Distribution des aquifères dans la zone d'étude

Aquifère socle

En général, il s'agit d'un aquifère fracturé où l'eau souterraine s'écoule le long des fissures et fractures généralement peu interconnectées. Pourtant le socle montre une zone altérée très puissante (jusqu'à 100 m) dans des climats extrêmes comme à Niamey. Cette zone agit comme un aquifère poreux qui emmagasine des quantités importantes d'eau souterraine. Le socle contient une nappe semi-captive dans des zones où il est sous-jacent au CT et une nappe libre dans les zones où il ne présente pas de couverture (BRGM, 1986). La transmissivité moyenne pour cet aquifère a été publiée par le BRGM (1986) comme étant de $6,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Aquifère Continental Terminal

Le Continental Terminal est un aquifère poreux. En général il consiste en plusieurs couches, donc plusieurs aquifères. Cependant, Niamey est situé sur le bord extrême sud-ouest du bassin de l'ullemmeden et ne porte qu'une couche connue comme CT3 (Greigert, 1966). Les valeurs de transmissivité pour le CT avec une moyenne de $1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (Greigert, 1978) sont très hautes.

Aquifère alluvial

Il s'agit d'un aquifère poreux local qui est limité à la vallée du fleuve Niger. Un deuxième aquifère alluvial très restreint se trouve le long d'un oued vers le nord-est de Niamey, mais il n'a pas été inclus dans l'étude.

3. Méthodologie

Dans les prochaines sections seront présentés l'inventaire des types de points d'eau trouvés, la définition du réseau piézométrique, la réhabilitation des forages pour leur utilisation comme piézomètres ainsi qu'une description de la campagne de suivi.

3.1 Inventaire des points d'eau et sélection d'un réseau piézométrique

Pendant la période du 05 au 26 juillet 2012, le projet AGES, en coopération avec la SFN nigérienne, a effectué un inventaire des points d'eau incluant point d'eau superficielle, les puits traditionnels et les forages équipés dans la région de Niamey. En total 56 points d'eau ont été répertoriés selon leur aptitude à servir comme piézomètre (aquifère capté, localisation, état général, etc.).

3.2. Types de points d'eau

Les points d'eau qui captent les aquifères alluvial et CT sont des puits ouverts (PO) avec un diamètre de 1,40 m ou 1,80 m et une profondeur modérée (< 10 m). Ils ont été creusés de manière traditionnelle en utilisant une houe, une pelle et des seaux. Les murs sont protégés avec un tubage en béton pour stabiliser le puits. Certains puits sont couverts par un couvercle en béton afin de les protéger des objets tombant, mais le plus souvent les couvertures sont simplement étendues pour faciliter l'accès à l'eau (Figure 10). Presque tous les PO n'ont pas de pompe et l'eau est prélevée par des seaux ou des bidons attachés à une corde. L'âge des PO considérés est inconnu, mais on peut estimer que la plupart ont été creusés avant les années 1980.



Figure 10 : Prélèvement d'eau d'un puits ouvert (N°16, quartier Lamordé) (Photo : BGR)

Les points d'eau qui captent l'aquifère socle sont des forages équipés (FE) avec un diamètre de 110 mm et fermés avec une chape. Une pompe à suction à motricité humaine (PMH), souvent du modèle « India » (Figure 11) est intégrée dans la chape. Le tube est en PVC. Les FE atteignent des profondeurs plus profondes (entre 10 m et 80 m). Ils ont été forés dans les années 1980 avec la méthode de marteaux fond du trou (MFT) propulsée par un moteur de camion.



Figure 11 : Prélèvement d'eau souterraine d'un forage équipé (N°33) avec une pompe de motricité humaine « India » (Quartier Kouara Mé) (Photo : BGR)

3.3. Définition du réseau piézométrique

Dans un premier temps, un nombre total de 15 points d'eau souterraine repartis sur les trois aquifères de la région de Niamey, ont été choisis pour faire partie du réseau piézométrique (Figure 12) :

- Aquifère socle : 3
- Aquifère CT : 6
- Aquifère alluvial : 6

De plus, deux endroits pour le prélèvement des eaux de surface ont été inclus, un sur chacun des ponts qui traversent le fleuve Niger.

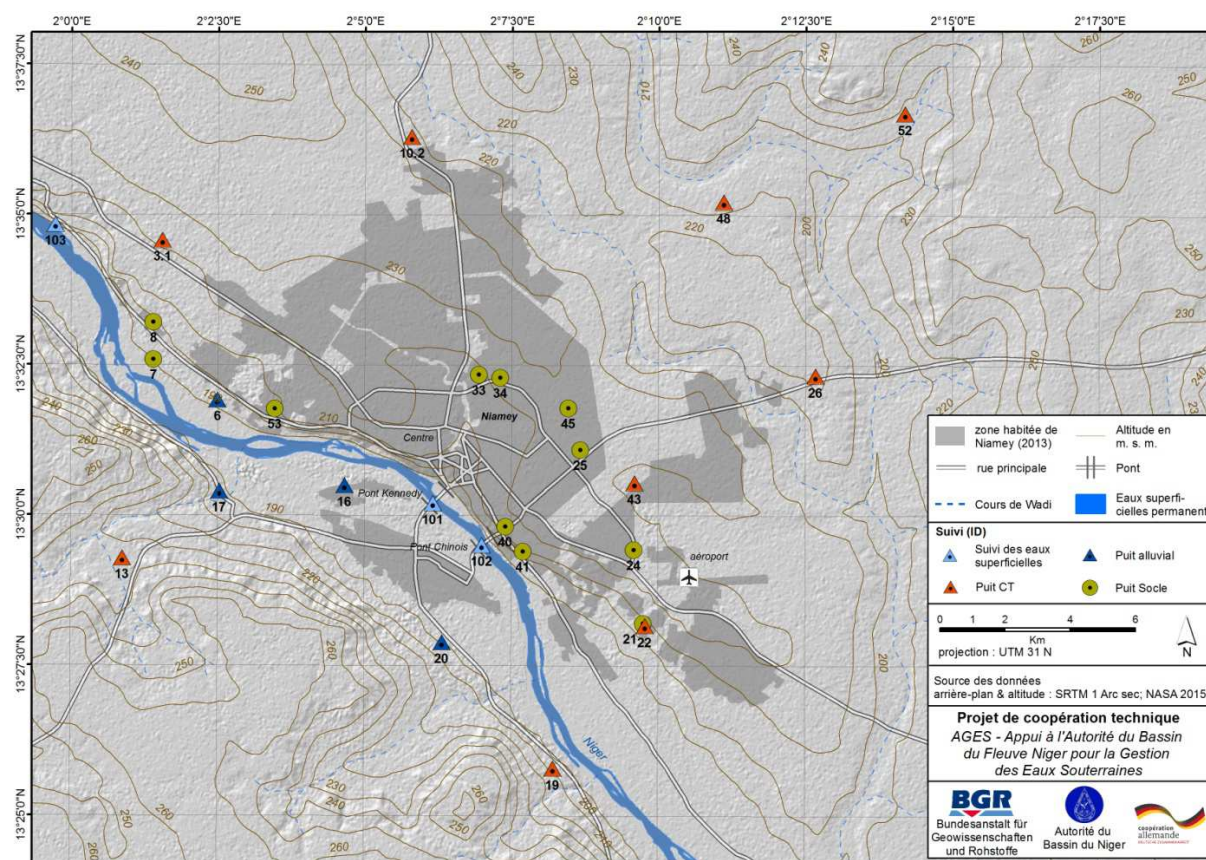
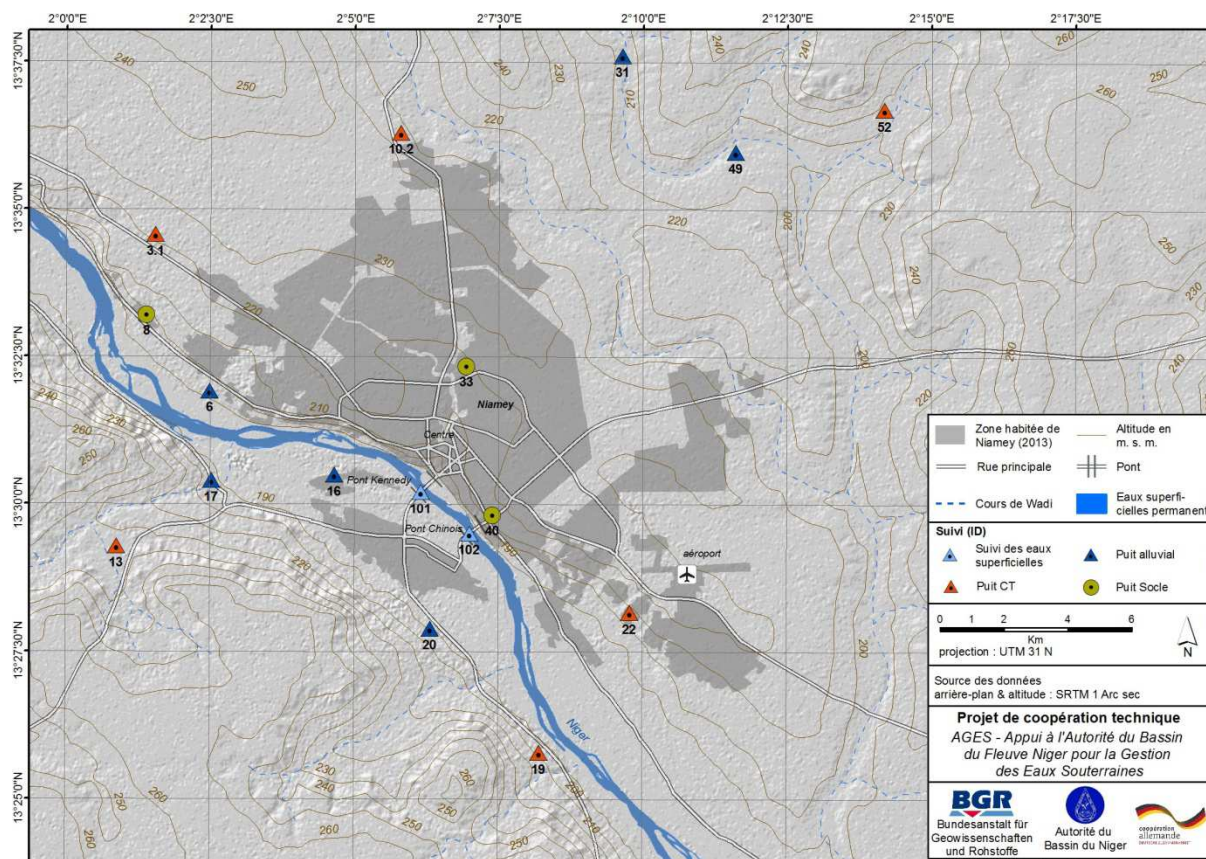


Figure 12 : Carte de la zone d'étude avec la distribution des points d'eau sélectionnés pour le suivi en décembre 2012 (haut) et en juin 2013 (bas)

3.4. Réhabilitation des forages et élargissement du réseau piézométrique

En juin 2013, sept forages équipés (FE) abandonnés qui captent le socle ont été réhabilités pour les utiliser comme piézomètres. La réhabilitation comprend le démontage du point de puisage, le soufflage du forage (Figure 13) et sa fermeture avec une plaque de métal massif démontable pour permettre l'introduction de la sonde piézométrique et l'échantillonnage.



Figure 13 : Soufflage d'un forage abandonné (N°25, quartier Route Filingué / Église Garbado)

Simultanément, le réseau piézométrique a été élargi. Huit puits supplémentaires captant l'aquifère CT et sept captant le socle (quatre sur la rive droite du fleuve) ont été inclus. Dans un même temps, les deux puits qui captent l'aquifère alluvial de l'oued ont été éliminés à cause des mesures de sécurité. La répartition définitive des piézomètres est :

- Aquifère socle : 15
- Aquifère CT : 9
- Aquifère alluvial : 4

Le nombre de points de prélèvement des eaux de surface a également été augmenté avec une station en amont (N° 103 Tondey Kwarey) et une station lointaine quelques 33 km en aval de la ville (N° 104 Kollo) (Figure 14). Au total, quatre stations de prélèvement des eaux de surface ont été incluses.

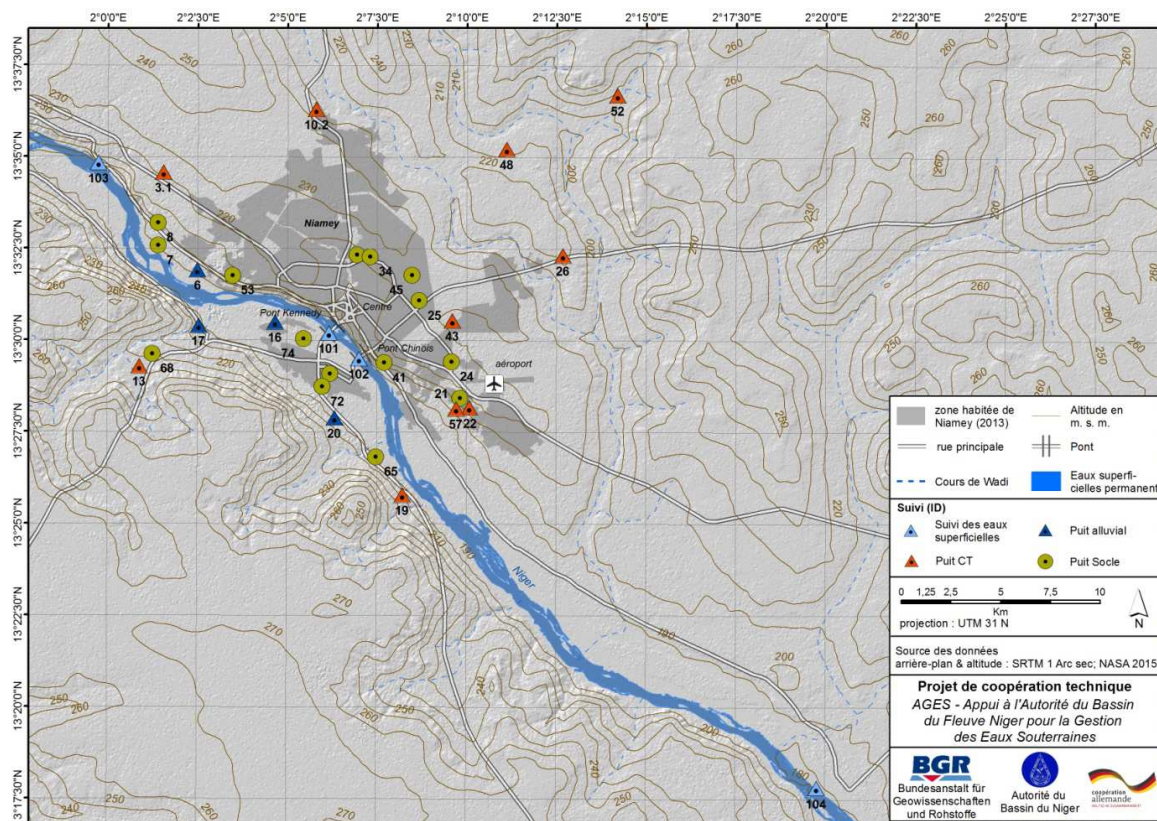


Figure 14 : Carte de la zone d'étude avec la distribution des points d'eau sélectionnés pour le suivi en juillet 2014

Les caractéristiques des points d'eau du réseau actuel sont représentées dans le tableau qui suit.

Tableau 1. Caractéristiques des points d'eau du réseau piézométrique

ID	X (WGS84)	Y (WGS84)	Z (m NN)*	Profondeur (m)	Aquifère capté	Type
7 Kossey Dgerma	2,0234	13,5432	186,77	34,4	Socle	POB
8 Gabou Goura	2,0233	13,5534	191,44	d.n.d.	Socle	FE
21 Saga Gassia 1	2,1625	13,4702	205,55	74,8	Socle	POB
24 Telladjé	2,1598	13,4906	225,03	70,6	Socle	POB
25 Route Filingué	2,1446	13,5183	221,65	83,4	Socle	POB
33 Kouaramey	2,1158	13,5391	211,58	72,0	Socle	FE
34 Boukoki Mairie	2,1218	13,5383	220,56	70,3	Socle	POB
40 Gamkalley Sebangué	2,1234	13,4970	209,89	57,0	Socle	FE
41 Gamkalley Gollé	2,1284	13,4901	201,18	54,3	Socle	POB
43 Bassora	2,1599	13,5091	216,71	24,6	Socle/Cont.T ?	PC
45 Dangao	2,1412	13,5299	221,60	30,8	Socle	POB
53 Goudel Tassiba	2,0579	13,5296	212,21	67,5	Socle	POB
65 Saga Gourma 1	2,1247	13,4473	193,19	26,0	Socle	FE
68 Diadjiré	2,0207	13,4939	219,79	d.n.d.	Socle	FE
70 Gaweye	2,1033	13,4850	188,27	40,8	Socle	POB
72 Kirkissoy	2,0997	13,4791	184,05	43,7	Socle	POB
74 École Agronomie	2,0910	13,5009	187,64	45,0	Socle	POB
3.1 Tondidia Peul	2,0258	13,5762	217,92	13,4	Cont. Terminal	PC

ID	X (WGS84)	Y (WGS84)	Z (m NN)*	Profondeur (m)	Aquifère capté	Type
10.2 Goudel Gourou Siminti	2,0966	13,6050	223,45	22,8	Cont. Terminal	PC
13 Kariel	2,0147	13,4881	221,96	12,0	Cont. Terminal	PC
19 Timeré	2,1369	13,4298	206,78	16,0	Cont. Terminal	PC
22 Saga Gassia 2	2,1630	13,4694	204,96	16,0	Cont. Terminal	PC
26 Saga Gorou 1	2,2112	13,5388	218,98	27,5	Cont. Terminal	PC
48 Kongou Saboncaré	2,1850	13,5871	209,39	15,2	Cont. Terminal	PC
52 Kongou Gongga	2,2364	13,6116	211,29	19,0	Cont. Terminal	PC
6 Lossa Goungou	2,0415	13,5319	187,86	11,8	Alluvial	PC
16 Lamordé	2,0776	13,5083	182,66	14,7	Alluvial	PC
17 Kangel	2,0421	13,5066	196,63	10,9	Alluvial	PC
20 Sanguia	2,1054	13,4648	185,89	6,1	Alluvial	PC
101 Pont Kennedy	2,1027	13,5034			Eau de surface	
102 Pont Chinois	2,1167	13,4918			Eau de surface	
103 Tondey Kouarey	1,9955	13,5805			Eau de surface	
104 Station Kollo	2,3293	13,2970			Eau de surface	

Note : * Les hauteurs des forages ont été mesurées à l'aide d'un GPS différentiel

POB : puits d'observation

FE : forage équipé

PC : puits cimenté

d.n.d. : donnée non disponible

3.5. Pompages d'essai

Quatre pompages d'essai ont été effectués dans des forages concernant l'aquifère socle. Les quatre forages ont été forés en 1985 par le BRGM (BRGM, 1986). Il s'agit des forages N°21 (Saga Gassia 1) et N°34 (Boukoki Mairie) sur la rive gauche et des forages N°70 (Gaweye) et N°74 (École Agronomie) sur la rive droite. L'entreprise FORACO était en charge de l'exécution des essais et un consultant local (Cet-Cherif) a supervisé et évalué les essais.

Les coefficients d'emmagasinement n'ont pas été estimés à cause du manque de points d'eau autour des forages qui auraient pu être utilisés comme des piézomètres lors des essais. Les résultats de transmissivité obtenus sont résumés dans le Tableau 2. Pour plus d'informations, voir rapport technique (Cet-Cherif, 2014).

Tableau 2. Résultats des pompages d'essai

ID	Localisation	T (m ² /s)	Q _{pompage} (m ³ /s)	Méthode
21 Saga Gassia 1	Rive Gauche	2,90 * 10 ⁻⁶	0,48	Cooper-Jacob (1946)
34 Boukoki Mairie Garage 1	Rive Gauche	2,90 * 10 ⁻⁵	1,3	Logan (1964)
74 Ecole Agronomie	Rive Droite	1,24 * 10 ⁻⁴	3,9	Cooper-Jacob (1946)
70 Gaweye Centre de Santé	Rive Droite	5,23 * 10 ⁻⁴	3,6	Cooper-Jacob (1946)

Les valeurs obtenues montrent une transmissivité beaucoup plus élevée dans les forages de la rive droite que dans les forages de la rive gauche. La différence est due à la situation géologique de la zone. Les coupes lithologiques des forages sur la rive droite indiquent la présence de schistes (N°74) et gneiss (N°70) altérés ou fracturés déjà à partir de 10 m de profondeur avec des entrées d'eau importantes entre 21 m et 38 m de profondeur. Dans le forage N°21 sur la rive gauche, une couche de gneiss altérée est enregistrée à 48 m de profondeur, mais elle est d'à peine 2 m d'épaisseur. Le gneiss sain suit en profondeur. De très faibles entrées d'eau sont enregistrées entre 55 m et 77 m de profondeur. Malheureusement la coupe lithologique du forage N°34 n'est pas disponible, mais les coupes de deux forages très proches (BRGM 21664 et BRGM 21665) montrent une situation similaire à celle du forage N°21.

Les résultats confirment les valeurs obtenues par le BRGM dans la campagne de forages (BRGM, 1985). Dans le même temps, des essais à débit constant de 3 heures ont eu lieu après le nettoyage et le développement des forages par « air-lift ». De plus, les transmissivités estimés restent dans le domaine des valeurs publiés par Boubakar Hassane (2010). Le socle est relativement un bon aquifère sur la rive droite, mais pas sur la rive gauche où la zone altérée ne contient pas d'eau.

3.6 Campagnes de suivi trimestrielles

Le suivi trimestriel inclut la mesure du niveau piézométrique et l'échantillonnage pour des analyses chimiques, bactériologiques et isotopiques.

Différentes méthodes ont été utilisées pour prélever l'eau pour l'échantillonnage selon les possibilités offertes par chaque point d'eau : la pompe « Comet », le bailer ou un seau attaché à une corde (Figure 15).



Figure 15 : Différentes méthodes de prélèvement et mesures in situ (Photos : BGR)

Les paramètres in situ (température, pH, conductivité) ont été mesurés avec un WTW-multimètre « Multi 340 i ». Les paramètres apparents (odeur, couleur, turbidité) ont été aussi notés. Les analyses chimiques ont été effectuées par le laboratoire du BGR à Hanovre, Allemagne et englobent les anions/cations totaux ainsi que les métaux lourds. Les analyses d'isotopes environnementaux (^{18}O et ^2H) ont été aussi effectuées au laboratoire du BGR à l'aide d'un spectromètre à laser Picarro L2120-i.

Quant aux teneurs bactériologiques, les échantillons ont été analysés au bureau du projet AGES dans la Direction Technique (DT) de l'ABN à Niamey. La présence des bactéries indicatrices de pollution fécale (Coliformes totaux, Escherichia coli, Entérocoques) a été mesurée avec le système IDEXX Quanti-Tray/2000.

4. Résultats

Les résultats obtenus pendant les différentes campagnes de mesure seront présentés et discutés dans les prochaines sections en débutant par le niveau statique. Les paramètres physico-chimiques décrits ci-après correspondent aux résultats de terrain (pH et conductivité électrique) ainsi que ceux du laboratoire du BGR. La description des paramètres chimiques se limite aux paramètres qui montrent des concentrations préoccupantes (manganèse, fer (II), nitrate, nitrite et arsénique). Le chapitre finit par la description des isotopes oxygène-18 (^{18}O) et deutérium (^2H).

4.1. Niveau statique

En décembre 2012 et mars 2013 le niveau statique n'a été mesuré que dans les puits ouverts car l'introduction de la sonde dans les forages équipés n'était pas possible. Cette situation a été résolue à partir de juin 2013 avec la réhabilitation et installation des forages comme piézomètres.

Ayant pris en compte les altitudes des margelles des puits mesurées par GPS différentiel pendant des campagnes de nivellement exécutées en collaboration avec la SFN de Niger, le niveau statique a été calculé par rapport au niveau de la mer (m NN), en mètres. Les cartes et diagrammes des niveaux piézométriques obtenus pour les différents aquifères sont présentés ci-dessous.

4.1.1 Aquifère socle

La Figure 16 ci dessous montre les niveaux piézométriques mesurés dans l'aquifère socle ainsi que les niveaux du fleuve durant la période de suivi. En juin 2014 tous les piézomètres du socle, à l'exception du piézomètre N°08 Gabou Goura et N°45 Dangao, ont été équipés avec des sondes automatiques pour mesurer le niveau statique.

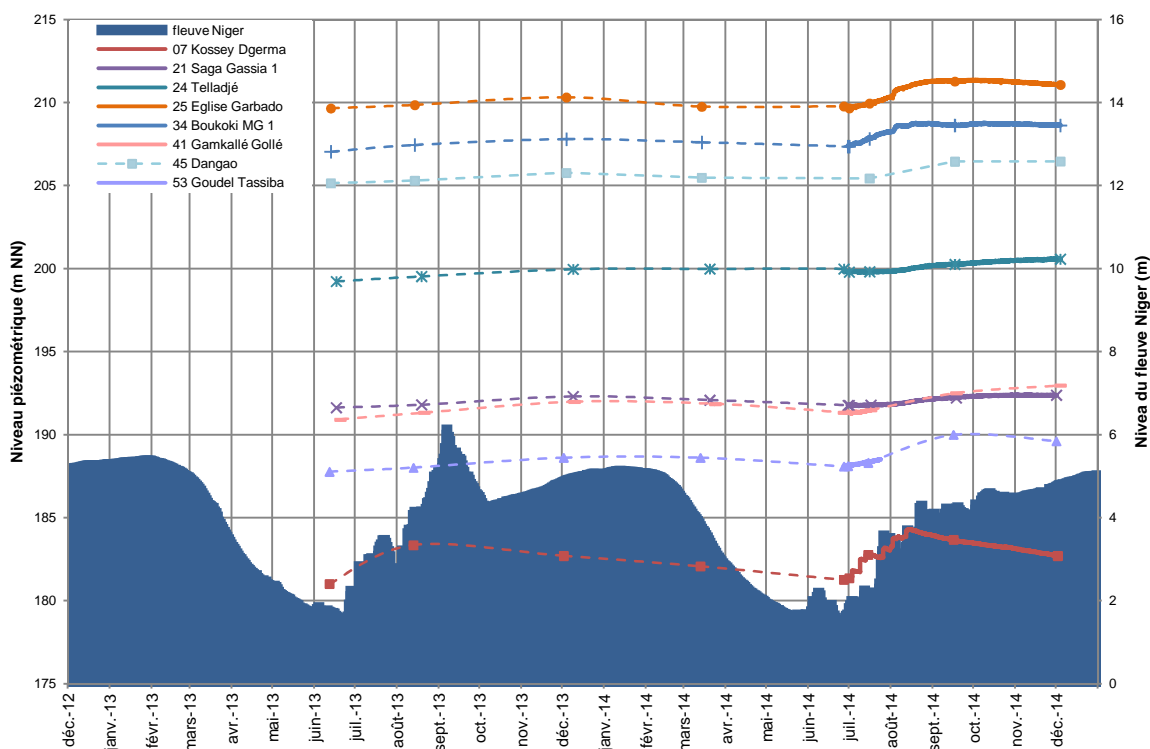


Figure 16 : Niveau piézométrique dans le socle en comparaison avec le niveau journalier du fleuve Niger à la station Point Kennedy pour la période de décembre 2012 à décembre 2014

La Figure 16 montre la bonne corrélation entre les mesures manuelles (indiquées par les nuages de points reliés par des lignes en pointillés) et celles des sondes (lignes). Tous les niveaux piézométriques dans l'aquifère socle se trouvent au moins 3 m au-dessus du niveau d'eau du fleuve Niger. La variation maximale de niveau entre les points d'eau considérés est d'environ 28 m.

