



ALGERIA



BURKINA FASO



MALI



MAURITANIA

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

RAF/7/011

**BASSIN DE TAOUDÉNI**

2017

#### NOTE D'ORDRE RÉDACTIONNEL

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 des 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 SUR LE PROJET RÉGIONAL DE COOPÉRATION TECHNIQUE RAF/7/011 APPUYÉ PAR L'AIEA

## BASSIN DE TAOUDÉNI

### CONTREPARTIES :

M. Adnane Souffi MOULLA (Algérie)  
M. Abdelwaheb SMATI (Algérie)  
M<sup>me</sup> Ratoussian Aline KABORE KOMI (Burkina Faso)  
M. Alphonse GALBANE (Burkina Faso)  
M. Sidi KONÉ (Mali)  
M. Aly THIAM (Mali)  
M. Brahim Labatt HMEYADE (Mauritanie)  
M. Sidi Haiba BACAR (Mauritanie)

### EXPERT :

M. Jean Denis TAUPIN (France)

Reproduit par l'AIEA

Vienne (Autriche), 2017

# Table des matières

1. INTRODUCTION	1
2. SITES D'ÉTUDE	5
2.1. Présentation générale des pays participants	5
2.2. Précipitations et hydrologie	8
2.3. Géologie et hydrogéologie	10
3. ACQUISITION DE DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE UTILISÉE	22
4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION	26
4.1. Résultats et discussion : zone d'étude de la Mauritanie	26
4.2. Résultats et discussion : zone d'étude au Mali	33
4.3. Résultats et discussion : zone d'étude au Burkina Faso	61
5. CONCLUSIONS	86
6. RÉFÉRENCES	90
ABRÉVIATIONS	95
ANNEXES	97

# 1. INTRODUCTION

Le bassin de Taoudéni (1,5 million de km<sup>2</sup>) est une importante formation géologique sédimentaire d'Afrique de l'Ouest, qui doit son nom au village de Taoudéni situé au nord du Mali. Il occupe de vastes territoires du craton ouest-africain en Mauritanie, au Mali et dans la région sud-ouest du Burkina Faso (Fig. 1).

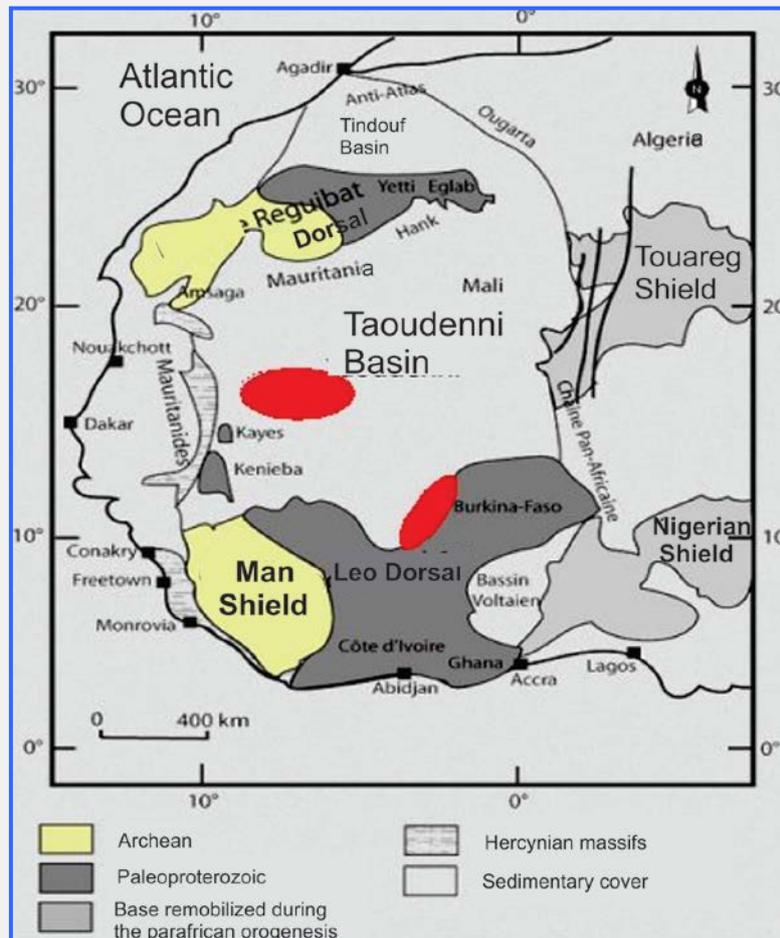


Figure 1 : Bassin de Taoudéni. Les zones étudiées dans le cadre du projet RAF/7/011, soutenu par l'AIEA, sont représentées en rouge.

Ce bassin, qui constitue le plus grand synclinal sédimentaire du nord-ouest africain, s'est formé dans la deuxième moitié du protérozoïque. Sa période active de subsidence s'est poursuivie jusqu'au milieu du paléozoïque, où s'est produite l'orogénèse hercynienne et où il s'est trouvé exondé. Il renferme près de 6 000 m de sédiments du précambrien terminal et du paléozoïque. Il est çà et là recouvert de fins dépôts continentaux du mésozoïque-cénozoïque, comprenant notamment des dunes du quaternaire et des systèmes lacustres. Ces derniers dépôts témoignent de la continuité géographique entre plusieurs bassins, à savoir le bassin de Taoudéni/Tanezrouft au nord et celui de Taoudéni qui communique avec le bassin des Iullemeden à l'est. Les réserves en eau du bassin de Taoudéni sont très abondantes, mais,

compte tenu des conditions climatiques actuelles, caractérisées par un climat sahélo-soudanien (pluviométrie annuelle entre 600 et 1 000 mm) au sud et un climat aride (pluviométrie < 150 mm/an) au centre et au nord, l'eau prélevée par l'activité anthropique ne se renouvelle pas en totalité. Bien que la densité démographique et la consommation d'eau soient limitées dans la partie septentrionale de Taoudéni, la population croît à un rythme d'environ 3 % par an dans la partie centrale et, plus particulièrement, dans la partie méridionale, où la pression grandissante sur les ressources en eau va de pair avec une contraction de la nappe phréatique dans de nombreux aquifères et une dégradation de la qualité de l'eau, imputable aux activités humaines et à l'absence de mesures de protection de l'environnement.

Deux zones d'étude ont été examinées dans le cadre du projet RAF/7/011, mis en œuvre avec le soutien de l'AIEA dans trois pays, à savoir la Mauritanie, le Mali et le Burkina Faso, les interventions initialement prévues au Mali ayant été revues à la baisse en raison de problèmes de sécurité dans le nord du pays (Fig. 1).

La zone d'étude chevauche le Mali et le Burkina Faso au sud (sud-est du Mali et sud-ouest du Burkina Faso) et correspond à la limite est du bassin sédimentaire de Taoudéni, où s'intercale un dépôt infracambrien discordant sur le socle cristallin du paléo-protérozoïque en surface. La superficie totale est comprise entre 9°30'-15°5' de latitude et 1°30'-8°30' de longitude ouest.

### Études isotopiques et hydrochimiques effectuées précédemment dans la zone cible

Concernant les données existantes ou les projets en cours dans la zone étudiée dans la partie mauritanienne du bassin de Taoudéni, aucune étude n'est mentionnée dans les références bibliographiques accessibles sur Internet ni dans la littérature scientifique. Certains outils géologiques (carte, coupe, profil stratigraphique) ont été fournis par une contrepartie de projet lors d'une réunion organisée par l'AIEA sur le projet RAF/7/011, pour une zone située entre 15°-17° N et 6-12°O.

Les données existantes ou les projets menés dans la zone d'étude livrent peu d'informations géochimiques et isotopiques sur les régions centrale et occidentale. En revanche, la partie orientale a fait l'objet d'un grand nombre d'études et de projets axés sur l'hydrogéologie et la

qualité de l'eau depuis les années 1970 et la chute des précipitations dans la zone sahélo-soudanienne :

- le projet « Mali sud » (SOGREAH, 1988), qui a permis de déterminer les paramètres de transmissivité pour la partie occidentale du Burkina Faso,
- le projet « Bilan d'eau » au Burkina Faso (Iwago, 1989), qui a permis de classer les aquifères en trois catégories selon leur type de porosité,
- le programme ERES (près de Bobo Dioulasso), étude détaillée de l'hydrodynamique des eaux souterraines dans les 1 500 km<sup>2</sup> du bassin de Kou (SOGREAH, 1994) à partir de la diversité des couches sédimentaires de l'infra-cambrien,
- les projets RESO (1994) et BAD (1999), menés dans le prolongement du programme ERES afin de mettre au point une vaste banque de données sur l'emplacement géographique des puits.

Les premiers travaux d'importance ont été réalisés par Ouédraogo (1994), qui a proposé une synthèse géologique du bassin de Taoudéni côté Burkina Faso et une description hydrodynamique et géochimique des eaux souterraines locales. En complément des travaux de Ouédraogo, Dakouré (2003) et Huneau *et al.* (2011) ont étudié les caractéristiques géochimiques et isotopiques des eaux souterraines situées dans la même zone en reprenant différentes analyses géochimiques et isotopiques détaillées qui ont été effectuées dans la région à partir des années 1980, dans le cadre de projets de coopération technique soutenus par l'AIEA, notamment de deux projets conduits au Burkina Faso (BKF/8/002 et BKF/8/003) et d'un projet exécuté au Mali (MLI/8/002). Ils ont choisi de travailler sur les données géochimiques et isotopiques de 110 points d'échantillonnage, dont 98 pour le tritium et 39 pour le carbone 14 utilisés pour le calcul du temps de séjour des eaux souterraines. La signature isotopique de la recharge a été calculée à l'aide des données du GNIP (AIEA/OMM, 2006) issues des stations de Bobo Dioulasso, Barogo et Bamako. Le principal objectif de cette étude était de livrer une analyse fine de l'hydrodynamique et de la géochimie du système aquifère et de proposer un premier modèle d'écoulement homogène à travers différentes formations sédimentaires, malgré la présence par endroits de discontinuités hydrauliques. Les auteurs mettent en lumière et quantifient la baisse du niveau de l'eau (30 m/an au Burkina Faso), en lien avec l'accroissement de la consommation humaine et la diminution des précipitations. L'étude de la géochimie montre essentiellement la présence d'un type Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> qui peut passer soit à un type Na-K-HCO<sub>3</sub> indiquant l'apparition d'interactions entre les minéraux des eaux souterraines et de l'argile liées au temps de séjour, soit à un type

Cl-NO<sub>3</sub>.SO<sub>4</sub>.HCO<sub>3</sub> indiquant une influence anthropique sur ces eaux liée aux mauvaises conditions d'assainissement prévalant autour des puits. Cette étude isotopique montre que la recharge actuelle est très limitée ou nulle dans la plupart des parties de l'aquifère, et qu'il n'y a de preuve de réalimentation récente que dans des sites très localisés.

La zone d'échantillonnage du projet RAF/7/011 correspond à celle de l'étude de Dakouré. Les derniers travaux (Koussobe, 2013) ont porté sur l'hydrogéologie, l'hydrochimie et des études isotopiques de la plaine de Gondo (bassin de Sourou) avec modélisation hydrodynamique. Ils ont été effectués un peu plus au nord de la zone du projet RAF/7/011, et ont examiné l'hydrogéologie de l'infra-cambrien, ainsi que du continental terminal au-dessus du dépôt infra-cambrien et du socle cristallin, des formations géologiques identifiées dans la plaine de Gondo. Les principaux résultats ont permis de définir la caractérisation géométrique et piézométrique des différents aquifères, pour mettre en lumière une réalimentation récente (aquifères superficiels) ou des aquifères profonds en bordure de la plaine de Gondo et une recharge antérieure à 1950 en ce qui concerne les autres aquifères profonds au-dessous du continental terminal (le carbone 14 n'a pas été analysé pour affiner la datation mais on peut supposer un âge plus élevé comme dans l'étude de Dakouré, qui met en évidence des teneurs en isotopes stables inférieures à celles des précipitations actuelles). Compte tenu de la différence du niveau de connaissance en fonction de la zone d'étude en Mauritanie et au Mali-Burkina Faso, les objectifs définis sont différents.

### **Objectifs du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA dans l'aquifère cible**

Les objectifs du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA dans le bassin de Taoudéni en Mauritanie sont les suivants : élaborer une première évaluation du potentiel d'eaux souterraines ; effectuer une première caractérisation géochimique de la variabilité spatiale à relier aux informations géologiques ; définir la direction d'écoulement avec une carte potentiométrique montrant s'il y a une relation entre les aquifères superficiels et les aquifères plus profonds et si la réalimentation actuelle a lieu avec les isotopes stables de l'eau et le tritium. La principale difficulté consiste à comparer les isotopes stables des eaux souterraines et des précipitations. De fait, il y a très peu de données, notamment en ce qui concerne le nord du Sénégal (Travi *et al.*, 1987) et les données récentes (2013-2015) dans la partie côtière Rosso-Tiguint-Boutilimit-Nouakchott de la Mauritanie, et les conditions climatiques sont différentes de celles de la zone d'étude du projet RAF/7/011.

Les objectifs de ce projet sont différents dans l'ouest et l'est de la zone d'étude au Mali. Dans l'ouest, il y a peu de données car c'est la première évaluation du potentiel d'eaux souterraines (ouest de l'infra-cambrien tabulaire (ICT), du continental intercalaire (CI) et du continental terminal (CT)), et les mêmes objectifs pourraient éventuellement être atteints pour la Mauritanie à la fin dudit projet. Dans la partie est et au Burkina Faso, il y a plus de données disponibles, avec une plus forte densité d'échantillonnage, et la valeur scientifique de ces travaux est avérée. Ces nouvelles données renforceront les efforts d'interprétation passés et, par comparaison, permettront de mettre en évidence toute évolution de la géochimie des eaux souterraines (la contribution anthropique est plus importante) et d'ajuster le modèle hydrodynamique en comparant l'évolution temporelle du tritium. La nécessité d'élaborer un modèle numérique avec des données géochimiques et isotopiques au cours des prochains mois est évidente.

## 2. SITES D'ÉTUDE

### 2.1. Présentation générale des pays participants

La République islamique de Mauritanie, dont la capitale est Nouakchott, a une superficie de 1 030 000 km<sup>2</sup> et est couverte à 90 % par le désert. Elle s'étend essentiellement de 14° à 26° de latitude N et de 5° à 17° de longitude O. Le relief est généralement peu accidenté, avec de vastes plaines arides traversées occasionnellement par des crêtes et des affleurements apparentés à des falaises. La Mauritanie peut se diviser en cinq zones écologiques en fonction des caractéristiques climatiques, à savoir :

- La zone aride, qui comprend les terres en deçà des isohyètes de 150 mm, à l'exception de la bande littorale, et correspond au climat saharien.
- La zone sahélienne orientale, qui comprend les terres situées entre les isohyètes de 150 mm et la bordure des deux hodhs et le Mali, et abrite la moitié du potentiel sylvo-pastoral du pays.
- La zone sahélienne occidentale, comprise entre les isohyètes de 150 mm et le fleuve Sénégal.
- La vallée du fleuve où est concentré l'essentiel de l'agriculture du pays.
- Le front marin, une bande étroite de 50 m entre Nouadhibou et N'diogo.

Le Mali, dont la capitale est Bamako, est le plus grand pays d'Afrique occidentale. Il est limité par sept autres pays, à savoir la Mauritanie, l'Algérie, le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire, la Guinée, le Niger et le Sénégal. Le Mali est situé entre 10° et 25° de latitude N et 13° et

5° de longitude E. C'est une vaste étendue de plaines traversée par deux fleuves, le Sénégal vers sa bordure occidentale et le grand fleuve Niger. Généralement présenté comme le poumon du Mali, le Niger est source de nourriture et d'eau de boisson et d'irrigation, et sert aussi au transport. Il conflue avec le fleuve Bani sur sa route vers le nord. Venant de Guinée, le Niger crée un vaste delta intérieur fertile en formant un arc au nord-est, à travers le Mali, avant de tourner vers le sud pour se jeter dans le golfe de Guinée. Il conflue avec le Bani et forme un riche delta intérieur, les marécages du Macina, qui s'étend sur 450 km le long du fleuve, avec une largeur de 200 km à certains endroits. Le centre du pays est une région de pâturage aride appelée le Sahel, qui a beaucoup souffert de sécheresse. Le Mali a une superficie de 1 240 192 km<sup>2</sup>, dont environ 65 % sont désertiques ou semi-désertiques. À Tombouctou où il rejoint le désert, le fleuve Niger tourne d'abord vers l'est, puis vers le sud-est à Bourem, d'où il se dirige vers l'océan. Dans le désert, près des frontières de l'Algérie et du Niger au nord-ouest, se dresse le massif de l'Adrar des Iforas, haut de 800 m. Le nord du Mali est une zone totalement désertique, hormis quelques oasis le long des anciennes pistes chamelières qui traversent le Sahara. La majorité de la population vit dans la région de savane, au sud.

Le Mali peut se diviser en quatre zones écologiques en fonction des caractéristiques du climat, des sols et de la topographie.

- La steppe saharienne au nord de la zone saharienne, avec des précipitations de zéro à 150 mm. Sa végétation est formée de pâturages de *Cornulaca monacantha*, *Panicum turgidum* et *Aristida pungens*. La steppe subsaharienne, entre les isohyètes de 150 et de 250 mm, où la végétation est concentrée dans les oueds et les ravins. Constituée d'espèces naines, celle-ci se compose d'un couvert herbacé comprenant des plantes annuelles à cycle court (*Aristida hordaceae*, *Morettia philaeana*, *Farsetia stylosa*, etc.) et d'une strate arbustive clairsemée d'*Acacia ehrenbergiana*, d'*Acacia tortilis*, de *Balanites aegyptiaca* et de *Maeura crassifolia*. La végétation peut être abondante dans les dépressions et les plaines correspondant aux lits des oueds comme l'Adrar, ou aux zones d'épandage des crues (Adrar, Tilemsi, Tamesna). Celle des dunes et des zones sableuses est composée d'*Aristida* (*A. mutabilis*, *A. pallida*, *A. papposa*) essentiellement et de *Panicum turgidum*.

- La steppe sahélienne, entre les isohyètes de 250 et de 500 mm. Sa végétation est de type xérophile sur les dunes du nord : la strate herbacée est dominée par *Cenchrus biflorus*, *Aristida mutabilis* et *Schoenfeldia gracilis*, et on note la présence

d'Acacia senegal et d'Acacia laeta dans la strate arbustive. Elle est ouverte sur les dunes, où le pouvoir de rétention d'eau est faible, et les pentes, où le ruissellement est important. La végétation est une steppe mésophile vers le sud. Elle se concentre dans les dépressions silteuses, avec Schoenfeldia gracilis, Panicum laetum, Acacia laeta et Salvadora persica, et dans les zones d'inondation des cours d'eau où se forment des pâturages lacustres constitués d'espèces pérennes comme Echinochloa stagnina, Oryza barthii et Vossia cuspidata. Sur les plateaux, les cuirasses latéritiques sont colonisées par Combretum nigricans, Guiera senegalensis, Lannea acida et Sclerocarya birrea. Sur le plan floristique, le sud du Sahel est une zone de transition entre les zones sahélienne et soudanienne. Il abrite des éléments des diverses zones biogéographiques avec, toutefois, une abondance marquée de la composante nord soudanienne (combrétacées) et la prédominance des espèces de grande taille dans le couvert herbacé.

- La zone soudanienne, entre les isohyètes de 800 et de 1 400 mm, est la zone de « savane de prairie-parc », avec un couvert herbacé intégral. Cette savane est caractérisée par Vitellaria paradoxa, Parkia biglobosa, Sclerocarya birrea et Lannea acida. La strate herbacée est dominée par les espèces pérennes dont Andropogon gayanus tend aujourd'hui à se raréfier en raison du défrichage. Seules des poches de cette espèce survivent dans les zones cultivées, avec de vastes étendues d'Andropogon pseudapricus, de Cymbopogon giganteus et de Pennisetum percellatum, des espèces peu appréciées.

- La zone soudano-guinéenne, qui correspond à celle de plus de 1 000 mm de précipitation, est le domaine de la savane arbustive et de la forêt clairsemée. Elle s'enrichit en graminées pérennes de grande taille, y compris plusieurs espèces d'Hyparrhenia. La strate arbustive est dominée par Daniellia oliveri et Isoberlina doka, associées à des espèces herbacées comme Schizachyrium rupestre, S. semi-herbe et Diheteropogon hagerupii.

Le Burkina Faso, dont la capitale est Ouagadougou, est un pays sans littoral situé au cœur de l'Afrique occidentale, limité à l'ouest et au nord par le Mali, à l'est par le Niger et au sud par la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Togo et le Bénin. D'une superficie de 264 000 km<sup>2</sup>, il s'étend essentiellement entre 9° et 15° de latitude N (avec une petite partie au nord de 15°) et entre 6° de longitude O et 3° de longitude E (Fig. 1). Il y a deux grands types de relief au

Burkina Faso. La plus grande partie du pays est constituée d'une pénéplaine faiblement ondulée, avec quelques collines isolées dans certaines régions et les derniers vestiges d'un massif précambrien. Le sud-ouest du pays est pour sa part constitué d'un massif de grès dont le sommet le plus haut, le Ténakourou, culmine à 749 m. Ce massif est bordé de falaises escarpées pouvant atteindre 150 m de hauteur. L'altitude moyenne au Burkina Faso est de 400 m et la différence entre les points les plus hauts et les plus bas ne dépasse pas 600 m. C'est donc un pays relativement plat. Il peut se diviser, en fonction des caractéristiques climatiques, en quatre zones écologiques, à savoir, du nord au sud, la zone sud soudanaise, la zone nord soudano-saharienne, la zone subsahélienne et la zone sahélienne.

## 2.2. Précipitations et hydrologie

En Mauritanie, la zone d'étude est caractérisée par un climat aride, avec des précipitations inférieures à 150 mm/an (essentiellement entre juin et octobre), et un gradient sud-nord (Soulé, 2013). Les stations météorologiques de la zone sont, du sud vers le nord, Moudejeria (18,55 N-11,43 O -188 mm), Tichit (18,43 N-9,48 O -79 mm), Tidjikia (18,55 N-11,43 O -26 mm), Chinguetti (20,45 N-12,35 O -56 mm) et Atar (20,51 N-13,05 O -70 mm).

Les moyennes des mesures d'évaporation effectuées à l'évaporimètre Piche (Griffith, 1972, et Shahin, 2006) vont de 14 mm/j à l'est à 3 mm/j dans la région côtière. Les eaux de surface sont très rares dans le nord et le centre où les précipitations sont extrêmement limitées. Il y a des oueds, mais pas de cours d'eau permanents, ainsi que des eaux de surface salines dans les zones de dépression liées à l'évaporation directe des eaux de ruissellement accumulées ou à l'évaporation des aquifères souterrains.

Au Mali et au Burkina Faso, la zone d'étude s'étend sur la même variation altitudinale, ce qui signifie que la pluviométrie est sensiblement égale dans l'est et l'ouest et ne dépend que du gradient sud/nord lié à la circulation dans la ZCIT. La pluviométrie annuelle va de 500 à 1 000 mm. Il y a un système bien développé de cours d'eau permanents dans le sud de la zone d'étude, mais pas dans la partie nord. Dans l'ouest et le centre de cette zone, outre l'infiltration directe des eaux de pluie, le Niger et ses affluents contribuent énormément au processus de recharge des aquifères, en particulier dans le delta intérieur du fleuve. Dans l'est (zone Mali-Burkina Faso), la partie malienne est située principalement dans le bassin du Niger et celui du Bani, un important affluent du Niger (101 600 km<sup>2</sup>), et la partie burkinabè est située essentiellement dans le bassin supérieur du Mouhoun. La zone du bassin du Bani est

peu accidentée et celui-ci a tracé des méandres avec le temps et donné naissance à un système de plaine d'inondation qui facilite le processus de réalimentation. Le débit du fleuve est très élevé entre août et novembre (station hydrométrique près de Ségou, dans la zone d'étude) et coïncide avec la saison pluvieuse dans la région (Fig. 2).

Dans la partie burkinabè, le débit du Mouhoun n'est pas si élevé (moyenne annuelle de 25 m<sup>3</sup> sur 20 000 km<sup>2</sup>) avant la confluence avec le fleuve Sourou venant du Mali dans le nord de la zone d'étude, et d'autres petits cours d'eau (Kou, Bingbéle et Niamé) sillonnent la région près de Bobo Dioulasso. On observe aussi des sources d'eau abondante (86 dont 77 permanentes), les plus importantes étant la source Guinguette (1 820 l/s), les deux sources ONEA (400 l/s) et les sources Pessou (100 l/s). Le sud-ouest de la zone d'étude fait partie du bassin de la Comoé, avec de nombreuses sources.

