



ALGÉRIE



BÉNIN



MALI



NIGER



NIGÉRIA

Gestion intégrée et durable des systèmes aquifères et des bassins partagés de la région du Sahel

RAF/7/011

SYSTÈME AQUIFÈRE D'IULLEMEDEN

2017

NOTE DE L'ÉDITEUR

Le présent rapport n'est pas une publication officielle de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Son contenu n'a pas fait l'objet d'un examen officiel par l'AIEA. Les opinions exprimées ne reflètent pas nécessairement celles de l'AIEA ni de ses États Membres. L'emploi d'appellations particulières pour désigner des pays ou des territoires n'implique de la part de l'AIEA aucune prise de position quant au statut juridique de ces pays ou territoires, ou de leurs autorités et institutions, ni quant au tracé de leurs frontières. La mention de noms de sociétés ou de produits particuliers (qu'ils soient ou non signalés comme marques déposées) n'implique aucune intention d'empiéter sur des droits de propriété et ne doit pas être considérée non plus comme valant approbation ou recommandation de la part de l'AIEA.

RAPPORT DU PROJET RÉGIONAL DE COOPÉRATION TECHNIQUE RAF/7/011 APPUYÉ PAR L'AIEA

SYSTÈME AQUIFÈRE D'IULLEMEDEN

CONTREPARTIES :

- M. Adnane Souffi MOULLA (Algérie)
- M. Abdelwaheb SMATI (Algérie)
- M. Philippe Armand ADJOMAYI (Bénin)
- M. Moussa BOUKARI (Bénin)
- M. Aly THIAM (Mali)
- M. Sidi KONÉ (Mali)
- M. Sanoussi RABÉ (Niger)
- M. Ismaghil BOBADJI (Niger)
- M. Christopher Madubuko MADUABUCHI (Nigeria)
- M. Adegboyega Albert ADEDEJI (Nigeria)

EXPERT:

- M. Kamel ZOUARI (Tunisie)

Reproduit par l'AIEA
Vienne (Autriche), 2017

Table des matières

1. INTRODUCTION	1
2. SITES D'ÉTUDE	3
2.1. Localisation et topographie générale	3
2.2. Climatologie	5
2.3. Utilisation des terres et types de végétaux	7
2.4. Exploitation et approvisionnement en eau	8
2.5. Géologie et hydrogéologie du système aquifère d'Iullemeden	9
2.6. Système aquifère d'Iullemeden : bilan hydrique	21
3. ACQUISITION DE DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE UTILISÉE	24
4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION	22
4.1. Données géochimiques du bassin du Niger (Dosso)	24
4.1.1. Étude géochimique du bassin du Niger (Dosso)	24
4.1.2. Données isotopiques du bassin du Niger (Dosso)	37
4.2. Données géochimiques du bassin du Nigeria	45
4.2.1. Étude géochimique du bassin du Nigeria	45
4.2.2. Données isotopiques du bassin du Nigeria	59
4.3. Données géochimiques du bassin de Kandi (Bénin)	64
4.3.1. Étude hydrochimique du bassin de Kandi (Bénin)	64
4.3.2. Étude isotopique du bassin de Kandi (Bénin)	78
4.4. Données géochimiques du système aquifère d'Iullemeden	84
4.4.1. Étude hydrochimique du système aquifère d'Iullemeden	84
4.4.2. Étude isotopique du bassin transfrontières d'Iullemeden	90
4.4.3. Étude statistique du bassin transfrontières d'Iullemeden	94
5. CONCLUSIONS	97
6. RÉFÉRENCES	101
ABRÉVIATIONS	103
ANNEXES	104

1. INTRODUCTION

Le système aquifère d'Iullemeden (SAI), qui est partagé par l'Algérie, le Mali, le Niger, le Nigeria et le Bénin, constitue la principale source pérenne d'eau potable et une ressource stratégique pour le développement durable des pays concernés. Sa capacité est estimée à 2000 km³ (fig. 1). Il est confronté à de multiples problèmes, notamment en ce qui concerne l'accès aux ressources en eau compte tenu de sa trop grande profondeur (plus de 600 m) dans certaines régions. En outre, l'absence d'un mode de gestion stratégique de ces ressources a entraîné des changements dans la dynamique hydrologique et la dégradation de la qualité de l'eau de ce système aquifère. Ces effets sont dus aux facteurs suivants:

- Les changements de l'utilisation des terres, les pertes par évaporation et par écoulement dans les zones humides et les zones de recharge, qui constituent des paramètres importants du bilan hydrologique annuel.
- L'augmentation de la demande ou la surexploitation liées à la croissance démographique, et la diminution de la disponibilité des ressources, qui nuit au développement économique. Le franchissement, en 1995, du seuil de surexploitation, qui est de 152 millions de m³ par an d'après les estimations préliminaires.
- La grande vulnérabilité de l'aquifère aux effets du changement climatique liés à la diminution de la recharge actuelle.

Le niveau actuel de connaissance du SAI, y compris des zones de recharge et de débit sortant, les ressources disponibles et les caractéristiques d'écoulement, est très incertain et met en jeu des données nationales non coordonnées et souvent contradictoires. Cette incertitude est encore aggravée par les pressions internationales, les différences de perception entre pays et les risques de conflit liés à ces ressources aquifères partagées. Dans un contexte transfrontières caractérisé par des risques élevés et des incertitudes scientifiques et en matière de politique, les approches de gestion conjointe du SAI doivent être axées sur la réduction des vulnérabilités et l'établissement de responsabilités claires en ce qui concerne la détermination, l'atténuation, la prise en compte et le partage des risques.

Études isotopiques et hydrochimiques précédentes de la zone cible

L'AIEA a appuyé plusieurs projets régionaux centrés sur les ressources en eau partagées par deux ou plusieurs pays. Au cours des dix dernières années, elle a concentré son appui sur l'aquifère d'Iullemeden à la demande d'États Membres concernées (Mali, Niger et Nigeria). L'AIEA a mis en œuvre (2007-2010) le projet RAF/8/038 intitulé « Mise en valeur des systèmes aquifères des Iullemeden », qui fait suite au projet régional MSP/GEF « Gestion des risques hydrogéologiques dans le système aquifère d'Iullemeden », pour améliorer la gestion des ressources en eaux souterraines dans les pays concernés par le SAI. Des techniques hydrochimiques et isotopiques ont été utilisées, notamment celles mettant en jeu ^2H , ^{18}O , ^3H , ^{13}C , ^{14}C ainsi que les principaux éléments chimiques. Ces outils ont été utilisés pour déterminer les signaux géochimiques et isotopiques de chaque aquifère, étudier sa dynamique d'écoulement et déterminer ses périodes de réalimentation (AIEA, 2010). Un résultat majeur de ce projet a été d'améliorer la compréhension du fonctionnement du système aquifère du bassin d'Iullemeden au Mali, au Niger et au Nigeria et de dégager des paramètres clés pour la mise au point d'un modèle d'écoulement souterrain de façon à faciliter la gestion des ressources en eau du bassin d'Iullemeden. Ses résultats ont débouché sur l'élaboration des éléments d'une stratégie de sensibilisation dans la gestion des risques transfrontières. Ce projet a en outre permis d'analyser efficacement l'expérience accumulée dans les pays concernés et d'évaluer les possibilités de collaboration avec les programmes actuels et futurs de participation et de sensibilisation dans le domaine des ressources naturelles ou de l'agriculture dans chaque pays.

Par ailleurs, l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS), qui poursuit, avec l'appui de la Banque africaine de développement, des activités visant à mettre en place des outils de gestion intégrée des ressources en eau de l'Iullemeden et du fleuve Niger, recherche la collaboration et la contribution de l'Agence. Le principal résultat de ces activités a été l'élaboration d'un modèle numérique et hydrologique du système aquifère d'Iullemeden (OSS, 2008).

Objectifs du projet RAF/7/011 concernant l'aquifère étudié

Le projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA consiste en une approche intégrée de la gestion efficace des ressources en eau rares en l'Afrique de l'Ouest. Son objectif à long terme est de promouvoir ce mode de gestion ainsi que le développement durable des ressources en eaux souterraines partagées dans la région du Sahel. Plus précisément, il a pour but :

- L'évaluation et une meilleure connaissance des processus hydrogéologiques et géochimiques qui contrôlent les conditions de recharge des minéraux et les caractéristiques d'écoulement du bassin d'Iullemeden.
- L'établissement d'une base de données commune entre les pays grâce à un réseau de collecte de données en vue de l'amélioration de la gestion des ressources en eau partagées.
- L'étude de la vulnérabilité et de l'impact de la variabilité/du changement climatiques sur les ressources en eau du SAI.
- La fourniture de données scientifiques pour l'établissement d'un plan d'action stratégique (PAS) en vue de l'élaboration de cadres juridiques et institutionnels pour l'amélioration de la gestion et l'utilisation rationnelle des ressources en eau partagées.

2. SITES D'ÉTUDES

2.1. Localisation et topographie générale

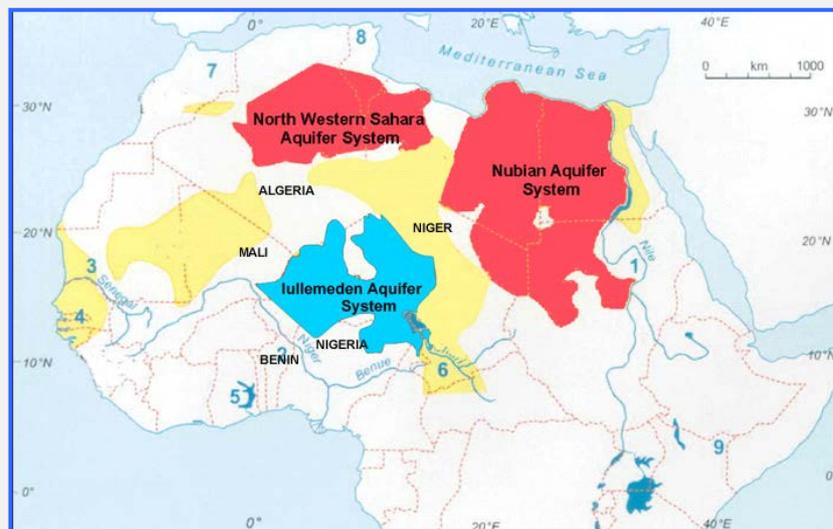
Le bassin sédimentaire d'Iullemeden, qui est situé au Mali, au Niger et au Nigeria, et de façon très marginale en Algérie et au Bénin, couvre quelque 525 000 km², dont environ 31 000 km² au Mali, 434 000 km² au Niger et 60 000 km² au Nigeria. Il s'étend sur environ 1000 km, de 10°N à 19°N, et quelque 980 km, de 1°E à 10°E (fig. 1). La population actuelle de cette zone est d'environ 15 millions de personnes, dont 65 % au Niger, 34 % au Nigeria et moins de 2 % au Mali (OSS, 2008 et 2011).

Le relief topographique comprend : des plateaux montagneux, des plaines semi-arides de pâturages et de savane, ainsi que des régions de plaines inondées locales et étendues couvertes de vastes systèmes de dunes. Le système aquifère d'Iullemeden est tributaire du fleuve Niger, considéré comme le troisième plus long d'Afrique, avec 4200 km. Au Nigeria, la zone du bassin est essentiellement ondulée, avec des dépressions dues à des oueds et des cours d'eau. L'altitude à la surface de la terre varie de 240 à 350 m au-dessus du niveau de la mer, et le sol est composé de croûtes dures de latérite et de pierres ferrugineuses qui affleurent sur les collines de la région. Les deux grands cours d'eaux qui drainent l'Iullemeden sont les rivières Rima et Sokoto qui se jettent dans le fleuve Niger, lequel se jette à son tour dans

l'océan Atlantique. Ces rivières prennent toutes leur source dans les hauts plateaux de Mashika et Dunia. Au Bénin, l'altitude à la surface dans la zone de l'Iullemeden varie de 160 à 410 mètres. L'altitude est plus élevée dans la partie sud du bassin et diminue progressivement à mesure qu'on avance vers sa partie septentrionale.

Le système aquifère d'Iullemeden est du type multicouche, comprenant, au niveau le plus bas, une nappe sédimentaire du crétacé (continental intercalaire) sur laquelle se superposent trois couches de formations (tertiaires) du continental terminal. Il est situé au Mali, au Niger, au Nigeria, en Algérie et au Bénin. Les aquifères paléozoïques que l'on retrouve en Algérie et au Bénin ne sont pas reliés à ce système et n'en font pas partie.

Le bassin sédimentaire d'Iullemeden est défini par les chaînes de montagnes environnantes, avec l'Aïr vers le nord, l'Adrar vers le nord-ouest et le plateau de Jos au Nigeria vers le sud. À l'est, le long d'une ligne allant de ce plateau aux chaînes de l'Aïr, il est partiellement séparé des aquifères captifs du bassin du lac Tchad par la dorsale continentale sud-nord. Vers l'ouest, au Mali et au Niger, le système est limité par les grès hamadiens et pourrait être relié au bassin d'extension du Tamesna vers l'ouest des hauts plateaux de l'Adrar, à travers le fossé de Gao. Au sud-ouest, la limite du bassin suit la chaîne du socle le long du fleuve Niger.



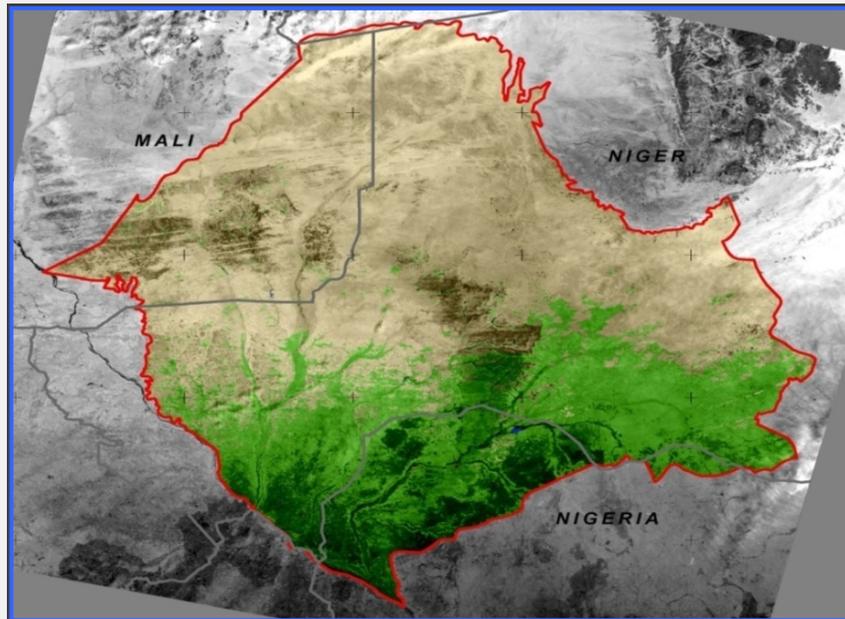


Figure 1 : Carte de localisation du bassin d'Iullemeden (OSS, 2008)

2.2. Climatologie

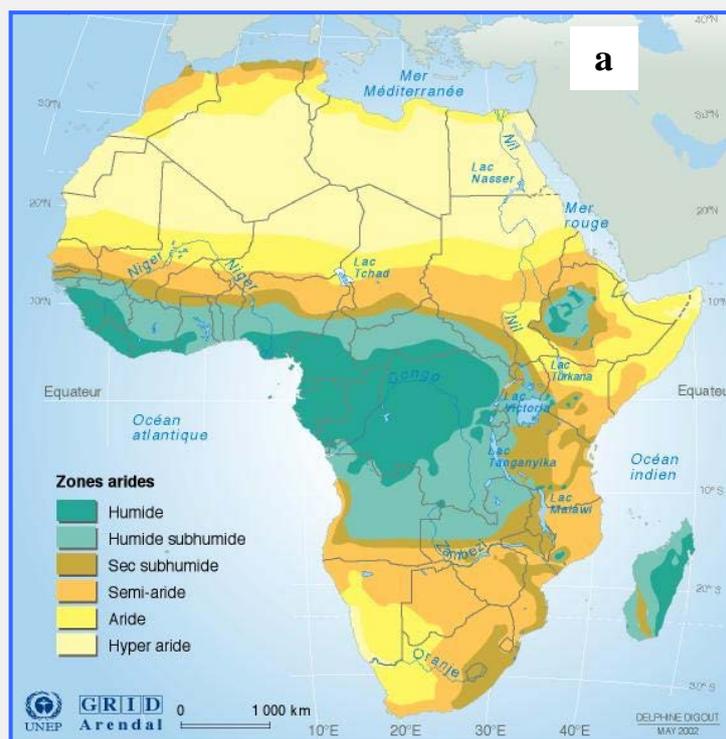
À la surface, la zone du bassin d'Iullemeden est caractérisée par un climat tropical aride et semi-aride, avec une longue saison sèche et une courte saison humide irrégulière (fig. 2). Elle correspond à une partie du bassin hydrologique du fleuve Niger communément appelé « cours moyen du Niger ». La pluviométrie dans le bassin du Niger est marquée par un gradient élevé : moins de 50 mm au nord et plus de 800 mm au sud. La position des isohyètes annuelles normales a permis de déterminer quatre zones climatiques :

- la zone saharienne (moins de 150 mm) ;
- la zone sahélienne nomade (entre 150 et 300 mm) ;
- la zone sahélienne sédentaire (entre 300 et 600 mm) ; et
- la zone sahélo-soudanienne (entre 600 et 800 mm).

La zone du bassin est sujette à de longues périodes de sécheresse. On observe des tendances de réductions de la pluviométrie sur le long terme et les isohyètes de 200 mm ont avancé d'environ 200 km vers le sud au cours de la sécheresse du Sahel de 1970-1985. En outre, la pluviométrie moyenne annuelle au Nigeria est caractérisée par une baisse des précipitations (fig. 2b).

Le climat du système d'Iullemeden dans le bassin du Nigeria est un climat tropical continental dominé par deux masses d'air opposées : la masse maritime tropicale humide venant de l'Atlantique et la masse continentale tropicale sèche venant du désert du Sahara. Les températures sont généralement extrêmes, avec des minimas moyens journaliers de 19 °C pendant les périodes d'harmattan de décembre à mi-février, alors des températures de plus de 40 °C sont fréquentes entre juin et septembre.

La pluviométrie dans cette région varie de 500 à 650 mm d'eau par an. La saison humide commence en mai et s'achève autour du mois d'octobre, alors que la saison sèche va d'octobre à mai. Dans le bassin du Bénin, le climat est caractérisé par une seule saison pluvieuse de mai à octobre, avec une pluviométrie moyenne annuelle d'environ 973 mm et une température moyenne de 34,6 °C. L'évapotranspiration moyenne annuelle est de 1668 mm, et dépasse donc largement la pluviométrie annuelle.



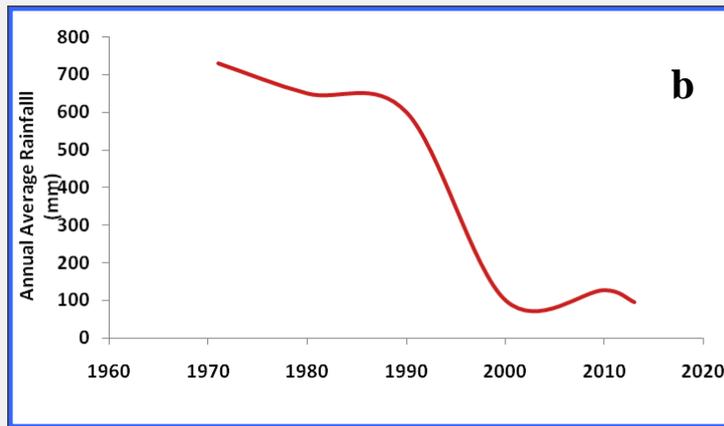


Figure 2 : Distribution spatiale du climat (a) et répartition de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin d'Iullemeden (Nigeria) (b)

2.3. Utilisation des terres et types de végétaux

L'humidité du sol est sujette à de grandes variations dues à l'infiltration et à l'évaporation à partir des nappes souterraines peu profondes des zones d'affleurement de l'aquifère. Les changements de l'utilisation des terres et la déforestation sont les principales causes de la dégradation des terres ainsi que de la disparition d'écosystèmes, de la sécheresse et de la production de poussière qui en résultent (fig. 3). Les changements de l'utilisation des terres dans les zones de recharge et les régions humides influent sur la réalimentation, le bilan hydrique actuel et la qualité de l'eau des aquifères. Les risques connexes de changement des niveaux d'eau, de pertes de ressources en eau ainsi que de dégradation de la qualité et de salinisation de l'eau sont en outre exacerbés par la baisse des précipitations, l'augmentation de la température et la forte évapotranspiration. Plusieurs États du Nigeria (Sokoto, Kebbi, Zamfara et Katsina) sont considérés par l'initiative panafricaine du projet de la grande muraille verte comme faisant partie des onze États de la ligne de front au Nigeria souffrant de l'impact de la sécheresse et de la désertification. D'un autre côté, un renversement de tendance, avec une augmentation des niveaux de l'eau, pourrait entraîner un engorgement et la salinisation, avec des pertes de terres et de ressources en eau (FEM, 2003).



Figure 3 : Les changements climatiques provoquent des sécheresses et des pénuries d'eau dans le bassin d'Iullemeden

En conséquence, les terres cultivées au Niger sont généralement pauvres en matières organiques et en phosphore. Leur fertilité diminue régulièrement, elles ont tendance à s'acidifier, sont sensibles à l'érosion hydrique et éolienne, ont une faible capacité de rétention, et sont sujettes aux phénomènes d'alcalinisation et de salinisation. Il convient de noter que 80 à 85 % des terres arables sont des dunes et que seules 15 à 20 % d'entre elles sont des terres hydromorphes légèrement argileuses (SEDES, 1987). Les régions montagneuses et les grands plateaux (Air, Ader Douchi et continental terminal) sont dominées par des lithosols. Les vallées fossiles (Dallols, Goulbi, Korama), celles des cours d'eau, et les bassins du Komadougou, du lac Tchad et de Manga sont essentiellement dominés par des sols hydromorphes et des vertisols (GEF, 2003 ; OSS, 2008 ; OSS, 2011).

Les enquêtes effectuées par le projet national de recherche agronomique dans les départements de Diffa, Zinder, Maradi, Dosso et Tahoua sur les espèces ligneuses susceptibles d'être perdues montrent aussi les effets de la baisse des précipitations sur l'extinction d'un grand nombre de ces espèces.

2.4. Exploitation et approvisionnement en eau

Le bassin d'Iullemeden est exploité grâce à des puits de 40 à 100 m de profondeur, et quelques forages profonds d'exploration et de production pouvant descendre jusqu'à 600m. Les débits vont généralement de 20 à 100 m³/h. L'exploitation s'étend actuellement de manière notable essentiellement dans la partie méridionale de la section malienne, le sud du Niger et le bassin de Sokoto au Nigeria. On dénombre aujourd'hui plus de 23 000 puits et forages, y compris 400 forages en exploitation au Mali, 500 forages dont 200 profonds au Niger et plus de 1200 forages certifiés au Nigeria.

Le SAI est caractérisé par une distribution irrégulière des points d'eau actuels (forages et puits pastoraux) dont un grand nombre ne sont pas fonctionnels. En conséquence, les populations humaines et animales se concentrent autour des rares points d'eau fonctionnels, ce qui se traduit par une pression accrue sur les ressources en eau. De plus en plus de forages, en particulier des puits pastoraux, sont creusés dans le but d'améliorer les conditions de vie de la population et de développer l'élevage, lequel revêt une importance cruciale, notamment dans les régions septentrionales vouées au pastoralisme qui sont très sujettes aux sécheresses récurrentes. Au Mali par exemple, on a dénombré 170 puits et 251 puits modernes dans cette zone en 2006 sur une superficie totale de 31 000 km² (avec une population de 33 445 personnes répartie sur 170 villages et sites). L'installation de ces puits dans ces régions arides contribue à réduire le potentiel hydrologique de l'aquifère du continental terminal (FEM, 2003 ; OSS, 2008 ; OSS, 2011).

Les besoins en eau pour les activités industrielles sont couverts à la fois par le fleuve Niger et les eaux souterraines des aquifères du continental intercalaire et du continental terminal. Il n'y a pas d'industrie dans la partie malienne du SAI. La consommation annuelle d'eau des industries va de quelques milliers de mètres cubes, pour la plupart des unités industrielles, à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes pour les brasseries et les usines textiles. Les eaux souterraines sont la principale source d'approvisionnement en eau au Niger et la plupart des sociétés industrielles et minières ont leurs propres réseaux de forages.

En ce qui concerne la région de Sokoto au Nigeria, on estime à environ 800 millions de mètres cubes la quantité d'eaux souterraines prélevée en 2000 pour l'industrie, soit 10 % du volume annuel total de 8 milliards de mètres cubes (GEF, 2003 ; OSS, 2008 et 2011).

2.5. Géologie et hydrogéologie du système aquifère d'Iullemeden

Le système aquifère d'Iullemeden est limité au nord par le Hoggar, l'Aïr et l'Adrar des Iforas, qui constituent le bouclier touareg, au sud par le plateau de Jos au Nigeria et à l'ouest par le Liptako-Gourma. Il est séparé du bassin du lac Tchad à l'est par la dorsale du socle cristallin du Damagaram-Mounio, laquelle est une structure à la fois géologique et hydrogéologique.

Le bassin du SAI est composé de formations sédimentaires allant du cambrien-ordovicien au tertiaire et au quaternaire. Dans ce cas, il est aussi partagé par l'Algérie et représente les formations cambrien-ordoviciennes. Les principaux aquifères partagés sont ceux du continental intercalaire (crétacé), du continental terminal (tertiaire) et du quaternaire (OSS, 2011) (figures 4, 5). Au sud-est, dans le bassin nord-ouest au Nigeria, le système aquifère d'Iullemeden est connu sous le nom de groupe Rima, avec le groupe Gundumi-Illo, Wurno et Sokoto du crétacé et les aquifères Gwandu du tertiaire ainsi que les formations gréseuses de Kalambina (GEF, 2003 ; OSS, 2011).

Le SAI est généralement profond comme en témoignent la profondeur des forages et les données géophysiques de 1500 à 2000 m au-dessous du niveau de la mer. Ses limites supérieures vont de 100 à 400 m et dépassent 1000 m près du fossé de Gao. Les niveaux de l'eau vont de zéro à 80 m. Dans les parties septentrionale et centrale du système, on atteint l'aquifère à 600 m et l'eau se trouve à 60 m de profondeur. Le système devient artésien vers le sud. On estime que les parties de l'aquifère situées à plus de 250 m au-dessous du niveau de la mer n'interviennent pas dans le cycle hydrologique actuel. La perméabilité du système aquifère est moyenne ou élevée, et sa transmissivité, qui est normalement de 10^{-3} à 10^{-4} m²/s, atteint localement 10^{-2} à 10^{-3} m²/s dans la partie centrale du bassin (OSS, 2008).

Le continental intercalaire

Le continental intercalaire (CI) correspond aux formations aquifères du Gundumi et Illo au Nigeria. Au Mali comme au Niger, il comprend de bas en haut les grès du Tégama, les argiles de Farak et le continental hamadien. Dans l'ouest du bassin d'Iullemeden, le continental intercalaire est recouvert par les formations marines du crétacé supérieur ou celles de l'aquifère du continental terminal. C'est le plus grand système aquifère multicouche dans le bassin d'Iullemeden. Il est libre dans sa bordure et captif au centre et à l'ouest au Mali (fig. 6). La nappe est radiale convergente vers le fleuve Niger au sud-ouest ; dans cette zone, l'aquifère est captif artésien et le fleuve est drainant. Le niveau piézométrique des eaux souterraines dans la partie libre est en général assez profond, entre 40 et 60 m. Dans les départements de Tahoua et Dosso (partie libre) au Niger, les niveaux de l'eau sont nettement moins profonds, souvent à moins de 20 m (fig. 7). On distingue deux axes de drainage : l'axe nord-sud à l'aplomb de l'oued Azaouak, et l'axe nord-est/sud-ouest à l'aplomb du Goulbi de Maradi (au Niger) – Sokoto (au Nigeria). Les gradients hydrauliques moyens respectifs sont de $2,6 \cdot 10^{-4}$ et $3,5 \cdot 10^{-4}$.

Une couche sableuse très transmissive (en moyenne environ 10^{-2} m²/s) occupe la partie centrale de l'aquifère avec son équivalent dans le bassin de Sokoto au Nigeria (formation de Guindumi) (OSS, 2008 ; OSS, 2011).

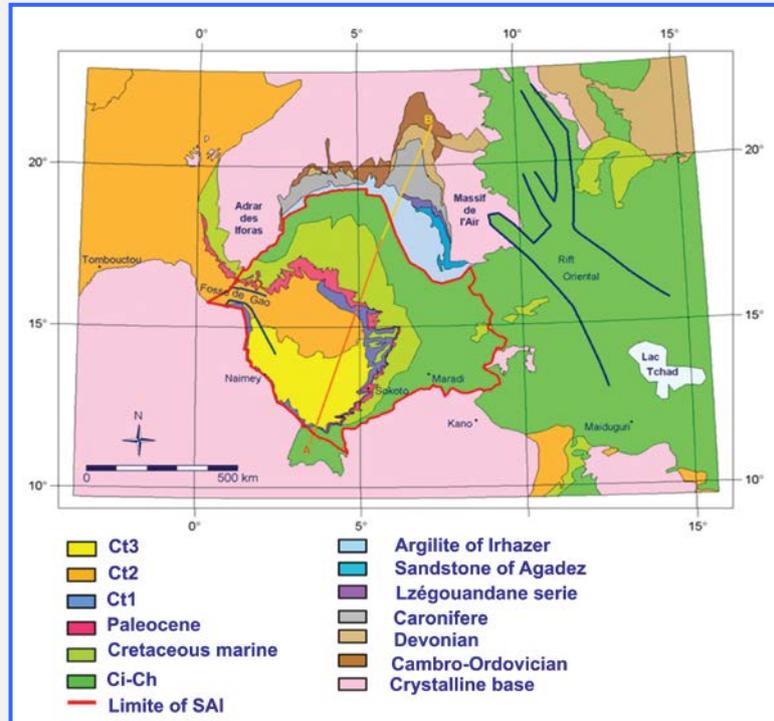


Figure 4 : Carte géologique du bassin d'Iullemeden (OSS, 2011)



Figure 5 : Extension des aquifères du continental terminal et du continental intercalaire dans le bassin d'Iullemeden (OSS, 2011)

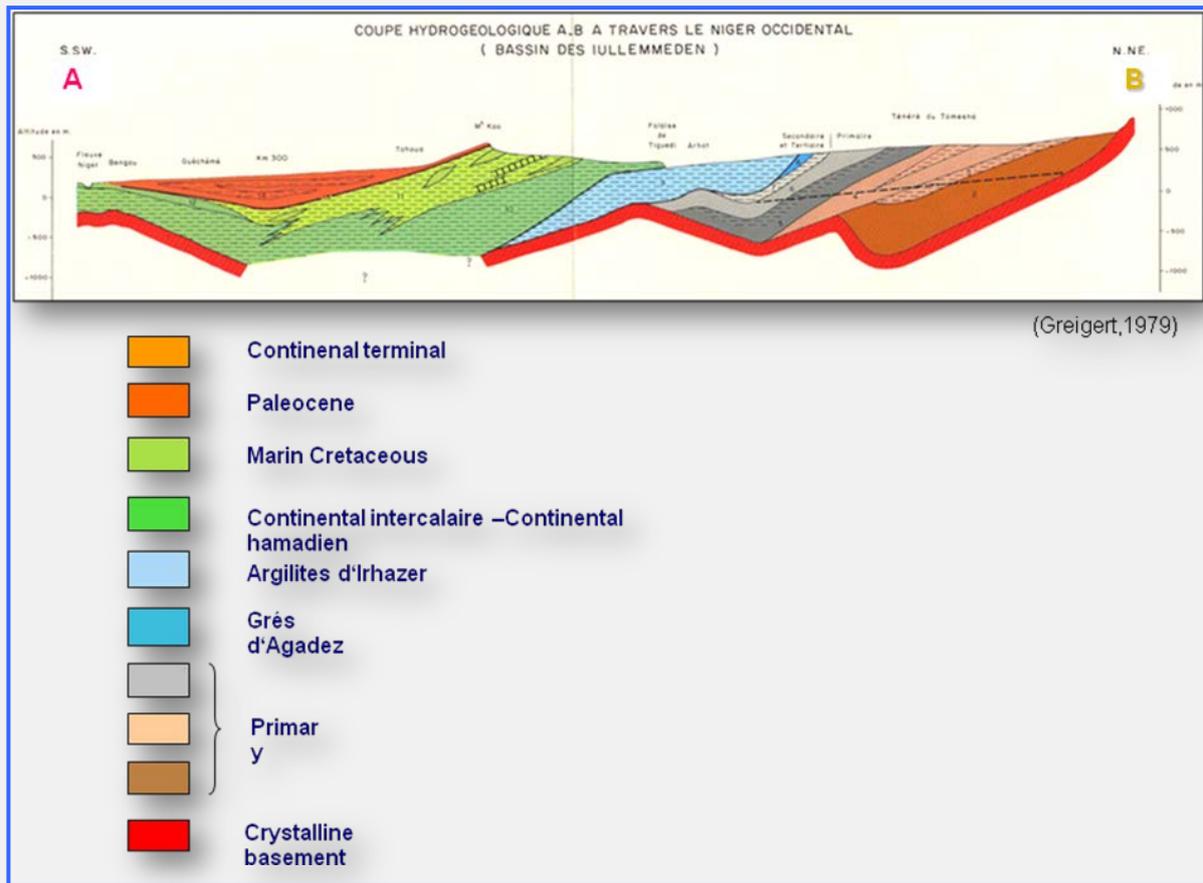


Figure 6 : Coupe hydrogéologique du bassin d'Iullemeden (OSS, 2011)

Au Niger, le débit spécifique varie de 0,1 à 26 m³/h/m. Dans la couche transmissive, il est en moyenne de 13 m³/h/m, avec des valeurs minimales et maximales de 7 m³/h/m et 26 m³/h/m. Dans les zones captives, les débits sont presque supérieurs à 50 m³/h et peuvent dépasser 100 m³/h. La contrainte majeure du point de vue économique est la grande profondeur des ouvrages de captage, surtout dans la partie captive de l'aquifère où elle varie de 100 à 800 m.

Le continental terminal

Le continental terminal (CT) est un système aquifère multicouche au Niger, mais seulement monocouche au Mali et au Nigeria (Gwandu). La plus grande partie de la population habite sur l'étendue du CT. Grâce à l'accessibilité aisée et à la bonne qualité de ses eaux, ce système aquifère joue un rôle fondamental dans la gestion durable des ressources en eaux souterraines de ces trois pays. Le continental terminal est contenu dans les sédiments continentaux d'âge tertiaire, qui se présentent par des alternances de sables et d'argiles avec de nombreuses et rapides variations latérales et verticales de faciès.

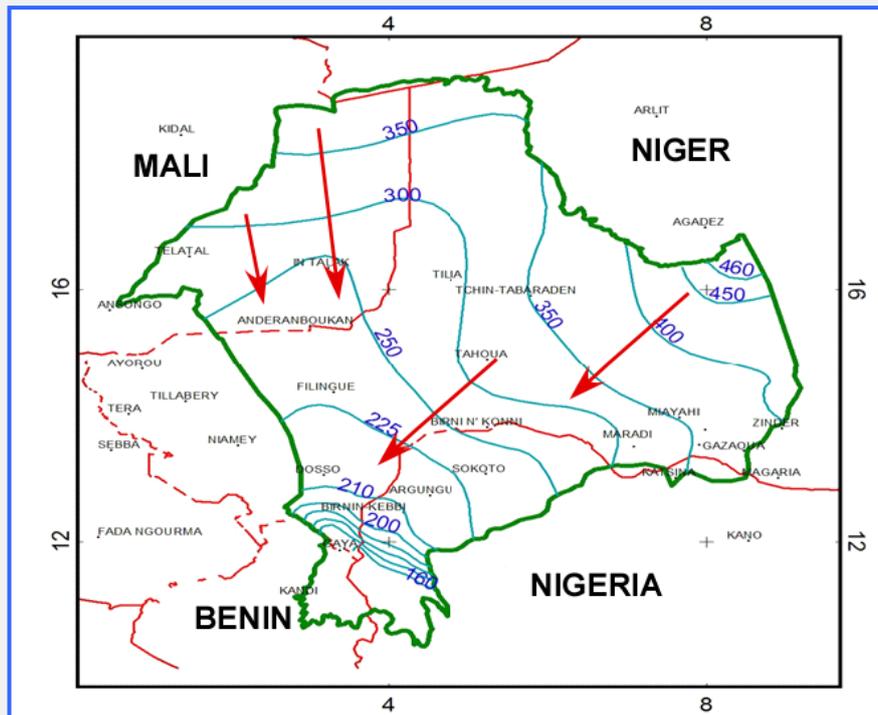


Figure 7 : Carte potentiométrique du CI (OSS, 2008)

Extension des formations géologiques et hydrogéologiques dans le bassin du Niger

Au Niger, le continental terminal se compose de trois formations aquifères bien reconnues : le continental terminal 1 (CT1) ou « série sidérolithique », le continental terminal 2 (CT2) ou « série argilo-sableuse à lignite », et le continental terminal 3 (CT3) ou « série des grès argileux du Moyen Niger ». Actuellement, on parle plutôt de formation. De bas en haut, on distingue :

- - la série sableuse inférieure (CT1) ;
- - la série des argiles et silts verdâtres (CT2) ;
- - la formation à oolithes ferrugineuses (CT2 ou CT3) ;
- - la formation argileuse et silteuse grise (CT3) ;
- - la formation sableuse ou silteuse (CT3).

a. Le continental terminal 1 (CT1) (captif)

L'aquifère est à nappe captive sauf dans sa partie périphérique. On observe une discontinuité sédimentologique dans sa partie occidentale, ainsi qu'un dôme piézométrique allongé selon une orientation nord-ouest/sud-est dû probablement à une alimentation per ascensum (drainance). Les axes généraux d'écoulement sont orientés nord-est/sud-ouest et nord-ouest/sud-est. Le niveau piézométrique est toujours à faible profondeur et artésien, sauf

dans l'ouest du département de Tahoua où il peut dépasser 35 m de profondeur. Dans les dallols Bosso et Maouri, l'aquifère est artésien, avec des hauteurs de jaillissement pouvant atteindre 20 m. Les gradients hydrauliques moyens sont de $4 \cdot 10^{-4}$. La transmissivité varie de 10^{-4} à $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (fig. 8).

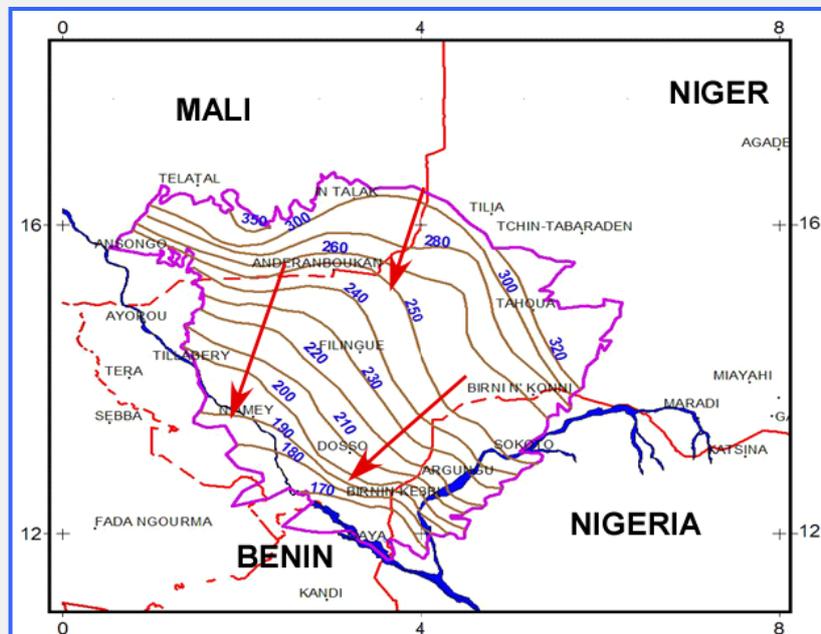


Figure 8 : Carte potentiométrique du CT (2007) (OSS, 2008)

b. Le continental terminal 2 (CT2) (semi-captif)

Vers la partie occidentale, la lithologie de l'aquifère devient argilo-sableuse et celui-ci est composé de grès à oolithes ferrugineuses. L'aquifère est à nappe captive et radiale convergente, et les principaux axes d'écoulement sont orientés nord-ouest/sud-est et nord-est/sud-ouest. Leurs gradients hydrauliques moyens respectifs sont $1,2 \cdot 10^{-4}$ et $2 \cdot 10^{-3}$. Un dôme potentiométrique allongé est observé dans la partie sud-est de l'aquifère, selon une direction nord-nord-est/sud-sud-ouest. Les niveaux piézométriques de cet aquifère semi-captif sont profonds : entre 30 et 60 m sauf dans les dallols où la profondeur est inférieure à 10 m. Sur les régions de plateaux, celle-ci peut dépasser 80 m par effet de topographie. Cet aquifère n'est jamais artésien. La transmissivité varie de 10^{-3} à $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

c. Le continental terminal 3 (CT3) (libre)

Les principaux axes de drainage de cet aquifère à nappe libre sont orientés nord-ouest/sud-est et nord-est/sud-ouest. Leurs gradients hydrauliques respectifs vont de $2 \cdot 10^{-4}$ à $3,2 \cdot 10^{-4}$. Le CT3 est caractérisé par des dômes et des dépressions piézométriques. Le niveau piézométrique varie généralement de 20 à 50 m. Dans les bas dallols, il est très proche de la

surface du sol et de nombreuses mares permanentes sont liées à la surface piézométrique. Sur les plateaux, le niveau est presque toujours supérieur à 60 m. Ses fluctuations saisonnières ont une amplitude moyenne de 65 cm. Elles atteignent localement 4 m. L'exploitation de cet aquifère est envisageable avec des puits. En dehors des dallols, les puits doivent être assez profonds, jusqu'à 50 m en général. L'aquifère est accessible par les captages classiques, mais l'exhaure n'est pas particulièrement aisée, ni par puits traditionnels ni par pompe à motricité humaine. Il est sensible à la pollution. Une attention particulière doit être portée aux installations annexes des puits (margelles, antibourbiers, abreuvoirs) pour préserver la qualité de l'eau (GEF, 2003 ; OSS, 2008).

- Extension des formations géologiques et hydrogéologiques dans le bassin du Nigeria

Le bassin sédimentaire du nord-ouest du Nigeria, qui constitue la partie sud-est du bassin d'Iullemeden, est connu localement sous le nom de bassin de Sokoto, et couvre une superficie d'environ 6400 km². Il s'agit essentiellement d'une plaine faiblement ondulée dont la hauteur varie de 250 à 400 m au-dessus du niveau de la mer. L'âge des formations sédimentaires du bassin de Sokoto va du crétacé au tertiaire ; celles-ci sont constituées de grès, les lits plongeant en pente douce vers le nord-ouest (fig. 9). Une calotte latéritique dont l'épaisseur atteint généralement jusqu'à 12 m dans certaines localités, couvre toutes les formations et assure l'alimentation en eau de la plupart des puits de la région. La répartition et l'apparition d'eaux souterraines au Nigeria dépendent des diverses unités géographiques déterminées. L'étendue d'une zone donnée est déterminée par les limites d'un ensemble de types de roches, de formations géologiques ou d'un ensemble de formations de conditions hydrologiques similaires.

SYSTÈME	SÉRIE	GROUPE	FORMATION	ÉPAISSEUR (M)	CARACTÈRE LITHOLOGIQUE	PROPRIÉTÉS HYDROPHILES
Quaternaire	Époque récente et pléistocène			0-15	Limons et sables non consolidés avec des graviers dans les fadamas des rivières Sokoto et Rima	Fournit des quantités faibles ou moyennes d'eau potable aux puits peu profonds
Tertiaire	Post-éocène et éocène		Gwandu	0 – 305	Sable et argile fins ou grossiers semi-consolidés	La partie sableuse du socle fournit des quantités moyennes aux forages sous pression artésienne
	Paléocène	Sokoto	Klambaina	0 – 49	Limons et marne argileux semi-consolidés	Le limon fournit des quantités faibles ou moyennes aux puits peu profonds et aux sources dans la zone d'affleurement.
			Dange	0 – 43	Schiste plastique bleu ou gris semi-consolidé	Fournit peu d'eau, forme un lit captif pour l'eau des puits artésiens dans la formation de Wurmo
Crétacé	Crétacé supérieur (Maastrichtien)	Rima	Wurmo	0 – 46	Grès friable et sable	Fournit des quantités modérées d'eau de nappe libre aux forages sous pression artésienne
			Dukamaje	0 – 27	Schistes fossilifères de couleur sombre, etc.	Fournit peu ou pas d'eau aux puits et aux forages
			Taloka	0 – 183	Sable semi-consolidé à grains fins ou de taille moyenne, etc.	Fournit des quantités faibles ou moyennes aux forages. Sous pression artésienne en profondeur
	Crétacé inférieur		Gundumi et Illo	0 – 305	Sable semi-consolidé à grains fins ou grossiers, etc.	Fournit des quantités faibles ou modérées d'eau de nappe libre aux puits dans la zone d'affleurement.
Précambrien			socle	socle rocheux	Granite-gneiss, phyllite et quartz	Fournit des quantités faibles ou modérées d'eau libre aux puits dans la zone d'affleurement.

Figure 9 : Stratigraphie des formations d'Iullemeden dans le bassin de Sokoto (Parker, 1964).

a. socle :

Il y a de l'eau souterraine dans la partie altérée décomposée par l'érosion, les zones de fracture et les parties associées à des digues.

b. Formation de Gundumi (CI) :

Les roches sédimentaires de l'âge du crétacé plongeant vers l'ouest et le sud-ouest couvrent ce socle rocheux, membre le plus ancien de la série sédimentaire de la formation de Gundumi de l'âge du crétacé. Il s'agit principalement de dépôts lacustres d'origine continentale composés de galets, de graviers et de sable argileux de quartz et de feldspath. La recharge de l'aquifère est essentiellement assurée par infiltration d'eau de pluie et par les ruisseaux effluents. Le potentiel d'eau souterraine est élevé, avec une capacité spécifique moyenne d'environ $57 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \text{ m}^{-1}$. L'aquifère est peu profond dans la partie orientale, mais artésien côté ouest.

c. Groupe Illo (CI):

Bien que sa lithologie soit similaire à celle de la formation de Gundumi, le groupe Illo comprend des sables et des argiles caillouteux non marins sous-jacents à une zone d'environ 6400 km^2 dans la partie sud-ouest du bassin de Sokoto.

d. Groupe Rima :

Le groupe Rima est une séquence de transition des dépôts terrestres de la formation de Gundumi du crétacé aux dépôts calcaires marins de recouvrement du groupe de Sokoto datant du tertiaire. Il est représenté par des dépôts marins de sable à grains fins, de grès et d'argilite lâchement cimentés ainsi que de schiste. L'épaisseur du groupe Rima est estimée à 220 m à Sokoto et 300 m dans la région de Gudu (aquifère artésien avec une hauteur de jaillissement de 9 m). La zone d'affleurement, qui est une bande allant de Goronyo jusqu'à l'est de Jega, constitue la principale zone de recharge des aquifères du groupe Rima et couvre une superficie d'environ 13 600 km².

Ce groupe pourrait être subdivisé en formations de Taloka, Dukamaje et Wurno, la deuxième étant une unité de schiste séparant deux unités aquifères de la formation sous-jacente de Taloka de la formation de recouvrement de Wurno. La formation de Dukamaje s'amenuise au sud de la rivière Sokoto, ce qui rend impossible la séparation des formations de Taloka et de Wurno par cartographie de surface en raison de la similitude de leurs lithologies.

La formation de Wurno est constituée de sable fin ou grossier, de sable limoneux, de schiste et de grès, avec de nombreuses couches d'argile/de schiste. C'est un aquifère moyennement productif en eau du bassin de Sokoto (épaisseur maximum de 180 m). La formation est en couche continue, sans couches intercalaires d'argile à proximité de Sokoto. Elle se situe à 80-120 m et les forages produisent de 13,64 à 18,18 l/h à Kajiji, et à 40 m à Yabo.

La formation de Taloka est constituée de sable fin à Gwadabawa, Kyadawaand, notamment autour d'Ilela et Gada. L'épaisseur de cet aquifère est estimée à 90 m à Aleiro. Une baisse de la nappe phréatique notée autour de la ville de Sokoto était due à la surexploitation par les nombreux forages alimentés par l'aquifère.

e. Le groupe de Sokoto (paléocène) :

Le groupe de Sokoto est composé de dépôts marins de la formation de Dange à sa base et de limon de la formation de Kalambaina au-dessus, laquelle constitue l'aquifère principal. Toutefois, on pourrait dire que la formation de Dange de la partie inférieure du groupe est plus ou moins un aquitard. De nombreux forages exploitent l'aquifère de Kalambaina mais les quantités d'eau prélevées sont très variables en fonction de la saison et d'un point à l'autre en fonction de la teneur en argile. Les niveaux piézométriques connaissent d'importantes

fluctuations. Au cours de la période 1994-1998, la nappe phréatique a baissé en moyenne de 4,2 m dans 11 forages de la région de Sokoto.

f. Formation de Gwandu (éocène) :

La formation de Gwandu recouvre péniblement celle de Kalambaina et d'autres formations plus anciennes dans les parties septentrionale et centrale du bassin. Elle affleure sur 13 600 km² dans la partie occidentale du bassin, avec des sédiments d'âge tertiaire constitués d'alternances de couches de sable et d'argile semi-consolidés. On a déterminé quatre aquifères logés dans des couches de sable alternant avec des couches d'argile, appelées zone supérieure I, zone supérieure II, zone moyenne et zone inférieure. Cette formation abrite les aquifères les plus fiables du bassin de Rima, avec une capacité spécifique moyenne de 50 à 100 m³/j/m. Une baisse du niveau des eaux souterraines de 70 à 150 m a été observée au fil des ans dans la frange nord du Nigeria et du Niger, et attribuée essentiellement au grand nombre de puits, avec comme conséquence un pompage excessif. D'une manière générale, les formations de Gwandu et de Gundmumi-Illo sont les aquifères les plus productifs en ce qui concerne la mise en valeur des ressources en eaux souterraines dans le bassin.

Extension des formations géologiques et hydrogéologiques dans le bassin de Kandi

D'un point de vue géologique, le bassin de Kandi est un bassin continental d'âge paléomésozoïque, avec des reliques du cénozoïque (Alidou, 1983 ; Boukari, 2007) (fig. 10). La partie nord-ouest est plus étendue (plus des deux-tiers du bassin) que la partie sud-est. La faille de Kandi (direction N20-E) est la plus importante de ce bassin et constitue une faille crustale majeure à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest. Konaté (1996) a établi qu'elle correspondait à une inversion tardive à l'échelle panafricaine à une zone de décrochement dextre, qui a été réactivée successivement en faille normale, normale sénestre pendant le premier déplacement extensif d'orientation N65-E du paléozoïque et le second déplacement extensif d'orientation N100-E de la même époque, puis comme faille sénestre et inverse au cours du crétacé (déplacement compressif de décrochement d'orientation N-S à N140-E) (fig. 10).

Les sédiments du paléozoïque sont généralement inclinés 10° ONO dans ce bassin (Konaté et al., 1994). Quatre unités stratigraphiques ont été identifiées dans les formations précambriennes sur la base des indicateurs lithologiques, sédimentaires et paléontologiques du cambrien en remontant aux reliques du continental terminal (IRB, 1982 ; Alidou, 1983 ;

Konaté, 1996). On peut distinguer deux grands aquifères de bas en haut parmi ces unités (Boukari, 2007). Le premier est l'aquifère cambrio-ordovicien connu sous le nom de formation de Wèrè. Il est constitué de conglomérats, de brèches et de grès lacustres (Konaté, 1996). Le second est l'aquifère ordovicien terminal/silurien appelé formation de Kandi. Il est constitué de grès fins de marée sur fond de microconglomérats et de silt. À ces deux aquifères s'ajoute l'aquifère du quaternaire, composé de dépôts alluvionnaires et que l'on trouve principalement le long du fleuve Niger.

La formation du continental terminal est constituée de grès grossiers du mio-pliocène. Bien qu'elle soit parfois appelé aquifère, ce n'est pas réellement un aquifère productif dans la principale partie du bassin de Kandi car elle ne constitue pas une couche continue sur les plans géologique et hydraulique. Cette formation n'est donc pas exploitée. Toutefois, la formation du continental terminal semble couvrir des zones plus étendues dans les parties du bassin d'Iullemeden situées au Niger et au Nigeria, et est donc un aquifère continu sur le plan hydraulique et exploitable dans ces pays. L'aquifère du cambrio-ordovicien est habituellement un aquifère semi-captif, mais devient une nappe libre dans les parties périphériques occidentale et méridionale du bassin où il affleure (Boukari, 2007). Les zones d'affleurement correspondent généralement à la zone de transition entre le bassin et la formation du socle protérozoïque panafricain.

Les forages ont une profondeur de 27 à 102 m dans le bassin (Achidi et al., 2012). Les plus profonds d'entre eux se trouvent autour de la commune de Kandi et dans la partie centrale du bassin. La plupart de ces forages n'atteignent pas le socle panafricain. Le bassin est moins peuplé et la construction de forages s'arrête dès que la quantité d'eau obtenue est considérée comme suffisante pour subvenir aux besoins des populations vivant autour des forages. Les rendements spécifiques des forages varient de 0,005 à 19,8 m³/h/m, et les chiffres les plus élevés sont observés le long de la rivière Sota, où les dépôts sédimentaires sont plus épais et la transmissivité varie de $2 \cdot 10^{-6}$ à $7 \cdot 10^{-3}$ m²/s (Achidi et al., 2012).

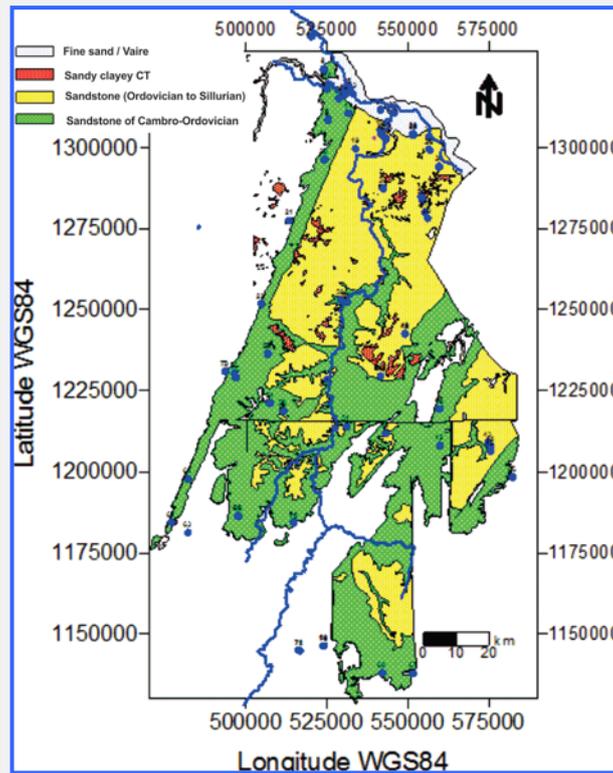


Figure 10 : Carte géologique du bassin de Kandi (Bénin) (Kegpli et al., 2015)

Il ressort de la carte potentiométrique de la nappe aquifère peu profonde que le niveau hydrostatique des eaux souterraines varie de 380 à 150 m. Les chiffres les plus élevés sont observés dans le sud et les plus faibles au nord (fig. 11). Cela montre que la nappe est principalement réalimentée dans la partie méridionale du bassin et que les eaux souterraines coulent vers le nord, en *direction* de la vallée du fleuve Niger qui constitue la principale zone de déversement (Kegpli et al., 2015).