La plupart des niveaux piézométriques observés (Figure 16) affichent une montée modérée (entre 0,5 m et 1,0 m) du niveau à partir du début du suivi, sauf dans le piézomètre N°07, que continue progressivement à monter jusqu'en décembre 2013, où le maximum est mesuré. Le niveau piézométrique suit une descente lente qui continue jusqu'en juillet 2014 dans les piézomètres N°25, N°34 et N°53 et en août 2014 pour les autres. Ultérieurement, une nouvelle montée s'amorce. Si l'extraction d'eau est considérée comme plus au moins constante pendant toute l'année, cette réaction, bien que faible, indique la réponse de l'aquifère aux variations de débit du fleuve Niger et la recharge de l'aquifère avec l'eau du fleuve.

Le piézomètre N°07 Kossey Dgerma montre au début du suivi et pendant les deux mois suivants, une montée rapide d'environ 2,3 m. À partir de mi août 2013, le niveau descend continuellement pendant presque une année. La montée suivante est rapide (2,5 m au total). Elle a lieu à partir de début juillet pour finir mi août 2014. Les deux montées rapides coïncident avec les périodes de pluie plus intense (Figure 17). Le piézomètre N°07 montre une recharge par précipitation.

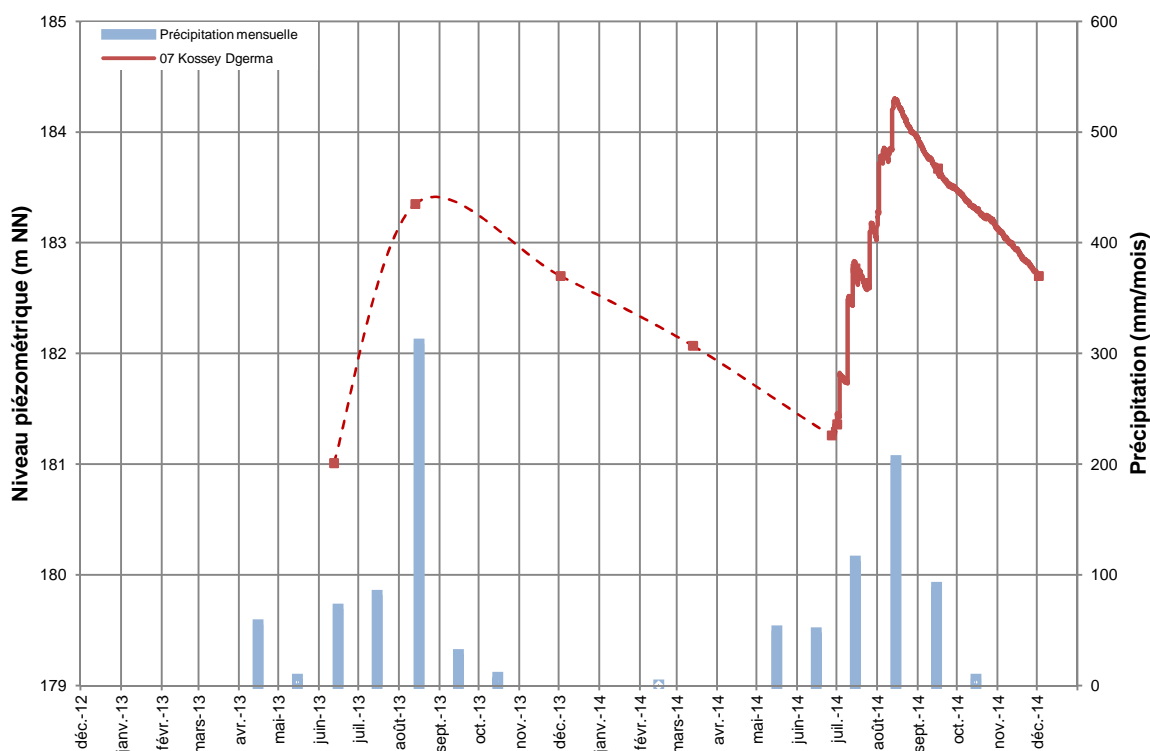


Figure 17 : Niveau piézométrique mesuré à N°07 Kossey Dgerma et précipitation mensuelle mesurée à Niamey aéroport

Les mesures effectuées dans le cadre du projet montrent que les variations du niveau statique dans le socle sont plus intenses dans les forages les plus proches au fleuve Niger (Figure 18) et ne dépendent pas de la profondeur de la nappe comme l'avait conclu Boubakar Hassane (2010). Ce sont les points d'eau N°7 (Kossey Dgerma), N°53 (Goudel Tassiba) et N°41 (Gamkalley Gollé) sur la rive gauche, ainsi que N°74 (École Agronomie) sur la rive droite.

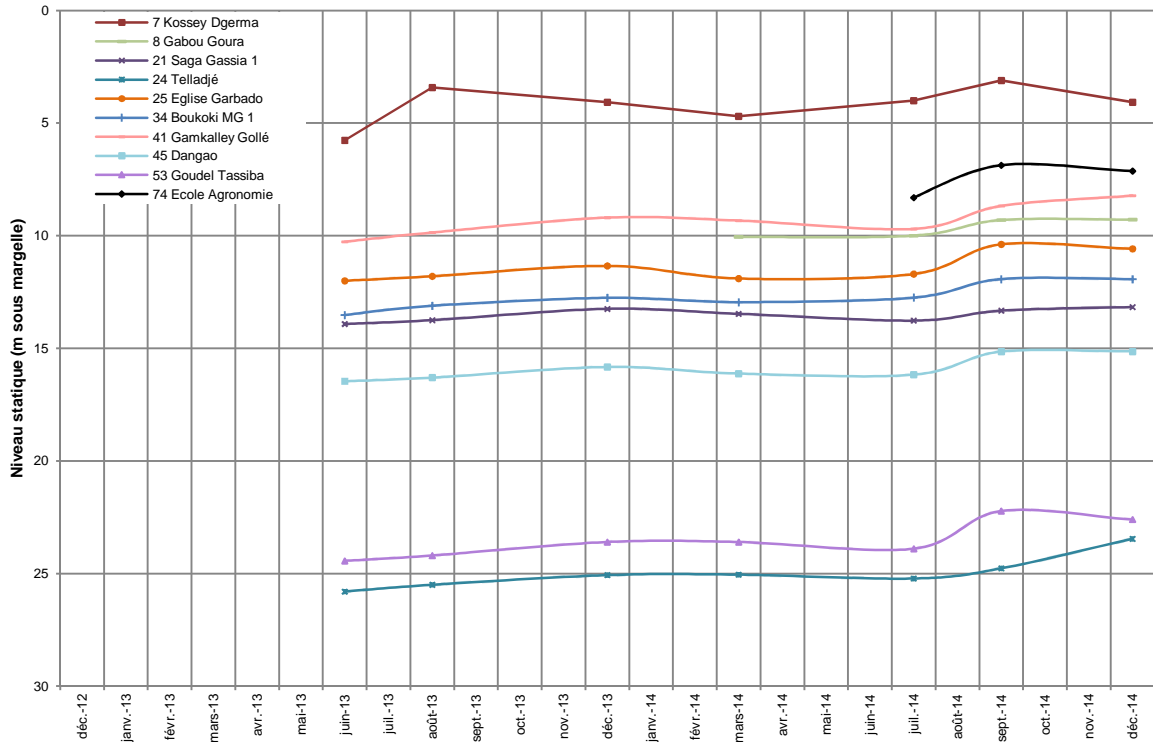


Figure 18. Variation de niveau statique

Cinq piézomètres supplémentaires concernant le socle ont été installés fin juin 2014 sur la rive droite du fleuve. Les niveaux piézométriques sont représentés dans la Figure 19. La période considérée est trop courte pour trouver des effets importants. Toutefois, il est clair que le piézomètre N°65 Saga Gourma 1 est affecté par le pompage.

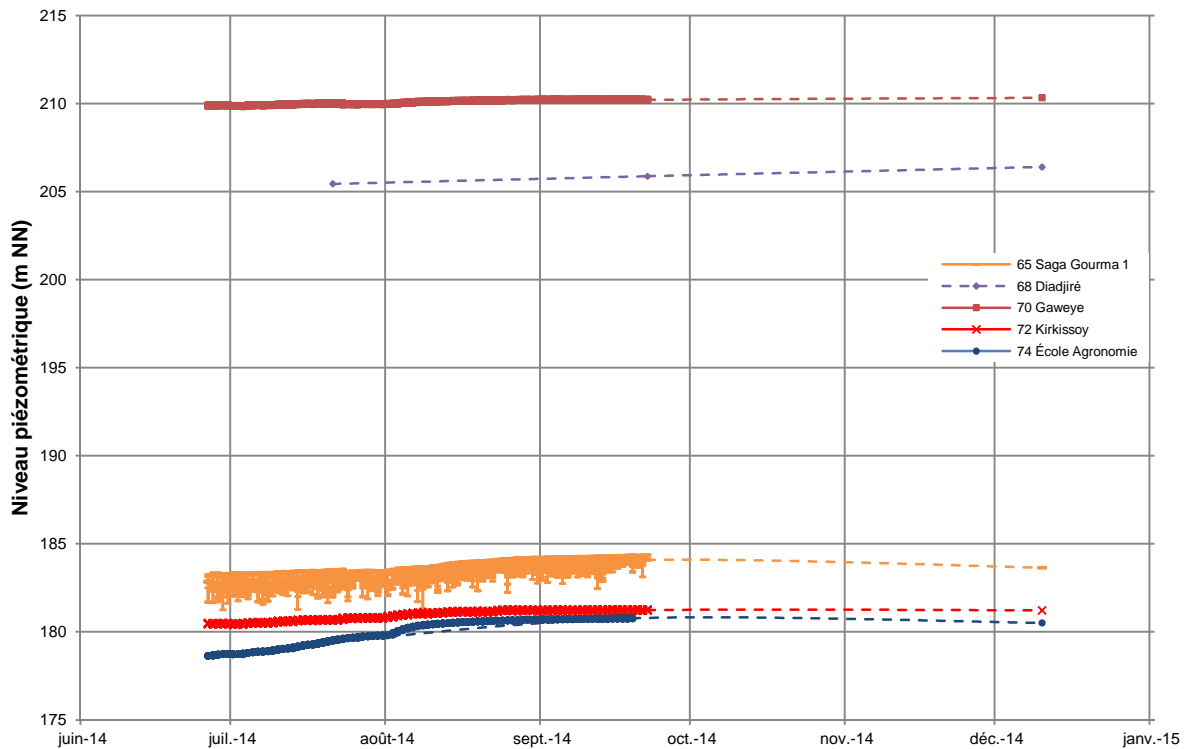


Figure 19 : Niveaux piézométriques des nouveaux piézomètres installés sur la rive droite du fleuve Niger

La carte piézométrique pour l'aquifère socle faite avec les mesures de décembre 2014 est représentée sur la Figure 20. Les courbes de niveau indiquent une pente beaucoup plus forte sur la rive gauche que sur la rive droite. Ainsi, elles confirment les résultats des pompages d'essai qui montraient une conductivité hydraulique beaucoup moins importante sur la rive gauche. L'écoulement de l'eau se fait de la nappe souterraine vers le fleuve Niger qui, dans la zone d'étude, serait la décharge de l'aquifère.

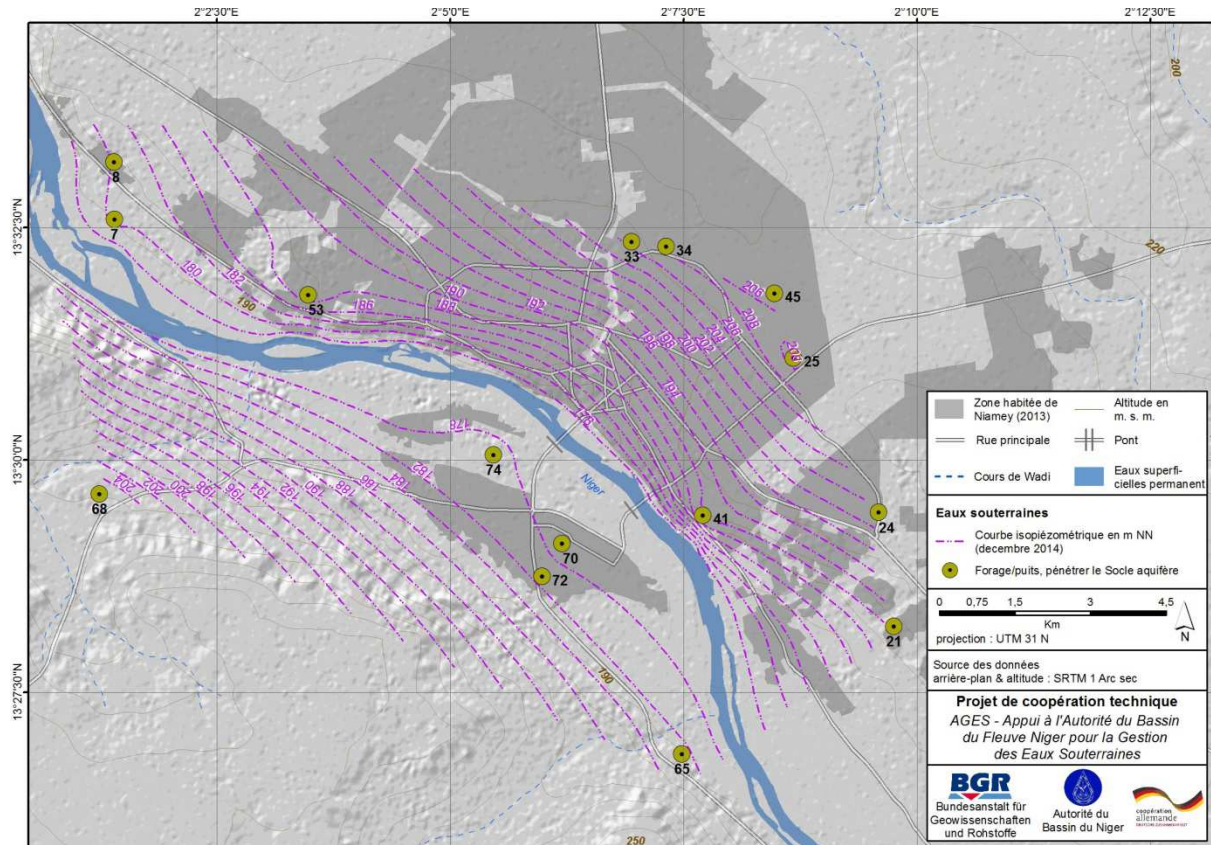


Figure 20 : Carte piézométrique pour l'aquifère socle

4.1.1 Aquifère CT

Les niveaux piézométriques dans le CT ainsi que ceux du fleuve Niger mesurés au cours des campagnes sont représentés dans la Figure 21.

Une montée des niveaux piézométriques entre juin et août 2013 est observée dans la plupart des piézomètres (Figure 21). Elle arrive à environ 1,0 m à N° 13 Kariel et N° 48 Kongou Saboncare et à quelques 0,8 m dans plusieurs autres points d'eau (N°3.1 Tondidia Peul, N°22 Saga Gassia 2, N°43 Bassora et N°52 Kongou Gonga). Cette montée est suivie par une faible descente plus au moins constante jusqu'à une nouvelle montée de juillet à septembre 2014. En sachant que l'aquifère CT dans la zone d'étude n'est pas en contact avec le fleuve Niger, les montées du niveau correspondent aux saisons de pluie et sont évidemment le résultat d'une recharge directe par précipitation.

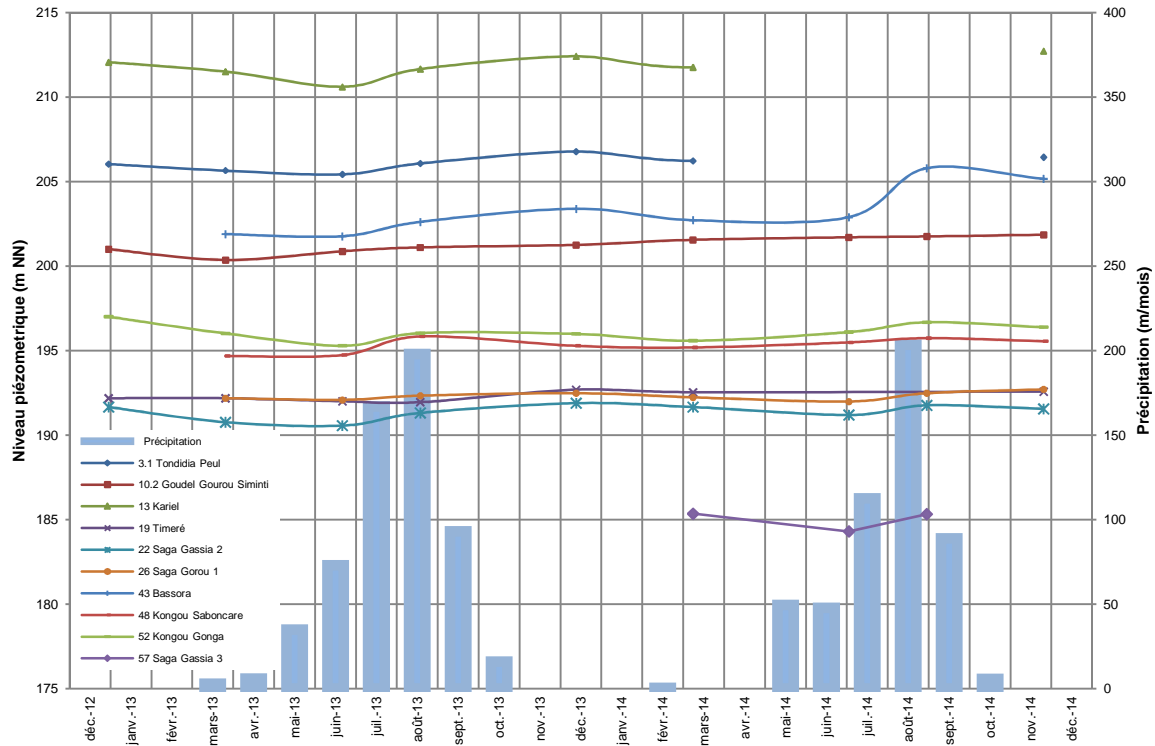


Figure 21 : Niveau piézométrique dans le CT pour la période décembre 2012 – décembre 2014

Il faut noter que le niveau piézométrique dans le piézomètre N°10.2 Gourel Gourou Siminti augmente progressivement depuis mars 2013 et a pourtant un comportement particulier qui ne correspond ni à une recharge par précipitation ni à une recharge par le fleuve Niger. Une autre explication pourrait être que, après une extraction intense entre décembre 2012 et juin 2013, le puits a été abandonné et le niveau d'eau récupère de façon permanente, mais ce n'est qu'une supposition parce que les données des débits d'extraction ne sont pas disponibles. Dans un même temps, le piézomètre N°43 Bassora (Figure 21) montre une réaction très importante à la période de pluie de 2014. Elle est beaucoup plus importante que dans les autres piézomètres. La raison pourrait être soit une recharge locale ou une erreur dans la mesure du niveau en septembre 2015.

La carte piézométrique pour l'aquifère CT faite avec les mesures de décembre 2014 sans tenir en compte le piézomètre N°43 Bassora est représentée sur la Figure 22. Les courbes de niveau indiquent un écoulement de l'eau souterraine du nord-ouest vers le sud-est, plus au moins parallèle au cours du fleuve Niger avec un gradient d'environ 0,0007 (70 cm par km).

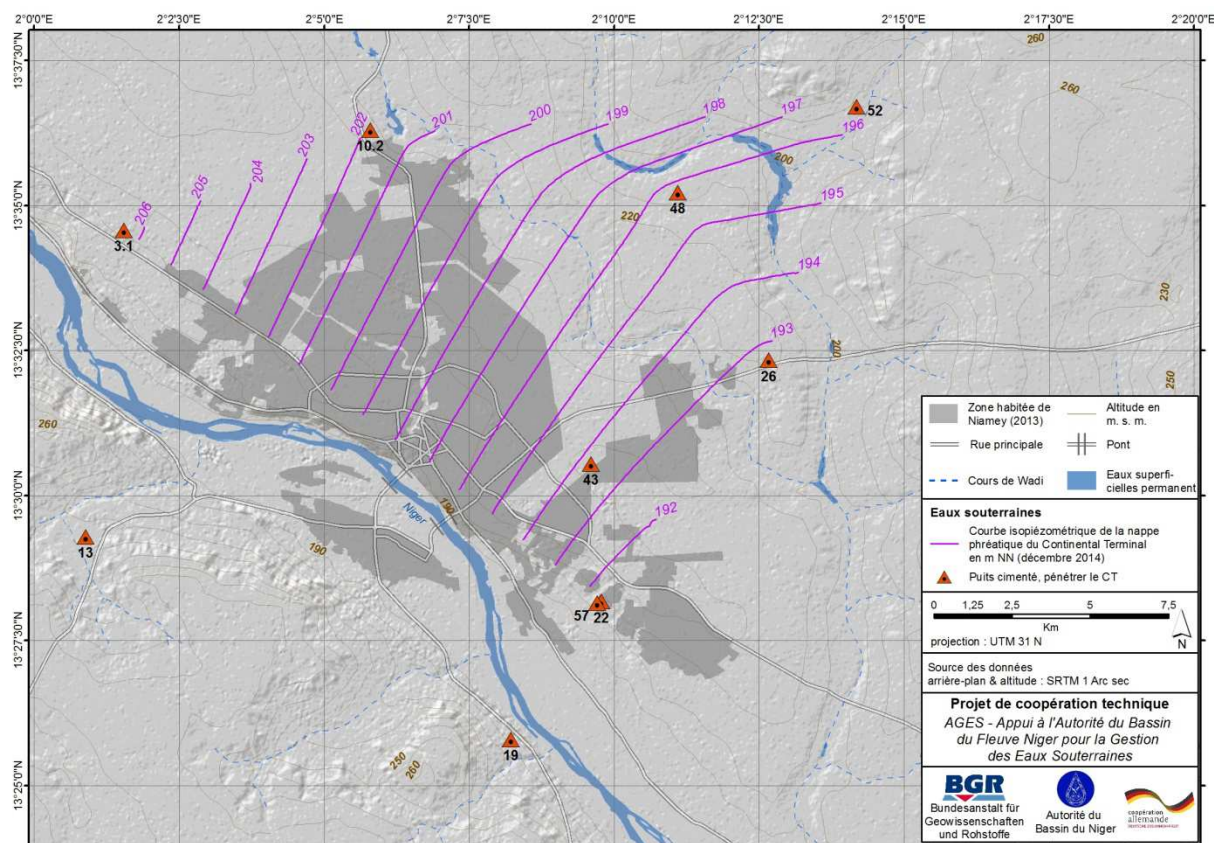


Figure 22 : Carte piézométrique pour l'aquifère CT en décembre 2014

4.1.3 Aquifère alluvial

Les niveaux piézométriques dans l'aquifère alluvial ainsi que ceux du fleuve Niger mesurés au cours des campagnes sont représentés dans la Figure 23. Les piézomètres les plus proches du fleuve Niger (voir Figure 12), N°06 Lossa Gougou (environ 1 km) et N°16 Lamordé (environ 0,5 km), montrent une recharge de la nappe par le fleuve. Mais ce n'est pas le cas pour les piézomètres N°17 Kangel (à 1,3 km du fleuve) et N° 20 Saguia (2,5 km). Ils réagissent plutôt à la précipitation (Figure 24).

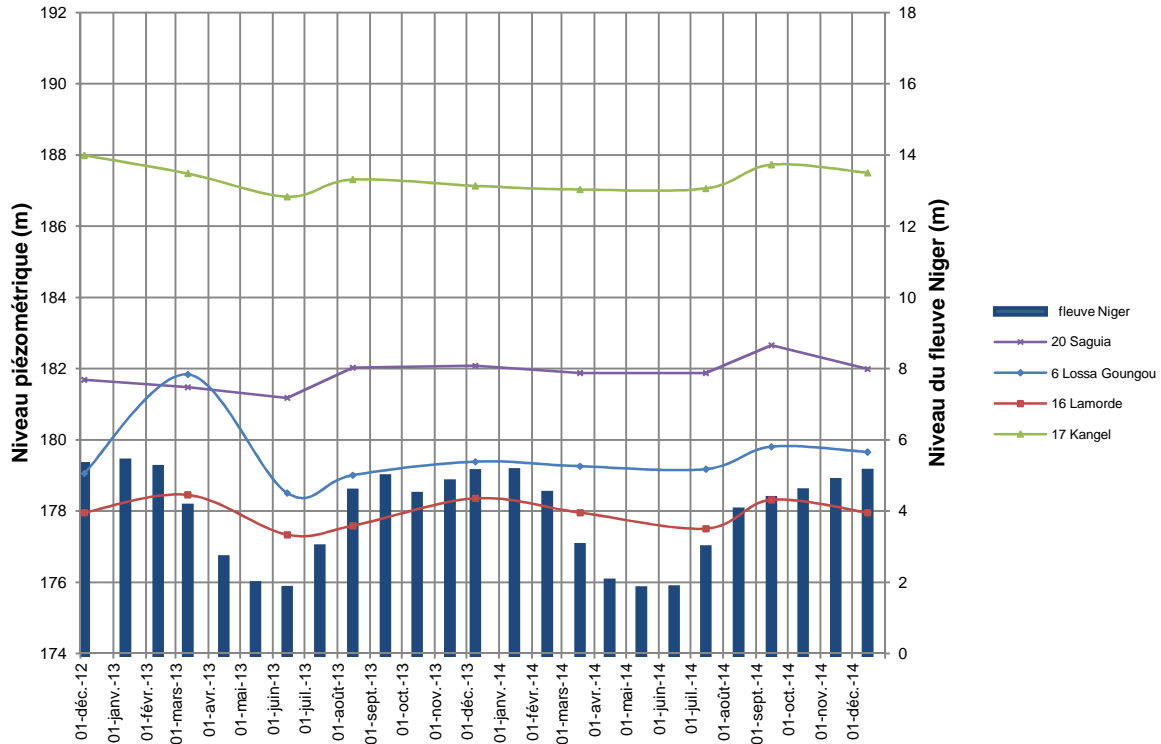


Figure 23 : Niveau piézométrique dans l'aquifère alluvial pour la période décembre 2012-mars 2014 en relation avec les hauteurs du fleuve Niger

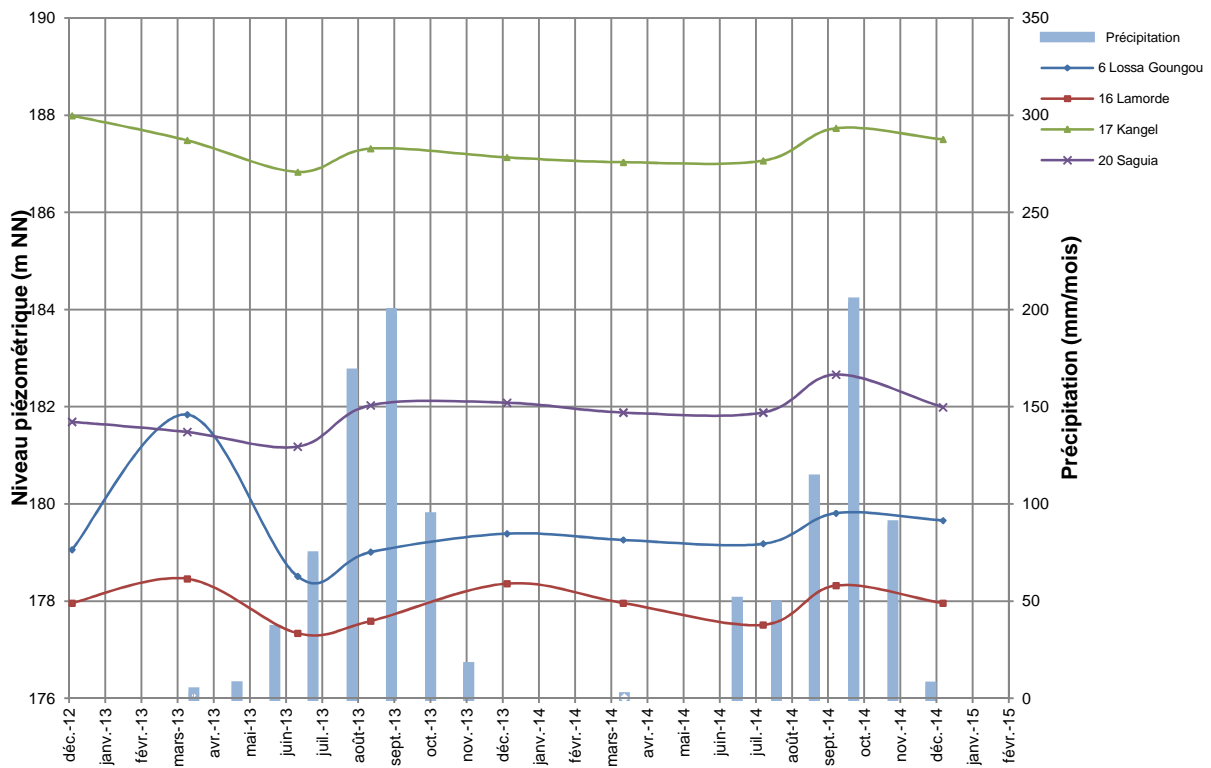


Figure 24 : Niveau piézométrique dans l'aquifère alluvial pour la période décembre 2012-décembre 2014 en relation avec la précipitation

Quatre points d'eau mesurés montrent un niveau minimal en juin 2013 suivi par une remontée en août 2013. En suite, le niveau décline lentement jusqu'à juillet 2014, où une nouvelle remontée à lieu (Figure 23).