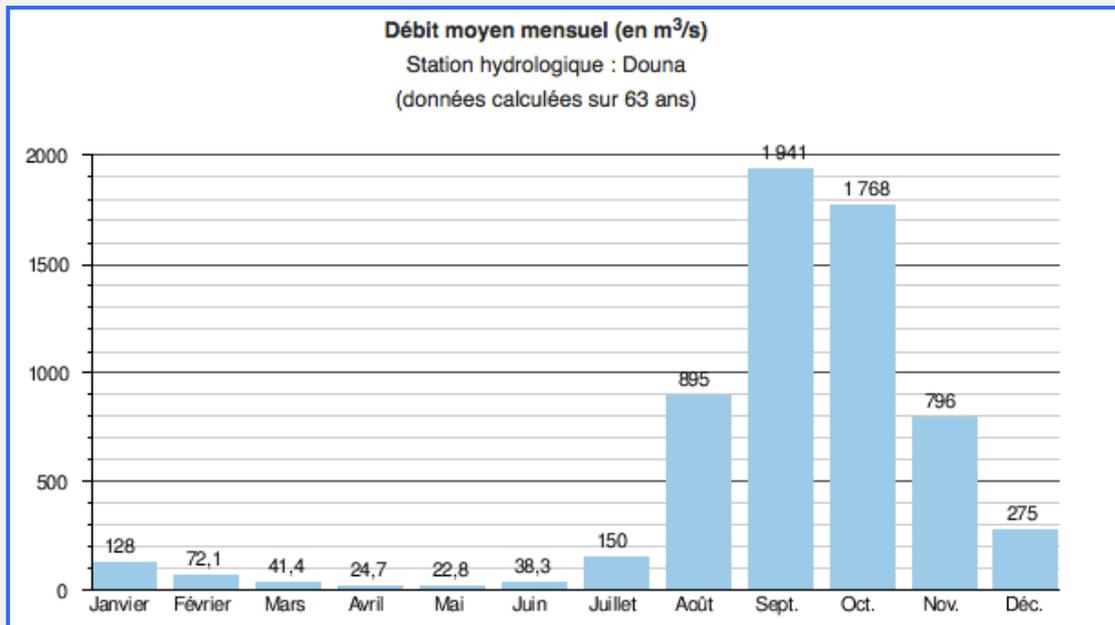


Figure 2 : Débit mensuel moyen à la station de Dona sur le fleuve Niger.

L'évolution du climat au cours des dernières décennies est marquée par une baisse généralisée des précipitations depuis le début des années 1970, même si on a noté une légère hausse à la fin des années 1990 (Fig. 3). La hausse des températures entraîne aussi une augmentation du processus d'évaporation. Ces deux paramètres - baisse de la pluviométrie et hausse des températures - se traduisent par une diminution du volume total d'eau disponible, même si on peut noter une hausse du niveau de la nappe de certains aquifères de la zone due à l'intensification de l'écoulement de surface et à la concentration dans le système endoréique permettant une infiltration locale massive. Cela est dû au processus de déforestation, qui modifie la structure du sol, avec en conséquence une vitesse d'écoulement des pluies plus

élevée (Leduc *et al.*, 2001). La baisse de la pluviométrie entraîne une diminution du débit fluvial (Fig. 4).

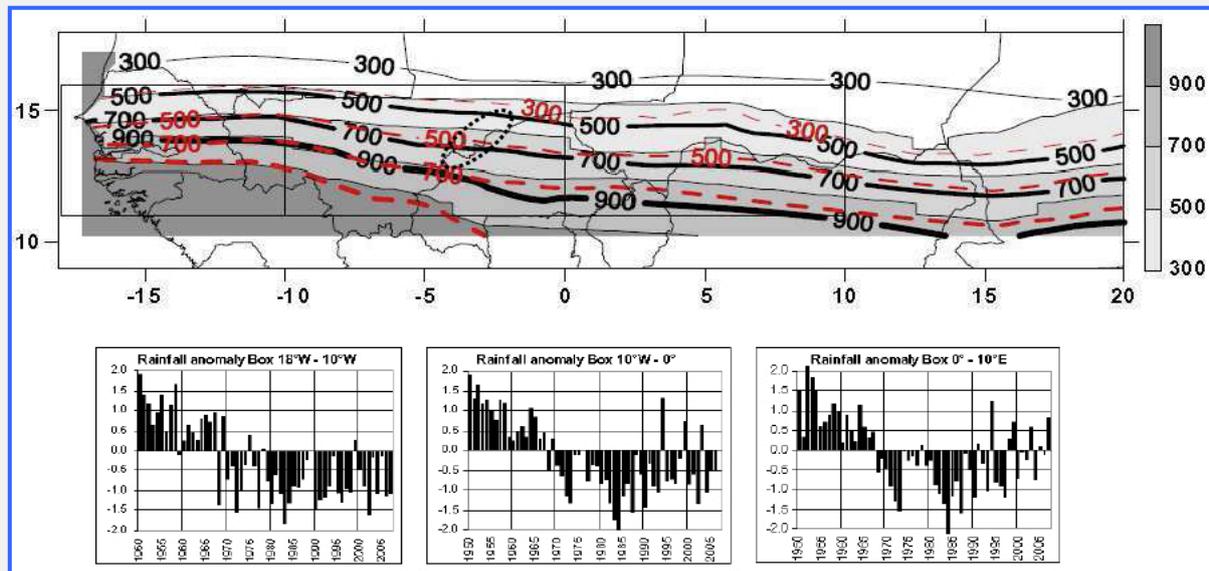


Figure 3 : Baisse des précipitations dans la région du Sahel. Distribution spatiale des moyennes annuelles pour la période 1970-1989 (en noir) et 1990-2006 (en rouge) (Lebel et Ali, 2009).

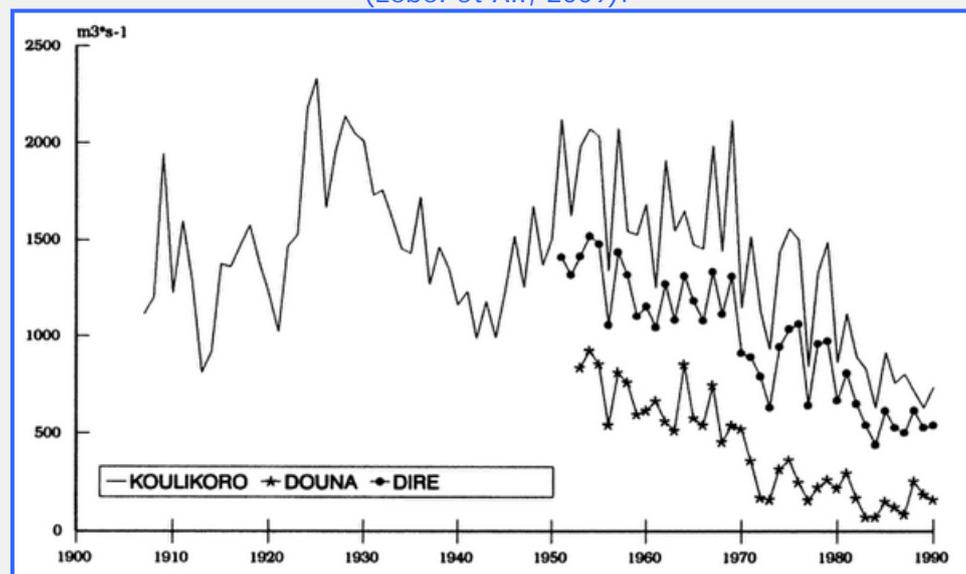


Figure 4 : Diminution du débit moyen ( $m^3/s$ ) dans le bassin du fleuve Bani entre 1900 et 1990.

### 2.3. Géologie et hydrogéologie

À l'heure actuelle, la géologie de la zone d'étude en Mauritanie (bordure ouest du bassin de Taoudéni) n'est pas bien caractérisée, et les informations disponibles sont une carte générale du potentiel hydrogéologique, une carte géologique générale (Fig. 5) et une étude du système hydrogéologique d'Atar, dans la partie nord de la zone d'étude (Bertone *et al.*, 2007).

Dans cette région, les limites des affleurements des formations de bassin les plus anciennes (formation du groupe de Char et du groupe d'Atar) sont des sites où se sont formées de petites vallées parallèles qui drainent toutes les eaux dans l'oued Seguelil vers la plaine archéenne d'Amsaga au sud. Les oasis du secteur d'Atar, irrigué par de nombreux puits, se trouvent dans ces vallées souvent partiellement remplies de dépôts du quaternaire. Moussu et Trompette (1966 a, b) ont décrit l'environnement hydrogéologique de cette zone à partir des puits des oasis des dépôts du quaternaire. Jusqu'aux années 1970, ces puits exploitaient l'aquifère alluvial. Avec la baisse des précipitations, celui-ci se tarit aujourd'hui après les épisodes de réalimentation. Les puits des oasis ont souvent été approfondis pour atteindre les formations sédimentaires situées sous les alluvions du quaternaire. Le principal point d'exploitation du système est encore actuellement situé sous les oasis, d'où sont extraites plus de 6,5 Mm<sup>3</sup> d'eau par an, mais des quantités croissantes sont pompées des anciennes formations sédimentaires. Dans ce secteur, outre les 2 500 puits creusés dans les 22 oasis, les aquifères sont exploités autour d'Atar à partir de forages. Une analyse de ces données montre le caractère discontinu de ces aquifères. Vingt-cinq pour cent des forages produisent moins de 1 m<sup>3</sup>/h et 20 % plus de 15 m<sup>3</sup>/h. Seuls les puits les plus productifs ont fait l'objet d'essais hydrauliques et la transmissivité (T) des aquifères allait de 1x10<sup>-4</sup> à 5x10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s. Les échantillons ont été prélevés dans les formations du paléozoïque et de l'infra-cambrien, probablement de dunes du quaternaire.

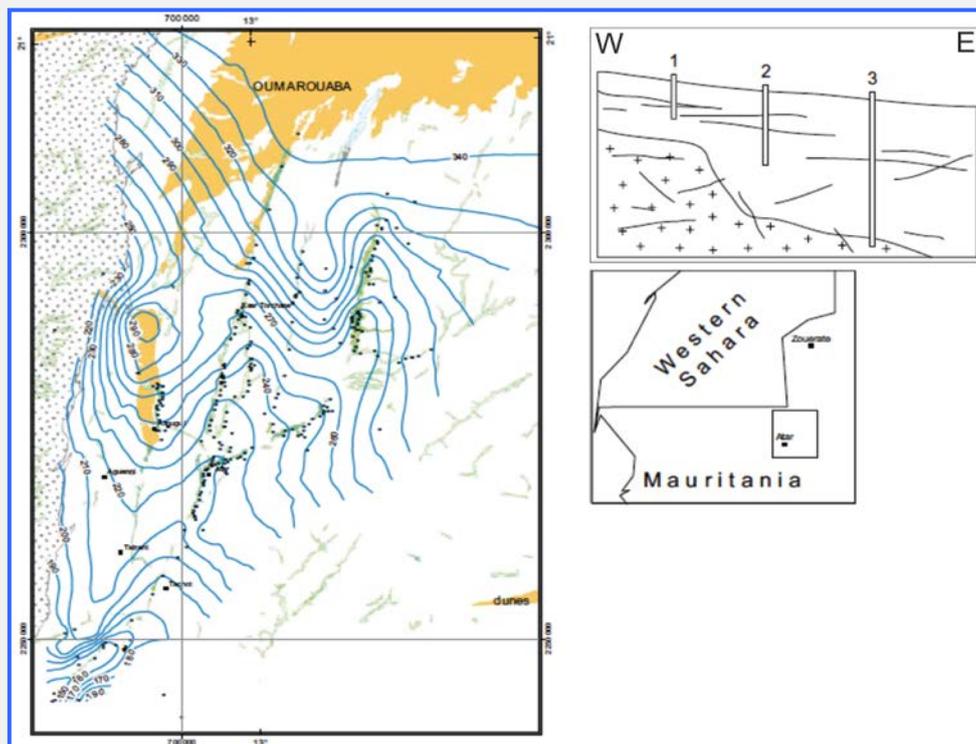


Figure 5 : Coupe géologique transversale ouest-est et carte potentiométrique de la bordure occidentale (région d'Atar) du bassin de Taoudéni (Bertone, 2007).

La carte potentiométrique (Fig. 5) tracée à partir des niveaux des eaux souterraines mesurés dans toutes les formations du grand groupe de Hodh fait ressortir une remarquable cohérence. Elle montre qu'il y a au moins deux grands systèmes d'écoulement séparés par une crête piézométrique : le système d'Atar au sud du massif des dunes d'Oum Arouaba, et celui de *Bou Talha* au nord de ces dunes. Dans la partie sud-est de cette région se trouve un système aquifère supérieur peu profond, situé dans le super-groupe d'Atar. Un second aquifère, isolé par un épais aquitard, recouvre les formations de Hodh.

En ce qui concerne le système d'Atar, l'eau coule d'une manière générale du nord (dunes d'Oum Arouaba) au sud (plaine d'Amsaga) et les eaux souterraines sont drainées par les oasis dans les petites vallées d'Adrar. La part de cet écoulement régional qui arrive au point d'extraction du sud est probablement très faible, de l'ordre de  $0,2 \text{ Mm}^3/\text{an}$ . Si le système peut se recharger au cours des inondations sous les dépôts alluviaux, remplissant les oueds, et peut-être aussi au cours des épisodes pluvieux entre les vallées, sous les affleurements de grès et de limons très fracturés en surface, la carte potentiométrique laisse à penser que le système est réalimenté à partir de la crête piézométrique au nord, sous le massif des dunes d'Oum Arouaba. Au total, la recharge par les précipitations pourrait être de l'ordre de  $5,4 \text{ Mm}^3/\text{an}$ . Les variations piézométriques rapportées par les exploitants des puits des oasis montrent que le système se réalimente au cours des saisons très pluvieuses. Il se vide jusqu'aux grandes pluies suivantes, un à quatre ans plus tard. Au cours des saisons très pluvieuses, la recharge est intensive et les niveaux piézométriques dans les oasis sont souvent inférieurs à 1 à 2 m au-dessous de la surface du sol. Étant donné que les prélèvements sont limités par la profondeur des puits, le système se trouve en état d'équilibre instable entre la recharge maximale au cours des saisons très pluvieuses et l'assèchement maximal après plusieurs années sans recharge, lorsque les niveaux piézométriques atteignent la limite de la profondeur des puits. Outre la recharge par les précipitations, le système est aussi réalimenté à partir du système sous-jacent du grand groupe d'Adrar, probablement par un volume d'environ  $2,1 \text{ Mm}^3/\text{an}$ .

Les deux campagnes de mesures sont des campagnes préliminaires (Fig. 6), mais il faudrait que le groupe de la Mauritanie effectue une analyse extensive de la géologie locale (carte géologique avec une meilleure résolution -1/250 000-1/100 000) et utilise l'abondante bibliographie existant sur le paléozoïque-précambrien en Mauritanie, et notamment l'étude de Bertone (2007), pour délimiter les différentes formations, décrire chaque puits échantillonné,

y compris sa profondeur, son niveau statique, sa stratigraphie si cette information est disponible, afin de présenter les coupes géologiques transversales de la zone d'étude pour montrer l'hydrodynamique (continuité ou discontinuité) existant entre les formations géologiques et le sens d'écoulement régional (Fig. 7).

La géologie et l'hydrogéologie de cette zone au Mali sont bien connues dans l'est, grâce aux nombreux travaux effectués sur la bordure infracambrienne est du bassin de Taoudéni (Fig. 8). Dans l'ouest, des échantillons ont été prélevés dans certaines formations (CIT, cambrien, CTQ) avec une faible résolution spatiale ; c'est une étude préliminaire avec peu de données existantes hormis dans certaines zones situées à proximité du système d'approvisionnement en eau de la ville de Bamako (Alpha *et al.*, 1991 ; Jerzy Kiewicz, 2011) sur lesquelles on dispose d'analyses géochimiques complètes.

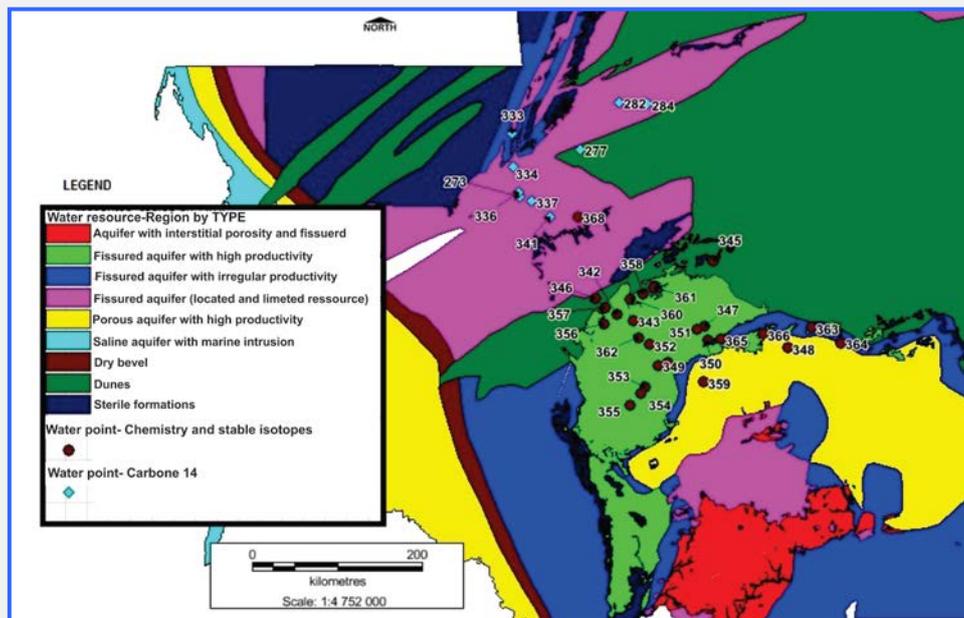


Figure 6 : Potentiel hydrogéologique en Mauritanie.

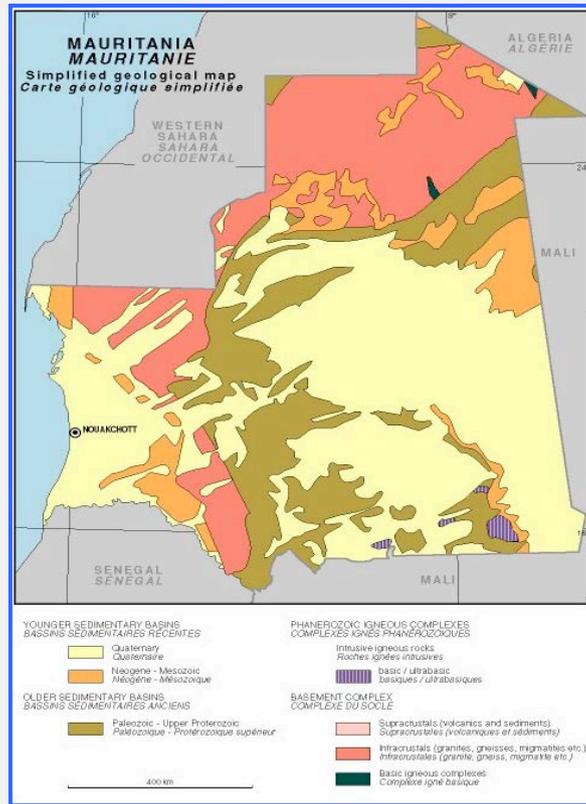


Figure 7 : Carte géologique simplifiée de la Mauritanie.

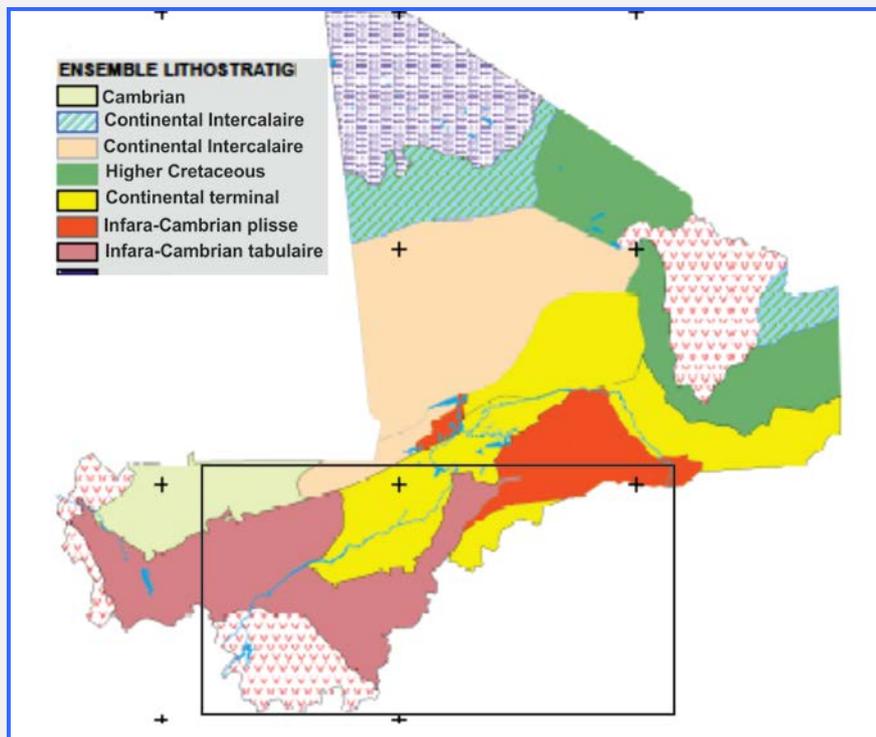


Figure 8 : Carte géologique simplifiée du Mali.

Les profils géologiques détaillés sont donnés dans cette zone avec des données géoélectriques et stratigraphiques, un exemple au nord de Bamako (Fig. 9).

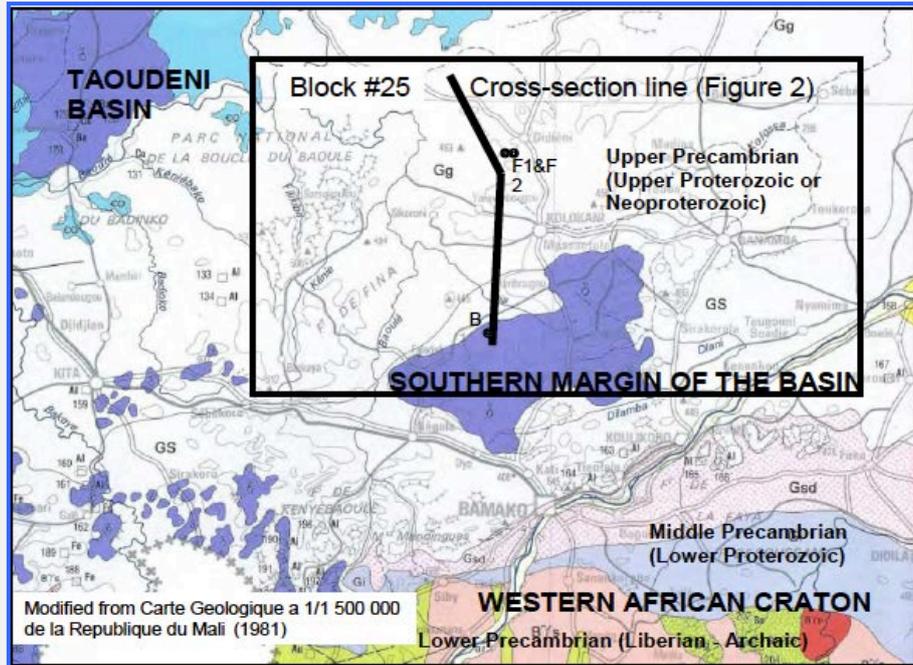


Figure 9a : Localisation des profils géologiques, nord de Bamako (Jerzykiewicz, 2011).