Le Niger est le plus grand fleuve du bassin de Kandi (en tant que limite nord de ce bassin). Il a deux affluents dans le bassin, de l'ouest vers l'est, à savoir l'Alibori et la Sota, tous deux caractérisés par un écoulement permanent. De fait, la Sota prend sa source dans la partie sud de ce bassin, à plus de 400 m au-dessus du niveau de la mer, sur une colline située autour de la commune de Kalalé. Elle coule dans tout le bassin qu'elle draine et son débit est minimum en avril ou mai, avec des chiffres allant de 3 à 6 m³/s (Le Barbé et al., 1993). Les chiffres maximum enregistrés jusque-là dans quatre stations (habituellement en septembre) vont de 250 à 400 m³/s (Vissin, 2007). La Sota est reliée à plusieurs cours d'eau intermittents, comme le Tassiné et le Bouli (fig. 11), et se jette finalement dans le fleuve Niger, autour de la commune de Malanville.

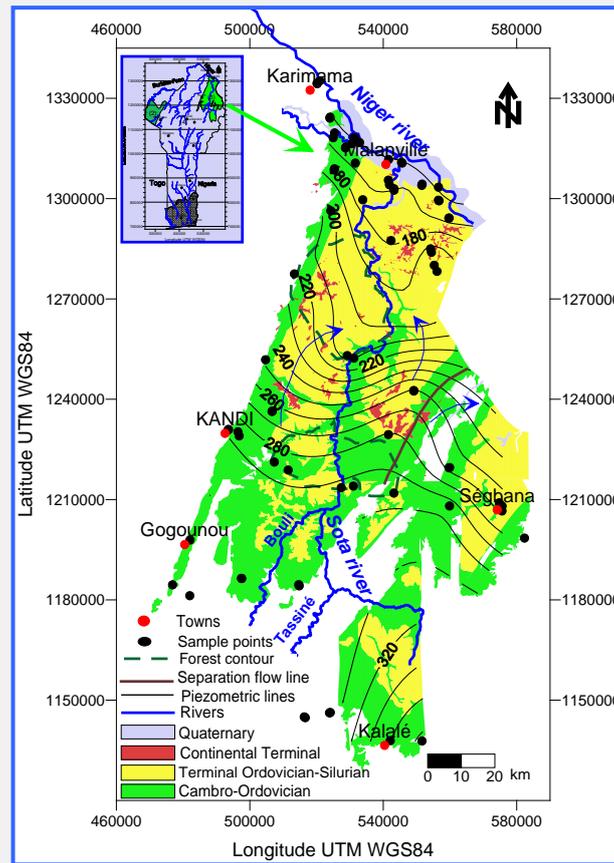


Figure 11 : Carte potentiométrique de l'aquifère peu profond du bassin de Kandi en 2013 (Kegpli *et al.*, 2015)

2.6. Système aquifère d'Iullemeden : bilan hydrique

Les réserves exploitables totales du SAI sont estimées à environ 2000 km^3 , ce qui correspond à environ 4000 mm sur toute la zone du bassin. Cet aquifère est une réserve stratégique importante de portée sous-régionale égale à 50 ans d'écoulement dans le fleuve Niger. Le taux de stockage dans les zones captives, généralement élevé, est de $25000 \text{ m}^2/\text{km}^2$ le long de la frontière nigéro-malienne et de $15000 \text{ m}^2/\text{km}^2$ dans le sud du Niger et du Nigeria. Le niveau actuel de recharge annuelle est élevé, mais les ressources en eau totales comprennent dans une large mesure d'importantes quantités d'eau fossile accumulées dans les conditions climatiques plus humides du pléistocène et de l'holocène. Une relation similaire entre de grandes réserves de stockage et un niveau élevé de recharge actuelle a été confirmée pour le SAI au Nigeria. Les conditions de l'exploitation planifiée, durable des eaux souterraines varient dans le bassin mais constituent une importante option de gestion qui sera examinée dans le cadre du projet. Le bilan hydrique approximatif annuel du SAI au Niger du débit entrant total de recharge de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ et le débit sortant se présente comme suit: a) les pertes par évaporation sont de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, b) le rythme de prélèvement actuel de l'eau est de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ et c) le débit sortant de

drainage, qui est de 10 m³/s dans le fleuve Niger, est extrêmement important pour maintenir le faible écoulement de saison sèche et des périodes de sécheresse dans le fleuve Niger et les autres cours d'eau de surface. Le bilan hydrique de l'aquifère d'Iullemeden montre le niveau élevé de la recharge actuelle et l'importance écologique des pertes par évaporation et par débit sortant dans les zones humides GEF, 2003 ; OSS, 2011).

3. ACQUISITION DE DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE UTILISÉE

Les échantillons d'eaux souterraines et de surface ont été prélevés épisodiquement dans la zone d'étude sur plusieurs périodes dans seulement trois pays : Niger, Nigeria et Bénin. Il n'y a pas eu d'échantillonnage au Mali et en Algérie en raison des problèmes de sécurité sur le terrain. Au total, 471 échantillons ont été prélevés dans le système aquifère d'Iullemeden. Les cartes de distribution spatiale des points d'échantillonnage ont été établies à l'aide du progiciel Arc GIS (version 10.2) comme suit (fig. 12) :

- il y a eu trois campagnes d'échantillonnage au Niger (Dosso). Les campagnes 1 et 2 ont été appuyées par le projet RAF 7011 et comprennent des analyses chimiques et isotopiques. Toutefois, la campagne 3 a été menée par la direction des ressources en eaux du Niger et ne comprend que des analyses chimiques. Au total, 157 échantillons d'eaux souterraines ont été prélevés dans des puits et des forages existants au Niger en mars 2013 (campagne 1) et en janvier 2014 (campagne 2).

- trois campagnes d'échantillonnage ont aussi été menées au Nigeria. Un total de 149 échantillons ont été collectés dans des puits et des cours d'eau en juillet 2013 (campagne 1), avril 2014 (campagne 2) et novembre 2015 (campagne 3).

- il y a eu également trois campagnes au Bénin. Un total de 165 échantillons ont été collectés dans des puits et des cours d'eau en mars 2013 (campagne 1), en octobre, novembre et décembre 2013 (campagne 2) ainsi qu'en avril 2016 (campagne 3).

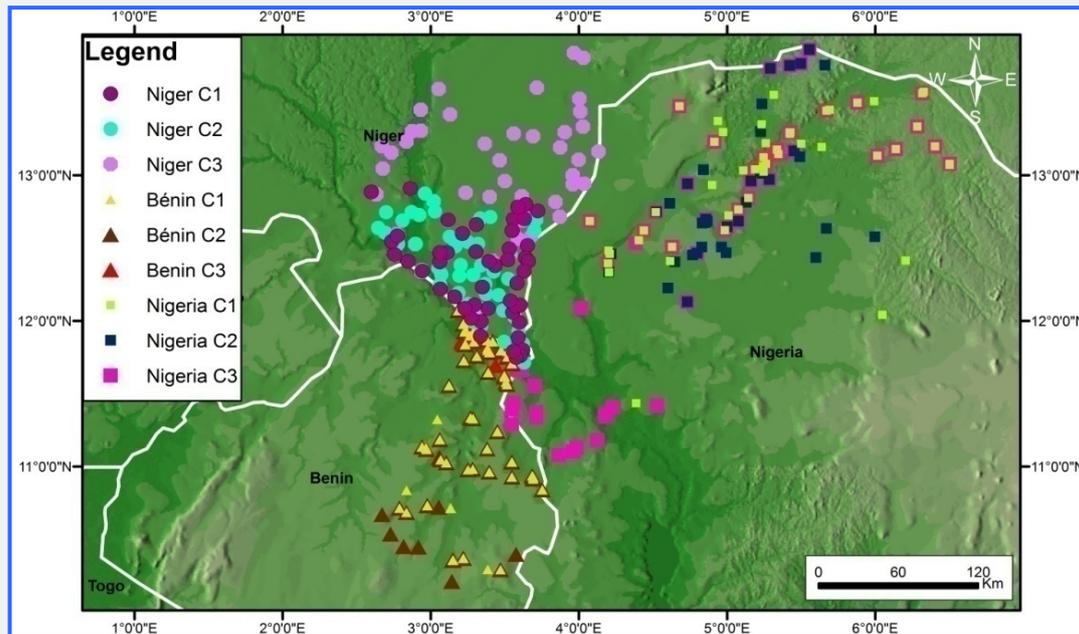


Figure 12 : Localisation des points d'échantillonnage dans le bassin d'Iullemeden.

Des mesures *in situ* de pH, de température et de conductivité électrique ont été effectuées (annexe). Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des bouteilles en polyéthylène de 1000 ml munies de bouchons poly-joint, en vue de l'analyse des principaux éléments après stabilisation du pH, de la conductivité électrique et de la température. Les analyses chimiques et les mesures isotopiques ont été effectuées au Laboratoire de radio-analyse et d'environnement de l'École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie) et au Laboratoire d'hydrologie isotopique du CNESTEN (Maroc).

Les principaux éléments (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^-) ont été analysés par chromatographie liquide ionique haute performance (HPILC) à deux phases pour les anions et les cations. La limite générale de détection des ions était de 0,04 mg/l. Les concentrations de CO_3^- et HCO_3^- ont été mesurées en laboratoire par titrage avec du HCl 0,1 N. La marge de l'équilibre ionique pour tous les échantillons était de $\pm 5\%$.

Des mesures du rapport d'isotopes stables ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et $^2\text{H}/^1\text{H}$) ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre à absorption laser LGR DLT 100 (Penna et al., 2010). Les résultats sont donnés en ‰ de l'étalon moyen de l'eau de mer - Vienne (V-SMOW).

Les analyses de tritium ont été effectuées par la technique d'enrichissement des électrolytes et de compteur à scintillateur liquide (Taylor, 1976). La concentration en ^3H est exprimée en

unités de tritium (UT). Une UT est définie comme le rapport des isotopes ^3H et ^1H , $^3\text{H}/^1\text{H} = 10^{-18}$.

Les analyses de radiocarbone et de ^{13}C n'ont été effectuées que sur huit échantillons du Bénin au laboratoire de l'université de Groningen (Pays-Bas) par la méthode de spectrométrie de masse par accélérateur (SMA). Celles de carbone 13 ont été effectuées par spectromètre de masse et les résultats ont été exprimés en valeurs de δ , en ‰ de l'étalon V-PDB.

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

4.1. Données géochimiques du bassin du Niger (Dosso)

4.1.1. Étude géochimique du bassin du Niger (Dosso)

Le bassin de Dosso fait partie du bassin sédimentaire transfrontières d'Iullemeden (commun à l'Algérie, au Niger, au Nigeria, au Mali et au Bénin). Il est situé dans la partie sud-ouest de ce bassin appartenant à la zone sahélienne et caractérisée par un climat semi-aride. Le projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA a permis d'établir une grande base de données géochimiques et isotopiques (157 échantillons) en vue de la détermination, de l'analyse et de l'évaluation des risques qui pourraient peser sur les ressources en eaux souterraines dans cette région (fig. 13).

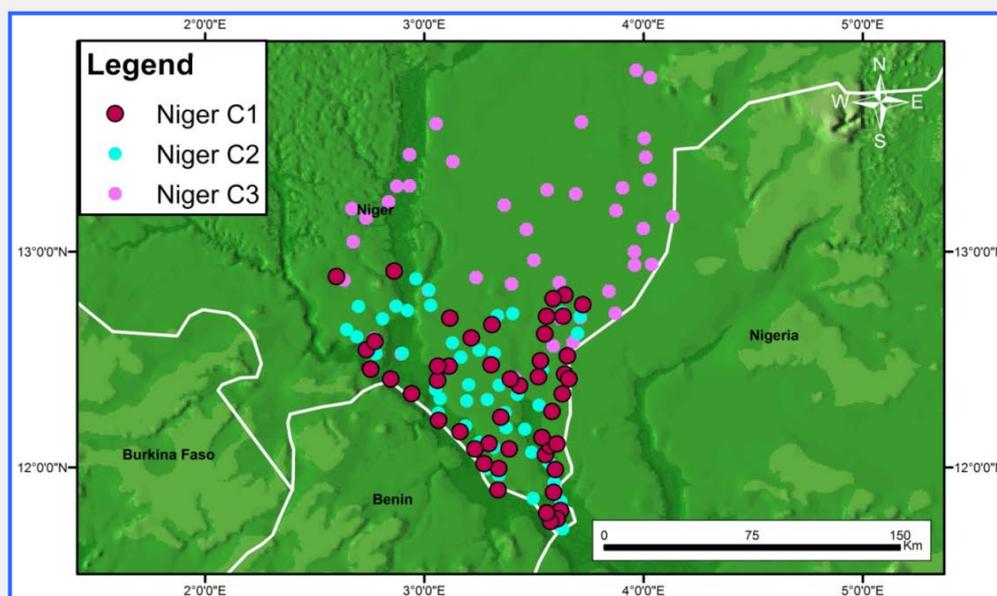


Figure 13 : Localisation des points d'échantillonnage dans le bassin d'Iullemeden (Dosso - Niger).

- Conductivité électrique

La conductivité électrique (CE) varie de 13 à 2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les valeurs de CE des eaux des diverses formations géologiques diffèrent en termes de minéralisation et de variabilité. Pour les eaux du CT3, la minéralisation est la plus faible et la variabilité est faible. Les eaux souterraines du CT1 sont les plus homogènes et la valeur moyenne de leur CE, qui est de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, est la plus élevée (fig. 14).

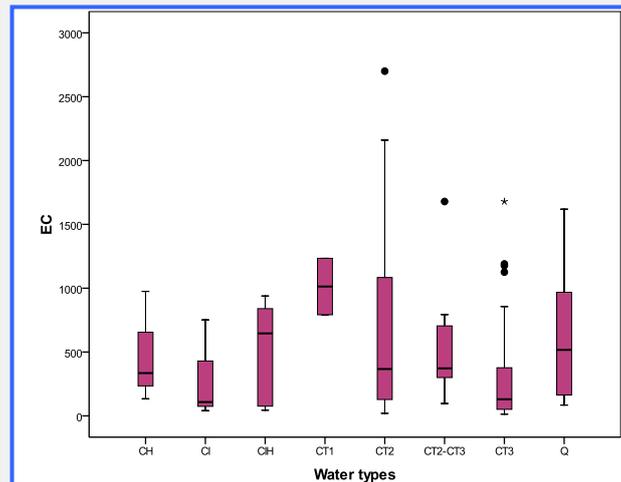


Figure 14 : Distribution des valeurs de CE des eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

- pH

Les valeurs de pH varient de 5,4 à 8,5. Contrairement à celles de CE, elles se divisent en deux groupes : l'un de pH basique, l'autre de pH neutre. Le pH basique du premier groupe dénote des valeurs d'alcalinité totale plus élevées, ce qui est probablement dû à une source minéralogique de Na (K) compte tenu de la présence de bicarbonate de soude ou d'hydroxide dissous dans l'eau (fig. 15).

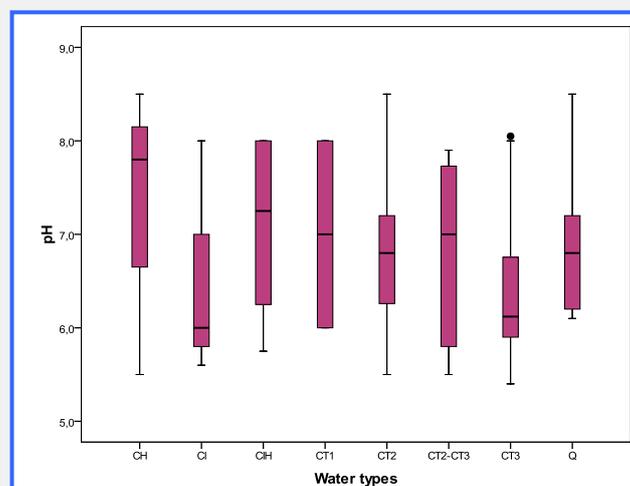


Figure 15: Distribution du pH des eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

- Température

La température des eaux souterraines varie peu, de 26,8 à 35,8 °C, ce qui est en harmonie avec la température annuelle de l'atmosphère dans cette zone. Toutefois, il y a une légère distorsion systématique dans la mesure des températures entre les aquifères. Néanmoins, les conditions de mesure semblent assez bonnes, sans exposition excessive à l'atmosphère, excepté pour quatre points (fig. 16).

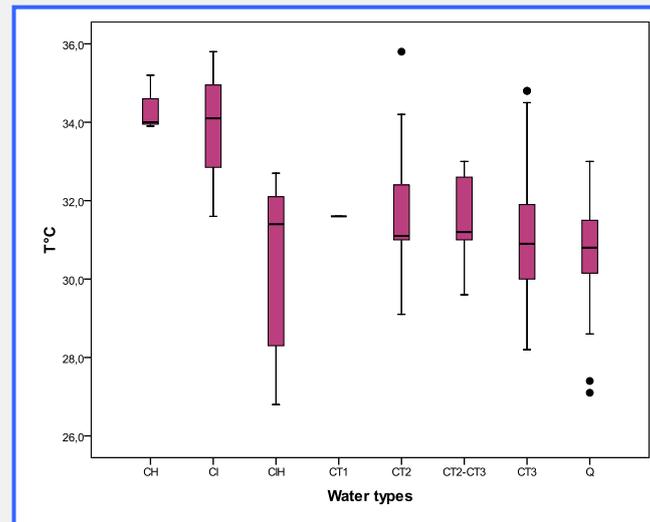


Figure 16 : Distribution de la température des eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

- Matières dissoutes totales

Les valeurs de matières dissoutes totales (MDT) mesurées pour les puits et les forages de la région de Dosso vont de 13 à 2700 mg/l. Les valeurs les plus faibles enregistrées sont celles de l'aquifère CT3 alors que les plus élevées observées sont celles de l'aquifère CT2. La comparaison des valeurs de MDT (fig. 17) et de conductivité électrique fait ressortir une bonne correspondance, excepté pour quatre points pour lesquels la corrélation est faible. Ces deux échantillons se situent au-dessus de la tendance générale, avec de fortes teneurs en bicarbonate, en sulfate et en sodium, ce qui est incompatible avec la faible CE mesurée sur le terrain.

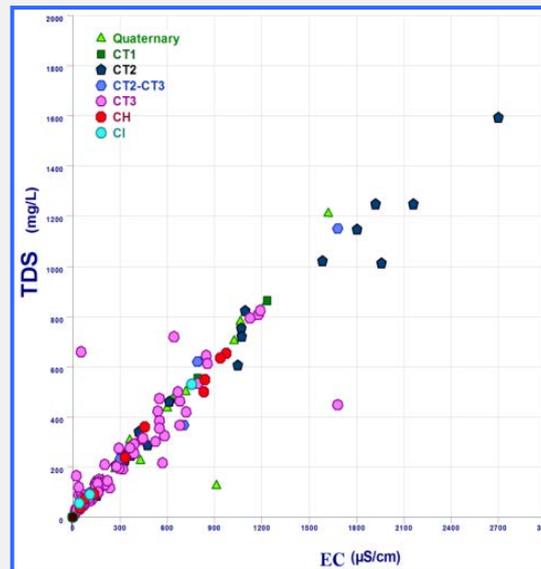


Figure 17 : Courbe des teneurs en MDT en fonction de la CE dans les eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

- Cations

Les teneurs en calcium pour l'aquifère du CH sont faibles, de même que leur variabilité. Pour les autres aquifères - ceux du quaternaire, CT2 et CT3 - elles sont plus ou moins égales à la moyenne, autour de 20 mg/l (fig. 18). Les concentrations en magnésium sont faibles pour toutes les formations, et suivent le schéma de celles du calcium (fig. 19). Les teneurs en sodium sont généralement plus faibles pour le CT3 et plus élevées pour le CT1 (fig. 20). Les eaux de tous les aquifères ont de très faibles teneurs en potassium (fig. 21).

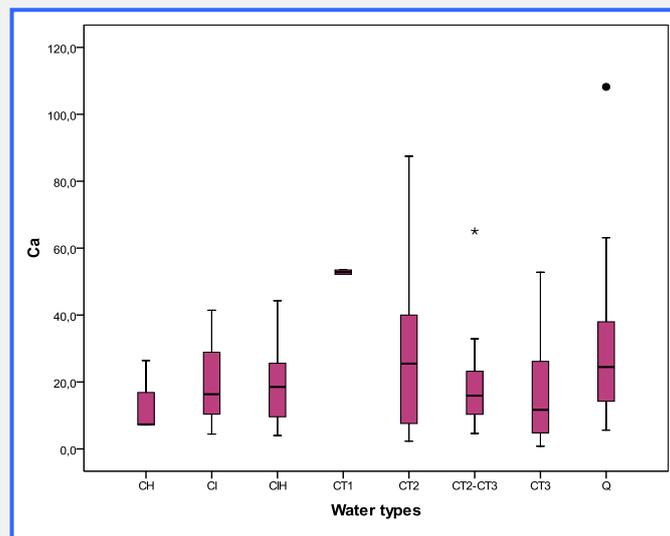


Figure 18 : Variabilité et distribution des teneurs en Ca des eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

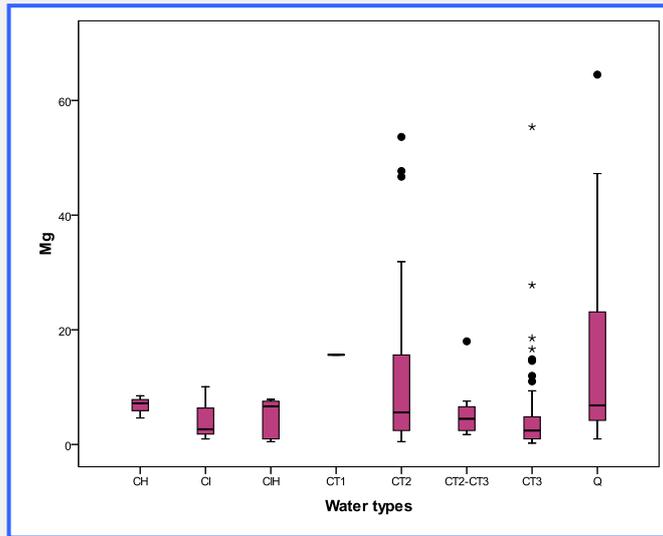


Figure 19 : Variabilité et distribution des teneurs en Mg des eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

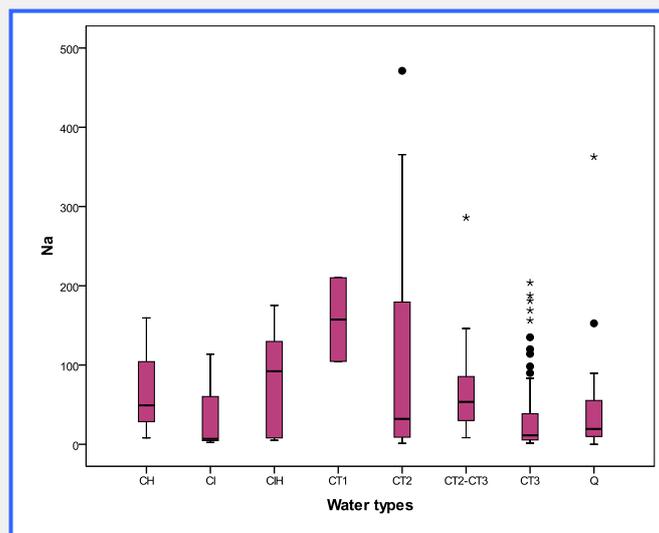


Figure 20 : Variabilité et distribution des teneurs en Na des eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

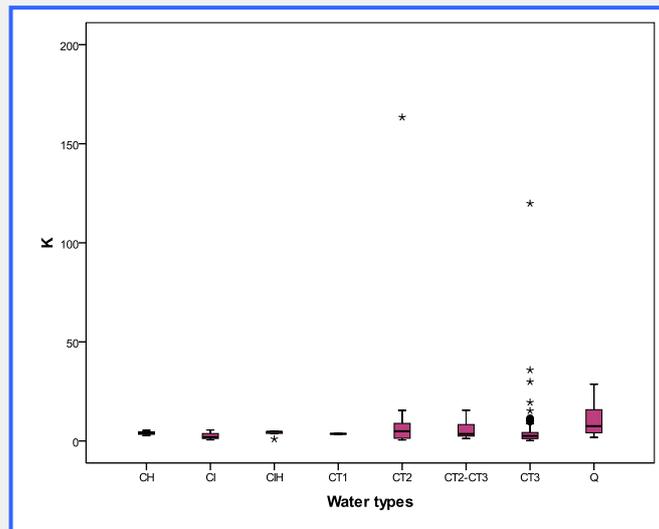


Figure 21 : Variabilité et distribution des teneurs en K des eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

- Anions

Les teneurs en bicarbonate (fig. 22) varient de 1,2 à 365 mg/l. Elles sont plus faibles pour les eaux souterraines du CT3 en corrélation avec des valeurs de CE plus faibles. Les teneurs en bicarbonate pour le CT1 et le CIH sont les plus élevées. D'après les données géologiques ayant trait à ces deux formations aquifères de la zone d'étude, il semble évident que la présence de limon dans celles-ci contribue à la minéralisation de l'eau.

Les teneurs en chlore pour le CT3 sont faibles et correspondent au niveau naturel (< 10 mg/l) (fig. 23). En ce qui concerne le CT1, le CT2 et le CIH, presque toutes les valeurs sont plus élevées (30-210 mg/l). Il semble que leurs plus fortes teneurs en sodium soient liées à des niveaux de bicarbonate ou de chlore plus élevés.

Les teneurs en sulfate (fig. 24) des eaux du CT1 sont élevées (62,9 à 278,9 mg/l) et la valeur de CE est la plus élevée, tandis que celles des eaux du CH, du CI, du CT2-CT3, du CT3 et de l'aquifère quaternaire sont faibles (< 50 mg/l). Dans la formation du CT1, les concentrations de sulfate atteignent 278,9 mg/l, la prévalence des anions dans ses eaux est associée dans ce cas à la forte teneur en sodium, ce qui pourrait être lié localement aux minéraux évaporatiques (gypse, thénardite or glaubérite).

Les teneurs en nitrate des eaux souterraines des aquifères étudiés de Dosso sont généralement faibles ou modérées (< 40 mg/l) (fig. 25). Seuls quelques échantillons d'eau des aquifères du

quaternaire et du CT3 ont des concentrations de nitrate supérieures à 50 mg/l, la valeur maximum recommandée par l’OMS pour l’eau potable (OMS, 2006). Ces fortes concentrations de nitrate ont été observées à de très faibles profondeurs (entre 2,1 et 22,6 m) (fig. 26) où les teneurs en tritium vont de 1,5 à 5,7 UT.

Les sols de la région du Sahel supportant certains types de végétaux comme les acacias, une espèce ligneuse qui fixe l’azote, contiennent généralement du nitrate d’origine naturelle ; les termites aussi peuvent produire de l’azote et les concentrations en nitrates des eaux souterraines peuvent être élevées (Ngugi et Brune, 2012).

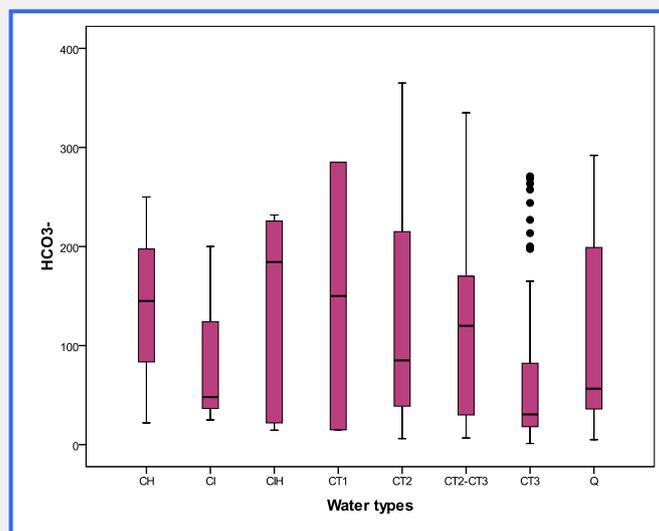


Figure 22 : Variabilité et distribution des teneurs en HCO₃ des eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

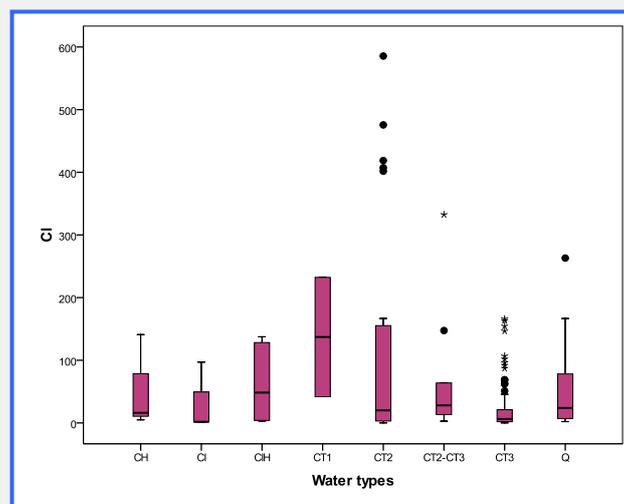


Figure 23 : Variabilité et distribution des teneurs en Cl des eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

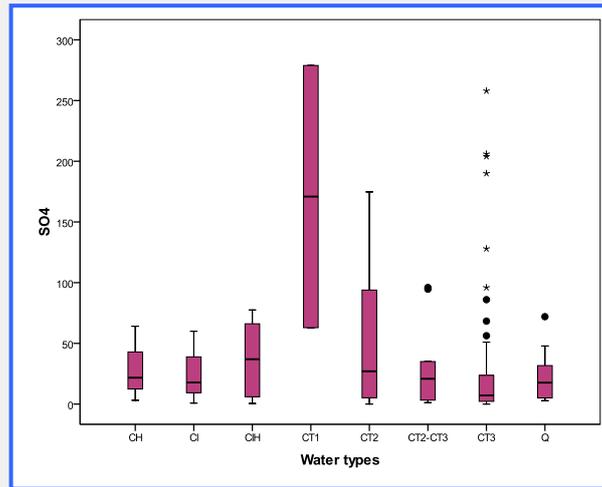


Figure 24 : Variabilité et distribution des teneurs en SO_4 des eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

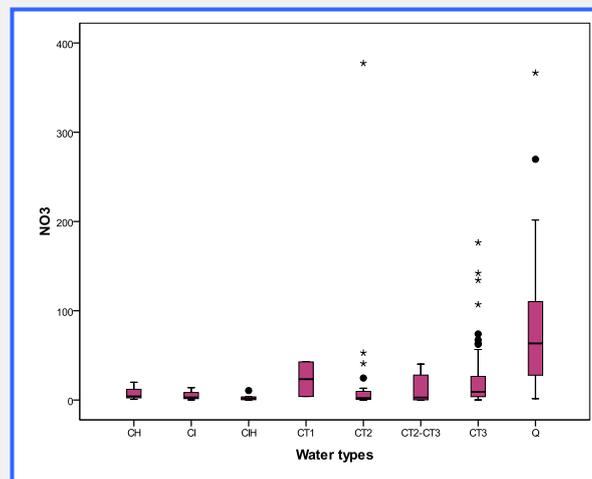


Figure 25 : Variabilité et distribution des teneurs en NO_3 des eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

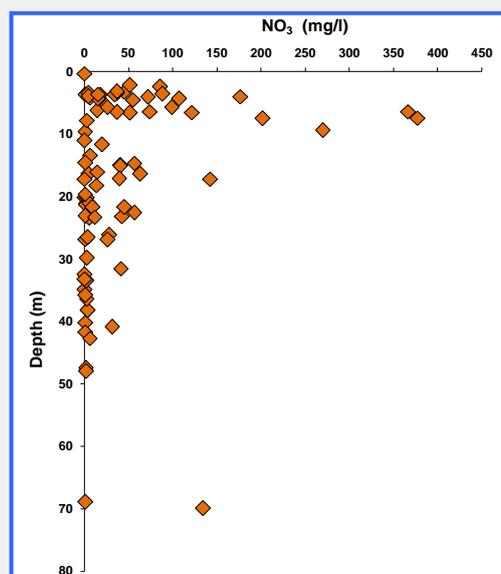


Figure 26 : Distribution des teneurs en nitrates des eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger) en fonction de la profondeur

- Faciès hydrochimiques

La composition chimique des échantillons analysés est présentée dans les diagrammes de Piper d'équivalence trilinéaire de la figure 27. La distribution générale dans le diagramme des cations montre un léger enrichissement en sodium par rapport aux autres cations. En ce qui concerne le diagramme des anions, deux tendances générales se dégagent, i) entre les pôles HCO_3 et Cl-NO_3 et ii) entre HCO_3 et SO_4 . Plus précisément, on pourrait distinguer plusieurs types d'eau, à savoir les types :

- Ca-Mg- HCO_3 ,
- Na-K-Cl,
- Ca-Cl- SO_4 , et
- Na-K- HCO_3 .

La grande variabilité spatiale des faciès hydrochimiques des échantillons d'eau analysés pourrait être liée aux réactions d'altération physique et chimique des minéraux.

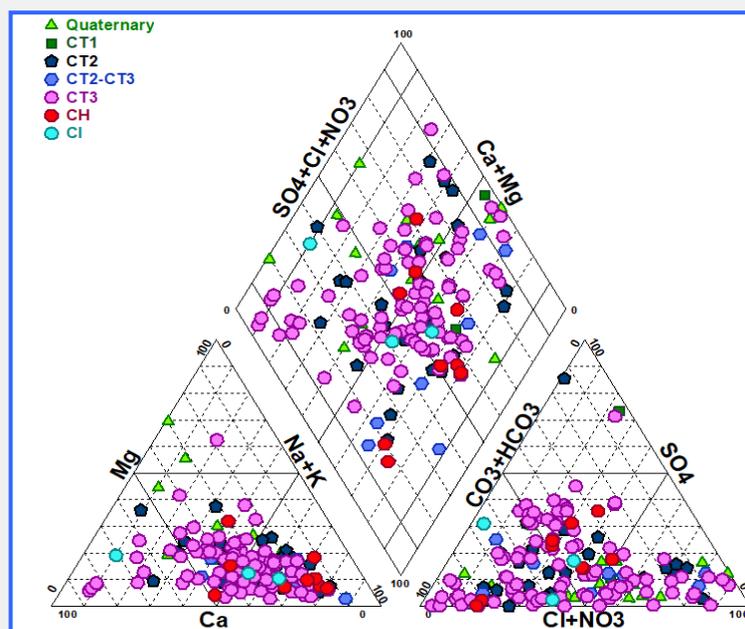


Figure 27 : Diagramme de Piper des échantillons d'eaux souterraines analysés (Dozzo, Niger)

Origine des principaux ions et processus de minéralisation

Les relations entre les principaux éléments et les matières dissoutes totales (MDT) sont examinées dans les figures 28 et 29. Les teneurs en Ca, Na, Mg, K, Cl, HCO_3 , SO_4 et NO_3 augmentent systématiquement avec les MDT. Ces corrélations positives indiquent que ces ions contribuent largement à la minéralisation des eaux souterraines.

Plusieurs représentations à deux variables ont été établies pour déterminer l'origine de ces ions et les processus qui contrôlent leurs concentrations (fig. 30). À la lumière des principales compositions ioniques de l'eau prélevée de façon répétée dans des puits, la chimie des échantillons d'eaux souterraines de la région de Dosso semble surtout contrôlée par les minéraux dissous dans les roches hôtes des bassins versants comme l'indiquent les indices de saturation calculés (fig. 31).

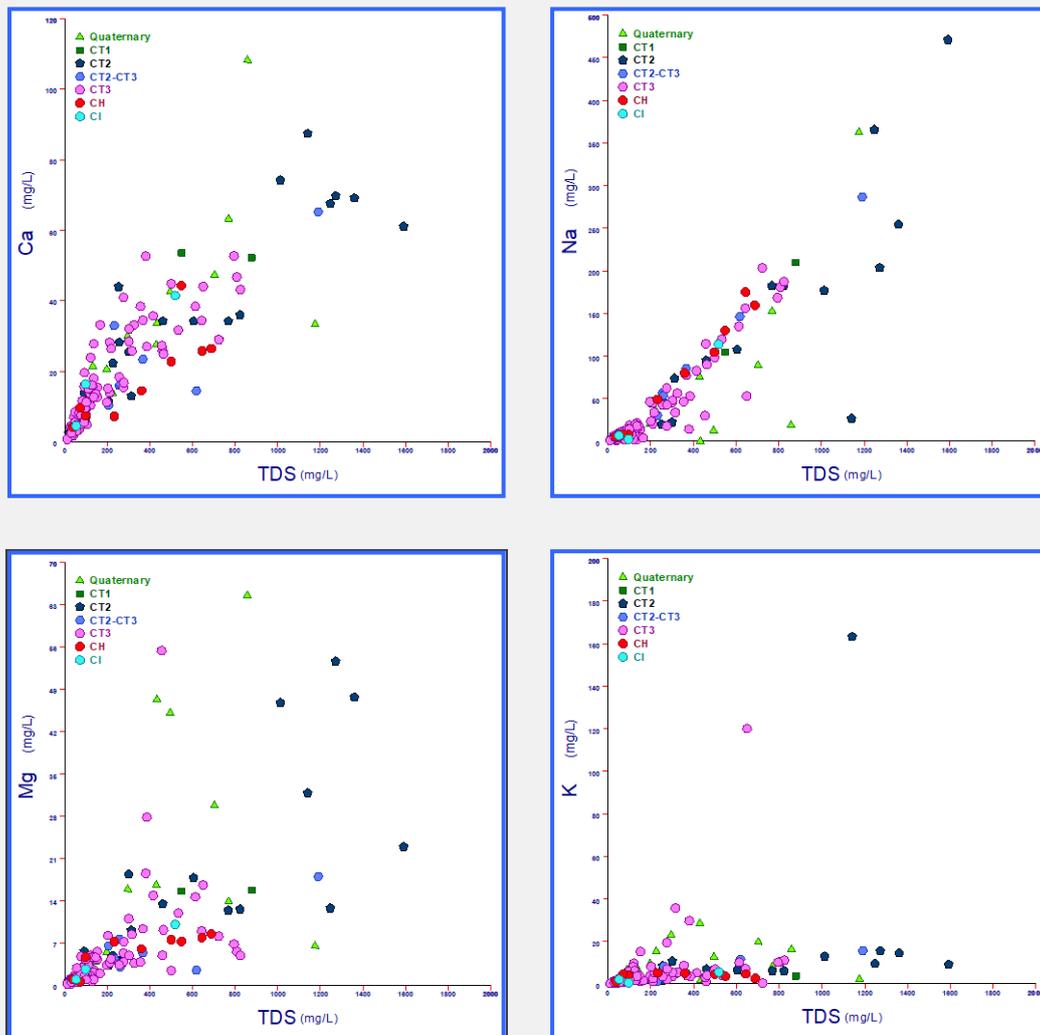


Figure 28 : Relations entre les MDT et les principaux éléments (cations) dans des échantillons d'eau (Dosso, Niger)

Il ressort de la figure 30 que les points où le rapport molaire Na^+/Cl^- est égal à 1 indiquent un processus de dissolution de halites. L'augmentation de ce rapport au-dessus de 1 dans certains échantillons des aquifères du CH, du CT2 et du CT3 pourrait suggérer l'existence de réactions de minéraux silicatés. Le rapport molaire $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ a tendance à augmenter le long de l'écoulement des eaux souterraines, ce qui est aussi une indication de la prépondérance de réactions de minéraux silicatés provenant de l'altération de grès dans la formation du CT3. La

figure 30 montre que la plupart des points représentant les aquifères du CT3 et du CH se trouvent sur la droite de dissolution 1-1 du gypse ou juste au-dessus de cette droite. Ce résultat pourrait s'expliquer par les effets conjugués des processus de dissolution et d'évaporation du gypse. Néanmoins, les pertes de SO_4^{2-} sont plus élevées que celles de Ca^{2+} dans les eaux souterraines des aquifères du CT2, du CT3 et du quaternaire. On pense que l'excès de Ca^{2+} est dû à la dissolution probable des minéraux carbonatés, comme le confirme la figure 30, et les points représentant les eaux souterraines des aquifères du CT2, du CT3 et du quaternaire se situent soit sur la ligne d'équilibre stoechiométrique 1-1 soit juste au-dessus de cette droite. Les points représentant les eaux souterraines de tous les autres échantillons, y compris celles de l'aquifère du quaternaire, sont au-dessus ou au-dessous de cette ligne, ce qui indique qu'il pourrait y avoir une autre source de Ca^{2+} , peut-être l'altération et l'érosion de minéraux de gypse et/ou d'argile.

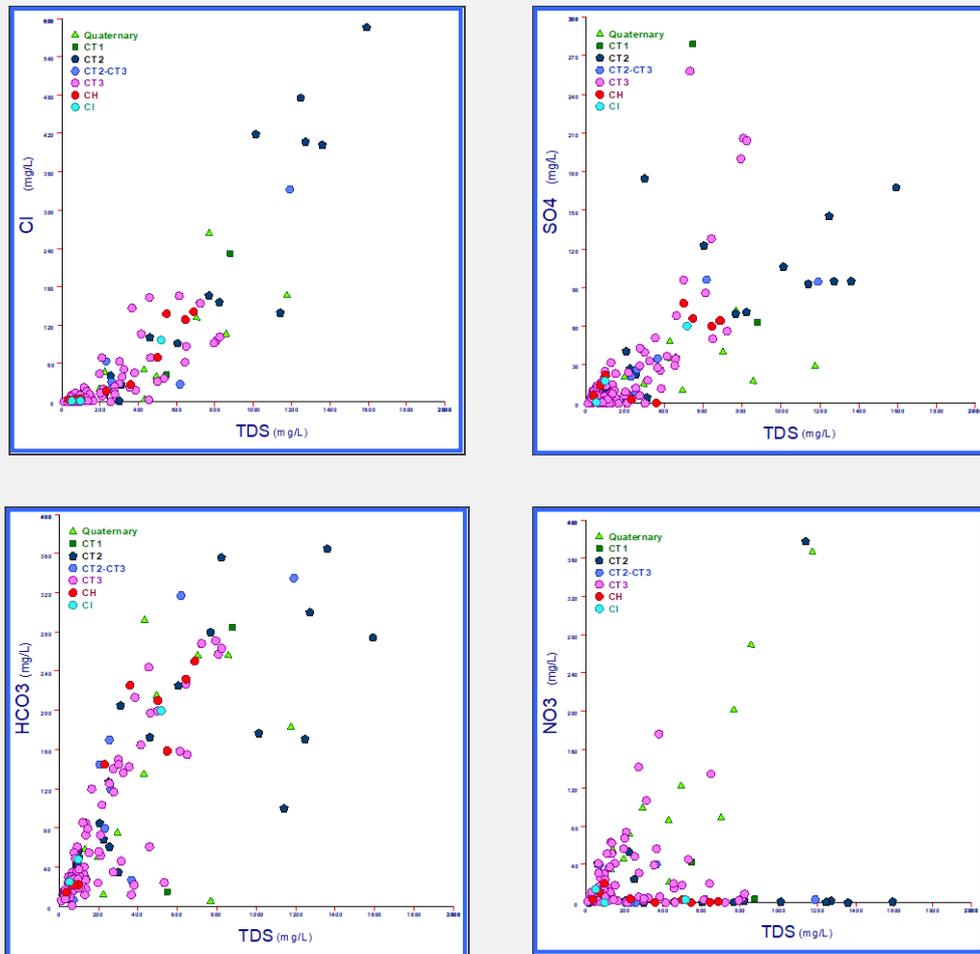


Figure 29 : Relations entre les MDT et les principaux éléments (anions) des échantillons d'eaux souterraines (Dosso, Niger)

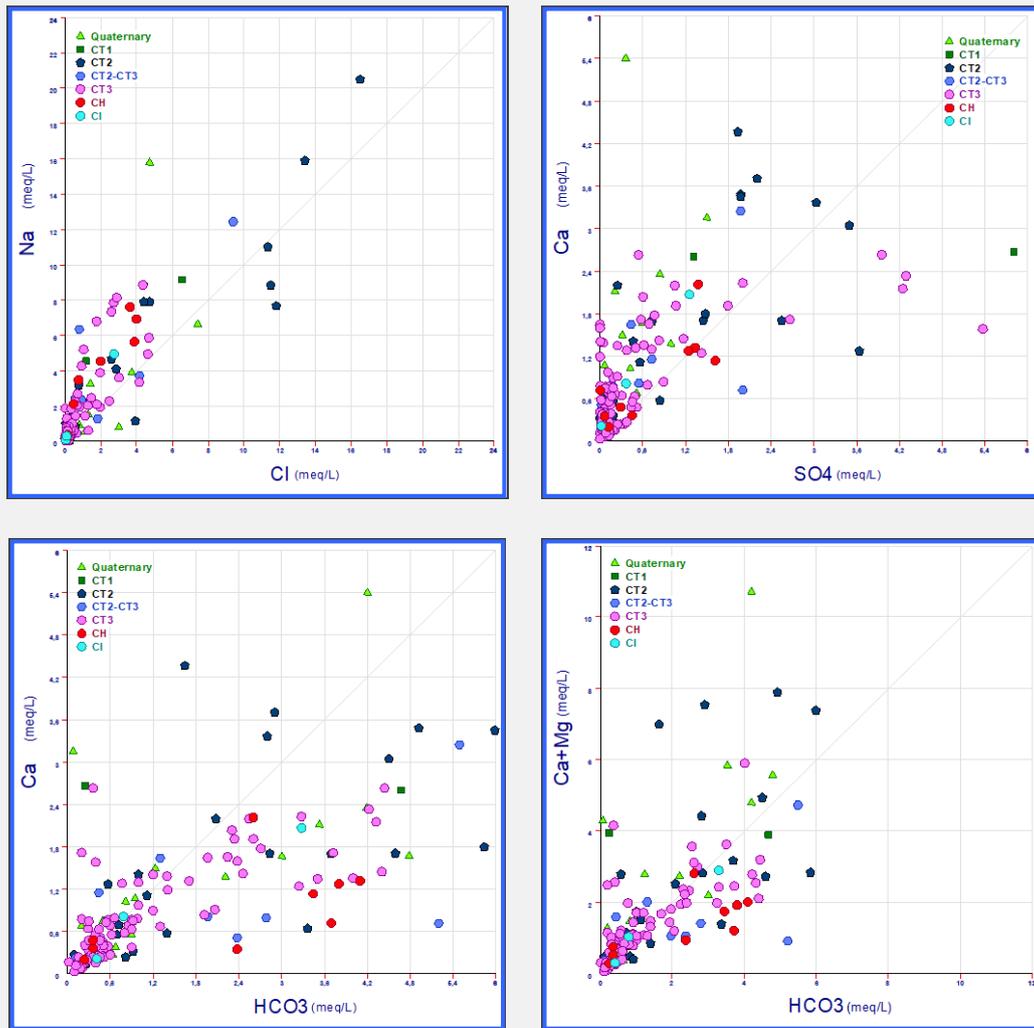


Figure 30 : Relations entre les principales espèces ioniques des échantillons d'eaux souterraines (Dozzo , Niger)

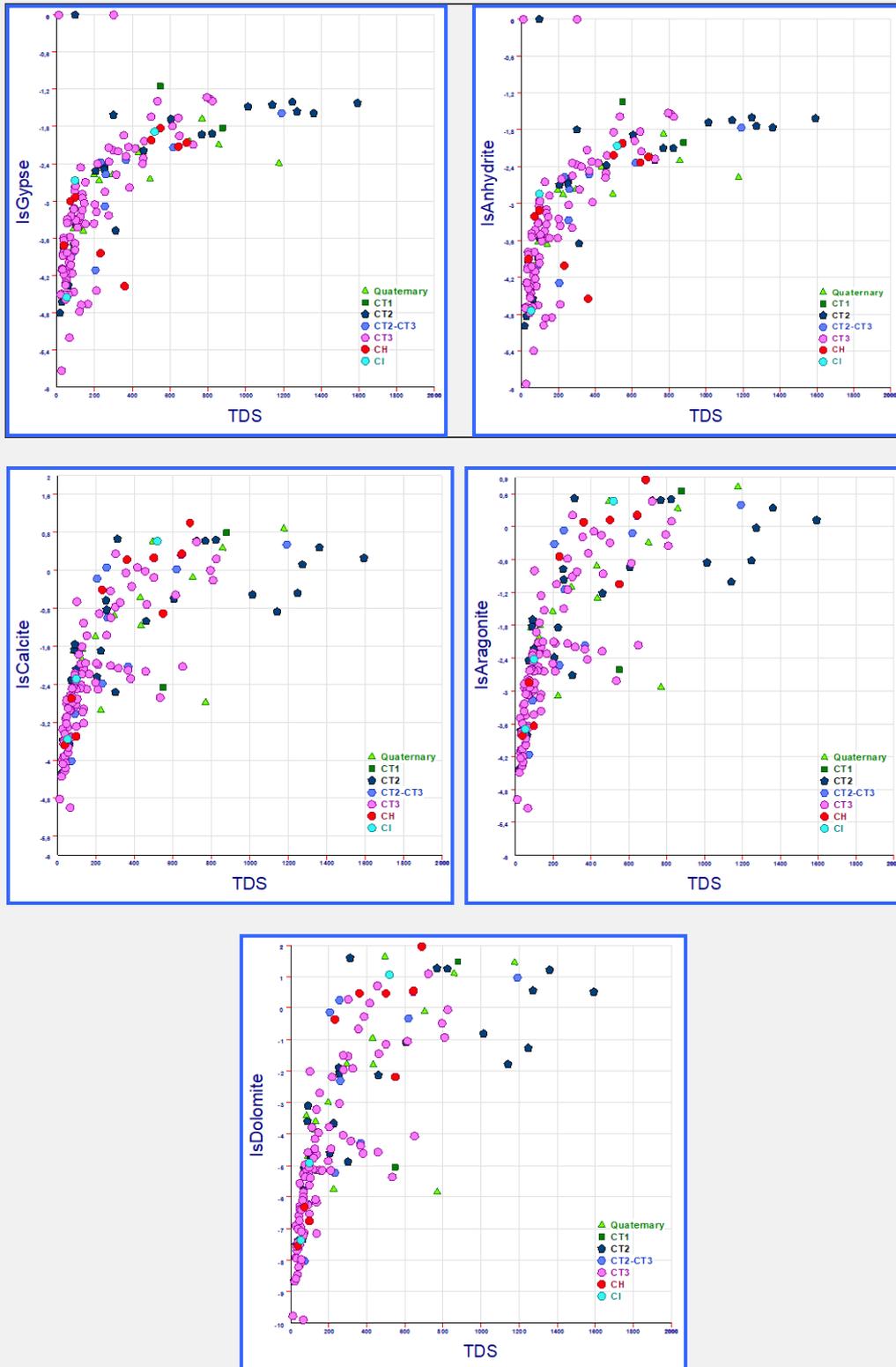


Figure 31 : Relations entre les indices de saturation et les MDT des échantillons d'eaux souterraines (Dozzo, Niger)

4.1.2. Données isotopiques du bassin du Niger (Dosso)

- **Composition isotopique des précipitations locales à Dosso**

En hydrologie isotopique, la première étape importante de la caractérisation d'un aquifère est de comparer la signature des isotopes stables des eaux de pluies locales à celle des eaux souterraines, ce qui devrait donner une idée de la valeur moyenne pondérée des contributions des précipitations (Gat et Carmi, 1987). En conséquence, étant donné que la pluie constitue la principale source d'eau dans un système hydrogéologique, la connaissance de la composition isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) des précipitations atmosphériques est un outil important pour les applications hydrologiques, climatologiques et météorologiques (Agence internationale de l'énergie atomique, AIEA, 1981; Rozanski et al., 1993).

Compte tenu des processus naturels de fractionnement, on peut déterminer les caractéristiques de la recharge des aquifères grâce aux isotopes environnementaux ^{18}O et ^2H . En fonction des processus qui ont lieu avant qu'elle n'arrive à la surface du sol, l'eau de pluie a une composition spéciale de ces isotopes. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a publié l'équation d'une droite météorique mondiale avec la relation $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$, qui donne la composition moyenne de l'eau de pluie partout dans le monde. Bien que les isotopes de l'eau de pluie n'aient pas été analysés au cours de la mise en œuvre du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA, la base de données de l'Agence contient certaines données ayant trait à la station de Niamey (1992-2013) qui peuvent permettre de déterminer la droite météorique locale (fig. 32) qu'on pourrait adopter en ce qui concerne la région de Dosso.

La droite météorique locale pour le Niger est définie pour la première fois dans le présent rapport, sur la base des échantillons de données mensuelles de précipitations collectées à la station de Niamey au cours de la période 1992-2013 (fig. 31). Tant la pente que l'ordonnée $\delta^2\text{H}$ de la droite météorique locale pour Niamey ($\delta^2\text{H} = 6,9 \times \delta^{18}\text{O} + 3,6$) s'écartent de celles de la droite météorique mondiale ($\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$).

Il est clair que le processus d'évaporation dans la région semi-aride de Dosso altère la relation originale $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ caractérisant l'eau de pluie, ce qui se traduit par une pente inférieure à 8 comme indiqué pour de nombreuses régions arides et semi-arides (Gat, 1980) et des valeurs d'excès de deutérium inférieures à celles de la droite météorique mondiale, qui indiquent

peut-être que la pluie tombe surtout à une humidité moyenne inférieure à 100 % (Goni et al., 2001 ; Maduabuchi et al., 2006).

Les pentes inférieures à 8 dans cette station pourraient indiquer qu'il y a des processus d'évaporation en dehors des zones d'équilibre lorsque les gouttes d'eau tombent sous la base des nuages (Dansgaard, 1964). Dans de nombreuses régions, on observe en outre des écarts saisonniers par rapport à la droite météorologique mondiale, dus essentiellement à une plus forte évaporation partielle de ces gouttes pendant les mois d'été et/ou lorsque les conditions saisonnières sont variables dans les zones sources pour la vapeur.

L'excès de deutérium calculé avec une pente théorique de 8 pour la période d'étude est de 9,24 pour la droite météorologique locale de Niamey et est clairement inférieur à ceux de la droite météorologique mondiale. Cette droite météorologique locale ne pouvait donc être adoptée pour la présente étude. La chimie isotopique des eaux de pluie dans la région du Sahel est extrêmement variable, sur les plans tant géographique que temporel, et dépend des conditions de circulation atmosphérique (Joseph et al., 1992) (figures 33 et 34). Les précipitations dans la région sahélo-saharienne, y compris le bassin d'Iullemeden, ont pour source le golfe de Guinée (Taupin and *al.*, 2000). Toutefois, l'eau réévaporée à partir du continent est une source importante de vapeur d'eau, comme en témoignent l'absence d'effet continental et l'important excès de deutérium au début et à la fin de la saison des pluies (Taupin et *al.*, 1997 ; 2000).