Les deux piézomètres les plus proches au fleuve Niger (N°06 Lossa Goungou et N°16 Lamorde) présentent une variation de niveaux piézométriques très forte. Ces variations suivent les variations du fleuve Niger plutôt que celles de la pluviométrie (voir Figure 24). Cela montre que la connexion entre le fleuve Niger et l'aquifère alluvial est manifeste.

4.2. Paramètres physico-chimiques

Les tableaux ci-dessous (Tableau 3) montrent les résultats statistiques des paramètres mesurés dans les différents aquifères et l'eau de surface comparés avec les teneurs limites de l'OMS. Les chiffres en gras indiquent les valeurs supérieures aux teneurs limites de l'OMS.

Tableau 3. Synthèse statistique des résultats chimiques

Param.	Unité	OMS	Socle			CT			Alluvial			Eaux de surface		
			Min.	Max.	Éc.	Min.	Max.	Éc.	Min.	Max.	Éc.	Min.	Max.	Éc.
pH		6,5 - 9,2	6,00	8,29	0,43	5,40	7,40	0,47	6,16	8,09	0,40	6,84	8,73	0,44
EC	µS/cm	1500	192	2160	367	24	429	106	199	1145	303	40	112	20
K	mg/l		0,4	5,8	1,4	0,2	11,4	3,6	0,3	11,4	3,8	1,4	4,5	1,0
Na	mg/l	200	6,7	116,0	26,3	1,5	57,9	15,8	8,1	114,0	33,9	1,4	7,4	1,6
Mg	mg/l		0,38	201,00	35,33	0,10	8,67	2,52	0,33	42,30	12,52	1,25	3,21	0,54
Ca	mg/l		3,56	95,90	17,30	1,97	46,30	8,11	5,42	70,90	24,97	3,18	4,80	0,50
Cl	mg/l	250	13,9	186,0	31,9	0,6	5,8	1,1	1,7	120,0	25,9	0,1	3,1	0,8
SO ₄	mg/l	500	1,9	502,0	59,2	0,2	93,0	27,4	1,0	79,1	16,1	0,0	2,2	0,5
HCO ₃	mg/l		40,4	550,0	134,9	7,1	179,0	36,8	15,6	469,0	177,7	21,0	50,2	8,4
Fe (II)	mg/l	0,3	l.d.	1,90	0,21	0,01	1,77	0,22	l.d.	0,15	0,02	0,05	0,42	0,09
Mn	mg/l	0,2 - 0,4	l.d.	0,53	0,12	0,00	0,74	0,11	0,00	0,64	0,13	0,00	0,03	0,01
NO ₃	mg/l	50	0,02	613	108	0,02	55	15	0,26	70	28	0,01	4	1
NH ₄	mg/l	0,2	l.d.	2,08	0,51	l.d.	5,02	0,76	l.d.	0,20	0,04	l.d.	0,07	0,02
NO ₂	mg/l	0,2 - 3	l.d.	8,86	1,53	l.d.	7,73	1,03	l.d.	0,65	0,16	l.d.	0,18	0,05
PO ₄	mg/l		0,04	0,89	0,20	l.d.	0,49	0,09	l.d.	1,06	0,34	l.d.	0,07	0,01
Br	mg/l		l.d.	0,13	0,03	0,00	0,07	0,01	0,01	0,34	0,07	l.d.	0,07	0,02
F	mg/l	1,5	l.d.	3,1	0,6	0,0	0,5	0,1	0,0	1,2	0,2	0,0	0,2	0,0
Al	mg/l	0,2	l.d.	0,15	0,03	0,01	0,17	0,03	0,00	0,11	0,03	0,03	0,56	0,10
As	mg/l	0,01	l.d.	0,02	-	l.d.	l.d.	-	l.d.	0,15	0,05	l.d.	l.d.	-
BO ₂	mg/l		l.d.	0,85	0,23	l.d.	0,09	0,02	l.d.	0,14	0,04	l.d.	0,08	0,02
Ba	mg/l	0,7	0,001	0,157	0,043	0,004	0,188	0,039	0,006	0,246	0,081	0,029	0,057	0,006
Be	mg/l		l.d.	l.d.	-	l.d.	0,0006	-	l.d.	l.d.	-	l.d.	l.d.	-
Cd	mg/l	0,003	l.d.	0,006	0,002	l.d.	l.d.	-	l.d.	l.d.	-	l.d.	l.d.	-
Co	mg/l		l.d.	0,012	-	l.d.	0,005	0,001	l.d.	l.d.	-	l.d.	l.d.	-
Cr	mg/l	0,05	l.d.	l.d.	-	l.d.	0,007	0,002	l.d.	0,003	-	l.d.	l.d.	-
Cu	mg/l	0,2	l.d.	0,009	0,002	l.d.	0,008	0,002	l.d.	0,004	0,001	l.d.	0,006	0,001
Li	mg/l		l.d.	0,065	0,018	l.d.	0,007	0,000	l.d.	0,011	0,003	l.d.	l.d.	-
Ni	mg/l	0,07	l.d.	0,018	0,004	l.d.	0,019	0,000	l.d.	l.d.	-	l.d.	l.d.	-
Pb	mg/l	0,01	l.d.	0,12	0,03	l.d.	l.d.	-	l.d.	l.d.	-	l.d.	l.d.	-
Sc	mg/l		l.d.	l.d.	-	l.d.	0,001	-	l.d.	l.d.	-	l.d.	0,001	-
SiO ₂	mg/l		16,90	84,40	13,45	12,40	59,30	9,99	16,70	78,60	17,47	5,60	14,60	2,74
Sr	mg/l		0,043	1,580	0,259	0,012	0,368	0,051	0,021	0,610	0,188	0,033	0,070	0,009
Ti	mg/l		l.d.	0,003	0,001	l.d.	0,003	0,001	l.d.	0,002	0,000	l.d.	0,004	-
V	mg/l		l.d.	0,020	0,005	l.d.	0,027	0,007	l.d.	0,026	0,009	l.d.	0,003	-
Zn	mg/l		0,008	3,870	0,675	0,011	0,423	0,079	0,008	0,321	0,079	0,008	0,219	0,072
δ ¹⁸ O	‰		-4,99	-0,11	1,23	-4,79	-3,30	0,35	-3,95	-1,07	0,94	-3,07	0,42	1,68
δ ² H	‰		-31,62	-8,28	6,19	-28,81	-19,47	2,05	-23,46	-12,66	3,65	-23,48	-6,25	7,46

Note : OMS : limites de l'OMS

Éc : Écarte

l.d. : limite de détection de la méthode utilisée

valeurs en gros surpassent la limite de l'OMS

4.2.1 pH

Le pH est l'un des paramètres les plus souvent mesurés, même si ces valeurs ont normalement peu d'implication sur la santé humaine. Selon les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'eau potable doit avoir des valeurs pH entre 6,5 et 8,5 (OMS, 2011). Ces limites sont basées sur des considérations techniques (corrosion) et l'intervalle peut être étendu jusqu'à 9,5 si il n'y a pas de systèmes de distribution (OMS, 2011).

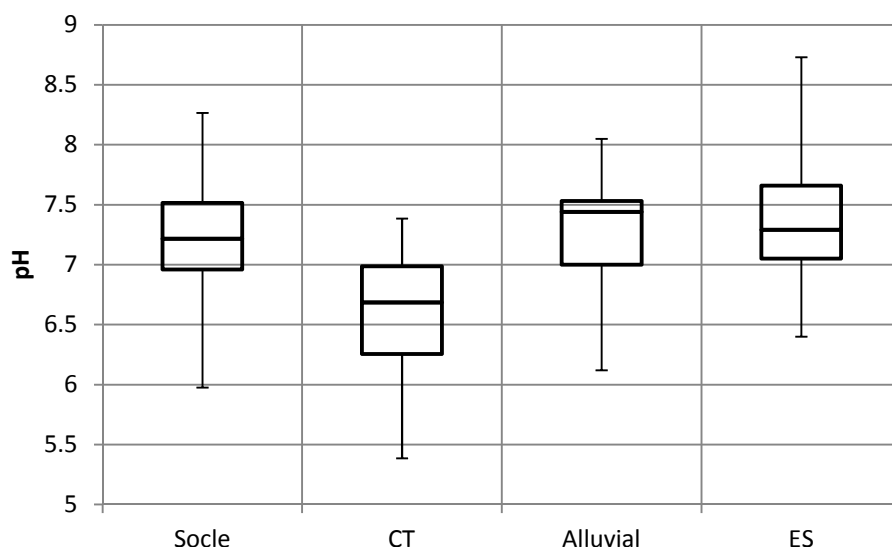


Figure 25 : Statistique des valeurs de pH mesurés pendant la période rapportée (décembre 2012 à décembre 2014) (ES = eaux de surface)

On peut remarquer une différence, bien que faible, entre les valeurs de pH des différents aquifères (Figure 25). L'eau du CT est la plus acide de la région avec un pH qui varie entre 5,4 et 7,4 et une médiane de 6,7. Le pH dans le socle varie entre 6,0 et 8,3 (médiane 7,2) et dans l'aquifère alluvial entre 6,2 et 8,1 (médian 7,5). L'eau de surface a un pH qui varie entre 6,4 et 8,7 avec une médiane de 7,3.

Le pH donne une idée du type de recharge pour chaque aquifère. Le fait que les aquifères alluvial et socle montrent un pH similaire à celui de l'eau de surface permet de conclure qu'ils reçoivent une recharge du fleuve Niger. Le Continental Terminal quant à lui est rechargé par une eau de précipitation ce qui a pour conséquence un pH beaucoup plus acide. Une valeur de pH de 6,4 pour l'eau de précipitation à Niamey a été mesurée en juillet 2014.

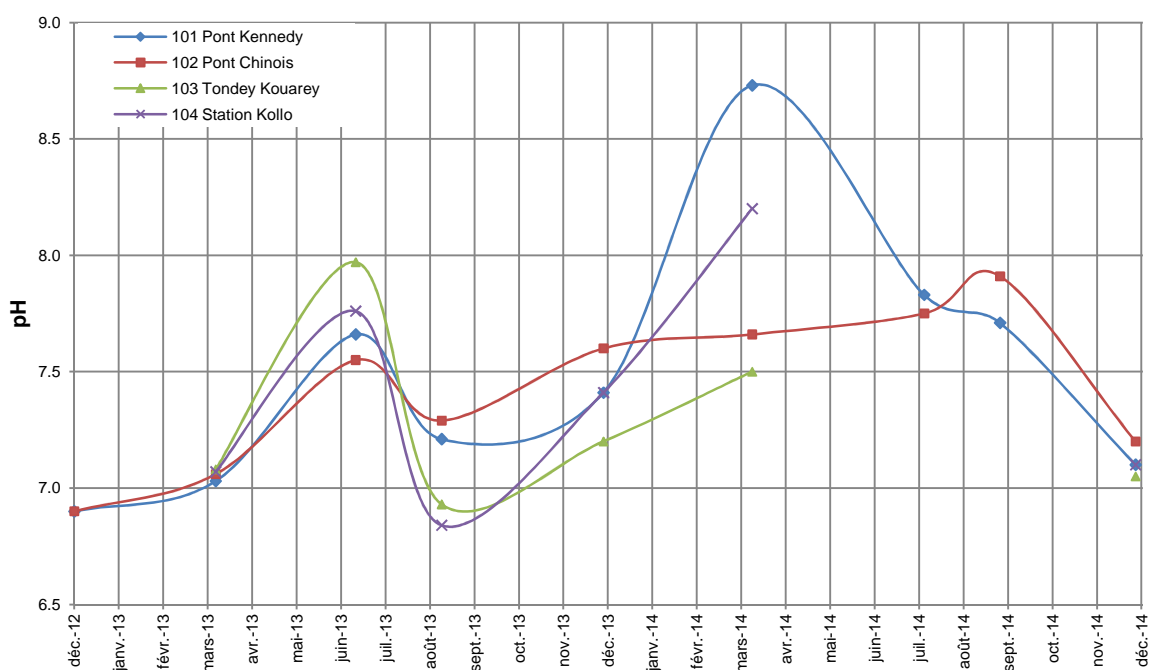


Figure 26 : pH mesurés pour l'eau de surface dans des différentes stations

Dans sa thèse de doctorat, Alhou (2007) conclut que les variations de pH dans le fleuve Niger à Niamey ne sont pas importantes. Contrairement à cette conclusion, les valeurs de pH des eaux de surface mesurées par le projet montrent des différences saisonnières considérables (Figure 26). Le pH est neutre (environ 7) et similaire pour tous les points de mesure au début du suivi, pendant les très hautes eaux de la période 2012-2013. En juin 2013 (période de basses eaux), les valeurs augmentent vers des valeurs entre 7,55 (Pont Chinois) et 7,97 (Station Tondey Kouarey) pour retourner vers un pH neutre en août 2013, lorsque la nouvelle période des hautes eaux commence. Les valeurs de pH mesurées pendant les basses eaux de la période 2013-2014 indiquent une eau basique et varient entre 7,50 à la Station Tondey Kwarey et 8,73 au Pont Kennedy.

Il est étonnant que le pH à la station Pont Chinois ne suive pas les variations saisonnières montrées par les eaux de surface dans le Pont Kennedy et reste presque constante de décembre 2013 à septembre 2014. Ce comportement peut être expliqué par des rejets acides déversés dans le fleuve entre Pont Kennedy et Pont Chinois.

En décembre 2014, lors de la nouvelle période des hautes eaux, le pH est presque neutre pour les trois stations mesurées.

La distribution des valeurs de pH dans la zone d'étude en juin 2013 est représentée dans la Figure 27 à continuation.

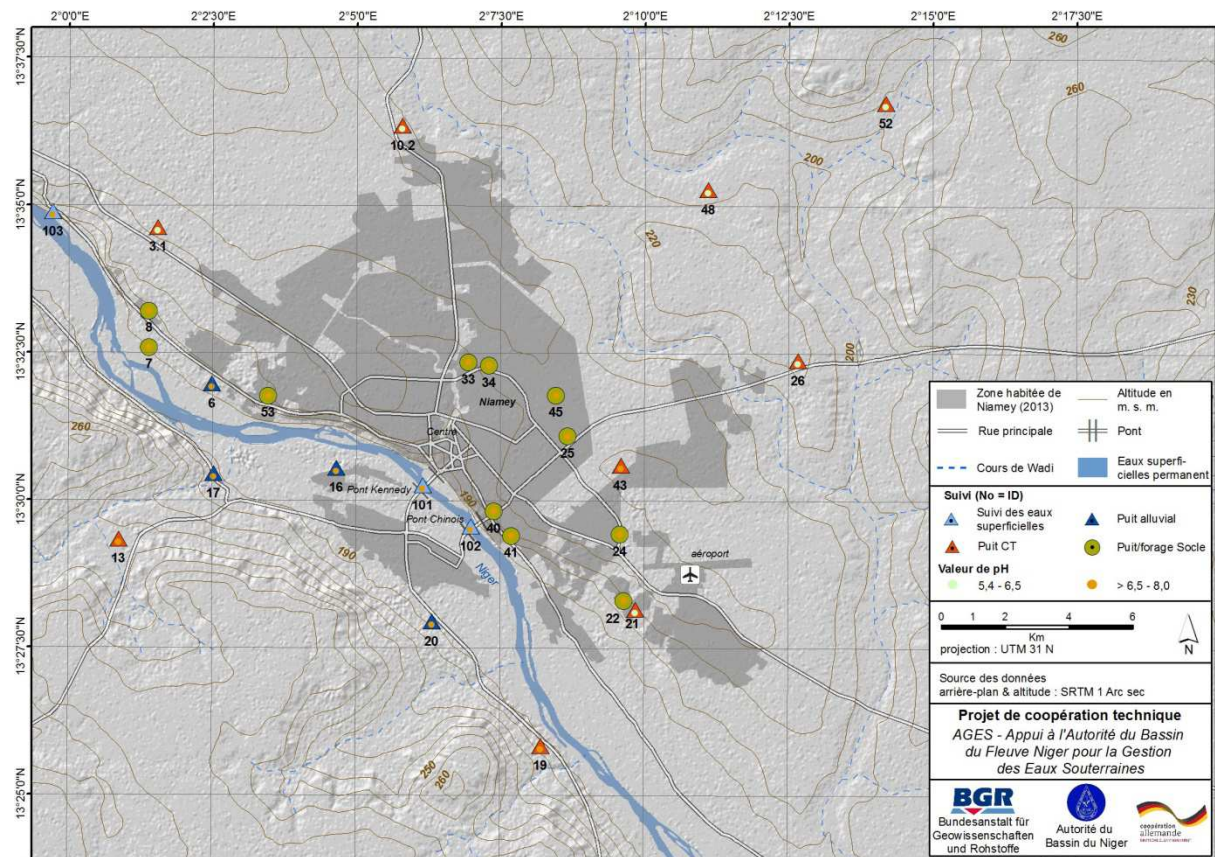


Figure 27. Carte de distribution du pH dans la zone d'étude en juin 2013

4.2.2 Conductivité électrique

La conductivité électrique (CE) est associée à la teneur de substances dissoutes (contenant des ions) totale, c'est-à-dire qu'elle est un indicateur de la minéralisation de l'eau. L'OMS ne donne pas une limite pour la CE, mais en général valeurs inférieures à 1,500 mg/l indiquent un contenu faible de minérales dans l'eau. D'après Hölting & Coldewey (2008), les eaux de pluie ont une conductivité électrique entre 5 μ S/cm et 30 μ S/cm, les eaux souterraines

douces 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, les eaux souterraines minéralisées 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et l'eau de mer 45.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 55.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La conductivité électrique se comporte différemment selon l'aquifère considéré. Dans le socle, elle varie entre 192 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 2160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une médiane de 504 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figure 28). Les valeurs extrêmes correspondent au N°70 (Gaweye Centre de Santé), où la conductivité électrique est d'environ 2140 $\mu\text{S}/\text{cm}$, suivies par ceux de N°7 (Kossey Dgerma) et N°8 (Gabour Goura) dans les environs de 950 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Dans l'aquifère alluvial, la conductivité électrique varie entre 199 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1145 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une médiane de 367 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le CT montre des valeurs beaucoup plus faibles avec une variation entre 24 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 596 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une médiane de 117 $\mu\text{S}/\text{cm}$ qui reflète de nouveau une recharge d'origine pluviométrique, car l'eau de pluie est moins minéralisée. La conductivité électrique mesurée pour l'eau de précipitation à Niamey est de 69 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La conductivité électrique dans l'eau de surface varie entre 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 112 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une médiane de 59 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

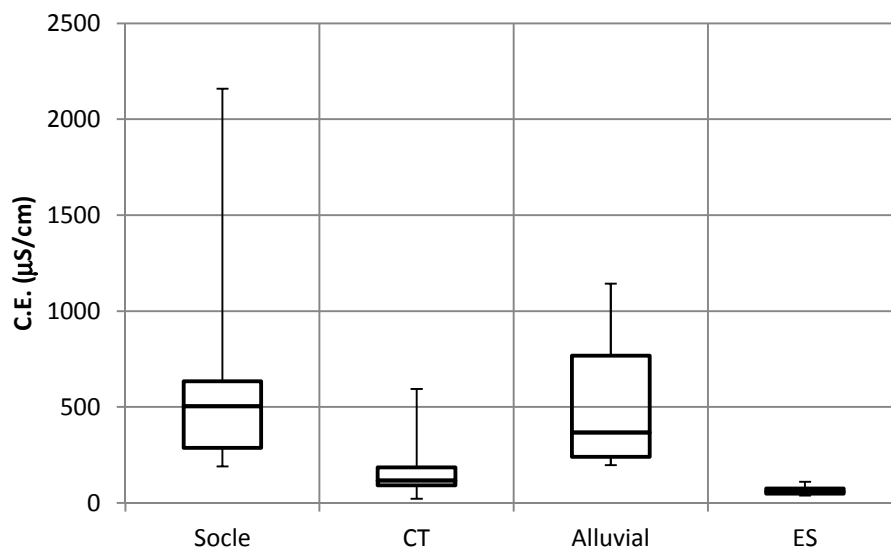


Figure 28 : Statistique des valeurs de conductivité électrique mesurées pendant la période rapportée (décembre 2012 à décembre 2014) (ES = eaux de surface)

La distribution des valeurs de la conductivité électrique dans la zone d'étude est représentée dans la Figure 29 pour juin 2013.

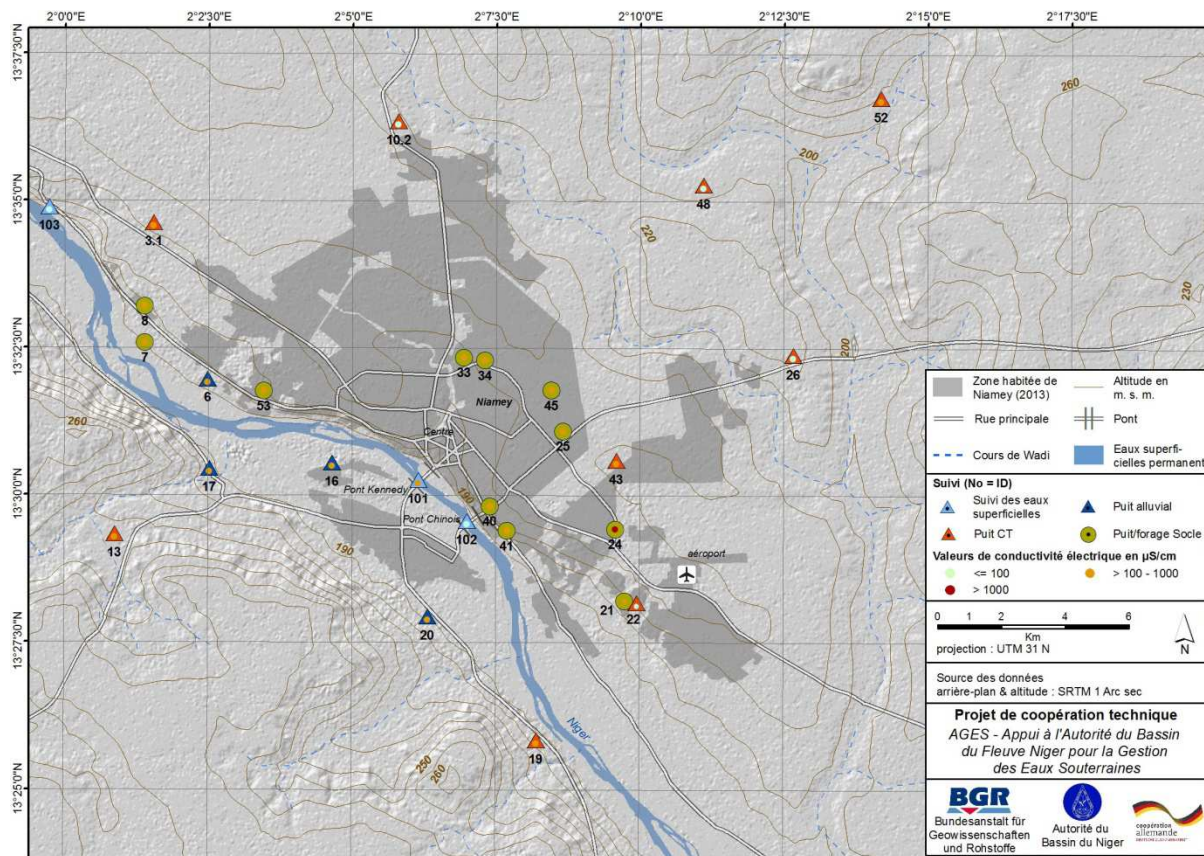


Figure 29 : Carte montrant la distribution des conductivités électriques en juin 2013

La conductivité électrique des eaux du fleuve Niger montre des différences saisonnières (Figure 30). Les valeurs de CE des eaux de surface sont beaucoup plus élevées pendant les basses eaux (avril – juillet) que pendant les hautes eaux (août – février) où le volume du fleuve est, dans sa majorité, composé par des eaux de précipitation moins minéralisées.

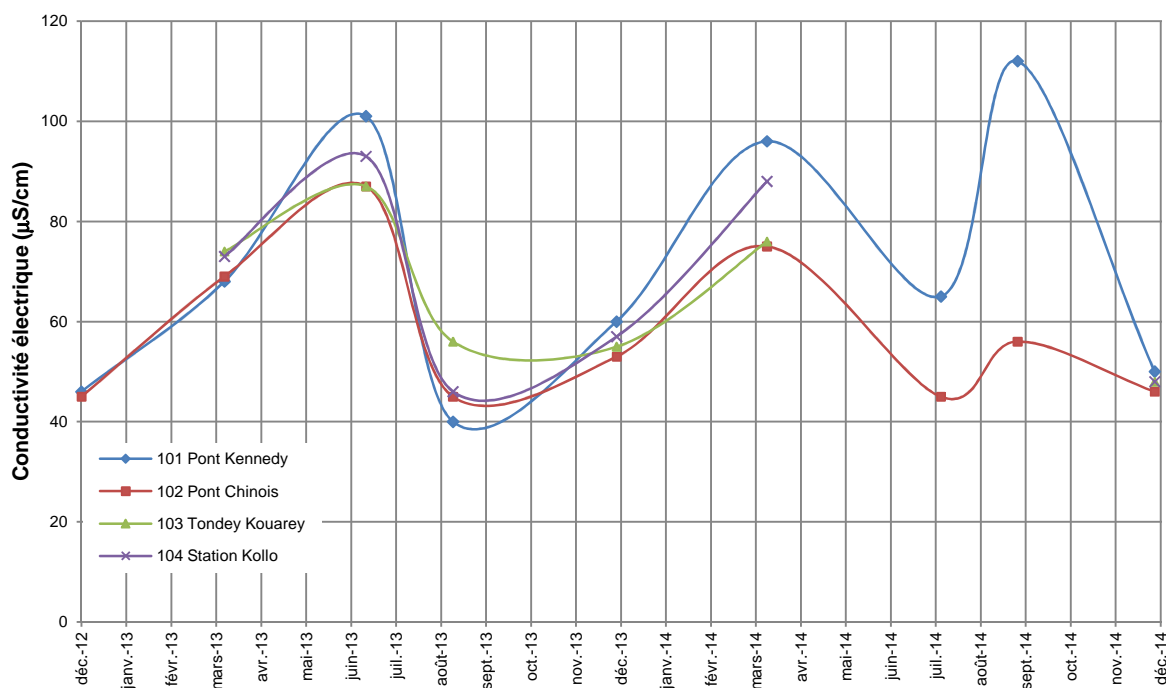


Figure 30 : Variation saisonnière de la conductivité électrique dans l'eau de surface

Alhou (2007) rapporte que la conductivité électrique augmente pendant la saison des pluies car le ruissellement transporte toute sorte de déchets dans le fleuve. Cet effet n'est pas confirmé pour la saison de pluie en 2013, mais pour celle de 2014. Il semblerait que l'augmentation de la conductivité au début de la saison des pluies dépend de l'importance des événements pluvieux. La saison pluvieuse en 2013 était beaucoup plus importante que celle de 2014.