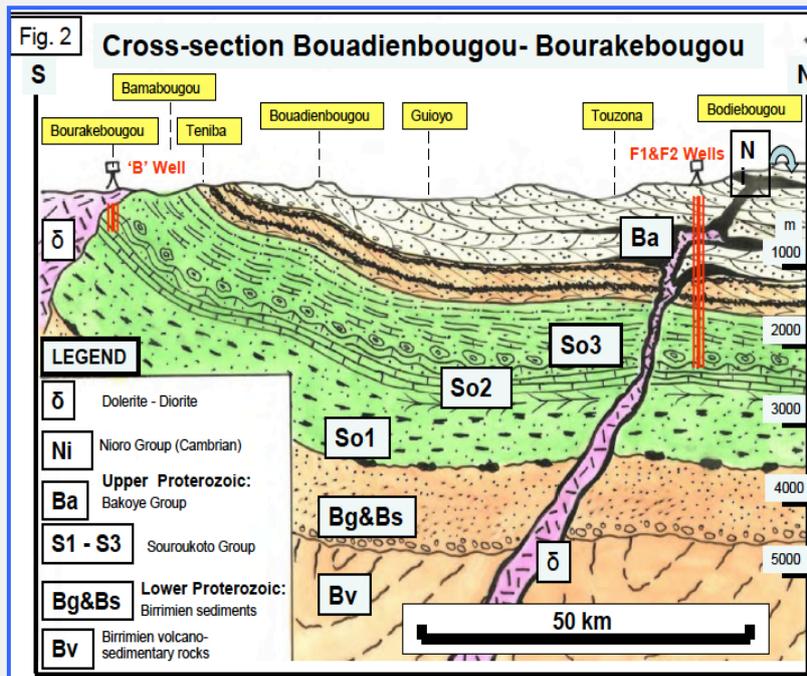


Figure 9b : Coupe géologique transversale du nord de Bamako (Jerzykiewicz, 2011).

Le socle fait partie du bouclier du craton ouest-africain. Sa partie inférieure, appelée libérien, est d'âge précambrien inférieur (archéen) et a subi d'importantes transformations métamorphiques, migmatiques et granitiques il y a environ 270 millions d'années. L'archéen est représenté par les granites, les migmatites, les anorthosites, les charnockites et les schistes avec des horizons hyperalumineux et hyperferrugineux (magnétites, quartzites). La partie supérieure du socle est appelée birrimien et est d'âge précambrien moyen (métamorphisation

et granitisation il y a 1 800 millions d'années). Elle contient une association de roches spillitico-kératophyriques volcaniques, et une association de roches flyschoides marquées Bg&Bs (grauwackes, conglomérats, quartzites, arkoses et schistes). On observe des intrusions granitiques peut-être de faciès hypo-volcanique dans toute la succession birrimienne. Les sédiments néoprotézoïques, dans notre cas des formations de l'ICT, sont divisés en trois groupes : Sotuba (St), Souroukoto (So) et Bakoye (Ba).

Les strates du premier groupe forment le socle dans la région de Bamako, au sud de la vallée du Niger, et les grès du groupe de Souroukoto au nord de cette vallée. Ce sont des quartzites et des grès contenant de la glauconite et les grès de socle du groupe de Souroukoto, plus résistants, forment des escarpements abrupts au nord-ouest du Niger, entre Sibi et Tabou et Bamako.

Les études des aquifères ont commencé dans l'est du bassin de Taoudéni, le sud-est du Mali et le sud-ouest du Burkina Faso au cours des années 1970, avec l'accroissement de la demande et les conditions climatiques de plus en plus arides. Cette zone est caractérisée par des altitudes allant de 240 à 790 m au-dessus du niveau de la mer, les régions les plus hautes étant au sud-ouest et les plus basses au nord-est de la zone. On distingue deux grandes formations géologiques dans la zone d'étude :

- La principale formation de l' infracambrien, qui affleure dans une vaste région au sud du Mali et au sud-ouest du Burkina Faso où elle constitue la limite est du bassin de Taoudéni. Dans ce dernier pays, l' infracambrien s'enfonce péniblement dans le socle cristallin. Son épaisseur est d'environ 600 m dans le sud (projet RAF) et 8 000 m dans la région de Gourma.
- La formation du continental terminal (CT), qui est située dans le nord de la zone d'étude (dépôts fluviaux lacustres - éocène-oligocène supérieur) et s'enfonce péniblement dans les parties inférieures des formations de l' infracambrien, avec plus de 40 m d'épaisseur. Le CT est composé d'alternances de couches sablo-ferrugineuses rouges et d'argile. La formation du CT joue un rôle dans la recharge des eaux souterraines, avec les alluvions argilo-sableuses récentes observées le long des principaux cours d'eau. On peut aussi observer une importante couverture latéritique dans la plus grande partie de la région.

Au Mali, l'infra-cambrien a été divisé en deux grands groupes dans la zone d'étude :

- Le groupe des grès, qui comprend :
  - \* Les grès inférieurs de Massigui-Faya (GI) dont les grès de Kebeni, Ningoni, Monkokoro, Niamakina, Baba, Zana, Sekeyet, Tebena, Banco, Bao-Flala.
  - \* La formation de grès et de roches silto-dolomitiques (GSD), y compris les grès de Sikasso, la formation pélitique de Fana, un niveau d'argile gréseuse, un d'argilite rouge et de jaspe jaune, un autre de grès et de schistes argileux fins, d'argilite, de limon et de jaspe, un de grès et de schistes argileux roses, d'argilite micacée, un autre d'argilite calcaire et les grès de Ména.
  - \* Les grès de Koutiala (GK)
  - \* Les grès de Bandiagara (GB)
- Le groupe des schistes, avec les schistes de Toun (ST).

Au Burkina Faso, l'infra-cambrien a été divisé en neuf grandes formations (Ouédraogo, 1998) : du bas vers le haut, la sédimentation étant essentiellement de type gréseux avec, localement, plus ou moins de ciment carbonaté, ce qui couvre la nomenclature malienne. Huneau *et al.* (2011) ont référencé quatre points proches de Sikasso comme étant des GKS et des SAC1. Les autres points dans le nord de la partie malienne (de Koutiala vers le nord) sont référencés comme étant du continental terminal, mais cela ne semble pas en harmonie avec la carte géologique et l'échantillonnage de l'équipe malienne, qui indiquent qu'il s'agit d'une formation de l'infra-cambrien. Ce point pourrait être clarifié.

Les neuf formations référencées au Burkina Faso sont (Fig. 10) :

- Les grès inférieurs (GI)
- Les grès de Kawara-Sindou ou « grès du socle » (GKS), 90-350 m
- Les grès fins à glauconie ou « grès de Sotuba » (GFG), 100-150 m
- Les grès granulés quartziques (GGQ), 300-600 m
- Les siltites, les argilites et les carbonates de Guena-Souroukoundinga (grès, schistes, dolomite) (SAC1), 300 m
- Les grès fins roses (GFR), 100 m
- Les siltites, les argilites et les carbonates de Samandeni-Kiébané ou « schistes de Toun » (SAC2), 400-700 m
- Les siltites et les quartzites du passage de Fo ou « grès de Koutiala » (SQ)
- Les grès de Fo-Bandiagara (GFB) ou grès de Koutiala (SQ).

Les différentes formations sont en position horizontale et plongent légèrement, d'environ 2°, en direction nord-ouest. L'épaisseur des formations inférieures tend à augmenter vers l'ouest en lien avec une anomalie gravimétrique positive axée sur la direction Fo-Bandiagara. La stratigraphie hétérogène des grès de toutes les formations indique des conditions de sédimentation très changeantes, avec alternance de phases marine, littorale et continentale. On peut aussi observer de nombreuses intrusions doléritiques et gabbro-doléritiques probablement d'origine permienne, sous forme de seuils rocheux, de necks et de dykes de plusieurs kilomètres de long. À ce jour, il n'existe aucun puits profond traversant toute la couverture sédimentaire jusqu'au socle. Dans le sud de la zone, près de Banfora, les formations sédimentaires des grès inférieurs semblent plissées. On observe, en particulier vers le nord (les directions les plus communes étant sud sud-est/nord nord-ouest, sud-ouest/nord-est), un grand nombre de failles et de fractures sur la falaise de Banfora, qui est le trait le plus caractéristique du paysage de la région. La tectonique globale de la zone sédimentaire est relativement complexe et modifie énormément l'organisation pseudo-tabulaire des dépôts avec d'importants rejets de failles d'environ 100 m. Le long de la falaise de Banfora, une importante faille subméridienne s'observe sur le socle et limite clairement l'extension des dépôts sédimentaires vers l'est. D'autres failles majeures ont été identifiées dans la région de Bobo Dioulasso. Elles sont pour la plupart plus petites, orientées nord-ouest/sud-est et divisent la couverture sédimentaire en de nombreux compartiments parallèles descendants ou ascendants (Ouédraogo, 1998).

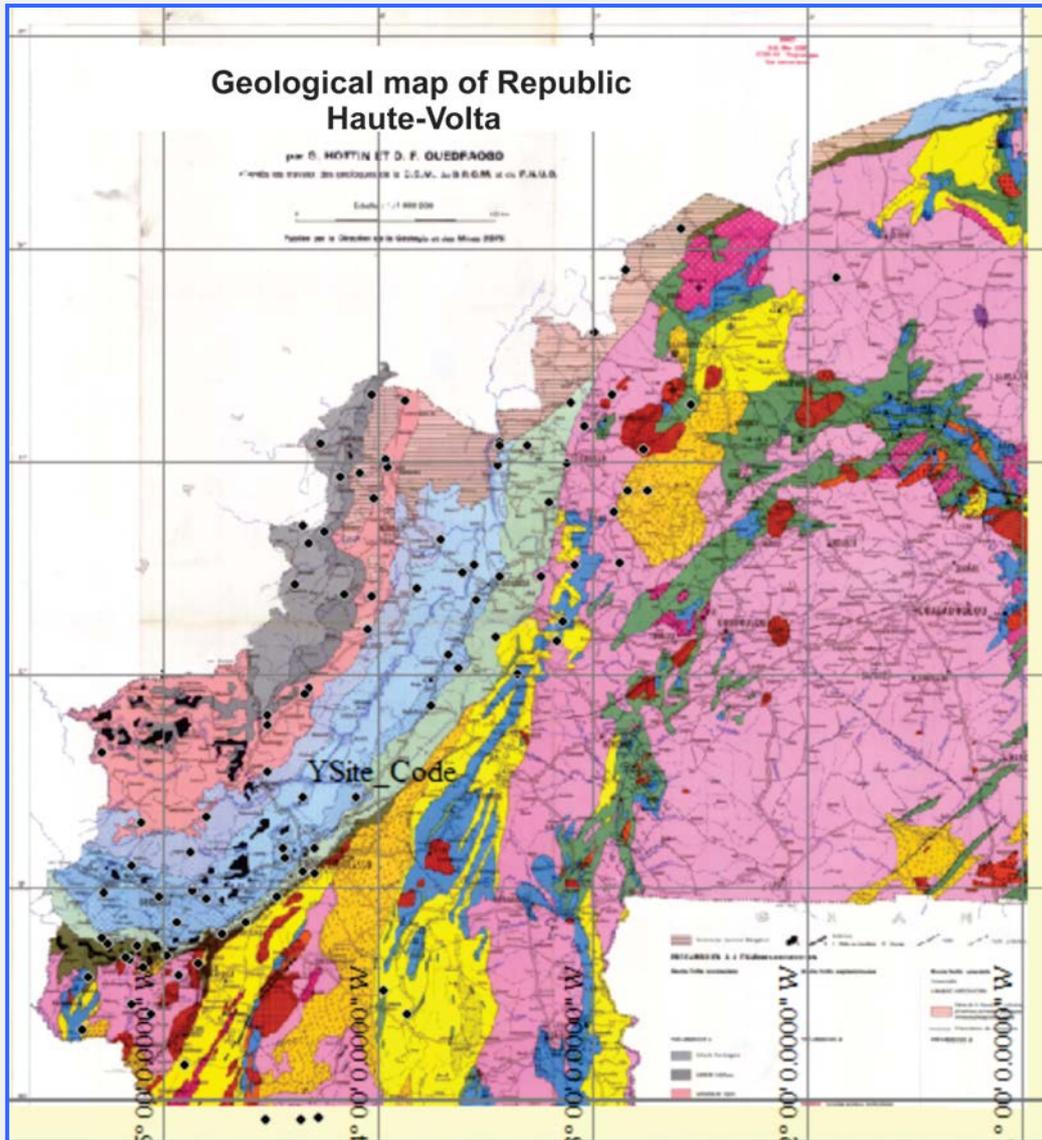


Figure 10 : Carte géologique de la zone d'étude au Burkina Faso.

Certaines coupes géologiques transversales de la partie nord de la zone d'étude proches du continental terminal ou situées dans celui-ci sont présentées à la figure 14, mais la formation la plus ancienne (GI) est absente de cette zone. Deux aquifères sont considérés dans la zone d'étude, à savoir celui du continental terminal et celui de l'infra-cambrien considéré comme un aquifère multicouche faisant partie d'un système. Les principales constatations des diverses études géologiques et un rapport de synthèse figurent dans Dakouré, 2003 ; Huneau *et al.*, 2011 ; Koussobé, 2013. Les paramètres hydrogéologiques disponibles sur les dépôts sédimentaires du système de Taoudéni ont été rassemblés par Gombert (1998) à partir d'un millier de forages (Tableau 1). La perméabilité des grès est plutôt élevée, autour de  $1,8 \cdot 10^6$  m/s, et favorable à la constitution d'un aquifère important. Le coefficient de stockage estimé était d'environ  $1 \times 10^{-4}$ .

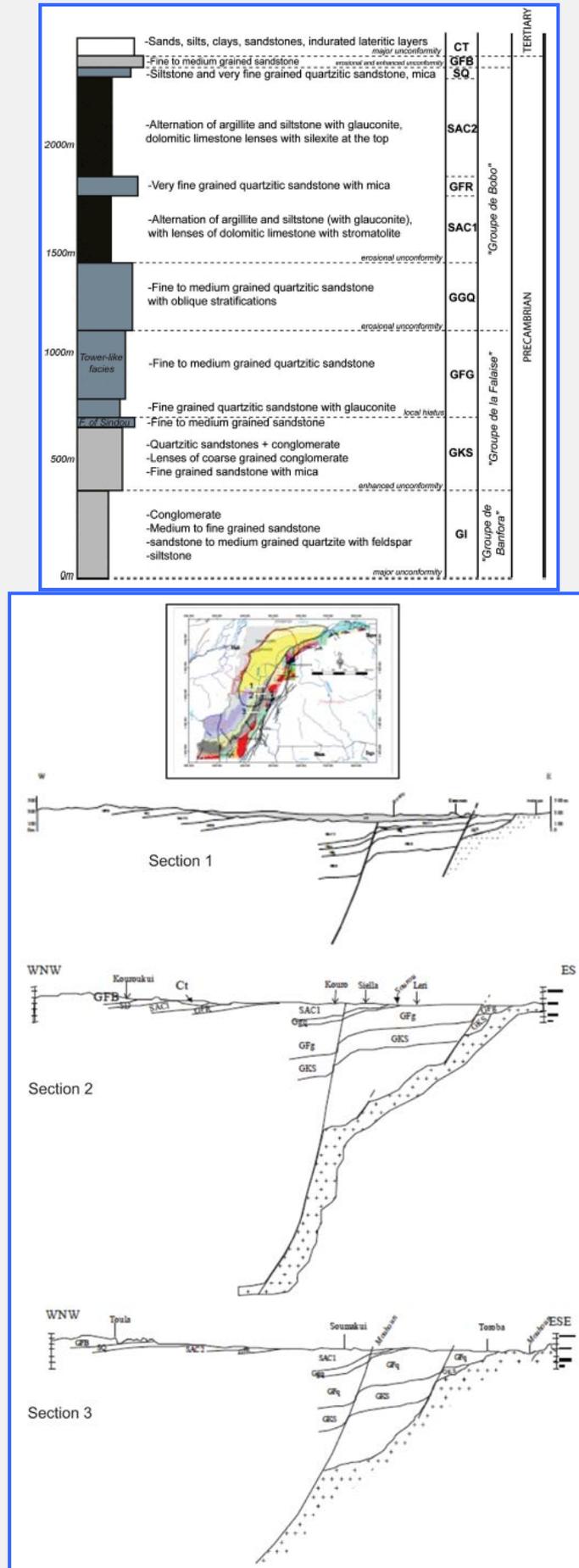


Figure 11 : Quelques coupes géologiques transversales de la partie nord de la zone d'étude et profil stratigraphique simplifié.

**Tableau 1 : Paramètres hydrogéologiques des formations de l'infrcambrien (Gombert, 1998)**

Unité	Nbre de forages	Profondeur (m)	Production moyenne (m <sup>3</sup> /h)	Production moyenne spécifique (m <sup>3</sup> /h)	Transmissibilité (T) (10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s)	Conductibilité hydraulique (K) (10 <sup>-6</sup> m/s)
GI	21	75	5,1	0,6	0,5	0,2
GKS	69	48	5,1	0,4	2,7	1,2
GFG	166	80	9,1	0,5	2,8	0,5
GGQ	271	62	13	1	8,5	3
SAC1	179	66	13,4	1,4	4,9	2,2

Le continental terminal occupe le dernier rang, avec un niveau statique (NS) et un niveau piézométrique (NP) plus faibles que l'affleurement infrcambrien, avec probablement une connexion hydraulique (Tableau 2).

**Tableau 2 : Données piézométriques des différentes formations**

Unité	Nbre	Profondeur minimale	Profondeur maximale	Profondeur moyenne	NS moyen	Production (Q) moyenne	Production spécifique (Qs)	NP moyen
GI	6	76	196	129	8	9		293
GKS	67	37	196	83	10	6	0,43	342
GFG	134	41	196	94	16	8	0,78	405
GGQ	269	37	142	70	14	12	1,31	434
SAC1	158	43	190	82	12	10	0,51	345

Étant donné qu'on ne peut identifier aucune couche de confinement ou de faible perméabilité à l'échelle régionale, le système peut donc être considéré sur le plan conceptuel comme un aquifère unitaire. De nombreuses discontinuités observées à différentes profondeurs (failles, fractures, discontinuités horizontales) sont à l'origine d'une porosité de fracture secondaire qui peut augmenter à la fois l'écoulement et la capacité de stockage des sédiments et faciliter la circulation de l'eau à travers les roches peu perméables comme les argilites.

Les eaux souterraines coulent essentiellement dans la direction sud-ouest/nord-est. La carte potentiométrique (Fig. 12) de la région montre aussi que les zones surélevées sud-ouest et centrale semblent se comporter comme des zones de recharge (environ 500-600 m au-dessus du niveau de la mer) et que le fleuve Mouhoun peut être considéré comme le principal axe de drainage de la région (les points les plus bas sont à environ 180 m d'altitude). Ce fleuve est en équilibre avec le niveau des eaux souterraines le long de la majeure partie de son cours. Mahé (2009) a déjà fait état de fortes interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines dans le bassin du fleuve Bani (affluent du Niger) au Mali. Dans la zone très contrastée sur le plan topographique située entre Bobo-Dioulasso et Sikasso, la plupart des

forages produisent de l'eau artésienne. Il y a aussi d'importantes sources dans la zone d'étude, dont la célèbre source « Nasso-Guinguette » près de Bobo-Dioulasso. Dakouré (2003) propose une hauteur d'infiltration effective d'environ 74 à 120 mm par an pour la région de Bobo-Dioulasso pour la période 1981-1990. En ce qui concerne le nord-est (dépression de Gondo), Dakouré (1970) considère que la hauteur d'infiltration est plus faible, à environ 20 à 38 mm par an. L'évolution potentiométrique montre une tendance claire à la baisse des niveaux depuis les années 1960 (Saad, 1970). Par exemple, la baisse dans la région de Dédougou (dépression potentiométrique de Dongo) a atteint environ 30 m et peut être corrélée avec la diminution des précipitations. Les résultats des analyses chimiques et isotopiques des études passées seront examinés au chapitre suivant.

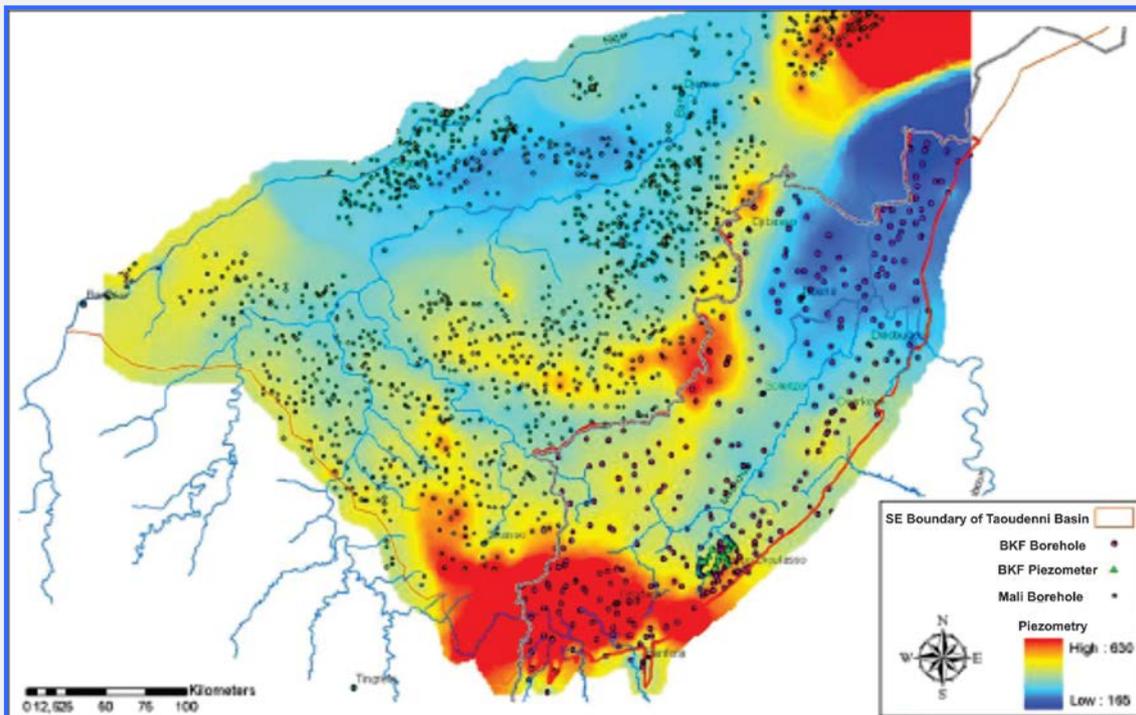


Figure 12 : Carte potentiométrique des aquifères de toute la zone du CI et du CT (Dakouré, 2010).

### 3. ACQUISITION DE DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE UTILISÉE

#### Échantillonnage

##### - Mauritanie

Il y a eu deux campagnes d'échantillonnage en Mauritanie, l'une en septembre 2015 (19 échantillons), l'autre en juillet 2016 (14 échantillons). Les mesures de laboratoire ont porté sur la chimie des éléments majeurs, les isotopes stables de l'eau et le tritium (Figure 13).

Malheureusement, seules les mesures de terrain (emplacement géographique, CE, pH, T, alcalinité) et celles ayant trait aux isotopes stables de l'eau et au tritium pour la première campagne (septembre 2015) sont disponibles à l'heure actuelle. Les deux campagnes sont des travaux préliminaires et doivent être complétées par des données hydrodynamiques (niveau piézométrique) et géologiques (informations relatives aux formations géologiques pour chaque puits, profondeur de celui-ci, etc.). Une interprétation préliminaire a été effectuée dans le présent rapport.

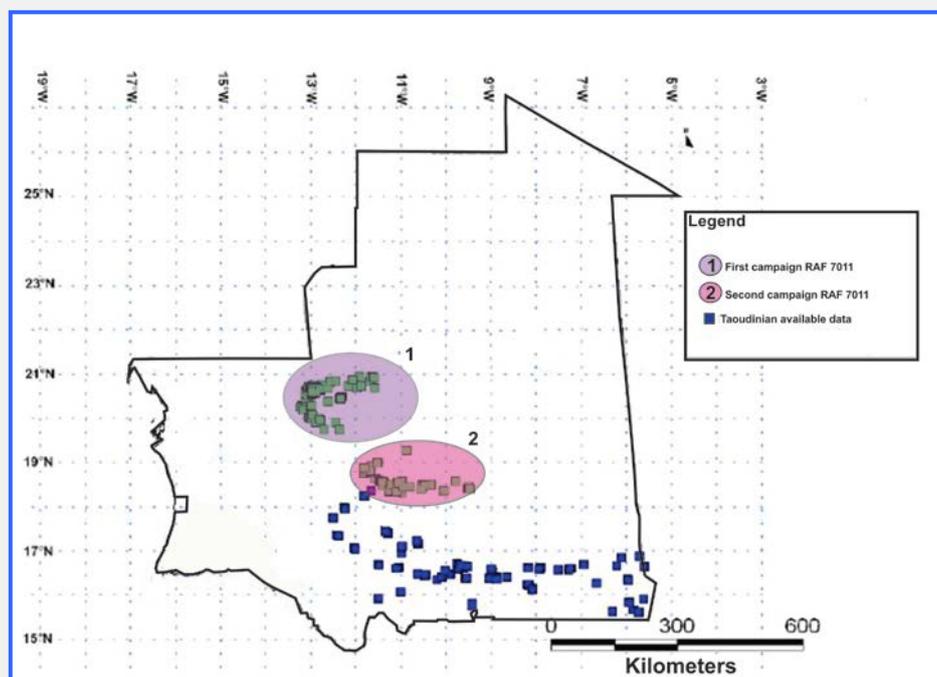


Figure 13 : Sites d'échantillonnage en Mauritanie.