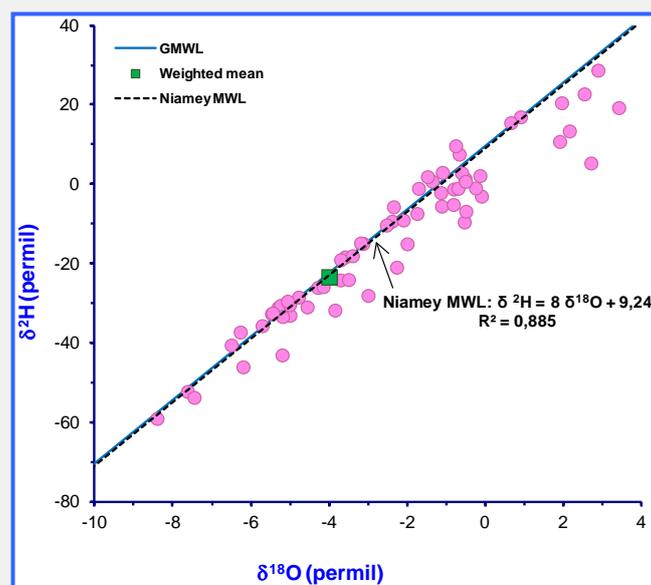


Figure 32 : Comparaison de la droite météorologique locale de la station de Niamey (en noir) tracée à partir de données de l'AIEA et de la droite météorologique mondiale (en bleu)

Bien que la température soit un facteur important qui contrôle la variation de la composition isotopique des précipitations, il a été montré (Fontes, 1976) qu'il n'y a souvent pas de relation claire entre les températures mesurées sur terre et la composition isotopique de l'eau de pluie en zone tropicale, ce qui indique que d'autres processus doivent intervenir. Pendant la préparation des tempêtes, la convection se traduit par de faibles températures de condensation à la hauteur du processus de formation verticale des nuages (Fontes et *al.*, 1993 ; Taupin et *al.*, 1995).

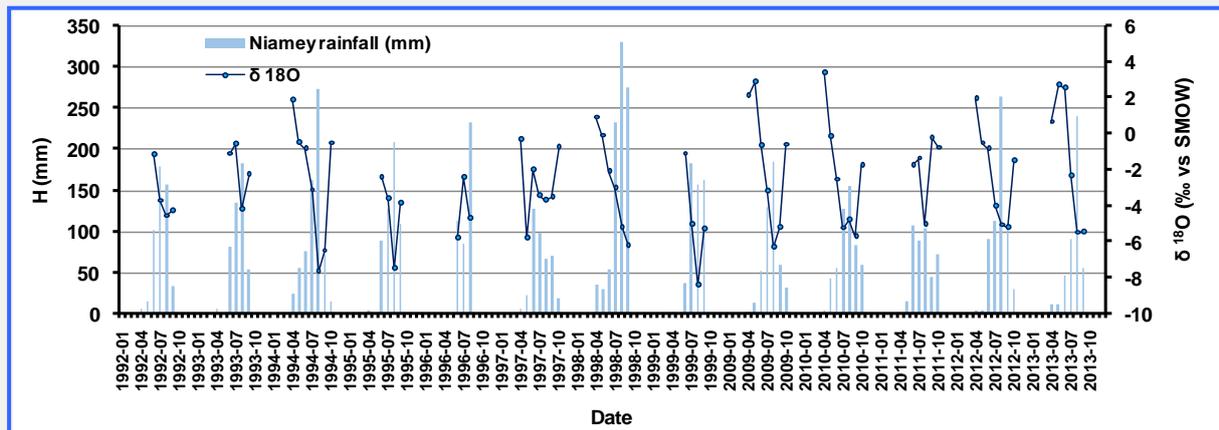


Figure 33 : Données mensuelles d'oxygène 18 et de pluviométrie pour la station de Niamey

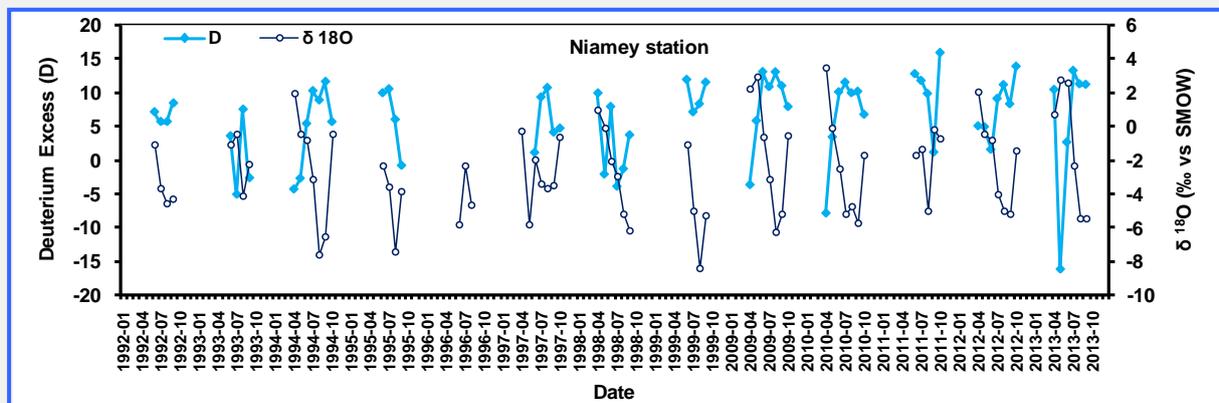


Figure 34 : Données mensuelles d'oxygène 18 et d'excès de deutérium (précipitations) pour la station de Niamey

- **Composition isotopique des eaux souterraines à Dosso**

Les isotopes environnementaux ont été mesurés dans tous les échantillons d'eaux souterraines collectés dans le bassin de Dosso dans le cadre du projet RAF/7/011. La figure 12 présente la carte de localisation des points de prélèvement d'échantillons pour les mesures des isotopes ^{18}O et ^2H .

- Isotopes de l'eau

La fourchette des valeurs pour tous les aquifères de Dosso va de -7,76 à -1,77 ‰ pour l'oxygène 18 et de -57,35 ‰ à -13,23‰ pour le deutérium (Figs. 35, 36). Bien que tous ces aquifères présentent de grandes variations, la comparaison de leurs valeurs médianes montre que les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ sont proches, ce qui est en harmonie avec la valeur isotopique pondérée de la pluviométrie annuelle. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des aquifères du CI, du CT1, du CT2 et du CH vont de -7‰ à -4‰, ce qui montre que l'eau est d'origine diverse. En revanche, la forte variabilité et les valeurs positives de concentrations observées pour les eaux souterraines des aquifères du CT3 et du quaternaire montrent que d'autres processus interviennent, comme le mélange avec des eaux de surface du fleuve Niger et/ou l'évaporation. Ce dernier processus pourrait se produire avant l'infiltration (les zones endoréiques collectent les eaux de surface), pendant celle-ci en fonction de l'humidité du sol, ou directement à partir de puits ouverts dans la mesure où la plupart des puits de la formation du quaternaire sont peu profonds.

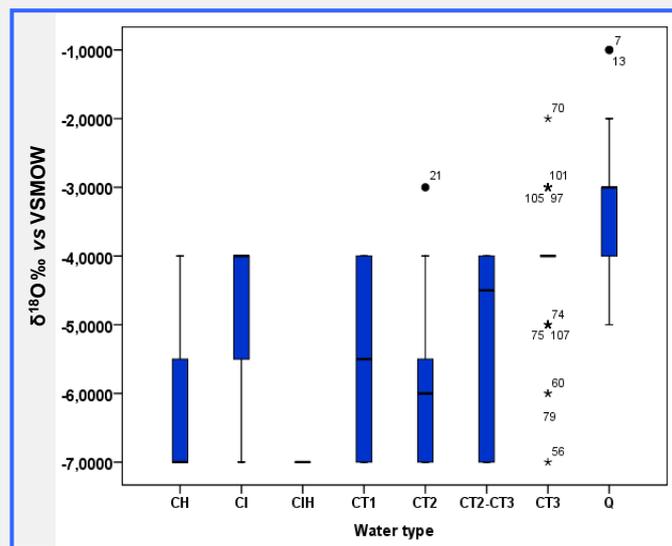


Figure 35 : Variabilité et distribution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

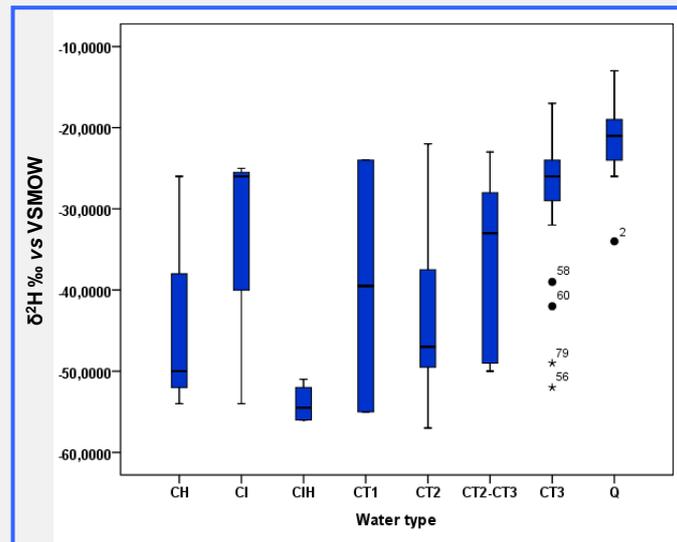


Figure 36 : Variabilité et distribution des valeurs de $\delta^2\text{H}$ dans les eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

La position des points représentant les échantillons d'eau du bassin de Dosso analysés sur le graphique de ^2H en fonction de ^{18}O montre que ceux-ci se divisent en trois groupes (fig. 37) :

- Les échantillons d'eau appauvrie des aquifères du CI, du CH, du CT1 et du CT2 dont les compositions d'isotopes stables différentes de celles des précipitations actuelles. Les faibles valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ pourraient indiquer un effet paléoclimatique pouvant laisser à penser que ces aquifères contiennent des eaux qui ont été rechargées à une période différente et n'ont pas été couplées avec le cycle hydrologique actuel. Cette hypothèse est appuyée par de très faibles teneurs en tritium (figures 38, 41).

- L'eau enrichie, qui montre : i) l'importance de la contribution des eaux du fleuve Niger à l'évolution de la composition isotopique des échantillons d'eau prélevés dans l'aquifère du quaternaire, et/ou ii) l'existence d'un flux de retour de l'irrigation. Les concentrations en tritium et en nitrates de ces échantillons sont élevées ($> 50 \text{ mg/l}$) (figures 37, 25, 39) ;

- Un mélange d'eau contenant des isotopes stables dont les signaux sont intermédiaires entre ceux des eaux de pluies de l'époque actuelle et ceux de l'eau fossile. Cela explique le diagramme de certaines données, en particulier en ce qui concerne les échantillons du CT3, qui se situent entre celles de l'eau plus pauvre et de l'eau relativement plus riche en isotopes stables, respectivement interprétées comme étant de l'eau fossile et de l'eau de recharge de l'époque actuelle (Goni, 2006).

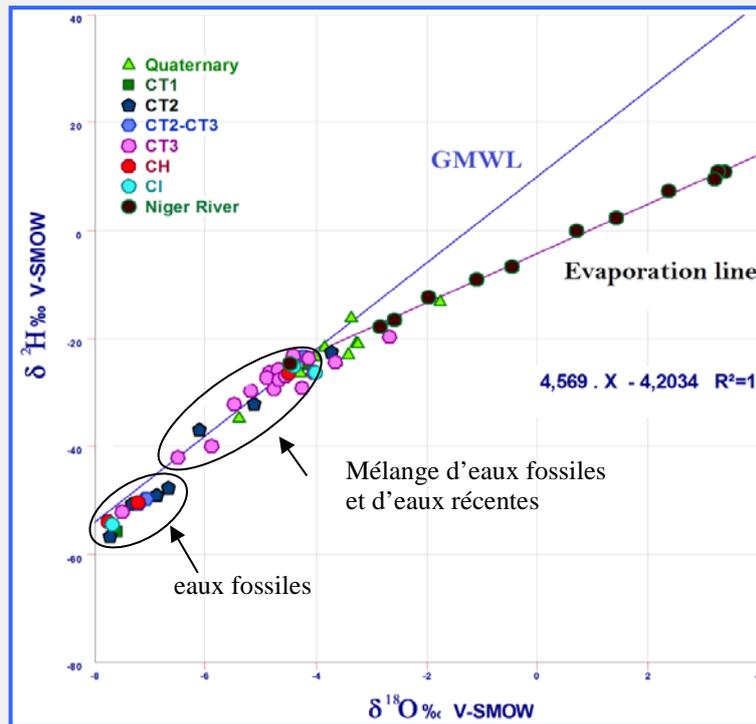


Figure 37 : Diagramme de ^2H en fonction de ^{18}O dans les échantillons d'eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

Excès de deutérium « d »

La valeur de l'excès de deutérium « d » se caractérise par une assez grande variabilité particulièrement notable pour les aquifères du CT3 et du quaternaire dont les valeurs sont les plus faibles (valeurs négatives) (fig. 38). Les fortes concentrations en isotopes stables de ces aquifères et ces faibles valeurs de « d » confirment qu'ils contiennent de l'eau évaporée. Toutefois, en ce qui concerne les eaux des autres aquifères pour lesquelles l'excès de deutérium est faible, en particulier les aquifères du CI, du CT1 et du CT2 dont les valeurs de « d » sont inférieures à 10 ‰, le processus d'évaporation ne semble pas envisageable. Outre le problème de l'échantillonnage et de la conservation avant l'analyse, la valeur de l'excès de deutérium n'est pas si facile à comprendre. Compte tenu de la faible concentration en isotopes stables de ces points d'échantillonnage, une recharge paléoclimatique avec des conditions de circulation atmosphérique différentes des conditions actuelles est possible, ce qui influe sur l'excès de deutérium. La variation spatiale hétérogène observée en ce qui concerne les teneurs en isotopes stables des différents aquifères est en harmonie avec la forte variation de l'excès de deutérium. Cette variabilité est essentiellement liée aux effets paléoclimatiques pour les eaux souterraines à faibles teneurs et aux effets de l'évaporation en ce qui concerne les eaux souterraines à fortes teneurs. Les conditions locales d'infiltration et la force du processus

d'évaporation, qui dépend du processus d'infiltration (infiltration directe, infiltration après ruissellement, concentration dans des zones endoréiques avant infiltration) influent aussi sur la composition isotopique et l'excès de deutérium des eaux de ces aquifères (fig. 38).

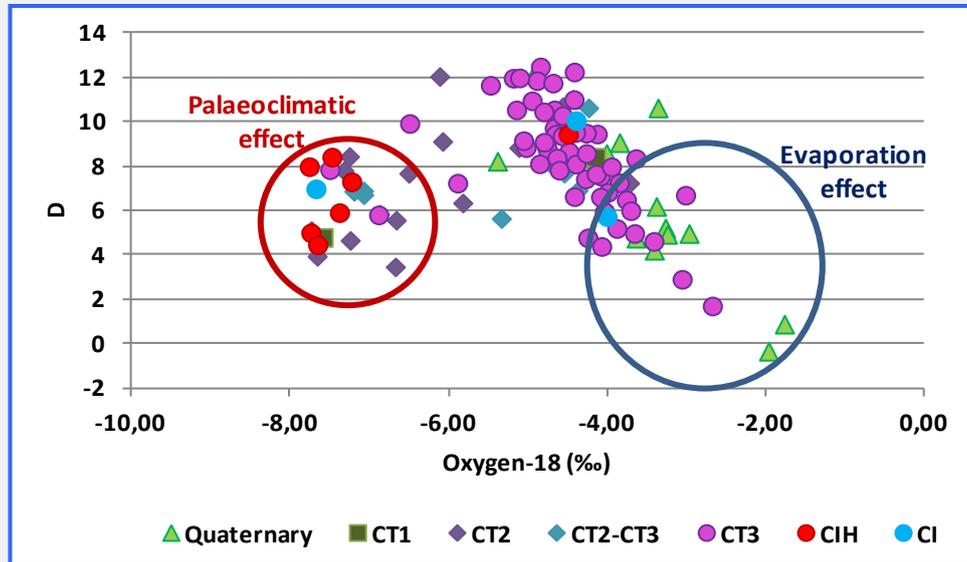


Figure 38 : Diagramme de l'excès de deutérium en fonction de la teneur en ^{18}O des échantillons d'eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

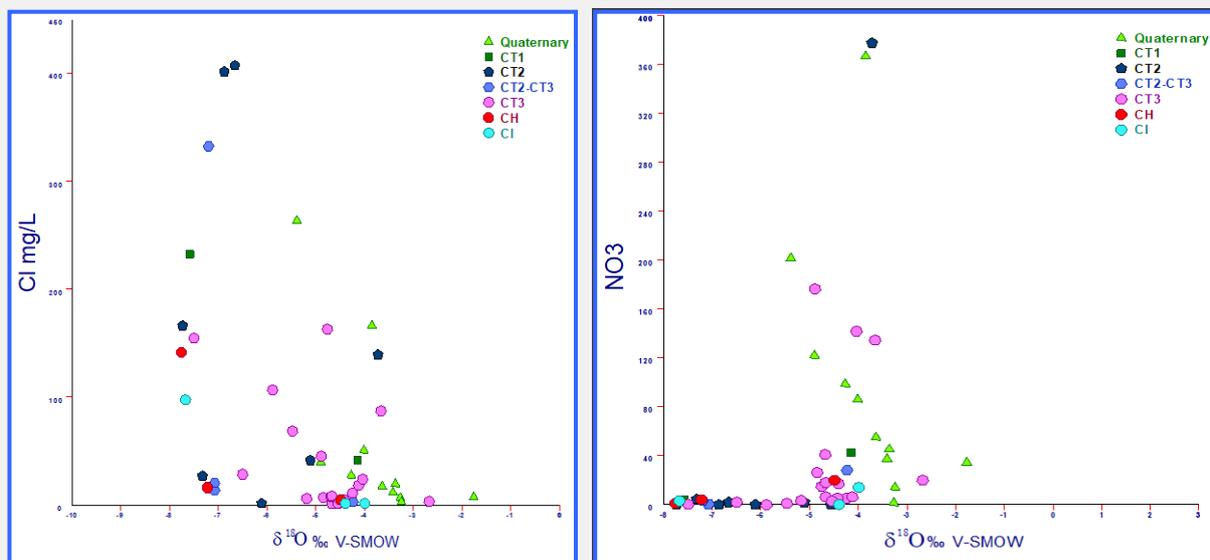


Figure 39 : Diagrammes de la teneur en chlore en fonction de la teneur en ^{18}O et de la teneur en nitrate en fonction de la teneur en ^{18}O des échantillons d'eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

- Tritium

D'une manière générale, la concentration en tritium estimée (niveau naturel) des précipitations récentes est de 4 UT. La teneur en tritium des eaux souterraines dépend des conditions locales de recharge (infiltration, profondeur de l'eau, ...) et de la distribution spatiale des précipitations. En ce qui concerne les eaux souterraines des aquifères du CT3 et

du quaternaire, on observe une recharge récente à la plupart des points d'échantillonnage au cours des 65 dernières années, avec des concentrations en tritium supérieures à 1,5 UT, des 10 à 20 dernières années et des concentrations supérieures à 5-6 UT pendant la période du pic de tritium (1955-1980). On peut noter que les valeurs d'EC de ces échantillons sont faibles, ce qui dans ce cas est lié au renouvellement rapide de l'eau (figures 40, 41). Toutefois, en ce qui concerne les eaux des aquifères du CI, du CH, du CT1 et du CT2, il s'agit d'un mélange d'eau de recharge récente et d'eaux souterraines antérieures à 1950.

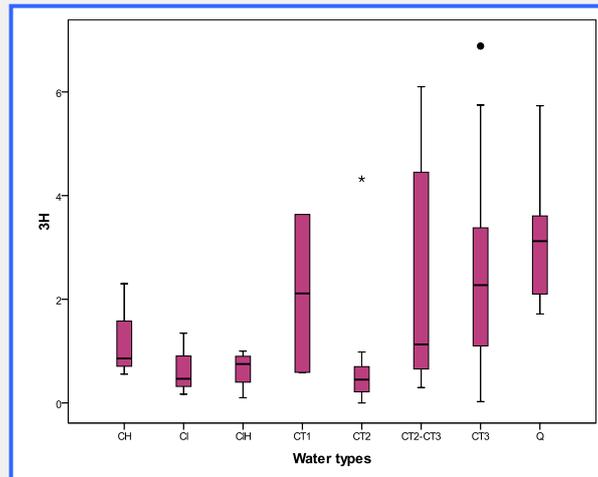


Figure 40 : Variabilité et distribution de la teneur en ^3H des eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

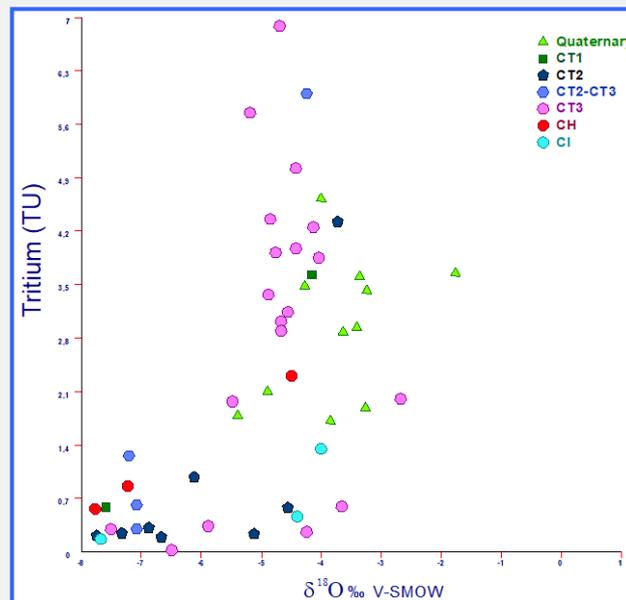


Figure 41 : Diagramme de la teneur en ^3H en fonction de la teneur en ^{18}O des eaux souterraines du bassin de Dosso (Niger)

4.2. Données géochimiques du bassin du Nigeria

4.2.1. Étude géochimique du bassin du Nigeria

La section nigérienne de l'aquifère d'Iullemeden couvre les régions des États de Sokoto et Kebbi ainsi que les parties septentrionales des États de Katsina et Zamfara. Au total, 149 échantillons ont été collectés au cours de trois campagnes d'échantillonnage dans cette section (fig. 42).

Cette zone est une région tropicale, avec essentiellement des saisons sèches et pluvieuses de durées variables. Toutefois, le climat est aride et semi-aride dans certaines parties, avec une pluviométrie inférieure à 800 mm/an. La région est drainée par le Sokoto-Rima et ses affluents. Ceux-ci sont généralement entourés de grandes plaines inondées traversant la région, et les pentes des vallées des cours d'eau descendent d'une hauteur de 340 m à environ 247 m au fond des vallées. Les plaines inondées sont souvent marécageuses en saison pluvieuse et constituent des réservoirs d'eaux souterraines précieuses au cours de la saison sèche, lorsque la plupart des chenaux des cours d'eau sont à sec. Vers la fin de la saison sèche, ces cours d'eau et leurs affluents sont habituellement asséchés.

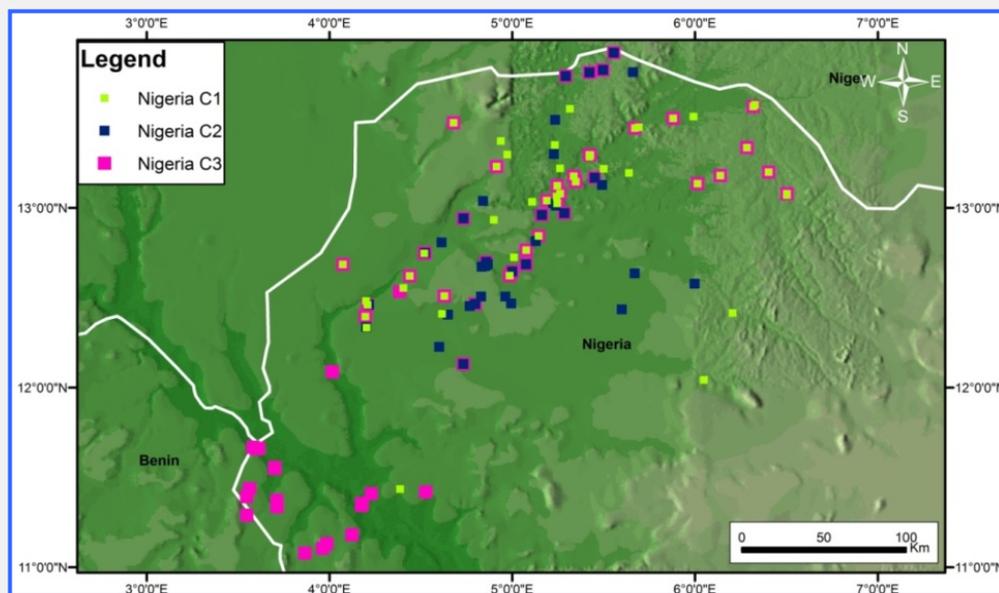


Figure 42 : Distribution des points d'échantillonnage dans le bassin d'Iullemeden (Nigeria)

- Conductivité électrique

Les chiffres de conductivité électrique (CE) mesurés pour les puits et les forages du bassin au Nigeria vont de 10 à 2020 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ceux des cours d'eau sont plus homogènes, avec une

faible variabilité, et vont de 10 à 490 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (fig. 43). Les résultats indiquent que d'une manière générale, ces eaux souterraines se situent dans les limites acceptables de l'OMS en ce qui concerne l'eau potable. Il n'y a pas de différence entre les valeurs d'EC de l'eau des cinq formations géologiques en termes de minéralisation et de variabilité. Les eaux souterraines de l'aquifère du CT ont le taux de minéralisation le plus bas et une faible variabilité, avec une moyenne de 185 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux souterraines du paléocène supérieur ont le taux de minéralisation et la variabilité le plus élevé, avec une moyenne de 614 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Il ressort de la comparaison des valeurs de MDT et de conductibilité électrique (fig. 44) qu'il y a une bonne corrélation entre ces deux paramètres.

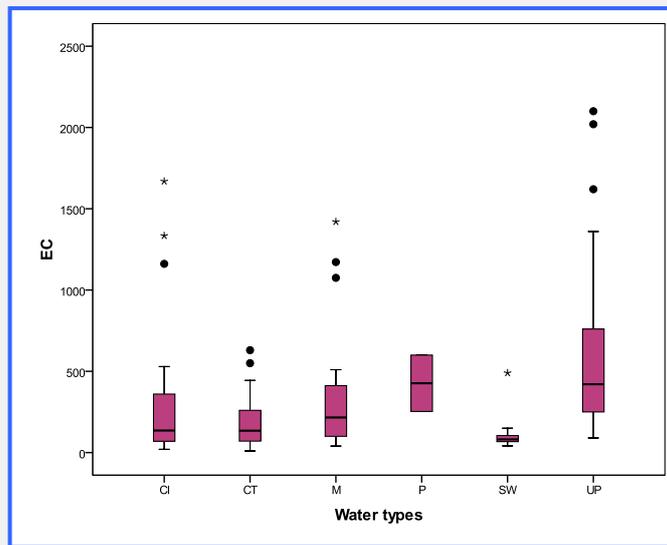


Figure 43 : Conductibilité électrique des échantillons d'eau du bassin du Nigeria

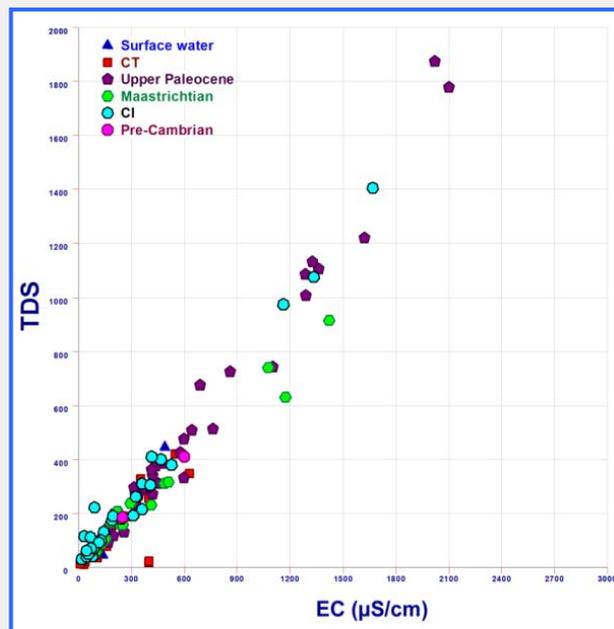


Figure 44 : Diagramme des valeurs de MDT en fonction de celles de CE des échantillons d'eau du bassin du Nigeria

- Température

Les températures moyennes calculées de l'eau sont homogènes et varient peu entre les aquifères. Toutefois, certains chiffres extrêmes (paléocène supérieur, Maastrichtien et CT), qui constituent des valeurs aberrantes, devraient être considérés avec méfiance en ce qui concerne le calcul de l'indice de saturation et la détermination de l'équilibre thermodynamique. Les valeurs les plus faibles concernent les eaux de surface (fig. 45) et sont voisines des valeurs annuelles de température atmosphérique.

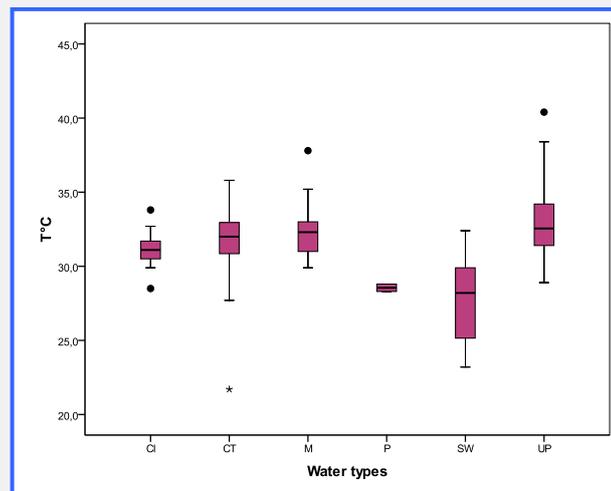


Figure 45 : Distribution de la température des échantillons d'eau analysés du bassin du Nigeria

- pH

Le pH des eaux de surface est basique, ce qui est en harmonie avec les principales caractéristiques de chimie ionique, qui sont dominées par la prépondérance de l'ion bicarbonate. En ce qui concerne les échantillons d'eaux souterraines, le pH mesuré est voisin du pH neutre, avec une faible variabilité, et va de 6 à 8 pour la plupart des points d'échantillonnage. Certaines valeurs aberrantes observées pour les eaux souterraines des aquifères du paléocène supérieur et du maastrichtien (fig. 46) devraient être considérées avec méfiance.

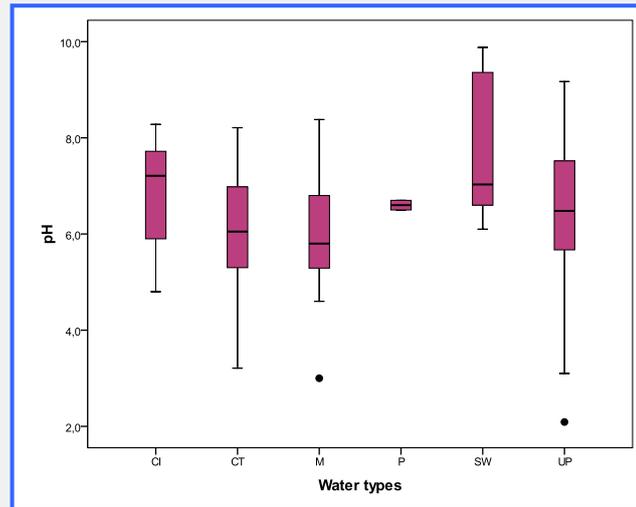


Figure 46 : distribution du pH des échantillons d'eau du bassin du Nigeria

- Cations

Les concentrations de calcium mesurées sont homogènes et ont une faible variabilité dans les formations aquifères du CI, du CT et du maastrichtien (fig. 47), mais sont plus élevées dans celles du paléocène supérieur, avec une forte variabilité (moyenne de 14,2 mg/l). Les teneurs en calcium des eaux de surface sont les plus faibles. Les teneurs en magnésium en mg/l sont plus faibles pour toutes les formations. En ce qui concerne le paléocène supérieur, la situation est la même que pour le Ca (fig. 48).

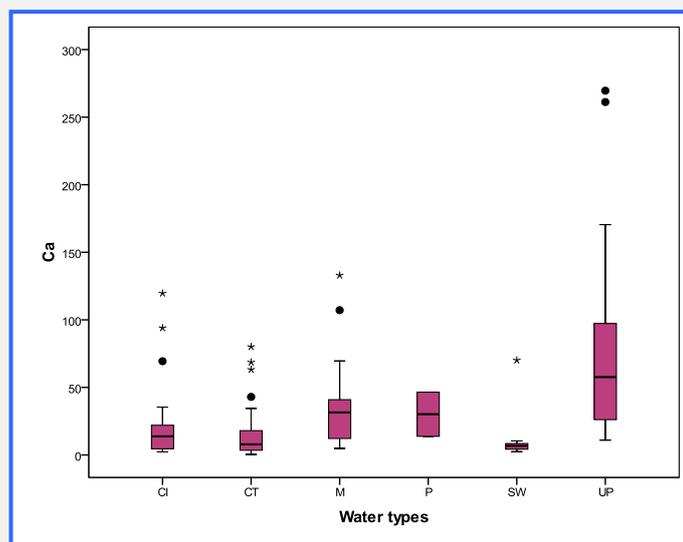


Figure 47 : Variabilité et distribution de la teneur en Ca des échantillons d'eau analysés du bassin du Nigeria

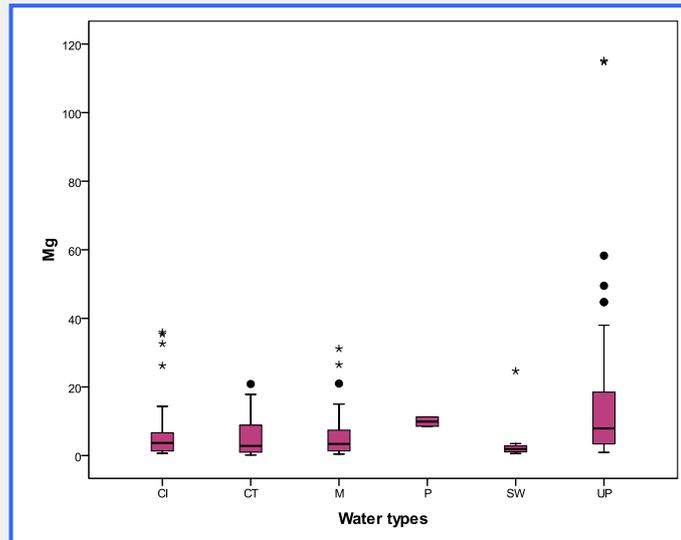


Figure 48 : Variabilité et distribution de la teneur en Mg des échantillons d'eau analysés du bassin du Nigeria

Les teneurs en sodium, généralement homogènes et plus faibles pour la plupart des échantillons d'eau de surface, et les aquifères du CT, du précambrien et du Maastrichtien, varient de 0,24 à 50 mg/l (fig. 49). On observe une plus grande variabilité en ce qui concerne le paléocène supérieur et le CI, où les concentrations de sodium de certains échantillons peuvent dépasser 150 mg/l. Les teneurs en potassium des échantillons d'eau analysés sont très faibles (fig. 50), excepté certaines valeurs extrêmes (>80 mg/l) mesurées pour l'aquifère de CI.

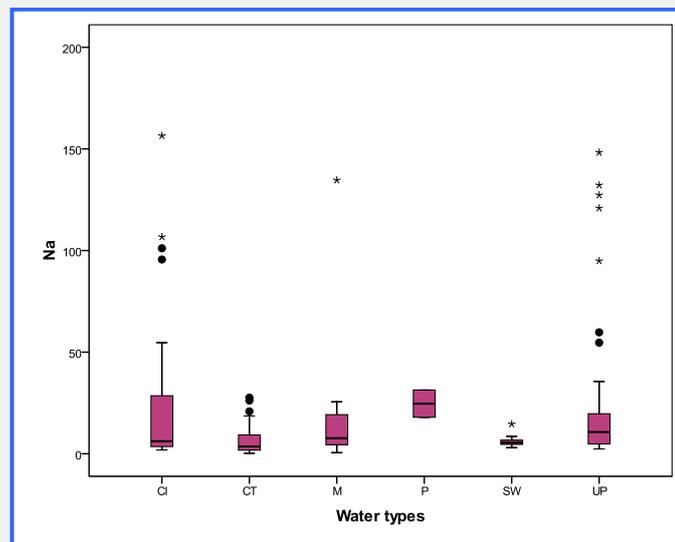


Figure 49 : Variabilité et distribution de la teneur en Na des échantillons d'eau analysés du bassin du Nigeria

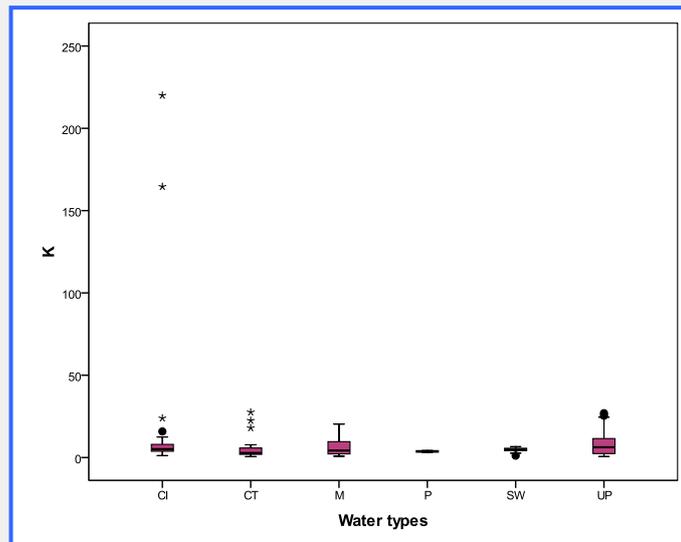


Figure 50 : Variabilité et distribution de la teneur en K des échantillons d'eau analysés du bassin du Nigeria

Les valeurs des autres ions n'augmentent pas, à l'exception de celles des nitrates (>200 mg/l), et une contribution anthropique semble liée à cette teneur en K.

- Anions

Le bicarbonate (fig. 51) est l'anion prépondérant dans le section nigériane du bassin d'Iullemeden. De fait, les teneurs en HCO_3^- les plus élevées ont été observées dans l'aquifère du précambrien alors que les valeurs sont plus homogènes et plus faibles pour les eaux souterraines des aquifères du CI, du CT et du maastrichtien.

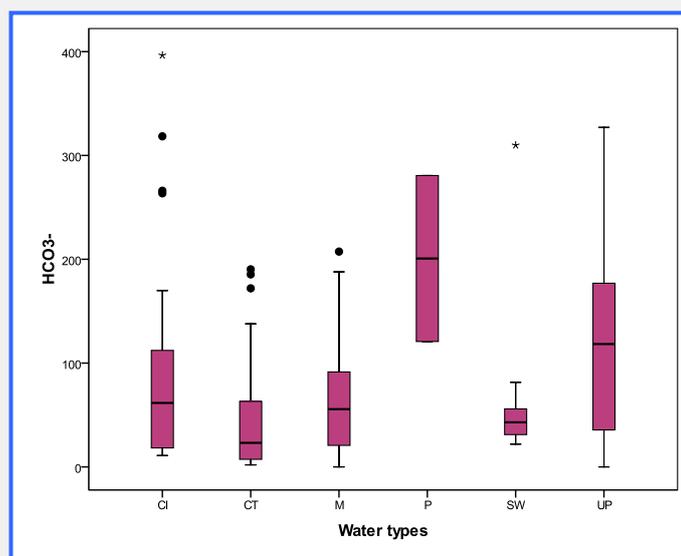


Figure 51 : Variabilité et distribution de la teneur en HCO_3^- des échantillons d'eau analysés du bassin du Nigeria

La distribution des teneurs en chlore est caractérisée par des valeurs homogènes et faibles de niveau naturel pour les eaux souterraines des aquifères du CT, du maastrichtien et du paléocène. Les teneurs en chlore des eaux souterraines des aquifères du paléocène supérieur et du CI sont plus élevées et plus variables, avec certaines valeurs aberrantes qui dépassent 50 mg/l (fig. 52).

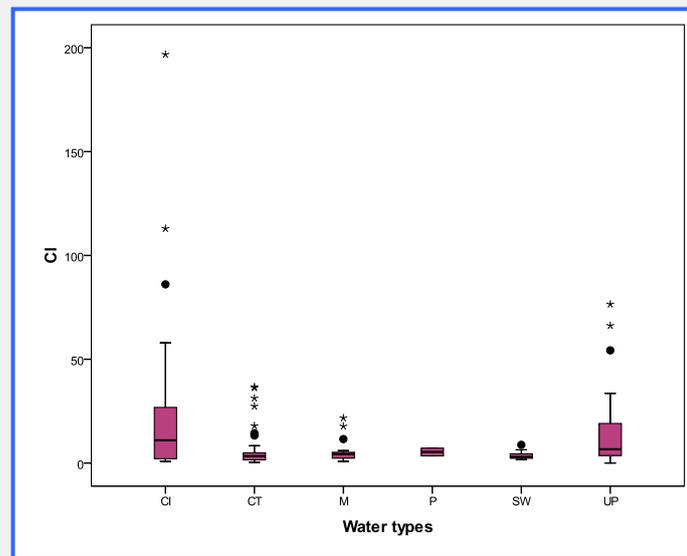


Figure 52 : Variabilité et distribution de la teneur en Cl des échantillons d'eau analysés du bassin du Nigeria

Les niveaux des teneurs en sulfates (fig. 53) sont très bas pour les eaux souterraines et les eaux de surface (< 20 mg/l) des aquifères du CI, du CT et du paléocène. Ils atteignent 1377 mg/l pour l'eau de l'aquifère du paléocène supérieur dans laquelle les anions sont prépondérants. Dans ce cas associé à de fortes concentrations de calcium et de sodium, les apports de sulfates pourraient être liés à la dissolution de minéraux de sulfates. Les teneurs en nitrate des eaux souterraines dans les aquifères étudiés du bassin d'Iullemeden au Nigeria sont généralement faibles ou modérés (< 40 mg/l) (fig. 54). Les concentrations en nitrates ne sont moyennes que pour l'aquifère du CI (57,7 mg/l), et sont supérieures à la limite de l'OMS. Les concentrations locales de nitrates dépassent les niveaux élevés (> 50 mg/l) en de nombreux endroits. Elles pourraient s'expliquer par l'utilisation excessive d'engrais et de fumier animal.

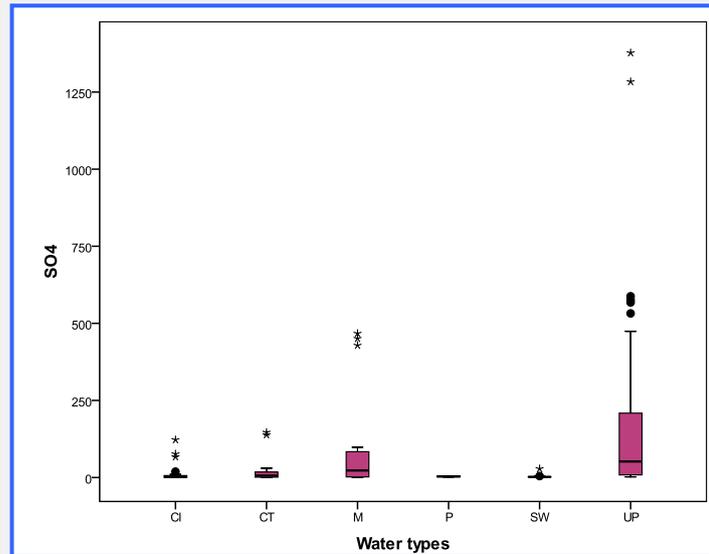


Figure 53 : Variabilité et distribution de la teneur en SO_4 des échantillons d'eau analysés du bassin du Nigeria

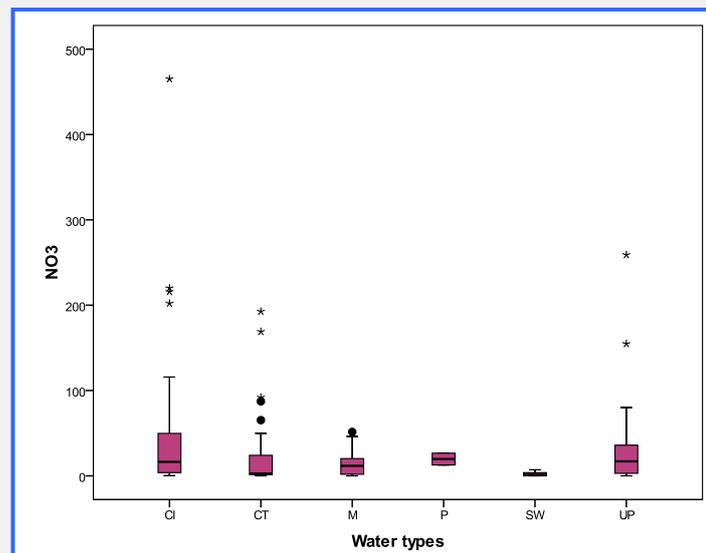


Figure 54 : Variabilité et distribution de la teneur en NO_3 des échantillons d'eau analysés du bassin du Nigeria

- Faciès hydrochimiques

La composition chimique des échantillons analysés est présentée dans les diagrammes de Piper d'équivalence trilineaire de la figure 55. Deux tendances pourraient être dégagées du diagramme des niveaux d'anions : i) une évolution générale du bicarbonate vers le chlore en ce qui concerne les eaux souterraines du CI et ii) du bicarbonate au sulfate pour les points d'échantillonnage du paléocène supérieur.

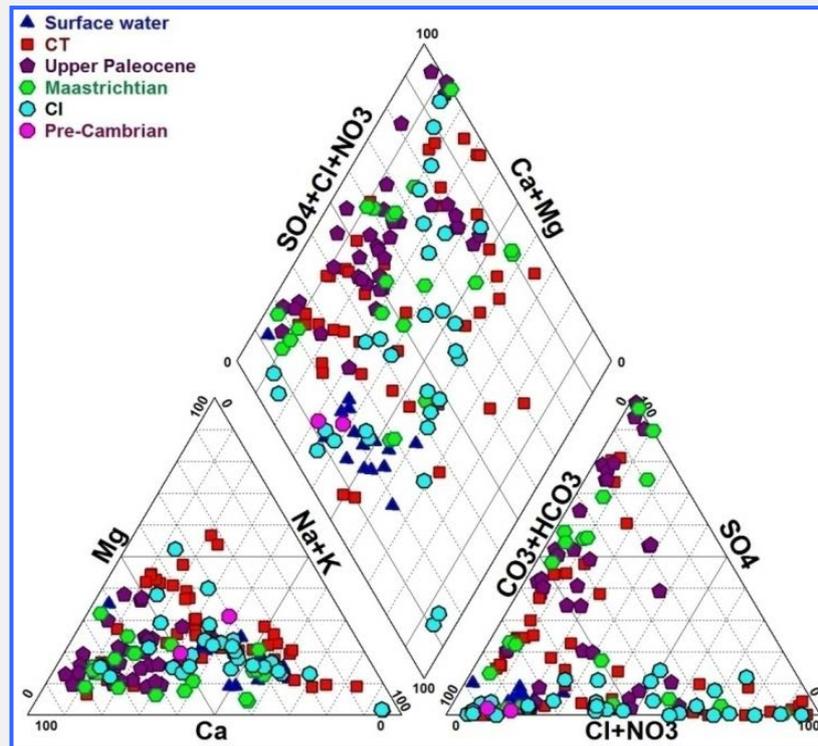


Figure 55 : Distribution de la température des échantillons d'eau analysés du bassin du Nigeria

On pourrait distinguer plusieurs grands types d'eau, à savoir les types :

- Ca-Mg-HCO₃, Na-K-Cl, Ca- Cl - SO₄ et Na-K-HCO₃.

- Origine des principaux ions et processus de minéralisation

Les relations entre les principaux éléments et les valeurs de CE sont examinées dans les figures 56 et 57. Les teneurs en Ca, Na, Mg, K, Cl, HCO₃, SO₄ et NO₃ augmentent systématiquement avec les valeurs de CE. Ces corrélations positives indiquent que ces ions contribuent de manière notable à la salinisation des eaux souterraines.

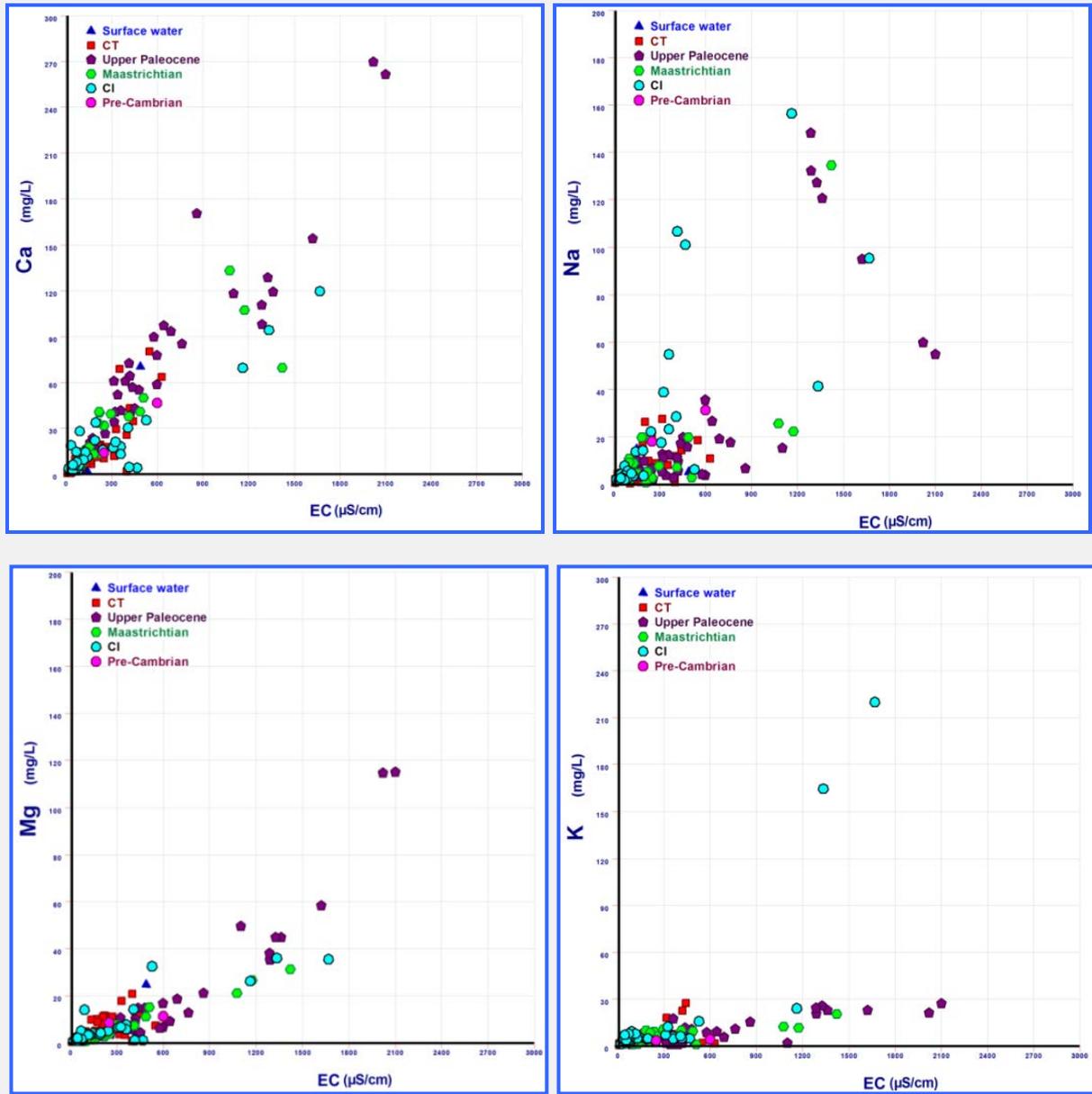


Figure 56 : Relations entre la CE et les principaux éléments (cations)

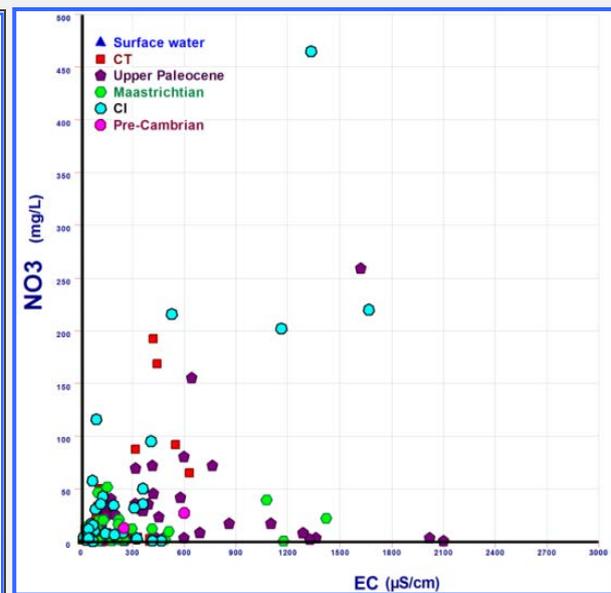
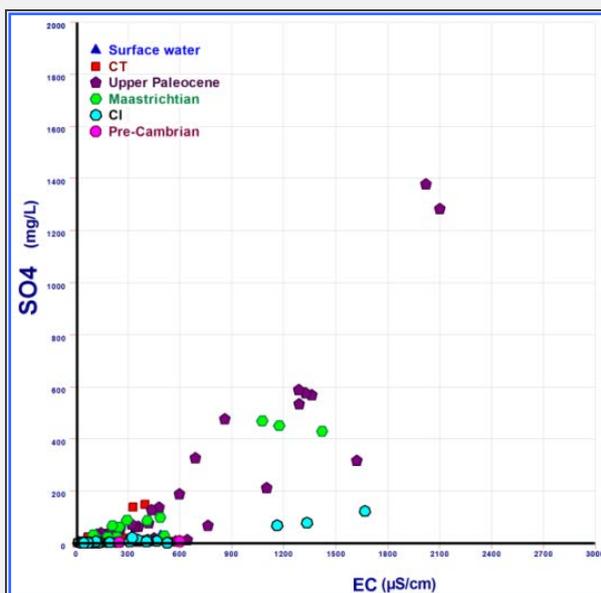
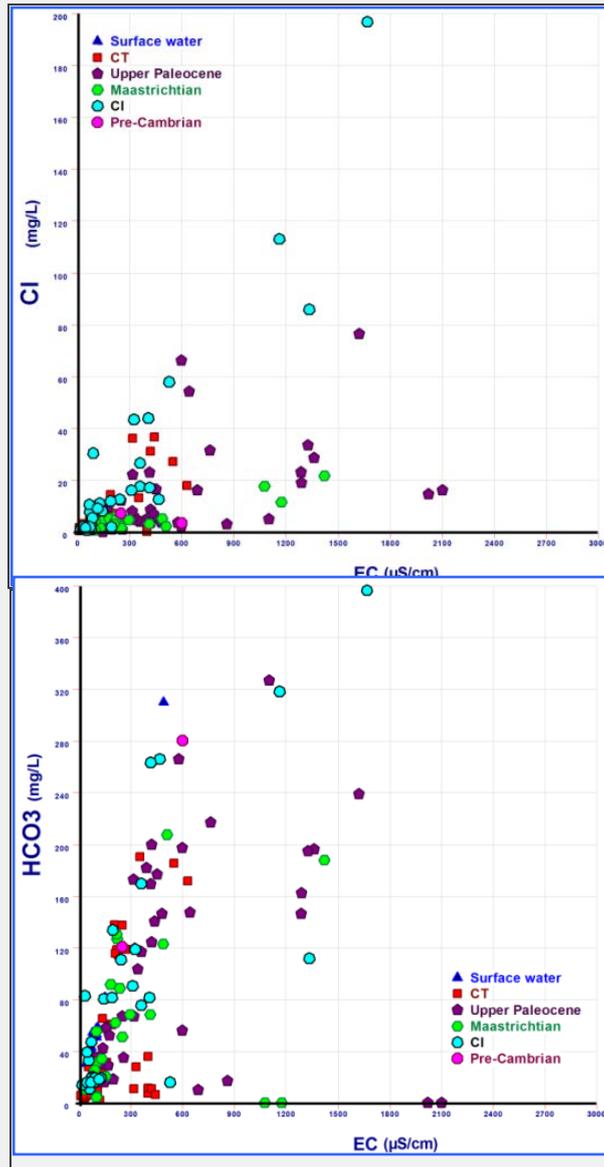
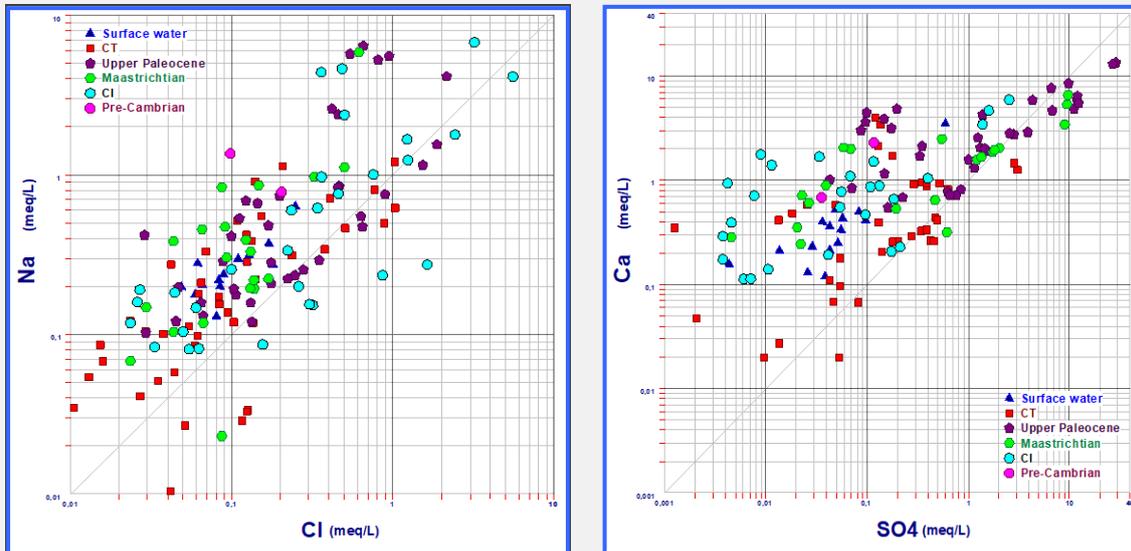


Figure 57 : Relations entre la CE et les principaux éléments (anions)

Pour déterminer l'origine de ces ions et les processus qui contrôlent leurs concentrations, plusieurs diagrammes à deux variables ont été tracés. À la lumière des principales compositions ioniques de l'eau prélevée de façon répétée dans des puits, la chimie des échantillons d'eaux souterraines du bassin d'Iullemeden au Nigeria semble surtout contrôlée par les minéraux dissous dans les roches hôtes

Il ressort de la figure 58 que les points où le rapport molaire Na^+/Cl^- est égal à 1 indiquent un processus de dissolution de halites. L'augmentation de ce rapport au-dessus de 1 dans certains échantillons des aquifères du maastrichtien, du paléocène supérieur et du CI pourraient laisser à penser qu'il y a des réactions de minéraux silicatés. L'excès de Na par rapport à Cl dans les échantillons d'eaux souterraines pourrait être lié à l'échange de cations comme le laisse à penser la relation entre Na et Ca.