4.2.3 Composition chimique de l'eau

La composition de chaque eau dépend de la vitesse d'écoulement (où du temps de permanence de l'eau dans l'aquifère) et la composition de l'aquifère. La minéralisation des eaux souterraines augmente avec le temps de séjour dans l'aquifère, si le milieu contient des matériaux réactifs. L'eau subit des échanges d'anions et de cations selon leur abondance dans le sous-sol. Ca et Mg sont échangés par Na; HCO_3 par SO_4 et/ou Cl, bien que l'échange d'anions soit plutôt rare. Le diagramme de Piper est un bon moyen de présenter les différentes compositions chimiques des eaux.

Pour mieux comprendre les relations entre les aquifères et/ou entre l'eau de surface, l'eau de précipitation et les aquifères, les résultats sont représentés dans des diagrammes de Piper pour chaque aquifère. Les eaux de précipitation ont été échantillonnées à partir d'un pluviomètre collecteur installé sur le toit du bâtiment de l'ABN.

Aquifère socle :

La majorité des échantillons correspond à des eaux bicarbonatées calciques magnésiennes, mais cinq échantillons montrent une eau sulfatée nitraté calcique magnésienne (Figure 31 à gauche).

Si la présence de nitrate n'est pas considérée comme naturelle mais comme la conséquence d'une pollution humaine, il n'est pas pris en compte dans la représentation et donc n'apparaît pas dans le diagramme Piper, à droite dans la Figure 31. Dès lors, seuls les échantillons correspondants au point d'eau N°24 (Telladjé) montrent une eau sulfatée calcique magnésienne.

En général les différences saisonnières ne sont pas significatives, à l'exception des points d'eaux N°34 (Boukoki Mairie), N°24 (Telladjé) et N°25 (Route Filingué).

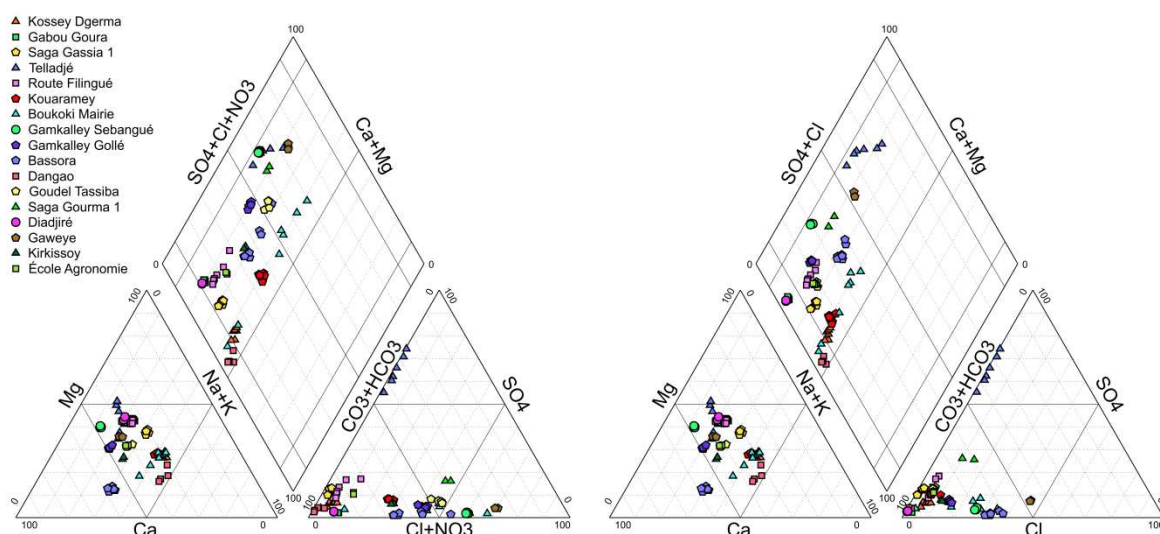


Figure 31 : Diagramme Piper pour l'aquifère socle avec nitrate à gauche et sans considérer le nitrate à droite

Aquifère CT :

La majorité des échantillons montrent des eaux bicarbonatées calciques magnésiennes. Deux échantillons indiquent des eaux sulfatées nitratées calciques magnésiennes et deux autres eaux du type sulfaté nitraté sodique potassique (Figure 32 à gauche). Si le nitrate est écarté (Figure 32 à droite), les échantillons correspondants au point d'eau N°13 (Kariel) restent dans le secteur sulfaté calcique magnésien, mais ceux du point d'eau N°52 (Kongou Gonga) changent et passent au secteur bicarbonaté sodique potassique.

Des variations saisonnières importantes ne sont visibles que pour Kongou Gonga (N°52) et Goudel Gourou Siminti (N°10.2).

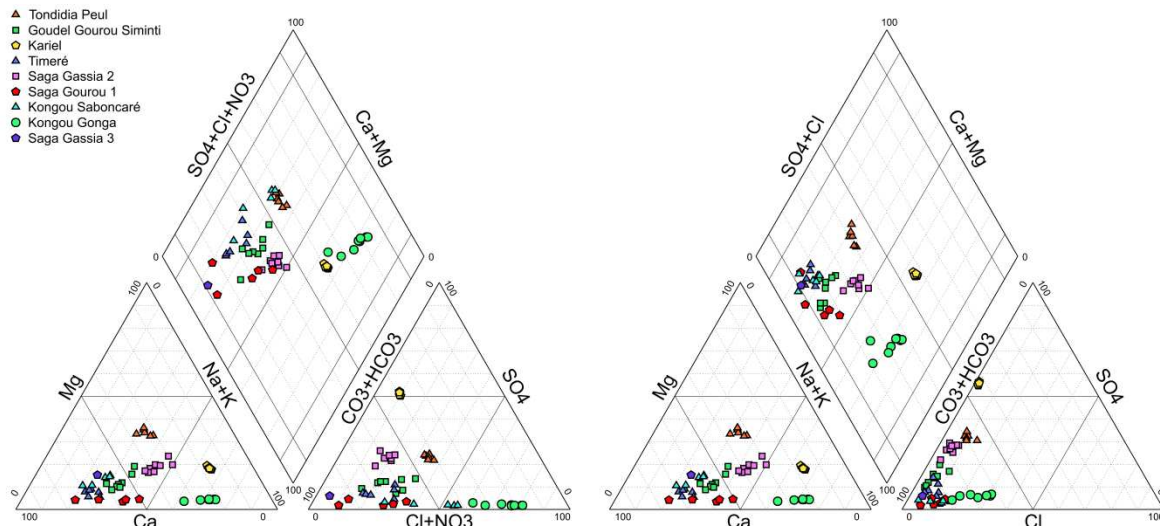


Figure 32 : Diagramme Piper pour l'aquifère CT avec nitrate à gauche et sans considérer le nitrate à droite

Aquifère alluvial :

Parmi les quatre points d'eau considérés, trois montrent des eaux dans le secteur bicarbonaté calcique et magnésien et un (N°20 Saguia), dans le secteur bicarbonaté nitraté sodique potassique (Figure 33 à gauche). Cette différence disparaît si le nitrate n'est pas tenu en compte (Figure 33 à droite).

Des variations saisonnières ne sont observées que dans le point d'eau N°16 Lamordé.

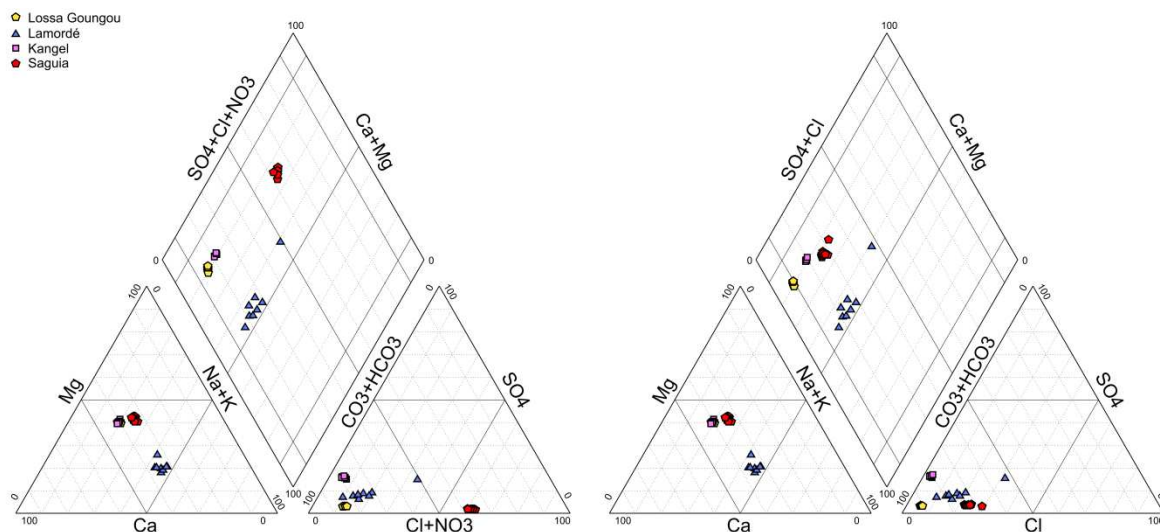


Figure 33 : Diagramme Piper pour l'aquifère alluvial avec nitrate à gauche et sans considérer le nitrate à droite

Eaux de surface :

Les eaux de surface montrent une composition du type bicarbonaté calcique magnésien, similaire à celui de l'eau de précipitation (Figure 34).

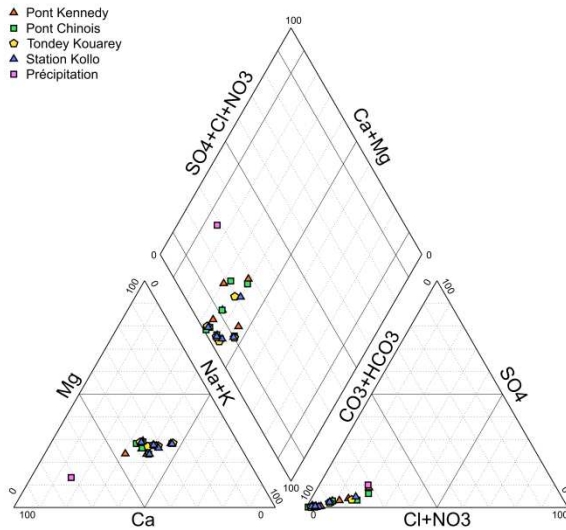


Figure 34 : Diagramme Piper pour les eaux de surface et la précipitation

4.2.4 Fer

Dans des conditions anaérobiques, une forte concentration en fer est possible dans l'eau souterraine. Cependant, une fois en contact avec l'oxygène de l'atmosphère, le fer ferreux s'oxyde en fer ferrique et précipite donnant à l'eau une couleur indésirable. Le fer favorise aussi le développement de fer-bactéries. Ces bactéries acquièrent de l'énergie à partir de l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique et déposent un revêtement dans les tuyaux dans le processus. C'est pour cette raison que l'OMS a fixé une limite de 0,3 mg/l (OMS, 2011).

Les concentrations en fer mesurées dans le socle varient entre 0,002 mg/l et 1,900 mg/l avec une médiane de 0,010 mg/l, dans le CT entre 0,005 mg/l et 0,185 mg/l avec une médiane de 0,020 mg/l et dans l'aquifère alluvial entre 0,003 mg/l et 0,147 mg/l avec une médiane de 0,010 mg/l. Finalement, dans les eaux de surface, la concentration en fer varie entre 0,047 mg/l et 0,415 mg/l avec une médiane de 0,190 mg/l (Figure 35). Les concentrations en fer supérieures à la valeur limite de l'OMS sont trouvées dans le socle et dans l'eau du fleuve Niger.

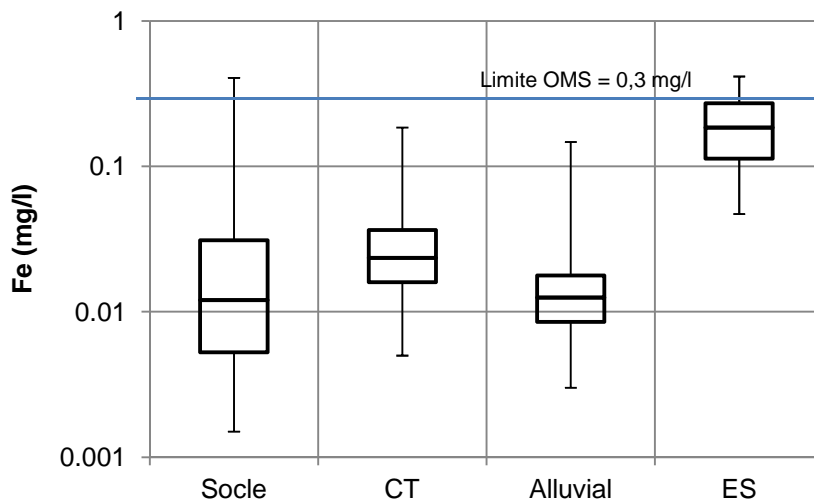


Figure 35 : Statistique des concentrations en Fe mesurées pendant la période reportée (décembre 2012 à décembre 2014) (ES = eaux de surface)

Les différences saisonnières des concentrations en fer ne sont pas significatives dans les aquifères mais dans les stations du fleuve Niger (Figure 36).

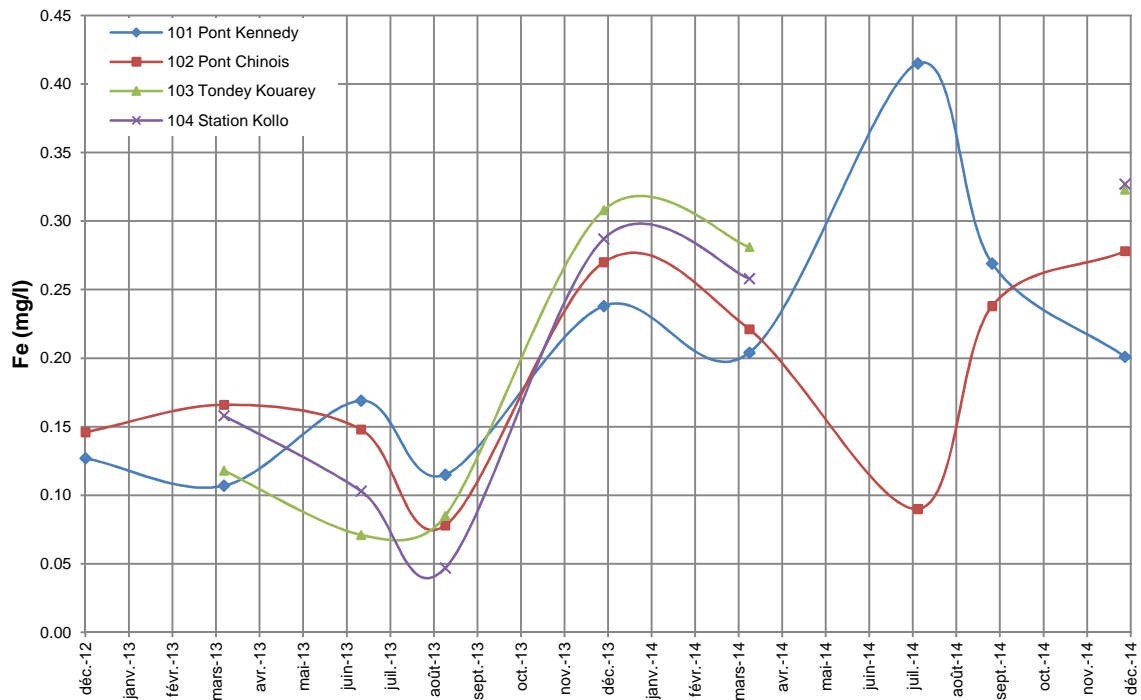


Figure 36 : Variation saisonnière de la concentration en Fe pour les eaux de surface mesurées pendant la période de suivi

Les variations saisonnières des concentrations en fer dans les eaux de surface montrent une certaine corrélation avec la saison des pluies (juillet à septembre). Les valeurs sont significativement plus basses que pendant la saison sèche. Pourtant, entre les valeurs de la saison sèche fin 2012 et celles de la saison sèche fin 2013 il y a une différence frappante : les concentrations de fin 2013 sont quasiment doublées par rapport à celles de fin 2012. Mais la concentration en fer dans la station Pont Kennedy change son allure à partir de mars 2014. En juillet 2014, au lieu de diminuer, la concentration atteint un maximum avec 0,415 mg/l, une valeur quatre fois supérieure à celle du Point Chinois à la même date. Il semblerait qu'une source de fer soit présente dans des déchets jetés dans le fleuve entre ces deux points.

4.2.5 Manganèse

Certaines eaux souterraines soumises à des conditions anaérobiques abritent des taux élevés de manganèse. L'OMS propose une valeur limite de 0,1 mg/l pour des raisons organoleptiques (OMS, 2011).

L'exposition permanente à des concentrations élevées de manganèse a été associée à une déficience intellectuelle et une réduction du quotient intellectuel chez les enfants d'âge scolaire (Bouchard et al., 2010). Pour de bonnes conditions de santé, l'OMS propose une valeur limite de 0,4 mg/l pour le manganèse. Cependant, l'eau potable avec concentrations de manganèse supérieures à 0,05 mg/l ne sont pas acceptées par la population en raison de la coloration de l'eau et son mauvais goût.

Une faible distinction au niveau de la concentration de manganèse peut être observée entre les aquifères considérés (Figure 37). Le socle est l'aquifère qui présente la variation la plus importante, où la concentration de manganèse varie de 0,001 mg/l à 0,527 mg/l avec une médiane de 0,013 mg/l. Pour le CT, la concentration de manganèse varie entre 0,003 mg/l et 0,739 mg/l avec une médiane de 0,012 mg/l. Dans l'aquifère alluvial, elle varie de 0,002 mg/l à 0,642 mg/l avec une médiane de 0,005 mg/l et dans les eaux de surface de 0,002 mg/l à

0,031 mg/l avec une médiane de 0,004 mg/l. Des concentrations supérieures à la limite de l'OMS sont trouvées dans les trois aquifères, mais pas dans l'eau du fleuve Niger.

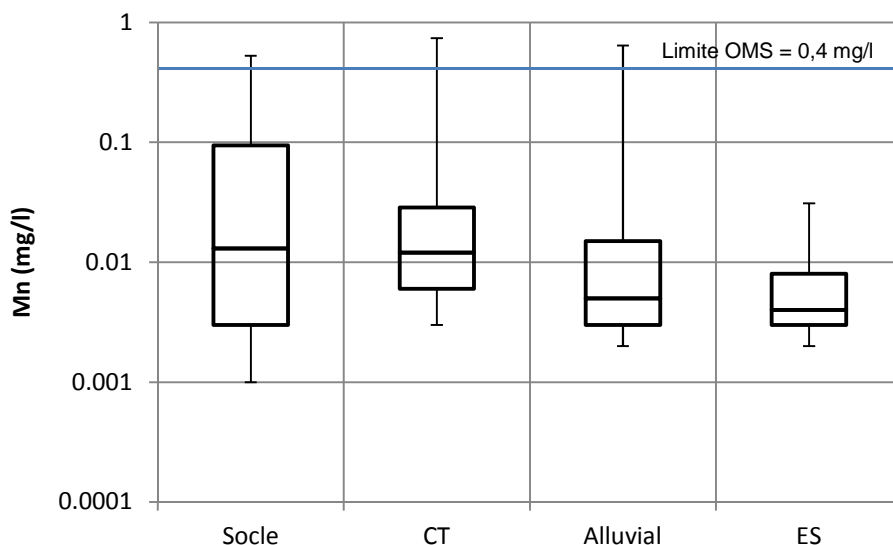


Figure 37 : Statistique des concentrations en manganèse mesurées dans la période rapportée (décembre 2012 à décembre 2014) (ES = eaux de surface)

Seulement six échantillons ont montré des concentrations en manganèse au-delà de la valeur limite de l'OMS: le N°25 (Route Filigué) dans le socle en décembre 2013 et juillet, septembre et décembre 2014, le N°10.2 (Goudel Gourou Siminti) dans le CT en décembre 2012 (Figure 38, droite). Le N° 16 (Lamordé) dans l'aquifère alluvial montre également une concentration en manganèse supérieure à la limite de l'OMS en décembre 2014 (0,642 mg/l). Cependant, cinq points d'eau dans le socle et deux points d'eau dans le CT présentent de façon permanente des concentrations en manganèse supérieures à 0,05 mg/l.

Des variations saisonnières sont observées surtout dans les points d'eau captant le socle (Figure 38, gauche). Dans l'aquifère du CT, la concentration en manganèse n'a varié que dans le N° 10.2 (Goudel Gourou Siminti) où elle a diminué drastiquement de 0,74 mg/l en décembre 2012 à 0,06 mg/l en mars 2014 pour se stabiliser à un taux quasiment nul pendant toute la suite de la période de suivi.

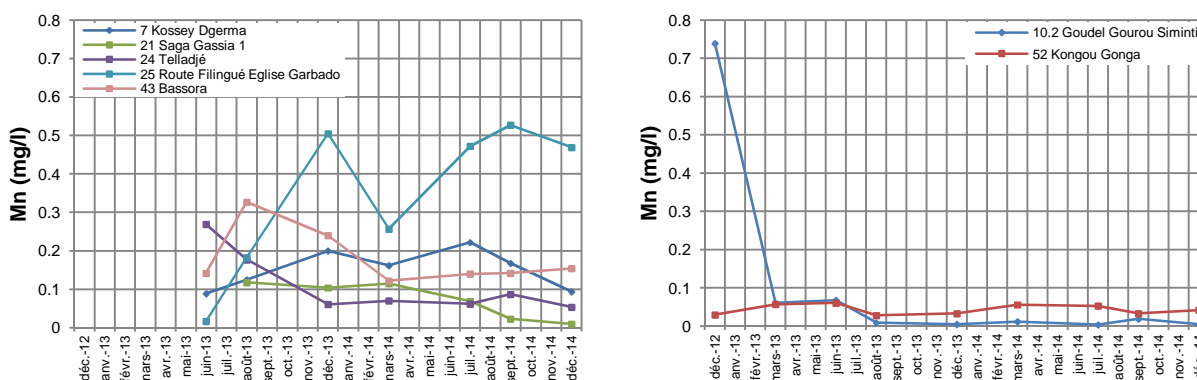


Figure 38 : Variation de la concentration en manganèse dans les points d'eau de l'aquifère socle (à gauche) et du CT (à droite). Seuls les points d'eau avec au moins une concentration supérieure à 0,05 mg/l sont représentés.

4.2.6 Nitrate

Un excès des concentrations en nitrates dans l'eau souterraine est un indicateur soit d'une utilisation abondante et inadéquate des engrais azotés dans les activités agricoles, soit d'une contamination avec des matières fécales (humaines et animales). Toutefois, de fortes concentrations en nitrate d'origine naturelle ont été relevées dans les régions arides à semi-arides en Afrique, probablement en raison de la minéralisation de la matière organique du sol accumulée pendant les périodes humides et détruite pendant les périodes sèches (Stadler et al., 2008). Une autre source naturelle de nitrate est l'atmosphère. Elle est constituée en 80% par azote qui est transformé en nitrate par des éclairs. La concentration en nitrate de la précipitation dans la région de Niamey a été mesurée à 0,76 mg/l (Galy & Modi, 1998).

Pour les êtres humains, une fois que le nitrate est dans l'appareil digestif, il peut être réduit à du nitrite par des bactéries dans la flore intestinale. Le nitrite est considéré comme cancérigène. De plus, le nitrite peut réduire le taux d'oxygène dans le sang et causer la mort par « asphyxie interne », ce qui est particulièrement dangereux pour les bébés. Ce phénomène est connu comme la « maladie du bébé bleu » (OMS, 2011). L'OMS établit une valeur limite de 50 mg/l pour le nitrate.

Des concentrations en nitrate supérieures à la limite de l'OMS ont été mesurées principalement dans des points d'eau situés dans la ville de Niamey (Figure 39). Ainsi, les fortes concentrations correspondent aux aquifères socle et alluvial. Cela est dû à une présence massive de latrines généralement mal construites, avec des fuites, mais aussi à cause d'une utilisation habituelle de puits ouverts. Pour améliorer la situation il est fortement recommandé de trouver des sources d'eau potable en dehors de la ville (vers le nord, nord est et sud ouest), de fermer les puits ouverts et de perfectionner la construction des latrines. Du reste, la sensibilisation de la population est indispensable pour arriver à ce but.

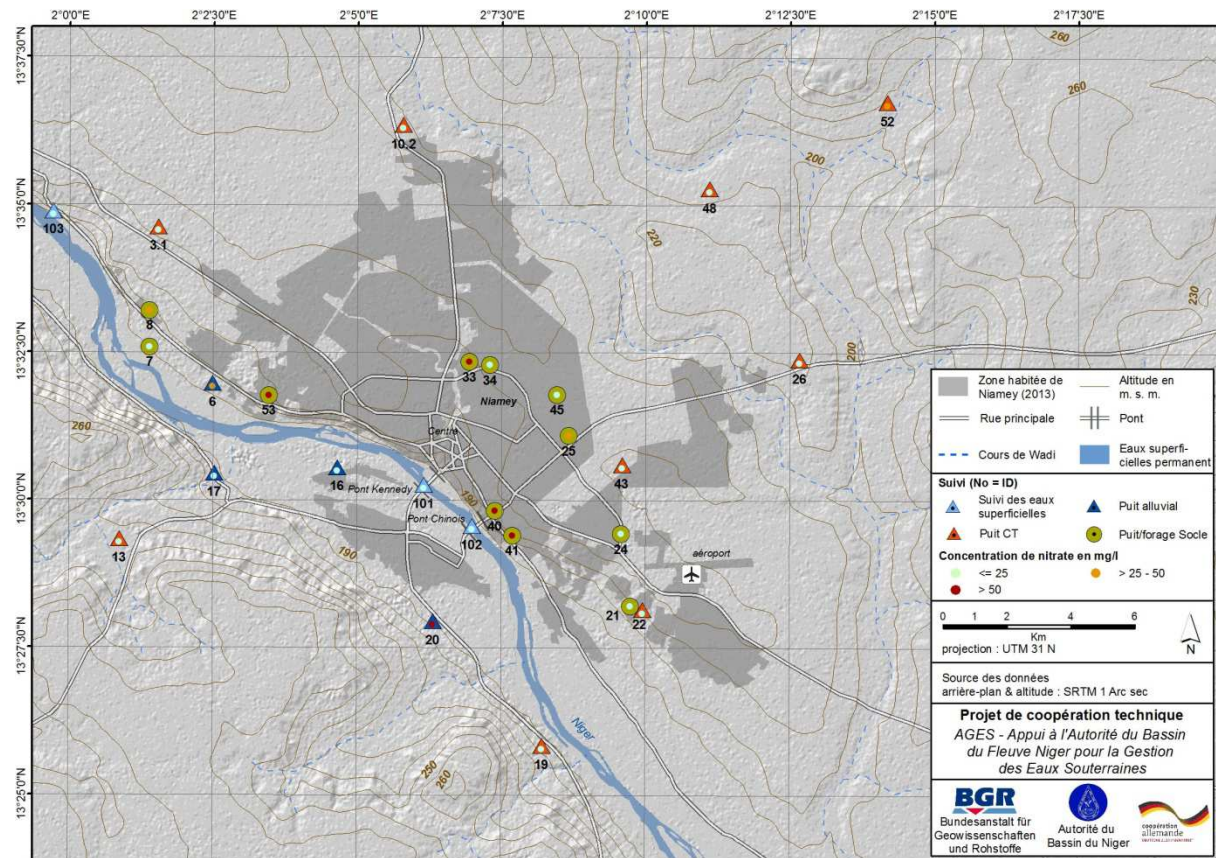


Figure 39 : Distribution des concentrations en nitrate en juin 2013

Les concentrations de nitrate mesurées dans le socle varient entre 0,02 mg/l et 613,00 mg/l (point d'eau N°70, Gaweye Centre de Santé, mesurée en décembre 2014) avec une médiane de 35,00 mg/l. Dans le CT, le nitrate varie entre 0,02 mg/l et 70,50 mg/l avec une médiane de 13,20 mg/l. Dans l'aquifère alluvial le nitrate varie entre 0,26 mg/l et 69,80 mg/l avec une médiane de 28,60 mg/l. Les concentrations les plus faibles ont été mesurées dans les eaux de surface. Elles varient de 0,007 mg/l à 4,00 mg/l avec une médiane de 0,15 mg/l (Figure 40).