#### - Mali

Trois campagnes (juin 2013, mai 2014 et mars 2015) ont été menées par la contrepartie malienne (Fig. 14) au cours de la mise en œuvre du projet RAF/7/011 soutenu par l'AIEA. Les mesures de terrain comprennent l'emplacement géographique, la CE, le pH, les MDT, l'oxygène dissous, la profondeur du puits, et certaines mesures d'alcalinité. Au total, 108 échantillons ont été prélevés depuis 2013 : 58 pour l'ICT, 34 pour le CTQ, sept pour le CAM, quatre pour le CIT et 5 pour l'ICP. Les analyses de laboratoire ont porté sur la chimie des éléments majeurs, la silice, certains éléments traces (Fe), l'oxygène dissous, les isotopes stables de l'eau et le tritium. La CE et le pH ont été contrôlés en laboratoire. L'équilibre ionique montre que les analyses ont été généralement bien effectuées. Toutefois, il était supérieur à 5 % pour quelques échantillons.

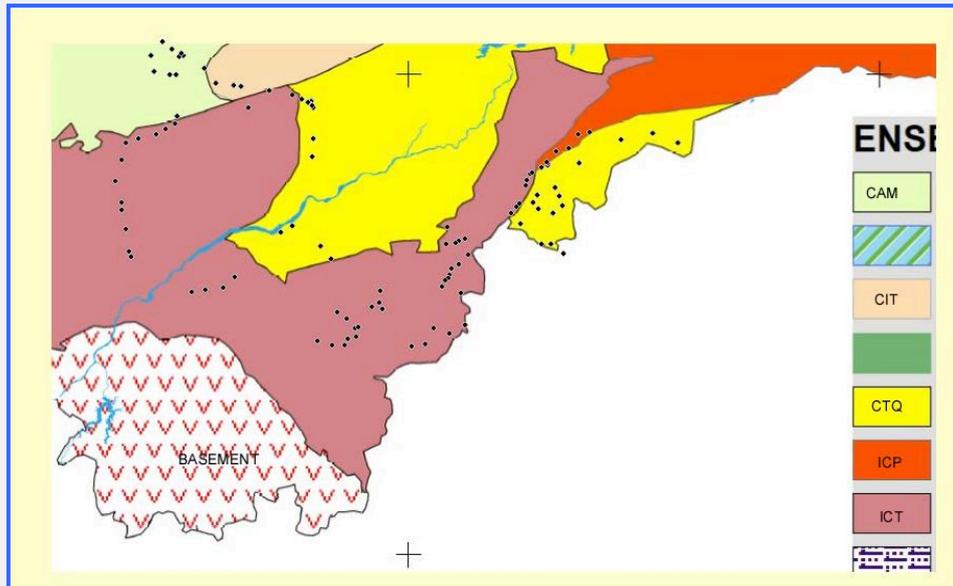


Figure 14 : Sites d'échantillonnage au Mali.

Les précipitations mensuelles ont aussi été collectées pour 2014 et 2015 des stations de Bamako, Sévaré, Koufiala, Mopti et Bankass, et les isotopes stables de l'eau (AIEA), le tritium (Hydrosys Labor-Budapest) ont été mesurés.

#### - Burkina Faso

Un total de 140 échantillons d'eau a été prélevé par l'équipe du Burkina Faso au cours de deux campagnes menées en décembre 2013, janvier 2014 et mai 2016. Les analyses de laboratoire ont porté sur la chimie des éléments majeurs et la silice, certains éléments traces (Fe), l'oxygène dissous et les isotopes stables de l'eau. La CE et le pH ont été contrôlés en laboratoire (Fig. 15).

Au total, 94 échantillons ont été prélevés au cours de la première campagne, dont 25 (socle cristallin), 10 (continental terminal quaternaire, CTQ) et 59 (infracambrien tabulaire, ICT). Ceux de l'ICT ont été classés de la formation lithologique la plus ancienne à la plus récente pertinente pour le lieu : GI (3)/GKS (8) / GGQ (11) /GFR (3) /SAC2 (6) /GFG (12) /SAC1 (7) /SQ (2) /GFB (7).

Les résultats de l'analyse des échantillons de la dernière campagne ont été donnés après le dépôt du présent rapport. Par ailleurs, les échantillons ont été prélevés dans la même zone que lors de la première campagne et les paramètres chimiques et de variation isotopique sont similaires. Nous avons noté 13 points d'échantillonnage où de l'eau de surface a été prélevée. La datation du tritium confirme aussi que la répartition de l'âge est la même.

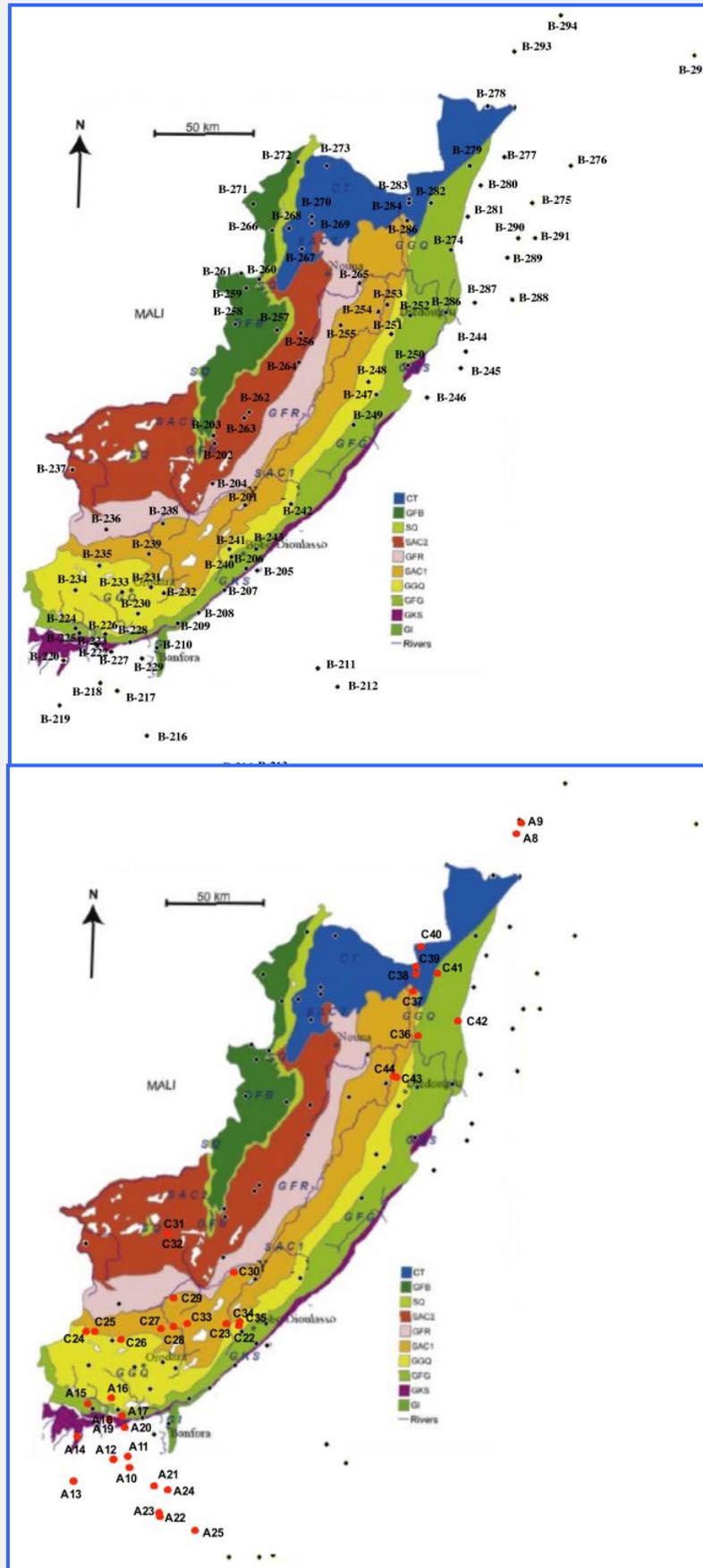


Figure 15 : Localisation des sites d'échantillonnage pour les campagnes 1 et 2 au Burkina Faso.

Toutes les analyses chimiques et d'isotopes stables ont été effectuées au LRAE en Tunisie. Le tritium a été mesuré au laboratoire Hydrosys Labor-Budapest. La première synthèse des données géochimiques devrait être achevée avec d'autres données de base, faute de quoi l'interprétation hydrogéologique et la connaissance du système des eaux souterraines seront incomplètes. D'abord, il faut connaître le niveau de l'eau aux points d'échantillonnage (Mali et Burkina Faso). En ce qui concerne le Burkina Faso, il n'y a pas d'informations géologiques sur les points d'échantillonnage dans la base de données, la géologie de la zone d'étude est complexe (couches géologiques multiples de la bordure du synclinal sédimentaire avec forte variation du faciès stratigraphique et des discontinuités de la perméabilité, même si l'ensemble de la série peut être considéré comme un aquifère multicouche). Pour résoudre ce problème, on a dans un premier temps localisé les points d'échantillonnage sur la carte géologique pour séparer, dans cette analyse géochimique, les différentes couches afin d'éviter de faire une analyse simpliste, mais il faudrait vérifier sur le terrain les points à la limite de deux couches. Il convient de noter que 20 échantillons ont été présentés comme provenant du socle cristallin et, en l'absence d'autres informations géologiques, ont été analysés en tant que groupe homogène.

## 4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

### 4.1. Résultats et discussion : zone d'étude de la Mauritanie

Faute d'informations géologiques adéquates, les données de terrain partielles ont été analysées par campagne.

#### - Conductivité électrique

La conductivité électrique (CE) varie de 395 à 3 331  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour la première campagne, et de 178 à 1 906  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour la seconde. Hormis le point dont la valeur est la plus élevée pour la première campagne, la distribution de la CE correspond plus ou moins aux valeurs faibles à moyennes de CE (Fig. 16).

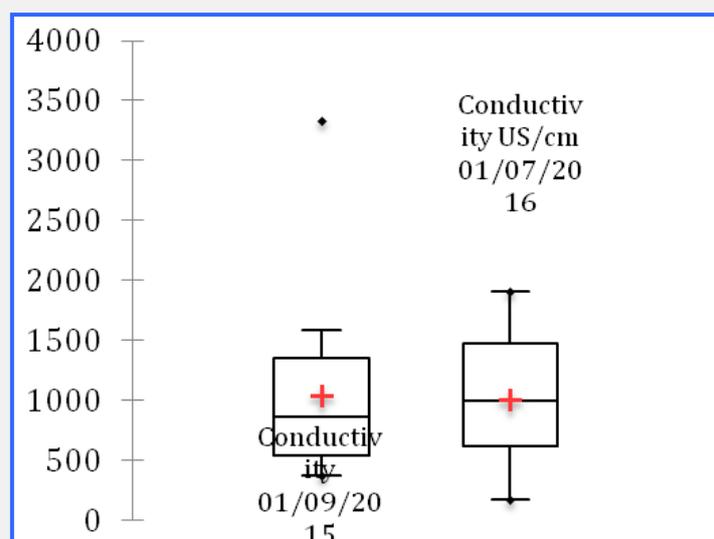


Figure 16 : Distribution des valeurs de conductivité électrique dans les échantillons d'eaux souterraines.

### - pH

Contrairement à la CE, il y a une différence entre les deux groupes en ce qui concerne le pH, le premier groupe ayant des valeurs de pH basique alors que celles du second groupe sont neutres. L'alcalinité totale est conforme aux valeurs plus élevées pour le groupe de pH basique, ce qui est probablement dû à une source minéralogique de Na (K) compte tenu de la présence de bicarbonate de soude ou d'hydroxyde dissous dans l'eau (Fig. 17).

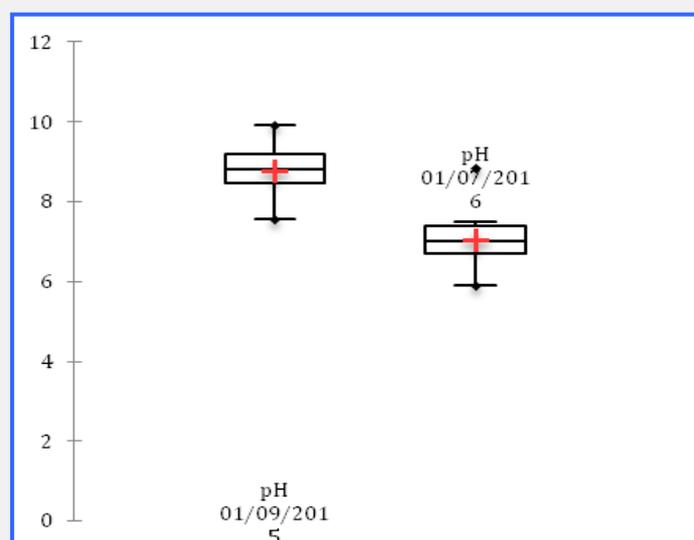


Figure 17 : Distribution des valeurs de pH dans les échantillons d'eaux souterraines.

### - Température

La distribution des valeurs de température dans les échantillons d'eaux souterraines fait ressortir de faibles variations et est en harmonie avec les températures atmosphériques annuelles dans cette zone. Toutefois, il y a une légère distorsion systématique dans les mesures de température entre les deux campagnes. Mais il semble qu'elles sont mesurées dans

des conditions suffisamment bonnes, sans trop d'interférence avec la température atmosphérique, hormis pour une mesure (Bir lechkeb 1) avec 39,4 °C. Ici, la minéralisation est faible et un point thermique local est hautement improbable, ce qui signifie qu'une erreur de mesure est possible (Fig. 18).

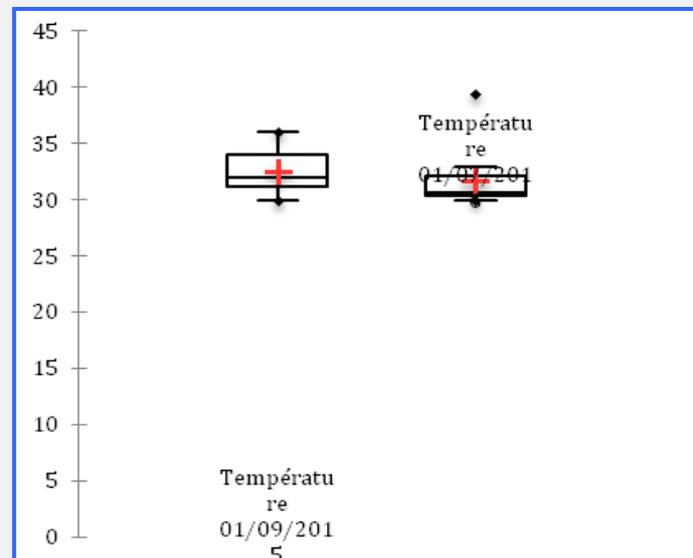


Figure 18 : Distribution des valeurs de température dans les échantillons d'eaux souterraines.

#### - Alcalinité

Comme indiqué, le pH est lié à l'alcalinité dans ces échantillons. Avec comme hypothèse que l'alcalinité est essentiellement due à  $\text{HCO}_3$  et  $\text{CO}_3$  dans ces eaux, et étant donné la relation entre les MDT et la CE dans cette fourchette de valeurs ( $\text{MDT} = 0,75 \text{ CE}$ ) la part du bicarbonate dans l'équilibre anionique semble relativement élevée mais pas prédominante pour la majorité des échantillons d'eau (Figures 19 et 20), les chlorures et/ou le  $\text{SO}_4$  doivent beaucoup contribuer à la géochimie de ces eaux.

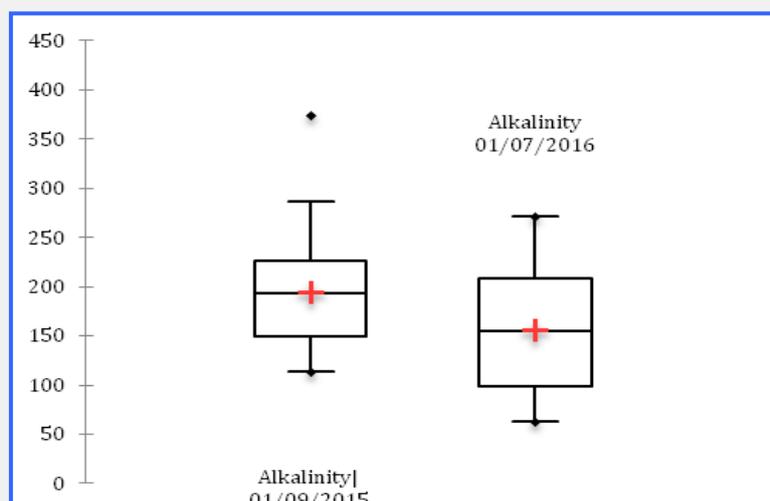


Figure 19 : Distribution des valeurs d'alcalinité dans les échantillons d'eaux souterraines.

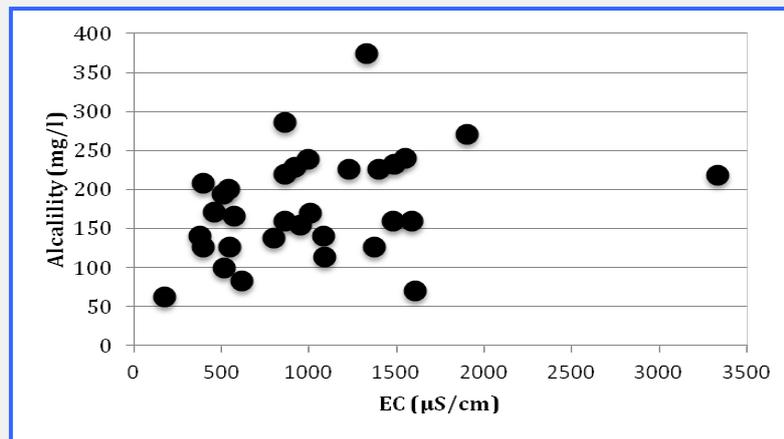


Figure 20 : Relation entre conductivité électrique et alcalinité.

### - Oxygène 18 et deutérium

En ce qui concerne les seuls résultats disponibles, ceux de la première campagne, la fourchette des valeurs est inférieure à 3 ‰ (oxygène 18), avec une valeur moyenne de -4,32 ‰ et de 18 ‰ (deutérium) avec une moyenne de -30 ‰, une variabilité normale pour un aquifère phréatique. Aucune valeur dénotant des niveaux d'enrichissement très élevés n'a été observée et les chiffres enregistrés se situent dans la fourchette des teneurs en isotopes de l'eau de pluie trouvées dans la zone (Figures 21 et 22).

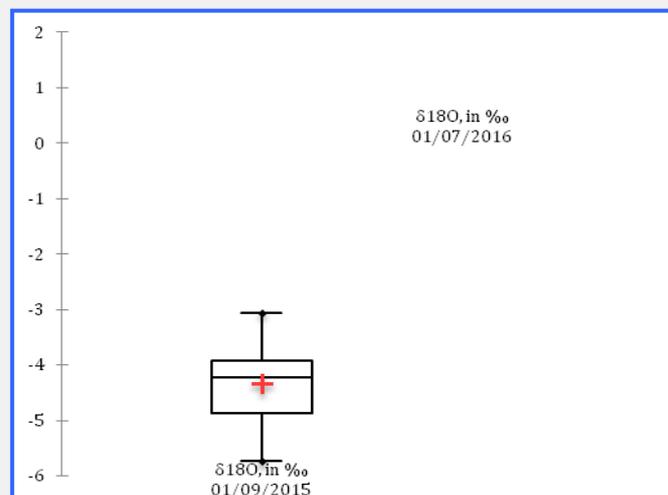


Figure 21 : Distribution des teneurs en  $^{18}\text{O}$  des échantillons d'eaux souterraines.

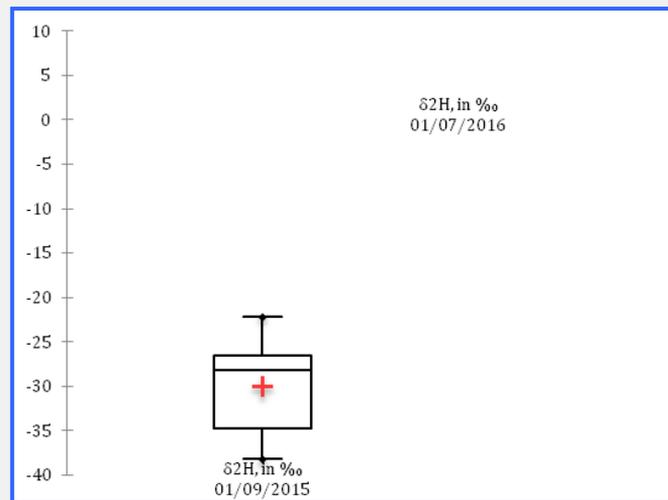


Figure 22 : Distribution des teneurs en  $^2\text{H}$  des échantillons d'eaux souterraines.

### - Excès de deutérium

L'excès de deutérium est faible ( $< 9 \text{ ‰}$ ) pour tous les échantillons d'eau, entre  $-0,5$  et  $8,5 \text{ ‰}$ , ce qui peut être le signe de l'existence d'un processus d'évaporation au cours de l'infiltration, si l'on suppose que les règles d'échantillonnage ayant trait aux isotopes ont été suivies (Fig. 23). Pour aller plus loin dans l'analyse, on a comparé les teneurs en isotopes des eaux souterraines et certaines teneurs en isotopes de l'eau de pluie plus près de la zone d'étude. Il y a trois sources de données, à savoir certaines données mensuelles partielles de quatre stations du sud du Sénégal (Travi *et al.*, 1987), des données mensuelles sur une année entière (2013) à Louga (nord du Sénégal) et des mesures quotidiennes effectuées sur trois ans dans deux stations côtières en Mauritanie (Rosso et Nouakchott, réseau IRD en collaboration avec l'EMIM) (Tableau 3).

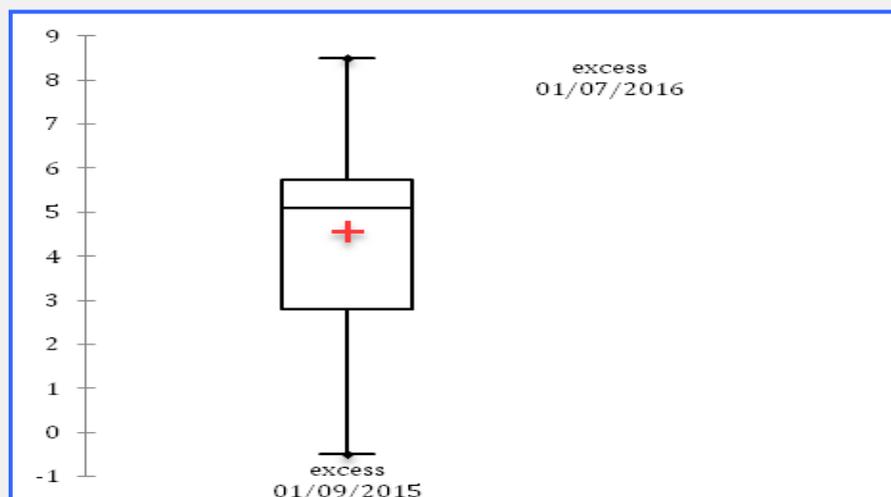


Figure 23 : Distribution des valeurs d'excès de deutérium dans les échantillons d'eaux souterraines.

Il est évident que les conditions climatiques sont différentes de celles de la zone d'étude mais c'est une première approximation qui permet d'élaborer des hypothèses sur l'origine de l'eau. La variabilité des valeurs isotopiques des événements pluvieux au cours des trois ans d'échantillonnage quotidien est élevée (9 ‰ pour l'oxygène 18 et 68 ‰ pour le deutérium) à Rosso et Nouakchott (Fig. 24).