Le rapport molaire $\text{Na}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ a une tendance à la hausse le long de l'écoulement des eaux souterraines, ce qui est aussi une indication de la prépondérance de réactions de minéraux silicatés provenant de l'altération de grès dans les formations détritiques.



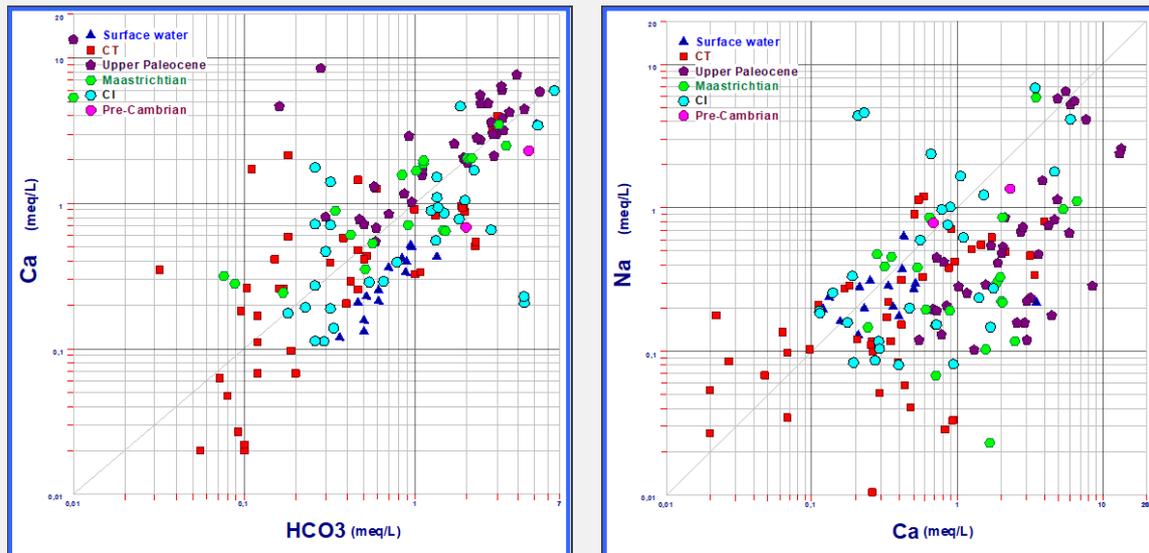


Figure 58 : Relations entre les principaux éléments

La figure 59 montre que la plupart des points représentant les aquifères du paléocène supérieur et du maastrichtien se trouvent sur la droite de dissolution 1-1 du gypse ou juste au-dessus de cette droite. Ce résultat pourrait s'expliquer par les effets conjugués des processus de dissolution et d'évaporation du gypse. Néanmoins, les pertes de SO_4^{2-} sont plus élevées que celles de Ca^{2+} dans les eaux souterraines des aquifères du CI et du CT. On pense que cet excès de Ca^{2+} provient de la dissolution probable de minéraux carbonatés. Comme le confirme la figure 58, les points représentant les eaux souterraines des aquifères du maastrichtien, du paléocène supérieur, du CI et du CT sont soit sur la droite d'équilibre stoechiométrique 1-1, soit juste au-dessus de cette droite. Les points représentant les eaux de tous les autres échantillons sont au-dessus ou au-dessous de cette ligne, ce qui indique qu'il pourrait y avoir une autre source de Ca^{2+} , peut-être l'altération et l'érosion de minéraux de gypse et/ou d'argile.

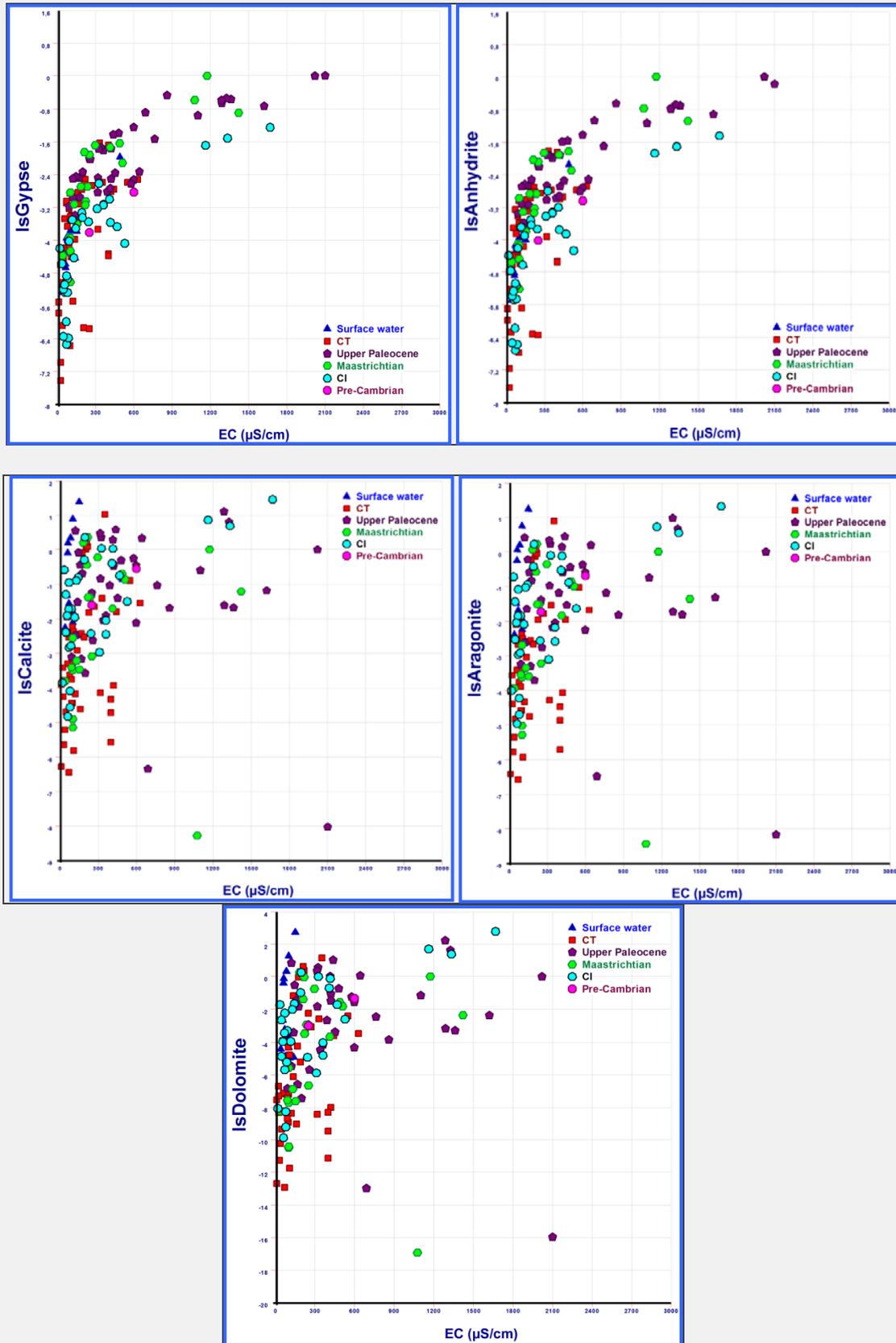


Figure 59 : Relations entre les indices de saturation et la CE

4.2.2. Données isotopiques du bassin du Nigeria

- Composition isotopique des précipitations locales dans le bassin du Nigeria

Bien que les isotopes de l'eau de pluie n'aient pas été analysés pendant le projet RAF/7/011, la base de données de l'AIEA contient certaines données ayant trait à la station de Kano (1961-1973) qui peuvent permettre de déterminer la droite météorique locale (fig. 59) à adopter pour la zone d'étude.

La droite météorique locale est définie pour la première fois dans le présent rapport, sur la base des échantillons de données de précipitations collectées à la station de Kano (Nigeria) (fig. 60). Tant la pente que l'ordonnée $\delta^2\text{H}$ de la droite météorique locale pour Kano ($\delta^2\text{H} = 7,08 \times \delta^{18}\text{O} + 4,38$) s'écartent de celles de la droite météorique mondiale ($\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$).

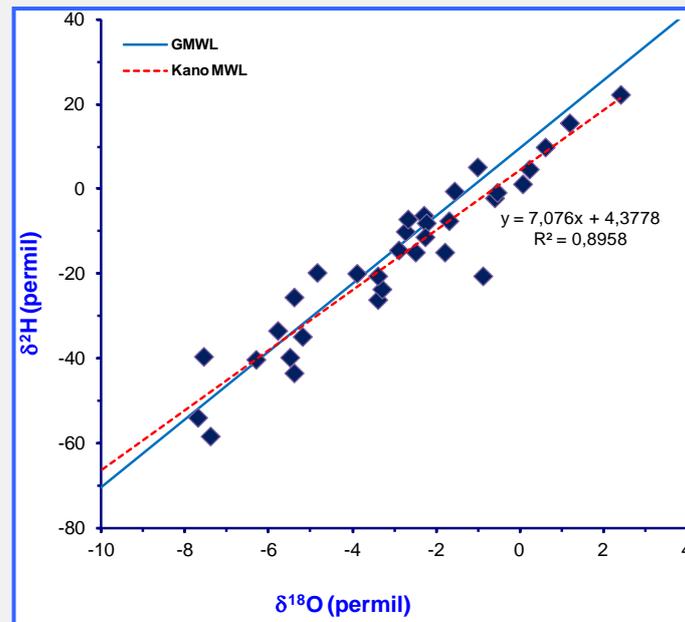


Figure 60 : Comparaison de la droite météorique locale de la station de Kano (en rouge) tracée à partir de données de l'AIEA et de la droite météorique mondiale (en bleu)

Taupin et *al.*, (2000) montrent que les niveaux d'isotopes lourds dans les eaux de pluies au Sahel et ailleurs sont les plus bas au plus fort de la saison, en août (figures 61, 62) (Mbonu et Travi, 1994 ; Taupin et *al.*, 1997). La quantité de pluie tombée au cours d'une tempête peut aussi influencer sur la signature isotopique. L'humidité relative de la colonne d'air est aussi extrêmement importante. Par conséquent, les situations climatiques et météorologiques extrêmes rencontrées dans les régions de moussons tropicales peuvent donner lieu à des signatures isotopiques très différentes pour chaque épisode pluvieux (Goni, 2006) (fig. 63).

Dans le bassin d'Iullemeden, les pluies saisonnières sont contrôlées par le mouvement de la ceinture de pluies tropicale (encore appelée zone de convergence intertropicale, ZCIT) qui oscille entre les zones tropicales nord et sud au cours d'une année, et entraîne des pluies dans les régions sud du Niger lorsqu'elle est dans sa position nord entre juin et octobre, avec un pic en août. La pluviométrie moyenne dans les régions les plus humides (les plus au sud) à ce moment est de 300 mm par mois mais la pluviométrie totale diminue rapidement avec l'augmentation de la latitude. Il ne pleut presque pas pendant les mois secs, entre novembre et mars.

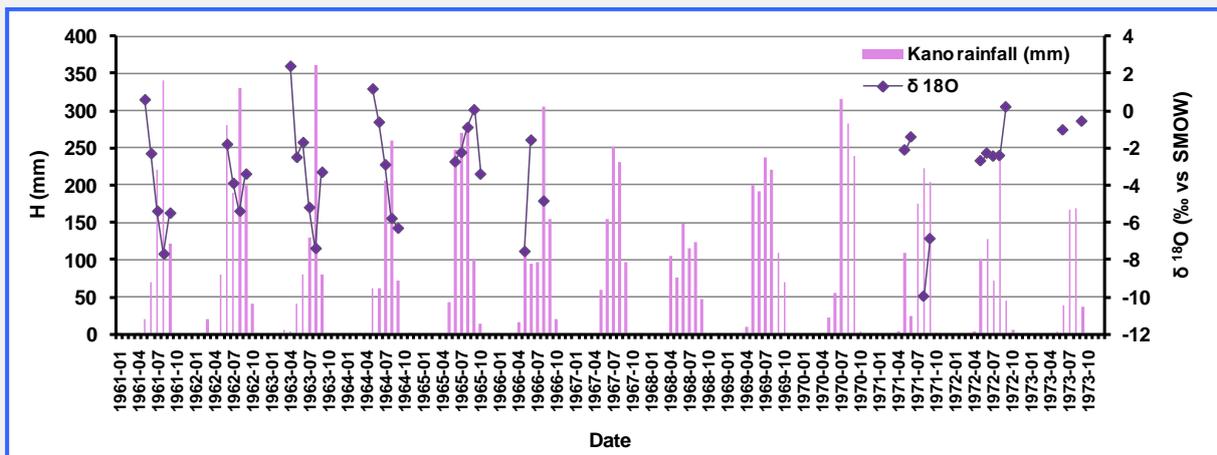


Figure 61 : Données mensuelles d'oxygène 18 et de pluviométrie à la station de Kano (1961-1973)

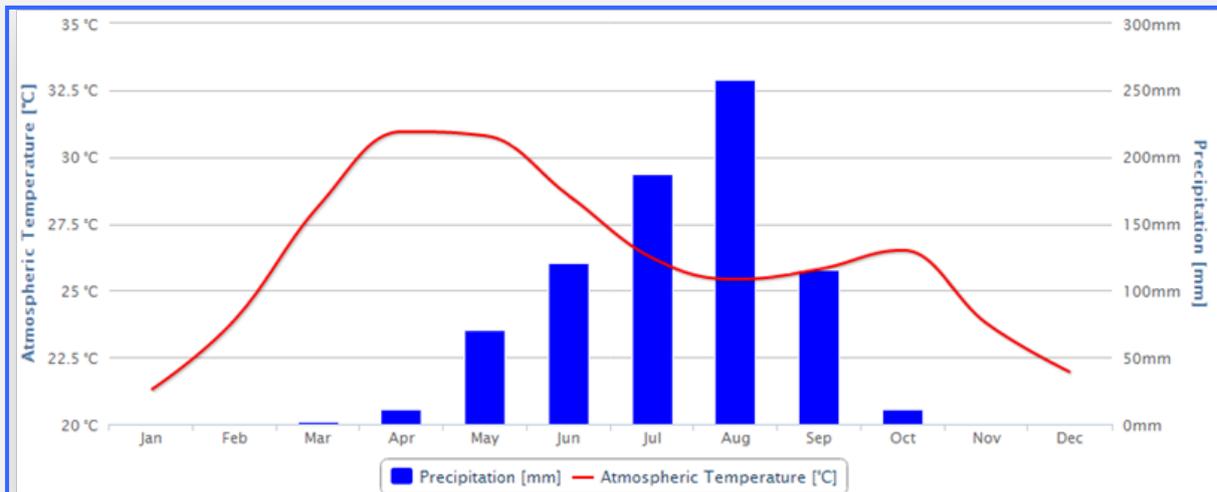


Figure 62 : Diagramme climatique de la station météorologique de Kano (1961-1973)

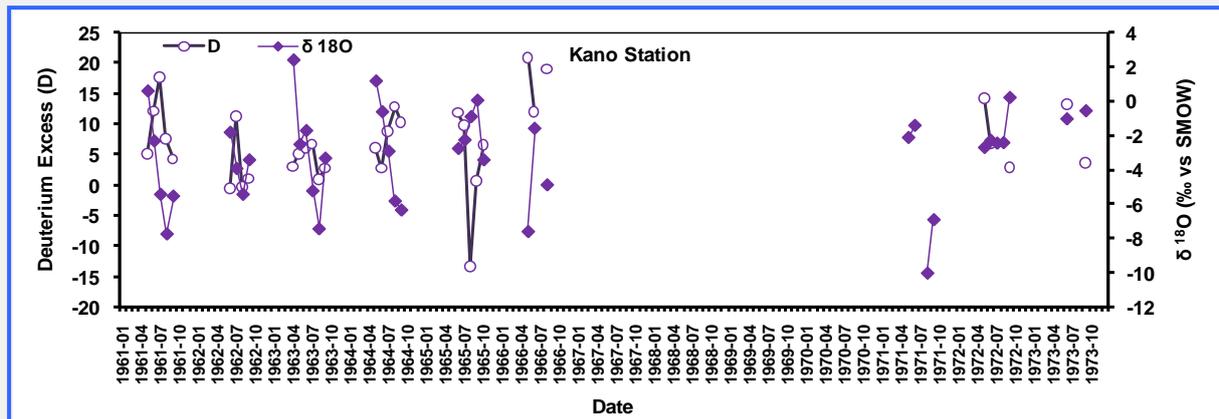


Figure 63 : Données mensuelles de $\delta^{18}\text{O}$ et d'excès de deutérium à la station météorologique de Kano (1961-1973)

Une variation des mouvements latitudinaux de la ZCIT au cours d'une année peut entraîner une grande variabilité de la pluviométrie au cours de la saison humide d'une année à l'autre et occasionner des sécheresses récurrentes. La région septentrionale, désertique du Niger reçoit très peu de pluie tout au long de l'année. Les températures moyennes annuelles, qui s'établissent à 27-30 °C, sont similaires dans presque tout le pays et ne sont sensiblement différentes que dans les régions montagneuses plus fraîches du nord où elles vont de 25 à 27 °C. Toutefois, elles connaissent de fortes variations saisonnières et leurs caractéristiques diffèrent dans diverses parties du pays. Ces variations sont plus marquées dans les régions les plus septentrionales, et les températures estivales et hivernales sont différentes, les chiffres étant de 27 à 35 °C en été (juillet-août-septembre) contre 15 à 25 °C en hiver (janvier-février-mars). Les variations saisonnières sont moins évidentes dans le sud, mais les mois d'été (juillet-août-septembre) sont les plus frais de l'année (23-27 °C) en raison de l'effet rafraîchissant des nuages et de la pluie en cette période de l'année, alors que la saison sèche (avril-mai-juin) est plus chaude (25-30 °C). Le Niger est l'un des pays les plus chauds du monde. Il est traversé par l'équateur thermique, qui relie les points les plus chauds de la planète tout au long de l'année sur la base de la température journalière moyenne. Les quantités de pluies sont négligeables dans la plus grande partie du pays et les sécheresses sont fréquentes. La saison pluvieuse va de fin juin à début décembre dans sa partie la plus méridionale. Les inondations du fleuve Niger sont fréquentes au cours de cette période, et créent le delta intérieur du Niger.

Au Sahel, la pluviométrie est caractérisée par une forte variabilité entre les années et entre les décennies, ce qui peut rendre difficile la détermination des tendances à long terme. Le début

des années 1960 a été une période de pluviométrie particulièrement élevée, alors que celui des années 80 a été très sec, entraînant une sécheresse répandue au Mali et dans d'autres pays sahéliens (Taupin et *al.*, 2002).

- **Composition isotopique des eaux souterraines et des eaux de surface au Nigeria**

Les isotopes stables ^{18}O et ^2H ont été déterminés dans tous les échantillons d'eaux souterraines et d'eaux de surface collectés dans la partie nigériane du bassin dans le cadre du projet RAF/7/011 (fig. 64).

La position des points représentant les échantillons d'eau analysés sur le diagramme de la relation entre les teneurs en ^{18}O et ^2H (figure 64) montre que les compositions isotopiques varient, ce qui pourrait être lié aux effets de plusieurs processus comme l'évaporation, les conditions paléoclimatiques et la recharge effective. On peut faire plusieurs observations en ce qui concerne les isotopes stables des aquifères étudiés par rapport à la pluviométrie actuelle.

- Les points comprenant les aquifères du CI, du CT, du Maastrichtien et du paléocène supérieur dont les eaux ont des teneurs inférieures à la teneur moyenne pondérée des eaux de pluie locales indiquent probablement que les eaux souterraines ont été rechargées dans des conditions climatiques plus fraîches que celles prévalant aujourd'hui dans la région (très faibles teneurs en tritium, ~ 0 UT, fig. 65).

- Il y a des points correspondant à un mélange d'eau contenant des isotopes stables dont les signaux sont intermédiaires entre ceux des eaux de pluie de l'époque actuelle et ceux de l'eau fossile. Cela explique que le diagramme de certaines données se situe entre ceux de l'eau pauvre et de l'eau relativement riche en isotopes stables, respectivement interprétées comme étant de l'eau fossile et de l'eau de recharge de l'époque actuelle (fig. 64).

- Les points pour lesquels les teneurs en isotopes de l'eau prélevée dans les cours d'eau et les réservoirs d'eau sont élevées indiquent l'existence d'un processus d'évaporation dans des plans d'eau ouverts (teneurs en tritium $> 2,5$ UT ; fig. 65).

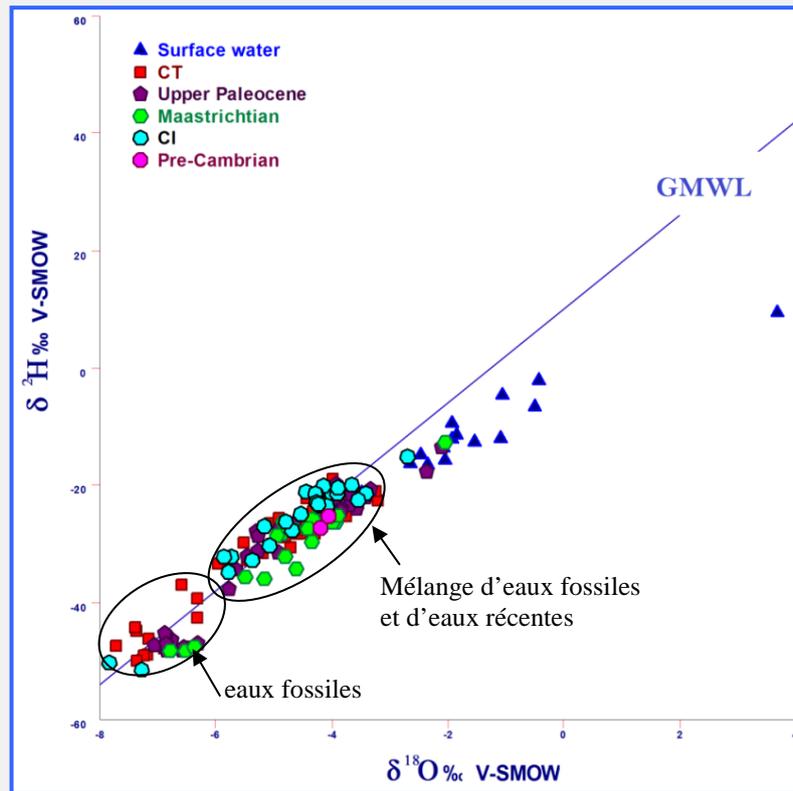


Figure 64 : Relation entre les teneurs en ^2H et en ^{18}O des échantillons d'eau du bassin du Nigeria

- Tritium

Les données relatives au tritium sont disponibles pour tous les échantillons prélevés. Les teneurs en tritium des eaux de surface varient de 2,1 à 5,6 UT et celles des eaux souterraines de 0 à 6,7 UT. En ce qui concerne les échantillons provenant de l'aquifère du précambrien, la variation est faible et les teneurs en tritium élevées de l'ordre de 2 UT sont en harmonie avec une importante recharge actuelle dans la partie émergente de l'aquifère.

En comparaison avec cet aquifère, et toutes les formations aquifères du CI et du CT, les teneurs en tritium pour le paléocène supérieur sont plus variables, ce qui indique la présence d'eaux souterraines âgées et récentes dans le bassin (figures 65, 66).

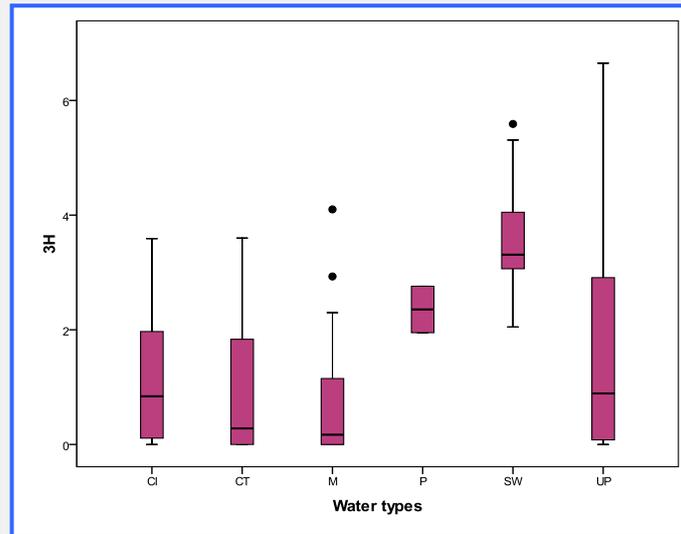


Figure 65 : Variabilité et distribution de la teneur en ^3H des échantillons d'eau analysés du bassin du Nigeria

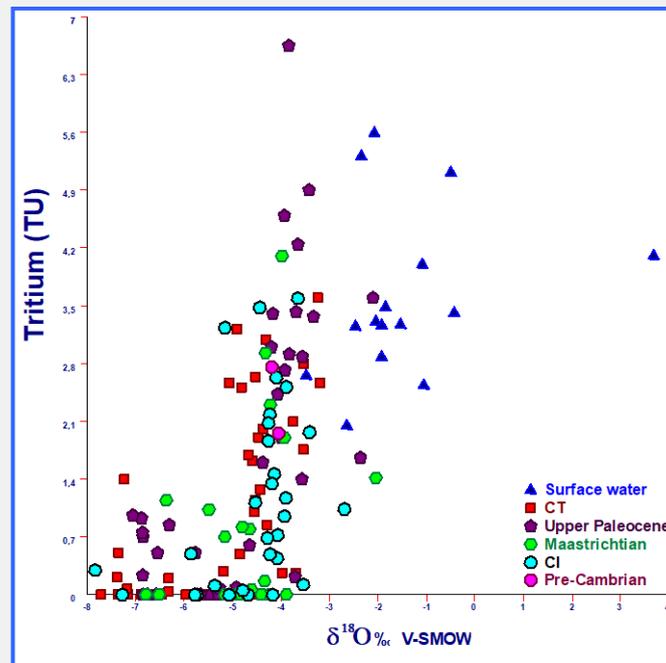


Figure 66 : Diagramme de ^{18}O en fonction de ^3H dans les échantillons d'eaux du bassin du Nigeria

4.3. Données géochimiques du bassin de Kandi (Bénin)

4.3.1. Étude hydrochimique du bassin de Kandi (Bénin)

Le bassin de Kandi, qui fait partie du bassin sédimentaire transfrontières d'Iullemeden, est situé dans la zone semi-aride où les eaux souterraines sont généralement la principale source d'approvisionnement en eau des populations. Il est limité au nord par le fleuve Niger, au sud par le socle rocheux, à l'ouest par la faille régionale de Kandi et à l'est par la république

du Nigeria. Il couvre une superficie d'environ 8700 km², soit 7 % du territoire du Bénin. Ses flancs ouest et sud sont des socles rocheux. Un total de 165 échantillons ont été collectés dans ce bassin dans le cadre du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA (fig. 67).

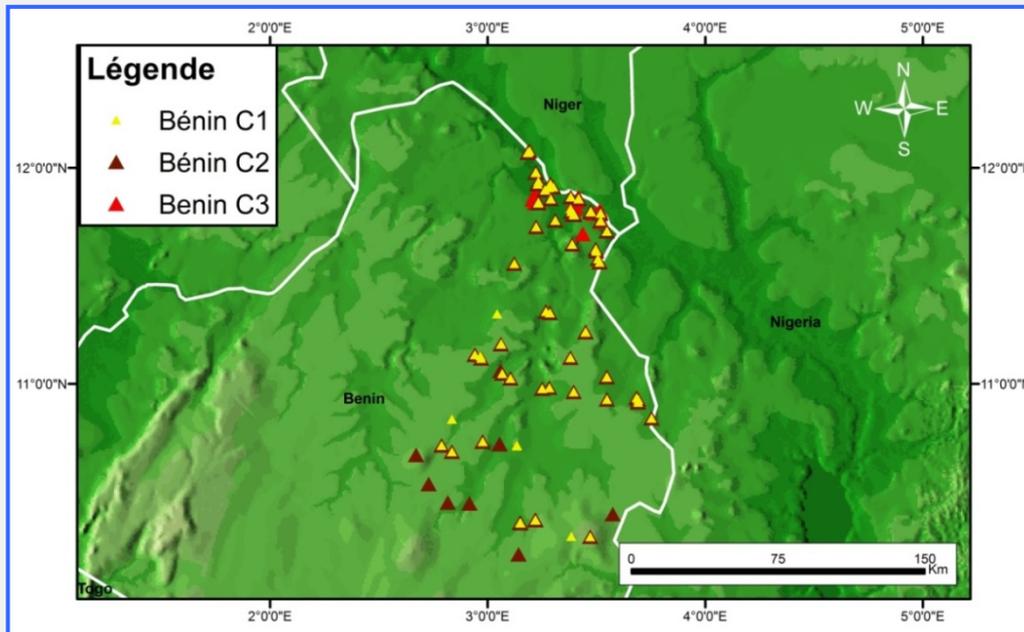


Figure 67 : Localisation des points d'échantillonnage dans le bassin d'Iullemeden (Kandi - Bénin).

- Conductivité électrique

La conductivité électrique (CE) varie de 12 à 1929 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (fig. 68). La CE des eaux souterraines dépend des formations géologiques. Les valeurs les plus élevées ont été observées pour l'aquifère du quaternaire (en moyenne de 296 $\mu\text{S}/\text{cm}$), qui présente une grande variabilité, et les plus faibles pour celui de l'ordovicien/silurien, qui est plus homogène (moyenne de 208 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

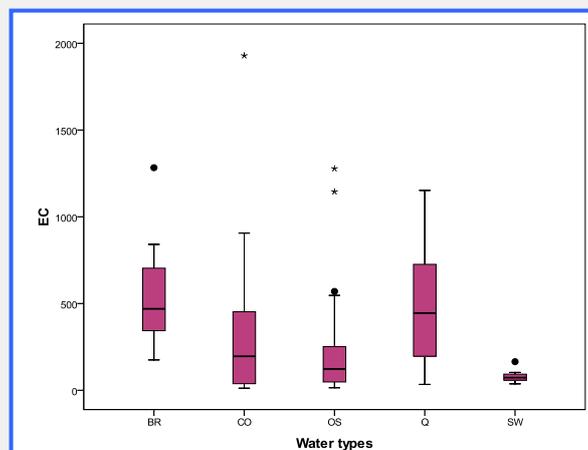


Figure 68 : Comparaison des valeurs de CE des échantillons d'eau du bassin de Kandi.

- Température

La température varie de 23,1 à 34,4 °C. Celles des eaux souterraines sont moins variables que celles des eaux de surface, ce qui dénote des fluctuations de la température atmosphérique dans cette zone (fig. 69). Pour les eaux souterraines comme pour les eaux de surface, les valeurs sont plus faibles dans la partie sud du bassin que dans sa partie nord, dans le voisinage du fleuve Niger (Kpegli et al., 2015). Cela indique que la température des eaux souterraines dépend de celle de l'air à la surface dans l'ensemble du bassin étant donné que le gradient de température augmente du sud au nord du bassin (LeBarbé et al., 1993).

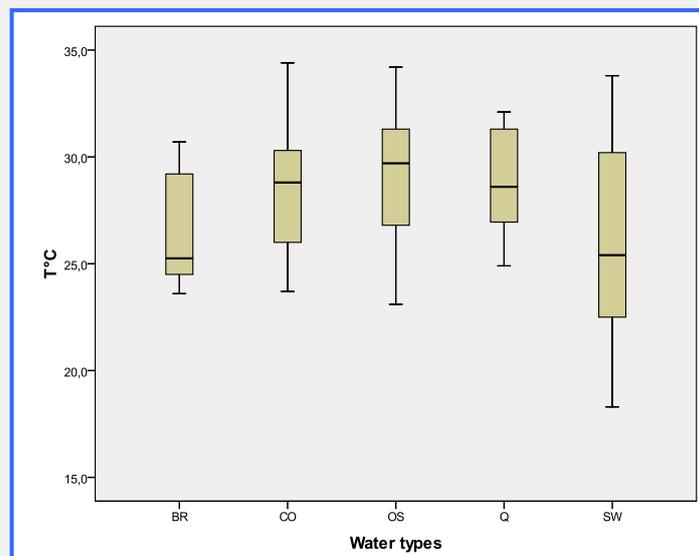


Figure 69 : Distribution de la température des échantillons d'eau du bassin de Kandi.

- pH

Les valeurs de pH varient de 4,5 à 8,1 (fig. 70). Celles des eaux de surface peuvent être divisées en trois groupes : le premier est celui des valeurs allant de 5,7 à 6,1 caractérisant la rivière Sota ; le deuxième est celui des valeurs de 6,9 à 7,3 et où les valeurs faibles caractérisent le fleuve Niger ; et le pH 7,8 qui caractérise l'Alibori. La variabilité élevée du pH des échantillons d'eaux souterraines (de 4,5 à 7,9) dénote les effets combinés de différents facteurs : interaction entre eaux de surface et eaux souterraines, profondeur des eaux souterraines, temps de séjour dans le système d'écoulement, recharge.

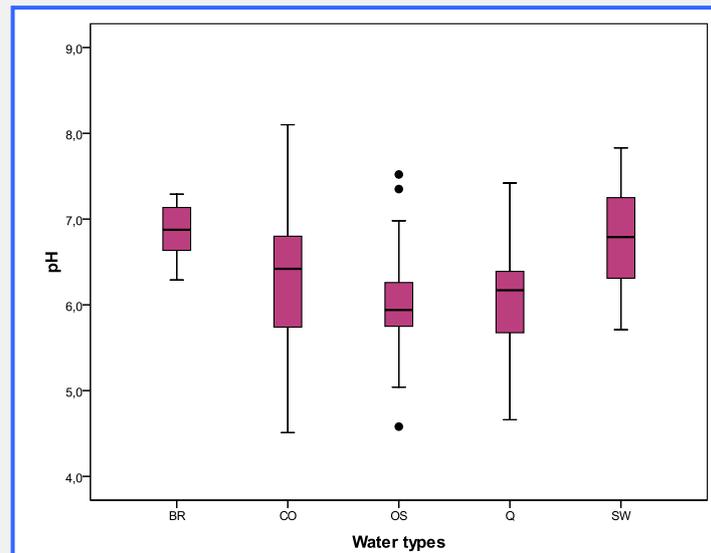


Figure 70 : Distribution du pH des échantillons d'eau du bassin de Kandi.

- MDT

Les valeurs de matières dissoutes totales (MDT) sont distribuées de manière hétérogène et varient de 10,8 à 2160 mg/l. Cela indique que le bassin est très hétérogène et que les valeurs de MDT sont influencées par différents processus géochimiques. Toutefois, celles de l'aquifère de l'ordovicien terminal/silurien sont relativement faibles (< 400 mg/l). Les valeurs les plus élevées sont celles des aquifères du cambro-ordovicien, du quaternaire et du socle rocheux sous-jacent du bassin (fig. 71). Qu'elles soient faibles ou élevées, les valeurs de MDT sont indépendantes de la position géographique.

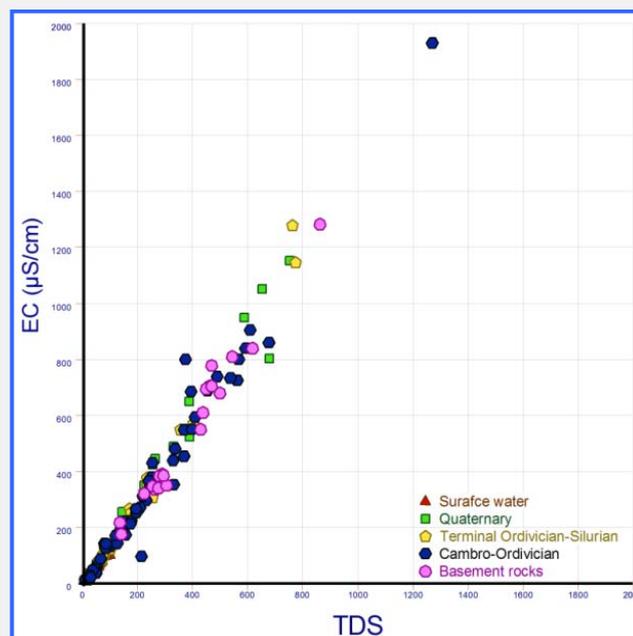


Figure 71 : Diagramme de la CE en fonction des MDT dans les échantillons d'eau du bassin de Kandi

- Cations

Il ressort clairement des figures 72, 73, 74 et 75 que les concentrations en cations des eaux de surface sont faibles, ce qui est en harmonie avec les valeurs de MDT. Les teneurs en calcium et en magnésium sont plus faibles dans les formations du cambro-ordovicien et de l'ordovicien/silurien. Les niveaux sont élevés, avec une forte variabilité, en ce qui concerne les eaux souterraines des aquifères du quaternaire et du socle rocheux (figures 72, 73).

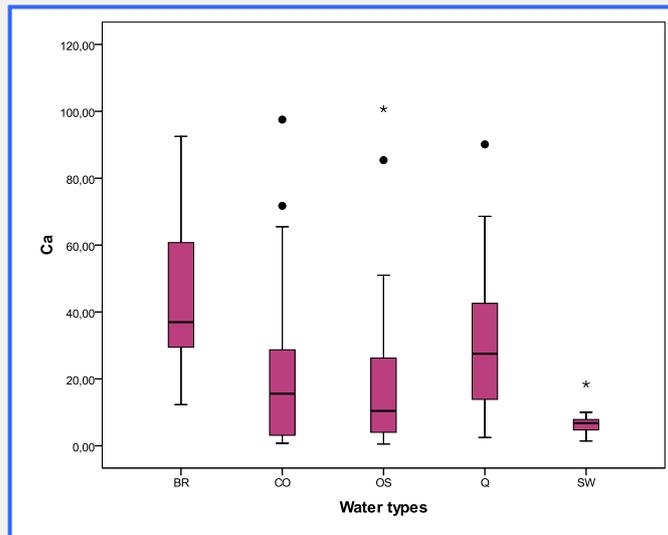


Figure 72 : Variabilité et distribution de la teneur en Ca des échantillons d'eau dans le bassin de Kandi

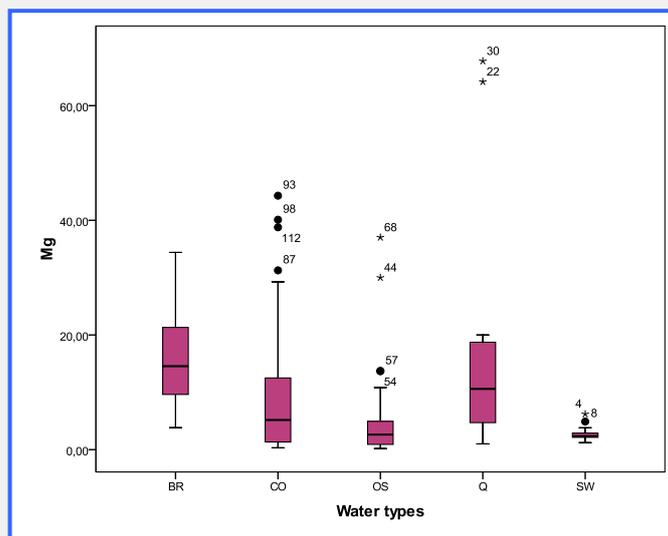


Figure 73 : Variabilité et distribution de la teneur en Mg des échantillons d'eau dans le bassin de Kandi

Les teneurs en sodium et en potassium sont généralement plus faibles, avec une plus grande variabilité, pour les aquifères du cambro-ordovicien et de l'ordovicien/silurien, et élevées pour l'aquifère du quaternaire peu profond et celui du socle rocheux (figures 74, 75).

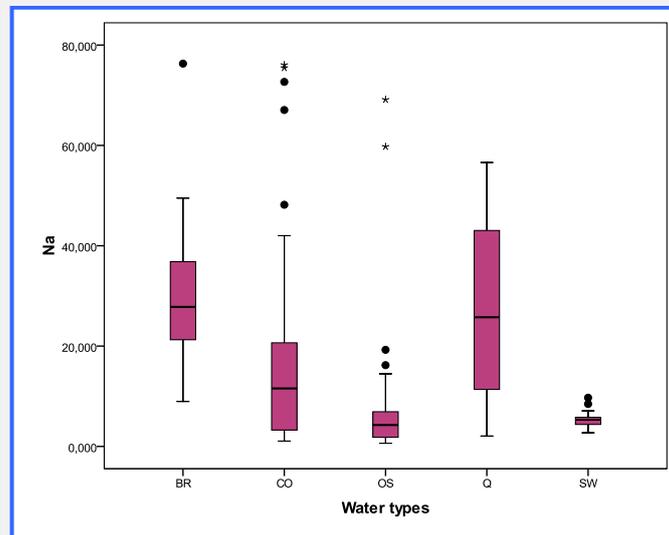


Figure 74 : Variabilité et distribution de la teneur en Na des échantillons d'eau dans le bassin de Kandi

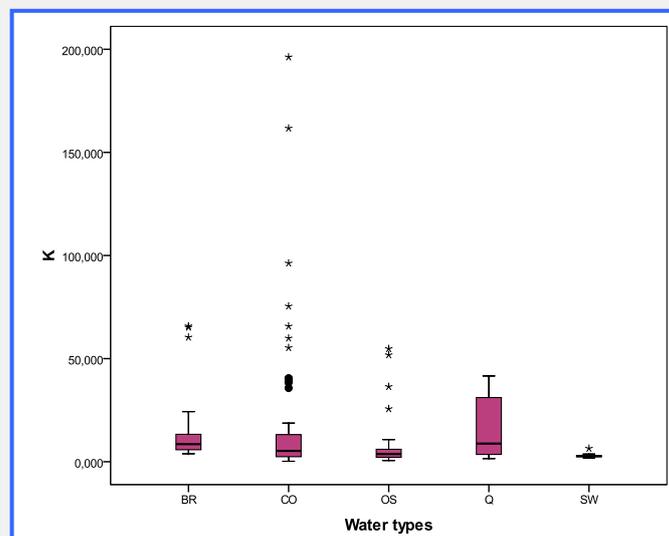


Figure 75 : Variabilité et distribution de la teneur en K des échantillons d'eau dans le bassin de Kandi

- Anions

Les teneurs en anions des eaux des cours d'eau de surface sont généralement très faibles (figures 76, 77, 78, 79). Les teneurs en bicarbonate vont de 4 à 396,5 mg/l (fig. 76). Les valeurs les plus faibles sont celles des eaux souterraines de l'aquifère ordovicien/silurien, ce

qui est en harmonie avec les faibles valeurs de CE. Celles des eaux des aquifères du cambrio-ordovicien et du socle rocheux sont plus élevées. Au vu des données géologiques ayant trait à ces deux formations aquifères de la zone d'étude, il semble évident que les limons et les dolomites pourraient contribuer à la minéralisation de l'eau.

Les teneurs en chlore (fig. 77) sont faibles (< 20 mg/l) en tant que niveau naturel, comme le montrent celles des eaux souterraines de l'aquifère ordovicien/silurien. En ce qui concerne les aquifères du socle rocheux et du quaternaire, presque toutes les valeurs sont plus élevées (30-210 mg/l).

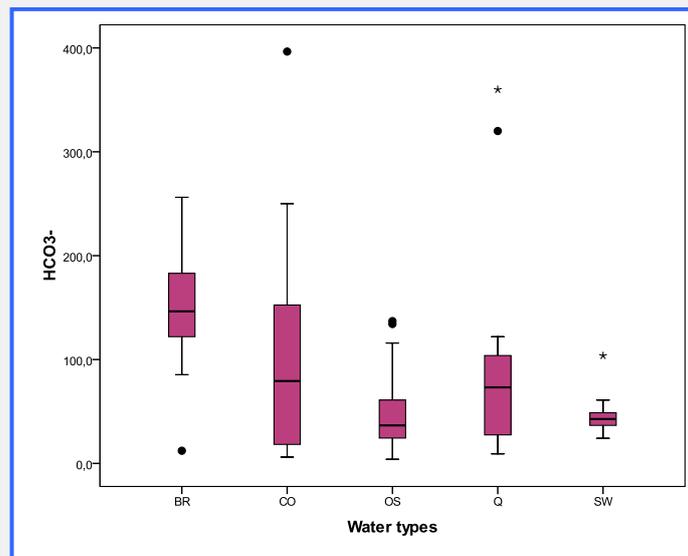


Figure 76 : Variabilité et distribution de la teneur en HCO₃ des échantillons d'eau dans le bassin de Kandi.

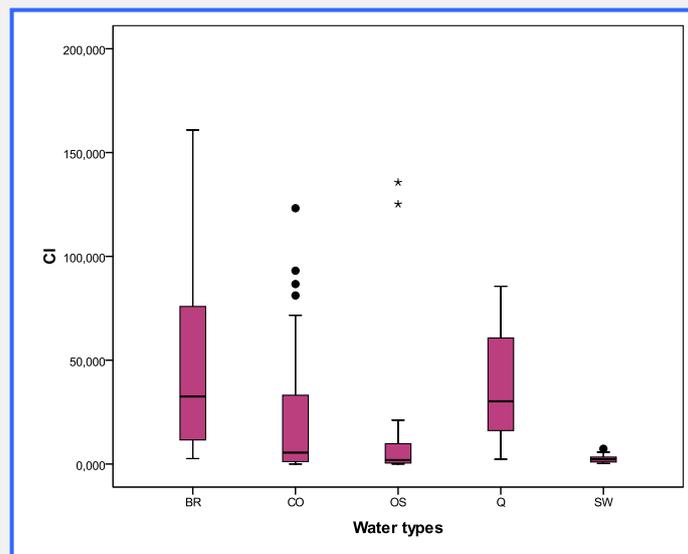


Figure 77 : Variabilité et distribution de la teneur en Cl des échantillons d'eau dans le bassin de Kandi.

Les eaux souterraines de l'aquifère du quaternaire ont des teneurs en sulfate élevées (fig. 78) et les valeurs de CE les plus élevées, alors que celles de la formation de l'ordovicien/silurien sont faibles (< 20 mg/l). La teneur en sulfate atteint 43,3 mg/l dans les formations peu profondes de l'aquifère du quaternaire, ce qui pourrait être associé aux fortes teneurs en sodium et en calcium. Cela pourrait être lié localement aux minéraux évaporatiques (gypse, thénardite ou glauberite).

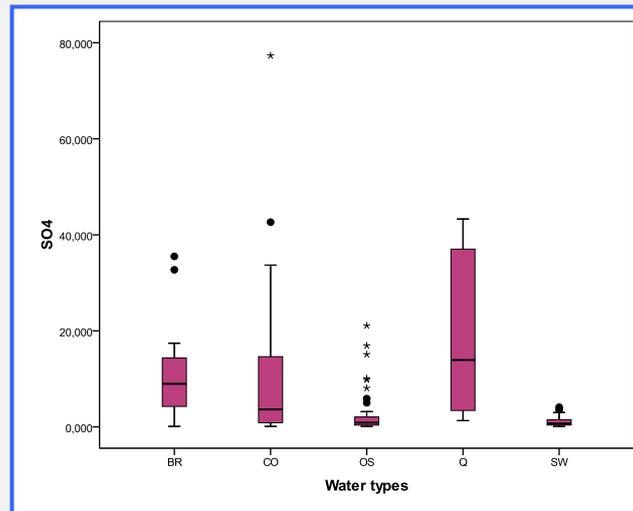


Figure 78 : Variabilité et distribution de la teneur en SO₄ des échantillons d'eau dans le bassin de Kandi.

- Nitrates

Les teneurs en nitrates des eaux souterraines du bassin de Kandi varient de 0 à 765 mg/l. Celles de certains échantillons sont élevées et dépassent 50 mg/l (limite maximum recommandée par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) pour l'eau de boisson). Ces fortes teneurs ont été observées à des profondeurs de 1,4 à 76 m. Les concentrations extrêmes ont été observées à moins de 20 m de profondeur. Ces données pourraient être liées à la présence d'une végétation spécifique, comme les acacias, et de termites, ou à des effets anthropiques comme ceux d'activités agricoles extensives, de la fumure (figures 79, 80). L'influence potentielle des engrais s'observe dans les régions agricoles où sont utilisées de grandes quantités d'engrais azotés sous forme d'urée (N), de NPK (engrais riches en N, P, K) et d'engrais organiques. L'utilisation excessive d'engrais pourrait se traduire par de fortes concentrations de nitrates dans les terres agricoles.

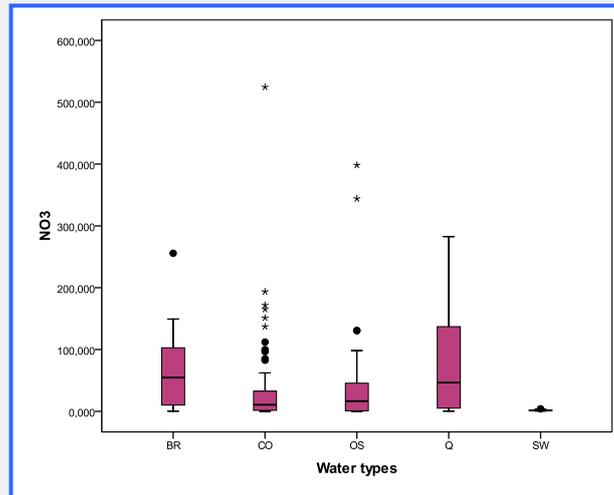


Figure 79 : Variabilité et distribution de la teneur en NO_3 des échantillons d'eau dans le bassin de Kandi.

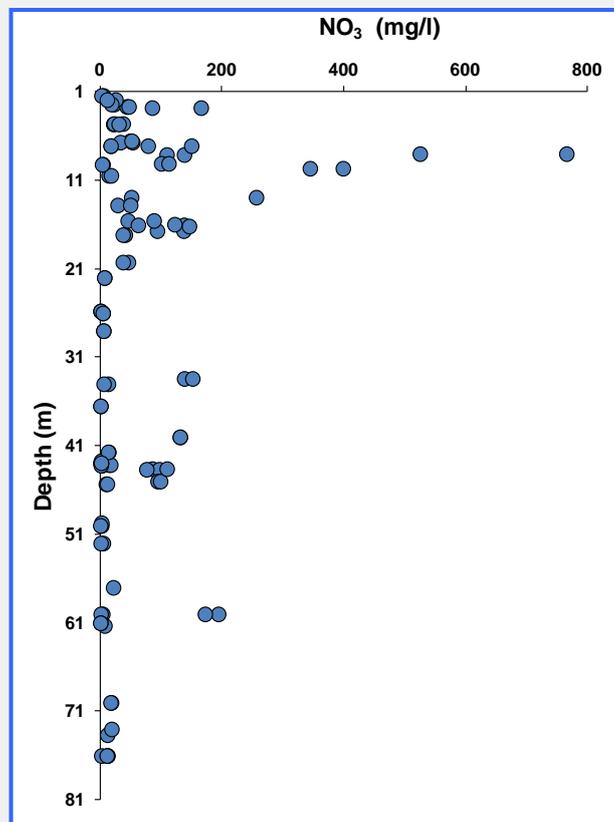


Figure 80 : Distribution des teneurs en nitrates en fonction de la profondeur dans les eaux souterraines dans le bassin de Kandi

- Faciès hydrochimiques

La composition chimique des échantillons d'eau analysés est présentée dans les diagrammes de Piper d'équivalence trilineaire de la figure 81. La teneur en nitrate a été prise en compte pour tracer ce diagramme en raison de l'abondance relative de cet élément dans certains échantillons d'eau.