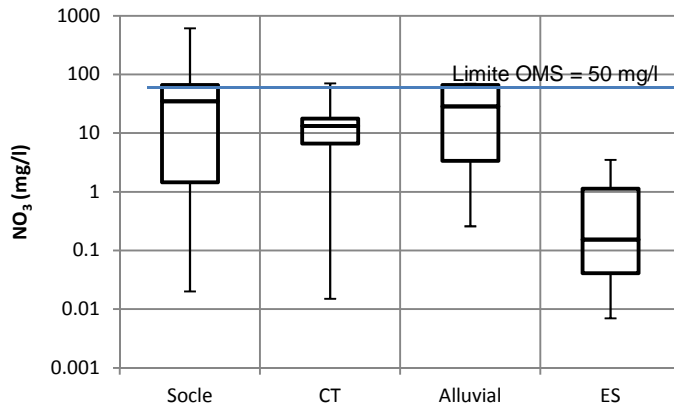


Figure 40 : Statistique des concentrations en nitrate mesurées dans la période rapportée (décembre 2012 à décembre 2014) (ES = eaux de surface)

Les variations saisonnières des concentrations en nitrate pour les trois aquifères considérés sont présentées dans la Figure 41. La figure représente seulement les points d'eau dont la concentration en nitrate est supérieure à 25 mg/l. En général les variations de concentrations sont faibles et ne montrent pas de corrélation avec la crue du fleuve. Le point d'eau N°34 (Boukoki Mairie Garage 1) dans le socle montre des variations très erratiques entre 5,4 mg/l en décembre 2014 et 69,4 mg/l en décembre 2013.

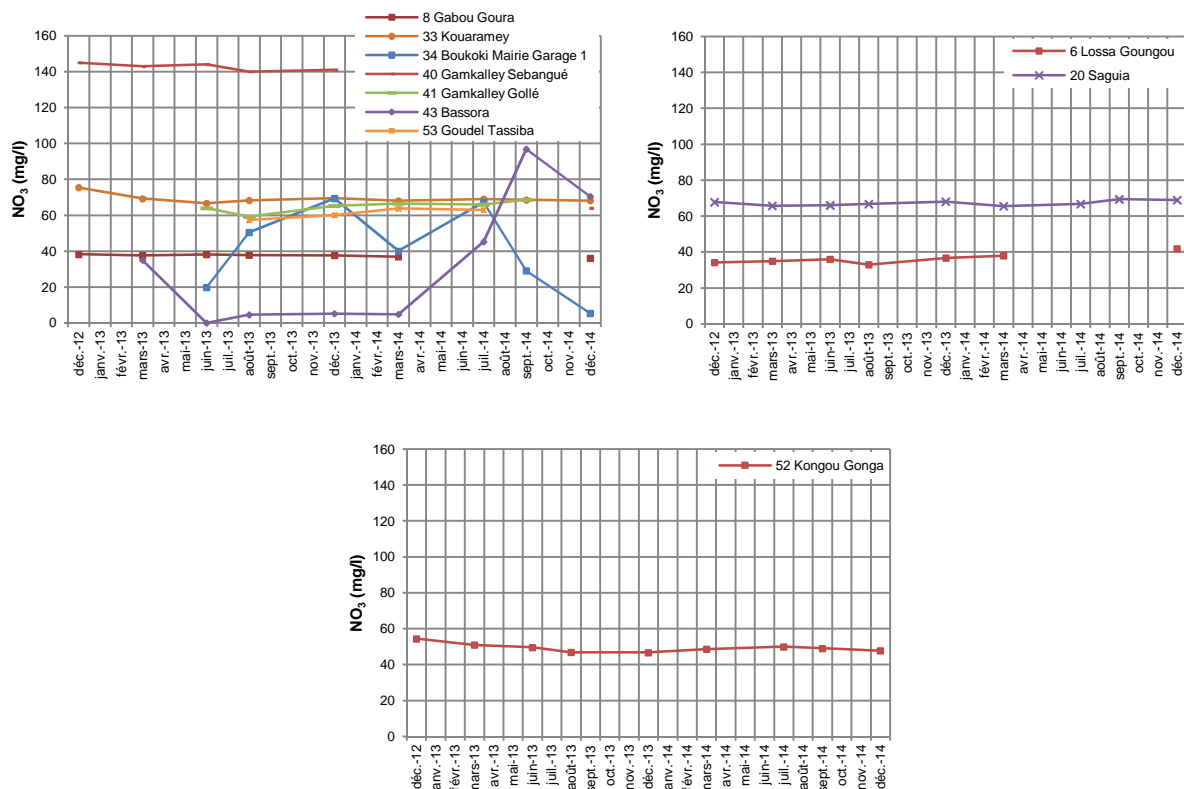


Figure 41. Variation de la concentration en nitrate dans le socle (en haut à gauche), l'aquifère alluvial (en haut à droite) et le CT (en bas). Seuls les points d'eau avec au moins une concentration supérieure à 25 mg/l sont représentés

Les concentrations mesurées dans chaque aquifère sont très différentes selon le point d'eau considéré. Dans le cas du socle, de fortes concentrations, notamment 140 mg/l sur le N°40 (Gamkalley Sebangué), mais également de plus faibles, environ 0,5 mg/l sur le N°24 (Telladjé), ont été mesurées. La même situation est retrouvée dans l'aquifère alluvial avec de fortes concentrations, environ 65 mg/l dans le N°20 (Saguia) et aussi de plus faibles concentrations, notamment 3 mg/l au N°17 (Kangel). Pour le CT, le N°52 (Koungou Gongga) présente les concentrations plus fortes qui varient autour de 50 mg/l pendant que des concentrations qui varient entre 2 mg/l et 3 mg/l ont été mesurées dans le N°26 (Saga Gerou 1). Ces variations considérables confirment que la contamination est plutôt locale et qu'il s'agit d'une pollution humaine. Ainsi, elle est due aux fuites des latrines défectueuses, à l'application d'engrais dans l'agriculture et/ou à une utilisation inadéquate des puits ouverts (voir Figure 42).



Figure 42 : Le forage N°40 (Gamkallé Sebangué) en pleine ville à gauche et les environs du puits ouvert N°20 (Saguia) en pleine utilisation à droite

4.2.7 Nitrite

Un excès de concentration en nitrites dans l'eau souterraine est, comme dans le cas de nitrate, un indicateur de contamination directe avec des matières fécales.

Le nitrite est considéré comme cancérigène pour des êtres humains. De plus, le nitrite peut également réduire le taux d'oxygène dans le sang et causer la mort par « asphyxie interne », en particulier dans les bébés. L'OMS établit une valeur limite de 0,2 mg/l pour une exposition prolongée et de 3 mg/l pour une courte exposition (OMS, 2011).

La Figure 43 montre la distribution des concentrations en nitrite mesurées en juin 2013.

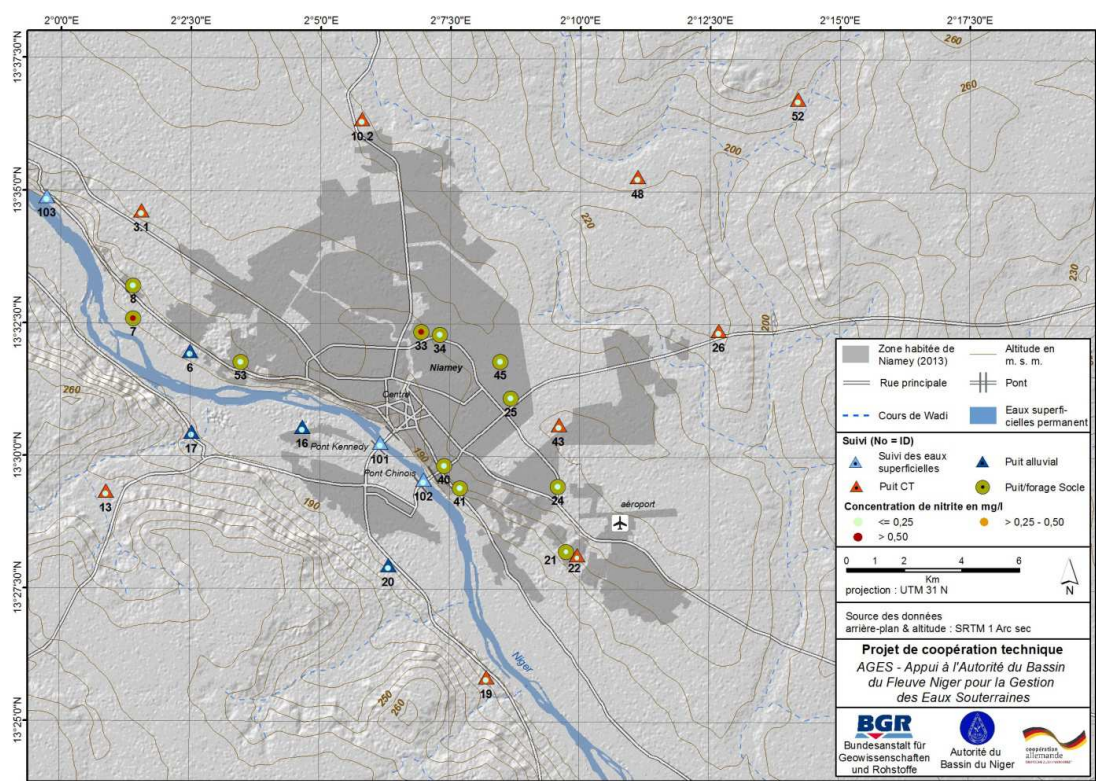


Figure 43 : Distribution des concentrations en nitrite en juin 2013

Une statistique de la totalité des résultats de nitrite obtenus à Niamey est présentée dans la Figure 44. Dans le socle, les concentrations en nitrite varient de 0,002 mg/l à 8,860 mg/l avec une médiane de 0,030 mg/l. Le nitrite dans le CT varie de 0,003 mg/l à 7,730 mg/l avec une médiane de 0,020 mg/l, dans l'aquifère alluvial de 0,003 mg/l à 0,647 mg/l avec une médiane de 0,020 mg/l et dans les eaux de surface de 0,003 mg/l à 0,178 mg/l avec une médiane de 0,020 mg/l. Tous les aquifères présentent des concentrations en nitrite supérieures à la limite de l'OMS pour une exposition permanente (0,2 mg/l). De plus, le socle et le CT montrent des concentrations en nitrite supérieures à la limite de 3 mg/l donnée par l'OMS pour des cas d'exposition courte.

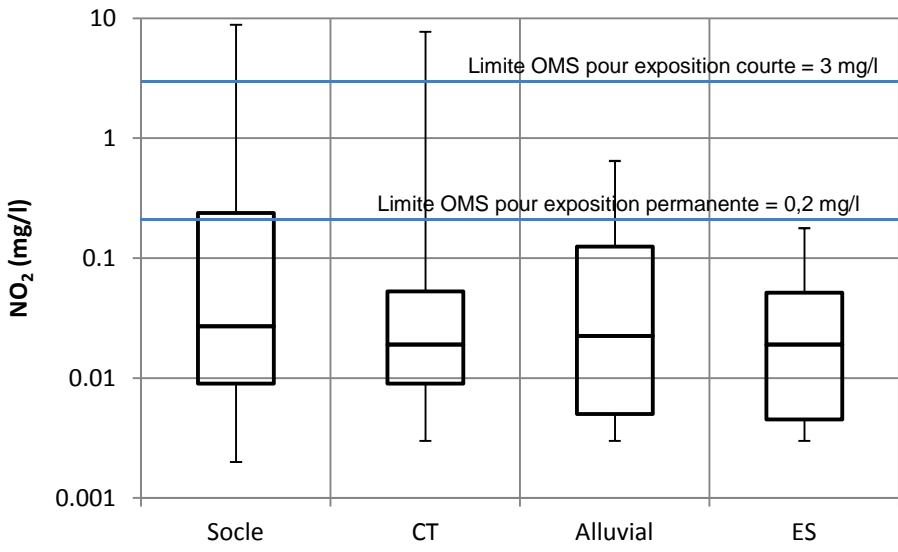


Figure 44 : Statistique des concentrations en nitrite mesurés dans la période rapportée (décembre 2012 à décembre 2014) (ES = eaux de surface)

Les variations saisonnières de nitrite sont représentées dans la Figure 45 pour les points d'eau des trois aquifères dont des concentrations sont supérieures aux limites de l'OMS.

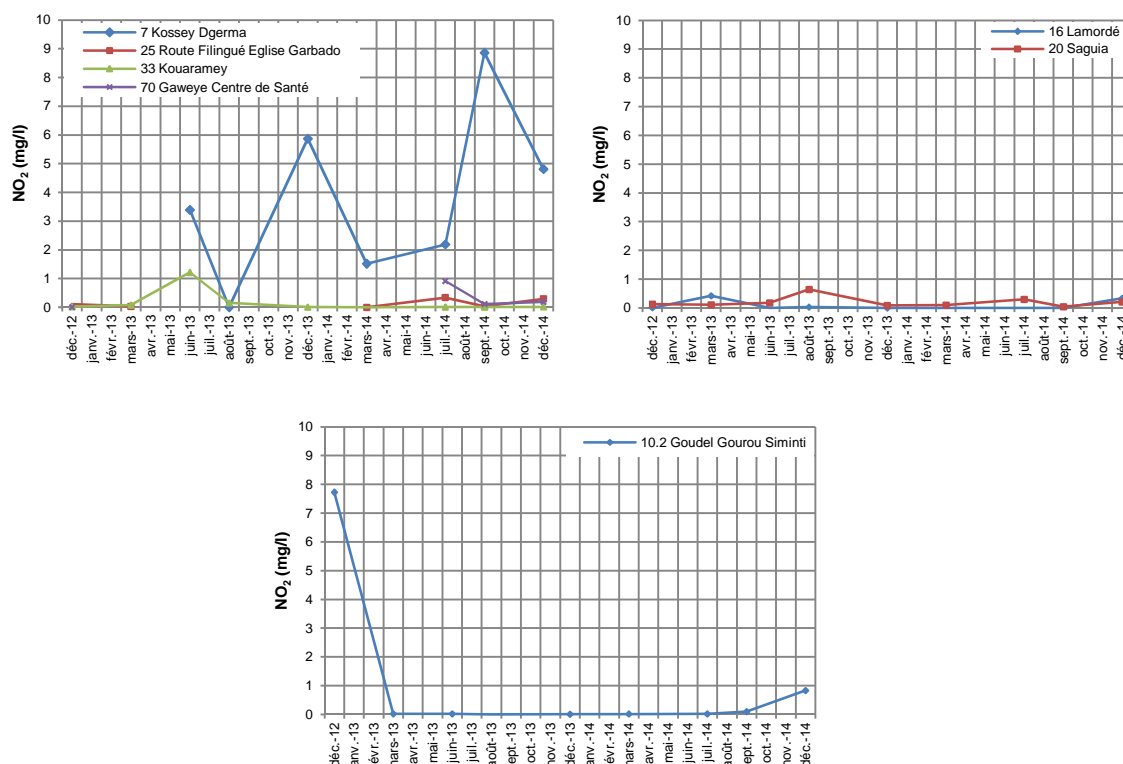


Figure 45. Variation de la concentration en nitrite dans l'aquifère socle (à gauche), alluvial (à droite) et CT (en bas). Seuls les points d'eau avec des concentrations supérieures aux limites de l'OMS sont représentés

Dans le socle (Figure 45, en haut et gauche), le point d'eau N°07 (Kossey Dgerma) montre des variations erratiques considérables entre 0,005 mg/l en août 2013 et 8,860 mg/l en septembre 2014. Tous les autres points d'eau montrent aussi des variations erratiques mais elles sont plus modérées.

Dans le cas du N°10.2 (Goudel Gourou Siminti) dans l'aquifère alluvial (Figure 45, en bas), seule la première mesure en décembre 2012 montre une concentration en nitrite très élevée. Il est sûrement dû au fait que le puits n'est pas utilisé très fréquemment: ce premier échantillonnage ne représente pas la situation dans l'aquifère mais est le résultat de l'eau stagnante dans le puits. Une situation similaire est observée par Boubakar Hassane (2010).

Les fortes concentrations en nitrite sont le produit d'une pollution directe par les fuites des latrines défectueuses.

4.2.8 Arsénique

Des lésions cutanées sont fréquentes lors d'une exposition constante à l'arsénique dans l'eau potable pendant une période de cinq ans. En outre, la consommation d'eau présentant un taux élevé d'arsénique peut conduire à des cancers de peau, de la vessie et du poumon. Pour ces raisons, l'OMS recommande une valeur limite de 0,01 mg/l d'arsénique dans l'eau potable (OMS, 2011).

Malheureusement, l'arsénique a été mesuré dans le laboratoire du BGR à l'aide de la spectrométrie d'émission optique (ICP-OE) avec une limite de détection de 0,02 mg/l, qui est supérieure à la limite de l'OMS.

Pour l'aquifère socle, seule une mesure dans le point d'eau N°24 (Telladjé) et une autre dans le point d'eau N°40 (Gamkalley Sébangué), ont atteint la limite de détection de la

méthode, avec une concentration de 0,02 mg/l. Dans le cas du CT ainsi que pour les eaux de surface, tous les échantillons ont des concentrations en arsénique inférieures à la limite de détection. Dans le cas de l'aquifère alluvial, seul le point d'eau N°16 Lamordé montre des concentrations en arsénique supérieures à la limite de l'OMS (Figure 46).

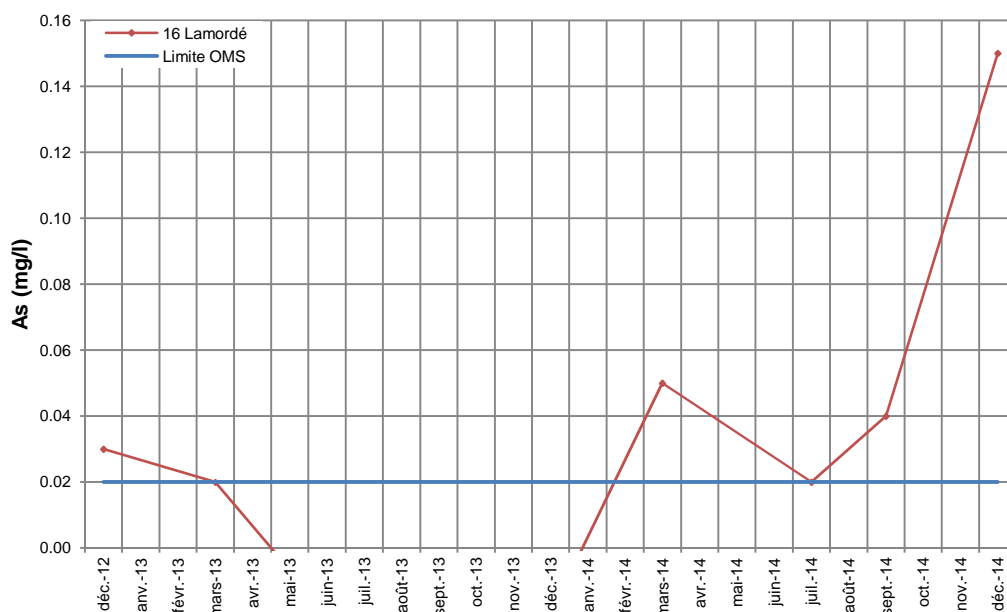


Figure 46 : Concentrations en arsénique mesurées dans le point d'eau N°16 (Lamordé) dans l'aquifère alluvial

Les concentrations en arsénique mesurées dans le point d'eau N°16 (Lamordé) semblent suivre une oscillation saisonnière faible (Figure 46). Pendant la saison des pluies (juin/juillet à septembre), les concentrations restent inférieures à la limite de l'OMS, mais pendant la saison sèche (octobre à juin), elles dépassent cette valeur limite. Vraisemblablement, la concentration élevée en arsénique est due à une pollution locale qui se dilue pendant la saison de pluie (hautes eaux) avec l'eau du fleuve Niger qui recharge l'aquifère. Cette variation de concentration confirme la thèse précédemment exposée d'une recharge de l'aquifère alluvial par l'eau du fleuve.

4.3. Paramètres bactériologiques

4.3.1 Coliformes totaux

Les coliformes sont naturellement abondants dans les intestins et les matières fécales des êtres vivants homéothermes (êtres humains, mammifères et oiseaux). Les coliformes ne causent normalement pas de maladies graves mais ils sont un indicateur de la contamination des eaux par des matières fécales et donc un bon indicateur pour la qualité d'eau (OMS, 2011).

Contrairement aux composants physico-chimiques, les bactéries sont des êtres vivants et ont la capacité de se reproduire sous des conditions favorables. L'OMS (2011) propose l'utilisation des méthodes « présence/absence » afin d'analyser la contamination bactériale. La valeur limite maximale des « colony forming units (CFU) » (= nombre des bactéries qui forme - ou peut former - une colonie) mesurées dans 100 ml d'eau pour les coliformes totaux est 1 CFU/100 ml.

Une contamination par des matières fécales est évidente dans tous les aquifères. Dans le cas du socle, seuls 8 échantillons sur un total de 84 (10%) n'ont pas montré de contamination (Figure 47). Dans le cas du CT, de l'aquifère alluvial et des eaux de surface, toutes les échantillons montrent la présence de coliformes totaux.

Socle (84 échantillons)

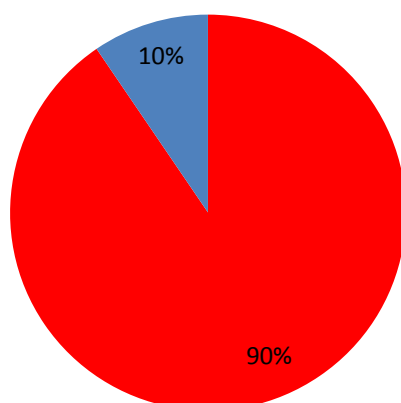


Figure 47. Coliformes totaux sur l'aquifère socle. Seul 10% des échantillons ne sont pas pollués

A titre comparatif, des échantillons de l'eau du robinet ont été pris à différentes occasions. Aucun des échantillons ne présente de coliformes totaux, cela indique la bonne qualité du traitement de l'eau avant la distribution.

4.3.2 Escherichia coli (E. coli)

La bactérie « Escherichia coli » appartient au groupe des coliformes. La plupart des souches d'E. coli sont relativement inoffensives pour les êtres humains, mais quelques unes peuvent causer de graves intoxications alimentaires, ainsi que la diarrhée, la gastro-entérite, des infections urinaires, méningites et sepsis (OMS, 2011). E. coli est un bon indicateur de contaminations récentes par des matières fécales, donc un bon indicateur pour la qualité d'eau.

L'OMS (2011) a déclaré une valeur limite maximale pour l'E. coli de 1 CFU/100 ml.

Tous les aquifères montrent une contamination par des E. coli. Dans le cas du socle, la moitié des 60 échantillons était contaminée (Figure 48). Dans le CT, seul un échantillon sur un total de 65 échantillons (2%) ne présentait pas de E. coli, alors que la totalité des échantillons dans l'aquifère alluvial et les eaux de surface était contaminée. Le fait que le pourcentage d'échantillons du socle contaminés soit inférieur aux autres aquifères s'explique par le fait qu'il s'agit ici de forages beaucoup mieux protégés que les puits utilisés comme piézomètres dans le CT ou l'aquifère alluvial. En plus, la plupart du socle est couvert soit par le CT ou par l'aquifère alluvial qui évitent l'infiltration de la pollution bactérienne de la surface.

Des échantillons de robinet ont également été analysés pour évaluer la qualité du traitement de l'eau avant la distribution. Aucun des échantillons n'a présenté de contamination avec E. coli.

Socle (84 échantillons)

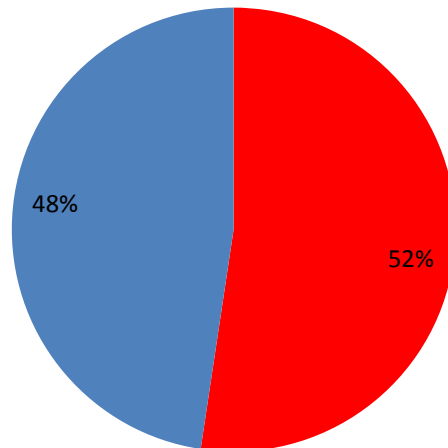


Figure 48. E. coli sur l'aquifère socle. Seul 48% des échantillons ne sont pas contaminés

4.3.3 Entérocoques

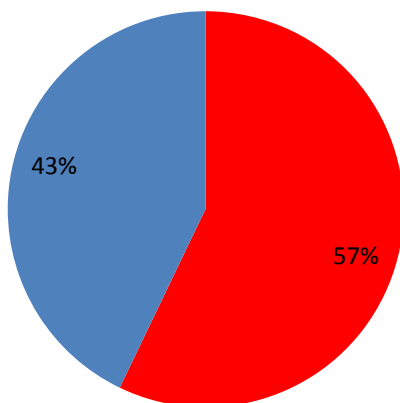
Les entérocoques sont un autre groupe de bactéries. Les deux espèces *Enterococcus faecium* et *Enterococcus faecalis* sont les plus communes. Comme les coliformes, ils vivent dans les intestins des êtres vivants homéothermes (êtres humains, mammifères et oiseaux) (OMS, 2011). Ils peuvent causer des inflammations parmi les êtres humains qui ont un système immunitaire faible, surtout chez enfants en bas âge qui n'ont pas encore de système immunitaire mûr et de flore intestinale complète.

En comparaison avec E. coli, les entérocoques sont plus résistants aux pH alcalins et environnements salins. Pourtant, ils sont un indicateur plus clair de pollution bactérienne (Byappanahalli et al., 2012).