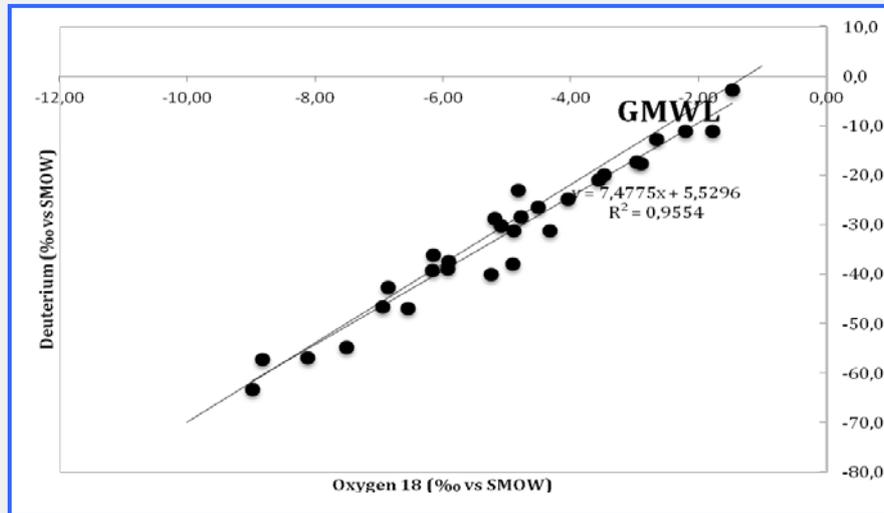


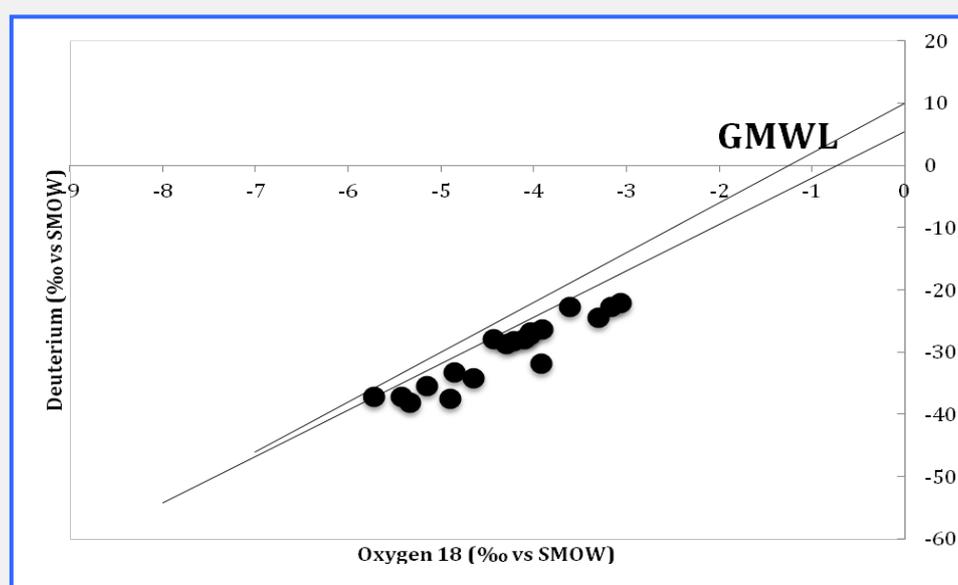
Figure 24 : Relation entre  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$  dans les événements pluvieux quotidiens (2013-2015 - Rosso et Nouakchott).

La droite météorique ( $\delta^2\text{H} = 7,48 \delta^{18}\text{O} + 5,53$ ) est proche de la droite météorique mondiale. La variabilité des valeurs moyennes annuelles pondérées étant élevée, entre -2,92 et -6,80 ‰, pour les trois ans, il n'est pas possible sur une courte période de temps de définir une valeur réaliste de teneur isotopique de l'eau de pluie comme référence pour comparaison avec les teneurs isotopiques des eaux souterraines. Toutefois, c'est la même fourchette de valeurs qu'on observe dans ces eaux et la contribution des précipitations actuelles est une solide hypothèse confirmée par les valeurs du tritium (Fig. 25).

Tableau 3 : Teneurs isotopiques des précipitations en Mauritanie et au Sénégal

	Station	P	$\delta^{18}\text{O}_w$ (‰)	$\delta^2\text{H}_w$ (‰)
2013	ROSSO	239	-6,80	-45,4
	NOUAKCHOTT	154	-5,16	-32,6
2014	ROSSO	55	-2,92	-21,8
	NOUAKCHOTT	43	-4,93	-12,3
2015	ROSSO	241	-3,98	-24,8
	NOUAKCHOTT	103	-5,82	-40,9
Travi 1987	Juillet-Août			
	Mbour		-4,05 /	-22,7/
	Diafilon		-8,08/-6,66	-54,3/-42,6
	Tambacouda		-6,33/-6,60	-42,4/-41,9
	Toll		-5,83/-5,38	-32,9/-33,1
GNIP, 2013	Louga	412	-4,78	-33,5

Il conviendrait de noter que, fait remarquable, les points ayant trait aux eaux souterraines forment une droite parallèle à la droite météorique mondiale, avec une pente de 6,61. Pour savoir si une part importante de l'eau d'un aquifère provient d'une recharge ancienne, il faudrait la comparer à d'autres études d'eaux souterraines de la zone pour savoir si les anciennes conditions climatiques ont ou non changé les caractéristiques de la circulation de l'air, la pente de la relation linéaire  $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$  serait alors inférieure à 10 %, soit celle de l'eau de réalimentation récente.

Figure 25 : Relation entre  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$  dans les échantillons d'eaux souterraines.

## - Tritium

Tous les échantillons ont une teneur en tritium élevée (0,7-2,8), hormis cinq échantillons (F13 Atar, Lemoilih POO7, N'Tomadi, Oued Amlellek P012, AD63), dont les valeurs sont situées dans la mesure de la limite d'erreur. Il y a donc une recharge actuelle malgré les conditions arides, ce qui semble en harmonie avec l'hypothèse émise à partir de l'analyse des isotopes stables (Fig. 26). Ces processus d'infiltration sont probablement diffus si le niveau de l'eau est proche de la surface ou ont lieu par concentration de l'eau dans une dépression endoréique (infiltration locale) comme cela a été démontré dans le sud de la Tunisie, une région aride (Dhaoui *et al.*, 2016). La réalimentation spatiale actuelle est faible et les eaux souterraines sont probablement un mélange d'eaux anciennes et d'eaux modernes. Par comparaison avec la teneur en tritium dans les stations météorologiques plus proches de la zone d'étude (stations de Bamako, Koutiala, Mopti et Bankass au Mali), les chiffres mensuels de teneur en tritium des précipitations vont de 2,9 à 4,8 UT et les chiffres annuels estimés sont proches de 4 UT représentant le niveau naturel dans l'air dans la région. Toutes les teneurs en tritium des eaux souterraines sont plus faibles, et les conditions hydrodynamiques d'un aquifère phréatique sont plus proches d'un modèle de mélange que d'un modèle piston. Cette fourchette de valeurs signifie donc clairement qu'il y a présence d'eaux plus anciennes (antérieures à 1950).

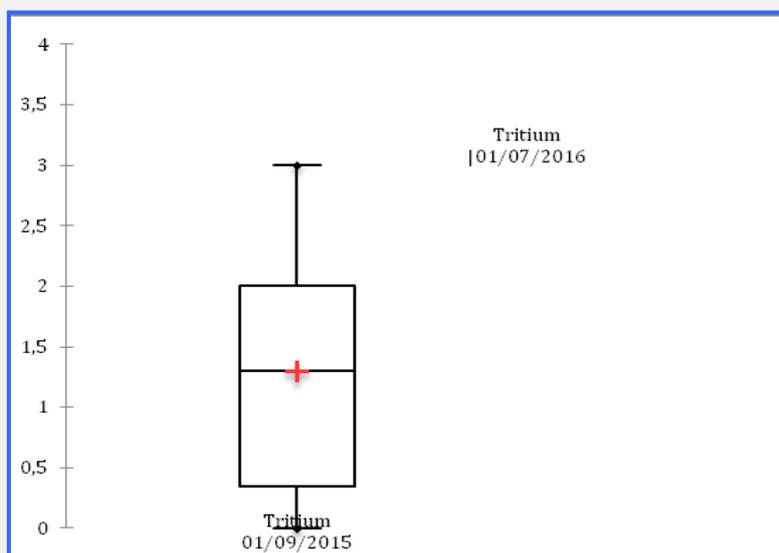


Figure 26 : Distribution des teneurs en tritium dans les échantillons d'eaux souterraines.

## 4.2. Résultats et discussion : zone d'étude au Mali

Les données recueillies ont été traitées pour chaque aquifère. Des échantillons ont été prélevés dans cinq formations géologiques de toute la zone d'étude. Hormis la partie orientale sur laquelle il y avait suffisamment d'études et de données pour poser des hypothèses concernant la relation hydrodynamique entre les différentes formations (ICT, CTQ et ICP), on

considérera dans la présente étude les systèmes aquifères de la partie occidentale, avec les formations ICT, CAM et CTQ, comme des systèmes aquifères isolés (Fig. 14). Il a en outre été noté que certains points figurant sur la carte géologique, donnés par le groupe du Mali, semblent approximatifs et pourraient ne pas correspondre aux informations géologiques fournies dans la banque de données.

#### - Profondeur des puits d'échantillonnage

Les échantillons d'eaux souterraines ont été prélevés essentiellement dans des puits peu profonds (< 100 m) mais spécifiques pour chaque aquifère. Les profondeurs sont essentiellement homogènes pour le CAM, le CIT et l'ICP, soit en moyenne 30, 50 et 45 m respectivement. Elles sont plus variables pour le CTQ et l'ICT, mais avec un nombre plus élevé de puits, et ceux-ci sont plus profonds (80 et 105 m). Les profondeurs moyennes sont de 40 et 55 m, et les puits du CTQ sont plus superficiels (Fig. 27).

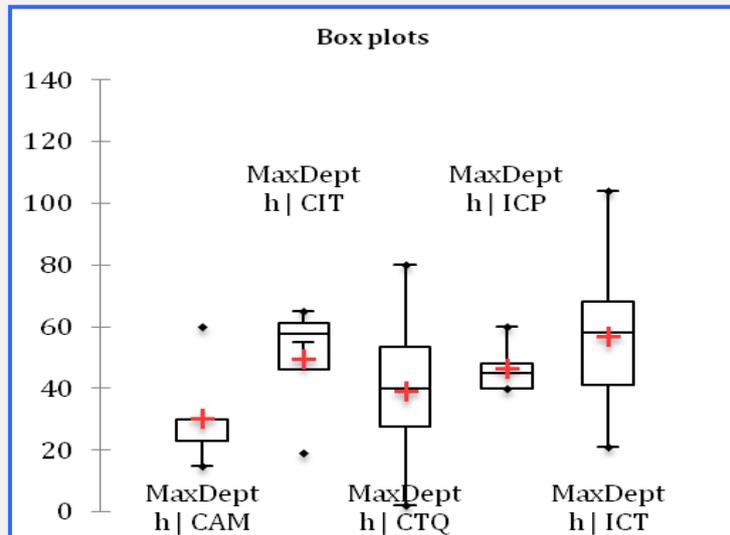


Figure 27 : Variabilité et distribution des profondeurs des puits d'échantillonnage dans les différentes formations géologiques.

#### - Conductivité électrique et MDT

Les valeurs de conductivité électrique (CE) des eaux souterraines des cinq formations géologiques diffèrent en termes de minéralisation et de variabilité. Les eaux souterraines du CIT sont caractérisées par la plus faible minéralisation et une faible variabilité, avec une moyenne de 182  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , excepté deux points (1 418 et 1 490  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) où l'eau semble contaminée, avec des niveaux élevés de nitrates et de sulfates. Les eaux souterraines de l'ICQ, qui est la même formation que l'ICT mais est plissée, sont aussi caractérisées par une faible minéralisation (légèrement plus élevée que celle de l'ICT et avec une faible variation) avec une moyenne de 357  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Les valeurs sont intermédiaires pour les eaux souterraines

du CTQ, avec une moyenne de 535  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , et la variabilité est plus élevée que pour celles de l'ICT, avec deux valeurs maximum d'environ 2 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Les eaux des derniers aquifères (CIT et CAM) sont caractérisées par une minéralisation moyenne plus élevée (700 et 1 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), mais avec une forte variabilité pour le CIT (quatre échantillons ont entre 36 et 1 847  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), ce résultat n'est pas significatif pour cette formation, alors que les échantillons du CAM (sept) sont plus homogènes (860 à 2 660  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) (Fig. 28).

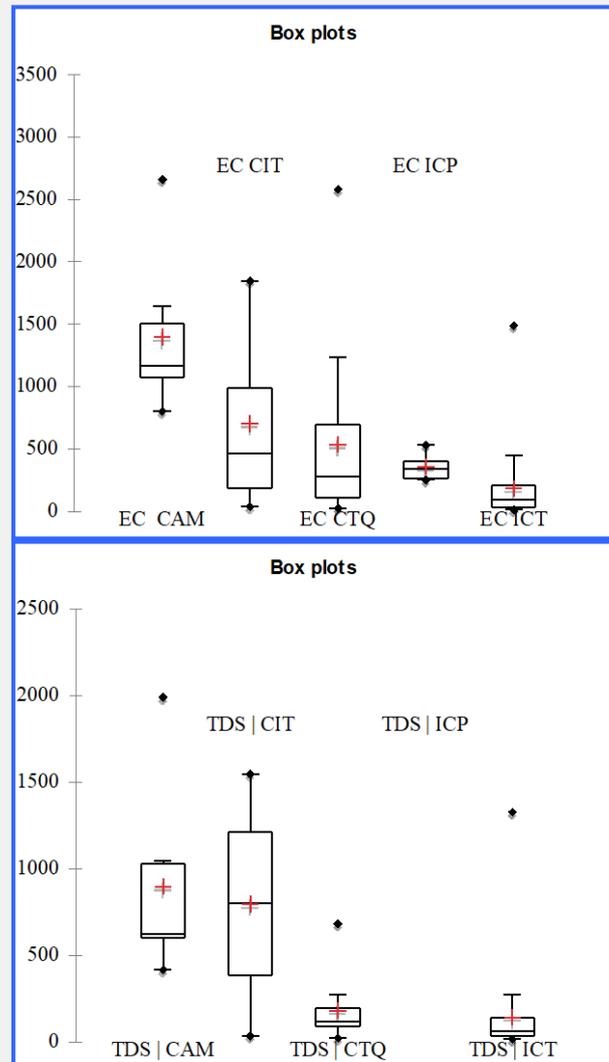


Figure 28 : Variabilité et distribution des valeurs de CE et de MDT dans les différentes formations géologiques.

La comparaison des MDT et de la CE fait ressortir une bonne harmonie, excepté pour deux points pour lesquels les teneurs en bicarbonate, en sulfates et en sodium sont élevées (Fig. 29).

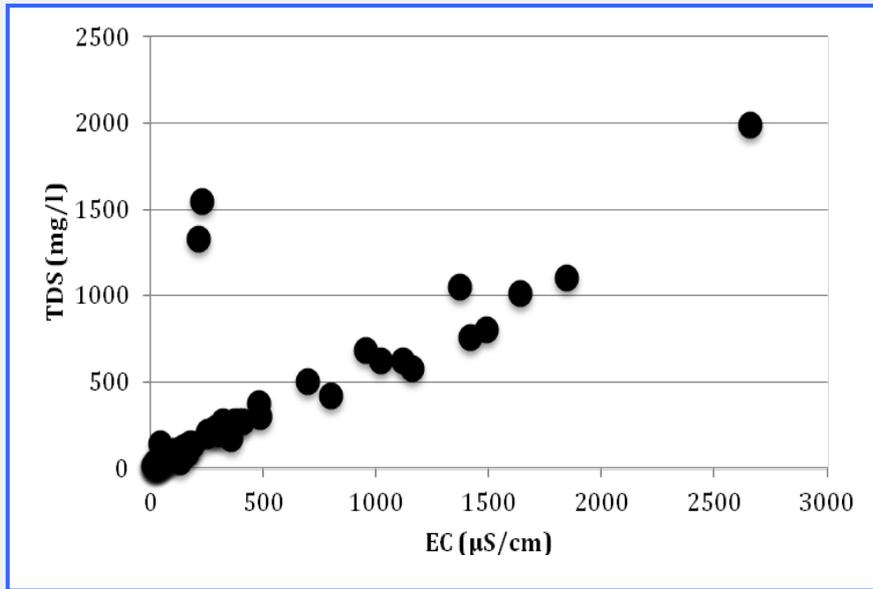


Figure 29 : Relation entre conductivité électrique et MDT pour tous les échantillons collectés.

### - Température

Les températures moyennes des eaux souterraines varient peu entre les aquifères et se situent dans la fourchette des valeurs de températures atmosphériques annuelles. Certaines valeurs maximum (CTQ et ICT) devraient être considérées avec méfiance dans le calcul de l'équilibre thermodynamique en raison du rééquilibrage de la température des eaux souterraines avec la température atmosphérique dans les mesures (Fig. 30).

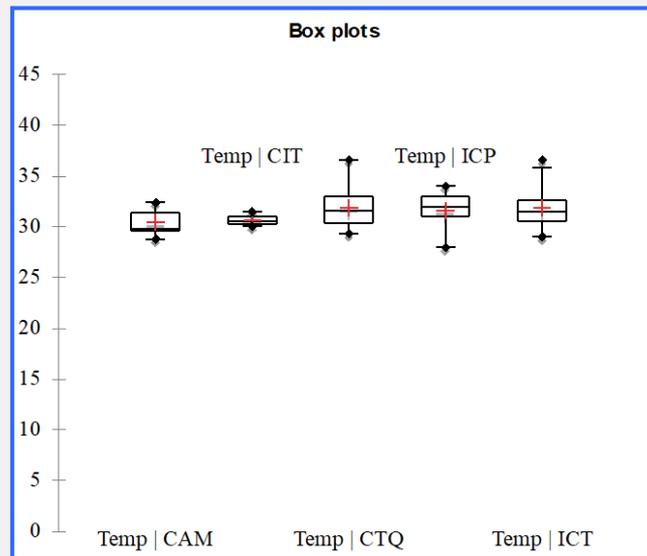


Figure 30 : Variabilité de la température dans les différentes formations géologiques.

### - pH

Hormis pour les eaux souterraines de l'ICP, le pH (5,5 à 8,5) se situe globalement dans la fourchette des valeurs normales pour les faciès de grès et de limon. Les valeurs de pH inférieures ou supérieures à ces limites devraient être considérées avec méfiance. Dans le cas

des pH basiques des eaux souterraines de l'ICP (pH moyen = 10), la chimie des principaux ions ne fait pas ressortir d'excès particulier d'ions alcalins ( $\text{HCO}_3\text{-Ca/Mg}$ ) et l'alcalinité mesurée semble liée au bicarbonate (Fig. 31).

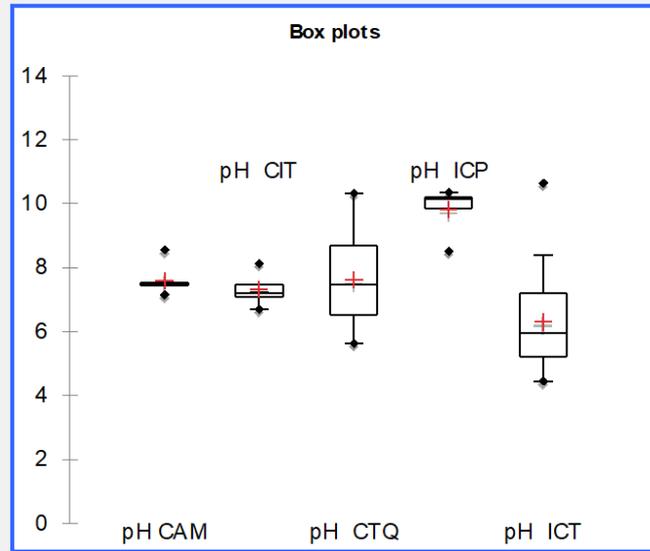


Figure 31 : Variabilité et distribution des valeurs de pH dans les différentes formations géologiques.

#### - Oxygène dissous

Tous les échantillons d'eaux souterraines (excepté ceux de l'ICP pour lesquels il n'y a pas de mesure) ont un niveau normal d'oxygène dissous (5 mg/l) conforme à la proximité des aquifères peu profonds de l'atmosphère (Fig. 32).

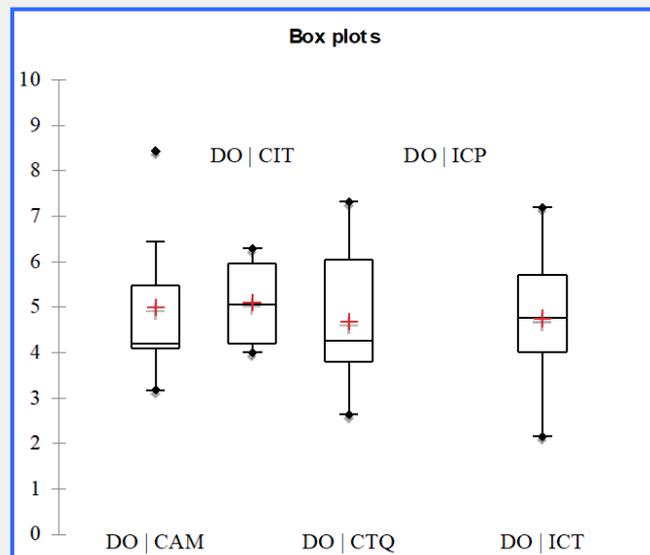


Figure 32 : Variabilité et distribution des valeurs d'oxygène dissous dans les différentes formations géologiques.

#### - Cations

La teneur en calcium est plus faible dans l'ICT, avec une faible variabilité (moyenne = 12,2 mg/l). Cette faible hétérogénéité est observée dans la formation de l'ICP,

mais avec des valeurs plus élevées (moyenne = 35,3 mg/l). Les teneurs en calcium des eaux souterraines des autres formations - CTQ, CIT et CAM - sont globalement en moyenne d'environ 30 mg/l. La concentration moyenne en calcium pour le CAM n'est pas représentative car elle est élevée en raison de la mesure de 250 mg/l enregistrée pour un point de cette formation (Fig. 33).

Les teneurs en magnésium sont plus faibles pour toutes les formations, hormis pour le CIT (moyenne d'environ 20 mg/l). S'agissant de l'ICT, le schéma est le même que pour le Ca, les valeurs sont plus faibles en ce qui concerne l'ICP et la variation est faible (moyenne = 7,2 mg/l) (Fig. 34).

Les teneurs en sodium sont plus faibles pour l'ICP, l'ICT et le CTQ, avec une valeur médiane inférieure à 10 mg/l) (excepté pour le point CTQ D509 dont la valeur est la plus élevée à 2 580  $\mu\text{S}/\text{cm}$ - et ICT B554 où le niveau de contamination est élevé avec 105 mg/l de nitrate (Fig. 35).

Les teneurs en potassium sont généralement basses (valeurs médianes entre 2,1 et 9,7 mg/l ). Un échantillon (B571) du CTQ a une valeur de 130,8 mg/l, ce qui ne semble pas normal, et les valeurs des autres ions n'augmentent pas, excepté celle du nitrate qui est élevée (81 mg/l) et semble liée à une contribution anthropique.

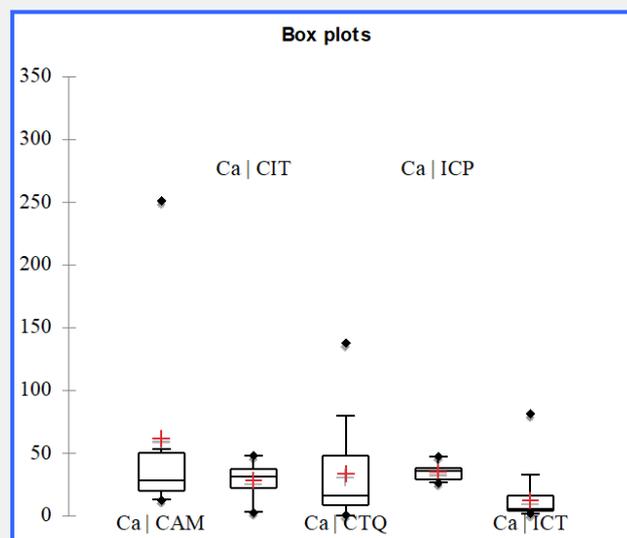


Figure 33 : Variabilité et distribution des teneurs en Ca dans les différentes formations géologiques.