La figure 81 montre que les eaux du bassin de Kandi sont caractérisées par de faibles proportions d'ions sulfate mais qu'il y a une gradation claire de HCO_3 à Cl-NO_3 . En ce qui concerne les eaux de surface, tous les échantillons sont du type d'eau Ca-HCO_3 excepté l'échantillon BK60 qui est du type Mg-HCO_3 (fig. 82). S'agissant des eaux souterraines du bassin, les types d'eau sont hétérogènes. Quatre types ont été clairement déterminés (fig. 81) : les eaux de type $\text{HCO}_3\text{-Na}$ qui sont essentiellement des eaux souterraines de l'aquifère du cambro-ordovicien, celles de type Cl-Na qui proviennent de trois aquifères, celles de type $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ qui sont essentiellement des eaux des aquifères de l'ordovicien terminal/silurien, et celles de type Cl-Ca qui proviennent des trois aquifères. Les types des autres échantillons d'eaux souterraines de tous les aquifères sont caractérisés par une mixité ionique. Cela indique que la géochimie des eaux souterraines de ce bassin est déterminée par divers facteurs.

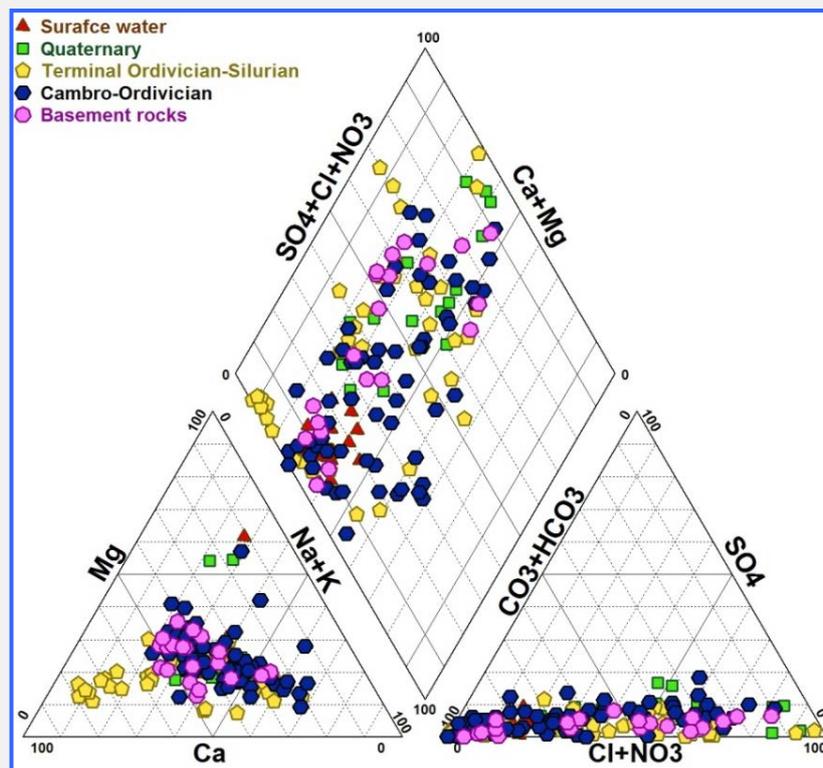


Figure 81 : Diagramme de Piper des échantillons d'eau du bassin de Kandi

- Origine des principaux ions et processus de minéralisation

Les relations entre les principaux éléments et les valeurs de matières dissoutes totales (MDT) ont été étudiées pour mettre en lumière les différents mécanismes contribuant à la minéralisation de l'eau dans le bassin de Kandi (figures 82, 83). Les teneurs en Ca, Na, Mg, K, Cl, HCO_3 , SO_4 et NO_3 augmentent systématiquement avec les concentrations en MDT. Ces

corrélations positives indiquent que ces ions contribuent de manière notable à la minéralisation des eaux souterraines.

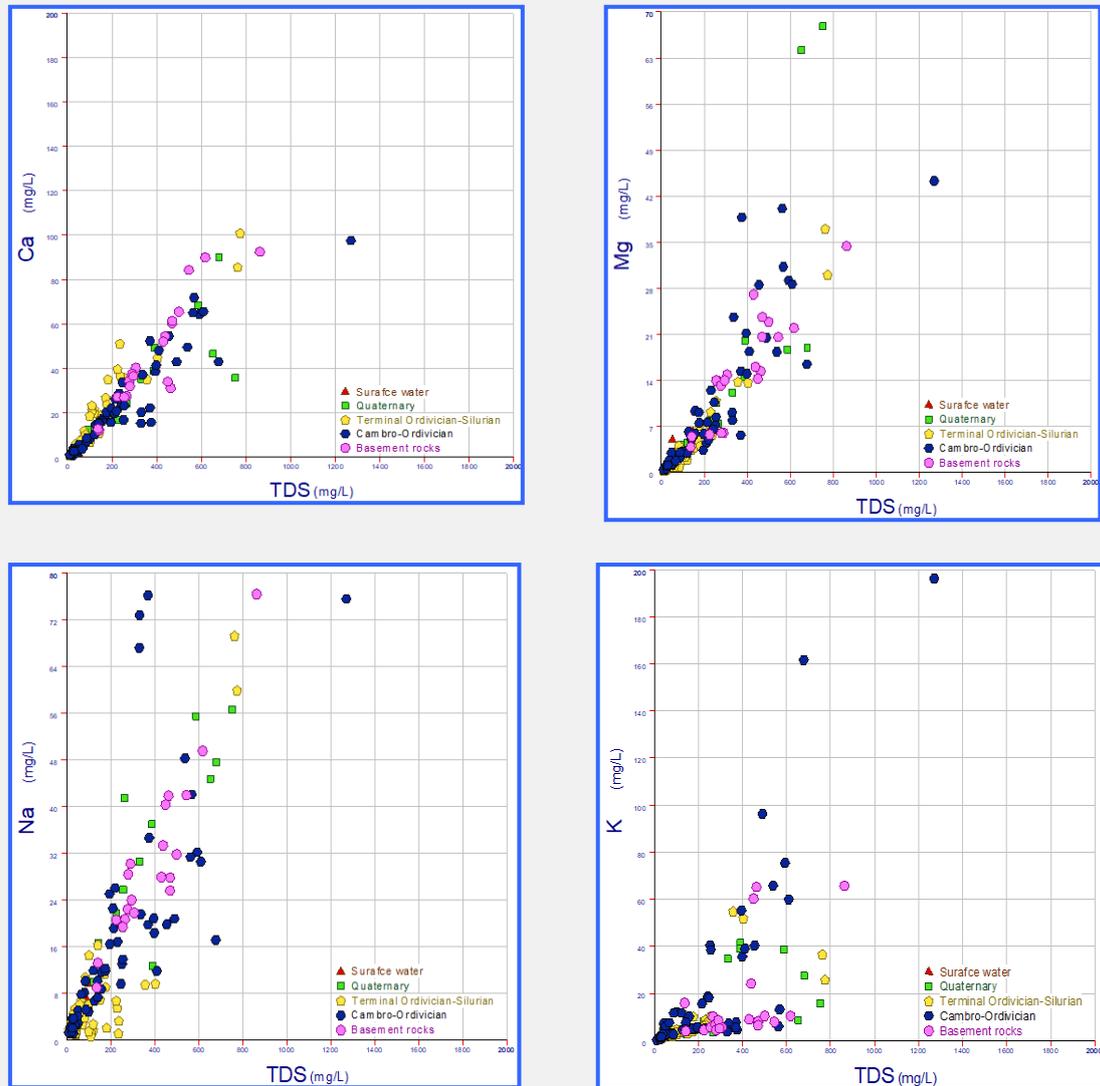


Figure 82 : Relations entre les valeurs de MDT et les principaux éléments (cations)

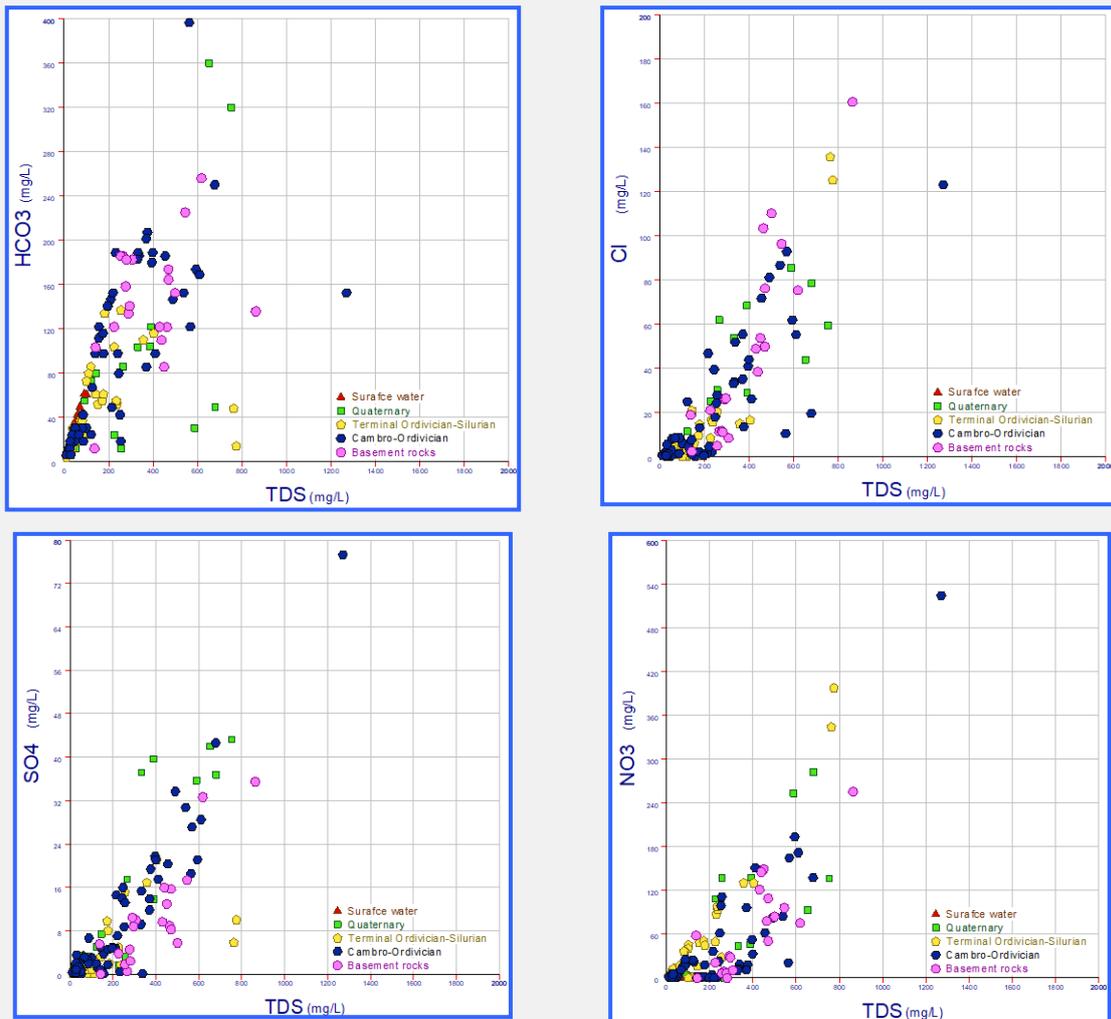


Figure 83 : Relations entre les valeurs de MDT et les principaux éléments (anions)

On a tracé plusieurs diagrammes à deux variables en vue de déterminer l'origine des ions concernés et les processus qui contrôlent leurs concentrations. Ces diagrammes ont été tracés en tenant compte des minéraux les plus abondants (calcite et aragonite : CaCO_3 , dolomite : $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, magnésite : (MgCO_3) et évaporites (halite : NaCl , gypse : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, anhydrite : CaSO_4 , mirabilite : Na_2SO_4), généralement présents dans les dépôts sédimentaires. Toutefois, la dissolution de gypse, d'anhydrite et de mirabilite devrait être exclue dans le cas du bassin d'Iullemeden au Bénin compte tenu des valeurs négligeables d'ions sulfates.

Le diagramme des teneurs en Ca en fonction des teneurs en HCO_3^- (fig. 84) montre que celles de certains échantillons d'eaux souterraines, essentiellement des aquifères du quaternaire et du terminal ordovicien/silurien, sont parfaitement regroupées le long de la droite de dissolution du calcite ou de l'aragonite. Cela indique que la dissolution de ces deux minéraux contribue partiellement à la présence de ces ions dans les eaux de ces aquifères (fig. 84). Cette

dissolution est confirmée par la relation proportionnelle parabolique observée dans les diagrammes de l'indice de saturation en fonction de Ca et HCO_3 en ce qui concerne les minéraux en question (fig. 85).

Toutefois, le fait que d'autres points s'écartent de la droite 1:1 indique que d'autres sources contribuent à la présence de Ca et d' HCO_3 dans le bassin.

La relation entre Na et Cl (fig. 84) montre qu'il y a un processus d'enrichissement parallèle en ce qui concerne ces deux ions pour l'aquifère du quaternaire et que ces points sont regroupés le long de la droite de dissolution de l'halite pour cet aquifère. La présence d'ions sodium et chlorure dans les eaux de l'aquifère du quaternaire pourrait être liée à la dissolution de l'halite (fig. 85). La contribution du chlore à la minéralisation est faible, comparée à celle des nitrates établie dans le diagramme de Piper. Une bonne partie du chlore provient donc d'apports anthropiques sous forme de pollution par les nitrates.

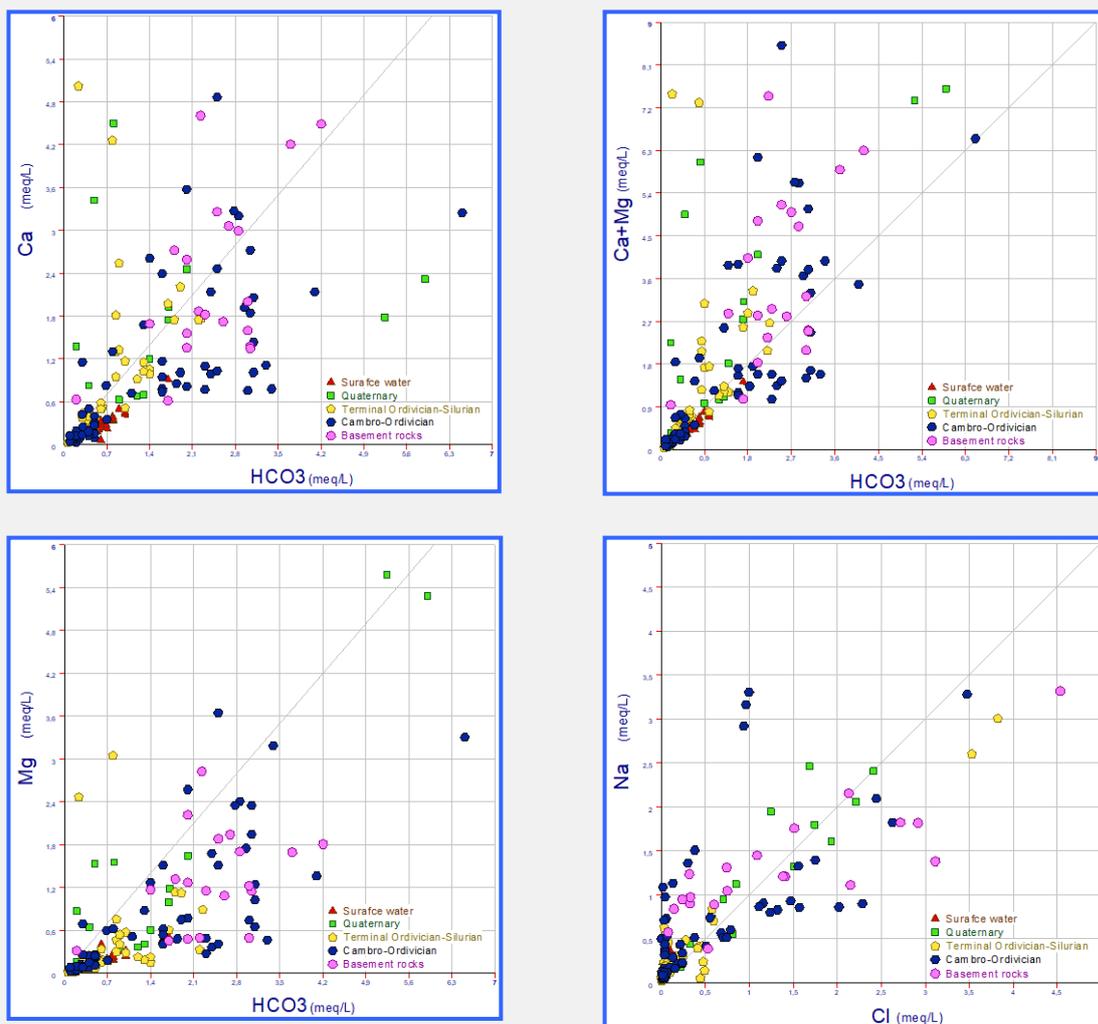


Figure 84 : Relations entre les principaux éléments de l'eau du bassin de Kandi

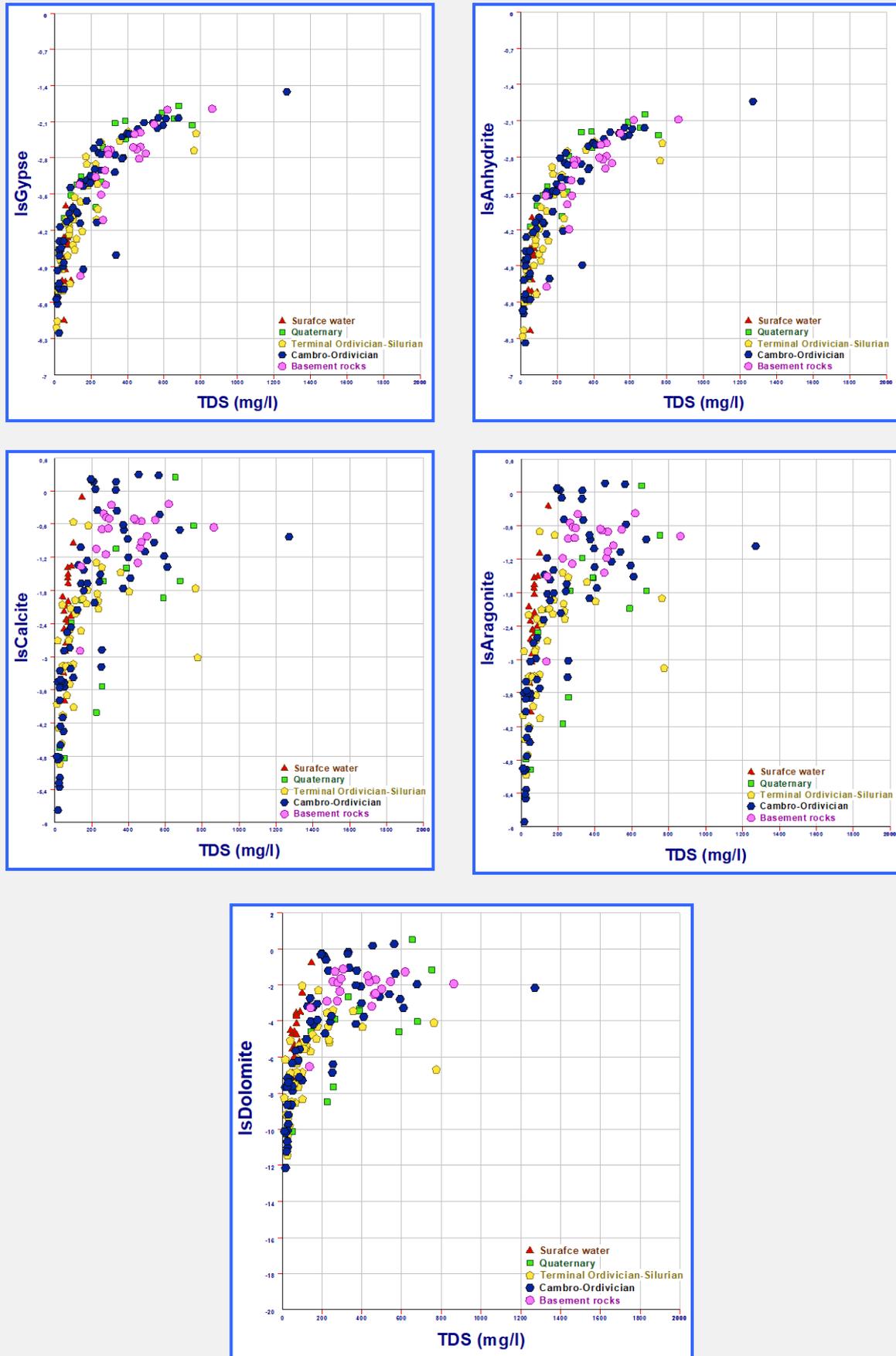


Figure 85 : Relations entre les indices de saturation et les valeurs de MDT dans les eaux du bassin de Kandi

4.3.2. Étude isotopique du bassin de Kandi (Bénin)

- **Composition isotopique des eaux de surface et des eaux souterraines**

Les isotopes stables ont été analysés dans tous les échantillons d'eaux souterraines et d'eaux de surface du bassin de Kandi. La fourchette des valeurs pour tous les aquifères de Kandi va de -6,5 à -0,9 ‰ pour l'oxygène 18 et de -43,4 ‰ à -10,3‰ pour le deutérium (figures 86, 87). La variabilité des teneurs des échantillons analysés est faible, ce qui reflète l'homogénéité de leur composition isotopique, à l'exception de certaines valeurs aberrantes de teneurs en isotopes faibles ou élevées.

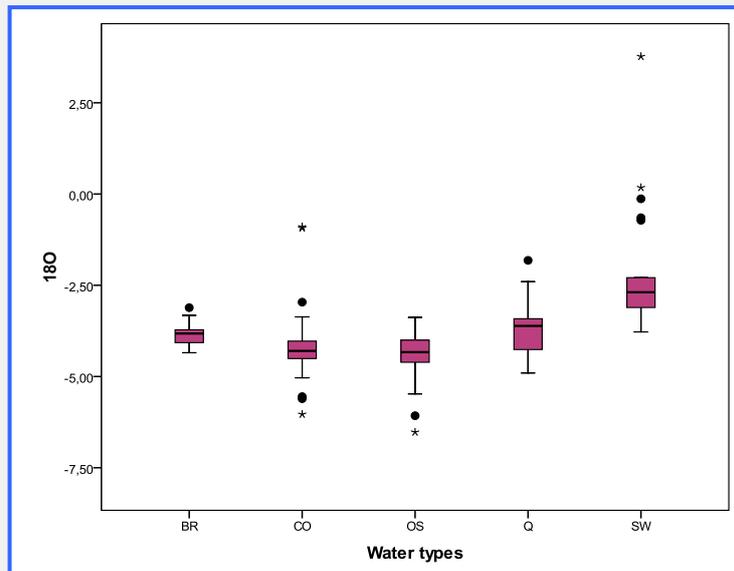


Figure 86 : Variabilité et distribution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des échantillons d'eau dans le bassin de Kandi.

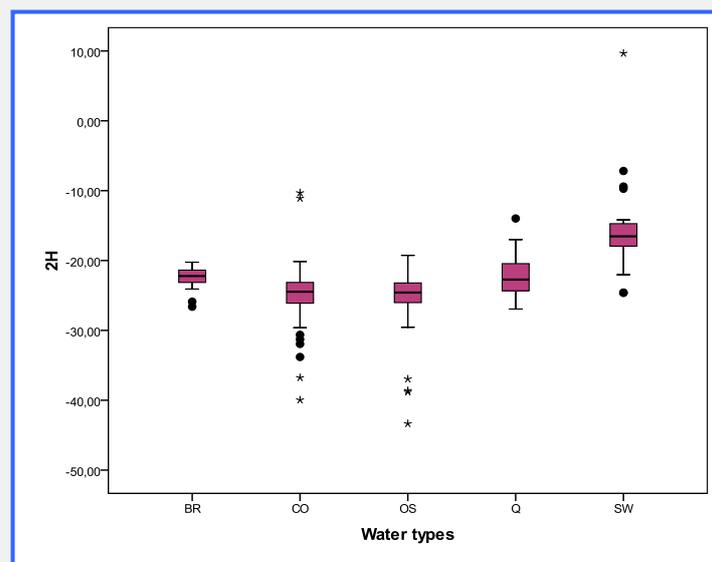


Figure 87 : Variabilité et distribution des valeurs de $\delta^2\text{H}$ des échantillons d'eau dans le bassin de Kandi.

Il ressort des figures 88 et 89 que les eaux de surface sont plus riches en isotopes stables. Les valeurs élevées sont un indice de l'effet de l'évaporation, dans la mesure où les points ayant trait à ces eaux sont regroupés le long de la droite d'évaporation.

On observe de grandes variations en ce qui concerne les eaux souterraines du bassin. En ce qui concerne la plupart de celles de l'aquifère cambro-orodovicien et du terminal ordovicien/silurien, les points sont regroupés autour de la droite météorique mondiale déterminée par Craig (1961). Cela indique que ces eaux proviennent de l'infiltration d'eaux de pluie actuelles. En outre, le fait que ces deux aquifères soient caractérisés par la même bande de signature d' ^2H et d' ^{18}O est un indice d'échange d'eau (mélange) entre eux dans certaines régions. Toutefois, le seul échantillon de l'aquifère du cambrio-ordovicien très riche en isotopes stables se retrouve au-dessous de la droite d'évaporation (fig. 88), ce qui montre que cet échantillon est le résultat de la recharge directe de cet aquifère par l'Alibori dans cette région. Ce point d'échantillonnage est situé au nord-ouest du bassin de Kandi, à proximité de l'Alibori, là où les microfailles existantes facilitent cette recharge directe.

Il ressort de la figure 88 que les points représentant l'aquifère du quaternaire sont regroupés le long de la droite d'évaporation. Cela signifie que les eaux de surface contribuent à la recharge de cet aquifère, lequel dépend de l'évaporation. Les points représentant cet aquifère ont des signatures similaires à celles de l'aquifère terminal ordovicien/silurien dans certaines régions. Cela révèle l'existence d'un phénomène de mélange entre ces deux aquifères dans ces régions (Madékali, Ganrou et Malanville). Les eaux souterraines du socle rocheux environnant contribuent à la recharge des aquifères du cambro-ordovisien et du terminal ordovicien/silurien dans le bassin, comme le laisse à penser la carte potentiométrique.

La qualité des eaux souterraines aux points d'eau voisins des zones de peuplement suscite des inquiétudes en raison de la contamination due aux activités humaines comme cela a été démontré dans le village de Dogué. Les teneurs en nitrates à de nombreux endroits atteignent déjà les niveaux d'alerte ($> 50 \text{ mg/l}$) (fig. 89).

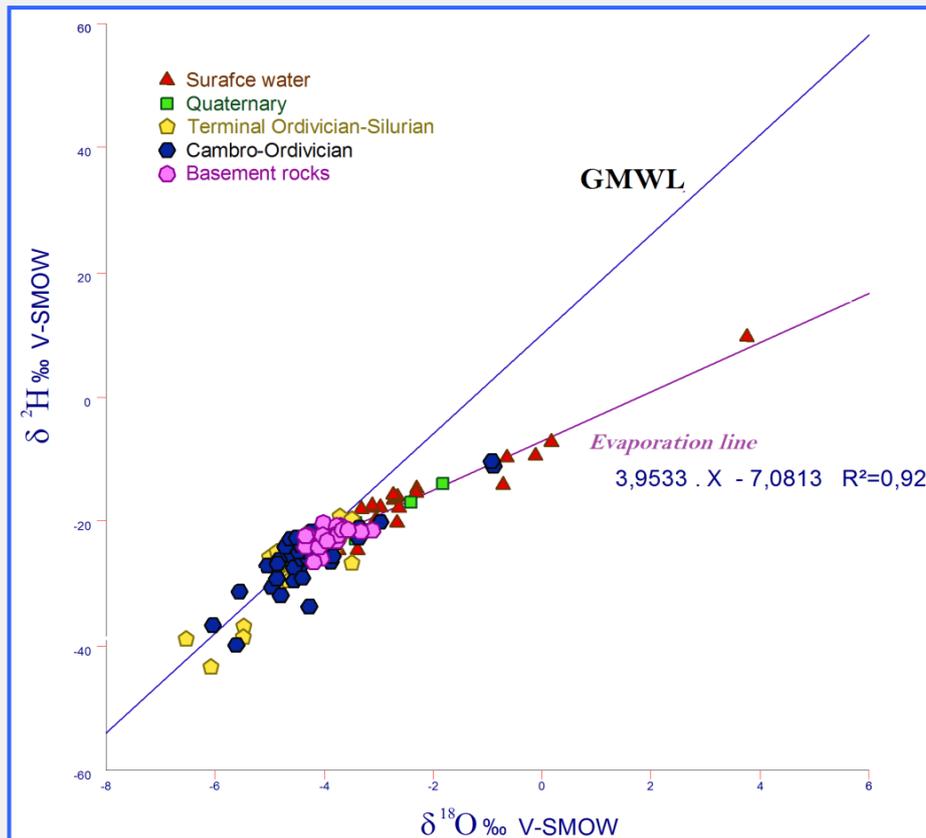


Figure 88 : Diagramme de la teneur en ^2H en fonction de la teneur en ^{18}O des échantillons d'eau du bassin de Kandi

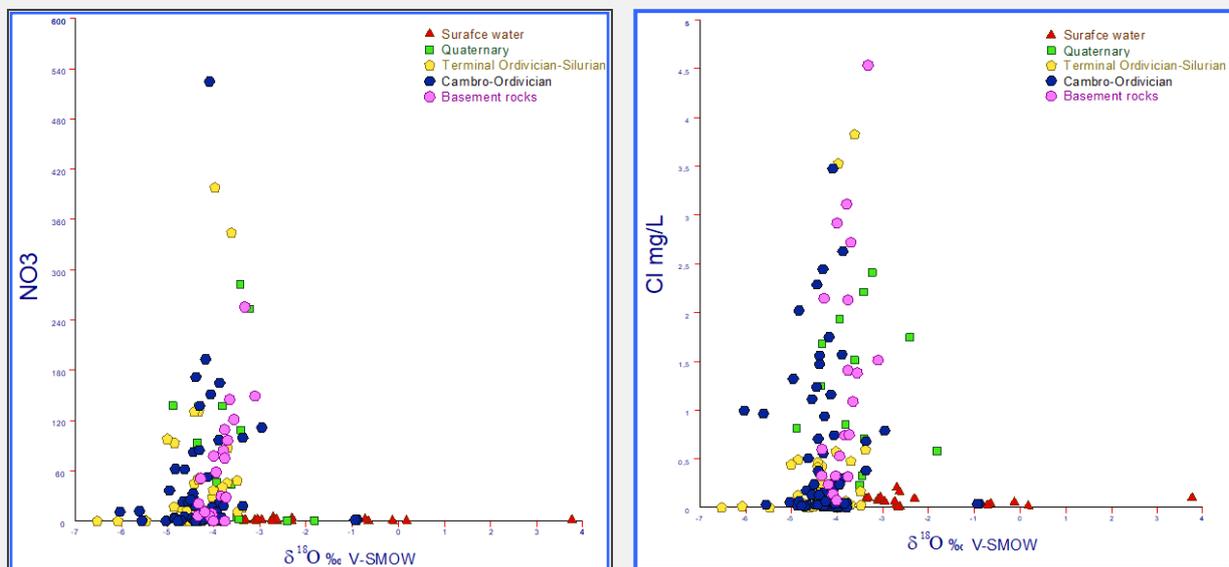


Figure 89 : Diagramme de la teneur en chlore et en nitrate en fonction de la teneur en ^{18}O des échantillons d'eau

Tritium

La teneur en tritium des eaux de surface va de 0,6 à 4,5 UT et celle des eaux souterraines de 0 à 5,1 UT. Plus de 80 % des échantillons d'eau du bassin de Kandi sont riches en tritium.

Quelques-uns d'entre eux en ont de faibles teneurs, inférieures à 0,5 UT. Des valeurs aussi faibles indiquent qu'il y a des eaux souterraines anciennes ou un mélange de celles-ci et d'eaux récentes dans ce bassin (figures 90, 91). Étant donné que les teneurs de la plupart des échantillons sont supérieures à 0,5 UT (unité de tritium), cela signifie que la plupart des eaux sont des eaux de recharge postnucléaire, c'est-à-dire que ce sont des eaux souterraines rechargées après 1960 (Clark et Fritz, 1997). On sait que les fortes teneurs en tritium comme 4,5 UT sont associées à des eaux rechargées aux alentours de 2000 à 2005. Elles se retrouvent presque partout dans le bassin. Cela signifie que l'infiltration directe des eaux de pluie sur presque toute la surface du bassin de Kandi contribue à la recharge des eaux souterraines. Les eaux de surface sont généralement riches en isotopes stables. Cela indique clairement qu'elles sont évaporées, ce qui est normal dans un tel environnement semi-aride. Toutefois, les eaux de surface provenant de deux points d'échantillonnage du nord du bassin tendent à se comporter comme des eaux anciennes. Ce sont les plus pauvres en ^{18}O comme en ^2H de tous les échantillons d'eaux de surface analysés. Cela signifie que ces deux points d'échantillonnage sont probablement des zones où des eaux souterraines relativement anciennes se déchargent dans la Sota.

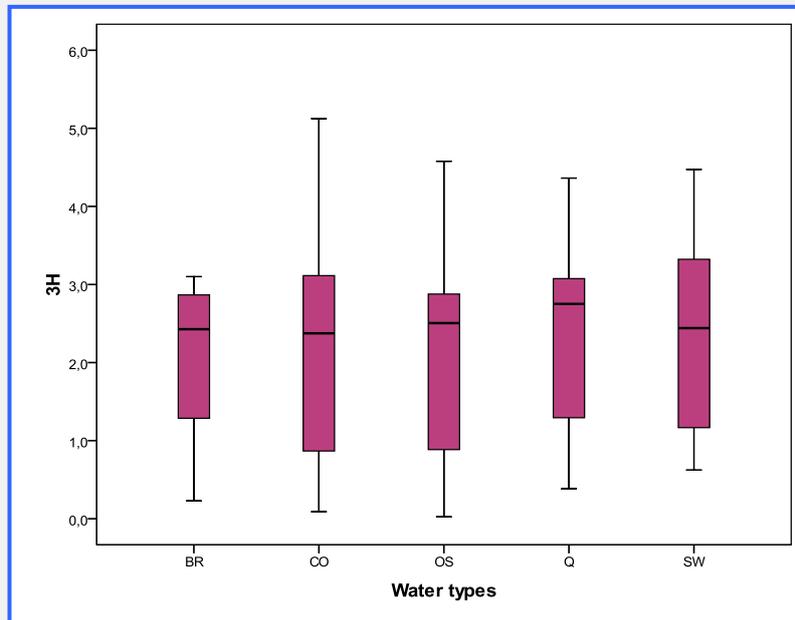


Figure 90 : Variabilité et distribution de la teneur en ^3H des échantillons d'eau du bassin de Kandi.

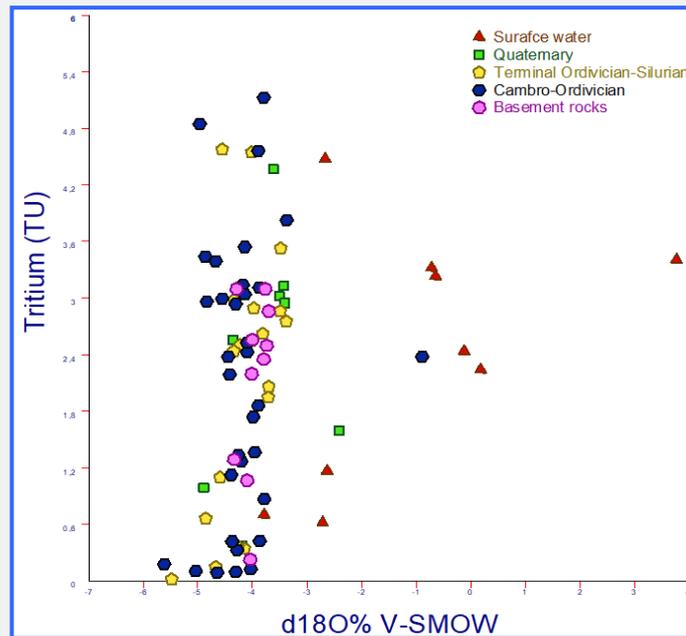


Figure 91 : Diagramme de la teneur en ^3H en fonction de la teneur en ^{18}O des échantillons d'eau analysés dans le bassin de Kandi

Carbone 14

Le ^{14}C et le ^{13}C n'ont été analysés que sur huit échantillons collectés au cours de la deuxième campagne (fig. 92). La concentration des échantillons d'eaux souterraines en ^{14}C va de 17 à 103 pcm (pour cent de carbone moderne). Un niveau d'activité relativement élevé de ^{14}C dans les eaux souterraines laisse à penser que la recharge de ces eaux est récente. Au contraire, un faible niveau d'activité de ^{14}C indique que la recharge est ancienne.

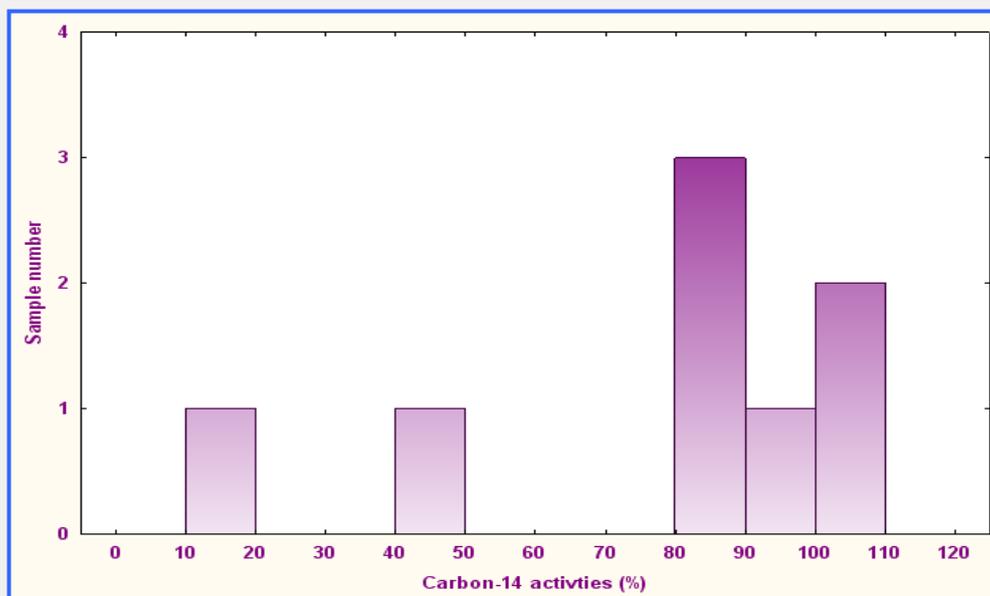


Figure 92 : Fréquence et distribution de la teneur en ^{14}C des échantillons d'eau analysés dans le bassin de Kandi.

La figure 93 montre que ces eaux souterraines se divisent en deux groupes distincts. Le groupe 1 est celui des eaux souterraines relativement récentes, dont l'activité du ^{14}C va de 80 à 103 pcm. Le groupe 2 est celui des eaux souterraines relativement anciennes, dont l'activité du ^{14}C va de 16 à 50 pcm. Une remarque importante est que les eaux souterraines récentes se trouvent essentiellement dans la partie sud du bassin et que celles qui sont relativement anciennes proviennent de sa partie nord, autour des municipalités de Sakaoun et Garoutédji. L'organisation assez logique de l'âge des eaux souterraines mise en évidence par les techniques isotopiques confirme leurs caractéristiques d'écoulement que laissait entrevoir au départ la carte potentiométrique du bassin.

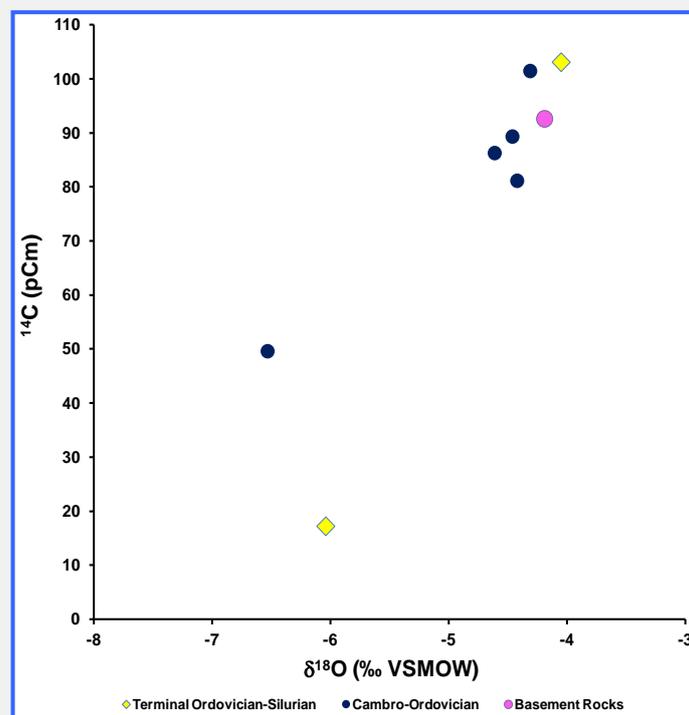


Figure 93 : Relation entre les teneurs en ^{14}C et en ^{18}O des échantillons d'eaux souterraines du bassin de Kandi

4.4. Données géochimiques du système aquifère d'Iullemeden

Les données géochimiques du système aquifère transfrontières d'Iullemeden ont été rassemblées pendant plusieurs campagnes de collecte menées de façon intermittente au Niger, au Nigeria et au Bénin. Compte tenu des problèmes de sécurité sur le terrain, les experts n'ont pas visité les points de collecte d'échantillons au Mali et en Algérie. Au total, 471 échantillons ont été prélevés dans le bassin d'Iullemeden.

4.4.1. Étude hydrochimique du système aquifère d'Iullemeden

- Salinité des eaux souterraines

Les valeurs de CE mesurées vont de 10 à 3860 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les puits et les forages et de 10 à 490 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les cours d'eau.

Plus de 75 % des échantillons d'eau ont des valeurs de MDT inférieures à 400 mg/l (fig. 94). Quelques valeurs aberrantes et extrêmes de MDT pouvaient dépasser 1g/l. Ces chiffres élevés de salinité sont localisés et observés essentiellement dans les aquifères du paléocène supérieur et ceux du CI et du CT. Ces points d'échantillonnage se trouvent dans différentes parties de l'ensemble du bassin (fig. 95).

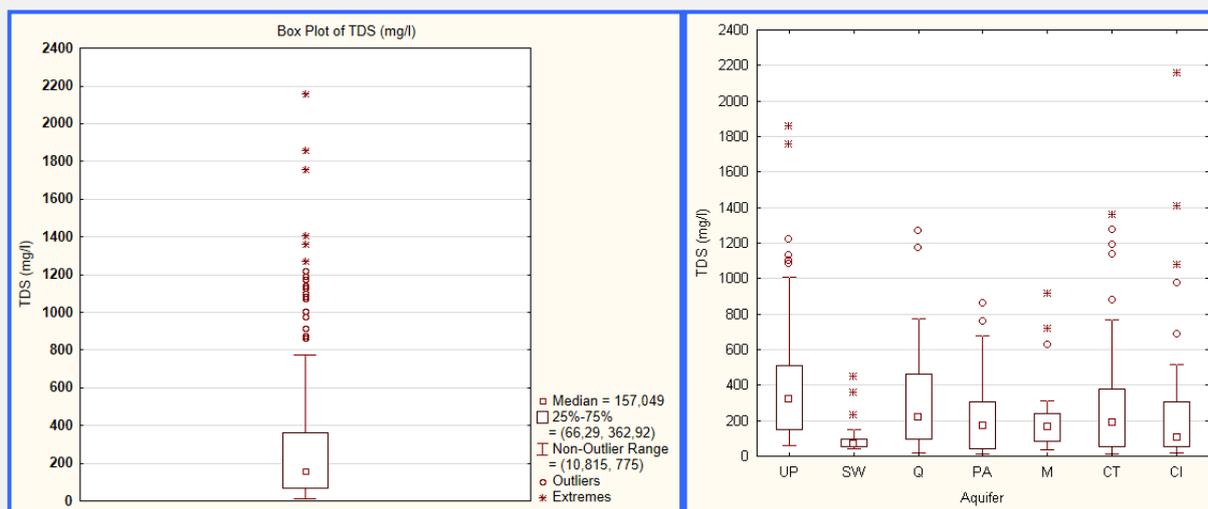


Figure 94 : Distribution et variabilité des valeurs de MDT des échantillons d'eau du système aquifère d'Iullemeden

On n'a observé aucun modèle spatial dans les différents aquifères, et il semble que la variabilité des valeurs de MDT et des paramètres chimiques dépende des conditions locales, en particulier des caractéristiques minéralogiques, de la profondeur de l'eau, de la structure de la recharge et des processus de contamination.

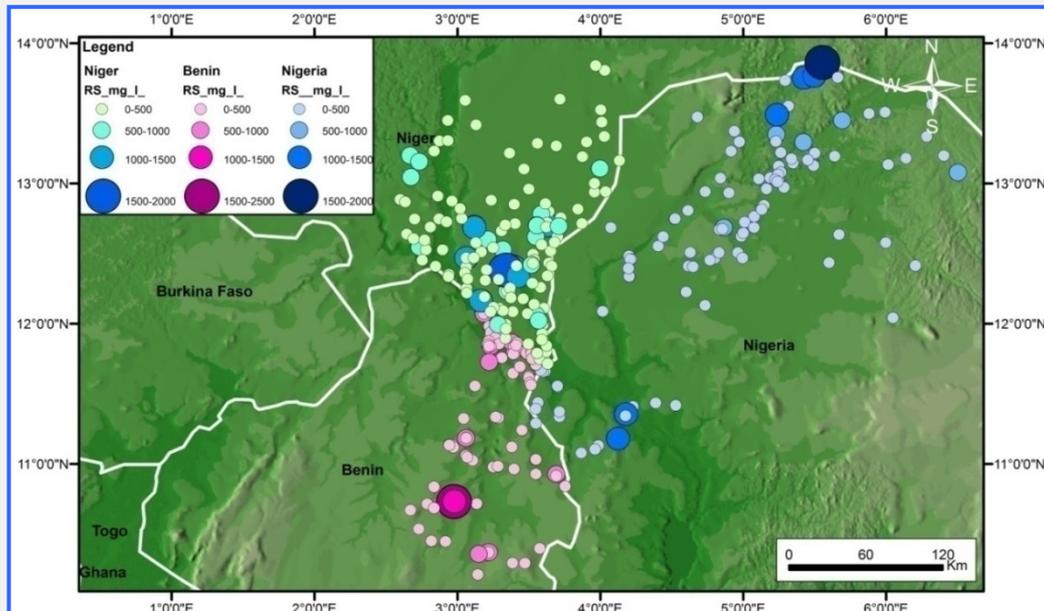


Figure 95 : Carte de distribution spatiale des valeurs de MDT dans le système aquifère d'Iullemeden

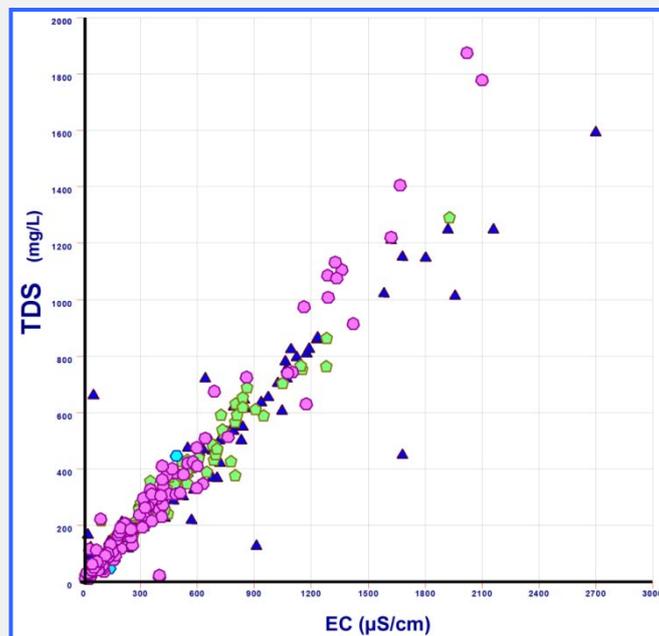


Figure 96 : Graphe de la teneur en MDT en fonction de la CE aux points d'échantillonnage dans le système aquifère d'Iullemeden

- Faciès géochimique des eaux souterraines

La composition chimique des eaux souterraines du système aquifère d'Iullemeden se caractérise par de faibles teneurs en cations, 95 % des valeurs étant inférieures à 40 mg/l avec prédominance du calcium et du sodium, ce qui témoigne d'une forte variabilité (fig. 97). Bien que les échantillons d'eaux de surface aient été collectés dans différents cours d'eau du bassin, ils sont les plus homogènes, avec les concentrations en cations les plus faibles, ce qui pourrait être lié aux fluctuations chimiques de la qualité de l'eau de pluie. Les teneurs en Ca, Mg et K des aquifères du CI et du CT sont faibles et homogènes mais les concentrations en Na sont plus variables et plus élevées. Les teneurs en anions sont faibles mais très variables, en particulier en ce qui concerne les sulfates dont certaines valeurs de concentration aberrantes pouvaient dépasser 1200 mg/l (fig. 98) pour l'aquifère du paléocène supérieur. Le bicarbonate constitue le principal anion, avec une forte variabilité dans toutes les eaux souterraines de l'aquifère.

Les teneurs en chlore sont faibles mais plus homogènes. Les concentrations en nitrates sont inférieures à 50 mg/l pour environ 80 % des échantillons. Toutefois, l'analyse de certains échantillons d'eaux souterraines collectés dans l'aquifère peu profond du quaternaire et les aquifères du paléozoïque et du paléocène supérieur montre qu'il y a une pollution locale par les nitrates principalement au Niger et au Bénin. Cette contamination pourrait être due à des végétaux particuliers comme les acacias, qui fixent l'azote, aux termites, ou à des activités anthropiques liées à l'agriculture et aux pratiques domestiques.

La composition chimique des échantillons analysés est présentée dans les diagrammes de Piper d'équivalence trinéaire de la figure 99. On pourrait distinguer plusieurs types d'eau, à savoir les types :

Ca-Mg-HCO₃, Na-K-Cl, Ca-Cl-SO₄ et Na-K-HCO₃.

La grande variabilité spatiale des faciès hydrochimiques des échantillons d'eau analysés pourrait être liée aux réactions d'altération physique et chimique des minéraux de silicate.