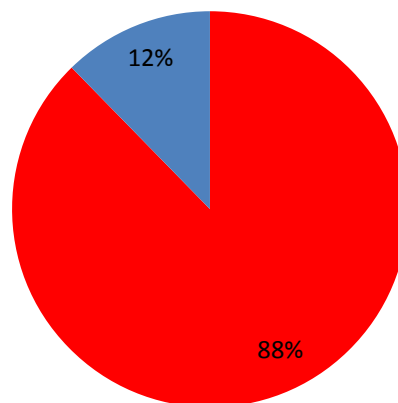
L'OMS (2011) stipule pour l'eau potable une valeur limite maximale de 1 CFU/100 ml.

Ainsi, tous les aquifères présentent une contamination par Entérocoques (Figure 49), elle est moins importante que pour les deux types de bactéries présentées précédemment. Dans le socle, 43% des 84 échantillons n'étaient pas concernés par la contamination. Dans le CT, 12% des 65 échantillons n'étaient pas contaminés, dans l'aquifère alluvial 21% des 34 échantillons et dans l'eau de surface 26% des 34 échantillons analysés.

Socle (84 échantillons)



CT (65 échantillons)



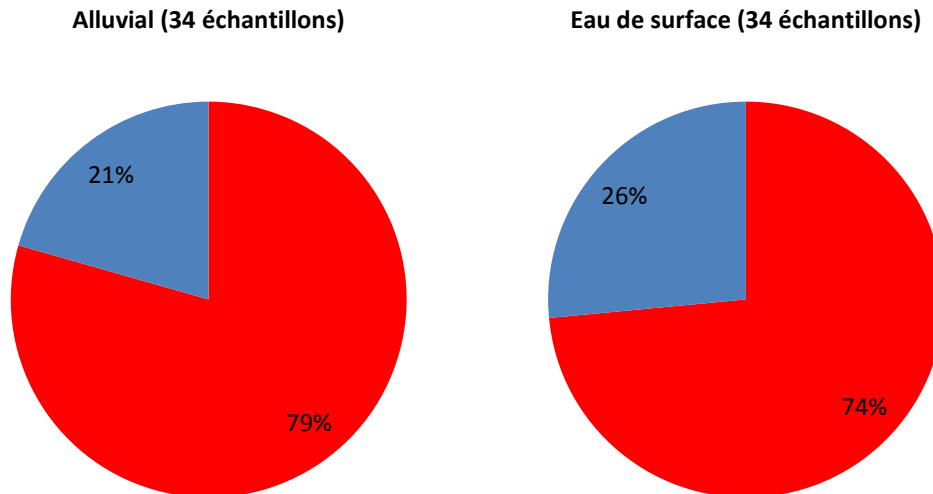


Figure 49. Contamination par Entérocoques dans la zone de Niamey

Des échantillons de l'eau du robinet ont été analysés pour évaluer la qualité du traitement de l'eau avant la distribution. Aucun des échantillons ne contenaient d'Entérocoques.

Les analyses bactériologiques montrent clairement la nécessité d'un traitement des eaux usées et d'un traitement de l'eau souterraine avant sa consommation. Il est fortement recommandé que la population soit sensibilisée sur des mesures d'hygiène ainsi que sur la nécessité de protéger la ressource.

4.4. Isotopie

4.4.1 Isotopes d'hydrogène

L'hydrogène (H) a deux isotopes stables, le protium (^1H) et le deutérium (^2H), et un isotope radioactif, le tritium (^3H). La répartition naturelle des trois isotopes est très déséquilibrée : protium constitue 99,9884 % de l'hydrogène, alors que le deutérium seulement 0,0115 %. Le tritium est encore beaucoup plus rare (Hölting & Coldewey, 2008).

La relation protium/deutérium (rapport isotopique) est différente pour l'eau de pluie que pour l'eau de fleuve (ou de lac), où elle est soumise à des conditions d'évaporation. En effet, les isotopes légers s'évaporent en premier, l'eau de surface s'enrichit avec l'isotope lourd, c'est-à-dire le deutérium. Les rapports isotopiques des échantillons d'eau souterraine permettent de déterminer si la recharge de l'aquifère est originaire d'une eau de surface ou de la précipitation. Ainsi on peut caractériser les mécanismes de recharge.

La variation relative de la teneur en deutérium ($\delta^2\text{H}$) est comparée à une valeur standard et s'estime comme il suit (Hölting & Coldewey, 2008) :

$$\delta^2\text{H} = \frac{R - R_{\text{st}}}{R_{\text{st}}} * 1000 [\text{‰}]$$

R = Rapport isotopique de ^2H de l'échantillon

Rst = Valeur standard de ^2H (1,05)

$\delta^2\text{H}$ = Déviation relative [‰]

4.4.2 Isotopes d'oxygène

L'oxygène (O_2) a trois isotopes : ^{16}O , ^{17}O et ^{18}O . L'isotope ^{16}O constitue 99,76% de l'oxygène, ^{18}O seulement 0,20% et ^{17}O est encore plus rare (0,037%) (Hölting & Coldewey,

2008). Comme dans le cas de l'hydrogène, la composition isotopique de l'oxygène dans l'eau varie avec les conditions extérieures.

La variation relative de la teneur en ^{18}O se calcule comme il suit (Hölting & Coldewey, 2008) :

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{R - R_{st}}{R_{st}} * 1000 [\text{‰}]$$

R = Rapport isotopique de ^{18}O dans l'échantillon

Rst = Valeur standard de ^{18}O (0,002)

4.4.3 Évaluation isotopique de l'eau dans la région de Niamey

La composition isotopique de la précipitation à Niamey a été mesurée par l'Agence Internationale d'Énergie Atomique (AIEA). Les données sont disponibles dans une base de données (WISER) sur le site web de l'agence. Il s'agit de 46 mesures de ^{18}O et 41 mesures de ^2H obtenues dans la période 1992-2009. Avec ces données, il est possible de représenter la ligne météorologique locale, c'est-à-dire celle de Niamey (ligne en bleu dans la Figure 50). Elle répond à la formule suivante :

$$\delta^2\text{H} = 7,3 \cdot \delta^{18}\text{O} + 3,5$$

Le projet AGES a mesuré quelques isotopes dans les précipitations échantillonnées dans le pluviomètre installé sur le toit du bâtiment de l'ABN. Les résultats sont très similaires à ceux de l'IAEA (voir losanges en bleu dans la Figure 50).

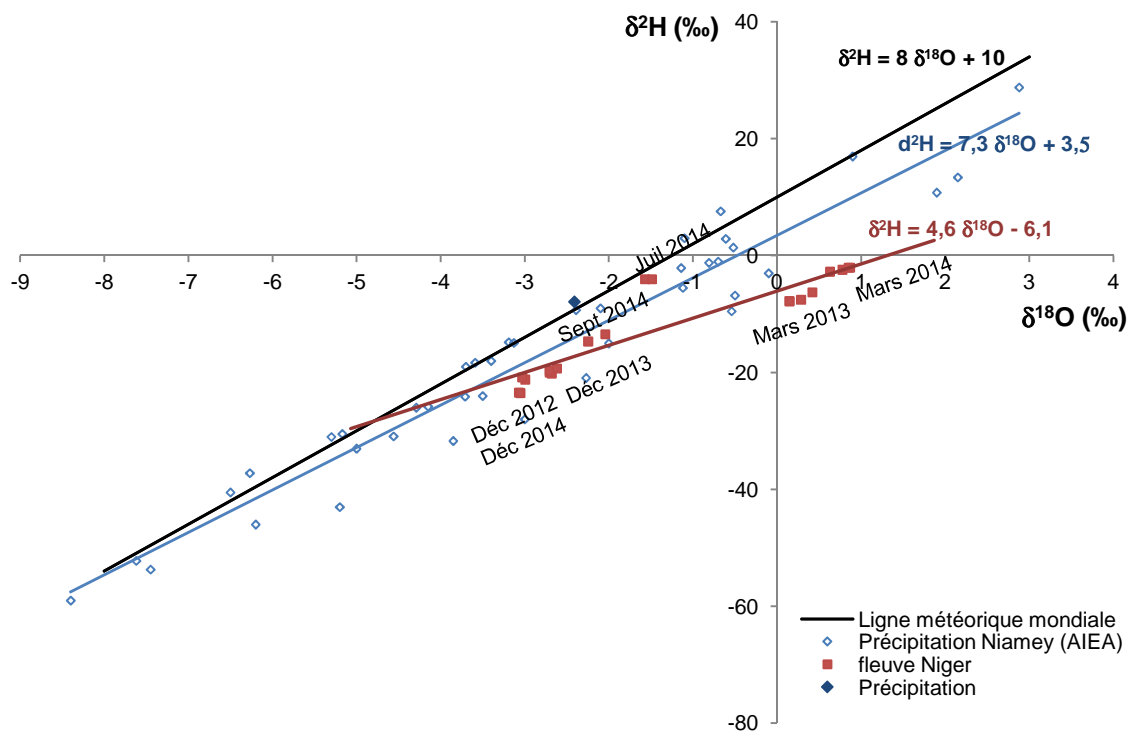


Figure 50 : Ligne météorologique globale pour les précipitations globales (en noir), ligne météorologique locale pour la précipitation de Niamey (en bleu) et ligne correspondant aux eaux du fleuve Niger à Niamey

En comparaison avec la ligne météorologique globale (ligne en noir dans la Figure 50), dont la formule est $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$, la ligne météorologique locale à Niamey montre des effets d'évaporation. Cet effet est visible par la faible pente de la ligne météorologique locale (7,3 au lieu de 8).

Les eaux du fleuve Niger (en rouge foncé dans la Figure 50) déterminent une droite qui montre encore plus les effets d'évaporation. Sa pente n'est que de 4,6. Les isotopes montrent également des compositions différentes selon la date d'échantillonnage. En mars 2013 et 2014, vers la fin de la période sèche, l'évaporation intense fait que l'eau du fleuve est chargée en isotopes lourds. En décembre 2012, 2013 et 2014, au milieu de la période des hautes eaux, l'eau du fleuve montre une composition isotopique similaire à celle de la précipitation. La composition en septembre et juillet 2014 est intermédiaire (voir Figure 51).

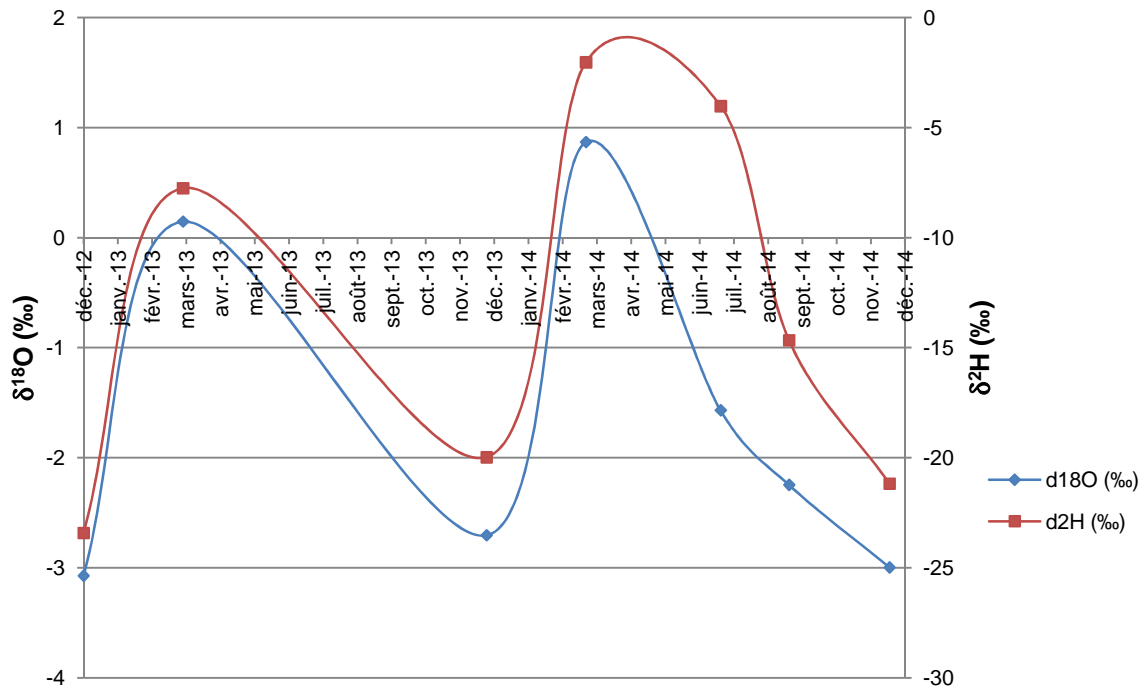


Figure 51 : Variation saisonnière de la composition isotopique pour le fleuve Niger mesurée au point Kennedy

La composition isotopique de l'aquifère socle comparée avec celles de la précipitation et du fleuve est représentée dans la Figure 52. Une relation est observée entre la composition isotopique et la distance du piézomètre par rapport au fleuve Niger. Les piézomètres les plus proches du fleuve (N°07 Kossey Dgerma et N°41 Gamkallé Gollé) ont une composition similaire à l'eau du fleuve en décembre indiquant une recharge avec de l'eau du fleuve pour cette partie de l'aquifère. Les piézomètres plus éloignés du fleuve présentent une composition plutôt similaire à celle de la précipitation ; ils reçoivent ainsi une recharge par précipitation. Les autres piézomètres montrent une composition intermédiaire et donc une recharge par les deux sources.

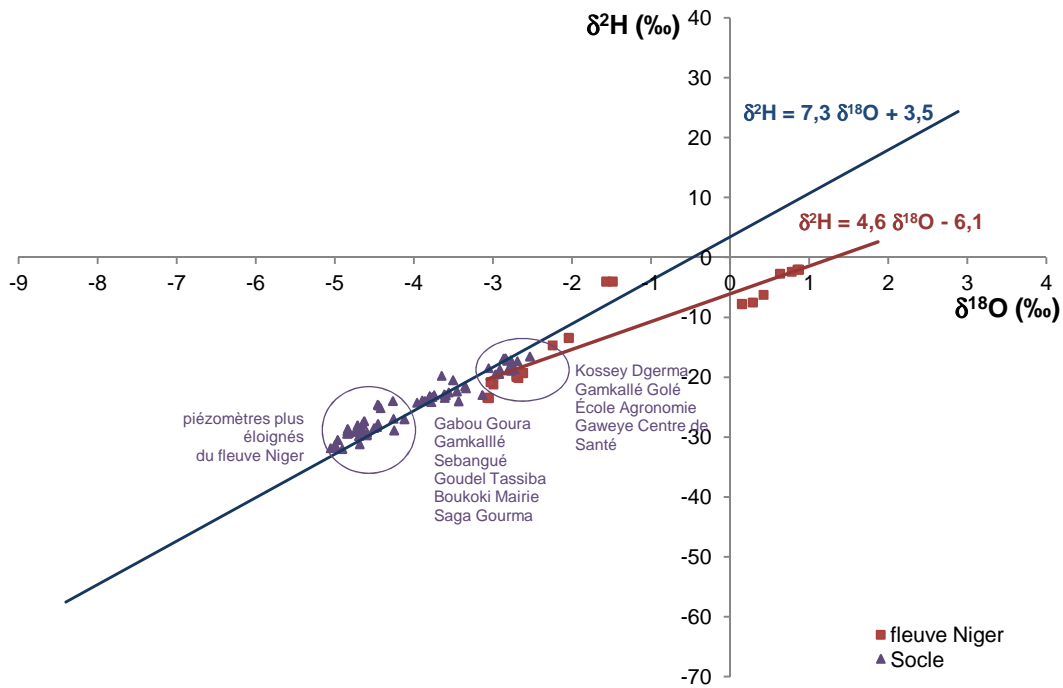


Figure 52 : Composition isotopique de l'eau du socle comparée avec la ligne météorique locale et la ligne de l'eau du fleuve Niger

Dans le cas du CT (Figure 53), tous les piézomètres à l'exception du N°43 Bassora montrent une composition similaire à celle de la précipitation. Cela confirme que cet aquifère est rechargé par l'eau de pluie. Le piézomètre Bassora montre une composition similaire à celle du fleuve Niger en mars, c'est-à-dire un effet d'évaporation très important. Cela est dû au fait qu'il se trouve très loin du fleuve et qu'il s'agit d'un puits non utilisé ; cette composition est le résultat d'eau stagnante et ne reflète pas la situation dans l'aquifère. Il est recommandé de souffler, de nettoyer le piézomètre ou de l'abandonner.

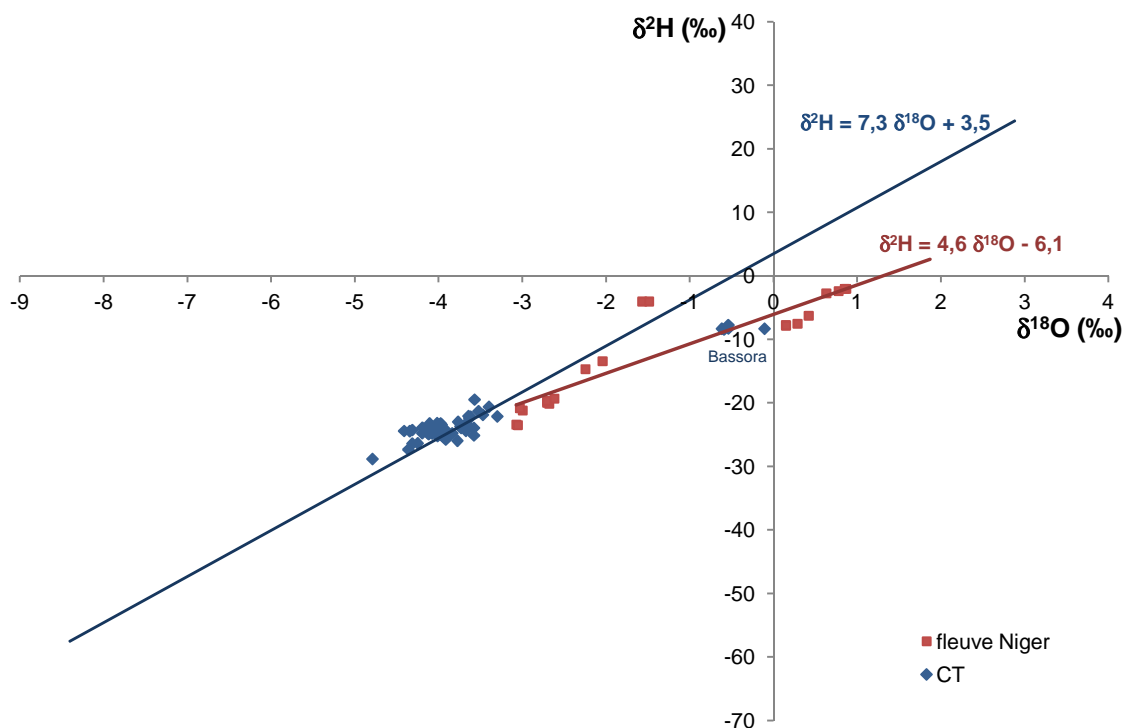


Figure 53 : Composition isotopique du CT comparée avec la ligne météorique locale et la ligne du fleuve Niger

L'aquifère alluvial montre une composition différente selon le piézomètre considéré (Figure 54). Le N°16 Lamordé a une composition similaire à celle du fleuve et indique une recharge par l'eau du fleuve pour cette partie de l'aquifère. Les autres piézomètres montrent une composition similaire à celle de la précipitation, mais aussi du fleuve pendant les hautes eaux. Il est donc difficile de déterminer la source de recharge ici car les deux sources ont une composition très similaire.

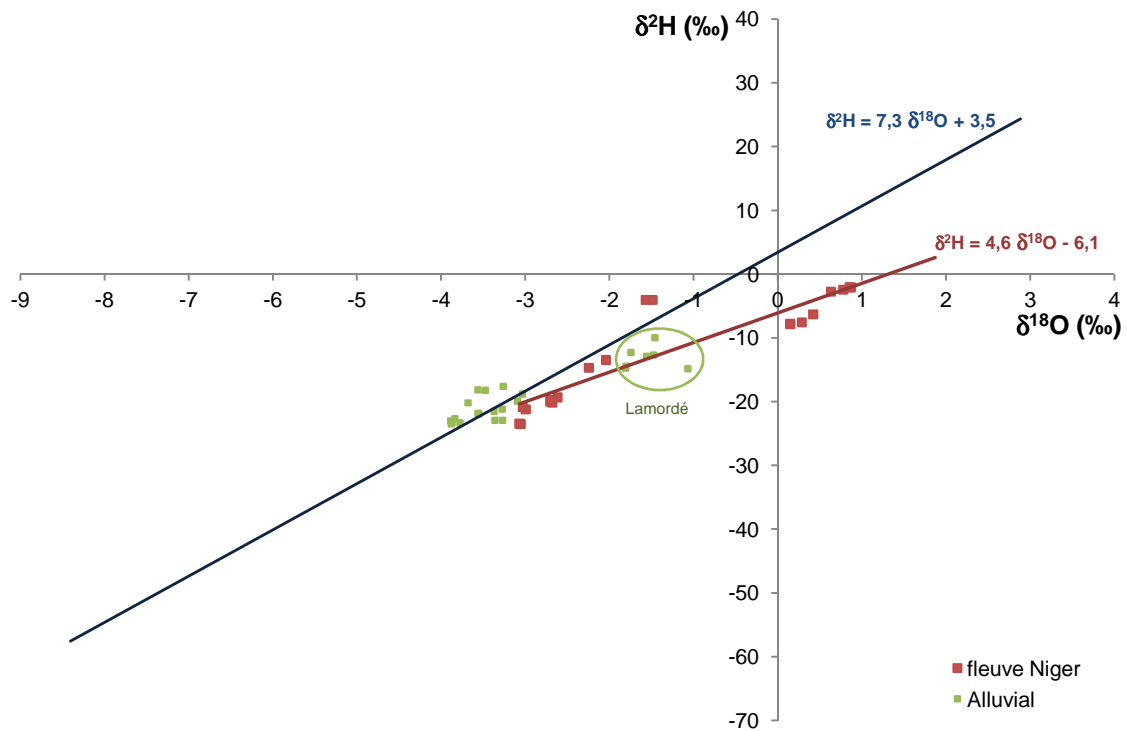


Figure 54. Composition isotopique de l'aquifère alluvial comparée avec la ligne météorique locale et la ligne du fleuve Niger

5. Résumé

Ce document résume les résultats de suivi des nappes du socle, alluvial et CT ainsi que des eaux du fleuve Niger dans les alentours de la ville de Niamey. Des mesures de niveau statique et des analyses chimiques et isotopiques ont été effectuées de façon trimestrielle à partir de décembre 2012. Le réseau piézométrique adopté compte actuellement 33 points : 4 dans l'aquifère alluvial, 10 dans le CT, 15 dans le socle et 4 dans les eaux du fleuve Niger.

L'analyse des niveaux statiques et les résultats chimiques concernant l'aquifère socle et l'aquifère alluvial montrent qu'ils sont en interaction hydraulique avec les eaux du fleuve Niger. De plus, conséquence de la situation géologique, la conductivité hydraulique du socle est plus faible sur la rive gauche que sur la rive droite. La zone altérée du socle sur la rive gauche ne contient pas d'eau et les captages d'eau dans les forages sont profonds (à partir de 60 m) et de débits moins importants. Sur la rive droite, les captages d'eau dans les forages sont moins profonds (entre 25 m et 38 m) et ont un débit trois fois supérieur.

L'écoulement souterrain dans le CT est parallèle au fleuve Niger. La décharge pour cet aquifère est le dallol située au nord-est la ville.

La présence de nitrates et de nitrites dans le socle et l'aquifère alluvial montrent la contamination humaine de ces aquifères, soit par des eaux usées, l'utilisation des engrais organiques, etc. Pour le CT, même si des nitrates et des nitrites sont présents, les concentrations ne dépassent généralement pas les limites de l'OMS.

Les points d'eau des trois aquifères montrent une contamination bactériale considérable. Cette contamination est compréhensible dans le cas du CT et de l'aquifère alluvial (les points d'eau sont tous des puits ouverts où une contamination directe est inévitable), elle est préoccupante dans le cas du socle. Ici tous les points d'eau correspondent à des forages équipés avec des pompes et ainsi sans une connexion directe avec l'environnement.

Les résultats des analyses isotopiques montrent :

- Une variation saisonnière de la composition isotopique ainsi que l'effet d'évaporation dans les eaux du fleuve Niger.
- Une recharge mixte dans les points d'eau du socle situés près du fleuve, c'est-à-dire une recharge à travers la précipitation et les eaux du fleuve. Pour les points d'eau situés plus loin, c'est la précipitation qui recharge l'aquifère.
- Dans le cas du CT, la recharge provient de la précipitation, sauf dans le cas du point d'eau N°43 Bassora qui montre des effets d'évaporation. Comme ce puits est localisé très loin du fleuve, ce n'est pas l'eau du fleuve qui cause la recharge. L'effet d'évaporation est plutôt dû au fait qu'il s'agit d'un puits ouvert sans utilisation.
- L'aquifère alluvial montre une recharge mixte de précipitation et d'eau du fleuve.

6. Recommandations

Pour améliorer le réseau de suivi, le point d'eau N°43 (Bassora) devrait être remplacé par un autre point d'eau à proximité.

À cause d'une pollution très haute en arsénique, le puits No. 16 Lamordé doit être abandonné.

Les recommandations générales de cette étude sont appropriées pour toutes les villes du bassin du fleuve Niger. L'ABN doit encourager les pays membres à les appliquer. Il s'agit de :

- La pollution persistante et dans quelques endroits extrêmement élevée en composantes azotées (nitrate, nitrite et ammonium) de tous les aquifères montre qu'il est impérativement nécessaire de promouvoir **mesures de protection de la nappe** pour assurer la provision en eau potable. Il est recommandé d'**installer des zones de protection** pour les forages basées sur les vitesses moyennes d'écoulement de l'eau souterraine et les débits extraits. L'utilisation des sols et l'emplacement des latrines doit être conforme aux zones de protection.
- A cause de l'extrême pollution bactérienne, il est recommandé de les **fermer les puits** pour éviter une contamination directe dès la surface. En outre, il est conseillé de **promouvoir l'installation des forages au lieu de puits**.
- Le but final pour le gouvernement de la ville devrait être un **approvisionnement en eau potable central** avec des forages placés en dehors de la ville ainsi que l'**installation d'un réseau de recollection des eaux usées** et des **plantes de traitement**.
- Il est fortement recommandé que **la population soit sensibilisée à propos des mesures d'hygiène** ainsi que sur la nécessité de protéger la ressource.
- Le **suivi de la qualité des eaux souterraines** doit poursuivre **de façon semestrielle** pour assurer l'aptitude de l'eau extraite.
- Il faudrait **abandonner les puits et forages que montrent des contaminations supérieures aux limites de l'OMS** pour assurer la santé de la population. La provision d'eau doit être garantie soit par un autre forage ou par un transfert d'eau d'un autre endroit.