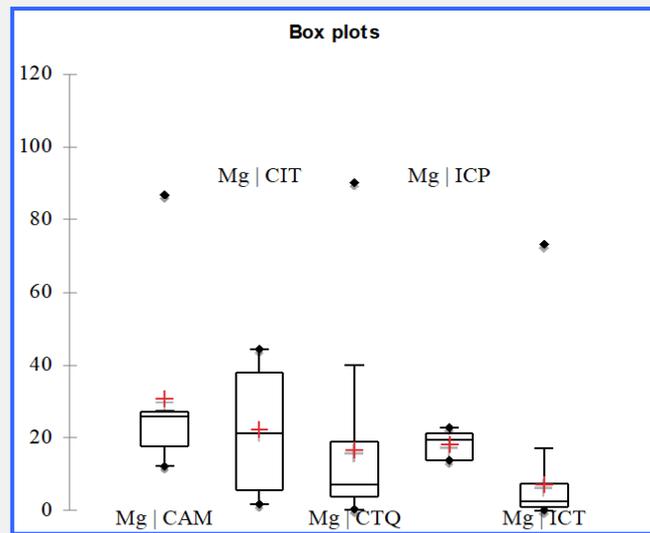


Figure 34 : Variabilité et distribution des teneurs en Mg dans les différentes formations géologiques.

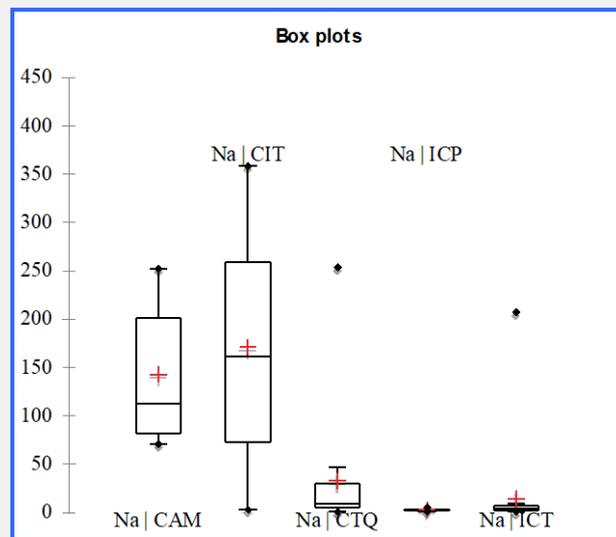


Figure 35 : Variabilité et distribution des teneurs en Na dans les différentes formations géologiques.

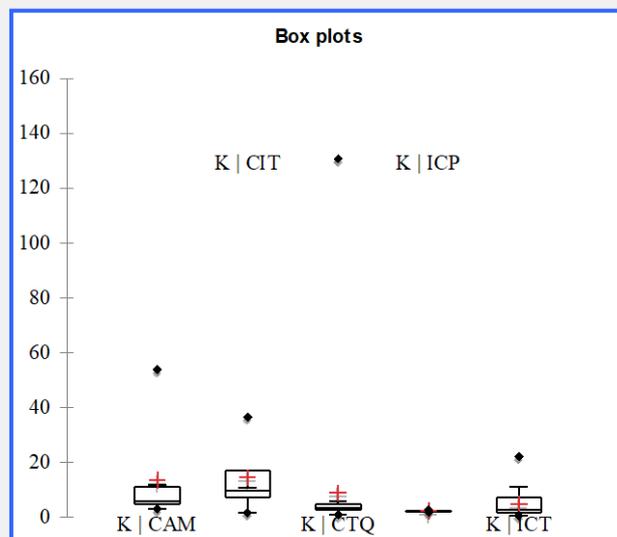


Figure 36 : Variabilité et distribution des teneurs en K dans les différentes formations géologiques.

## - Anions

Le bicarbonate est l'anion prédominant dans les eaux souterraines, avec une teneur de 50 mg/l pour 50 % des échantillons. Les teneurs des eaux souterraines de l'ICT sont plus faibles en raison de chiffres de CE plus faibles. Les teneurs pour le CAM et le CIT sont plus élevées, avec une moyenne de 200 mg/l. Il n'y a pas de données géologiques sur ces deux formations de la zone d'étude, mais il semble évident que la présence de limon dans les formations de grès contribue à la minéralisation de l'eau (Fig. 37).

Les teneurs en chlorure sont souvent faibles (< 10 mg/l), au niveau naturel, comme cela a été observé pour l'ICT, l'ICP et le CTQ (Fig. 38). Au-dessus de cette limite, il y a une forte corrélation entre les nitrates et les chlorures (Fig. 39), laquelle est essentiellement liée à une origine anthropique. Presque toutes les valeurs ayant trait au CIT et au CAM sont plus élevées (30-210 mg/l). Les teneurs en sodium de ces formations géologiques sont liées aux bicarbonates ( $r^2 = 0,71$ ) mais aussi aux chlorures ( $r^2 = 0,66$ ) (Fig. 40).

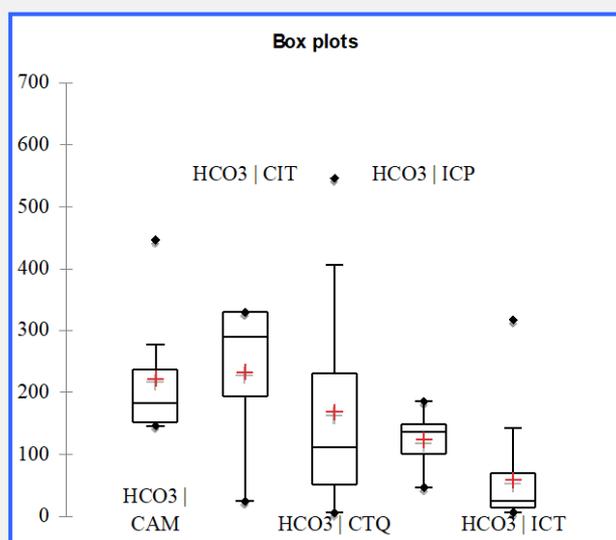


Figure 37 : Variabilité et distribution des concentrations en HCO<sub>3</sub> dans les différentes formations géologiques.

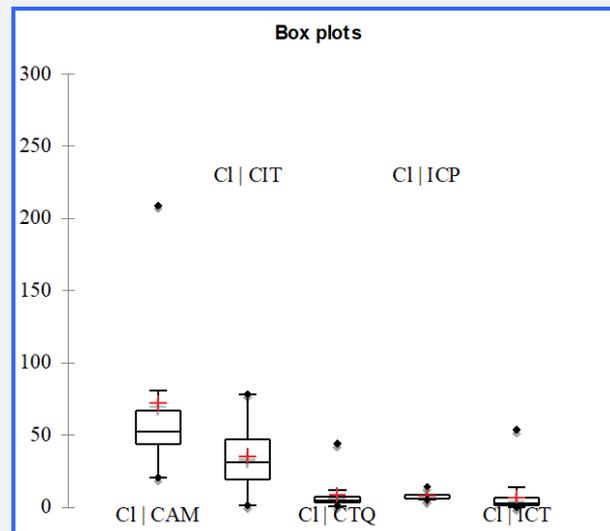


Figure 38 : Variabilité et distribution des concentrations en chlorures dans les différentes formations géologiques.

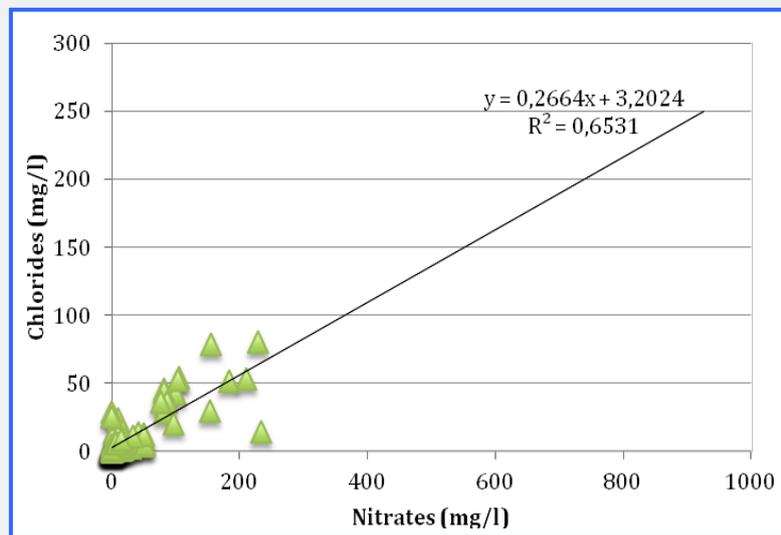


Figure 39 : Relation entre les nitrates et les chlorures dans tous les échantillons d'eaux souterraines.

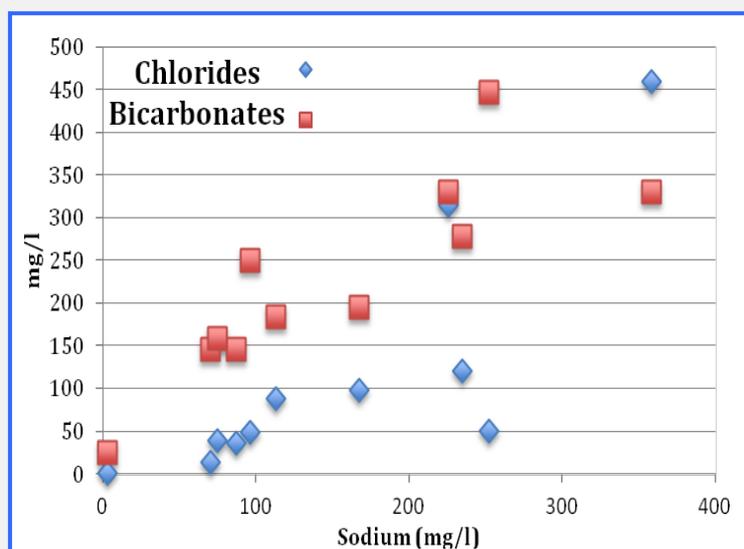


Figure 40 : Relation entre le sodium et les chlorures et les bicarbonates dans tous les échantillons d'eaux souterraines.

Les niveaux d'ions sulfate sont faibles pour les eaux souterraines de l'ICP, de l'ICT et du CTQ (valeurs médianes < 6 mg/l), excepté pour certains points du CTQ et de l'ICT dont les valeurs de CE sont les plus élevées, les teneurs de tous les cations et anions augmentent et la présence de sulfate semble dans ce cas liée à la dissolution naturelle. Dans la formation du CAM et plus spécialement celle du CIT, les concentrations en sulfates atteignent 458,7 mg/ (D528), la prévalence des anions dans ces eaux étant associée dans ce cas à la forte teneur en sodium, ce qui pourrait être lié localement aux minéraux évaporatiques (thénardite ou glaubérite). Un autre échantillon (D531) du CIT a les mêmes propriétés chimiques. En revanche, un autre point du CIT a la teneur en sulfates la plus faible de tous les échantillons avec seulement 0,3 mg/l, ce qui montre sa grande hétérogénéité minéralogique (Fig. 41)

Les ions nitrate sont présents naturellement dans les sols de la région du Sahel où poussent certains types de végétaux comme les acacias, une espèce ligneuse qui fixe l'azote ; les termites aussi peuvent produire de l'azote et en conséquence, les concentrations en nitrates des eaux souterraines peuvent être élevées (Ngugi et Brune, 2012). Dans la zone d'étude (Fig. 42), 45 % des échantillons ont une teneur en nitrate inférieure à 10 mg/l, 30 % une teneur supérieure à 25 mg/l, avec un maximum de 927 mg/l dans la formation du CAM où il constitue le principal anion (problèmes d'échantillonnage ou entreposage inapproprié à une température élevée?). Les teneurs en nitrate de tous les aquifères sont localement élevées, surtout CAM et CIT. La bonne corrélation entre les nitrates et les chlorures appuie l'hypothèse selon laquelle une part importante du nitrate provient de la contamination anthropique.

La teneur en silice (Fig. 43) varie de 3 à 37 mg/l, les valeurs les plus élevées étant celles des eaux souterraines du CAM, du CIT et du CTQ avec une forte variabilité dans chaque groupe. Les valeurs des eaux souterraines de l'ICT sont plus homogènes et plus faibles, et la faible CE observée montre que la dissolution minérale est limitée pour les ions ainsi que pour la silice, ce qui est probablement lié à un temps de résidence plus court.

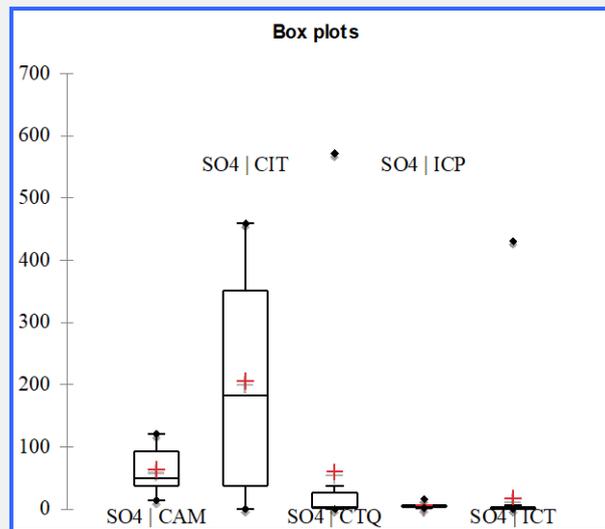


Figure 41 : Variabilité et distribution des concentrations en SO<sub>4</sub> dans les différentes formations géologiques.

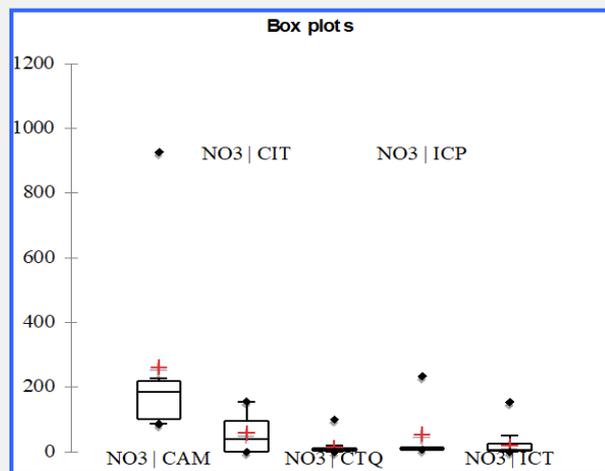


Figure 42 : Variabilité et distribution des concentrations en NO<sub>3</sub> dans les différentes formations géologiques.

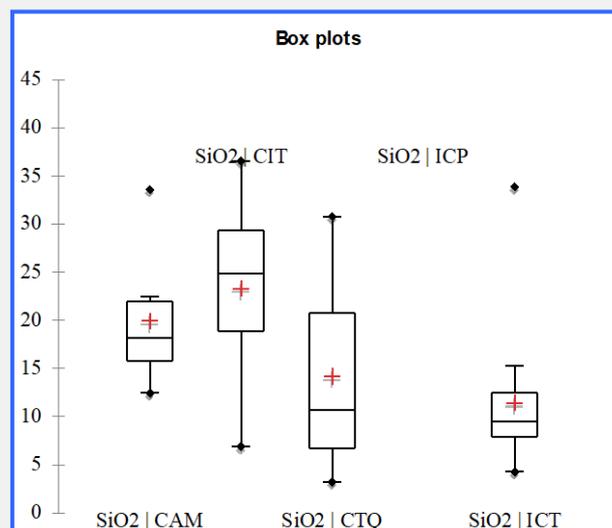


Figure 43 : Variabilité et distribution des concentrations en SiO<sub>2</sub> dans les différentes formations géologiques.

### - Oxygène 18 et deutérium

La fourchette des valeurs dans l'ensemble des aquifères va de -6,7 à 1,4 ‰ pour  $\delta^{18}\text{O}$  (Fig. 44) et de -52 à +1 ‰ pour  $\delta^2\text{H}$  (Fig. 45). Toutefois, la comparaison des valeurs médianes pour chaque groupe fait ressortir une faible variabilité - 1 ‰ pour  $^{18}\text{O}$  et 8 ‰ pour  $^2\text{H}$  - et ces valeurs sont en harmonie avec les valeurs isotopiques pondérées des précipitations annuelles. La variabilité observée pour l'ICT, l'ICP, le CIT et le CAM est normale pour les aquifères peu profonds (plus ou moins 3 ‰ pour  $\delta^{18}\text{O}$ ). Par contre, la variabilité élevée observée pour le CTQ révèle l'existence d'un autre processus, en l'occurrence l'évaporation mise en évidence par un enrichissement. Celle-ci pourrait se produire avant l'infiltration (ruissellement endoréique local de collecte), pendant celle-ci selon que les conditions de sol favorisent ou non ce processus, ou en cas d'infiltration directe du niveau supérieur de l'eau proche de la surface (ou directement à partir d'un puits ouvert). De nombreux puits de la formation du CTQ sont peu profonds et la profondeur/courbe isotopique confirme ce processus (Fig. 46)

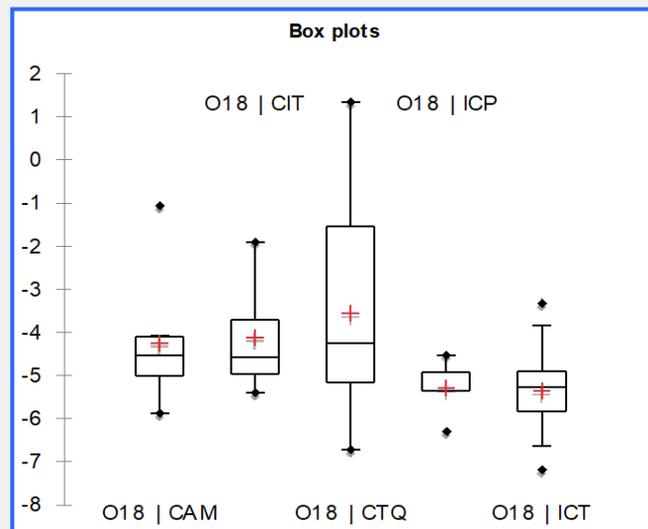


Figure 44 : Variabilité et distribution des concentrations en oxygène 18 dans les différentes formations géologiques.

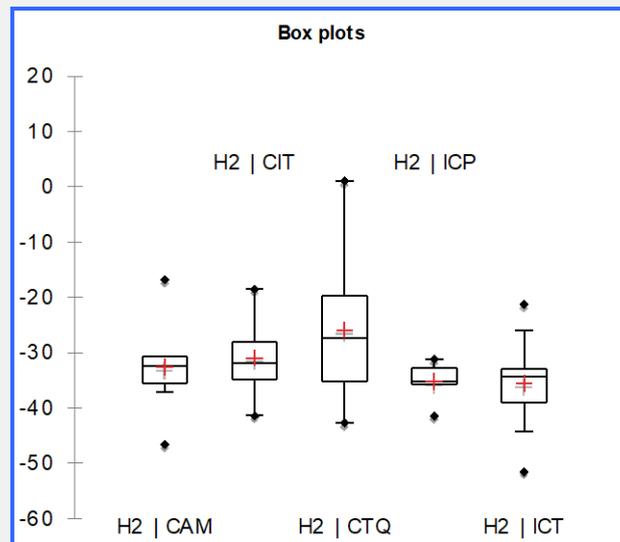


Figure 45 : Variabilité et distribution des concentrations en deutérium dans les différentes formations géologiques.

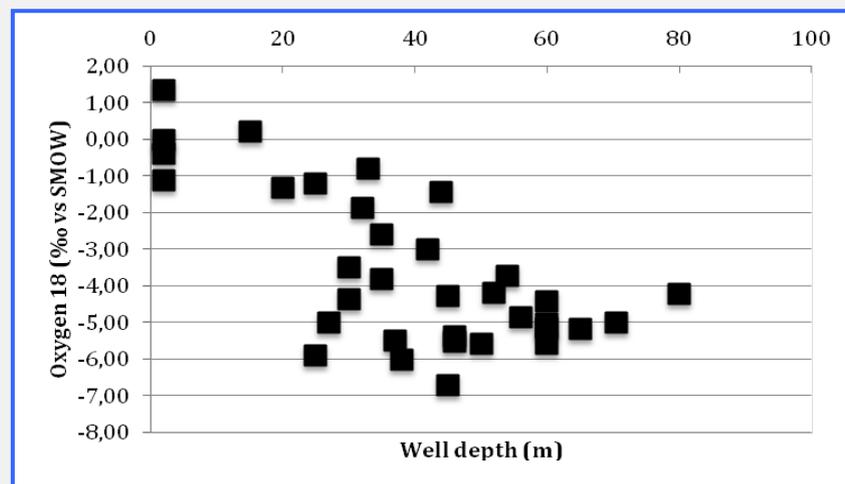


Figure 46 : Relation entre la concentration en oxygène 18 et la profondeur du puits dans les échantillons du CTQ.

#### - Excès de deutérium

Le processus d'évaporation est mis en évidence dans les eaux souterraines du CTQ par la forte variabilité de l'excès de deutérium et les valeurs faibles ou négatives. Mais celui-ci est faible dans les autres aquifères, en particulier ceux du CAM et du CIT, où « d » est inférieur à 6 ‰ (Fig. 47). Les valeurs moyennes pour l'ICT et l'ICP tournent autour de 7,5 ‰ et, lorsqu'elles sont proches de 13 ‰, cela est probablement lié au recyclage de la vapeur continentale (Taupin *et al.*, 2000). En dehors des problèmes d'échantillonnage et de conservation des échantillons avant analyse, le comportement de l'excès de deutérium du CAM et du CIT est impossible à expliquer par un processus général d'évaporation des eaux souterraines, excepté si le niveau de l'eau est proche de la surface. De l'eau provenant d'une recharge ancienne à une époque où les conditions de circulation atmosphérique étaient

différentes des conditions actuelles et influant sur l'excès de deutérium serait une autre hypothèse. L'analyse du carbone 14 pourrait permettre d'éclaircir cette discussion.

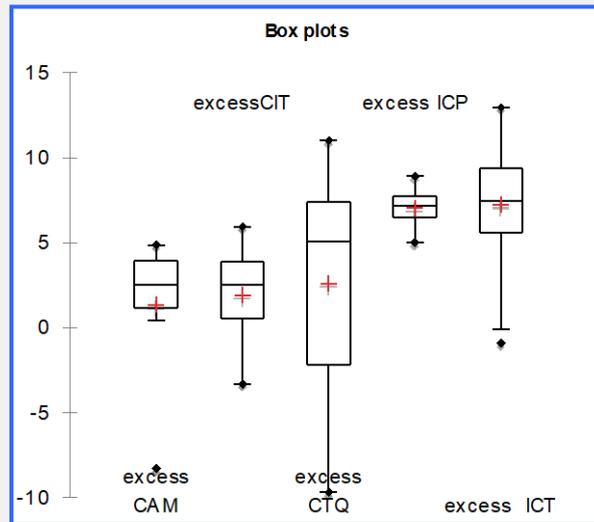


Figure 47 : Variabilité et distribution de l'excès de deutérium dans les différentes formations géologiques.

#### - Teneur en tritium

La teneur en tritium a été déterminée dans un total de 108 échantillons. Elle est élevée dans la plupart des eaux souterraines, hormis quelques points où le tritium est indétectable. Ce chiffre tient compte des teneurs en tritium notables. La teneur en tritium des échantillons de l'ICT est plus variable (0,3 à 9,1), avec les valeurs plus élevées, et une moyenne de 3,3 UT. Les teneurs en tritium des eaux de l'ICP et du CIT sont plus faibles et inférieures à 1,6 et 2,95 UT. Celles des eaux du CTQ sont intermédiaires et varient de 0,3 à 6,3 UT. La valeur annuelle (niveau naturel) estimée à partir des données (mensuelles : juin, juillet et août) de tritium (ayant trait aux stations de Bamako, Koutiala, Mopti et Bankass) de 2015 est de 4 UT. Elle montre que les eaux souterraines de l'ICP, du CIT, du CTQ et du CAM sont un mélange d'eau actuelle et d'eaux antérieures à 1950. En revanche, en ce qui concerne les eaux souterraines des aquifères de l'ICT, on observe une recharge récente à la plupart des points d'échantillonnage au cours des 65 dernières années, avec des concentrations en tritium proches de 4 UT les dix 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 de CE des échantillons de l'ICT sont plus faibles, ce qui, dans ce cas, est lié au renouvellement rapide de l'eau (Fig. 48).