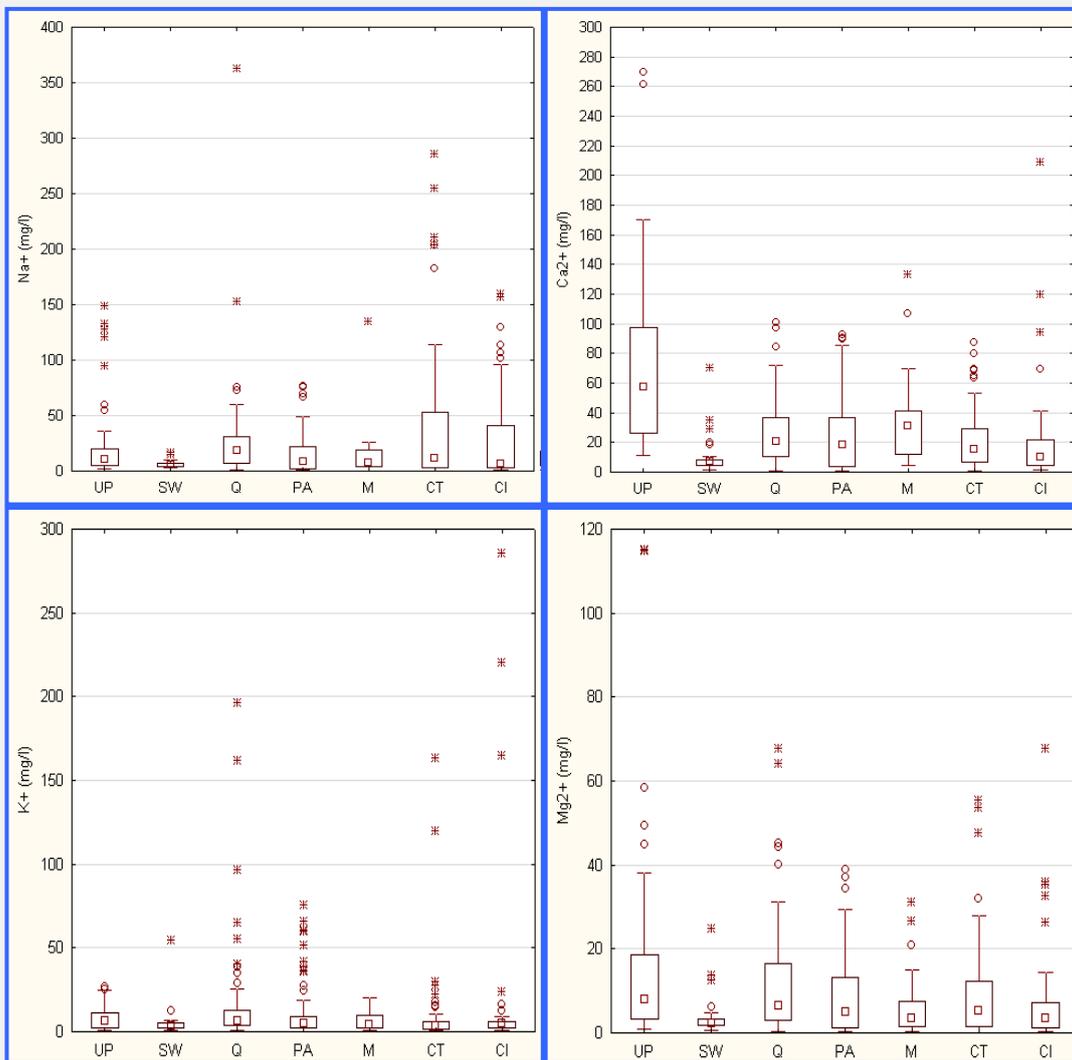
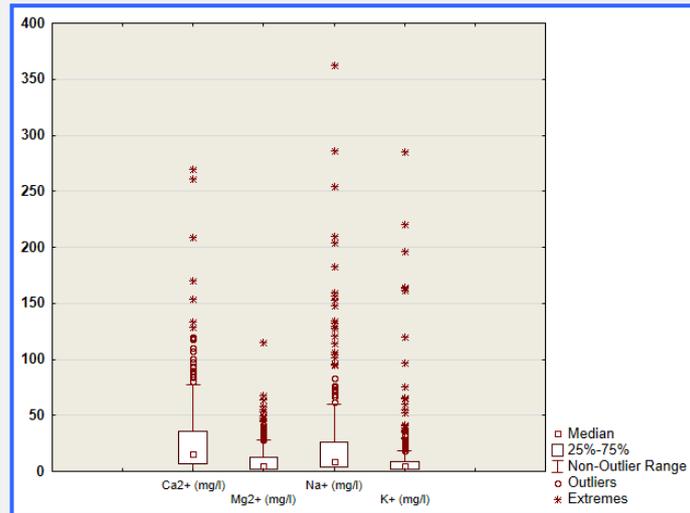


Figure 97 : Distribution et variabilité des principaux cations dans les échantillons d'eau du système aquifère d'Iullemeden

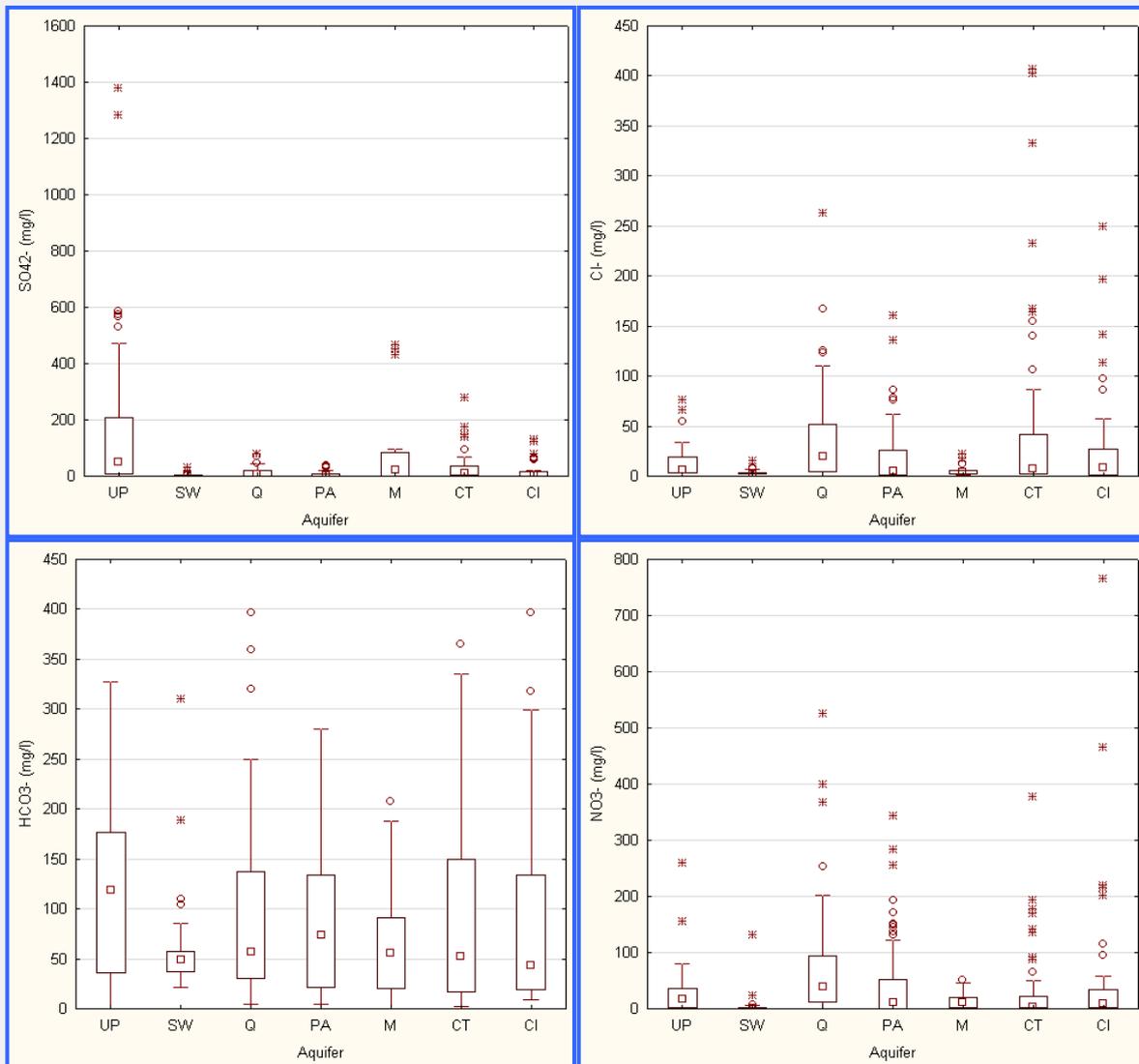
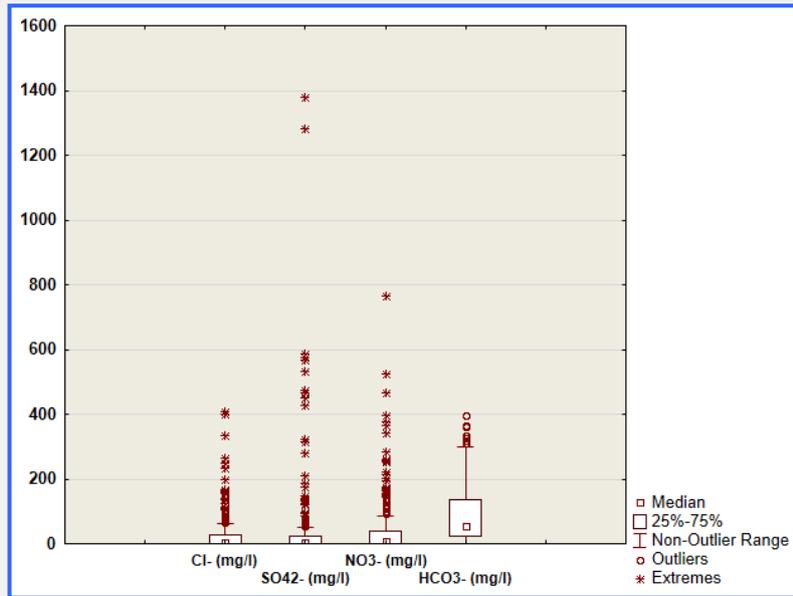


Figure 98 : Distribution et variabilité des principaux anions dans le système aquifère d'Iullemeden

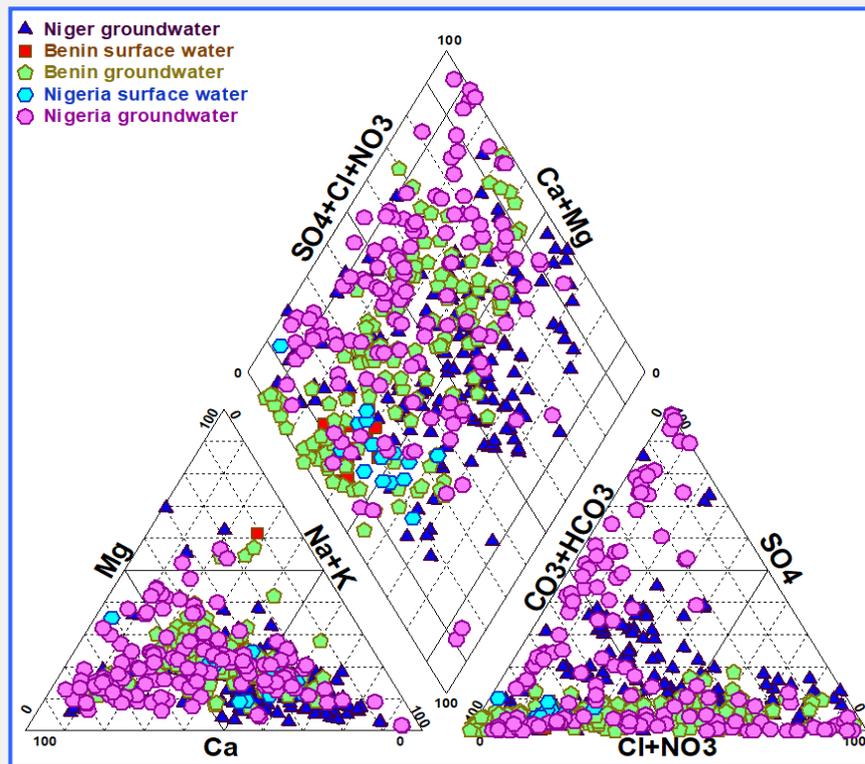


Figure 99 : Diagramme de Piper des échantillons d'eau collectés dans le système aquifère d'Iullemeden

- Origines des principaux ions et processus de minéralisation

La figure 100 présente les diagrammes à deux variables des principales compositions ioniques d'eau de puits soumise à un processus d'échantillonnage multiple. Il ressort de ces données que la chimie des échantillons d'eaux souterraines du bassin d'Iullemeden semble essentiellement contrôlée par la dissolution de minéraux dans les lithologies hôtes du bassin versant.

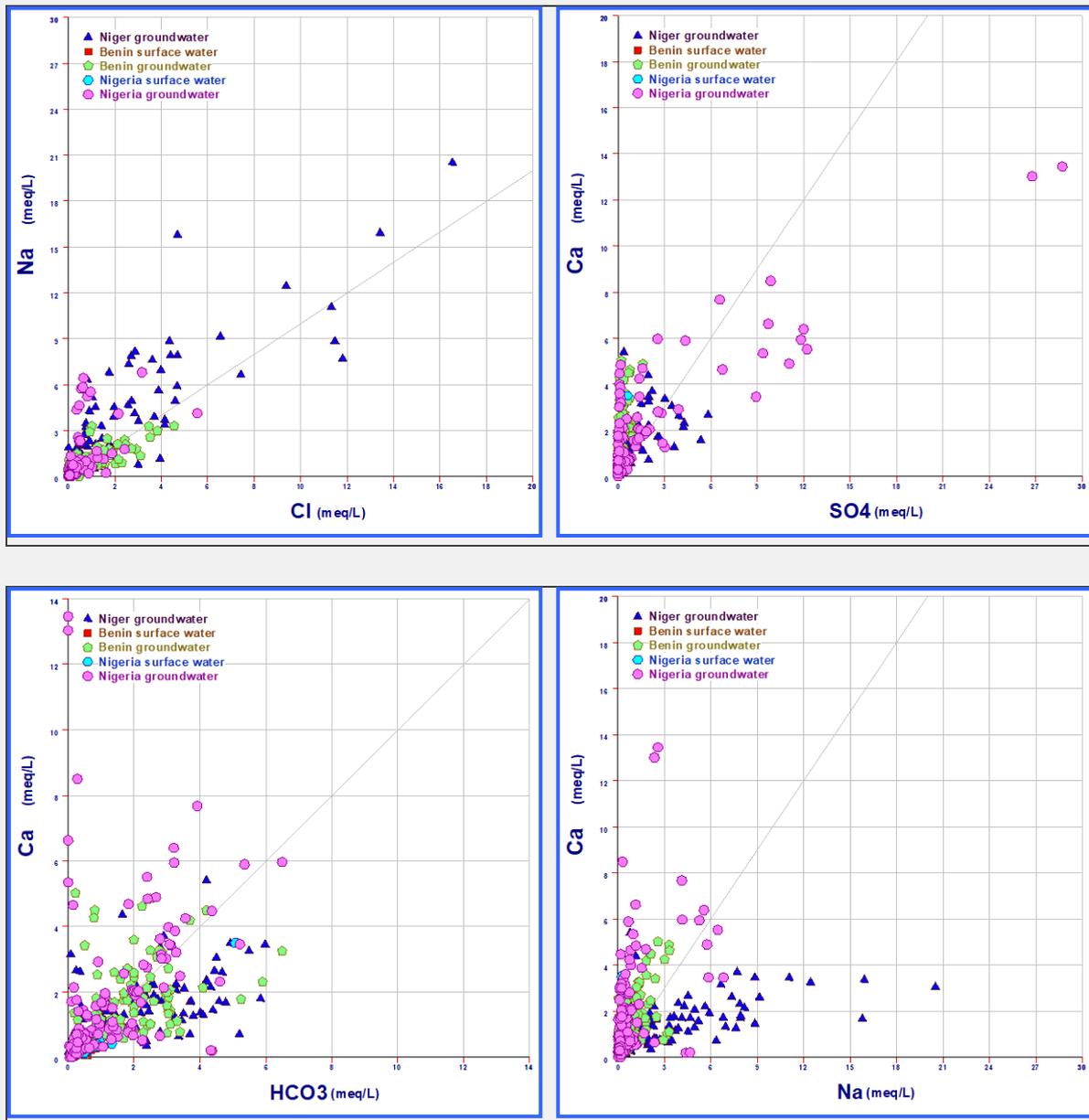


Figure 100 : Relations entre les principaux éléments de l'eau dans le système aquifère d'Iullemeden

4.4.2. Étude isotopique du bassin transfrontières d'Iullemeden

Les résultats relatifs aux isotopes stables montrent que 65 % des eaux souterraines d'Iullemeden sont caractérisées par des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ de -5 à -3‰ et des teneurs en $\delta^2\text{H}$ de -30 à -20‰, ce qui reflète les teneurs en isotopes stables de l'eau de pluie dans les régions arides et semi-arides (figures 101, 102).

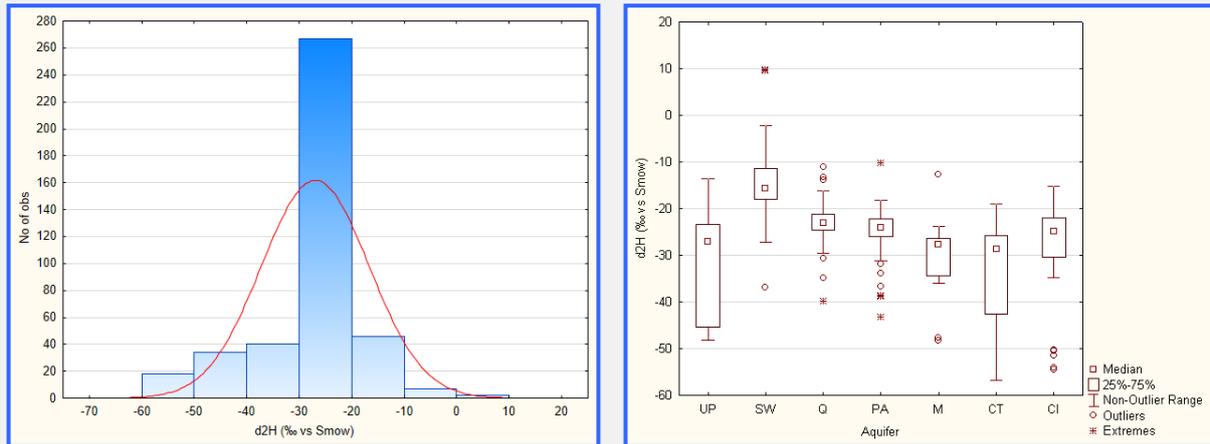


Figure 101 : Distribution et variabilité de la teneur en deutérium des échantillons d'eau du système aquifère d'Iullemeden

De faibles teneurs en deutérium et en ^{18}O sont observées dans les aquifères du CI, du CT et du paléocène supérieur à certains points représentant environ 10 % du nombre total d'échantillons collectés. Cela indique que les proportions d'eau fossile dans les eaux souterraines du SAI sont plus faibles que celles des eaux de pluie ou de surface récentes.

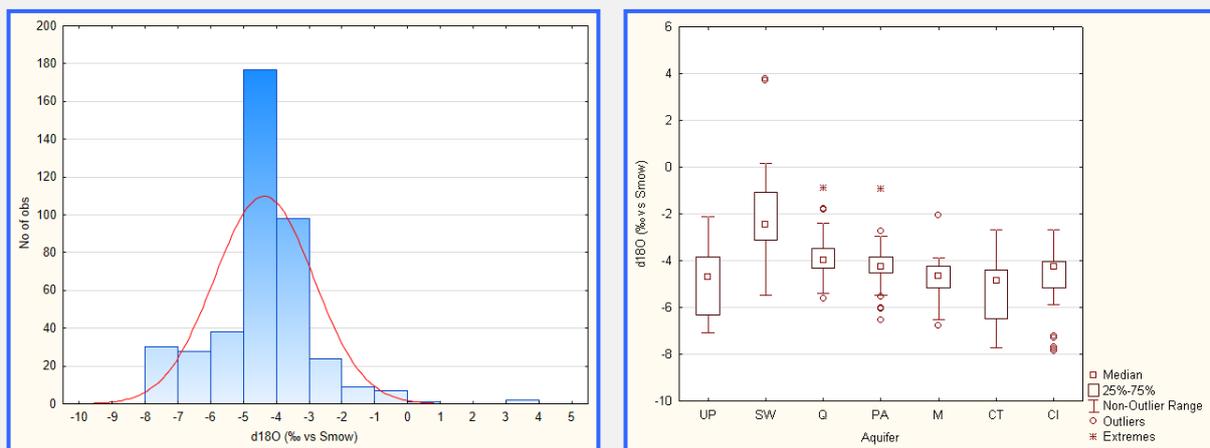


Figure 102 : Distribution et variabilité de la teneur en oxygène 18 des échantillons d'eau du système aquifère d'Iullemeden

Les résultats pour l'ensemble de la région d'Iullemeden étudiée sont présentés à la figure 103 par rapport à la droite météorique mondiale ($\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$) (Craig, 1961). On peut diviser globalement les données isotopiques en trois groupes qui indiquent la probabilité de variations des sources des pluies au cours du temps, à savoir : i) l'eau pauvre en isotopes, dont la composition isotopique est différente de celle des précipitations actuelles. Les aquifères étudiés (en particulier ceux du Niger et du Nigeria) contiennent donc certaines eaux fossiles qui ont été rechargées dans le passé et n'ont pas été couplées au cycle hydrologique actuel ; ii) l'eau riche en isotopes, qui montre l'importance de l'apport d'eaux de surface des cours

d'eau dans l'évolution de la composition isotopique observée des échantillons de la zone d'étude ; et iii) le mélange d'eaux contenant des isotopes stables dont les caractéristiques sont intermédiaires entre celles des eaux de pluie actuelles et celles des eaux fossiles. Cela explique que les diagrammes de certaines données soient intermédiaires entre ceux d'eaux pauvres et d'eaux relativement riches en isotopes stables.

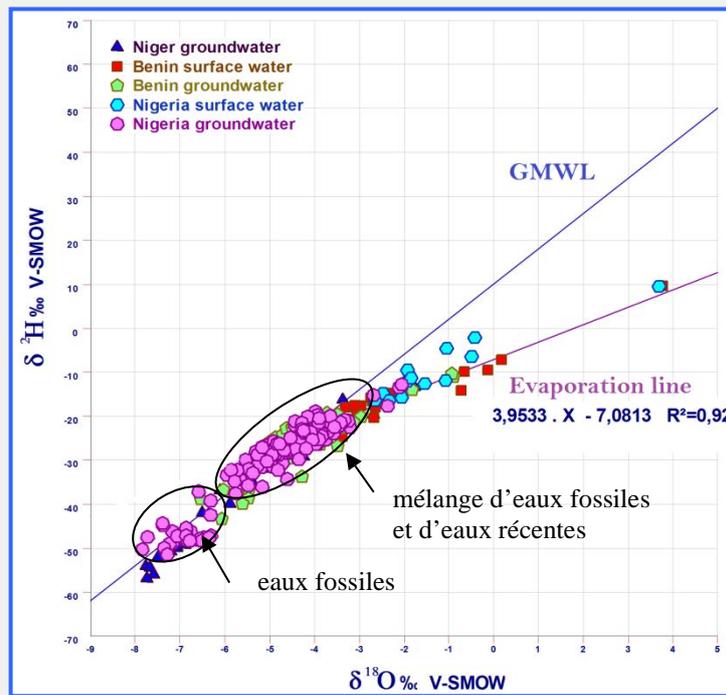


Figure 103 : Diagramme de $\delta^2\text{H}$ en fonction de $\delta^{18}\text{O}$ dans les échantillons d'eau du système aquifère d'Iullemeden

Un diagramme de CE en fonction de $\delta^{18}\text{O}$ a été tracé pour confirmer les mécanismes de minéralisation en jeu dans le bassin étudié (fig. 104). Il ressort des données disponibles que deux grands processus qui contribuent à la salinisation de l'eau pourraient être déterminés : la dissolution des minéraux et l'évaporation :

- Le premier illustre un effet de dissolution dans lequel les compositions isotopiques des échantillons ($\delta^{18}\text{O}$) ne changent pas en fonction des valeurs croissantes de CE. Cette observation renforce fortement l'hypothèse selon laquelle la salinité de ces eaux souterraines est principalement déterminée par un processus de dissolution comme cela a été souligné précédemment par les analyses hydrochimiques.

- Le second processus illustre un effet d'évaporation. Dans ce cas, les teneurs isotopiques des échantillons d'eau sont relativement corrélées avec les valeurs d'EC (fig. 104).

La majorité des échantillons du bassin d'Iullemeden ont des teneurs en tritium élevées. Plus de 65 % d'entre eux ont une concentration de plus d'une unité de tritium, et seuls 33 % d'entre eux ont une teneur inférieure à une unité. En ce qui concerne la relation entre le tritium et l'oxygène 18 (fig. 105), deux périodes de recharge se dégagent de l'étude des eaux souterraines. Les eaux dont les teneurs en ^3H sont inférieures à 1 UT, ce qui indique une recharge prénucléaire (avant 1960), et celles dont les teneurs sont supérieures à 1 UT, ce qui indique clairement une recharge postnucléaire (période 1960-1980) ou contemporaine, probablement au cours des deux ou trois dernières décennies.

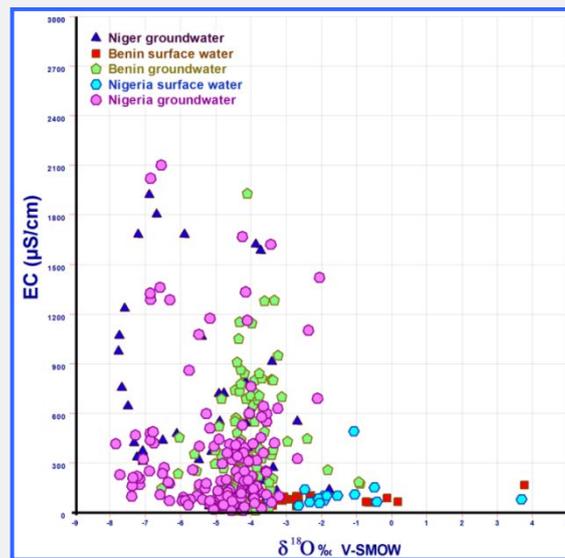


Figure 104 : Diagramme des valeurs de CE en fonction des teneurs en oxygène 18 des échantillons d'eau dans le système aquifère d'Iullemeden

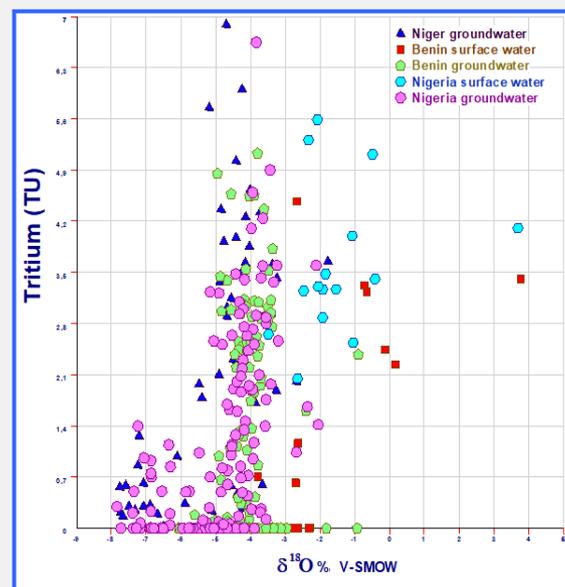


Figure 105 : Diagramme de la teneur en ^3H en fonction de la teneur en oxygène 18 des échantillons d'eau dans le système aquifère d'Iullemeden

4.4.3. Étude statistique du bassin transfrontières d'Iullemeden

Des analyses en composantes principales à plusieurs variables combinées à des techniques hydrochimiques classiques et des méthodes isotopiques ont été utilisées pour déterminer le principal processus géochimique qui contrôle la qualité des eaux souterraines dans le système aquifère d'Iullemeden. Le nombre total de facteurs obtenus à partir d'une analyse de facteurs classique indique le nombre total de sources possibles de variation des données. Les facteurs sont classés par ordre d'importance. Le premier facteur ou première composante est celui dont la somme de vecteurs propres est la plus élevée. Il représente les plus importantes sources de variation des données. Le dernier facteur concerne le processus le moins important qui contribue à la variation chimique. La figure 106 présente les valeurs de vecteurs propres représentant les facteurs et la proportion de la variance totale des échantillons attribuable à ces derniers. Des valeurs de vecteurs propres de 1,0 ou plus sont considérées comme significatives (Kim et Mueller, 1987). Le premier facteur, F1, dont la variance exprimée est de 45,52 %, est le plus important de tous, suivi des facteurs F2, F3 et F4 dont les variances exprimées sont de 17,12%, 13,88% et 7,41% respectivement. Les quatre facteurs représentent 83,93 % de la variance totale. La somme de leurs variances est supérieure à 70 % et ils sont suffisants pour expliquer les mécanismes contrôlant la chimie des eaux souterraines. Le plan factoriel F1-F2 est analysé dans le présent rapport en vue de comprendre la tendance générale de la chimie des eaux souterraines.

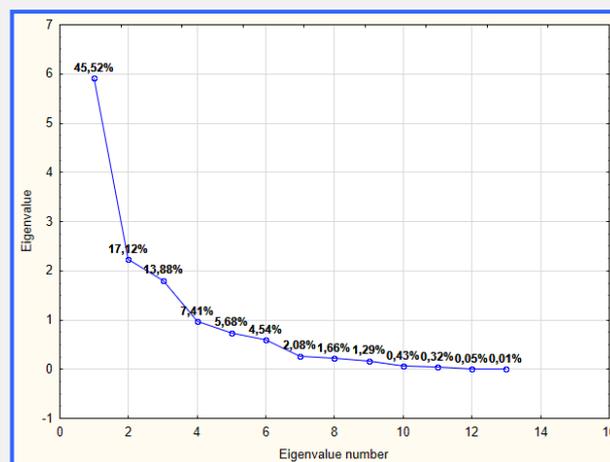


Figure 106 : Variance totale des facteurs dans le système aquifère d'Iullemeden

Le facteur F1, qui représente 45,52 % de la variance totale de la caractérisation du système, est déterminé positivement en partie par les variables Cl^- , Na^+ , EC, MDT, Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} et Cl^- (fig. 107). La proximité de Ca^{2+} et Mg^{2+} , ainsi que de Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} , reflète une bonne corrélation entre ces variables et les valeurs de MDT. Le groupe de variables exprime

la minéralisation naturelle de l'eau et donc le degré d'altération de la roche et, d'une autre manière, le temps de séjour de l'eau et l'interaction entre celle-ci et la roche. De fait, Mg^{2+} et Ca^{2+} proviennent en général de l'altération de la roche et de l'hydrolyse des minéraux de silicates. Le groupe de variables K^+ et NO_3^- correspond à la minéralisation anthropique et pourrait caractériser une évolution dans les eaux de surface ou les aquifères peu profonds. Le facteur F1 représente l'évolution et l'importance des processus d'interaction entre l'eau et les roches. Il met en relief le fait que les eaux souterraines dont le temps de séjour est plus long ont des teneurs en calcium et en magnésium plus élevées en fonction de la lithologie de l'aquifère. Ce facteur représente donc le phénomène de la minéralisation-temps de séjour de l'eau. Le facteur 2, qui explique 17,2% de la variance totale, a un poids factoriel négatif élevé sur $\delta^{18}O$ et δ^2H . Il caractérise une composition isotopique riche et exprime donc le processus d'évaporation dans la partie négative.

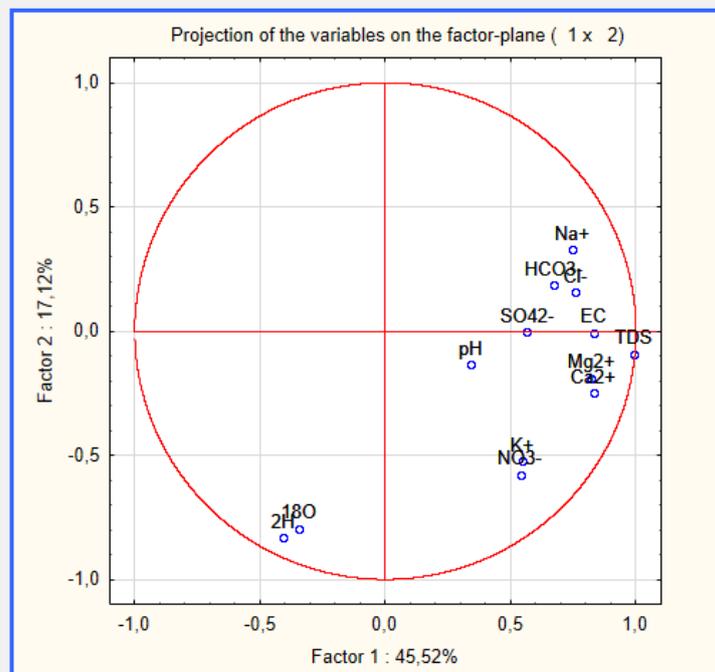


Figure 107 : Cercle de corrélation des variables dans le plan F1-F2 du système aquifère d'Iullemeden

On distingue plusieurs groupes dans la projection des échantillons d'eaux sur le plan F1-F2 (fig. 108), comme suit :

- Le groupe 1, qui représente les échantillons d'eaux souterraines caractérisés par une forte salinité liée à l'interaction entre l'eau et les roches ainsi qu'à la dissolution des minéraux.
- Le groupe 2, qui est composé d'eaux souterraines fossiles dont la salinité est relativement élevée.

- Le groupe 3, qui représente les eaux de surface peu profondes ou douces et pour lesquelles le processus d'évaporation est important.
- Le groupe 4, qui est composé d'eaux souterraines caractérisées par une forte salinité et pour lesquelles la pollution par les nitrates est importante.

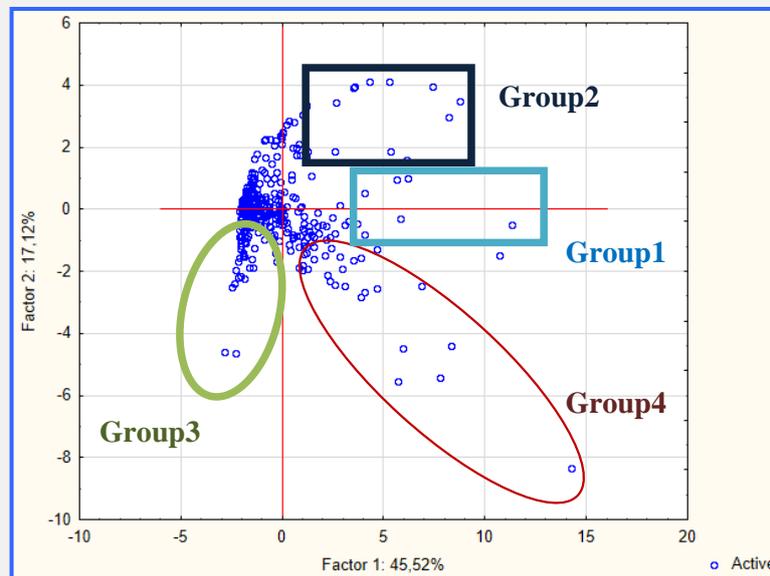


Figure 108 : Analyse en composantes principales (ACP) des échantillons d'eau du système aquifère d'Iullemeden

5. CONCLUSIONS

Le système aquifère d'Iullemeden (SAI), qui est partagé par l'Algérie, le Mali, le Niger, le Nigeria et le Benin, constitue la principale source pérenne d'eau potable et une ressource stratégique pour le développement durable des pays concernés de la région du Sahel. Seuls trois pays (Niger, Nigeria et Bénin) participent à ce projet et ont organisé plusieurs campagnes d'échantillonnage dans le cadre de ses activités. Il n'a pas été possible d'étudier la continuité latérale du SAI en Algérie et au Mali compte tenu des problèmes de sécurité sur le terrain.

Le présent rapport est une étude de synthèse préliminaire de cet aquifère partagé. Il est basé sur les informations géologiques et hydrogéologiques disponibles dans certaines études de synthèse (OSS, 2008, 2011).

Le bassin d'Iullemeden est composé de formations sédimentaires allant du cambrien-ordovicien au tertiaire et au quaternaire. Les principaux aquifères partagés sont ceux du continental intercalaire (CI), du continental terminal (CT) et du quaternaire. L'aquifère du CI est le plus grand système aquifère multicouche des séries sédimentaires du crétacé. C'est une nappe libre en périphérie et captive au centre et à l'ouest au Mali.

L'aquifère du continental terminal est contenu dans les sédiments continentaux d'âge tertiaire du bassin d'Iullemeden qui se présentent par des alternances de sables et d'argiles avec de nombreuses et rapides variations latérales et verticales de faciès. Au Niger, le système aquifère du CT est un système multicouche comprenant les aquifères du CT1 (captif), du CT2 (semi-captif) et du CT3 (nappe libre). Au Mali et au Nigeria, il est constitué d'un aquifère unique. L'aquifère du quaternaire, qui est un aquifère libre, est encastré dans des sédiments et exploité dans tous les pays concernés. Toutefois, celui du pré-cambrien (aquifère du socle fracturé et du cambro-ordovicien), qui est composé essentiellement de conglomérats, de brèches et de grès fluviaux, est bien exploité au Bénin.

La géochimie et l'hydrologie isotopique des eaux de surface et des eaux souterraines du bassin d'Iullemeden ont fourni des informations utiles sur leur origine, leurs processus de minéralisation et leurs mécanismes de réalimentation. Il ressort des données chimiques que les niveaux de salinité sont faibles mais extrêmement variables dans les faciès hydrochimiques des échantillons d'eau analysés. L'évolution géochimique des eaux souterraines étudiées est

dominée par l'altération physique et chimique des formations lithologiques hôtes. Les teneurs en nitrates des eaux souterraines du SAI sont généralement inférieures à 50 mg/l. Toutefois, quelques échantillons d'eaux peu profondes provenant principalement du Niger et du Bénin montrent des signes de pollution locale par les nitrates. Cette contamination locale est détectée dans différents aquifères et ne démontre aucune évolution spatiale particulière. Elle pourrait être liée à des activités anthropiques ayant trait à l'agriculture et aux pratiques domestiques. Les signatures des isotopes stables révèlent que certains échantillons d'eaux souterraines du bassin d'Iullemeden, en particulier des aquifères du CI, du CT et du paléocène supérieur, ont des signatures d'eaux fossiles rechargées probablement pendant des périodes plus humides avec des climats plus frais.

Les parties peu profondes sont rechargées actuellement, avec de l'eau aux isotopes stables caractéristiques de l'eau de pluie actuelle et aux fortes teneurs en tritium. La méthode isotopique a mis en lumière le phénomène d'échange entre les aquifères du bassin, les eaux fossiles, la recharge directe des aquifères par les eaux de surface dans certaines régions, et la recharge par les précipitations actuelles, ce qui influe sur la géochimie des eaux souterraines du bassin.

L'analyse statistique à plusieurs variables indique que plusieurs facteurs contrôlent la qualité des eaux souterraines, ce qui montre que plusieurs processus géochimiques complexes entrent en jeu. Seuls les deux premiers facteurs sont analysés dans le présent rapport. Le premier exprime le phénomène de minéralisation de l'eau qui est renforcé avec l'augmentation du temps de résidence et le second est le processus d'évaporation qui influe sur les eaux de surface et les eaux souterraines les moins profondes. Les effets anthropiques qui contribuent de fait à la minéralisation des eaux souterraines sont mis en lumière.

Les ressources des aquifères du bassin d'Iullemeden étudiés constituent d'importantes réserves d'eau de bonne qualité qui doivent être bien gérées en tant que ressources de grande qualité, dans le cadre de plans intégrés pour l'approvisionnement en eau futur du bassin. Les résultats scientifiques de cette étude ont des incidences importantes en ce qui concerne la gestion des eaux souterraines de ce bassin dans le cadre de cette stratégie de développement et peuvent servir de base à l'élaboration des modèles futurs d'écoulement des eaux souterraines. Il faut donc qu'une stratégie visant à assurer la recharge des eaux souterraines soit mise en

place grâce à des efforts concertés d'établissements publics et non gouvernementaux ainsi que du public visant à reconstituer la nappe d'eau et à faire des ressources en eaux souterraines une source fiable et durable d'approvisionnement en eau pour répondre aux besoins des populations.

Recommandations

Au vu des résultats de l'étude, il faudrait notamment s'attacher à :

- Surveiller et évaluer les risques de salinisation et de pollution par certains métaux lourds comme le plomb, le chrome, le cadmium, l'arsenic, le cuivre, le mercure qui sont déjà mesurés dans certains secteurs du Nigeria (Anka, Bukkuyun et Zamfara) et au Niger.
- Renforcer les capacités locales d'échantillonnage et d'analyse en ce qui concerne ^{15}N et ^{34}S afin de confirmer encore les sources de contamination des eaux souterraines.
- Prélever d'autres échantillons d'eau de pluie et d'eaux de surface (pour mieux évaluer les interactions) afin d'intégrer toutes ces données dans une interprétation générale.
- Prélever d'autres échantillons pour l'analyse de ^{14}C et ^{13}C en vue de mieux déterminer les périodes de recharge.

Les résultats de ces travaux devraient aider les autorités du secteur de l'eau à :

- Élaborer un programme d'action stratégique (PAS) en vue de la mise en place d'un cadre juridique, politique et institutionnel pour la gestion et l'utilisation rationnelle du SAI.
- Élaborer des modèles numériques d'écoulement des eaux souterraines du SAI afin de définir des scénarios de gestion durable des ressources en eau.

Par ailleurs, la mise en oeuvre du programme d'action stratégique (PAS) passe par :

- le renforcement de la collaboration entre les pays participants et les organismes partenaires intervenant dans la gestion des ressources en eaux souterraines partagées.
- Des mesures concertées dans l'interprétation des données pour promouvoir la collaboration au sein des bassins/des aquifères afin d'harmoniser les stratégies et de promouvoir l'échange de données d'expérience entre pays.

6. RÉFÉRENCES

- Achidi, J., Bourguet, L., Elsaesser, R., Legier, A., Paulvé, E., Tribouillard, N., 2012. Notice explicative de la carte hydrogéologique du Bénin : carte du bassin sédimentaire de Kandi à l'échelle 1/200 000. Rapport technique, DGEau, Cotonou, Bénin, 45 p.
- Alidou, S., 1983. Étude géologique du bassin paléo-mésozoïque de Kandi (nord-est du Bénin, Afrique de l'ouest). Thèse de PhD, Université de Dijon, France, 328 p.
- Alidou, S., Lang, J., Bonvalot, J., Roman, E. et Seilacher A., 1991. Marine influences in the so-called continental sediment of Paleozoic-Mesozoic Kandi Basin (Northern Benin-West Africa). *J. Afric Earth Sci.*, 12, N°1/2, 55-65.
- Boukari, M., 2007. Hydrogéologie de la République du Bénin (Afrique de l'ouest). *Africa geosciences revue*, 303-328.
- Clark, I., Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, New York, 328p.
- Craig, H., 1961. Isotopic variation in meteoric water. *Science* 133, 1702–1703.
- Darling, W.G., Bath, A.H., Gibson, J.J., Rozanski, K., 2006. Isotopes in water. In: Leng, M.J. (Eds.), *Isotopes in Paleoenvironmental Research*, Springer, Dordrecht, pp. 1–66.
- GEF, 2003 Gestion du risque hydrogéologique dans le Système Aquifère des Iullemeden dossier du projet 45p.
- Kepgli, R., Alassane A., Trabelsi R., Zouari, K., Boukari, M., Mama D., Dovonon, F.L., Yoxi, Y.V., Toro-Espitia, L.E. 2015. Groundwater Flow pattern and resident time in Kandi basin (Benin, West Africa): a combined hydrogeological and isotopic approach. *Quaternary International* 369, 99-109.
- Kim, J.-O., Mueller, C.W., 1987. Introduction to factor analysis: what it is and how to do it. *Quantitative Applications in the Social Sciences Series*. Sage University Press, Newbury Park.
- Konaté M., Guiraud M., Alidou S., Clermonté J., Drouet J-J. et Lang J., 1994. Structuration et dynamique sédimentaire du bassin paléozoïque en demi-graben de Kandi (Bénin, Niger). *Comptes Rendus Académie des Sciences*. Paris, France. 318 (II) 535-542.
- Konaté, M., 1996. Évolution tectono-sédimentaire du bassin paléozoïque de Kandi (Nord-Bénin et Sud-Niger) : un témoin de l'extension post-orogénique de la chaîne panafricaine. Thèse de PhD Université de Bourgogne et Université de Nancy I. France. 281 p.
- Le Barbé, L., Alée, G., Millet, B., Texier, H., Borel, Y., Gualde, R., 1993. Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Edition Orstom, Paris, France, 540 p.
- Maduabuchi, C., Faye, S., Maloszewski, P., 2006. Isotope evidence of paleorecharge and paleoclimate in the deep confined aquifers of the Chad basin, NE Nigeria. *Sci. Tot. Environ.* 370, 467–479.
- Ngugi DK, Brune A., 2012. Nitrate reduction, nitrous oxide formation, and anaerobic ammonia oxidation to nitrite in the gut of soil-feeding termites (*Cubitermes* and *Ophiotermes* spp.). *Environ Microbiol.* 2012 Apr;14(4):860-71. doi: 10.1111/j.1462-2920.2011.02648.x.

OSS (Observatoire du Sahel et du Sahara), 2003. Système aquifère du Sahara septentrional : Gestion commune d'un bassin transfrontière. Rapport de synthèse. OSS, 129 p.

OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel) 2007. Common Database of the Iullemeden Aquifer System. Tunis Edited by OSS in 2011 (Volume II).

OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel), 2007. Hydrogeological Model of the Iullemeden Aquifer System. Tunis Edited by OSS in 2011 (Volume III).

OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel). The Iullemeden Aquifer System (Mali, Niger, Nigeria). Concerted management of the shared water resources of a Sahelian Transboundary aquifer, Technical Report, Tunis, 2008.

OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel). The Iullemeden Aquifer System (Mali, Niger, Nigeria). The GEF TDA/SAP approach applied to the IAS, Technical Report, Tunis, 2011.

Penna, D., Stenni, B., Wrede, S., Bogaard, T.A., Gobbi, A., Borga, M., Fischer, B.M.C., Bonazza, M., Charova, Z., 2010. On the reproducibility and repeatability of laser absorption spectroscopy measurements for $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopic analysis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 7, 2975-3014.

Taylor, C.B., 1976. IAEA Isotope Hydrology Laboratory, Technical Procedure Note No. 19. Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne

Rozanski, K., Araguas-Araguas, L., Gonfiantini, R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. In : Swart, P.K., Lehmann, K.C., McKenzie, J., Savin, S. (eds), *Climate Change in Continental Isotopic Records*, Geophys. Monogr. Ser., 78, AGU, Washington, D.C., pp. 1-36.

OMS, 2006 Organisation mondiale de la Santé. Directives de qualité pour l'eau de boisson 3ème édition, incorporant le premier additif. Disponible à l'adresse : http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/en/index.html.

ABRÉVIATIONS

CH : Continental hamadien

CI : Continental intercalaire

CIH : Continental intercalaire hamadien

HPILC : Chromatographie liquide ionique haute performance

CNESTEN : Centre national des sciences et technologies nucléaires (Maroc)

CT : Continental terminal

CE : Conductivité électrique

AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique

FEM : Fonds pour l'environnement mondial

OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel

SAI : Système aquifère d'Iullemeden

ACP : Analyse en composantes principales

PDB : Dee Belemnite Standard

PAS : Plan d'action stratégique

MDT : Matières dissoutes totales

UT : Unité de tritium

V-SMOW : Étalon moyen de l'eau de mer - Vienne

OMS : Organisation mondiale de la Santé

ANNEXES

Données de terrain et données hydrochimiques et isotopiques produites dans le cadre du projet RAF/7/011
sur le bassin d'Iullemeden au Niger (campagne 1)

N°	Echantillon	LAT	LON	localités	Aquifère	Profondeur d'échantillonnage (N.S)	Date de prélèvement	Conductivité µs/cm	Température	pH	TDS_mg/l	Ca_mg/l	Mg_mg/l	Na_mg/l	K_mg/l	Cl_mg/l	SO ₄ _mg/l	NO ₃ _mg/l	CO ₂ _mg/l	HCO ₃ _mg/l	δ ¹⁸ O (‰ vs Smow)	δ ² H (‰ vs Smow)	δ ³ H (TU)
9	NERDOS9	03°31'46"	12°29'39"	Angoal Dokal	Quaternaire	3,22	14/03/2013	270	28,6	6,9	197	20,56	5,45	20,39	9,62	19,94	20,45	45,29	0	50	-3,36	-16,26	3,61
18	NERDOS18	03°20'55"	12°13'56"	Kawara Gohé	Quaternaire	7,5	14/03/2013	1064	30,8	6,1	771	63,11	13,80	152,58	8,20	263,07	71,99	201,70	0	5	-5,39	-34,87	1,79
28	NERDOS28	03°36'20"	11°45'40"	Pinke Polé	Quaternaire	3,45	15/03/2013	912	30,3	6,7	124	14,78	4,64	10,94	6,24	11,80	5,60	37,37	0	33	-3,41	-23,04	2,94
29	NERDOS29	03°34'32"	11°44'56"	Gokou	Quaternaire	21,08	15/03/2013	133	31,7	6,2	89,965	11,119	2,658	7,933	6,721	6,828	4,48	1,499	0	55	-3,27	-20,92	1,88
30	NERDOS30	03°33'27"	11°47'23"	Gatawani Kaina	Quaternaire	4,5	15/03/2013	190	30,8	6,1	139,958	15,025	3,889	19,274	6,71	17,455	3,259	54,983	0	30	-3,64	-24,34	2,88
33	NERDOS33	03°16'21"	12°01'02"	Momboyé Tounga	Quaternaire	2,37	16/03/2013	629	30,6	7,2	429	27,47	16,495	75,475	28,625	50,405	47,84	85,84	0	135	-4,01	-23,51	4,63
36	NERDOS36	03°13'50"	12°05'07"	Albarkaize	Quaternaire	3,66	16/03/2013	135	31,3	6,5	131,216	21,474	4,511	8,814	4,563	7,264	3,132	34,682	0	58	-1,77	-13,23	3,65
37	NERDOS37	03°09'45"	12°09'55"	Ouna	Quaternaire	6,4	16/03/2013	1619	31,1	8,5	1175,658	33,32	6,47	362,68	2,18	166,68	28,94	366,52	60	183	-3,85	-21,70	1,72
44	NERDOS44	02°56'31"	11°20'29"	Bombodji djerma	Quaternaire	5,68	17/03/2013	364	31,1	7	293,825	29,866	15,836	21,57	22,98	27,818	14,988	98,686	0	75	-4,27	-26,46	3,49
45	NERDOS45	02°50'46"	12°24'33"	Boumba	Quaternaire	6,2	17/03/2013	84	33	7	82,1049	7,709	2,744	7,508	3,725	2,841	2,783	14,193	0	41	-3,24	-21,00	3,42
47	NERDOS47	02°44'08"	12°32'43"	Bossia	Quaternaire	6,55	17/03/2013	717	30,3	8	494,78	42,425	45,105	12,59	12,73	39,745	10,24	121,82	0	215	-4,90	-26,85	2,10
14	NERDOS14	03°31'14"	12°25'12"	Guéza Bissala	CT1	23,17	14/03/2013	792	31,6	6	548	53,48	15,58	104,60	3,42	41,89	278,87	42,72	0	15	-4,15	-24,78	3,64
15	NERDOS15	03°26'04"	12°22'41"	Bellawa	CT1		14/03/2013	1234	31,6	8	879	52,20	15,71	210,12	3,78	232,34	62,93	4,00	0	285	-7,59	-55,91	0,59
2	NERDOS2	03°03'42"	12°28'08"	Noma Koorá	CT2	33,4	13/03/2013	1803	33,4	7,2	1273	69,76	53,64	203,61	15,42	407,25	94,89	2,22	0	300	-6,67	-47,75	0,19
3	NERDOS3	03°33'27"	12°41'59"	Zabori	CT2	20,1	13/03/2013	1068	35,8	7,95	769	34,27	12,39	182,25	6,34	166,71	69,58	0,51	0	280	-7,74	-56,79	0,21
4	NERDOS4	03°37'56"	12°42'03"	Angoal Dangné	CT2	7,43	13/03/2013	1581	30,5	6,6	1139	87,47	31,89	26,72	163,36	139,73	93,09	377,30	0	100	-3,72	-22,52	4,32
6	NERDOS6	03°38'26"	12°47'57"	Kara kara	CT2	16,4	13/03/2013	419	33,6	8,5	313	12,96	9,12	73,99	4,40	26,75	4,35	4,68	0	205	-7,32	-50,79	0,25
19	NERDOS19	03°20'55"	12°13'56"	Adiga Iele	CT2	32,5	14/03/2013	20	31	5,5	16	2,31	0,72	1,259	0,52	1,26	0,80	0,10	0	11	-4,56	-25,79	0,58
27	NERDOS27	03°37'15"	11°48'01"	Tounouga	CT2	21,3	15/03/2013	367	34,2	7,2	253,825	28,2	4,004	48,072	8,576	41,578	22,426	1,988	30	61	-5,12	-32,10	0,23
34	NERDOS34	03°23'14"	12°05'08"	Bouma	CT2	34,9	16/03/2013	478	31,6	5,8	301	25,485	18,36	22,455	10,78	1,59	174,735	0	0	35	-6,12	-36,89	0,98
42	NERDOS42	03°06'59"	12°41'30"	Tokoyé bangou	CT2	17,21	17/03/2013	1921	32,2	7,5	1359,852	69,15	47,69	254,12	14,49	401,73	94,73	0	0	365	-6,88	-49,15	0,32
11	NERDOS11	03°38'24"	12°25'56"	Angoal Daoura	CT2-CT3	26,15	14/03/2013	97	31,2	5,8	90	8,44	2,12	8,29	1,24	2,82	2,42	27,95	0	30	-4,24	-23,27	6,00
12	NERDOS12	03°39'33"	12°24'37"	Doli	CT2-CT3	0,3	14/03/2013	306	32,6	7,9	206	10,34	6,58	44,34	3,52	13,37	1,15	0,15	0	145	-7,08	-49,73	0,61
13	NERDOS13	03°37'45"	12°20'26"	Toranké	CT2-CT3	9,64	14/03/2013	372	33	7,9	255	15,92	7,57	56,95	3,00	20,38	8,38	0,62	0	170	-7,08	-49,89	0,30
16	NERDOS16	03°23'33"	12°24'33"	Béla1	CT2-CT3	20,1	14/03/2013	1679	32,9	7,6	1190	65,06	17,99	286,02	15,49	332,52	94,64	2,78	0	335	-7,20	-50,71	1,26
1	NERDOS1	03°18'30"	12°39'43"	Barazé Gorou	CT3	23,42	13/03/2013	36	31,7	6	54	4,64	0,85	6,58	2,87	11,13	1,47	5,42	0	17	-4,25	-29,20	0,26
7	NERDOS7	03°35'15"	12°46'53"	Angoal Doua	CT3	23,1	13/03/2013	640	33,2	8,05	721	29,01	8,16	203,86	0,50	154,60	56,30	0,60	0	268,4	-7,50	-52,17	0,30
10	NERDOS10	03°39'09"	12°31'02"	Balifolo 2	CT3	26,9	14/03/2013	107	31,5	5,5	97	9,22	3,94	5,38	2,98	7,52	3,05	26,48	0	30	-4,84	-26,28	4,36
17	NERDOS17	03°18'16"	12°28'33"	Régie Faréye	CT3	1679	14/03/2013	1679	32,9	7,6	415	35,64	14,86	83,31	5,22	106,87	36,58	0,16	0	165	-5,89	-39,88	0,34
22	NERDOS22	03°34'23"	12°05'57"	Malamkadi	CT3	13,37	15/03/2013	145	29,1	6,8	135	27,76	1,15	2,22	1,658	1,38	2,28	6,61	0	85	-4,67	-26,82	3,02
23	NERDOS23	03°36'16"	12°06'33"	Faska	CT3	33,53	15/03/2013	436	32	6,9	301	28,50	11,01	45,76	3,625	28,52	39,81	2,00	0	150	-6,50	-42,03	0,02
24	NERDOS24	03°32'11"	12°08'18"	Dankouna	CT3	4	15/03/2013	550	30	6	381	52,70	18,54	14,68	29,855	45,66	26,05	176,32	0	22	-4,89	-27,25	3,37
31	NERDOS31	03°20'09"	11°53'45"	Tara	CT3	15	16/03/2013	168	32,8	5,8	151,52	15,515	4,294	6,088	15,217	8,09	3,952	40,762	0	55	-4,69	-25,75	6,89
32	NERDOS32	03°20'20"	11°59'41"	Tanda	CT3	21,08	16/03/2013	72	32,6	6	66,29	7,934	1,44	7,908	2,784	2,058	7,729	5,291	0	35	-4,42	-24,37	5,02
35	NERDOS35	03°17'42"	12°06'37"	Sia	CT3	4,3	16/03/2013	76	34,5	5,5	70,078	5,944	1,619	6,397	3,696	5,268	1,473	16,821	0	25	-4,42	-23,09	3,97
38	NERDOS38	03°03'52"	12°13'05"	Koulou	CT3	4,16	16/03/2013	539	30,5	7,25	385	27,005	27,79	53,005	3,4	18,635	11,755	6,45	60	213,5	-4,13	-23,57	4,25
39	NERDOS39	03°03'37"	12°24'13"	Sambéra Zeno	CT3	14,62	16/03/2013	320	32,2	5,9	210,469	13,88	3,708	44,724	1,364	68,754	7,534	1,194	0	52	-5,48	-32,16	1,97
40	NERDOS40	03°06'45"	12°28'07"	Kobti Tanda	CT3	17,21	16/03/2013	390	34,8	6,5	273,845	15,49	5,325	62,29	2,15	24,09	6,09	142,13	0	35	-4,04	-26,33	3,85
41	NERDOS41	03°12'49"	12°35'59"	Marigouna	CT3	69,92	17/03/2013	51	31,2	5,5	651,122	44,11	16,64	53,03	119,88	87,015	50,27	134,255	0	155	-3,66	-24,28	0,59
43	NERDOS43	03°03'42"	12°28'08"	Bani Kané Issa	CT3	16,05	17/03/2013	721	31,2	6	457,64	25,93	4,99	114,065	1,16	163,29	34,775	14,93	0	61	-4,76	-29,29	3,92
46	NERDOS46	02°45'17"	12°27'18"	Brigambou	CT3	550	17/03/2013	550	33	7,5	455,455	27,25	55,38	30,2	3,045	3,61	29,455	20,055	60	244	-2,67	-19,69	2,00
48	NERDOS48	02°46'25"	12°35'01"	Sakala Gongá	CT3	38,18	17/03/2013	36	30,8	6	43,68	7,006	1,204	1,412	1,15	5,946	2,503	3,367	0	18	-5,19	-29,53	5,75
49	NERDOS49	02°35'57"	12°53'04"	Bouringa Béri	CT3	3,6	17/03/2013	170	33,5	7	151,52	12,744	5,568	14,532	1,334	8,514	23,336	17,767	0	55	-4,67	-27,64	2,89
50	NERDOS50	02°51'44"	12°54'35"	Fabiéji	CT3	29,86	17/03/2013	19	32,2	6	26,205	4,412	1,052	2,131	0,487	1,702	0,889	2,799	0	15,5	-4,55	-26,86	3,14
5	NERDOS5	03°43'22"	12°45'14"	Yéldou	CH	13/03/2013	335	35,2	7,8	233	7,13	7,18	49,12	5,33	16,17	3,10	4,07	0	145	-7,23	-50,51	0,86	
8	NERDOS8	03°32'58"	12°37'07"	Dioundiou	CH	13/03/2013	975	34	8,5	688	26,40	8,49	159,45	2,80	140,999	64,12	0,78	0	250	-7,76	-54,11	0,56	
20	NERDOS20	03°35'52"	11°59'25"	Bengou	CI	11,07	15/03/2013	108	35,8	6	98	16,34	2,64	2,40	0,537	1,53	17,81	0,21	0	48	-4,40	-25,11	0,47
21	NERDOS21	03°33'10"	12°03'31"	Bana	CI	7,82	15/03/2013	752	34,1	8	518	41,45	10,06	113,67	5,54	97,04	59,99	2,96	0	200	-7,68	-54,44	0,17
25	NERDOS25	03°34'55"	12°15'33"	Yéldou	CH	11,7	15/03/2013	134	33,9	5,5	97	7,32	4,63	8,06	3,896	4,88	21,74	19,90	0	22	-4,49	-26,51	2,30
26	NERDOS26	03°35'24"	11°53'06"	Sabon Birni	CI	18,2	15/03/2013	41	31,6	5,6	52	4,43	0,97	6,79	1,943	1,74	0,79	13,80	0	25	-4,00	-26,31	1,35