7. Références

- Alhou, B., 2007. Impact des rejets de la ville de Niamey (Niger) sur la qualité des eaux du fleuve Niger. Dissertation présentée dans la Faculté des Sciences, Département de Biologie. Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, Namur, Belgique. ISBN : 978-2-87037-550-1.
- BGR, 2012. Lac Tchad - Gestion durable des Ressources en Eau – Activités du projet, Rapport N°4, mars 2012.
- Bonnot, H., 1998. Carte Géologique du Niger 1/100.000. Feuille Say. Ministère des Mines de la République du Niger, Direction de la Recherche Géologique et Minière, Niamey.
- Boubakar Hassane, A., 2010. Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : Cas de la communauté de Niamey (Niger). Thèse de Doctorat soutenue en 2010. Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger.
- Bouchard, M.F., Sauvé, S., Barbeau, B., Legrand, M., Brodeur, M.-E., Bouffard, Th., Limoges, E., Bellinger D.C. and Mergler, D., 2010. Intellectual Impairment in School-Age Children. *Environmental Health Perspectives* 119 (1): 138–143. Doi:10.1289/ehp.1002321.
- BRGM, 1986. Programme d'urgence pour le renforcement de l'alimentation en eau potable des quartiers de la périphérie de Niamey (Niger), mars 1986.
- Cet-Cherif, 2014. Exécution de 4 essais de pompage sur les forages déjà réalisés lors des années 1984-1986 à titre de comparaison des anciennes données avec celles enregistrées en juin 2013 récemment. Rapport technique. Projet AGES/BGR.
- Cooper, H.H. et C.E. Jacob, 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Am. Geophys. Union Trans.*, Vol. 27, pages 526-534.
- Galy-Lacaux, C. et Modi, A., 1998. Precipitation Chemistry in the Sahelian Savanna of Niger, Africa. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 30, pages 319-343.
- Greigert, J., 1966. Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des lullemeden (Afrique occidentale). *Publ. Dir. Mines et Géologie Niger, Bur.Rech.Géol.Min.*, p. 234.
- Greigert, J., 1978. Atlas des eaux souterraines de la République du Niger. Etat des connaissances, Tome 1. Rapport BRGM, 79 AGE001, Orléans.
- Höltling, B. et W. G. Coldewey, 2008. *Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*, 7. Auflage, 368 pages, ISBN-13: 9783827417138, Editorial: Spektrum Akademischer Verlag, 2009.
- Institut National de la Statistique du Niger. Accès sur le site web le 8 octobre 2014 : <http://www.stat-niger.org/statistique/file/Population/population2012.pdf>
- Lang, J., Kogbe, C., Alidou, S., Alzouma, K.A., Bellion, G., Dubois, D., Durand, A., Guiraud, R., Houessou, A., de Klasz, I., Romann, E., Salard-Cheboldaëff, M., Trichet, J., 1990. The continental terminal in West Africa. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*. Volume 10, Issues 1-2, pages 79-99.
- Logan, J., 1964. Estimating transmissibility from routine production tests of water wells. *Ground Water*, Vol. 2, No. 1, pages 35-37.
- Byappanahalli, M.N., Nevers, M.B., Asja, K., Staley, Z.R., Harwood, V.J., 2012. Enterococci in the Environment. *Microbiology and Molecular Biology Review*, Volume 76, Nr. 4, pages 685-706. DOI: 10.1128/MMBR.00023-12.
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé), 2011. *Guidelines for Drinking-water Quality*, fourth edition.

Ousseini, I. et Morel, A., 1989. Utilisation des formations alluviales azoïques pour l'étude des paléoenvironnements du Pléistocène supérieur et Holocène au sud du Sahara : l'exemple de la vallée du fleuve Niger dans le Liptako nigérien. Bulletin Soc. Géol. De France, 8(5) :85-90.

Stadler S., Osenbrück K., Knöller K., Suckow A., Sültenfuß J., Oster H., Himmelsbach T., Hötzl H., 2008. Understanding the origin and fate of nitrate in groundwater of semi-arid environments. Journal of arid environments, 72, 10.

Vicat, J.P., Leger, J.M., Ahmed, Y., Willems, L., 1994. Les indices de déformations plio-quadernaire de la bordure occidentale du bassin des Iullemeden dans la région de Niamey. Rev. Géographie Alpine, Au Contact Sahara-Sahel. Vol.1, 15-25.

World Wildlife Fund (WWF), 2009. Terrestrial Ecoregions: „Sahelian Acacia Savanna”.

Wright, J.B., 1931. Geology and mineral resources of West Africa. Allen & Unwin, London, 1985.

Annexe 1 : Fiches des piézomètres (CD adjoint)

Annexe 2 : Résultats des analyses chimiques

Table with 32 columns (Nom de village/quartier, Date, T [°C], pH, C.E. [µS/cm], Col.tot. [CFU/100ml], E.Coli [CFU/100ml], Entéroco. [CFU/100ml], K [mg/l], Na [mg/l], Cl [mg/l], Mg [mg/l], Ca [mg/l], SO4 [mg/l], HCO3 [mg/l], Fe(II) [mg/l], Mn [mg/l], NO3 [mg/l], Br [mg/l], NH4 [mg/l], NO2 [mg/l], F [mg/l], PO4 [mg/l], Al [mg/l], As [mg/l], BO2 [mg/l], Ba [mg/l], Be [mg/l], Cd [mg/l], Co [mg/l], Cr [mg/l], Cu [mg/l], Li [mg/l], Ni [mg/l], Pb [mg/l], Sc [mg/l], SiO2 [mg/l], Sr [mg/l], Ti [mg/l], V [mg/l], Zn [mg/l]). Rows include locations like Tondidia Peul, Goudel Gourou Simint, Kariel, Timeré, Saga Gassia 2, Saga Gorou 1, Kongou Saboncaré, and Kongou Gongal.

Continental Terminal et pluie

Nom de village/ quartier	Date	T [°C]	pH	C.E. [µS/cm]	Col.tot. [CFU/100ml]	E.Coli [CFU/100ml]	Entéroco. [CFU/100ml]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Cl [mg/l]	Mg [mg/l]	Ca [mg/l]	SO4 [mg/l]	HCO3 [mg/l]	Fe(II) [mg/l]	Mn [mg/l]	NO3 [mg/l]	Br [mg/l]	NH4 [mg/l]	NO2 [mg/l]	F [mg/l]	PO4 [mg/l]	Al [mg/l]	As [mg/l]	BO2 [mg/l]	Ba [mg/l]	Be [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Li [mg/l]	Ni [mg/l]	Pb [mg/l]	Sc [mg/l]	SiO2 [mg/l]	Sr [mg/l]	Ti [mg/l]	V [mg/l]	Zn [mg/l]
Saga Gassia 3	13-juil.-14	31.0	7.23	311	>2419.6	>2419.6	>2419.6	6.1	14.3	5.75	6.08	40.2	9.36	179	1.770	0.354	0.444	0.019	1.27	0.089	0.441	0.38	0.089	-0.02	0.04	0.090	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	0.007	-0.003	-0.02	0.001	46.4	0.179	0.002	-0.003	0.089
	01-déc.-14	32.7	7.26	355	>2419.6	<1	<1	4.3	14.6	2.18	6.42	46.3	23.0	175	0.009	0.008	6.62	0.009	-0.01	0.197	0.506	0.49	0.024	-0.02	-0.01	0.188	-0.0005	-0.002	-0.003	0.007	-0.003	0.006	-0.003	-0.02	-0.001	59.3	0.368	-0.001	0.027	0.042
Pluie	24-juin-01	32.0	6.4	69	0.6	0.3	0.394	0.6	0.3	0.4	0.3	2.6	0.9	8	0.006	0.002	1.4	-0.003	0.01	-0.003	0.021	0.17	0.013	-0.02	-0.01	0.013	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	0.384	-0.02	-0.001	1.6	0.012	0.001	-0.003	0.083

Nom de village / quartier	Date	Temp [°C]	pH	C.E. [µS/cm]	Col.tot. [CFU/100ml]	E.Coli [CFU/100ml]	Entéroco. [CFU/100ml]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Cl [mg/l]	Mg [mg/l]	Ca [mg/l]	SO4 [mg/l]	HCO3 [mg/l]	Fe(II) [mg/l]	Mn [mg/l]	NO3 [mg/l]	Br [mg/l]	NH4 [mg/l]	NO2 [mg/l]	F [mg/l]	PO4 [mg/l]	Al [mg/l]	As [mg/l]	BO2 [mg/l]	Ba [mg/l]	Be [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Li [mg/l]	Ni [mg/l]	Pb [mg/l]	Sc [mg/l]	SiO2 [mg/l]	Sr [mg/l]	Ti [mg/l]	V [mg/l]	Zn [mg/l]
Kossey Dgerma	12-juin-13	33,47,04	911	549.3	1.0	7.2	1.4	98.3	19.2	32.7	60.2	32.1	530	0.012	0.089	0.863	0.094	8.80	3.392	0.891	0.14	0.028	-0.02	0.14	0.10	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	0.004	-0.003	-0.02	0.001	67.3	0.350	0.001	0.019	0.226
	13-aout-13	32,47,16	871	>2419.6	1986.3	2419.6	1.4	101	15.8	32.0	57.7	32.0	539	0.073	0.125	0.084	0.099	-0.01	0.005	0.815	0.38	0.037	-0.02	0.11	0.16	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	0.004	-0.003	-0.02	0.001	67.0	0.350	0.001	0.010	0.232
	02-déc.-13	32,67,83	935	248.1	37.3	31.4	2.6	101	17.2	33.1	63.2	22.3	550	0.054	0.200	0.160	0.089	0.01	5.87	0.894	2.25	0.004	-0.02	0.07	0.029	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	0.004	-0.003	-0.02	0.001	52.3	0.347	-0.001	0.003	0.008	
	13-mars-14	32,57,82	895	1986.3	2419.6	44.2	1.9	94.5	21.0	31.6	63.2	30.4	539	0.008	0.162	1.67	0.097	-0.01	1.52	0.678	0.91	0.007	-0.02	0.08	0.021	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.004	0.005	-0.003	-0.02	0.001	55.3	0.355	-0.001	0.012	0.015	
	15-juil.-14	32,57,80	866	1732.9	866.4	11.0	3.0	95.8	23.0	32.3	62.5	31.7	524	0.043	0.222	0.280	0.095	0.01	2.19	0.796	2.09	0.008	-0.02	0.04	0.024	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.004	0.003	0.005	-0.003	0.005	67.3	0.364	-0.001	0.004	0.070	
	16-sept.-14	31,98,29	910	>2419.6	1046.2	130.1	3.9	98.1	27.2	32.8	64.4	30.7	514	0.037	0.168	0.890	0.111	0.01	8.86	0.847	3.06	0.004	-0.02	0.04	0.025	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	0.003	-0.003	-0.02	0.001	65.3	0.376	-0.001	0.003	0.034	
	02-déc.-14	32,38,02	888	>2419.6	160.7	104.7	4.0	95.9	24.5	32.3	62.2	29.6	527	0.029	0.094	1.22	0.112	-0.01	4.81	0.823	3.10	0.016	-0.02	0.04	0.021	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	-0.003	-0.02	0.001	62.7	0.359	-0.001	0.005	0.017		
Gabou Goura	06.12.2012	31,87,10	723	112.6	16.0	5.2	0.4	33.0	6.12	37.8	55.1	7.99	399	0.011	0.004	38.3	0.057	-0.01	0.016	0.355	0.03	0.025	-0.02	0.85	0.004	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	0.006	-0.003	-0.02	0.001	64.2	0.421	-0.001	0.014	0.072	
	11.03.2013	33,57,17	870	7.5	4.1	1.0	0.5	35.1	6.04	37.7	56.7	7.98	402	0.004	0.004	37.7	0.059	-0.01	0.012	0.355	0.03	0.008	-0.02	0.84	0.003	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	0.008	-0.003	-0.02	0.001	63.9	0.424	-0.001	0.016	0.023	
	12.06.2013	34,07,11	680	41.0	<1	1.0	0.6	34.7	6.20	38.6	57.3	8.00	403	0.004	0.006	38.2	0.058	-0.01	0.009	0.336	-0.03	0.006	-0.02	0.81	0.007	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	0.008	-0.003	-0.02	0.001	63.4	0.422	-0.001	0.014	0.074	
	13.08.2013	31,47,25	817	816.4	275.5	4.1	0.5	35.0	5.55	38.4	57.0	7.69	404	0.007	0.005	37.9	0.070	-0.01	-0.003	0.317	0.06	0.011	-0.02	0.85	0.007	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	0.008	-0.003	-0.02	0.001	67.9	0.454	-0.001	0.015	0.053	
	02.12.2013	31,17,15	992	>2419.6	4.1	1.0	0.7	33.5	6.04	39.6	57.6	7.96	411	0.003	0.007	37.7	0.053	-0.01	0.008	0.375	0.04	0.003	-0.02	0.73	0.006	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	0.007	-0.003	-0.02	0.001	49.3	0.433	-0.001	0.016	0.032	
	13.03.2014	31,97,24	877	920.8	2.0	1.0	0.5	32.2	5.99	37.8	56.6	7.86	402	-0.003	0.005	36.9	0.051	-0.01	-0.003	0.257	0.05	0.004	-0.02	0.76	0.012	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.004	0.008	-0.003	-0.02	0.001	50.7	0.414	-0.001	0.015	0.013	
	02.12.2014	31,87,15	656	137.6	77.6	27.2	0.0	0.5	32.1	5.21	39.0	56.0	7.96	403	0.006	0.005	36.1	0.041	-0.01	0.015	0.355	0.05	0.008	-0.02	0.75	0.006	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.007	-0.003	-0.02	0.001	61.0	0.432	-0.001	0.016	0.023	
Saga Gassia 1	17.06.2013	35,16,85	245	>2419.6	2419.6	2419.6	4.7	15.4	1.76	11.6	16.0	14.9	131	0.018	0.118	1.45	0.011	-0.01	0.11	0.495	0.21	0.015	-0.02	0.05	0.035	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	0.020	0.006	-0.02	0.001	60.3	0.160	-0.001	0.009	0.803	
	19.08.2013	35,67,09	246	>2419.6	259.5	328.2	4.9	16.2	1.29	11.7	15.8	14.7	130	0.030	0.104	0.509	0.008	0.01	-0.003	0.45	0.27	0.118	-0.02	-0.01	0.031	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	0.021	0.004	-0.02	0.001	60.7	0.157	0.003	0.010	0.877	
	09.12.2013	32,17,02	245	17.2	1.0	17.4	5.1	15.4	1.42	11.6	16.4	15.3	131	0.026	0.115	0.297	0.009	0.15	0.003	0.509	0.46	0.003	-0.02	0.03	0.035	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	0.020	0.003	-0.02	0.001	65.0	0.156	-0.001	0.007	0.416	
	20.03.2014	33,77,40	246	209.8	1.0	10.6	5.1	15.2	1.62	11.1	16.1	15.6	129	0.012	0.069	0.801	0.007	-0.01	-0.003	0.362	0.54	0.013	-0.02	0.05	0.028	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	0.021	-0.003	-0.02	0.001	48.3	0.152	0.001	0.009	0.270	
	17-juil.-14	32,67,36	227	387.3	25.9	6.3	4.1	14.2	0.807	11.0	14.2	11.2	121	0.008	0.023	2.38	0.008	-0.01	0.003	0.509	0.48	0.003	-0.02	0.01	0.031	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.002	0.005	0.004	0.001	68.9	0.155	-0.001	0.014	0.569		
	18-sept.-14	32,77,87	243	435.2	<1	<1	4.2	14.6	0.669	11.2	15.2	11.4	129	0.003	0.010	2.27	0.006	-0.01	-0.003	0.488	0.44	0.004	-0.02	0.01	0.035	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	0.021	0.003	-0.02	0.001	64.2	0.153	-0.001	0.014	0.470	
	01.12.2014	35,17,23	231	15.8	<1	1.0	4.2	14.1	0.827	10.6	14.7	11.7	120	0.008	0.003	3.03	0.006	-0.01	-0.003	0.492	0.55	0.016	-0.02	-0.01	0.035	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	0.020	-0.003	-0.02	0.001	61.1	0.145	-0.001	0.015	0.362	
Telladjé	17.06.2013	33,77,29	1,228	>2419.6	2419.6	2419.6	4.3	67.7	1.54	58.9	122	502	218	0.047	0.269	0.047	0.025	-0.01	-0.286	0.06	0.017	0.02	0.18	0.010	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	0.017	-0.003	-0.02	0.001	40.5	1.035	0.001	-0.01	1.08		
	19.08.2013	32,86,76	760	>2419.6	344.1	51.2	3.4	36.7	2.36	36.8	67.9	268	136	0.031	0.177	0.200	-0.003	0.01	-0.003	0.199	0.24	0.081	-0.02	0.09	0.021	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.013	-0.003	-0.02	0.001	42.3	0.589	0.001	-0.01	1.68		
	09.12.2013	32,86,53	389	>2419.6	2.0	23.9	2.9	12.8	0.907	22.3	29.4	122	78.8	0.008	0.061	0.191	0.011	0.01	-0.003	0.193	0.30	0.006	-0.02	0.01	0.017	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.009	0.003	-0.02	0.001	33.7	0.266	-0.001	0.003	1.52		
	20.03.2014	31,16,54	315	727.0	3.0	10.8	2.6	8.0	1.22	18.3	22.7	92.1	69.1	0.048	0.070	0.159	0.007	-0.01	-0.003	0.099	0.36	0.007	-0.02	0.02	0.017	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	0.009	0.003	-0.02	0.001	35.9	0.208	-0.001	0.003	1.08	
	16.07.2014	33,16,77	296	>2419.6	866.4	69.5	2.9	7.1	1.21	18.0	20.8	82.2	66.2	0.238	0.062	0.810	0.011	0.07	0.214	0.180	0.54	0.003	-0.02	-0.01	0.013	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.009	0.007	0.004	0.001	42.9	0.194	-0.001	0.003	0.779		
	17.09.2014	33,26,88	324	>2419.6	579.4	2.0	2.8	7.1	0.903	18.3	21.1	77.3	78.1	0.317	0.087	0.557	0.009	0.01	0.114	0.171	0.41	0.003	-0.02	-0.01	0.014	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.009	0.003	-0.02	0.001	43.0	0.194	-0.001	0.003	0.032		
	04.12.2014	32,68,60	291	>2419.6	261.3	23.2	2.8	6.7	0.992	17.6	19.3	74.5	77.5	0.214	0.054	0.020	0.008	2.08	0.031	0.175	0.75	0.011	-0.02	-0.01	0.014	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.008	-0.003	-0.02	0.001	42.2						

Nom de village / quartier	Date	Temp. [°C]	pH	C.E. [µS/cm]	Col.tot. [CFU/100ml]	E.Coli [CFU/100ml]	Entéroco. [CFU/100ml]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Cl [mg/l]	Mg [mg/l]	Ca [mg/l]	SO4 [mg/l]	HCO3 [mg/l]	Fe(II) [mg/l]	Mn [mg/l]	NO3 [mg/l]	Br [mg/l]	NH4 [mg/l]	NO2 [mg/l]	F [mg/l]	PO4 [mg/l]	Al [mg/l]	As [mg/l]	BO2 [mg/l]	Ba [mg/l]	Be [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Li [mg/l]	Ni [mg/l]	Pb [mg/l]	Sc [mg/l]	SiO2 [mg/l]	Sr [mg/l]	Ti [mg/l]	V [mg/l]	Zn [mg/l]	
	18.09.2014	31,9	8,7	358	>2419,6	488,4	72,1	0,6	16,1	12,8	13,3	32,6	7,13	109	0,004	0,003	66,0	0,023	-0,01	0,003	0,413	0,41	0,008	-0,02	-0,01	0,006	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,008	-0,003	-0,02	0,001	53,0	0,159	-0,001	0,008	0,281	
	08.12.2014	31,2	7,28	252	>2419,6	<1	<1	0,6	15,7	11,9	12,8	31,4	7,31	104	0,003	0,003	68,7	0,022	-0,01	0,022	0,397	0,47	0,004	-0,02	-0,01	0,010	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,008	-0,003	-0,02	0,001	51,0	0,156	-0,001	0,008	0,232	
Bassora	13.03.2013	31,3	6,99	611	>2419,6	1046,2	120,7	3,0	38,9	67,1	9,92	66,5	7,72	199	0,014	0,142	35,0	0,132	-0,01	-0,097	0,19	0,054	-0,02	0,10	0,141	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	0,003	0,016	0,008	-0,02	0,001	43,7	0,370	0,001	-0,02	0,246		
	17.06.2013	31,6	6,84	603	>2419,6	2419,6	2419,6	3,4	37,7	64,7	8,92	67,4	3,08	235	1,898	0,327	0,057	0,109	0,64	-0,131	0,24	0,028	-0,02	0,09	0,149	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,014	0,003	-0,02	0,001	44,5	0,377	0,001	-0,02	0,111		
	19.08.2013	31,3	6,88	592	>2419,6	1986,3	245,8	3,8	41,3	66,6	8,65	66,2	3,02	230	0,061	0,240	4,63	0,081	1,18	0,052	0,111	0,61	0,147	-0,02	0,08	0,151	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,014	0,004	-0,02	0,001	42,8	0,377	0,003	-0,02	0,337	
	09.12.2013	32,0	6,95	585	>2419,6	579,4	2419,6	3,4	39,0	66,8	8,55	66,5	5,77	229	0,013	0,122	5,23	0,107	-0,01	0,568	0,121	0,08	0,006	-0,02	0,07	0,137	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,014	0,004	-0,02	0,001	35,1	0,380	-0,001	-0,003	0,086	
	20.03.2014	31,4	7,16	530	>2419,6	1299,7	1986,3	3,2	32,7	55,7	6,98	59,3	2,82	210	0,031	0,140	4,86	0,078	0,63	-0,003	0,049	0,08	0,013	-0,02	0,08	0,120	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	0,003	0,014	-0,003	-0,02	0,001	36,7	0,325	0,001	-0,003	0,021	
	17.07.2014	30,8	6,80	518	>2419,6	186,0	501,6	2,9	33,6	49,7	7,48	55,8	3,24	169	0,030	0,142	45,3	0,082	0,23	0,822	0,083	0,12	0,005	-0,02	0,02	0,131	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,016	0,006	-0,02	0,001	49,1	0,337	-0,001	-0,003	0,071	
	18.09.2014	30,7	6,91	876	>2419,6	35,9	4,1	3,5	38,0	59,5	9,47	71,3	4,05	165	0,004	0,154	96,9	0,079	1,04	3,46	0,052	0,13	0,003	-0,02	0,02	0,157	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,019	0,007	-0,02	0,001	49,9	0,485	-0,001	-0,003	0,089	
	08.12.2014	31,6	6,80	596	>2419,6	218,7	45,9	2,8	33,2	52,4	8,85	70,4	4,32	192	0,005	0,121	70,5	0,071	0,13	0,134	0,061	0,13	0,004	-0,02	0,03	0,131	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,016	0,005	-0,02	0,001	46,2	0,453	-0,001	-0,003	0,081	
Dangao	13.06.2013	33,2	7,71	215	77,6	1,0	9,7	3,0	22,4	1,09	6,40	14,0	4,38	126	0,068	0,005	3,69	0,008	-0,01	0,003	0,226	0,19	0,028	-0,02	0,02	0,007	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	0,004	0,028	-0,003	-0,02	0,001	50,3	0,123	0,001	0,008	0,122	
	14.08.2013	33,6	8,02	209	648,8	49,6	1,0	3,1	23,7	0,380	5,10	14,9	4,50	125	0,036	0,004	1,22	0,001	-0,01	-0,003	0,203	0,30	0,060	-0,02	0,04	0,009	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	0,003	0,027	-0,003	-0,02	0,001	46,9	0,118	0,001	0,008	0,173	
	04.12.2013	31,9	7,94	221	18,7	1,0	1,0	3,4	22,2	0,574	4,65	16,3	3,47	128	0,017	0,002	0,113	0,007	-0,01	-0,003	0,220	0,39	0,012	-0,02	0,01	0,015	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	0,006	0,026	-0,003	-0,02	0,001	33,8	0,122	-0,001	0,004	0,074	
	14.03.2014	32,1	7,54	218	30,5	1,0	1,0	3,3	21,9	0,73	4,30	16,6	2,71	131	0,018	0,015	0,059	0,004	-0,01	-0,003	0,121	0,36	0,005	-0,02	0,04	0,018	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	0,009	0,026	-0,003	-0,02	0,001	35,2	0,127	-0,001	0,003	0,112	
	16.07.2014																																								
	17.09.2014																																								
	04.12.2014	31,2	7,50	215	3,0	<1	2,0	3,3	21,2	0,575	4,36	16,9	2,66	131	0,008	0,001	0,250	0,005	0,00	-0,003	0,192	0,41	0,006	-0,02	-0,01	0,016	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	0,003	0,025	-0,003	-0,02	0,001	39,6	0,125	-0,001	-0,003	0,109	
Goudel Tassiba	12.06.2013	33,5	7,00	252	>2419,6	1,0	72,7	3,9	12,7	3,02	9,20	19,9	9,30	70,9	0,012	0,022	57,4	0,027	0,02	0,047	0,193	0,27	0,014	-0,02	0,06	0,005	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	0,004	0,009	0,003	-0,02	0,001	63,4	0,166	-0,001	-0,02	0,088	
	13.08.2013	31,5	7,02	255	>2419,6	43,5	410,6	3,6	13,3	2,60	9,15	18,5	8,00	64,8	0,014	0,010	60,1	0,036	-0,01	-0,003	0,166	0,37	0,012	-0,02	0,01	0,005	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,010	-0,003	-0,02	0,001	70,0	0,180	-0,001	0,004	0,063	
	02.12.2013	32,3	6,79	254	1553,1	20,9	5,1	3,7	12,7	2,54	9,32	20,4	7,90	64,6	0,003	0,004	63,8	0,025	-0,01	0,003	0,175	0,42	0,003	-0,02	-0,01	0,005	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,009	-0,003	-0,02	0,001	49,3	0,168	-0,001	0,003	0,024	
	13.03.2014	32,6	7,14	252	22,8	6,3	2,0	3,5	11,9	2,81	8,66	19,3	6,95	63,8	0,003	0,005	63,0	0,020	-0,01	-0,003	0,106	0,42	0,006	-0,02	0,02	0,006	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	0,004	0,009	-0,003	-0,02	0,001	51,8	0,165	-0,001	0,003	0,017	
	15.07.2014																																								
	16.09.2014																																								
	02.12.2014	32,6	6,84	251	>2419,6	2,0	64,4	3,9	12,2	3,03	8,89	19,5	7,08	66,4	0,008	0,006	59,2	0,021	-0,01	-0,003	0,170	0,08	0,014	-0,02	-0,01	0,035	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,02	0,001	16,9	0,043	-0,001	-0,003	0,021		
Saga Gourma 1	23.07.2014	31,3	7,54	582	1986,3	686,7	48,8	1,3	25,3	12,6	30,3	43,4	44,4	139	0,003	0,001	135	0,086	-0,01	0,018	0,370	0,27	0,005	-0,02	-0,01	0,004	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,008	-0,003	-0,02	0,001	84,4	0,407	-0,001	0,019	0,022	
	22.09.2014	32,2	7,43	673	>2419,6	1046,2	113,0	1,4	30,1	22,5	36,5	51,2	52,7	157	-0,003	0,002	156	0,100	-0,01	0,024	0,345	0,27	0,004	-0,02	-0,01	0,006	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,008	-0,003	-0,02	0,001	83,7	0,501	-0,001	0,019	0,030	
	10.12.2014	32,5	7,25	607	261,3	1,0	<1	1,2	26,6	14,3	34,1	44,3	50,9	143	0,003	0,002	144	0,080	-0,01	0,013	0,338	0,30	0,005	-0,02	-0,01	0,003	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,009	-0,003	-0,02	0,001	79,8	0,356	-0,001	0,020	0,045	
Diadjiré	21.07.2014	31,6	7,56	470	8,6	3,0	<1	0,9	23,2	0,967	27,6	39,4	5,96	276	-0,003	0,001	24,9	0,013	-0,01	0,013	0,394	0,07	0,005	-0,02	0,00	0,003	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	0,004	0,011	-0,003	-0,02	0,001	18,3	0,535	-0,001	-0,003	0,028	
	23.09.2014	31,9	7,69	469	52,8	3,1	6,1	0,9	23,1	1,2	28,5	38,4	6,34	277	-0,003	0,001	24,6	0,010	-0,01	-0,003	0,385	0,05	0,003	-0,02	-0,01	0,002	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	0,004	0,011	-0,003	-0,02	0,001	18,0	0,550	-0,001	-0,003	0,024	
	03.12.2014																																								