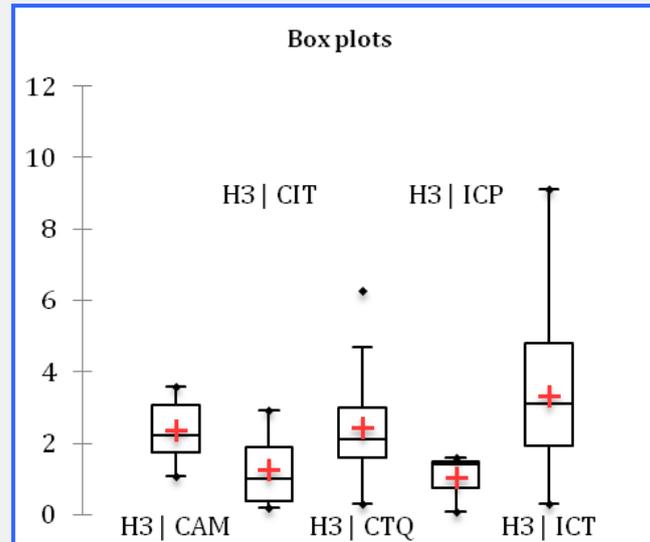


Figure 48 : Variabilité et distribution des teneurs en tritium dans les différentes formations géologiques.

### - Faciès hydrochimique

Les paramètres chimiques de l'eau exprimés en meq/l sont utilisés pour définir son faciès chimique. Il ressort du tableau 4 que  $\text{HCO}_3^-$  est l'anion dominant et  $\text{Ca}^{2+}$  est le cation dominant dans les eaux souterraines de l'ICT, du CIT et de l'ICP.  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Na}^+$  peuvent être les cations dominants dans certains échantillons, avec  $\text{HCO}_3^-$  ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ou  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $\text{Na}^+$ ) pour les eaux souterraines de l'ICT et du CTQ. Celles de l'ICT ont un faciès de mélange  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  alors que celui des eaux souterraines du CAM et du CIT est essentiellement de  $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ . Les nitrates sont les anions dominants dans certains échantillons et viennent principalement en deuxième position. Ces concentrations de nitrates plus élevées semblent suspectes, et il faut donc vérifier le protocole d'échantillonnage (bonnes conditions de prélèvement des échantillons, respect strict de l'intégrité de la chaîne du froid entre le terrain et le laboratoire, conservation des échantillons au congélateur ou stockage à froid et analyse chimique dans des délais raisonnables). Le principal risque associé à ces conditions climatiques (climat chaud et sec ou chaud et humide) est l'apparition d'algues ou de bactéries et l'augmentation de la teneur en nitrates de l'eau.

Tableau 4 : Teneurs en cations et en anions en meq/l (première campagne)

	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$
<b>ICT</b>	42	8	11		50	4		13
<b>CTQ</b>	16	7	11	1	31	2	1	2
<b>CAM</b>	1		6		6		1	2
<b>CIT</b>	1	1	3		2	2		
<b>ICP</b>	5	5			5			1

Le diagramme de Piper de tous les échantillons permet de montrer les caractéristiques des principaux faciès chimiques. On peut noter une évolution claire (dans le CTQ et l'ICT) des composantes  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  vers les composantes  $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ . La forme en diamant témoigne de la grande dispersion des échantillons d'eaux souterraines, mais n'est pas due à la dissolution d'un minéral particulier mais au flux de nitrates et ne devrait pas être prise en considération pour déterminer les processus géologiques de la dissolution. Il y a une autre évolution dans les aquifères du CTQ et de l'ICT, pour quelques points, vers une composante  $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+$ . Les eaux souterraines de l'ICP ont chacune un faciès chimique  $\text{HCO}_3^- \text{Ca}^{2+}$  ad  $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ . Celles du CIT et en particulier du CAM témoignent d'une évolution de  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$  vers  $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ .

La relation entre  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$  et  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$  (Garcia *et al.*, 2001) montre, comme on s'y attendait, qu'il y a un processus d'échange de cations entre les eaux de l'ICT, du CTQ, du CIT, du CAM, certaines évoluant vers des positions dénotant un gain de substances contenant des ions  $\text{Na}^+$  contre une perte de substances contenant des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ . En l'absence d'un tel phénomène, tous les points se retrouvent à l'origine (Fig. 50).

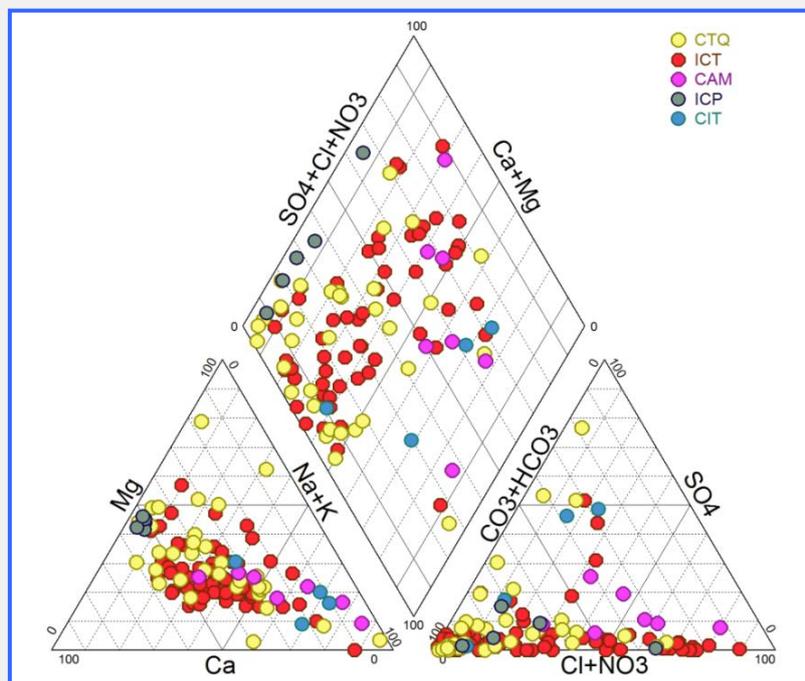


Figure 49 : Diagramme de Piper pour tous les échantillons d'eaux souterraines.

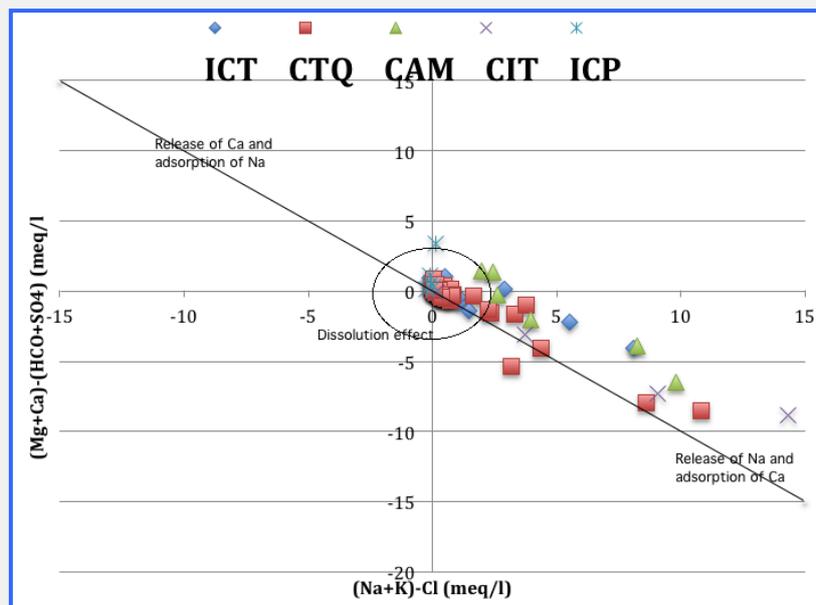


Figure 50 : Échange de cations dans les eaux souterraines.

- Équilibre entre les eaux souterraines et les minéraux (il n'y a pas de données sur les eaux de l'ICP)

L'indice de saturation de l'eau a été calculé pour certains minéraux classiques à l'aide du logiciel PHREEQC. On peut noter dans la base de données de l'AIEA que presque tous les échantillons de l'ICT et certains échantillons du CTQ ont des valeurs totales de concentrations en fer égales à 0,01 mg/l. Ces valeurs montrent essentiellement que l'eau est sursaturée en hématite et en goethite. Les autres minéraux importants, qui pourraient avoir des interactions dans notre environnement géochimique, sont la calcite, la dolomite et le quartz. Les eaux de l'ICT, du CIT et du CTQ sont essentiellement sous-saturées en calcite et quelques échantillons étaient saturés ou légèrement sous-saturés. Les échantillons de l'aquifère du CAM se situent dans la fourchette des valeurs de saturation (Fig. 51). Le graphe de l'indice de saturation pour la dolomite donne des résultats similaires (Fig. 52).

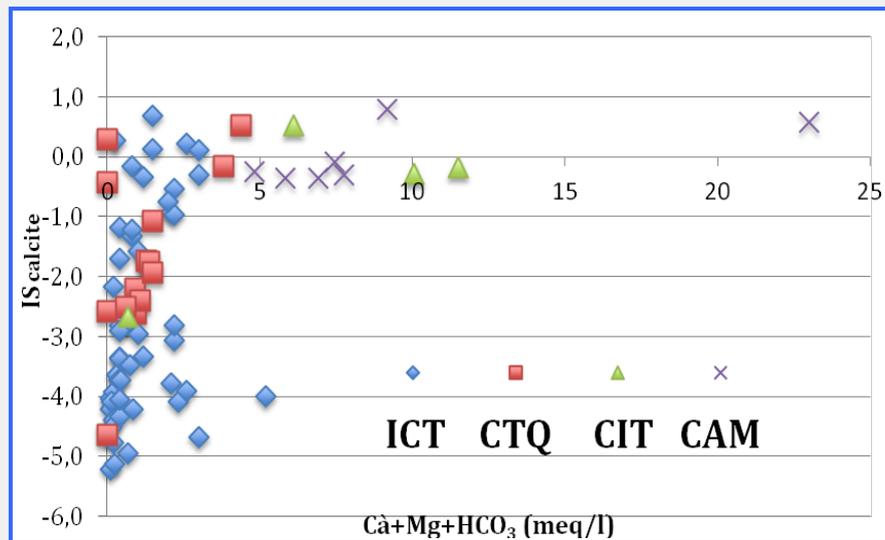


Figure 51 : Indices de saturation pour la calcite dans les échantillons d'eaux souterraines de divers aquifères.

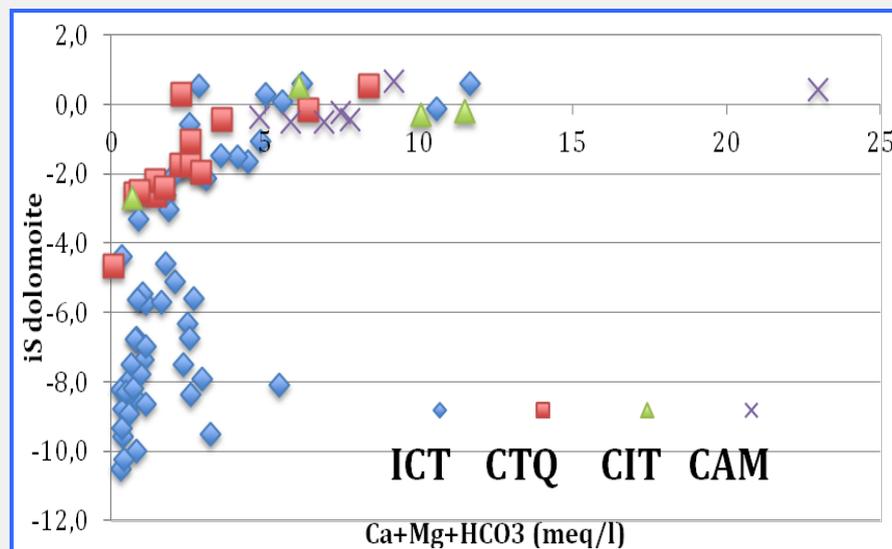


Figure 52 : Indices de saturation pour la dolomite dans les échantillons d'eaux souterraines de divers aquifères.

En ce qui concerne le quartz (Fig. 53), toutes les eaux souterraines se situent dans la zone de stabilité, les principales roches de la zone d'étude sont composées de grès contenant des minéraux de quartz ou un ciment de silice.

La figure 54 montre l'état d'équilibre des eaux en ce qui concerne les minéraux silicatés. Elles sont essentiellement en équilibre avec la kaolinite vers une évolution dans le domaine de l'argile de smectite ou du feldspath. L'état d'équilibre des eaux souterraines du CAM et du CIT est proche ou à l'intérieur du domaine de l'argile de smectite, et l'état de dissolution de ces eaux est plus avancé.

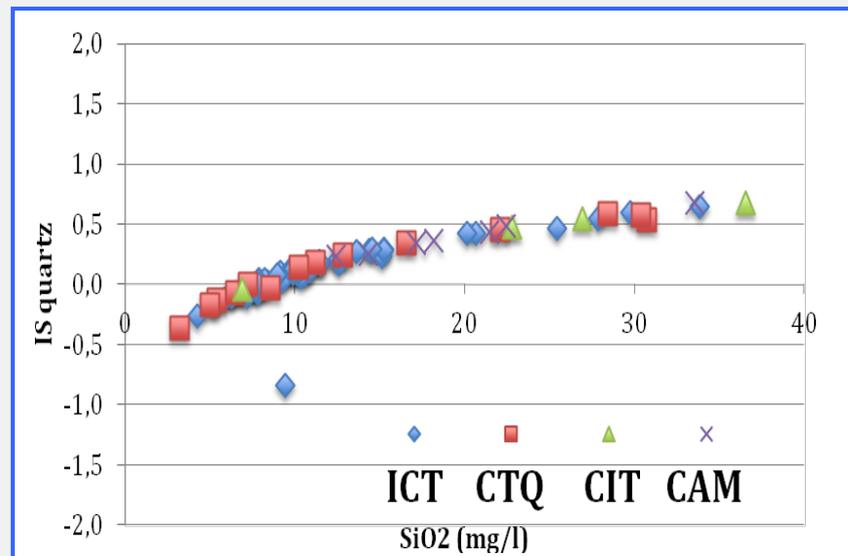


Figure 53 : Indices de saturation pour le quartz dans les échantillons d'eaux souterraines de divers aquifères.

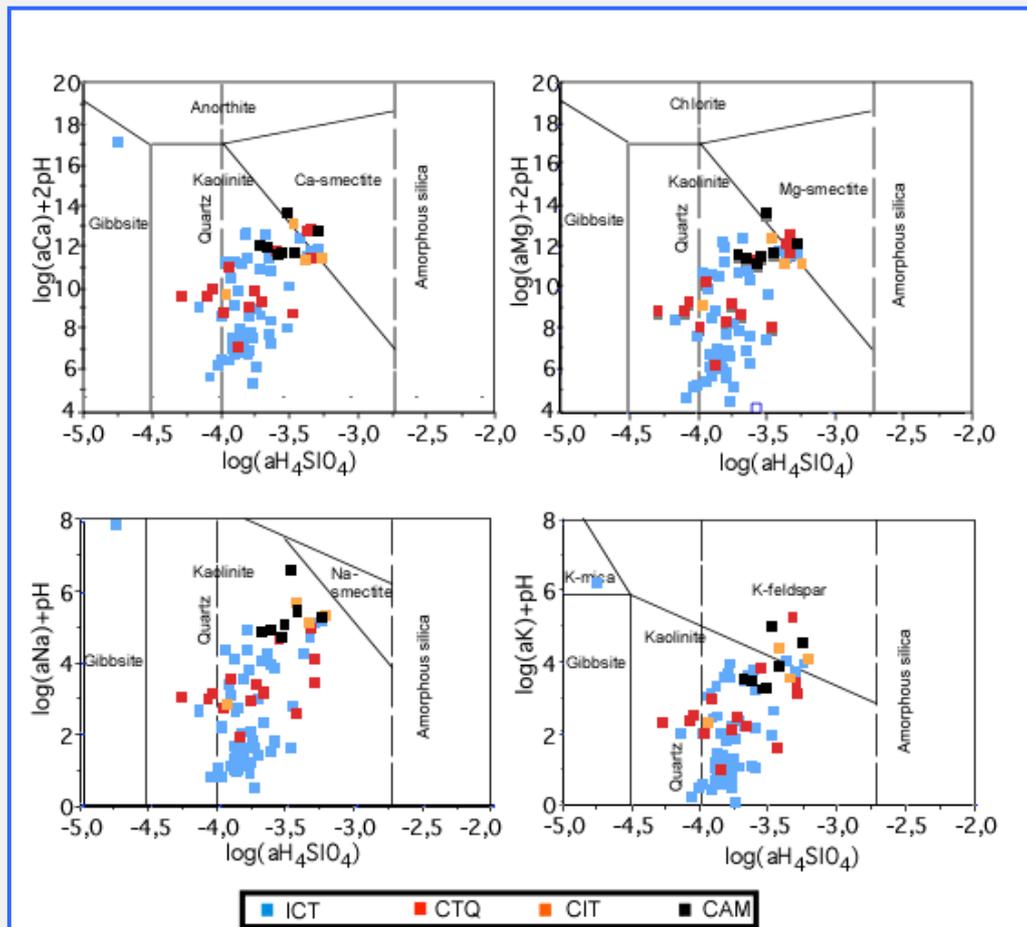


Figure 54 : Diagramme de Korjinsky, diagramme du champ de stabilité des minéraux silicatés.

## - Analyse de corrélation multiple

L'objectif d'un outil d'analyse en composantes principales est de permettre de proposer une visualisation de données multidimensionnelles, dans le cas présent les paramètres des eaux souterraines analysés ou mesurés sur le terrain, et de la structure des variables à travers un graphique bidimensionnel. Chaque axe correspond à une composition de n éléments analysés ; les coordonnées X et Y de chaque échantillon sont calculées comme suit :

$$X = a1 + b1 [\text{Param1}] + c1. [\text{Param2}] + d1. [\text{Param3}] + \dots + n1. [\text{ParamN}]$$

$$Y = a2 + b2. [\text{Param1}] + c2. [\text{Param1}] + d2. [\text{Param1}] + \dots + n2. [\text{ParamN}]$$

Dans ce cas, les paramètres utilisés sont les éléments de chimie, les mesures de terrain ainsi que les mesures des isotopes et de tritium.

Les eaux ayant un profil similaire sont proches dans le graphique.

Les résultats sont présentés dans le tableau 5 et les figures 55 et 56 (78 observations ont fait l'objet d'analyses complètes).

### Total ACP

[Tableau 5 : Variance totale par axe](#)

	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>	<b>F5</b>
Valeur	8 176	2 755	1 601	1 355	1 187
Variabilité (%)	45 424	15 303	8 896	7 529	6 596
Taux cumulé	45 424	60 727	69 623	77 152	83 748

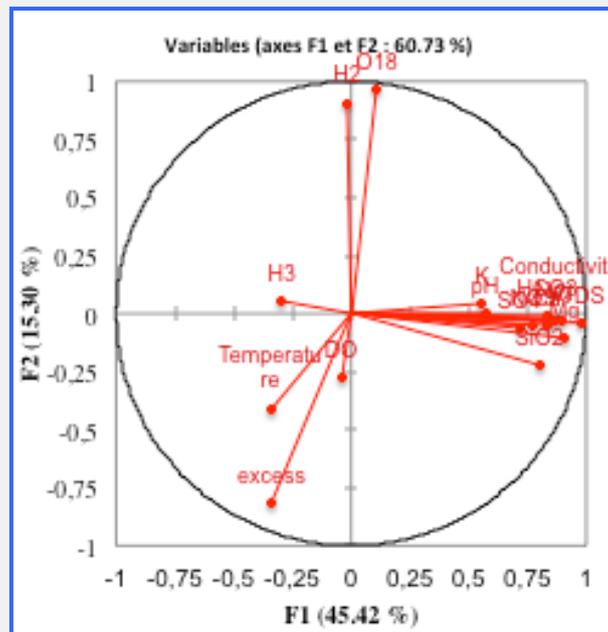


Figure 55 : Analyse en composantes principales des eaux souterraines (paramètres)

F1 représente tous les éléments de minéralisation et les éléments chimiques des eaux souterraines et F2 les isotopes stables de l'eau et, avec une corrélation négative, l'excès de deutérium. F3 n'ajoute aucune information nouvelle.

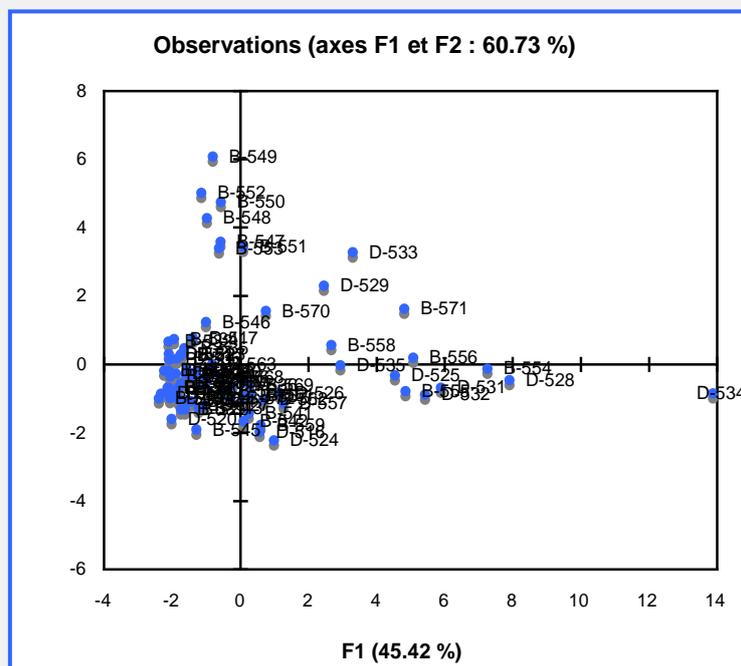


Figure 56 : Analyse en composantes principales de tous les échantillons d'eaux souterraines.

On peut identifier deux groupes d'échantillons distincts pour chaque axe en fonction des paramètres de F1 et F2. F1 détermine les échantillons les plus minéralisés et F2 les plus enrichis en isotopes et pour lesquels l'excès de deutérium est plus faible. L'analyse en composantes principales ne fait pas de distinction en fonction des formations géologiques,

lesquelles sont essentiellement similaires en termes de géochimie, mais tous les points de l'axe F2 viennent du CTQ car, comme on l'a constaté, ils ont les valeurs d'enrichissement en isotopes stables les plus élevées et l'excès de deutérium le plus faible, compte tenu de la faible profondeur de l'eau.

#### - Distribution spatiale des paramètres des eaux souterraines (travaux préliminaires)

Il n'y a pas suffisamment de points dans le CIT, l'ICP et le CAM pour déterminer une relation spatiale, dans ce cas pour montrer une direction d'écoulement marquée par une évolution chimique ou en fonction de l'âge liée à une interaction eau-roche plus longue.

En ce qui concerne la formation de l'ICT, la zone d'étude est trop vaste, le réseau est inapproprié et le contexte géologique est mal connu. Toutefois, si on pose comme hypothèse que le flux de circulation va de la bordure au centre du bassin, on aura, dans notre cas, deux sections transversales, une section transversale sud-nord dans la partie ouest et une section transversale sud-sud-est/nord-nord-ouest dans la partie est. On peut noter (avec prudence) une organisation spatiale est-ouest, avec des valeurs plus faibles dans la partie sud-est et une CE plus élevée dans la partie nord-ouest. Les comportements du bicarbonate et du calcium suivent aussi ce schéma, ce qui n'est pas une surprise dans la mesure où ces deux ions contribuent fortement à la minéralisation totale de l'eau. Le pH aussi montre cette évolution de l'eau de l'acidité vers la neutralité-alcalinité, évolution qui pourrait s'expliquer par un effet tampon chimique dû à la dissolution des phases minérales contenant des ions neutres ou alcalins, avec comme conséquence la baisse de l'acidité initiale. Le comportement des isotopes stables est moins clair, mais, dans la partie sud-est, les valeurs les plus fréquentes sont entre -4 et -6 ‰ et, dans la partie nord, elles sont entre -5 et -7 ‰ et dénotent un appauvrissement dû peut-être à un mélange plus important avec des eaux plus anciennes. La distribution spatiale du tritium est conforme à cette hypothèse, avec des eaux plus jeunes dans la partie sud-est (>3 TU) et, dans la partie nord-ouest, une forte baisse de la teneur en tritium, voire de l'eau qui n'en contient pas.