GESTION INTÉGRÉE ET DURABLE DES SYSTÈMES AQUIFÈRES ET DES BASSINS PARTAGÉS DE LA RÉGION DU SAHEL

N°	Echantillon	LAT	LON	Localité	AQUIFERE	Profondeur d'échantillonnage (N.S)	Date de prélèvement	Conductivité µs/cm	Température	pH	TDS_mg/l	Ca_mg/l	Mg_mg/l	Na_mg/l	K_mg/l	Cl_mg/l	SO ₄ _mg/l	NO ₃ _mg/l	HCO ₃ _mg/l	SiO ₂	δ ¹⁸ O (‰ vs Smow)	δ ² H (‰ vs Smow)	³ H (TU)
41	NERDOS0 50	12,55	2,74	Bossia	Quaternaire	9,4	2014/01/31	1231,0	27,1	7,5	856,7	108,2	64,5	18,5	16,3	106,0	17,3	269,7	256,2	22,8	-24,4	-4,4	2,4
42	NERDOS0 52	12,45	2,75	Brigambou	Quaternaire		2014/01/31	601,0	30,0	6,2	433,7	33,6	47,3	0,0	1,8	3,8	34,5	20,9	292,0	25,7	-16,0	-2,0	
43	NERDOS0 54	12,87	2,96	Kankandi	Quaternaire	4,0	2014/01/31	433,0	32,1	6,1	226,1	13,7	7,2	35,1	15,3	46,2	24,8	71,9	12,2	26,8	-20,9	-3,4	5,7
46	NERDOS0 22	11,99	3,29	Barifo Kambou	Quaternaire	3,56	2014/01/26	1024	27,4	7,2	703	47,25	29,75	89,60	19,70	131,50	40,25	88,65	256	46,42	-18,8	-3,0	3,3
33	NERDOS0 4	12,48	3,30	Régie farrey	CT2		2014/01/22	612,0	31,0	6,5	460,1	34,2	13,5	94,8	7,0	101,1	35,3	1,3	173,0	7,4	-39,5	-6,1	0,7
34	NERDOS0 5	12,53	3,32	Farrey	CT2	33,2	2014/01/22	1048,0	29,7	6,9	605,6	34,2	17,8	107,4	6,7	91,5	122,5	0,5	225,0	12,3	-44,4	-6,5	0,7
35	NERDOS0 7	12,70	3,56	Zabori	CT2	19,6	2014/01/23	1071,0	31,0	8,1	721,4	29,0	8,2	203,9	0,5	154,6	56,3	0,6	268,4	4,6	-53,3	-7,2	
36	NERDOS0 31	12,69	3,12	Tokoye Bangou	CT2	40,2	2014/01/27	1957,0	31,2	6,8	1013,2	74,3	46,7	176,6	13,1	418,7	106,0	1,0	176,9	7,5	-49,9	-6,7	0,7
37	NERDOS0 40	12,38	3,34	Bela 2	CT2		2014/01/29	2700,0	31,1	7,5	1593,2	61,0	22,9	471,2	9,2	585,5	167,7	1,2	274,5	4,9	-57,4	-7,7	0,7
48	NERDOS0 37	12,18	3,46	Malgorou	CT2		2014/01/28	272	33,8	6	206	11,57	3,36	47,11	1,82	14,80	40,44	1,84	85	8,58	-40,3	-5,8	0,1
49	NERDOS0 39	12,34	3,42	Kawara Gohé	CT2		2014/01/29	2160	31	6,9	1248	67,50	12,80	365,46	9,50	475,60	145,40	0,70	170,8	6,71	-49,6	-7,3	0
10	NERDOS0 18	11,71	3,63	Dolé	CT2-CT3		2014/01/25	385,0	31,2	7,0	259,4	16,4	3,1	53,5	8,3	31,8	26,2	0,2	120,0	17,6	-28,7	-4,5	1,0
19	NERDOS0 29	12,36	3,05	Sambera Alfa	CT2-CT3	15,1	2014/01/27	705,0	31,0	6,5	368,4	23,2	5,3	85,5	4,7	147,4	35,0	40,3	27,0	5,3	-28,0	-4,4	2,9
24	NERDOS0 35	12,31	3,29	Maikada	CT2-CT3		2014/01/28	300,0	30,7	5,5	232,8	32,9	4,5	30,0	1,3	63,8	20,8	0,2	79,3	5,5	-37,1	-5,3	0,7
25	NERDOS0 36	12,25	3,37	Adiga Kaboye	CT2-CT3	17,1	2014/01/28	113,0	32,3	5,7	73,2	4,6	1,7	11,3	2,5	3,8	3,2	39,4	6,7	9,5	-29,7	-4,7	6,1
1	NERDOS0 1	12,71	3,40	Mamane Dey	CT3	21,7	2014/01/22	65,0	31,6	5,5	51,6	4,4	0,7	10,0	1,3	8,3	0,9	9,2	17,0	6,0	-30,6	-5,1	0,8
2	NERDOS0 2	12,70	3,33	Gabikoy Dey	CT3	41,7	2014/01/22	37,0	31,1	5,4	89,6	15,7	1,9	5,4	1,0	4,2	0,3	1,2	60,0	6,0	-31,4	-5,0	1,2
3	NERDOS0 3	12,54	3,25	Guitodo	CT3	69,0	2014/01/22	48,0	31,2	6,0	47,1	8,5	0,7	2,6	0,8	2,5	0,7	1,0	30,5	7,8	-28,6	-4,9	0,8
4	NERDOS0 10	12,62	3,70	Koukadou	CT3	38,2	2014/01/23	27,0	30,7	5,8	24,6	2,2	0,9	2,7	1,2	1,5	0,1	3,7	12,2	6,5	-28,0	-4,8	0,9
5	NERDOS0 11	12,45	3,54	Rouwan Chama	CT3	4,3	2014/01/24	448,0	29,1	6,2	314,7	25,7	8,4	34,0	35,8	39,3	17,9	107,0	46,5	12,7	-17,4	-3,0	2,6
6	NERDOS0 13	12,29	3,52	Dangnakou	CT3	3,7	2014/01/24	679,0	32,6	6,9	463,4	24,9	9,2	89,9	4,1	68,8	68,3	0,6	197,5	6,8	-49,3	-6,9	0,7
7	NERDOS0 14	12,18	3,37	Banikoubay	CT3	6,6	2014/01/24	188,0	29,0	6,0	133,9	13,0	2,5	21,8	2,1	10,3	14,6	51,6	18,0	12,8	-27,2	-4,5	1,6
8	NERDOS0 16	11,93	3,59	Goro Kondo	CT3	3,4	2014/01/25	144,0	29,3	6,1	134,2	18,0	2,2	14,5	2,6	10,0	9,1	4,6	73,2	4,5	-28,7	-4,6	0,9
9	NERDOS0 17	11,84	3,62	Gamzaki	CT3	3,2	2014/01/25	165,0	29,6	6,4	119,8	10,3	4,9	11,5	9,8	11,4	7,1	36,7	28,0	9,4	-26,2	-4,6	3,3
11	NERDOS0 19	11,79	3,56	Gatawani	CT3	4,3	2014/01/25	235,0	28,4	6,1	117,3	13,8	4,2	11,0	8,2	22,2	5,7	15,7	36,6	26,7	-21,5	-3,1	2,8
12	NERDOS0 20	11,86	3,50	Kessa	CT3	3,9	2014/01/25	121,0	28,2	6,2	70,8	5,6	1,2	11,9	3,1	13,9	6,3	4,5	24,4	10,9	-25,8	-3,9	2,2
13	NERDOS0 21	11,96	3,34	Koaga	CT3	23,3	2014/01/26	83,0	28,8	6,0	64,3	6,9	2,1	5,5	4,1	2,3	1,5	11,4	30,5	9,1	-23,5	-3,9	3,2
14	NERDOS0 23	12,09	3,32	Zaroumey Koara	CT3		2014/01/26	292,0	31,0	7,1	274,0	41,0	3,9	18,3	19,5	15,8	29,2	6,1	140,3	21,9	-27,8	-4,7	0,8
15	NERDOS0 24	12,12	3,25	Chantier Maikassoua	CT3		2014/01/26	135,0	32,8	6,0	97,6	8,2	3,2	8,4	5,9	8,9	2,7	29,8	30,6	32,0	-25,1	-4,1	2,1
16	NERDOS0 25	12,19	3,19	Tiakoy Koara	CT3		2014/01/26	59,0	30,0	6,2	62,2	5,3	0,8	7,8	2,6	3,3	0,8	11,1	30,5	14,9	-28,2	-4,1	0,8
17	NERDOS0 26	12,25	3,06	Bani Gorou	CT3		2014/01/26	81,0	29,4	6,5	65,1	4,6	1,9	8,9	2,8	6,3	3,0	9,6	28,0	7,7	-23,6	-3,8	3,4
18	NERDOS0 28	12,35	2,94	Koumbougoni Koara	CT3	6,5	2014/01/27	174,0	29,9	6,4	124,4	14,8	4,6	10,9	6,2	11,8	5,6	37,4	33,0	7,3	-25,1	-4,0	3,3
20	NERDOS0 30	12,51	3,17	Loufari Koara	CT3	22,6	2014/01/27	296,0	30,0	6,5	196,3	11,2	3,3	46,6	3,9	44,6	6,0	56,6	24,0	7,1	-29,0	-4,6	2,1
21	NERDOS0 32	12,58	3,13	Dargol	CT3	47,5	2014/01/27	53,0	30,1	6,2	48,1	3,5	0,9	8,6	0,9	7,3	0,9	1,6	24,4	8,8	-28,9	-5,1	1,3
22	NERDOS0 33	12,38	3,20	Mayara koara	CT3	31,5	2014/01/28	105,0	30,8	5,6	65,0	3,5	1,7	11,7	0,8	1,9	3,1	41,1	1,2	6,8	-24,6	-4,3	4,8
23	NERDOS0 34	12,31	3,19	Fakara beri	CT3	48,0	2014/01/28	24,0	30,6	5,5	163,9	33,1	2,0	3,7	1,5	1,4	0,1	2,1	120,0	2,5	-29,3	-4,8	1,6
26	NERDOS0 38	12,07	3,49	Kagna Kagna	CT3	26,9	2014/01/29	57,0	31,2	6,0	92,0	19,6	1,0	1,8	0,9	1,1	5,5	1,2	61,0	7,7	-27,2	-4,6	1,1
27	NERDOS0 42	12,75	3,03	Haname Tombo	CT3	42,7	2014/01/29	45,0	29,6	6,0	45,9	4,1	0,8	5,2	1,9	2,4	0,9	6,2	24,4	5,5	-25,7	-4,4	1,3
28	NERDOS0 45	12,53	2,90	Saboula	CT3	5,7	2014/01/30	100,0	30,6	6,3	75,1	7,6	2,9	6,4	1,9	3,7	2,2	26,0	24,4	16,1	-23,6	-3,7	3,4
29	NERDOS0 46	12,69	2,81	Mallam Koara	CT3	16,4	2014/01/30	202,0	31,3	6,0	129,4	15,6	4,6	15,3	1,4	16,7	0,2	63,3	12,2	9,1	-26,8	-4,3	2,2
30	NERDOS0 47	12,75	2,70	Talwal	CT3	40,9	2014/01/30	85,0	31,7	5,6	67,4	8,2	2,2	6,2	1,3	3,2	0,1	31,2	15,0	3,2	-25,5	-4,1	3,1
31	NERDOS0 51	12,53	2,78	Kokorbé Bangou	CT3	36,4	2014/01/31	36,0	28,8	6,0	118,9	23,9	1,6	2,2	1,5	1,7	0,1	2,5	85,4	19,6	-27,1	-4,4	3,7
32	NERDOS0 52	12,75	2,87	Belandé	CT3	6,4	2014/01/31	202,0	29,4	6,0	210,9	28,2	3,7	20,3	2,6	8,7	0,2	74,0	73,2	26,2	-22,7	-3,4	3,5
44	NERDOS0 12	12,42	3,52	Gueza Bissala	CT3	21,72	2014/01/24	791	31,4	5,8	532	31,72	11,97	119,98	4,18	36,43	258,00	45,25	24,4	5,08	-26,1	-4,1	3,9
47	NERDOS0 27	12,32	3,07	Kayan Kaina	CT3	14,65	2014/01/27	678	31,3	6,6	368	34,45	9,35	77,30	4,35	146,73	27,57	56,52	12,2	5,5	-30,7	-4,9	1,8
50	NERDOS0 41	12,82	3,02	Gorou Yeno	CT3	26,48	2014/01/29	49	30,2	5,5	34	2,57	0,98	4,72	0,61	1,99	7,13	3,89	12,2	7,43	-28,7	-4,4	1,8
51	NERDOS0 43	12,73	2,92	Tour Tour Koara	CT3	2,12	2014/01/29	166	33,1	7	111	15,06	3,30	7,90	3,48	8,11	3,50	51,56	18,3	12,73	-20,8	-3,6	2,9
52	NERDOS0 44	12,88	2,60	Bouringa Béri	CT3	3,6	2014/01/30	162	31,6	6,5	98	9,63	4,28	13,89	1,52	10,45	24,99	15,30	18,3	12,86	-23,6	-3,9	2,6
53	NERDOS0 48	12,64	2,65	Koumbourfou	CT3	35,75	2014/01/30	60	32,4	5,8	76	7,61	4,77	2,57	2,24	1,15	1,62	0,92	54,9	6,42	-31,3	-5,1	0,3
54	NERDOS0 49	12,61	2,69	Zou Koara	CT3		2014/01/30	102	32,2	6	82	11,68	2,86	1,76	2,43	0,96	0,80	12,23	48,8	8,37	-25,5	-4,3	2,3
38	NERDOS0 6	12,62	3,55	Dioundiou	CIH		2014/01/23	939,0	26,8	8,0	645,6	25,6	7,8	175,2	4,7	128,3	59,9	0,4	231,8	11,0	-56,9	-7,7	0,8
39	NERDOS0 8	12,72	3,63	Angoal Laboua	CIH		2014/01/23	459,0	31,7	8,0	358,8	14,4	6,1	79,8	5,0	26,8	0,5	0,5	225,7	6,9	-51,4	-7,5	0,7
40	NERDOS0 9	12,70	3,71	Kizamou	CIH		2014/01/23	833,0	32,7	7,9	499,9	22,6	7,5	104,5	4,6	70,0	77,5	3,2	210,0	4,0	-56,8	-7,7	1,0
45	NERDOS0 15	12,02	3,57	Hamdallaye Bengou	CIH		2014/01/24	840	31,1	6,6	548	44,29	7,25	129,75	3,81	137,52	66,13	0,17	158,6	5,5	-53,1	-7,4	0,1

Données de terrain et données hydrochimiques et isotopiques présentées pour le bassin d'Iullemeden au Niger (campagne 3)

N°	Localité	Aquifère	LON	LAT	T°C	pH	CE	Ca_mg/l	Mg_mg/l	Na_mg/l	K_mg/l	Fe3	Fe2	HCO ₃ _mg/l	SO ₄ _mg/l	Cl_mg/l	NO ₃ _mg/l	NO2	F	CF
45	Diki Koara tagui	Quaternaire	3,13	13,42	32,2	6,5	137,0	5,6	1,0	19,4	3,6	0,0	0,0	39,0	18,0	2,0	11,0	0,0	0,4	
4	Gagila 1	CT2	4,01	13,44	32,2	6,0	80,0	5,6	2,2	6,0	1,4	0,0	0,0	6,1	1,0	0,0	40,9	0,1	0,5	
5	Majarkola	CT2	4,03	13,81	31,0	6,4	329,0	22,4	4,9	32,0	4,9	0,0	0,0	68,3	27,0	12,0	52,8	0,3	0,4	0,0
6	Tombo bouya	CT2	4,13	13,16	31,1	6,0	43,0	3,6	1,2	4,6	1,0	0,0	0,0	9,8	6,0	2,0	8,8	0,0	0,3	3,0
7	Kore mairoua	CT2	3,90	13,30	32,6	6,4	146,0	4,8	2,9	17,8	3,1	0,2	0,1	50,0	12,0	3,0	5,7	0,0	0,4	0,0
8	Kaini Kougoum	CT2	4,03	13,33	29,1	6,0	38,0	2,8	0,5	3,0	1,2	0,0	0,0	15,9	1,0	0,0	4,4	0,0	0,7	0,0
9	Kola Gobirawa	CT2	3,87	13,19	32,4	6,9	313,0	44,0	3,9	19,8	1,4	0,0	0,0	126,9	12,0	20,0	24,6	0,1	0,1	4,0
11	Malabawa	CT2	3,96	12,94	29,5	6,9	154,0	11,2	2,7	6,0	1,8	0,1	0,0	42,7	9,0	3,0	10,1	0,1	0,5	0,0
12	Guidadam	CT2	4,04	12,94	29,5	6,1	90,0	7,2	1,9	8,3	1,3	0,2	0,1	29,3	9,0	2,0	9,2	0,0	0,4	0,0
15	Sakoara peulh	CT2	3,87	12,71	32,4	6,5	105,0	8,0	1,0	9,5	1,1	0,1	0,0	31,7	2,0	6,0	10,1	0,0	0,4	0,0
16	zabori	CT2	3,56	12,70	32,0	7,9	1096,0	36,0	12,6	182,3	6,3	0,1	0,0	356,2	71,0	156,0	2,2	0,0	0,1	0,0
17	Garin Zabarmawa	CT2	3,68	12,58	31,1	6,9	117,0	14,0	5,6	2,1	1,0	0,0	0,0	43,9	2,0	8,0	13,2	0,0	0,2	0,0
18	Gomboro	CT2	3,62	12,69	30,2	6,6	139,0	6,4	1,0	14,7	6,2	0,1	0,0	56,1	0,0	12,0	0,0	0,0	0,1	2,0
10	Tibiri	CT2-3	4,00	13,11	29,6	7,7	793,0	14,4	2,4	146,1	11,5	0,0	0,0	317,2	96,0	28,0	3,1	0,0	0,1	0,0
1	Garin zangui	CT3	3,97	13,84	32,5	6,3	220,0	13,6	4,6	18,0	4,0	0,0	0,0	79,3	10,0	12,0	3,5	0,0	0,3	1,0
2	Noufawa	CT3	4,00	13,52	32,4	6,4	64,0	5,6	1,7	4,0	0,8	0,0	0,0	20,7	1,0	2,0	11,9	0,0	0,1	0,0
3	Kodey	CT3	3,72	13,60	33,1	6,0	29,0	1,6	0,5	5,3	0,6	0,0	0,0	11,0	6,0	0,0	4,4	0,0	0,4	1,0
19	Kizamou	CT3	3,71	12,69	33,7	7,8	848,0	34,4	9,0	156,3	7,2	0,1	0,0	226,9	128,0	62,0	19,8	0,0	0,4	0,0
20	Garin Na Allay	CT3	3,41	12,41	29,6	7,0	581,0	33,2	3,6	57,0	5,6	0,0	0,0	136,6	33,0	51,0	4,8	0,0	0,5	0,0
21	Gueza Bissala	CT3	3,53	12,43	30,1	8,0	526,0	32,0	4,9	48,0	5,6	0,1	0,0	145,2	0,0	63,0	4,4	0,0	0,4	0,0
22	Hama Mara	CT3	3,59	12,56	30,0	5,5	71,0	4,4	1,2	5,0	1,2	0,0	0,0	25,6	2,0	1,0	7,5	0,0	0,4	0,0
23	Dankouna	CT3	3,54	12,14	30,0	7,0	571,0	26,4	4,4	34,0	5,6	0,1	0,0	103,7	24,0	20,0		0,0	0,0	2,0
24	Gatawani	CT3	3,56	11,79	30,3	6,4	279,0	15,2	8,3	24,0	8,3	0,0	0,0	56,1	9,0	14,0	67,3	0,2	0,3	3,0
25	Hamdallaye bengou	CT3	3,57	12,02	31,1	7,1	856,0	38,4	14,6	135,0	10,3	0,1	0,0	158,6	86,0	166,0	3,1	0,0	0,2	0,0
26	Sabon Birni	CT3	3,59	11,89	30,2	6,1	38,0	3,2	1,0	4,0	1,1	0,0	0,0	8,5	10,0	1,0	5,3	0,0	0,4	1,0
27	Albarkaizé	CT3	3,23	12,09	31,8	6,3	122,0	4,8	1,9	19,0	4,1	0,0	0,0	31,7	14,0	2,0	24,6	0,0	0,2	1,0
28	Koulou	CT3	3,06	12,22	30,6	7,3	669,0	44,8	2,4	98,3	7,1	0,1	0,0	200,1	96,0	32,0	18,5	0,0	0,5	0,0
29	Kopti Tanda	CT3	3,11	12,47	34,8	6,5	390,0	18,4	3,4	43,2	3,5	0,1	0,0	125,7	12,0	0,0	48,4	0,0	0,2	0,0
30	Bombodji	CT3	2,94	12,34	31,1	7,0	364,0	16,8	7,3	43,1	7,1	0,1	0,0	117,1	43,0	12,0	30,8	0,0	0,2	
31	Brigambou	CT3	2,75	12,45	33,0	7,5	550,0	38,4	3,9	47,2	8,6	0,0	0,0	142,7	51,0	23,0	39,6	0,0	0,1	3,0
32	Saboula	CT3	2,89	12,53	31,8	6,6	103,0	4,8	1,9	11,3	2,3	0,0	0,0	28,1	16,0	3,0	8,8	0,0	0,1	
33	Sakala Gongga	CT3	2,77	12,60	30,8	6,0	36,0	1,6	1,0	6,1	1,7	0,0	0,0	12,2	5,0	1,0	8,4	0,0	0,2	
34	Fabidji	CT3	2,86	12,91	31,2	5,9	20,0	1,2	0,5	3,1	0,4	0,0	0,0	7,3	3,0	0,0	4,4	0,0	0,1	
35	Gorou yéno	CT3	3,02	12,82	30,2	5,5	49,0	3,2	1,0	6,2	1,2	0,0	0,0	14,6	8,0	3,0	3,5	0,0	0,2	
36	Tihoré	CT3	2,63	12,87	28,6	5,8	51,0	4,8	1,0	8,0	2,3	0,0	0,0	9,8	14,0	3,0	13,2	0,0	0,2	
37	Mingui	CT3	2,68	13,05	31,1	7,1	1177,0	46,8	5,6	181,0	10,5	0,4	0,1	257,4	206,0	96,0	4,0	0,0	1,1	
38	Kodjolé	CT3	2,67	13,20	29,6	7,6	1190,0	43,2	4,9	187,7	11,4	0,1	0,1	263,5	204,0	102,0	9,2	0,0	1,1	
39	Kofo	CT3	2,73	13,16	30,0	7,3	1126,0	52,8	6,8	169,0	10,3	0,2	0,1	270,8	190,0	92,0	2,6	0,0	1,1	
40	Sirignere peulh	CT3	2,87	13,30	30,5	6,3	68,0	4,8	0,5	8,3	2,8	0,1	0,0	22,0	12,0	0,0	5,3	0,0	0,1	
41	Zagoré	CT3	2,84	13,23	30,3	6,1	40,0	3,2	1,0	4,8	1,1	2,7	1,4	14,6	9,0	1,0	2,2	0,0	0,1	
42	Oude Seybou	CT3	2,93	13,30	30,6	6,9	148,0	16,0	0,7	19,7	1,4	0,1	0,0	40,3	32,0	6,0	11,0	0,0	0,4	
43	Boulaga Zarma	CT3	3,05	13,59	30,7	5,5	156,0	12,8	1,0	17,8	3,8	0,1	0,0	26,8	8,0	2,0	62,4	0,0	0,3	
44	Safa Dougoumi	CT3	2,93	13,45	30,7	6,5	104,0	9,6	1,5	14,1	3,1	0,1	0,0	28,1	21,0	4,0	13,2	0,0	0,2	
46	Bangou Fada Rouzou	CT3	3,56	13,29	29,8	5,6	40,0	2,4	1,2	5,9	0,3	0,0	0,0	12,2	7,0	0,0	10,1	0,0	0,3	
47	Ko Beri	CT3	3,36	13,22	29,2	5,9	29,0	1,6	0,2	6,1	0,2	0,0	0,0	11,0	6,0	0,0	3,5	0,0	0,2	
48	Goroubankassam	CT3	3,47	13,10	32,2	5,8	36,0	4,0	0,5	4,3	0,3	0,0	0,0	17,1	4,0	0,0	3,5	0,0	0,2	
49	Kargui Bangou	CT3	3,50	12,96	30,9	5,6	51,0	3,2	2,9	7,3	0,7	0,1	0,0	24,4	6,0	0,0	10,6	0,0	0,2	
50	Sakadamna	CT3	3,69	13,27	31,7	6,7	130,0	5,6	1,5	14,3	2,1	1,0	0,0	36,6	18,0	2,0	8,8	0,0	0,3	
51	Bourgami Peulh	CT3	3,62	12,86	28,8	5,7	13,0	0,8	0,2	1,5	0,2	0,0	0,0	6,1	0,0	0,0	1,3	0,0	0,5	
52	Garbey Tombo	CT3	3,24	12,88	31,8	6,3	27,0	2,4	0,5	5,1	0,8	0,0	0,0	7,3	4,0	0,0	11,0	0,0	0,2	
53	Mamaga	CT3	3,40	12,85	28,3	8,0	163,0	11,2	1,0	14,3	2,1	0,1	0,1	37,8	22,0	4,0	6,6	0,0	0,2	
13	Angoal Bozari	CIH	3,84	12,82	28,3	6,3	76,0	9,6	0,5	8,0	4,7	0,1	0,0	22,0	14,0	4,0	10,6	0,0	0,3	0,0
14	Angoal toudou	CIH	3,96	13,00	32,1	5,8	44,0	4,0	1,0	5,1	1,0	0,0	0,0	14,6	6,0	3,0	3,5	0,0	0,2	0,0

Données de terrain et données hydrochimiques et isotopiques produites dans le cadre du projet RAF/7/011
sur le bassin d'Iullemeden au Nigeria (campagne 1)

Site	Sample_Code	Aquifer	Aquifer 2	Latitude	Longitude	Altitude	Type	Sampling_Date	EC (µs/cm)	Temp	pH	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Li	B	Si	Fe	NH ₄	F	PO ₄	Chem_Lab	¹⁸ O	² H	Si_Lab	³ H	³ H_ERR	³ H_Lab
Gwandu	NIR-IAS-36	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene)CT	12,51	4,63	272	GBW	2013-07-26	11	33,0	4,4	0,54	0,15	1,97	0,54	0,54	0,65	5,61	1,49	3,623	9,759	0,0036	0,32	<LO	0,69	CNESTEN	-4,22	-27,32	CNESTEN	-0,16	0,17	CNESTEN	
Kalgo(Police Barrack)	NIR-IAS-39	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene)CT	12,33	4,20	212	GBW	2013-07-26	30	32,0	5,4	0,4	0,15	1,24	1,7	0,46	2,56	3,39	1,09	4,24	4,978	14,79	0,15	0,27	<LO	*	CNESTEN	-4,53	-26,8	CNESTEN	1,15	0,18	CNESTEN
Birin Kebbi	NIR-IAS-40	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene)CT	12,46	4,21	245	GBW	2013-07-26	270	32,0	6,3	17,67	11,02	8,83	5,9	4,68	18,69	118,97	2,61	-0,727	11,08	<LO	<LO	0,34	0,7	*	CNESTEN	-6,46	-47,55	CNESTEN	-0,32	0,14	CNESTEN
Goru(Birin Kebbi)	NIR-IAS-41	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene)CT	12,39	4,20	217	GBW	2013-07-27	98	29,7	5,4	3,37	1,25	6,32	2,83	1,49	ND	7,32	32,99	3,445	<LO	9,021	0,296	0,35	<LO	*	CNESTEN	-3,2	-22,59	CNESTEN	2,56	0,2	CNESTEN
Dageni(Primary School)	NIR-IAS-43	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene)CT	12,55	4,40	222,3	GBW	2013-07-27	120	32,0	5,9	7	2,71	2,73	5,63	3,66	0,06	1,95	49,84	21,86	6,169	12,05	0,3955	0,25	0,08	*	CNESTEN	-3,75	-25,35	CNESTEN	2,1	0,18	CNESTEN
Alwasa(Police Outpost)	NIR-IAS-44	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene)CT	12,62	4,44	221	GBW	2013-07-27	80	31,0	5,6	4,1	1,79	2,79	2,76	0,83	6,77	24,16	0,96	19,61	23,63	8,785	3,099	0,26	0,29	0,53	CNESTEN	-4,71	-30,65	CNESTEN	-0,05	0,15	CNESTEN
Karama Damba	NIR-IAS-38	Gundumi-Ilo	Late Cretaceous(Upper Jurrassic) CI	11,43	4,39	206	GWD	2013-07-26	60	31,1	4,8	3,53	0,83	3,68	2,22	0,92	0,18	10,98	17,04	4,585	2,036	11,38	0,6297	0,31	0,07	*	CNESTEN	-3,41	-21,38	CNESTEN	1,97	0,18	CNESTEN
Tangaza	NIR-IAS-04	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene)CT	13,37	4,94	255	GBW	2013-07-23	400	32,7	4,6	1,35	0,53	0,8	1,7	0,37	3,98	7,32	0,2	6,282	2,584	5	0,0289	0,34	0,12	*	CNESTEN	-5,46	-32,85	CNESTEN	-0,25	0,12	CNESTEN
Balle	NIR-IAS-05	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene)CT	13,47	4,68	228	GBW	2013-07-23	170	32,6	6,2	6,54	9,93	3,98	5,04	2,93	16,47	61,01	1,12	0,385	21,28	8,562	2,749	0,34	0,22	0,57	CNESTEN	-7,16	-46,23	CNESTEN	-0,42	0,14	CNESTEN
Tumbulla	NIR-IAS-08	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	13,19	5,64	279	GWD	2013-07-24	100	31,0	5,4	7,09	0,48	10,44	2,37	2,31	0,98	30,99	19,66	13,32	0,655	9,887	0,3089	0,24	0,07	ND	CNESTEN	-4,86	-28,32	CNESTEN	0,02	0,14	CNESTEN
Gundumi	NIR-IAS-09	Gundumi-Ilo	Late Cretaceous(Upper Jurrassic) CI	13,13	6,01	294	GBW	2013-07-24	80	31,1	4,9	2,79	0,92	5,93	2,35	3,54	0,51	20,26	9,2	10,65	3,644	9,079	0,013	0,31	0,08	*	CNESTEN	-5,37	-32,87	CNESTEN	0,11	0,16	CNESTEN
Gidan Sale	NIR-IAS-10	Gundumi-Ilo	Late Cretaceous(Upper Jurrassic) CI	13,18	6,14	332,2	GBW	2013-07-24	80	32,2	5,5	2,26	0,69	4,41	3,01	0,95	0,29	17,81	10,29	5,544	8,516	10,11	0,3168	0,28	0,1	*	CNESTEN	-5,73	-32,28	CNESTEN	-0,05	0,13	CNESTEN
Isa(Close to Izala Mosque)	NIR-IAS-13	Gundumi-Ilo	Late Cretaceous(Upper Jurrassic) CI	13,20	6,40	316	GBW	2013-07-24	360	31,7	5,7	17,93	7,75	23,2	6,01	26,81	6,4	75,65	49,76	1,372	6,637	17,57	0,0192	0,39	0,23	*	CNESTEN	-3,65	-19,96	CNESTEN	3,59	0,23	CNESTEN
Sabon Birni (Rima River)	NIR-IAS-15	Surface Water	Surface Water	13,57	6,33	305	SRI	2013-07-24	140	32,0	7,0	2,39	0,91	4,55	4,01	1,72	1,85	21,96	6,52	10,54	0,644	20,34	7,498	0,32	0,4	*	CNESTEN	-2,47	-14,84	CNESTEN	3,25	0,19	CNESTEN
Goronyo Dam	NIR-IAS-18	Reservoir	Reservoir	13,50	5,88	287	SRE	2013-07-24	70	29,0	6,6	4,29	1,52	6,45	4,93	2,17	2,07	37,09	7,06	10,55	6,019	35,45	12,41	0,29	0,43	*	CNESTEN	-1,93	-9,49	CNESTEN	2,88	0,21	CNESTEN
Rima River(along Illela-Sokoto Rd)	NIR-IAS-27	Surface Water	Surface Water	13,12	5,25	242	SRI	2013-07-25	100	29,7	6,7	10,38	2,93	6,82	5,03	3,87	2,32	57,35	4,73	8,684	4,38	26,89	9,291	0,22	0,47	*	CNESTEN	-1,54	-12,6	CNESTEN	3,27	0,23	CNESTEN
River Sokoto (along Illela-Sokoto Rd)	NIR-IAS-28	Surface Water	Surface Water	13,08	5,26	247	SRI	2013-07-25	70	30,2	7,2	7,29	2,14	4,7	4,65	2,32	2,07	42,95	5,95	10	4,99	35,02	11,11	0,27	0,31	*	CNESTEN	-3,49	-21,3	CNESTEN	2,65	0,2	CNESTEN
Birin Kebbi(Water board intake point)	NIR-IAS-42	Rima River	Rima River	12,48	4,20	198	SRI	2013-07-27	110	28,0	6,1	10,23	3,06	6,26	5,85	6,39	4	58,33	2,2	8,746	6,019	25,13	7,971	0,27	0,37	*	CNESTEN	-1,05	-4,62	CNESTEN	2,54	0,2	CNESTEN
Argungu(River Zamfara)	NIR-IAS-46	Surface Water	Surface Water	12,75	4,52	209	SRI	2013-07-27	100	29,0	6,6	6,74	2,06	6,59	6,25	4,43	2,66	53,69	2,82	9,382	4,347	28,94	9,941	0,28	0,4	*	CNESTEN	-1,93	-12,12	CNESTEN	3,26	0,21	CNESTEN
Goronyo Town	NIR-IAS-20	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	13,44	5,67	281	GBW	2013-07-24	237	32,6	6,8	13,09	3,39	19,23	9,14	3,06	22,43	88,34	1,47	1,356	1,875	<LO	<LO	0,31	0,21	1,06	CNESTEN	-6,51	-48,26	CNESTEN	-0,01	0,16	CNESTEN
Marmona	NIR-IAS-21	Sokoto group	Tertiary (Upper Paleocene)	13,22	5,50	350	GWD	2013-07-24	140	29,8	6,9	16,96	2,73	4,82	5,42	6,23	3,44	42,71	30,63	1,769	8,23	5,509	0,1191	0,31	0,5	ND	CNESTEN	-3,92	-19,84	CNESTEN	2,72	0,21	CNESTEN
Wurno(Adarawa) BH 2	NIR-IAS-22	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	13,29	5,43	277,4	GBW	2013-07-25	412	31,0	6,2	37,45	7,26	6,98	9,91	3,28	8,81	68,33	11,59	13,11	96,35	6,248	0,0015	0,39	0,92	*	CNESTEN	-4,61	-34,3	CNESTEN	0,06	0,15	CNESTEN
Wurno(Kofar Rimi)	NIR-IAS-23	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	13,28	5,42	282	GBW	2013-07-25	489	32,2	6,9	40,93	10,99	19,75	9,53	5,21	98,1	123,24	2,05	0,28	2,865	0,78	<LO	0,61	0,33	*	CNESTEN	-6,78	-48,31	CNESTEN	-0,06	0,15	CNESTEN
Wurno(Kan wuri)	NIR-IAS-24	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	13,29	5,42	271	GBW	2013-07-25	1172	32,6	5,7	107,16	26,49	22,37	11,74	11,55	450,67	0	ND	0,642	7,729	0,824	0,1516	5,65	0,7	*	CNESTEN	-5,16	-36	CNESTEN	-0,27	0,15	CNESTEN
Kandam(Nursery)	NIR-IAS-25	Sokoto group	Tertiary (Upper Paleocene)	13,14	5,35	307	GBW	2013-07-25	421	36,3	7,1	38,15	10,09	9,53	9,1	3,54	75,83	124,46	1,7	2,961	26,41	6,979	<LO	0,41	0,43	*	CNESTEN	-6,76	-46,28	CNESTEN	-0,08	0,15	CNESTEN
Wamakko(FMWA)	NIR-IAS-29	Sokoto group	Tertiary (Upper Paleocene)	13,03	5,11	262	GBW	2013-07-25	597	32,2	5,7	58,45	16,65	3,64	5,24	2,29	186,53	55,89	3,26	3,672	2,281	0,67	0,0264	0,39	0,38	*	CNESTEN	-5,27	-31,22	CNESTEN	-0,37	0,13	CNESTEN
Kalambaina	NIR-IAS-30	Sokoto group	Tertiary (Upper Paleocene)	13,04	5,19	285	GBW	2013-07-25	596	31,4	6,7	77,47	6,62	35,56	4,46	66,19	7,1	197,67	80,04	0,135	0,336	1,374	<LO	0,5	0,27	*	CNESTEN	-5,56	-21,69	CNESTEN	2,89	0,21	CNESTEN
Rundi	NIR-IAS-31	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene)CT	12,93	4,90	270	GWD	2013-07-25	136	31,0	5,9	11,56	2,14	7,62	2,2	2,46	1,23	23,18	44,16	5,711	<LO	3,134	0,0278	0,24	<LO	*	CNESTEN	-4,6	-28,37	CNESTEN	1,62	0,17	CNESTEN
Rodinga	NIR-IAS-32	Sokoto group	Tertiary (Upper Paleocene)	12,84	5,15	297	GWD	2013-07-26	200	32,6	5,2	16,22	2,81	9,67	2,35	1,02	40,77	18,3	25,36	1,473	0,548	<LO	<LO	0,29	0,08	*	CNESTEN	-4,7	-27,11	CNESTEN	-0,28	0,16	CNESTEN
Lambar Mazuru	NIR-IAS-33	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene)CT	12,76	5,08	318,5	GBW	2013-07-26	37	31,4	5,3	0,95	0,59	1,56	2	0,56	0,1	4,88	8,72	4,807	1,623	8,522	0,1026	0,3	0,08	*	CNESTEN	-4,82	-38,92	CNESTEN	2,51	0,2	CNESTEN
Yabo(Torankawa)	NIR-IAS-34	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene)CT	12,72	5,01	299	GBW	2013-07-26	50	30,9	5,3	2,21	0,93	4,84	1,53	2,29	2,05	7,32	13,1	2,879	0,55	11,55	0,0219	0,28	<LO	*	CNESTEN	-4,48	-26,76	CNESTEN	1,91	0,17	CNESTEN
Shagari	NIR-IAS-35	Rima group	Creteceous(Maestrichtien)	12,62	4,99	278	GBW	2013-07-26	153	32,0	5,2	17,8	1,32	4,43	4,29	4,9	1,89	20,74	51,48	0,012	5,638	6,711	0,0042	0,25	0,09	*	CNESTEN	-4,24	-27,16	CNESTEN	-0,21	0,17	CNESTEN
Sokoto Town(Sokoto South)	NIR-IAS-47	Sokoto group	Tertiary (Upper Paleocene)	13,02	5,25	304	GBW	2013-07-27	420	31,8	6,8	61,12	5,33	5,42	2,01	8,73	8,46	200,11	44,92	1,477	4,246	16,21	0,0006	0,36	0,3	*	CNESTEN	-3,33	-20,75	CNESTEN	3,37	0,19	CNESTEN
Sabongari-Sokoto	NIR-IAS-48	Sokoto group	Tertiary (Upper Paleocene)	13,06	5,24	295	GBW	2013-07-27	250	32,6	6,7	31,56	4,21	6,71	2,75	12,35	48,44	67,11	0,85	4,387	0,596	<LO	<LO	0,35	0,26	*	CNESTEN	-3,58	-24,05				

Données de terrain et données hydrochimiques et isotopiques produites dans le cadre du projet RAF/7/011
sur le bassin d'Iullemeden au Nigeria (campagne 2)

Site	Sample_Code	Aquifer	Aquifer 2	Latitude	Longitude	Altitude	Type	Sampling_Date	EC (µs/cm)	Temp	pH	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Li	B	SiO ₂	F	Chem_Lab	¹⁸ O	² H	SI_Lab	³ H_ERR	³ H_Lab	
Sifawa 1	NIR-IAS-01-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	12,81	5,13	296,0	GWB	11/04/2014	130	32,3	5,5	10,7	1,4	8,8	1,1	1,5	9,3	34,2	20,2	0,004432	0,003051	7,7	0,2	CNESTEN	-4,94	-28,7	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Jabo II	NIR-IAS-02-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	12,51	4,96	297,0	GWB	11/04/2014	90	33,8	5,3	12,2	0,8	4,5	4,2	4,6	1,3	25,6	12,7	0,000604	0,001794	6,2	2,5	CNESTEN	-3,94	-26,4	CNESTEN	1,9	0,2	HYDROSYS Labor Ltd.
Dogondaji I	NIR-IAS-03-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	12,46	4,80	269,8	GWB	11/04/2014	220	33,7	6,2	40,2	2,6	5,1	2,3	6,0	3,3	126,9	20,4	0,000225	0,003617	8,7	0,9	CNESTEN	-3,98	-26,4	CNESTEN	4,1	0,3	HYDROSYS Labor Ltd.
Barkeji I	NIR-IAS-04-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	12,45	4,77	271,0	GWB	11/04/2014	100	30,4	5,8	14,3	1,8	1,6	1,1	0,8	1,1	55,6	6,4	0,000423	0,002939	8,2	0,1	CNESTEN	-3,89	-25,3	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Kebbi II	NIR-IAS-05-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12,13	4,73	223,3	GWB	11/04/2014	420	32,1	4,7	43,0	11,6	11,4	22,5	31,2	6,2	11,0	192,7	0,004776	0,002506	11,8	0,1	CNESTEN	-4,32	-24,5	CNESTEN	3,1	0,3	HYDROSYS Labor Ltd.
Romon Sarki	NIR-IAS-06-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12,23	4,60	217,0	GWB	11/04/2014	60	32,8	5,5	9,6	1,0	0,9	2,6	1,0	0,9	28,1	8,2	0,000787	0,002321	7,8	0,1	CNESTEN	-4,68	-26,7	CNESTEN	1,7	0,3	HYDROSYS Labor Ltd.
Sabon Gari(tambuwal)	NIR-IAS-07-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	12,41	4,65	273,1	GWB	11/04/2014	120	36,4	6,0	13,7	1,4	4,6	1,2	1,7	10,8	36,0	15,3	0,000666	0,003403	7,6	0,2	CNESTEN	-4,66	-26,6	CNESTEN	0,6	0,2	HYDROSYS Labor Ltd.
Sanyinna(market)	NIR-IAS-08-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	12,70	4,86	231,5	GWB	12/04/2014	170	32,6	5,4	15,5	3,0	3,0	2,1	2,4	30,1	28,8	6,9	0,01482	0,008962	5,2	0,3	CNESTEN	-5,46	-32,1	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Tiggi	NIR-IAS-09-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12,81	4,61	227,7	GWB	12/04/2014	90	32,9	4,6	5,8	3,4	1,2	1,8	1,2	13,2	25,6	0,8	0,00904	0,007985	8,4	0,3	CNESTEN	-5,92	-33,3	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Argungu	NIR-IAS-10-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12,75	4,52	229,3	GWB	12/04/2014	160	33,3	4,2	8,7	5,1	1,3	2,8	1,6	22,6	31,7	1,6	0,005627	0,012	6,4	0,4	CNESTEN	-7,37	-44,9	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Rima Quarters(Birnin Kebbi)	NIR-IAS-11-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12,46	4,22	229,0	GWB	12/04/2014	230	35,7	6,1	19,1	11,2	9,7	7,7	4,4	16,7	114,7	1,6	0,000548	0,04443	7,1	2,0	CNESTEN	-7,72	-47,4	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Kalgo	NIR-IAS-12-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12,34	4,20	213,0	GWB	12/04/2014	70	35,2	3,2	5,3	1,7	2,3	2,0	1,3	20,2	6,3	0,6	0,003108	0,0128	6,0	0,1	CNESTEN	-5,96	-33,4	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Katami	NIR-IAS-13-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12,94	4,73	233,9	GWB	12/04/2014	110	34,3	3,6	5,2	1,4	0,2	1,3	1,5	9,8	10,3	0,9	0,0135	0,00412	6,4	0,2	CNESTEN	-6,59	-37,1	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Slame	NIR-IAS-14-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	13,04	4,84	251,0	GWB	12/04/2014	100	34,3	5,7	7,9	0,7	1,9	2,1	2,1	6,3	19,5	4,3	0,004724	0,001743	6,8	0,9	CNESTEN	-5,53	-29,9	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Rugar-Kijo	NIR-IAS-23-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	12,69	5,08	298,8	GWB	14/04/2014	90	33,6	5,5	11,0	0,9	2,8	0,7	1,6	7,8	35,6	0,3	0,001936	0,005177	7,0	0,2	CNESTEN	-4,89	-27,2	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Bancho	NIR-IAS-24-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	12,47	4,99	304,3	GWB	14/04/2014	40	31,6	5,7	4,9	0,4	3,4	1,0	1,0	1,1	10,3	13,8	0,001948	0,003627	5,8	0,2	CNESTEN	-4,84	-26,9	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Salah	NIR-IAS-25-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	12,51	4,83	277,0	GWB	14/04/2014	510	33,0	6,4	85,0	15,0	2,7	0,8	2,3	26,3	207,4	9,1	0,01305	0,00611	12,6	0,4	CNESTEN	-5,16	-26,9	CNESTEN	0,7	0,2	HYDROSYS Labor Ltd.
Gambuwa	NIR-IAS-28-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	12,69	4,87	251,8	GWB	14/04/2014	760	34,7	6,0	80,1	12,7	17,4	11,0	31,6	66,0	217,2	71,6	0,005132	0,006254	12,5	0,5	CNESTEN	-3,99	-26,5	CNESTEN	1,9	0,3	HYDROSYS Labor Ltd.
Yabo(Torankawa)	NIR-IAS-29-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12,43	5,60	299,0	GWB	14/04/2014	90	33,7	6,1	3,6	1,5	6,6	0,8	4,4	2,6	5,9	22,6	0,002311	0,001814	7,2	0,1	CNESTEN	-4,39	-26,8	CNESTEN	2,0	0,3	HYDROSYS Labor Ltd.
Raba(GGC) I	NIR-IAS-32-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	13,13	5,49	265,0	GWB	15/04/2014	100	37,8	4,8	6,4	0,5	9,0	2,5	4,3	29,5	4,6	0,9	0,02788	0,01388	15,1	0,3	CNESTEN	-4,66	-27,7	CNESTEN	0,8	0,2	HYDROSYS Labor Ltd.
Yar Geda	NIR-IAS-37-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12,58	6,00	305,0	GWB	16/04/2014	190	30,3	5,7	18,3	4,6	16,4	2,3	14,4	13,9	60,3	25,6	0,003953	0,002718	16,8	0,3	CNESTEN	-4,85	-28,0	CNESTEN	5,5	0,2	HYDROSYS Labor Ltd.
Gidan Ciwake	NIR-IAS-19-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	13,75	5,42	314,0	GWB	13/04/2014	1360	38,4	5,3	119,4	44,7	120,9	22,9	28,8	567,7	196,4	3,1	0,00651	1,243	9,1	1,0	CNESTEN	-6,58	-48,1	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Wauru	NIR-IAS-20-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	13,77	5,50	334,5	GWB	13/04/2014	1290	40,4	5,5	98,1	35,3	132,2	20,7	19,1	532,2	162,3	7,8	0,006067	1,035	8,4	1,0	CNESTEN	-6,85	-48,2	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Rima Basin Complex,Sokoto	NIR-IAS-31-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	12,97	5,29	316,5	GWB	15/04/2014	260	32,4	5,7	26,1	3,4	2,4	4,7	1,0	55,4	35,1	2,0	0,02642	0,02166	5,5	0,5	CNESTEN	-5,66	-34,4	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Bimassa	NIR-IAS-36-2	Gundumi	Late Cretaceous(Upper Jurassic) CI	12,63	5,67	308,2	GWB	16/04/2014	20	30,4	5,6	3,9	0,7	1,9	1,1	1,2	2,0	13,9	3,8	0,006478	0,000911	5,8	0,1	CNESTEN	-5,07	-30,4	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Gigane	NIR-IAS-17-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	13,49	5,24	256,7	GWD	13/04/2014	1620	30,5	5,7	154,0	58,3	94,9	23,0	76,5	315,3	239,1	259,0	0,000444	0,02505	19,2	6,5	CNESTEN	-3,43	-22,1	CNESTEN	4,9	0,4	HYDROSYS Labor Ltd.
Rafinduma	NIR-IAS-21-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	13,86	5,56	311,8	GWB	13/04/2014	2020	34,4	3,2	269,6	114,8	59,8	21,0	14,8	1377,1	0,0	3,3	0,01689	1,18	22,5	1,1	CNESTEN	-6,85	-47,1	CNESTEN	0,7	0,2	HYDROSYS Labor Ltd.
Tulluwa	NIR-IAS-15-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	12,96	5,16	287,0	GWB	12/04/2014	390	34,7	6,2	60,7	5,7	2,8	0,6	4,7	4,2	181,8	35,0	0,001344	0,002389	13,0	0,3	CNESTEN	-4,17	-24,6	CNESTEN	3,4	0,3	HYDROSYS Labor Ltd.
Sokoto(Yauri/Gwandu Rd)	NIR-IAS-34-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	13,02	5,22	323,3	GWB	15/04/2014	630	35,8	5,7	63,2	8,9	10,7	1,3	17,9	8,3	172,0	65,3	0,002866	0,003475	14,0	0,5	CNESTEN	-3,25	-21,0	CNESTEN	3,6	0,3	HYDROSYS Labor Ltd.
Sokoto(Sama Rd. Pump Station)	NIR-IAS-35-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	13,01	5,24	318,0	GWB	15/04/2014	550	32,6	6,3	80,1	7,4	18,6	1,9	27,4	5,8	185,4	92,0	0,001881	0,002983	10,6	0,3	CNESTEN	-3,55	-22,1	CNESTEN	2,8	0,3	HYDROSYS Labor Ltd.
Chacho	NIR-IAS-33-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	13,17	5,45	341,0	GWB	15/04/2014	250	35,2	4,9	31,5	3,4	2,4	6,3	1,5	59,0	51,2	1,1	0,02527	0,008741	10,8	0,2	CNESTEN	-4,42	-27,5	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Balkore(River Kainuwa)	NIR-IAS-16-2	Surface Water	Surface Water	13,30	5,23	261,0	SRI	13/04/2014	490	32,4	6,2	70,1	24,7	5,1	1,1	2,9	28,4	309,9	2,9	0,004053	0,007469	17,6	0,4	CNESTEN	-1,08	-12,0	CNESTEN	4,0	0,3	HYDROSYS Labor Ltd.
Shagari(dam)	NIR-IAS-30-2	Surface Reservoir	Surface Reservoir	12,65	5,00	250,4	SRE	14/04/2014	80	30,1	6,2	8,0	2,7	4,1	6,6	2,1	1,7	54,4	1,3	0,001287	0,009193	7,6	0,4	CNESTEN	3,69	9,4	CNESTEN	4,1	0,3	HYDROSYS Labor Ltd.
Ilela	NIR-IAS-18-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	13,73	5,29	265,1	GWB	13/04/2014	400	33,8	4,0	25,3	20,9	11,8	5,2	3,8	146,3	36,0	2,7	0,02153	0,1021	32,8	0,9	CNESTEN	-4,50	-27,7	CNESTEN	<0,4		HYDROSYS Labor Ltd.
Gada(Dan-dutse)	NIR-IAS-22-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	13,75	5,66	308,5	GWD	13/04/2014	690	32,2	2,1	93,3	18,5	19,1	5,6	16,2	323,8	9,8	7,9	0,04232	0,05439	18,2	0,4	CNESTEN	-2,11	-13,5	CNESTEN	3,6	0,3	HYDROSYS Labor Ltd.
Gudun	NIR-IAS-26-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	12,67	4,83	275,0	GWD	14/04/2014	360	31,7	5,7	41,5	7,1	12,3	17,2	4,0	63,0	117,1	28,6	0,000096	0,007022	7,6	0,3	CNESTEN	-4,20	-25,7	CNESTEN	3,0	0,3	HYDROSYS Labor Ltd.
Saida	NIR-IAS-27-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	12,68	4,85	255,5	GWD	14/04/2014	340	31,6	5,5	51,7	7,9	3,7	0,9	4,6	60,0	103,7	34,4	0,000775										

Données de terrain et données hydrochimiques et isotopiques produites dans le cadre du projet RAF/7/011 sur le bassin d'Iullemeden au Nigeria (campagne 3)