Alluvial

Nom de village / quartier	Date	Temp. (°C)	pH	C.E. (µS/cm)	Col.tot. (CFU/100ml)	E.Coli (CFU/100ml)	Entéroc. (CFU/100ml)	K (mg/l)	Na (mg/l)	Cl (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Fe(II) (mg/l)	Mn (mg/l)	NO3 (mg/l)	Br (mg/l)	NH4 (mg/l)	NO2 (mg/l)	F (mg/l)	PO4 (mg/l)	Al (mg/l)	As (mg/l)	BO2 (mg/l)	Ba (mg/l)	Be (mg/l)	Cd (mg/l)	Co (mg/l)	Cr (mg/l)	Cu (mg/l)	Li (mg/l)	Ni (mg/l)	Pb (mg/l)	Sc (mg/l)	SiO2 (mg/l)	Sr (mg/l)	Ti (mg/l)	V (mg/l)	Zn (mg/l)	
Kongou Moussa Kwara	3-déc.-12	31,0	6,16	270	>2419,6	116,9	3,0	0,9	33,0	13,5	0,330	5,42	0,98	15,6	0,023	0,017	69,8	0,128	-0,01	0,084	0,041	-0,03	0,022	-0,02	0,07	0,049	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,02	-0,001	16,7	0,021	-0,001	-0,003	0,020
Gorou Beri	3-déc.-12	31,0	7,00	424	1732,9	165,0	53,7	0,3	43,3	27,6	4,22	20,0	11,6	117	0,017	0,002	21,8	0,044	0,01	0,01	1,22	-0,03	0,025	-0,02	0,14	0,120	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,02	-0,001	46,8	0,165	-0,001	-0,003	0,026	
Lossa Goungou	4-déc.-12	28,9	7,60	770	2419,6	178,5	25,9	1,0	35,1	15,4	39,3	63,8	11,9	412	0,014	0,002	34,2	0,071	0,01	0,003	0,302	0,10	0,063	-0,02	0,11	0,007	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	0,004	0,008	-0,003	-0,02	-0,001	63,9	0,453	-0,001	0,007	0,321	
Lossa Goungou	12-mars-13	29,6	7,53	742	2419,6	43,5	1,0	1,0	36,7	14,6	40,2	66,3	12,1	429	0,003	0,005	34,9	0,071	-0,01	-0,003	0,274	0,08	0,003	-0,02	0,08	0,006	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,010	-0,003	-0,02	-0,001	67,6	0,483	-0,001	0,007	0,059	
Lossa Goungou	14-juin-13	31,5	7,45	741	1011,2	85,5	104,3	1,1	36,0	14,8	40,0	66,0	12,3	424	0,006	0,004	36,0	0,075	-0,01	-0,003	0,296	0,05	0,015	-0,02	0,07	0,007	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,009	-0,003	-0,02	-0,001	66,7	0,480	0,001	0,006	0,135	
Lossa Goungou	18-août-13	29,9	7,65	792	2419,6	81,3	223,5	1,4	37,0	14,1	38,8	64,4	12,2	419	0,014	0,005	32,9	0,064	0,05	-0,003	0,268	0,14	0,043	-0,02	0,08	0,011	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,009	-0,003	-0,02	-0,001	66,3	0,481	0,001	0,008	0,163	
Lossa Goungou	3-déc.-13	29,7	7,51	755	2419,6	98,3	4,0	1,2	36,5	16,3	42,3	68,7	12,3	430	-0,003	0,007	36,7	0,069	0,02	0,005	0,314	0,11	0,003	-0,02	0,03	0,007	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,009	-0,003	-0,02	-0,001	51,1	0,490	-0,001	0,007	0,045	
Lossa Goungou	18-mars-14	29,1	7,56	759	1732,9	28,5	1,0	1,6	34,4	17,2	39,7	67,1	12,5	428	0,005	0,006	37,9	0,064	0,09	0,012	0,209	0,10	0,009	-0,02	0,06	0,012	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	0,004	0,010	-0,003	-0,02	-0,001	53,7	0,480	-0,001	0,007	0,052	
Lossa Goungou	2-déc.-14	29,3	7,50	756	>2419,6	48,0	2419,6	1,2	35,4	19,2	42,0	68,4	12,6	429	0,006	0,003	41,9	0,065	-0,01	-0,003	0,289	0,10	0,007	-0,02	0,02	0,012	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,008	-0,003	-0,02	-0,001	64,2	0,503	-0,001	0,007	0,051	
Lamordé	4-déc.-12	28,9	7,50	1,145	>2419,6	1299,7	40,4	9,3	95,9	120	33,4	70,9	79,1	344	0,009	0,003	24,3	0,340	0,02	0,005	0,401	0,61	0,009	0,03	0,13	0,246	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,011	-0,003	-0,02	-0,001	46,7	0,610	-0,001	0,007	0,032	
Lamordé	12-mars-13	30,0	7,25	827	>2419,6	2419,6	18,0	8,9	85,7	28,7	18,5	60,5	28,1	424	0,147	0,245	0,41	0,134	-0,01	0,422	0,480	0,77	0,013	0,02	0,13	0,188	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,003	-0,003	-0,02	-0,001	68,3	0,463	0,001	0,009	0,044	
Lamordé	14-juin-13	33,3	7,76	850	>2419,6	36,4	2419,6	11,4	90,4	42,5	22,2	64,6	33,1	445	0,013	0,088	1,97	0,173	-0,01	-0,003	0,449	0,99	0,016	-0,02	0,11	0,167	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,005	-0,003	-0,02	-0,001	62,9	0,492	0,001	0,004	0,059	
Lamordé	18-août-13	30,8	7,66	871	2419,6	172,3	50,5	9,8	97,6	52,5	22,0	65,7	26,9	438	0,032	0,227	0,662	0,17	0,20	0,028	0,397	1,05	0,113	-0,02	0,10	0,179	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,006	-0,003	-0,02	-0,001	56,8	0,494	0,002	0,006	0,273	
Lamordé	3-déc.-13	31,5	7,55	1,018	1553,1	52,0	613,1	10,3	114	75,6	27,1	70,5	47,3	469	0,020	0,322	0,527	0,230	0,04	0,003	0,503	0,82	0,012	-0,02	0,08	0,237	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,007	-0,003	-0,02	-0,001	43,3	0,594	-0,001	0,006	0,035	
Lamordé	18-mars-14	30,5	7,83	958	33,7	22,1	1,0	9,9	101	58,6	24,5	63,9	40,9	453	0,004	0,045	0,259	0,167	0,03	-0,003	0,348	0,75	0,006	0,05	0,10	0,203	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,007	-0,003	-0,02	-0,001	47,0	0,529	-0,001	0,003	0,031	
Lamordé	13-juil.-14	32,3	8,09	639				8,3	61,5	32,3	16,3	49,6	26,2	316	0,004	0,029	5,24	0,113	-0,01	-0,003	0,368	0,68	0,010	0,02	0,06	0,123	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,005	-0,003	-0,02	-0,001	50,7	0,378	-0,001	0,005	0,066	
Lamordé	13-sept.-14	31,6	8,08	748	>2419,6	2419,6	61,9	9,1	76,4	51,8	19,9	59,1	29,5	358	-0,003	0,049	6,77	0,155	-0,01	-0,003	0,363	0,84	0,005	0,04	0,07	0,158	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,006	-0,003	-0,02	-0,001	48,1	0,454	-0,001	0,004	0,038	
Lamordé	3-déc.-14	30,4	7,47	807	1413,6	770,1	68,2	8,1	82,7	59,6	23,7	57,6	19,2	407	0,012	0,642	0,663	0,182	-0,01	0,336	0,445	1,06	0,006	0,15	0,06	0,234	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,008	-0,003	-0,02	-0,001	46,4	0,491	-0,001	-0,003	0,021	
Kangel	4-déc.-12	30,8	6,92	250	143,6	21,1	1,0	1,5	8,1	2,56	9,53	16,3	14,8	97,0	0,012	0,003	4,36	0,032	0,01	0,003	0,417	0,03	0,020	-0,02	0,09	0,032	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,02	-0,001	32,1	0,112	-0,001	-0,003	0,068	
Kangel	12-mars-13	31,8	6,98	200	>2419,6	328,0	10,0	1,4	8,2	1,97	9,91	16,5	15,3	98,1	0,011	0,005	4,19	0,029	-0,01	0,017	0,387	-0,03	0,026	-0,02	0,03	0,029	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,02	-0,001	33,0	0,112	0,001	-0,003	0,135
Kangel	14-juin-13	31,7	6,75	199	>2419,6	121,1	2419,6	1,3	8,3	1,68	10,4	16,4	15,5	96,4	0,017	0,005	2,97	0,031	0,02	0,004	0,434	-0,03	0,029	-0,02	0,01	0,026	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,02	-0,001	32,5	0,108	-0,001	-0,003	0,065
Kangel	15-août-13	30,6	6,90	203	>2419,6	61,3	1,0	1,3	8,4	1,66	10,2	16,6	15,2	96,3	0,032	0,003	3,09	0,021	-0,01	0,005	0,390	0,04	0,103	-0,02	0,02	0,028	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,02	-0,001	33,2	0,111	0,001	-0,003	0,229
Kangel	23-déc.-13	30,7	7,00	218	1553,1	12,2	1413,6	1,4	8,4	2,04	10,1	17,0	15,2	94,6	0,012	0,003	4,11	0,027	0,03	0,007	0,420	0,02	0,013	-0,02	-0,01	0,027	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,02	-0,001	26,2	0,112	-0,001	-0,003	0,019
Kangel	18-mars-14	32,0	7,32	219	>2419,6	34,1	1,0	1,5	8,3	2,36	10,1	17,5	16,7	100	0,024	0,007	3,10	0,022	0,06	0,003	0,286	0,04	0,035	-0,02	0,03	0,029	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,02	-0,001	27,2	0,113	0,001	-0,003	0,020
Kangel	3-déc.-14	31,0	7,28	214	1299,7	38,4	613,1	1,2	8,8	2,40	10,6	17,1	16,6	97,1	0,007	0,009	4,83	0,025	-0,01	0,006	0,402	0,05	0,017	-0,02	-0,01	0,029	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,02	-0,001	32,7	0,118	-0,001	-0,003	0,024
Sagua	5-déc.-12	31,0	7,10	302	1011,2	115,3	1,0	0,9	11,0	8,86	11,0	14,4	1,95	47,0	0,015	0,003	67,8	0,066	0,06	0,13	0,230	0,47	0,019	-0,02	0,08	0,008	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,004	-0,003	-0,02	-0,001	76,2	0,147	-0,001	0,024	0,049	
Sagua	12-mars-13	31,7	7,00	238	>2419,6	81,0	57,0	1,0	11,6	8,03	11,0	14,2	1,90	46,7	0,013	0,003	65,7	0,046	-0,01	0,11	0,215	0,46	0,020	-0,02	0,03	0,007	-0,0005	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,004	-0,003	-0,02							

Eau de surface

Nom de village / quartier	Date	pH	C.E. [µS/cm]	Col.tot. [CFU/100ml]	E.Coli [CFU/100ml]	Entéroc. [CFU/100ml]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Cl [mg/l]	Mg [mg/l]	Ca [mg/l]	SO4 [mg/l]	HCO3 [mg/l]	Fe(II) [mg/l]	Mn [mg/l]	NO3 [mg/l]	Br [mg/l]	NH4 [mg/l]	NO2 [mg/l]	F [mg/l]	PO4 [mg/l]	Al [mg/l]	As [mg/l]	BO2 [mg/l]	Ba [mg/l]	Be [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Li [mg/l]	Ni [mg/l]	Pb [mg/l]	Sc [mg/l]	SiO2 [mg/l]	Sr [mg/l]	Ti [mg/l]	V [mg/l]	Zn [mg/l]	
Pont Kennedy	7-déc-12	6.90	46	>2419.6	47.9	62.7	1.6	2.8	0.43	1.67	3.38	0.13	26.9	0.127	0.002	0.801		0.06	0.005	0.070	-0.03	0.038	-0.02	0.08	0.039	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	14.2	0.041	-0.001	-0.003	0.065
Pont Kennedy	14-mars-13	7.03	68	>2419.6	42.2	1	2.5	4.4	0.72	2.04	3.96	0.07	35.0	0.107	0.003	0.02	0.012	-0.01	0.004	0.079	-0.03	0.033	-0.02	0.02	0.047	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	13.2	0.050	0.001	-0.003	0.039
Pont Kennedy	18-juin-13	7.66	101	1553.1	74.9	1	4.4	7.1	3.10	3.15	4.75	1.33	47.4	0.169	0.007	0.79	0.008	0.05	0.035	0.157	0.04	0.112	-0.02	0.01	0.049	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	11.5	0.063	0.001	-0.003	0.133	
Pont Kennedy	16-août-13	7.21	40	>2419.6	920.8	5	3.1	1.4	1.10	1.31	4.16	0.850	22.8	0.115	0.007	2.10	-0.003	0.01	0.022	0.125	0.06	0.187	-0.02	0.02	0.032	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	6.2	0.038	0.003	-0.003	0.169	
Pont Kennedy	5-déc-13	7.41	60	1203.3	57.1	2	1.5	3.2	0.326	1.78	3.79	0.210	29.9	0.238	0.006	0.039	-0.003	0.03	0.003	0.053	0.04	0.050	-0.02	-0.01	0.046	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	11.4	0.045	0.001	-0.003	0.035	
Pont Kennedy	17-mars-14	8.73	96	13.5	6.3	1	2.4	4.7	0.790	2.25	4.43	0.186	39.5	0.204	0.007	0.046	-0.003	0.05	-0.003	0.040	0.03	0.047	-0.02	0.02	0.046	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.004	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	10.9	0.054	0.001	-0.003	0.014	
Pont Kennedy	13-juil-14	7.83	65				3.5	2.3	1.71	1.39	3.65	2.20	23.4	0.415	0.031	3.50	0.009	0.03	0.006	0.134	0.06	0.557	-0.02	0.01	0.046	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.006	-0.003	-0.003	-0.02	0.001	7.5	0.044	0.004	0.003	0.027	
Pont Kennedy	3-sept-14	7.71	112	83.3	43.8	2	3.5	2.9	1.19	1.88	4.57	0.840	32.9	0.268	0.008	1.19	0.003	0.02	-0.003	0.111	0.03	0.212	-0.02	0.01	0.043	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.004	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	11.4	0.050	0.001	-0.003	0.047	
Pont Kennedy	5-déc-14	7.10	50	2419.6	36.4	3	1.5	2.9	0.306	1.64	3.32	0.238	26.4	0.201	0.004	0.039	-0.003	0.02	-0.003	0.060	0.03	0.089	-0.02	-0.01	0.041	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	14.6	0.040	0.002	-0.003	0.020	
Pont Chinois	7-déc-12	6.90	45	>2419.6	86.2	44.1	1.5	2.7	0.29	1.57	3.22	0.10	26.2	0.146	0.002	0.154	0.074	0.03	-0.003	0.070	-0.03	0.080	-0.02	0.07	0.041	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	13.6	0.038	-0.001	-0.003	0.192	
Pont Chinois	14-mars-13	7.06	69	2419.6	218.7	8.5	2.5	4.5	0.85	2.04	3.94	0.10	36.6	0.166	0.002	0.09		-0.01	0.178	0.078	-0.03	0.048	-0.02	0.02	0.047	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	13.1	0.050	0.001	-0.003	0.064	
Pont Chinois	18-juin-13	7.55	87	>2419.6	2419.6	51.9	4.4	7.1	2.11	3.12	4.61	1.00	48.0	0.148	0.003	0.781	0.008	0.06	0.118	0.154	-0.03	0.116	-0.02	0.02	0.050	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	11.3	0.061	0.001	-0.003	0.127	
Pont Chinois	16-août-13	7.29	45	>2419.6	980.4	20.6	3.3	1.4	1.66	1.52	3.49	0.713	21.5	0.078	0.003	2.06	0.003	0.01	0.019	0.124	-0.03	0.148	-0.02	0.02	0.032	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	5.8	0.037	0.002	-0.003	0.157	
Pont Chinois	5-déc-13	7.60	53	2419.6	63.7	1	1.4	3.1	0.138	1.74	3.70	0.025	29.7	0.270	0.008	0.007	-0.003	0.02	-0.003	0.031	0.02	0.047	-0.02	-0.01	0.044	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	11.2	0.042	0.001	-0.003	0.018	
Pont Chinois	17-mars-14	7.66	75	28.1	18.7	1	2.4	4.6	0.73	2.21	4.46	0.179	38.3	0.221	0.004	0.054	-0.003	0.05	-0.003	0.042	0.03	0.055	-0.02	0.02	0.049	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.004	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	10.7	0.053	0.001	-0.003	0.012	
Pont Chinois	13-juil-14	7.75	45				3.5	2.4	1.66	1.39	3.57	1.41	21.5	0.090	0.004	3.29	0.007	0.03	0.005	0.135	0.03	0.152	-0.02	0.01	0.031	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.005	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	5.9	0.033	0.002	-0.003	0.008	
Pont Chinois	3-sept-14	7.91	56	483.3	116.6	<1	3.3	2.9	1.16	1.87	4.47	0.847	32.0	0.238	0.006	1.08	0.003	0.02	-0.003	0.111	0.03	0.202	-0.02	-0.01	0.043	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.004	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	11.3	0.045	0.002	-0.003	0.026	
Pont Chinois	5-déc-14	7.20	46	>2419.6	51.2	1	1.5	2.8	0.271	1.59	3.29	0.118	25.9	0.278	0.004	0.028	-0.003	0.02	-0.003	0.058	0.03	0.075	-0.02	-0.01	0.044	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	14.5	0.040	0.001	-0.003	0.014		
Tondey Kouarey	15-mars-13	7.08	74	>2419.6	488.4	15.3	2.5	4.5	0.70	2.05	3.91	0.08	37.0	0.118	0.022	0.05		-0.01	0.003	0.080	-0.03	0.069	-0.02	0.02	0.046	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	13.0	0.049	0.001	-0.003	0.202	
Tondey Kouarey	18-juin-13	7.97	87	>2419.6	238.2	14.4	4.4	7.1	1.86	3.10	4.51	0.9	47.4	0.071	0.002	0.913	0.008	0.07	0.059	0.159	-0.03	0.063	-0.02	0.02	0.046	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	11.1	0.059	-0.001	-0.003	0.067	
Tondey Kouarey	16-août-13	6.93	56	>2419.6	2419.6	80	3.4	3.3	2.21	2.00	4.30	1.03	30.0	0.085	0.010	2.07	-0.003	0.01	-0.003	0.160	0.03	0.157	-0.02	0.02	0.034	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	7.2	0.043	0.001	-0.003	0.168	
Tondey Kouarey	5-déc-13	7.20	55	>2419.6	1986.3	43.1	1.4	3.1	0.195	1.76	3.76	0.052	29.6	0.308	0.016	0.248	0.004	0.04	-0.003	0.066	0.02	0.049	-0.02	-0.01	0.044	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	11.2	0.041	0.001	-0.003	0.012	
Tondey Kouarey	17-mars-14	7.50	76	206.4	45.7	1	2.4	4.6	0.67	2.21	4.34	0.122	39.0	0.281	0.004	0.010	-0.003	0.04	-0.003	0.037	-0.03	0.060	-0.02	0.02	0.051	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.004	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	10.7	0.053	0.001	-0.003	0.010	
Tondey Kouarey	5-déc-14	7.05	48	>2419.6	65	15.3	1.5	2.9	0.269	1.63	3.36	0.100	26.4	0.323	0.005	0.047	-0.003	0.02	-0.003	0.059	0.03	0.081	-0.02	-0.01	0.044	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	14.5	0.041	0.001	-0.003	0.014	
Station Kollo	15-mars-13	7.07	73	>2419.6	275.5	3.1	2.6	4.7	1.03	2.06	4.05	0.08	37.4	0.158	0.012	0.08		-0.01	0.044	0.084	-0.03	0.087	-0.02	0.02	0.046	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	12.7	0.049	0.001	-0.003	0.219	
Station Kollo	18-juin-13	7.76	93	>2419.6	16.1	2	4.5	7.4	2.26	3.21	4.80	1.00	50.2	0.103	0.004	0.374	0.009	0.06	0.08	0.161	0.07	0.086	-0.02	0.02	0.057	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	12.4	0.070	0.001	-0.003	0.110	
Station Kollo	16-août-13	6.84	46	>2419.6	2419.6	59.9	3.1	2.2	0.936	1.25	3.18	0.998	21.0	0.047	0.004	2.88	-0.003	0.01	-0.003	0.147	0.03	0.125	-0.02	0.01	0.029	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	5.6	0.033	0.002	-0.003	0.198	
Station Kollo	5-déc-13	7.41	57	>2419.6	172.5	10.6	1.5	3.2	0.315	1.81	3.80	0.074	30.3	0.287	0.013	0.043	-0.003	0.05	0.004	0.063	0.03	0.056	-0.02	-0.01	0.043	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	11.2	0.042	0.001	-0.003	0.022	
Station Kollo	17-mars-14	8.20	88	298.7	125.9	1	2.4	4.6	0.72	2.20	4.35	0.131	38.5	0.258	0.003	0.017	-0.003	0.07	-0.003	0.036	-0.03	0.064	-0.02	0.02	0.049	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	10.7	0.053	0.001	-0.003	0.009	
Station Kollo	5-déc-14	7.10	48	>2419.6	95.9	7.4	1.5	3.0	0.303	1.68	3.50	0.123	27.0	0.327	0.010	0.018	-0.003	0.01	-0.003	0.060	0.02	0.082	-0.02	-0.01	0.045	-0.0005	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.02	-0.001	14.4	0.042	0.001	-0.003	0.009	

Annexe 3 : Résultats des analyses isotopiques

Nom de village / quartier	Date	$\delta^{18}\text{O}$	Écart-type	$\delta^2\text{H}$	Écart-type
Kossey Dgerma	15-juil.-14	-2.78	0.14	-17.1	0.7
Kossey Dgerma	02-déc.-14	-2.84	0.08	-16.8	0.2
Gabou Goura	06-déc.-12	-3.46	0.10	-22.3	0.4
Gabou Goura	11-mars-13	-3.43	0.06	-24.0	0.1
Gabou Goura	02-déc.-14	-3.80	0.08	-23.1	0.4
Saga Gassia 1	01-déc.-14	-4.83	0.09	-28.8	0.2
Telladjé	04-déc.-14	-4.99	0.04	-31.6	0.1
Route Filingué Eglise Garbado	04-déc.-14	-4.75	0.14	-29.1	0.8
Kouaramey	06-déc.-12	-4.26	0.18	-26.9	0.5
Kouaramey	11-mars-13	-4.25	0.02	-28.9	0.2
Kouaramey	03-déc.-14	-4.70	0.10	-28.8	0.1
Boukoki Mairie Garage 1	04-déc.-14	-3.50	0.14	-20.5	0.7
Gamkalley Sebangué	06-déc.-12	-3.34	0.17	-21.8	0.7
Gamkalley Sebangué	11-mars-13	-3.13	0.03	-23.0	0.5
Gamkalley Gollé	08-déc.-14	-2.94	0.07	-19.4	0.4
Bassora	13-mars-13	-0.11	0.02	-8.3	0.4
Bassora	08-déc.-14	-0.54	0.07	-8.3	0.4
Dangao	04-déc.-14	-4.69	0.04	-29.8	0.1
Goudel Tassiba	02-déc.-14	-3.90	0.06	-23.9	0.2
Saga Gourma 1	10-déc.-14	-3.96	0.03	-24.3	0.4
Diadjiré	03-déc.-14	-4.71	0.04	-28.0	0.1

Nom de village / quartier	Date	$\delta^{18}\text{O}$	Écart-type	$\delta^2\text{H}$	Écart-type
Tondidia Peul	04-déc.-12	-3.40	0.07	-20.6	0.2
Tondidia Peul	14-mars-13	-3.30	0.03	-22.1	0.2
Tondibia Peul	02-déc.-14	-3.64	0.05	-22.1	0.3
Goudel Gourou Siminti	03-déc.-12	-3.67	0.02	-23.2	0.1
Goudel Gourou Siminti	14-mars-13	-3.78	0.06	-25.9	0.3
Goudel Gourou Siminti	09-déc.-14	-3.77	0.04	-23.0	0.3
Kariel	04-déc.-12	-3.96	0.09	-23.4	0.0
Kariel	12-mars-13	-3.58	0.03	-23.9	0.3
Kariel	03-déc.-14	-4.00	0.05	-23.4	0.3
Timeré	05-déc.-12	-3.99	0.03	-24.9	0.1
Timeré	12-mars-13	-3.92	0.01	-25.8	0.4
Timeré	03-déc.-14	-4.07	0.07	-24.5	0.2
Saga Gassia 2	05-déc.-12	-3.73	0.17	-24.0	0.6
Saga Gassia 2	13-mars-13	-3.67	0.05	-24.4	0.5
Saga Gassia 2	01-déc.-14	-4.13	0.09	-24.7	0.6
Saga Gorou 1	13-mars-12	-3.58	0.00	-25.1	0.1
Saga Gorou 1	09-déc.-14	-3.47	0.05	-21.9	0.3
Kongou Saboncaré	13-mars-13	-4.36	0.05	-27.3	0.3
Kongou Saboncaré	09-déc.-14	-3.57	0.03	-19.5	0.4
Kongou Gonga	03-déc.-12	-4.11	0.05	-23.2	0.1
Kongou Gonga	13-mars-13	-4.01	0.06	-25.2	0.4
Kongou Gonga	09-déc.-14	-4.41	0.03	-24.4	0.2
Saga Gassia 3	01-déc.-14	-4.79	0.04	-28.8	0.1

Nom de village / quartier	Date	$\delta^{18}\text{O}$	Écart-type	$\delta^2\text{H}$	Écart-type
Kongou Mousse Kwara	3-déc.-12	-3.51	0.19	-20.7	0.4
Gorou Beri	3-déc.-12	-3.95	0.05	-21.7	0.2
Lossa Goungou	4-déc.-12	-3.10	0.10	-19.9	0.6
Lossa Goungou	12-mars-13	-3.27	0.05	-22.9	0.6
Lossa Goungou	2-déc.-14	-3.56	0.05	-21.8	0.2
Lamordé	4-déc.-12	-1.48	0.05	-12.7	0.1
Lamordé	12-mars-13	-1.07	0.07	-14.8	0.2
Lamordé	3-déc.-14	-1.56	0.04	-12.9	0.1
Kangel	4-déc.-12	-3.26	0.05	-17.6	0.1
Kangel	12-mars-13	-3.04	0.08	-18.8	0.4
Kangel	3-déc.-14	-3.68	0.04	-20.2	0.1
Sagua	5-déc.-12	-3.55	0.05	-21.9	0.2
Sagua	12-mars-13	-3.36	0.07	-22.9	0.2
Sagua	3-déc.-14	-3.88	0.03	-23.5	0.1

Nom de village / quartier	Date	$\delta^{18}\text{O}$	Écart-type	$\delta^2\text{H}$	Écart-type
Pont Kennedy	7-déc.-12	-3.07	0.03	-23.4	0.2
Pont Kennedy	14-mars-13	0.15	0.03	-7.8	0.2
Pont Kennedy	5-déc.-14	-3.00	0.06	-21.2	0.3
Pont Chinois	7-déc.-12	-3.05	0.04	-23.5	0.1
Pont Chinois	14-mars-13	0.15	0.06	-7.8	0.3
Pont Chinois	5-déc.-14	-3.03	0.08	-20.8	0.3
Tonday Kouarey	15-mars-13	0.29	0.04	-7.5	0.1
Station Tonday Kouarey	5-déc.-14	-2.95	0.11	-20.3	0.3
Station Kollo	15-mars-13	0.42	0.07	-6.3	0.5
Station Kollo	5-déc.-14	-2.94	0.05	-20.4	0.3