Site	Sample_Code	Aquifer	Aquifer 2	Latitude	Longitude	Altitude	Type	Sampling_Date	EC (µS/cm)	Temp	pH	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Li	B	SiO ₂	F	Chem_Lab	¹⁸ O	² H	SI_Lab	³ H	³ H_ERR	³ H_Lab	¹⁸ O	² H	SI_Lab	³ H	³ H_ERR	³ H_Lab
Sifawa 1	NIR-IAS-01-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	12.81	5.13	296.0	GWB	11/04/2014	130	32.3	5.5	10.7	1.4	8.8	1.1	1.5	9.3	34.2	20.2	0	0.0031	7.7	0.2	CNESTEN	-4.94	-28.7	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-0.50	-6.56	CNESTEN	5.11	0.18	CNESTEN
Jabo II	NIR-IAS-02-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	12.51	4.96	297.0	GWB	11/04/2014	90	33.8	5.3	12.2	0.8	4.5	4.2	4.6	1.3	25.6	12.7	0	0.0018	6.2	2.5	CNESTEN	-3.94	-26.4	CNESTEN	1.9	0.2	HYDROSYS Labor Ltd	-6.87	-45.32	CNESTEN	0.93	0.17	CNESTEN
Dogondaji I	NIR-IAS-03-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	12.46	4.80	269.8	GWB	11/04/2014	220	33.7	6.2	40.2	2.6	5.1	2.3	6.0	3.3	126.9	20.4	0	0.0036	8.7	0.9	CNESTEN	-3.98	-26.4	CNESTEN	4.1	0.3	HYDROSYS Labor Ltd	-7.06	-47.19	CNESTEN	0.96	0.17	CNESTEN
Barkeji I	NIR-IAS-04-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	12.45	4.77	271.0	GWB	11/04/2014	100	30.4	5.8	14.3	1.8	1.6	1.1	0.8	1.1	55.6	6.4	0	0.0029	8.2	0.1	CNESTEN	-3.89	-25.3	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-4.81	-32.21	CNESTEN	0.82	0.17	CNESTEN
Kebbi I	NIR-IAS-05-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12.13	4.73	223.3	GWB	11/04/2014	420	32.1	4.7	45.0	11.6	11.4	22.5	31.2	6.2	110.0	19.7	0	0.0029	11.8	0.1	CNESTEN	-4.32	-24.5	CNESTEN	1.1	0.3	HYDROSYS Labor Ltd	-5.49	-35.63	CNESTEN	1.03	0.15	CNESTEN
Romon Sanki	NIR-IAS-06-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12.23	4.69	217	GWB	11/04/2014	60	32.8	5.5	9.6	1.0	0.9	2.6	1.0	0.9	28.1	8.2	0	0.0023	7.8	0.1	CNESTEN	-4.68	-26.7	CNESTEN	3.7	0.3	HYDROSYS Labor Ltd	-7.07	-13.67	CNESTEN	5.59	0.23	CNESTEN
Sabon Garri (ambawu)	NIR-IAS-07-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	12.41	4.65	273.1	GWB	11/04/2014	120	36.4	6.0	13.7	1.4	4.6	1.2	1.7	10.8	36.0	15.3	0	0.0034	7.5	0.2	CNESTEN	-4.66	-26.6	CNESTEN	0.6	0.2	HYDROSYS Labor Ltd	-3.65	-21.55	CNESTEN	4.24	0.22	CNESTEN
Sanyirina (market)	NIR-IAS-08-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	12.70	4.86	233.5	GWB	12/04/2014	170	32.6	5.4	15.5	3.0	3.0	2.1	2.4	30.1	28.8	6.9	0.01	0.009	5.2	0.3	CNESTEN	-5.46	-32.1	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-4.30	-29.15	CNESTEN	0.85	0.26	CNESTEN
Tiger	NIR-IAS-09-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12.81	4.61	227.7	GWB	12/04/2014	90	32.9	4.6	5.8	3.4	1.2	1.8	1.2	13.2	25.6	0.8	0.01	0.008	8.4	0.3	CNESTEN	-5.30	-33.3	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-6.86	-47.10	CNESTEN	0.75	0.23	CNESTEN
Arguru	NIR-IAS-10-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12.75	4.52	229.3	GWB	12/04/2014	160	39.3	4.2	8.7	5.1	1.3	2.8	1.6	22.6	31.7	1.6	0.01	0.012	6.4	0.4	CNESTEN	-7.37	-44.9	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-6.30	-47.02	CNESTEN	0.85	0.28	CNESTEN
Rima Quarters (Birni Kebbi)	NIR-IAS-11-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12.46	4.22	220.0	GWB	12/04/2014	290	35.7	6.1	19.1	11.2	9.7	7.7	4.4	16.7	114.7	1.6	0	0.0444	7.1	2.0	CNESTEN	-7.72	-47.4	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-6.35	-47.02	CNESTEN	0.51	0.2	CNESTEN
Kilgo	NIR-IAS-12-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12.34	4.20	213.0	GWB	12/04/2014	70	35.2	3.2	5.3	1.7	2.3	2.0	1.3	20.2	6.3	0.6	0	0.0128	6.0	0.2	CNESTEN	-5.96	-33.4	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-5.76	-37.71	CNESTEN	0.51	0.22	CNESTEN
Katami	NIR-IAS-13-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12.94	4.73	233.9	GWB	12/04/2014	110	34.3	3.6	5.2	1.4	0.2	1.3	1.5	9.8	10.3	0.9	0.01	0.0041	6.4	0.2	CNESTEN	-6.59	-37.1	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-3.94	-22.83	CNESTEN	4.59	0.21	CNESTEN
Silame	NIR-IAS-14-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	13.04	4.84	251.0	GWB	12/04/2014	100	34.3	5.7	7.9	0.7	1.9	2.1	2.1	6.3	19.5	4.3	0	0.0057	6.8	0.8	CNESTEN	-5.53	-29.9	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-6.36	-47.00	CNESTEN	1.15	0.15	CNESTEN
Rugar-Kijo	NIR-IAS-23-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	12.69	5.08	298.8	GWB	14/04/2014	90	33.6	5.5	11.0	0.9	2.8	0.7	1.6	7.8	35.6	0.3	0	0.0022	7.0	0.2	CNESTEN	-4.89	-27.2	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-2.34	-16.44	CNESTEN	5.31	0.18	CNESTEN
Bancho	NIR-IAS-24-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	12.47	4.99	304.3	GWB	14/04/2014	40	31.6	5.7	4.9	0.4	3.4	1.0	1.0	1.1	10.3	13.8	0	0.0038	5.8	0.2	CNESTEN	-4.84	-26.3	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-3.89	-21.42	CNESTEN	0.95	0.13	CNESTEN
Salah	NIR-IAS-25-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	12.51	4.83	277.0	GWB	14/04/2014	510	33.0	6.4	50.0	15.0	2.7	0.8	2.3	26.3	207.4	9.1	0.01	0.0061	12.6	0.4	CNESTEN	-5.16	-26.9	CNESTEN	0.7	0.2	HYDROSYS Labor Ltd	-7.94	-50.20	CNESTEN	0.3	0.14	CNESTEN
Gambawa	NIR-IAS-28-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	12.69	4.87	251.8	GWB	14/04/2014	760	34.0	8.0	85.1	12.7	17.4	11.0	31.6	66.0	217.2	71.6	0.01	0.0063	12.5	0.5	CNESTEN	-3.99	-26.5	CNESTEN	1.9	0.3	HYDROSYS Labor Ltd	-4.44	-21.12	CNESTEN	3.48	0.14	CNESTEN
Yaboi (Torankawa)	NIR-IAS-29-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12.43	5.60	290.0	GWB	14/04/2014	90	33.7	6.1	3.6	1.5	6.6	0.8	4.4	2.6	5.9	22.6	0	0.0032	7.2	0.1	CNESTEN	-4.39	-26.8	CNESTEN	2.0	0.3	HYDROSYS Labor Ltd	-5.86	-32.24	CNESTEN	0.5	0.13	CNESTEN
Raba (GC1)	NIR-IAS-32-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	13.13	5.49	265.0	GWB	15/04/2014	100	37.8	4.8	6.4	0.5	9.0	2.5	4.3	29.5	4.6	0.9	0.03	0.017	15.1	0.3	CNESTEN	-4.66	-27.7	CNESTEN	0.8	0.2	HYDROSYS Labor Ltd	-5.30	-27.05	CNESTEN	0.01	0.13	CNESTEN
Yar Geda	NIR-IAS-37-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	12.58	6.00	305.0	GWB	16/04/2014	190	30.3	5.7	18.3	4.6	16.4	2.3	14.4	13.9	60.3	25.6	0	0.0039	16.8	0.3	CNESTEN	-4.85	-28.0	CNESTEN	0.5	0.2	HYDROSYS Labor Ltd	-3.83	-24.01	CNESTEN	2.91	0.26	CNESTEN
Gidan Cwaka	NIR-IAS-19-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	13.75	5.42	314.0	GWB	13/04/2014	1360	38.4	5.3	119.4	44.7	120.9	22.9	28.8	567.7	196.4	3.1	0.01	0.243	9.1	1.0	CNESTEN	-6.58	-48.1	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-5.07	-26.57	CNESTEN	2.56	0.17	CNESTEN
Wauru	NIR-IAS-20-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	13.77	5.50	334.5	GWB	13/04/2014	1290	40.4	5.5	98.1	35.3	132.2	20.7	19.1	532.2	162.3	7.8	0.01	0.035	8.4	1.0	CNESTEN	-6.85	-48.2	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-5.42	-21.15	CNESTEN	3.41	0.21	CNESTEN
Rima Basin Complex, Sokoto	NIR-IAS-31-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	12.97	5.29	316.5	GWB	15/04/2014	260	32.4	5.7	26.1	3.4	2.4	4.7	1.0	55.4	35.1	2.0	0.02	0.0127	5.5	0.5	CNESTEN	-5.66	-34.4	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-3.84	-24.44	CNESTEN	6.65	0.27	CNESTEN
Bimexa	NIR-IAS-36-2	Gundumi	Late Creteceous(Upper Jurrassic) CI	12.63	5.67	308.2	GWB	16/04/2014	20	30.4	5.6	3.9	0.7	1.9	1.1	1.2	2.0	13.9	3.8	0.01	0.0009	5.8	0.1	CNESTEN	-5.07	-30.4	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-4.22	-23.83	CNESTEN	2.3	0.28	CNESTEN
Gigane	NIR-IAS-17-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	13.49	5.24	256.7	GWB	13/04/2014	1620	30.5	5.7	154.0	58.3	94.9	23.0	76.5	315.3	239.1	29.0	0.01	0.0261	19.2	8.5	CNESTEN	-3.43	-22.1	CNESTEN	4.9	0.4	HYDROSYS Labor Ltd	-4.91	-25.70	CNESTEN	3.22	0.17	CNESTEN
Rafinduma	NIR-IAS-21-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	13.86	5.56	311.8	GWB	13/04/2014	2020	34.4	3.2	269.6	114.8	59.8	21.0	14.8	1377.0	1.0	3.3	0.02	0.118	22.5	1.1	CNESTEN	-6.85	-47.1	CNESTEN	4.09	0.31	HYDROSYS Labor Ltd	-4.93	-31.45	CNESTEN	0.09	0.16	CNESTEN
Tullawa	NIR-IAS-15-2	Sokoto Group	Tertiary(Upper Paleocene)	12.96	5.15	287.0	GWB	12/04/2014	290	34.7	6.2	60.7	5.7	2.8	0.6	4.7	4.2	181.8	25.0	0	0.0024	13.0	0.3	CNESTEN	-4.17	-24.6	CNESTEN	3.4	0.3	HYDROSYS Labor Ltd	-5.27	-28.67	CNESTEN	0.08	0.14	CNESTEN
Sokoto (Yauri/Gwandu Rd)	NIR-IAS-34-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	13.02	5.22	323.3	GWB	15/04/2014	630	35.8	5.7	63.2	8.9	10.7	1.3	17.9	8.3	172.0	65.3	0	0.0058	14.0	0.5	CNESTEN	-3.25	-21.0	CNESTEN	3.6	0.3	HYDROSYS Labor Ltd	-7.39	-44.32	CNESTEN	0.21	0.11	CNESTEN
Sokoto (Sama Rd, Pump Station)	NIR-IAS-35-2	Gwandu	Tertiary(Eocene-Miocene) CT	13.01	5.24	318.0	GWB	15/04/2014	550	32.6	6.3	80.1	7.4	18.6	1.9	27.4	5.8	185.4	29.1	0	0.003	10.5	0.3	CNESTEN	-3.55	-22.1	CNESTEN	2.8	0.3	HYDROSYS Labor Ltd	-4.85	-31.39	CNESTEN	3.48	0.14	CNESTEN
Chacho	NIR-IAS-23-2	Rima Group	Creteceous(Maestrichtien)	13.17	5.4515	341.0	GWB	15/04/2014	250	35.2	4.9	21.5	3.4	2.4	6.3	1.5	59.0	51.2	1.1	0.03	0.0077	10.8	0.2	CNESTEN	-4.42	-27.5	CNESTEN	<0.4		HYDROSYS Labor Ltd	-7.17	-48.83	CNESTEN	0.07	0.18	CNESTEN
Balkore (River/ Kainawa)	NIR-IAS-16-2	Surface Water	Surface Water	13.30	5.23	261.0	SRI	13/04/2014	490	32.4																										

Données de terrain et données hydrochimiques et isotopiques produites dans le cadre du projet RAF/7/011
sur le bassin d'Iullemeden au Bénin (campagne 1)

Region	Sample_Code	Aquifer	Longitude	Latitude	Altitude	Type	depth	Sampling_Date	EC	Temp	pH	Alk	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	TDS (mg/l)	δ ² H (‰ vs Smow)	² H_ERR	δ ¹⁸ O (‰ vs Smow)	¹⁸ O_ERR	EC	H3	H3_ERR	C13	C14	C14_ERR	C14_Lab
Kandi, Ilumeden	BK01-01	Nappe phreatique	3,22	11,98	171,1	GWD	6,7	07/03/2013	686	32,5	6,6	372	41,1	52,7	21,9	0	180,0	20,8	55,3	21,2	38,4	396,1	-25,8	1,3	-4,13	0,17	686	3,04	0,33				
Kandi, Ilumeden	BK04-01	Nappe phreatique	3,19	12,07	172,6	GWD	16,7	07/03/2013	1050	30,5	7,4	686	44,1	93,2	42,0	0	359,9	44,7	8,8	64,2	46,4	652,0	-25,8	0,9	-4,35	0,17	1050	2,56	0,26				
Kandi, Ilumeden	BK08-01	Nappe phreatique	3,23	11,84	166,7	GWD	2,8	08/03/2013	800	28,2	7,0	183	93,1	165,1	27,1	0	122,0	42,0	13,1	31,3	71,7	566,3	-23,1	0,7	-3,88	0,20	800	3,11	0,32				
Kandi, Ilumeden	BK10-01	Nappe phreatique	3,23	11,94	167,9	GWD	2,4	08/03/2013	143	29,6	7,0	67	4,7	22,4	1,3	0	67,1	6,7	4,5	6,2	14,5	127,9	-29,6	0,5	-4,55	0,17	143	2,99	0,35				
Kandi, Ilumeden	BK12-01	Nappe phreatique	3,26	11,90	159,8	GWD	4,6	08/03/2013	95	30,3	6,2	76	46,7	36,9	14,6	0	48,8	19,1	15,7	7,6	26,1	215,2	-30,6	1,3	-4,96	0,21	95	4,85	0,28				
Kandi, Ilumeden	BK14-01	Nappe phreatique	3,29	11,92	158,5	GWD	1,4	08/03/2013	118	28,6	6,1	79	8,2	4,8	3,3	0	54,9	6,2	3,5	4,2	12,6	91,3	-20,7	1,3	-3,51	0,20	118	3,03	0,26				
Kandi, Ilumeden	BK19-01	Nappe phreatique	3,31	11,76	177,2	GWD	20,3	08/03/2013	121	31,7	5,1	21	1,1	45,6	2,1	0	24,4	14,5	2,6	2,6	6,7	103,1	-19,3	0,8	-3,71	0,08	121	1,95	0,33				
Kandi, Ilumeden	BK24-01	Nappe phreatique	3,42	11,86	165,5	GWD	2,7	09/03/2013	488	31,6	6,7	162	53,6	43,2	37,2	0	103,7	30,5	34,8	12,1	35,0	332,0	-20,0	0,5	-3,61	0,15	488	4,36	0,32				
Kandi, Ilumeden	BK27-01	Nappe phreatique	3,40	11,78	173,5	GWD	17,2	09/03/2013	120	31,8	5,8	24	2,4	40,5	0,5	0	24,4	6,0	4,6	3,0	9,1	98,9	-24,6	0,6	-3,81	0,09	120	2,62	0,31				
Kandi, Ilumeden	BK28-01	Nappe phreatique	3,47	11,80	175,5	GWD	8,1	09/03/2013	350	30,9	4,7	6	25,0	108,9	1,7	0	24,4	21,7	8,3	7,9	16,7	225,3	-22,7	0,7	-3,41	0,18	350	2,94	0,33				
Kandi, Ilumeden	BK32-01	Nappe phreatique	3,52	11,75	176,0	GWD		09/03/2013	202	29,7	5,9	46	21,1	16,5	3,2	0	61,0	16,2	10,7	3,4	10,4	142,3	-21,1	1,2	-3,38	0,08	202	2,75	0,31				
Kandi, Ilumeden	BK33-01	Nappe phreatique	3,55	11,71	166,4	GWD	6,6	09/03/2013	180	29,6	6,3	34	5,9	48,8	0,5	0	51,8	6,9	3,3	3,7	19,1	152,5	-19,6	0,9	-3,49	0,20	180	2,86	0,18				
Kandi, Ilumeden	BK35-01	Nappe phreatique	3,50	11,62	213,9	GWD	15,6	09/03/2013	327	30,6	6,3	52	16,8	87,7	0,6	0	51,8	5,4	8,7	9,2	26,2	229,2	-22,2	1,2	-3,70	0,20	327	2,06	0,31				
Kandi, Ilumeden	BK38-01	Nappe phreatique	3,51	11,56	203,3	GWD	10,5	09/03/2013	83	30,1	5,7	34	3,6	13,5	0,4	0	31,5	2,7	3,2	3,0	7,4	72,0	-21,7	0,2	-4,22	0,11	83	2,51	0,26				
Kandi, Ilumeden	BK39-01	Nappe phreatique	3,39	11,65	209,1	GWD	41,7	09/03/2013	40	29,9	5,2	18	1,2	13,4	0,2	0	12,2	5,3	1,4	0,8	2,6	37,0	-25,9	1,0	-4,34	0,15	40	2,44	0,30				
Kandi, Ilumeden	BK42-01	Nappe phreatique	3,55	10,93	310,0	GWD	9,1	10/03/2013	377	29,5	5,3	18	24,2	99,9	8,8	0	42,4	13,0	40,4	7,3	5,7	252,4	-21,0	1,0	-3,37	0,08	377	3,83	0,33				
Kandi, Ilumeden	BK44-01	Nappe phreatique	3,69	10,93	178,5	GWD	9,7	10/03/2013	1145	29,7	5,2	18	125,2	398,2	10,1	0	14,2	59,8	25,7	30,0	100,7	775,0	-21,4	0,3	-3,97	0,18	1145	2,89	0,25				
Kandi, Ilumeden	BK47-01	Nappe phreatique	3,55	11,03	171,0	GWD	9,2	10/03/2013	19	29,9	4,6	15	0,6	3,9	2,1	0	12,2	2,7	1,1	0,7	2,2	26,3	-29,3	0,6	-4,87	0,21	19	3,45	0,24				
Kandi, Ilumeden	BK49-01	Nappe phreatique	3,45	11,24	183,9	GWD	7,1	10/03/2013	83	28,5	5,3	24	3,9	17,2	1,7	0	24,4	6,6	3,2	0,8	8,1	64,8	-25,1	0,8	-4,56	0,23	83	4,58	0,27				
Kandi, Ilumeden	BK50-01	Nappe phreatique	3,38	11,12	305,0	GWD	13,8	10/03/2013	305	29,8	6,3	116	20,5	28,3	15,1	0	137,0	19,3	10,3	10,8	35,7	256,1	-23,5	0,6	-4,02	0,14	305	2,54	0,31				
Kandi, Ilumeden	BK57-01	Nappe phreatique	3,06	11,18	259,3	GWD	16,1	11/03/2013	861	29,5	6,7	363	19,7	137,1	42,6	0	250,1	17,1	161,7	16,5	42,8	677,0	-25,4	0,7	-4,30	0,23	861	2,94	0,29				
Kandi, Ilumeden	BK59-01	Nappe phreatique	3,27	11,34	224,7	GWD	28,0	11/03/2013	21	30,1	4,9	9	0,8	5,1	0,0	0	12,2	3,7	1,3	1,1	4,8	24,1	-25,4	0,6	-4,65	0,15	21	0,09	0,21				
Kandi, Ilumeden	BK62-01	Nappe phreatique	2,98	10,73	304,4	GWD	8,0	11/03/2013	1929	28,5	6,5	174	123,2	524,6	77,3	0	152,5	75,5	196,2	44,3	97,5	1269,0	-21,4	0,6	-4,10	0,11	1929	2,43	0,31				
Kandi, Ilumeden	BK65-01	Nappe phreatique	2,84	10,84	328,5	GWD		11/03/2013	479	29,9	7,1	250	52,0	18,5	0,0	0	186,0	21,5	7,3	23,6	37,0	337,5	-23,4	0,9	-4,39	0,10	479	1,13	0,32				
Kandi, Ilumeden	BK67-01	Nappe phreatique	3,47	10,29	397,4	GWD	7,1	12/03/2013	704	28,9	6,8	101	103,5	78,1	9,0	0	122,0	41,8	65,2	15,4	31,3	462,6	-20,2	0,8	-4,01	0,22	704	2,56	0,30				
Kandi, Ilumeden	BK69-01	Nappe phreatique	3,22	10,37	329,0	GWD	12,9	12/03/2013	777	29,5	6,4	146	76,2	50,8	8,3	0	174,0	25,6	8,3	20,6	60,2	469,1	-22,2	1,3	-4,29	0,18	777	3,10	0,26				
Kandi, Ilumeden	BK71-01	Nappe phreatique	3,15	10,36	304,0	GWD	4,7	12/03/2013	319	29,4	6,8	165	21,2	21,2	3,9	0	122,0	20,6	4,6	5,8	27,2	226,1	-23,9	1,3	-4,34	0,24	319	1,29	0,27				
Kandi, Ilumeden	BK73-01	Nappe phreatique	2,94	11,13	276,3	GWD	1,9	13/03/2013	169	28,1	6,8	70	25,0	25,0	2,0	0	24,4	11,9	11,7	2,9	10,0	123,0	-23,9	1,3	-4,41	0,20	169	2,19	0,34				
Kandi, Ilumeden	BK75-01	Nappe phreatique	3,14	10,71	314,3	GWD		13/03/2013	687	29,2	7,7	153	71,6	62,2	20,3	0	186,0	19,8	40,4	28,6	54,6	454,7	-26,3	1,2	-4,84	0,08	687	2,96	0,35				
Kandi, Ilumeden	BK09-01	Nappe phreatique	3,23	11,84	174,0	GWB	76,0	08/03/2013	353	31,4	7,9	281	34,1	12,0	15,3	0	189,1	72,7	4,6	8,0	20,3	332,0	-40,0	1,3	-5,61	0,09	353	0,18	0,20				
Kandi, Ilumeden	BK05-01	Nappe phreatique	3,19	12,07	171,7	GWB	57,0	07/03/2013	725	31,5	7,2	616	10,5	21,1	18,6	0	396,5	31,3	6,1	40,1	65,1	562,0	-24,3	1,3	-3,89	0,17	725	4,56	0,34				
Kandi, Ilumeden	BK02-01	Nappe phreatique	3,22	11,98	174,1	GWB	43,0	07/03/2013	172	31,7	6,2	137	1,4	1,6	3,8	0	112,0	8,7	10,2	5,9	17,2	158,6	-11,1	0,8	-0,90	0,19	172	2,37	0,34				
Kandi, Ilumeden	BK11-01	Nappe phreatique	3,26	11,90	160,4	GWB	70,0	08/03/2013	143	32,1	6,1	43	1,6	17,8	2,8	0	30,5	8,1	2,9	2,3	6,2	79,3	-21,9	0,3	-3,80	0,12	143	5,12	0,34				
Kandi, Ilumeden	BK15-01	Nappe phreatique	3,29	11,92	162,4	GWB	25,8	08/03/2013	445	31,3	6,4	159	61,9	0,2	17,5	0	85,4	41,4	3,6	7,4	24,1	265,0	-17,0	0,7	-2,40	0,16	445	1,60	0,28				
Kandi, Ilumeden	BK40-01	Nappe phreatique	3,38	11,80	168,2	SRI		09/03/2013	37	29,3	5,8	24	1,0	1,9	0,4	0	31,5	3,3	2,4	1,3	4,7	48,7	-22,0	1,1	-3,78	0,21	37	0,70	0,23				
Kandi, Ilumeden	BK41-01	Nappe phreatique	3,40	10,96	294,5	GWB		10/03/2013	12	28,8	4,7	9	1,3	0,7	0,4	0	12,2	2,1	0,7	0,5	1,6	21,3	-24,8	0,9	-4,37	0,20	12	0,42	0,29				
Kandi, Ilumeden	BK43-01	Nappe phreatique	3,68	10,94	265,9	GWB		10/03/2013	48	30,7	5,1	31	0,8	1,9	0,2	0	30,5	2,1	4,9	2,0	3,4	44,3	-23,2	1,2	-4,15	0,24	48	0,34	0,32				
Kandi, Ilumeden	BK45-01	Nappe phreatique	3,69	10,91	194,5	GWB	36,5	10/03/2013	40	31,2	5,1	24	0,4	0,3	0,3	0	30,4	0,9	4,5	1,7	4,0	42,0	-23,9	0,8	-4,26	0,07	40	0,36	0,30				
Kandi, Ilumeden	BK46-01	Nappe phreatique	3,55	11,03	270,8	GWB	43,0	10/03/2013	14	30,1	4,5	9	0,4	2,1	0,3	0	9,2	2,2	0,8	0,3	0,9	17,4	-23,6	0,6	-4,14	0,15	14	3,54	0,32				
Kandi, Ilumeden	BK63-01	Nappe phreatique	2,84	10,69	335,2	GWB	22,0	11/03/2013	348	30,2	6,9	226	5,1	6,7	1,9	0	186,0	19,4	5,9	14,0	27,1	253,3	-24,1	1,0	-4,10	0,06	348	1,07	0,29				
Kandi, Ilumeden	BK64-01	Nappe phreatique	2,79	10,72	328,6	GWB	42,9	11/03/2013	222	30,4	6,6	162	0,0	0,2	0,1	0	122,0	11,6	4,5	9,4	16,4	157,6	-23,4	1,1	-3,78	0,06	222	0,87	0,28				
Kandi, Ilumeden	BK68-01	Nappe phreatique	3,38	10,29	406,3	GWB	61,3	12/03/2013																									

Données de terrain et données hydrochimiques et isotopiques produites dans le cadre du projet RAF/7/011
sur le bassin d'Iullemeden au Bénin (campagne 1)

Region	Sample_Code	Aquifer	Longitude	Latitude	Altitude	Type	depth	Sampling_Date	EC	Temp	pH	Alk	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	TDS (mg/l)	δ ² H (‰ vs Smow)	² H_ERR	δ ¹⁸ O (‰ vs Smow)	¹⁸ O_ERR	EC	H3	H3_ERR	C13	C14	C14_ERR	C14_Lab
Kandi, Iullemeden	BK21-01	Cambro Siluren	3,12	11,56	214,9	GWB	42,7	08/03/2013	43	30,8	5,3	31	1,8	2,3	2,0	0	24,4	3,3	7,2	1,0	2,4	42,2	-25,1	1,2	-4,21	0,16	43	1,26	0,26				
Kandi, Iullemeden	BK29-01	Cambro Siluren	3,47	11,80	172,9	GWB	34,0	09/03/2013	67	32,0	4,7	12	7,5	12,7	3,5	0	12,2	4,0	4,9	1,9	4,0	52,5	-24,1	0,9	-4,19	0,21	67	0,38	0,17				
Kandi, Iullemeden	BK36-01	Cambro Siluren45	3,50	11,61	218,6	GWB	45,0	09/03/2013	349	31,0	5,9	64	17,4	94,0	0,7	0	51,8	3,2	7,5	5,7	36,4	237,5	-27,6	0,3	-4,86	0,10	349	0,67	0,22				
Kandi, Iullemeden	BK51-01	Cambro Siluren	3,28	10,98	257,6	GWB	49,7	10/03/2013	18	28,9	5,0	9	0,2	1,8	1,9	0	15,3	2,4	2,1	0,8	1,6	28,7	-25,4	0,7	-3,96	0,21	18	1,36	0,28				
Kandi, Iullemeden	BK66-01	Socle Panafricain	3,75	10,84	319,0	GWB	45,3	11/03/2013	335	30,7	7,2	250	11,5	9,1	0,6	0	186,0	20,7	10,3	13,9	27,6	265,2	-25,9	0,8	-4,04	0,14	335	0,23	0,23				
Kandi, Iullemeden	BK18-01	Socle Panafricain	3,38	11,81	172,1	GWB	73,7	08/03/2013	30	32,8	5,0	9	0,9	11,4	0,6	0	6,6	1,8	2,1	0,9	2,4	27,0	-26,7	1,1	-3,49	0,08	30	3,52	0,31				
Kandi, Iullemeden	BK03-01	Fleuve	3,19	12,08	169,2	SRI		07/03/2013	61	30,6	6,9	52	1,6	0,4	1,3	0	34,5	4,4	2,6	2,5	4,1	49,3	-9,7	1,0	-0,65	0,16	61	3,23	0,26				
Kandi, Iullemeden	BK06-01	Fleuve	3,23	11,92	173,8	SRI		07/03/2013	165	33,8	7,8	131	3,6	1,6	4,1	0	103,7	8,5	6,4	6,2	18,4	147,8	9,7	1,2	3,77	0,08	165	3,41	0,29				
Kandi, Iullemeden	BK13-01	Fleuve	3,30	11,91	162,9	SRI		08/03/2013	62	29,8	6,9	49	1,0	2,0	0,3	0	42,5	5,3	2,9	2,4	4,7	60,8	-14,2	1,1	-0,72	0,19	62	3,32	0,31				
Kandi, Iullemeden	BK16-01	Fleuve	3,28	11,91	163,2	SRI		08/03/2013	88	32,0	7,1	73	2,1	0,5	0,5	0	48,8	4,4	3,0	3,4	7,9	69,0	-9,4	1,2	-0,13	0,21	88	2,44	0,26				
Kandi, Iullemeden	BK25-01	Fleuve	3,42	11,86	155,5	SRI		09/03/2013	38	31,8	7,3	34	0,9	4,1	0,2	0	24,2	3,3	2,9	1,2	4,4	42,2	-16,5	1,3	-2,71	0,17	38	0,62	0,23				
Kandi, Iullemeden	BK30-01	Fleuve	3,52	11,79	152,5	SRI		09/03/2013	62	30,5	6,1	46	0,7	1,0	0,1	0	42,2	5,3	3,0	2,4	5,6	60,6	-7,2	0,7	0,18	0,10	62	2,24	0,30				
Kandi, Iullemeden	BK52-01	Fleuve	3,25	10,98	214,7	SRI		10/03/2013	58	28,6	6,0	40	0,4	0,9	1,8	0	36,6	2,7	3,7	2,1	6,0	56,8	-17,8	1,0	-2,62	0,20	58	1,17	0,33				
Kandi, Iullemeden	BK60-01	Fleuve	3,29	11,33	193,4	SRI		11/03/2013	42	30,2	5,7	37	0,3	0,8	0,1	0	36,6	2,8	2,2	4,9	1,4	52,8	-20,3	0,9	-2,67	0,20	42	4,47	0,35				
Kandi, Iullemeden	BK61-01	Fleuve	2,98	10,73	303,2	GWB		11/03/2013	129	29,9	5,5	31	6,1	23,3	3,0	0	30,5	4,8	12,3	3,2	7,9	99,7	-24,5	0,6	-4,67	0,22	129	3,39	0,29				
Kandi, Iullemeden	BK07-01	Fleuve	2,94	11,14	280,8	GWB		08/03/2013	294	30,1	7,2	256	1,9	0,2	0,5	0	189,0	16,8	5,3	12,5	28,7	233,5	-27,1	0,3	-5,03	0,09	294	0,10	0,24				
Kandi, Iullemeden	BK26-01	Fleuve	3,40	11,79	168,6	GWB	40,0	09/03/2013	547	31,5	6,3	116	15,1	130,8	16,9	0	109,8	9,5	54,8	13,7	35,0	357,5	-26,2	0,9	-4,33	0,11	547	2,98	0,26				
Kandi, Iullemeden	BK31-01	Fleuve	3,52	11,75	168,4	GWB		09/03/2013	141	31,3	5,8	95	0,1	0,7	0,3	0	85,4	2,7	3,9	2,7	19,9	119,0	-37,0	1,0	-5,47	0,17	141	0,02	0,17				

Données de terrain et données hydrochimiques et isotopiques produites dans le cadre du projet RAF/7/011
sur le bassin d'Iullemeden au Bénin (campagne 2)

N°	Code	Aquifère	depth	Latitude	Longitude	Alt (m)	CE mS/cm	T°C	pH	Alcalinité mg/l	Sampling Date	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	TDS (mg/l)	SiO ₂	Fe	δ ² H (‰ vs Snow)	² H_ERR	δ ¹⁸ O (‰ vs Snow)	¹⁸ O_ERR	¹³ C	¹³ C_ERR	¹³ C_Lab	¹⁴ C	¹⁴ C_ERR	¹⁴ C_Lab
4	BK04-02	Quaternaire	16,7	12,07	3,19	172,6	1152	26,1	6,78	1010	02/11/13	59,54	136,56	43,29	18,00	320	56,59	15,84	67,77	35,79	753	9,75	<0,02	-34,5	0,9	-4,3							
12	BK14-02	Quaternaire	1,43	11,92	3,29	158,5	139	25,4	6,2	115	02/11/13	11,54	1,88	5,1		73,2	10,04	2,99	4,51	13,72	122,88	6,62	<0,02	-31,3	1,1	-3,5	0,1						
13	BK15-02	Quaternaire	25,78	11,92	3,29	162,4	254	26,9	6,31	195	02/11/13	20,66	0,42	7,41	0	79,3	16,638	2,609	4,907	14,025	145,989	7,49	<0,02	-34,0	0,7	-1,8	0,2						
18	BK23-02	Quaternaire		11,87	3,38	285,2	950	27	6,17	70	02/11/13	85,6	253,8	25,7	0	30,5	55,29	38,84	18,6	68,6	587,03	4,83	<0,02	-31,3	0,2	-3,2	0,1						
19	BK24-02	Quaternaire	2,67	11,86	3,42	165,5	649	24,9	6,43	215	02/11/13	88,415	46,595	39,665	0	104	37,03	38,93	14,425	38,735	387,755	1,72	<0,02	-34,0	0,7	-3,9	0,1						
23	BK28-02	Quaternaire	8,1	11,80	3,47	175,5	422	27,5	5,29	5	31/10/13	30,2	137,47	3,31	0	12,2	25,745	10,215	10,6	27,515	257,255	5,21	<0,02	-32,8	1,0	-3,8	0,2						
24	BK29-02	Quaternaire	94	11,80	3,47	172,9	34	27,9	5,24	10	31/10/13	2,316	5,468	1,307	0	9,2	2,067	1,598	1,007	2,47	25,343	1,26	<0,02	-34,6	1,2	-4,4	0,1						
3	BK03-02	Fluve Niger	12,08	3,19	169,2	41	24,5	6,71	50	02/11/13	3,30	0,38	1,50	0,00	33	5,34	2,08	1,73	3,83	51	3,49	0,85	-34,6	0,5	-3,4	0,1							
6	BK06-02	Fluve Allbort	11,92	3,23	173,8	99	25,4	7,67	100	02/11/13	7,25	2,28	3	0	61	9,708	3,206	3,813	8,413	98,77	3,89	1,34	-34,2	1,0	-2,7	0,2							
11	BK13-02	Fluve Niger	11,91	3,30	162,9	97	25,6	6,31	115	02/11/13	5,72	2,496	2,109	0	54,9	5,5	3,58	3,656	10,011	87,972	4,06	1,32	-36,0	1,2	-2,6	0,2							
20	BK25-02	Fluve Sota	11,86	3,42	155,5	79	23	6,79	90	02/11/13	2,477	1,602	0,825	0	48,8	5,804	2,786	2,243	7,175	71,712	2,57	0,57	-37,8	1,2	-3,1	0,2							
25	BK30-02	Fluve Niger	11,79	3,52	153,5	49	25,2	5,9	60	31/10/13	0,664	0,821	0,452	0	36,6	2,946	1,899	2,023	4,807	50,222	2,35	0,8	-34,6	1,1	-3,7	0,2							
26	BK40-02	Fluve Sota	11,80	3,38	168,2	80	22,4	7,09	85	02/11/13	2,27	1,66	0,622	0	48,8	5,371	2,519	2,307	7,853	71,402	3,62	1,92	-37,7	0,5	-3,0	0,2							
54	BK53-02	Fluve Sota	10,98	3,25	214,7	77	18,5	7,51	1159	04/12/13	2,164	1,025	0,664	0	48,8	5,15	2,588	2,33	6,67	69,391	6,1	<0,02	-35,7	0,9	-2,7	0,2							
59	BK60-02	Fluve Sota	11,33	3,29	193,4	70	22,5	6,63	1097	05/12/13	3,523	1,46	3,547	0	36,6	5,52	2,73	2,29	6,77	62,24	4,32	<0,02	-37,9	0,9	-3,3	0,2							
60	BK76-02	Fluve Sota	10,72	3,06		73	23,6	6,52	70	30/10/13	3,037	0,739	0,698	0	42,7	5,9	1,93	1,9	7,033	63,937	5,64	1,571	-37,5	1,1	-3,1	0,1							
74	BK85-02	Rivière Irané	11,06	3,06	220,4	93	18,3	6,5	1281	06/12/13	3,696	2,256	0,962	0	48,8	5,317	2,487	2,862	6,871	73,251	4,73	<0,02	-39,6	0,6	-3,0	0,1							
70	BK83-02	Rivière Bouli	10,45	2,92	273	109	19,5	7,31	3294	03/12/13	3,027	3,717	0	0	61	7,083	2,256	2,89	9,035	89,028	6,97	0,235	-34,7	0,9	-2,3	0,1							
72	BK83-02	Ruisseau à Doungulaye ouest	10,72	3,05	250,2	93	20,5	7,32	1281	03/12/13	3,364	0,431	0,978	0	48,8	6,487	2,718	2,788	7,398	72,964	6,41	0,258	-34,4	1,0	-2,3	0,1							
1	BK01-02	Cambro Ordovicien	6,7	11,98	3,22	171,1	551	26,8	6,3	350	02/11/13	43,90	32,70	21,07	0,00	189,1	18,35	35,76	15,00	41,28	397	9,13	<0,02	-27,3	1,0	-4,5	0,2						
2	BK02-02	Cambro Ordovicien	43	11,98	3,22	174,1	182	27,3	6,46	175	02/11/13	1,33	1,40	5,14	0,00	97,6	7,31	7,78	5,17	15,57	141	6,76	<0,02	-30,3	0,9	-0,9	0,2						
5	BK05-02	Cambro Ordovicien	73	12,07	3,19	171,7	800	26,8	7,19	930	02/11/13	13,30	18,36	19,40	24,00	207	34,57	4,50	39,78	15,61	376	6,81	<0,02	-22,6	0,9	-3,4	0,2						
7	BK07-02	Cambro Ordovicien	11,14	2,94	280,8	196	25,7	7,15	180	02/11/13	7,7	0,1	0,94	0	97,6	10,094	4,817	4,945	14,902	140,998	11,13	<0,02	-24,0	0,7	-4,0	0,2							
41	BK08-02	Cambro Ordovicien	2,8	11,84	3,23	165,7	732	24,7	6,64	4026	05/12/13	86,675	84,94	30,8	0	152,5	48,17	65,7	18,32	49,455	536,54	3,17	<0,02	-25,1	0,3	-4,3	0,2						
42	BK09-02	Cambro Ordovicien	76	11,84	3,23	174	453	25,5	7,13	4880	05/12/13	35,2	10,96	11,9	0	201,3	76,05	5,6	5,684	22,386	369,03	5,22	<0,02	-36,8	1,0	-6,0	0,2						
8	BK10-02	Cambro Ordovicien	2,4	11,94	3,23	167,9	222	25,5	6,42	160	02/11/13	13,24	18,11	4,65	0	97,6	11,84	4,707	7,5	19	176,647	6,17	<0,02	-34,9	0,8	-4,4	0,2						
9	BK11-02	Cambro Ordovicien	70	11,90	3,26	180,4	125	26,8	5,6	35	31/10/13	1,419	16,77	2,02	0	42,7	10,054	2,529	2,184	7,051	84,727	5,13	<0,02	-33,8	1,0	-4,0	0,2						
10	BK12-02	Cambro Ordovicien	4,6	11,90	3,26	159,8	365	25,9	6,37	125	02/11/13	39,432	22,412	14,108	0	97,7	20,04	18,716	6,59	23,372	242,37	5,12	<0,02	-27,5	1,2	-4,6	0,2						
14	BK17-02	Cambro Ordovicien	33,4	11,86	3,29	157,6	592	26	6,16	100	31/10/13	26,5	151,15	17,5	0	97,6	11,8	38,9	18,35	48	409,6	1,87	<0,02	-23,6	0,9	-4,1	0,2						
15	BK18-02	Ordovicien Terminal à Silurien	20,25	11,76	3,31	177,2	121	27,1	6,88	35	31/10/13	2,82	36,98	0	0	24,4	10,69	2,14	0,88	7,92	85,83	2,49	<0,02	-21,9	0,8	-4,0	0,1						
16	BK20-02	Cambro Ordovicien	60	11,73	3,22	188,4	986	26,4	6,02	340	31/10/13	55,25	171,75	28,5	0	169	30,5	50,9	28,58	65,5	608,98	1,58	<0,02	-26,1	1,0	-4,4	0,1						
17	BK21-02	Cambro Ordovicien	40,7	11,56	3,12	214,9	38	26	6,42	40	31/10/13	3,225	1,183	0,938	0	30,5	4,081	6,3366	1,335	3,132	50,3096	4,58	<0,02	-25,8	0,5	-4,3	0,1						
21	BK26-02	Ordovicien Terminal à Silurien	40	11,79	3,40	168,6	570	27,1	5,85	190	31/10/13	16,42	130,61	21,09	0	115,9	9,555	51,795	13,675	44,39	403,435	1	<0,02	-26,4	0,8	-4,4	0,2						
22	BK27-02	Ordovicien Terminal à Silurien	17,15	11,78	3,40	173,5	125	26,8	5,6	35	31/10/13	2,674	36,915	0,825	0	18,3	5,471	3,412	2,731	8,674	79,002	3,69	<0,02	-24,1	1,0	-4,0	0,1						
26	BK31-02	Ordovicien Terminal à Silurien	11,75	3,52	168,4	141	27,3	5,88	155	31/10/13	0	0	1,917	0	79,3	1,204	3,502	2,29	20,647	108,86	2,01	<0,02	-38,8	0,5	-6,5	0,1							
27	BK33-02	Ordovicien Terminal à Silurien	6,55	11,71	3,55	166,4	266	26,4	6,14	105	31/10/13	9,798	51,294	9,812	0	54,9	11,206	3,652	4,934	26,66	172,256	5,39	<0,02	-22,1	1,2	-4,3	0,2						
28	BK34-02	Ordovicien Terminal à Silurien	43,13	11,71	3,55	166	103	28,6	5,93	70	31/10/13	1,254	16,513	0,991	0	36,6	4,447	1,932	1,95	11,736	75,423	6,64	<0,02	-24,7	1,3	-4,7	0,1						
29	BK35-02	Ordovicien Terminal à Silurien	15,55	11,62	3,50	213,9	252	26,2	6,4	120	31/10/13	14,728	45	8,064	0	61	9,02	10,06	7,058	23,518	178,448	2,77	<0,02	-25,1	0,6	-4,4	0,2						
30	BK36-02	Ordovicien Terminal à Silurien	45	11,61	3,50	218,6	374	26,9	5,92	85	31/10/13	15,65	98,38	1,655	0	54,9	1,085	6,545	6,56	51	235,725	4,82	<0,02	-25,8	0,7	-5,0	0,1						
31	BK37-02	Ordovicien Terminal à Silurien	30	11,58	3,51	204,7	138	26,8	6,08	155	31/10/13	0	0	0,162	0	79,3	0,641	3,715	2,243	23,176	109,237	4,11	<0,02	-26,0	0,8	-4,6	0,2						
32	BK38-02	Ordovicien Terminal à Silurien	10,45	11,56	3,51	203,3	123	26,3	6,24	60	31/10/13	5,618	17,53	0,9	0	36,6	3,77	3,88	4,056	10,02	82,374	4,64	<0,02	-23,3	0,5	-4,4	0,2						
43	BK39-02	Ordovicien Terminal à Silurien	41,7	11,65	3,39	209,1	37	25,7	5,8	122	05/12/13	1,88	12,72	0,793	0	6,1	4,443	1,028	0,7	2,63	30,294	1,31	<0,02	-26,0	1,2	-4,6	0,2						
44	BK41-02	Cambro Ordovicien	10,36	3,40	294,5																												

Données de terrain et données hydrochimiques et isotopiques produites dans le cadre du projet RAF/7/011, présentées pour le bassin d'Iullemeden au Bénin (campagne 2)

N°	Code	Aquifère	depth	Latitude	Longitude	Alt (m)	CE m5/cm	T°C	pH	Alcalinité mg/l	Sampling Date	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	TDS (mg/l)	SiO ₂	Fe	δ ² H (‰ vs Smow)	² H_ERR	δ ¹⁸ O (‰ vs Smow)	¹⁸ O_ERR	³ H	³ H_ERR	³ H_Lab	¹⁴ C	¹⁴ C	14C_ERR	14C_Lab			
46	BK43-02	Ordovicien Terminal à Silurien	10,94	3,68	265,9	47	26,1	5,99	671	04/12/13	0,29	0	0,147	0	28,5	0,865	4,282	2,041	3,957	40,082	7,93	<0,02	-23,7	1,1	-3,9	0,2											
47	BK44-02	Ordovicien Terminal à Silurien	9,65	10,93	3,69	176,5	1278	24,9	6,11	610	04/12/13	135,65	346,07	5,88	0	48	69,13	36,4	37,02	85,4	761,55	5,95	<0,02	-21,6	1,0	-3,6	0,2										
48	BK45-02	Ordovicien Terminal à Silurien	36,5	10,91	3,69	194,5	47	26,4	6,05	671	04/12/13	0,65	0,3	0,44	0	39,5	1,107	4,874	1,584	3,8	43,07	6,98	<0,02	-23,7	1,1	-4,3	0,2										
49	BK46-02	Cambro Ordovicien	43	11,03	3,55	270,8	13	25,5	5,72	122	04/12/13	0,64	1,188	0,363	0	6,1	1,3	0,22	0,44	0,9	11,151	5,24	<0,02	-24,9	0,6	-4,3	0,2										
50	BK47-02	Cambro Ordovicien	9,2	11,03	3,55	171	23	24,9	5,84	366	04/12/13	2,112	2,907	0,866	0	12,2	2,56	0,45	0,53	3,72	25,345	4,54	<0,02	-26,9	1,2	-4,8	0,2										
51	BK48-02	Ordovicien Terminal à Silurien	43,2	11,24	3,45	179,1	20	25,1	5,81	244	04/12/13	0,701	0,848	0,391	0	12,2	3	0,745	0,51	1,24	19,635	5,43	<0,02	-23,2	0,8	-4,5	0,1										
52	BK49-02	Ordovicien Terminal à Silurien	11,1	11,24	3,45	183,9	79	23,1	6,03	488	04/12/13	4,374	17	1,5	0	18,3	6,092	3,31	0,85	7,6	59,026	5,28	<0,02	-24,8	1,0	-4,9	0,2										
53	BK50-02	Ordovicien Terminal à Silurien	7,8	11,12	3,38	395	324	24,7	6,48	2684	04/12/13	8,538	49,228	5,012	0	105,7	6,72	6,032	7,36	39,46	226,05	5,18	<0,02	-23,4	0,9	-4,3	0,2										
55	BK53-02	Cambro Ordovicien	26	11,03	3,11	272,2	22	23,7	6,28	395	06/12/13	1,073	4	0,3	0	12,2	1,47	1,16	1,21	2,39	13,869	2,46	<0,02	-24,9	0,8	-4,5	0,2										
56	BK54-02	Cambro Ordovicien	11,05	3,07	266,6	46	24,5	6,06	671	06/12/13	1,167	0,792	1,408	0	24,4	2,54	2,87	1,82	2,6	37,597	5,28	<0,02	-23,9	0,8	-4,4	0,2											
34	BK55-02	Cambro Ordovicien	60	11,12	2,97	296,3	27	25,1	6,31	30	30/10/13	0,467	0,672	0,854	0	18,3	2,03	1,58	1	2,92	27,823	3,39	<0,02	-24,2	1,1	-4,7	0,1										
57	BK57-02	Cambro Ordovicien	16,05	11,18	3,06	259,3	343	24	6,48	1891	06/12/13	18	61,85	16	0	79,3	9,6	18,2	10,7	33,65	247,3	4,94	<0,02	-22,8	0,5	-4,6	0,1										
58	BK59-02	Cambro Ordovicien	28	11,34	3,27	224,7	19	26,1	6,68	183	09/12/13	5,499	5,084	3,635	0	6,1	3,7	1,61	1,02	2,5	29,148	3,84	<0,02	-22,2	1,0	-4,3	0,2	<1,3									
35	BK61-02	Cambro Ordovicien	10,73	2,98	303,2	141	26,4	6,64	40	30/10/13	8,48	29,5	6,707	0	18,3	5,22	11,78	3,06	8,58	67,627	2,49	<0,02	-22,6	1,0	-4,5	0,1											
36	BK62-02	Cl	8	10,73	2,98	304,4	2906	25,4	6,36	845	30/10/13	249,78	765,08	131,24	24	298,9	129,34	285,4	67,54	298,8	2160,08	3,92	<0,02	-18,5	0,8	-3,5	0,2										
38	BK64-02	Cambro Ordovicien	42,92	10,72	2,79	326,6	213	26,3	6,72	305	30/10/13	2,202	1,218	1,802	6	115,9	12,26	5,28	9,08	20,252	173,994	10,25	<0,02	-21,5	1,2	-4,2	0,2										
39	BK73-02	Cambro Ordovicien	1,9	11,13	2,94	276,3	88	24,4	6,8	40	02/12/13	8,45	10,878	3,224	0	24,4	7,786	7,43	1,78	3,8	67,748	5,84	0,224	-21,5	0,9	-3,9	0,2										
37	BK63-02	Socle Panafricain	22	10,69	2,84	335,2	339	26,5	6,5	410	30/10/13	11,715	6,5	4,6	18	158,6	22,4	7,1	13,199	34,5	276,61	10,8	<0,02	-22,4	0,5	-4,3	0,1										
60	BK66-02	Socle Panafricain	45,3	10,84	3,75	319	350	25,3	7,29	1368	02/12/13	8,5	11	10	12	183	21,85	5,75	14,85	40,15	307,1	11,55	<0,02	-26,6	1,1	-4,2	0,2										
61	BK67-02	Socle Panafricain	7,1	10,29	3,47	397,4	696	24,6	6,67	3416	02/12/13	53,705	149,34	12,965	0	85,4	40,315	69,35	14,25	33,9	450,225	3,08	<0,02	-21,4	0,7	-3,1	0,1										
62	BK69-02	Socle Panafricain	12,92	10,37	3,22	329	1283	24,6	6,75	5246	02/12/13	160,87	255,71	39,51	6	136,2	76,3	65,8	34,4	92,5	863,29	10,67	<0,02	-21,6	0,3	-3,3	0,1										
63	BK70-02	Socle Panafricain	43,59	10,37	3,22	323,2	704	25,9	6,87	6710	02/12/13	49,88	109,135	15,7	12	164,7	27,75	6,55	23,6	61,35	470,665	12,4	<0,02	-21,1	0,9	-3,8	0,1										
64	BK71-02	Socle Panafricain	4,65	10,36	3,15	304	390	24,5	7,03	5612	02/12/13	26,285	30,215	10,505	6	134,2	30,2	8,75	6	37,4	289,555	12,35	<0,02	-22,4	0,5	-3,8	0,2										
65	BK72-02	Socle Panafricain	43,66	10,36	3,15	306,3	841	24,5	6,88	10370	02/12/13	75,595	75,655	32,715	6	256,2	49,5	10,5	21,98	49	618,345	12,66	<0,02	-20,7	1,0	-3,8	0,2										
66	BK77-02	Socle Panafricain	10,40	3,68	330,3	175	25,2	6,88	4026	02/12/13	2,624	0,2	0	0	10,7	13,178	3,88	5,55	12,3	141,412	11,18	<0,02	-22,2	0,7	-4,0	0,1											
67	BK78-02	Socle Panafricain	10,21	3,14	344,3	383	24,3	7,16	7747	02/12/13	11,222	0,2	2,546	12	183	28,4	4,4	6,06	3,2	279,828	9,15	<0,02	-22,0	1,0	-3,8	0,1											
68	BK79-02	Socle Panafricain	10,54	2,73	325,1	385	24,7	7,2	5856	03/12/13	26,605	28,19	8,92	12	140,3	24	5,25	14	36,5	295,765	8,42	<0,02	-22,2	1,1	-3,7	0,2											
69	BK80-02	Socle Panafricain	16,18	10,45	2,82	301,5	609	24,3	7,13	4026	03/12/13	38,455	145,705	15,96	0	110	33,35	24,3	16	54,5	438,27	17,19	<0,02	-21,3	1,1	-3,7	0,1										
71	BK82-02	Socle Panafricain	15,97	10,67	2,67	341,3	549	24,4	7,14	2928	03/12/13	48,995	121,78	9,665	12	122	27,86	9,02	27	52	430,32	9,41	<0,02	-21,3	0,6	-3,6	0,1										
73	BK84-02	Socle Panafricain	10,98	3,28	242	218	23,6	6,29	366	04/12/13	18,88	58,57	6,6	0	12,2	6,966	16,084	3,822	12,702	136,834	1,73	<0,02	-21,2	1,2	-3,9	0,1											

Données de terrain et données hydrochimiques et isotopiques produites dans le cadre du projet RAF/7/011, présentées pour le bassin d'Iullemeden au Bénin (campagne 3)

N°	Code	Aquifère	depth	Latitude	Longitude	Alt (m)	CE m5/cm	T°C	pH	Sampling Date	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	TDS (mg/l)	δ ² H (‰ vs Smow)	² H_ERR	δ ¹⁸ O (‰ vs Smow)	¹⁸ O_ERR
1	BK86-03		11,86	3,42	156,2	71	32,4	7,13	03/04/2016	0,89	<0,01	0,31	<0,01	30,50	2,54	1,67	1,83	3,87	41,61	-20,10	1,42	-2,96	0,15	
2	BK87-03	Ordovicien Terminal à Silurien	44,9	11,79	3,48	176,4	15	32	6,98	04/04/2017	1,03	2,66	0,18	<0,01	4,00	1,66	0,57	0,19	0,53	10,82	-23,48	1,10	-3,83	0,16
3	BK88-03	Cambro Ordovicien	52	11,85	3,21	172,6	270	33,7	7,95	04/04/2017	1,58	4,39	4,93	<0,01	146,40	22,46	4,95	4,44	19,77	208,92	-25,61	1,05	-3,83	0,19
4	BK89-03	Cambro Ordovicien	76	11,84	3,23	174	437	33	7,85	04/04/2017	33,14	10,64	9,20	<0,01	183,00	67,06	3,80	9,06	15,15</					