En ce qui concerne les formations du CTQ, il n'y a (a priori) pas de continuité hydrodynamique entre les parties est et ouest, le CTP est étant séparé par la formation de l'ICP. Il y a des différences entre les parties ouest et est, avec une plus grande minéralisation (CE et bicarbonate) et un pH basique à l'est.

Les caractéristiques de l'oxygène 18, avec enrichissement et faible excès de deutérium dans la partie nord-ouest de l'aquifère, sont en partie dues à la faible profondeur des puits, avec un niveau de l'eau proche de la surface. En ce qui concerne le tritium, il n'y a pas de caractéristiques évidentes, dans la mesure où on a de fortes teneurs en tritium et de l'eau sans tritium dans la même zone géographique.

### - Résultats des analyses isotopiques

Nous avons analysé toutes les données isotopiques disponibles dans la zone pour faire la synthèse des informations isotopiques du projet RAF/7/011 dans un contexte global à long terme. Nous avons utilisé les données isotopiques des programmes GNUP et GNIR au Mali et au Burkina Faso (Fig. 57).

#### • Teneurs en isotopes des précipitations

Pour la station de Bamako, nous n'avons utilisé que les données postérieures à 1990. La première série (1962-1980) comportait de nombreuses erreurs dues à des problèmes d'échantillonnage (excès de deutérium trop faible dans 60 % des échantillons).

Dans le premier exemple, nous avons estimé la moyenne annuelle pondérée des données de certaines stations et de certaines années où 90 % des chiffres de pluviométrie annuelle ont été collectés et analysés. Les résultats sont présentés au tableau 6. Malheureusement, la série de données de pluviométrie collectées à Bankass, Mopti, Bamako et Koutiala dans le cadre du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA est incomplète et moins de 90 % des données concernées ont été recueillies, excepté pour Mopti en 2014.



Figure 57 : Données isotopiques des stations GNIP et GNIR utilisées dans l'étude. Les rectangles noirs représentent les stations GNIP (Bamako, Koutiala, Nasso, Hounde et Bobo Dioulasso) et les rectangles noirs les stations GNIR (Sele).

Tableau 6 : Valeurs isotopiques annuelles

<b>Bamako, 1992</b>	-4,94	-31,3
<b>Bamako, 1993</b>	-4,97	-26,2
<b>Bamako, 1994</b>	-6,12	-38,7
<b>Bamako, 1996</b>	-4,45	-26,8
<b>Bobo Dioulasso, 2010</b>	-4,70	-29,8
<b>Bobo Dioulasso, 2011</b>	-3,37	-17,9
<b>Bobo Dioulasso, 2012</b>	-5,09	-29,7
<b>Bobo Dioulasso, 2013</b>	-2,11	-9,7
<b>Mopti-Sevaré 2014</b>	-3,75	-21,7

La variabilité des teneurs isotopiques annuelles est élevée ( $-2,11$  /  $-6,12$  ‰  $\delta^{18}\text{O}$  ;  $-9,7$  /  $-38,7$  ‰  $\delta^2\text{H}$ ), avec des moyennes de  $-4,39$  et  $-25,8$  ‰ respectivement pour  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$ . Ces chiffres sont en harmonie avec ceux d'études de longue durée effectuées dans la région du Sahel (Taupin *et al.*, 2000, 2002) qui sont de  $-4,2$  ‰ et  $-23,5$  ‰ respectivement pour  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$ . Mathieu *et al.* (1993) ont calculé des moyennes pondérées de  $-3,7$  ‰ ( $^{18}\text{O}$ ) et  $-23,8$  ‰ ( $^2\text{H}$ ) à la station de Barogo, située à environ 50 km au nord-est de Ouagadougou (période 1988-1989). Les variations intra-annuelles dépendent des

conditions climatiques. La saison des pluies au Sahel (avril à octobre) dépend de la position du front intertropical (FIT). Environ 80 % des précipitations annuelles sont dues à des systèmes convectifs. Au cours des années humides, la composition isotopique moyenne des précipitations locales est plus négative en raison de températures plus faibles et l'humidité relative élevée peut réduire l'effet de l'évaporation (Gourcy *et al.*, 2000). La composition isotopique est aussi influencée par l'origine des précipitations. Dans la région sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, la pluie vient des moussons de Guinée ou des vagues d'est transportées par le courant jet-africain d'est et le courant-jet tropical d'est (Gourcy *et al.*, 2000). La prédominance d'un de ces phénomènes au cours de la saison des pluies influe directement sur la quantité de précipitations et les teneurs en isotopes de l'eau de pluie (Gourcy *et al.*, 2000 ; Taupin *et al.*, 2002).

À l'échelle mensuelle (Bobo-Dioulasso - 2010-2013), la courbe des teneurs en isotopes et de l'excès de deutérium est en V (Taupin *et al.*, 2000, 2003). Au début et à la fin de la saison des pluies, les teneurs en isotopes augmentent en raison des températures élevées et de la désaturation de l'atmosphère dues à l'instabilité de la mousson. Au milieu de l'hivernage, lorsque la mousson est bien établie, elles diminuent parce que l'atmosphère est saturée d'eau, que les températures sont plus faibles et que de nombreux systèmes convectifs se développent à de grandes hauteurs (Fig. 58 et 59).

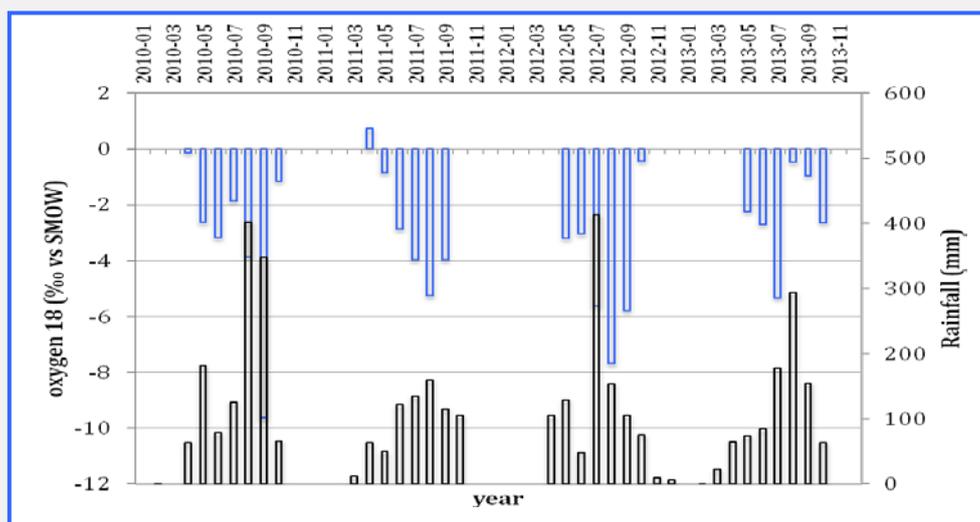


Figure 58 : Variabilité mensuelle de la teneur en isotopes à Bobo-Dioulasso.

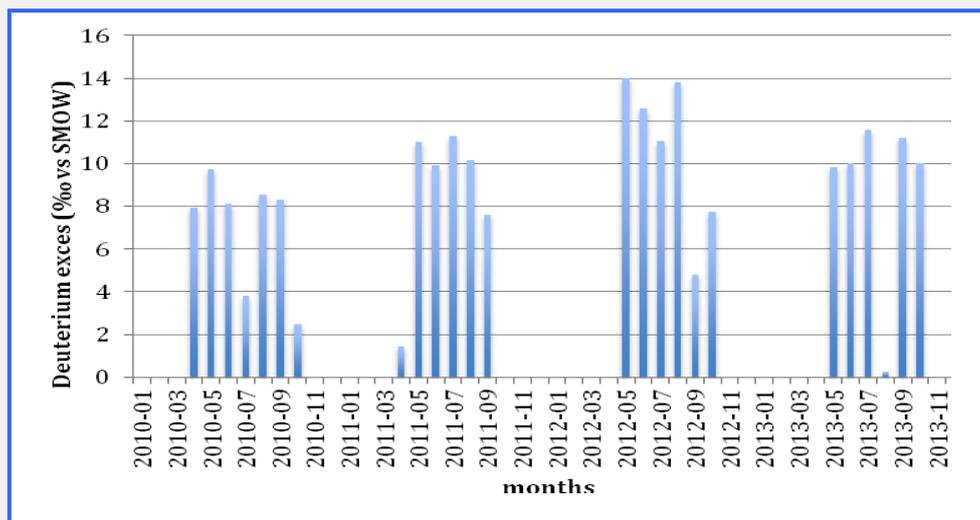


Figure 59 : Évolution mensuelle de l'excès de deutérium à la station de Bobo-Dioulasso.

Pour définir la relation entre l'oxygène 18 et le deutérium, nous avons utilisé toutes les données mensuelles disponibles à cinq stations météorologiques. La droite météorique locale est proche de la droite météorique mondiale. Si nous supprimons les points d'évaporation, la droite météorique locale représente  $\delta^2\text{H} = 7,866 \delta^{18}\text{O} + 8,87$ , très similaire à la droite météorique mondiale et aussi similaire à la relation observée dans les longues séries à Niamey (Taupin, 2002), et plus proche de la zone d'étude :

- station de Barogo, Mathieu *et al.* (1993) :

$$\delta^2\text{H} = 7,7 (\pm 0,3) \delta^{18}\text{O} + 7,8 (\pm 4,0)$$

- Bobo-Dioulasso, 1997-1998 (Huneau *et al.*, 2011) :

$$\delta^2\text{H} = 8,0 (\pm 0,5) \delta^{18}\text{O} + 10,2 (\pm 2,1)$$

- Bamako, période 1991-1998 (Gourcy *et al.*, 2000) :

$$\delta^2\text{H} = 8,1 (\pm 0,2) \delta^{18}\text{O} + 11,9 (\pm 2,1)$$

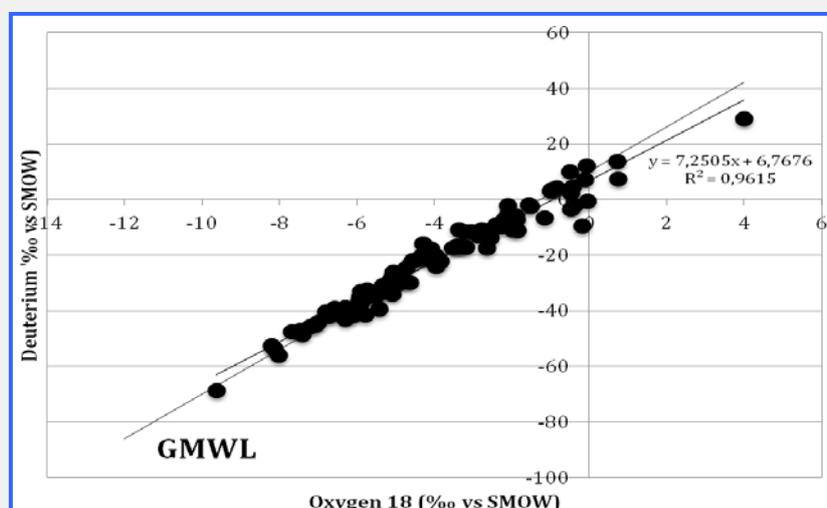


Figure 60 : Relation entre l'oxygène 18 et le deutérium dans des échantillons de précipitations mensuelles de cinq stations.

### • Teneurs en isotopes des échantillons d'eaux souterraines

Pour compléter et achever la discussion relative aux teneurs en isotopes des eaux souterraines, nous avons comparé celles des précipitations modernes et celles des cinq aquifères (Fig. 61). Avec une teneur en isotopes interannuelle estimée à  $-4,4 \text{ ‰}$  ( $\delta^{18}\text{O}$ ) et  $-25,8 \text{ ‰}$  ( $\delta^2\text{H}$ ) dans les précipitations, celles-ci sont nettement plus riches en isotopes que 77 % des échantillons d'eaux souterraines. Même en supposant une valeur moyenne de  $-5 \text{ ‰}$  pour  $\delta^{18}\text{O}$  en ce qui concerne les précipitations, 45 % des échantillons sont plus pauvres en isotopes. Par comparaison aux teneurs en isotopes des eaux souterraines au Burkina Faso, on s'aperçoit que ces concentrations sont supérieures à  $-6 \text{ ‰}$  ( $\delta^{18}\text{O}$ ) ; au Mali, les valeurs pour  $\delta^{18}\text{O}$  sont inférieures à  $-6 \text{ ‰}$  pour 14 % des échantillons analysés.

Si on compare les teneurs en  $\delta^{18}\text{O}$  et en tritium (Fig. 62), on constate qu'il n'y a pas de relation claire montrant un lien entre l'augmentation de l'âge et l'appauvrissement. Toutefois, il ressort des études paléoclimatologiques que le Sahel a connu, dans le passé, de nombreuses phases climatiques qui ont considérablement influencé les processus d'infiltration et de réalimentation.

Jusqu'à 4 500 avant le présent, le climat de l'Afrique occidentale était caractérisé par plusieurs périodes humides pendant l'Holocène, avec un optimum dans la région du Sahara autour de 8 500-6 500 avant le présent, interrompues par de brèves périodes sèches (Gasse, 2000). Dans la ceinture sahélienne, la reprise de la mousson après le dernier maximum glaciaire (DMG) froid et sec (23 000-18 000 avant le présent) s'est effectuée en deux temps vers 15 000 et 11 500 avant le présent (Gasse, 2000), séparés par un retour à des conditions plus sèches correspondant au Dryas récent. Des indices paléoclimatiques d'Afrique occidentale qui remontent à la période antérieure au DMG indiquent qu'avant 23 000 avant le présent les conditions climatiques humides alternaient avec des phases arides, tandis que les températures moyennes demeuraient inférieures à celles d'aujourd'hui (Gasse, 2000).

Huneau *et al.* (2011) ont suggéré, en ce qui concerne la bordure orientale du bassin de Taoudéni, à travers la datation au carbone 14, qu'il y a eu une recharge continue du système au cours de la période du présent au Pléistocène, mais que l'aquifère a surtout été réalimenté au cours des périodes humides jusqu'à 4 500-5 000 avant le présent.

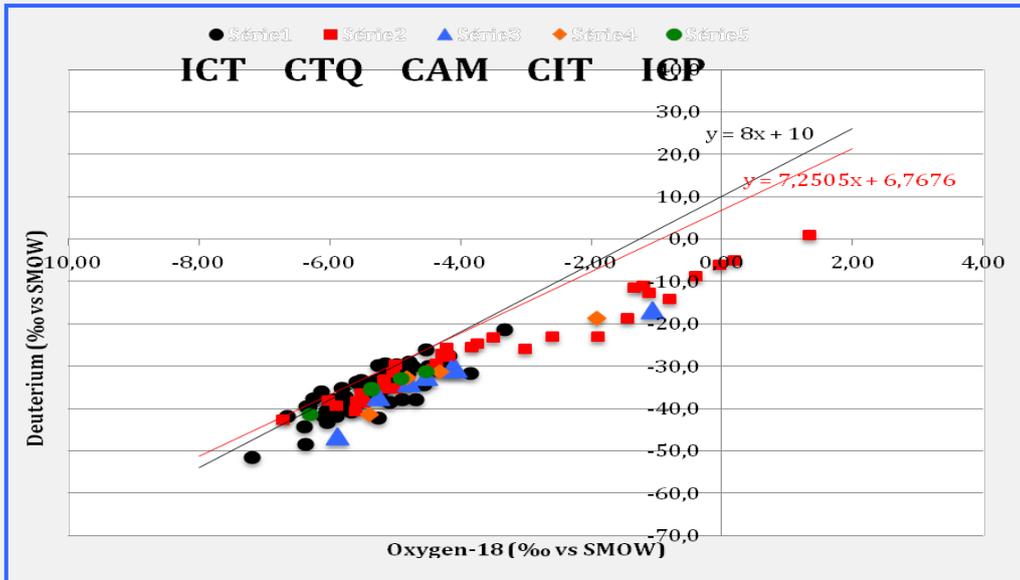


Figure 61 : Relation entre l'oxygène 18 et le deutérium dans les échantillons d'eaux souterraines.

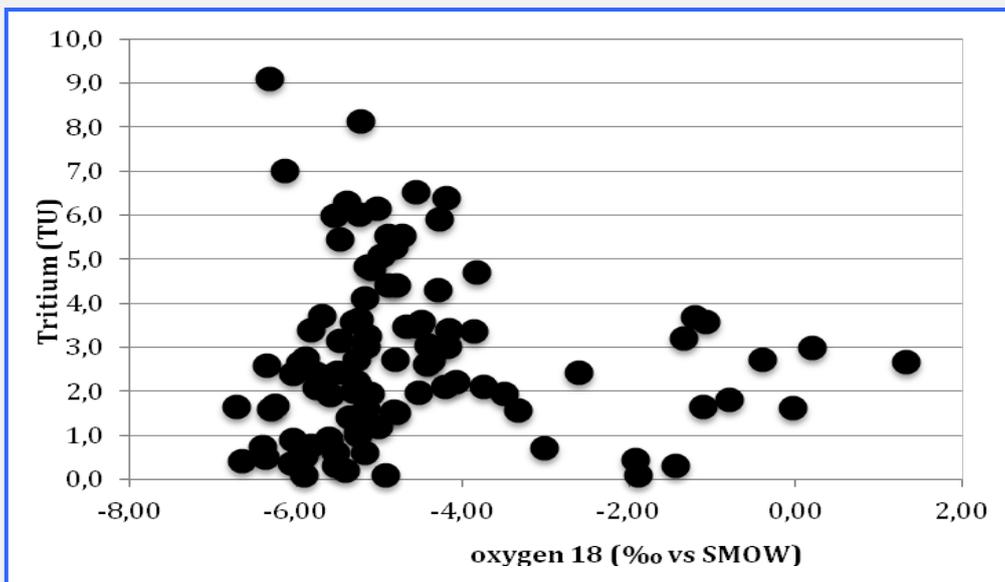


Figure 62 : Relation entre l'oxygène 18 et le tritium dans les échantillons d'eaux souterraines.

#### • Teneurs en isotopes des eaux de surface

Des échantillons d'eau de surface ont été prélevés en trois endroits au cours du projet : le 24/6/2013 sur le fleuve Niger à Bamako, le 25/05/2014 sur le fleuve Bani à Douna et le 18/03/2015 sur le fleuve Niger à Markala (Fig. 63). La CE va de 49 à 81  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , avec un pH neutre (6,7 à 7,6), et le faciès chimique est  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  ou  $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ . Les teneurs en nitrates sont faibles (0,09-3,8 mg/l) et les concentrations en oxygène dissous sont élevées dans tous les cas (7-8 mg/l).

La variabilité des teneurs en isotopes mesurées dans les eaux du Niger (Sele) est très élevée (> 8 ‰ pour l'oxygène 18) au cours de l'année, avec un cycle similaire à celui des isotopes des précipitations et un léger décalage temporel diphasé (un mois). Cette courbe est corrélée avec le débit du fleuve et, pendant la saison sèche, le Niger subit une forte évaporation (Fig. 63) (enrichissement en isotopes élevé et faible excès de deutérium).

Les teneurs en isotopes des trois échantillons ont une variation temporelle similaire, même si les valeurs sont différentes (plus faibles), ce qui dépend des conditions de précipitations annuelles :

24/6/2013 - fleuve Niger à Bamako : -3,00 ‰ -18,3 ‰ respectivement pour  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$

25/05/2014 - fleuve Bani à Douna : +0,48 ‰ -8,5 ‰

18/03/2015 - fleuve Bani à Markala : -1,14 ‰ -11,7 ‰

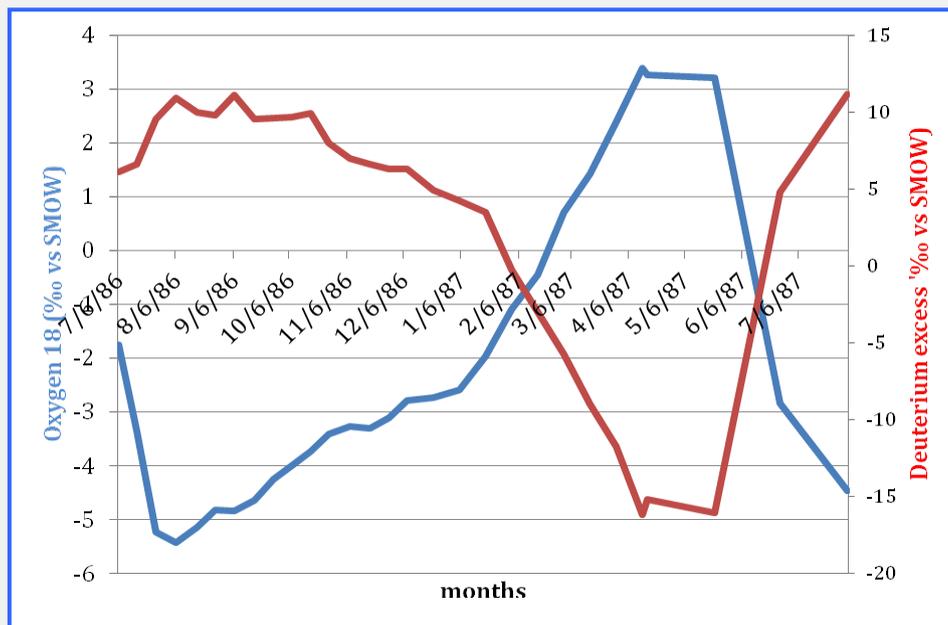


Figure 63 : Oxygène 18 et excès de deutérium en 1990-1991 à la station de Sele sur le Niger.

### 4.3. Résultats et discussion : zone d'étude au Burkina Faso

Les données disponibles ont été traitées par type lithologique (Fig.15).

#### - Profondeur des puits d'échantillonnage

Les échantillons d'eaux souterraines ont été prélevés dans des puits en moyenne plus profonds que les puits de prélèvement de la partie sud-est du Mali. La profondeur moyenne va

de 60 à 80 m, excepté dans la formation de GFR où elle est d'environ 50 m (Fig. 64). Il y a quelques puits peu profonds, entre 25 et 40 m, dans la zone d'étude. La profondeur des puits est très variable dans les deux formations de GFG et de SAC1, avec 80 et 90 m. À l'inverse, elle est homogène dans les formations cristallines malgré leur étendue et leur diversité géographique, peut-être en raison d'une altération généralisée et d'un processus de fracture qui limite la profondeur de la zone productive.

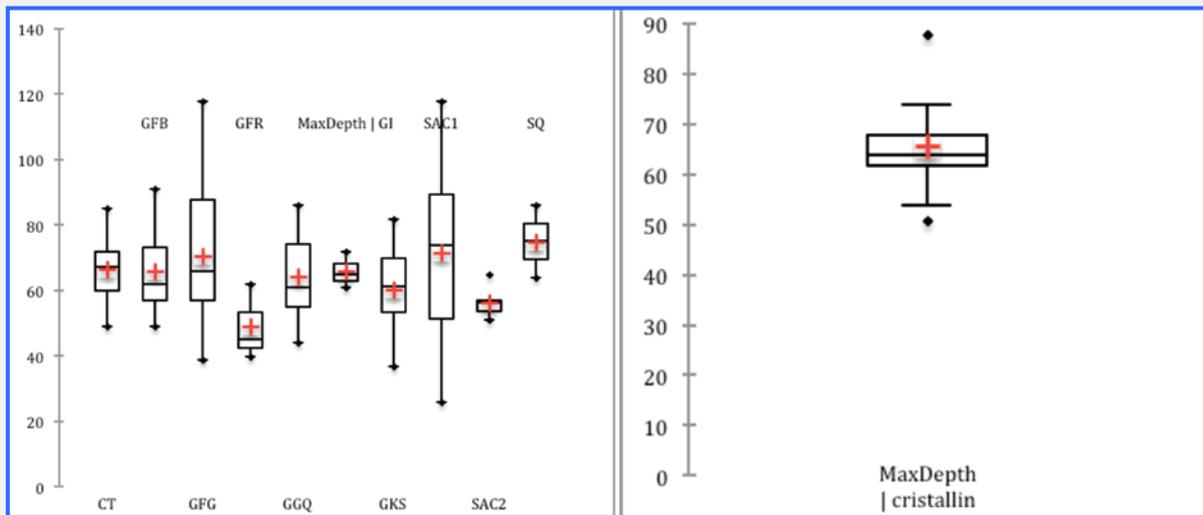


Figure 64 : Variabilité et distribution des profondeurs des puits d'échantillonnage dans les différentes formations géologiques.

### - Conductivité électrique

La CE est très variable dans les formations cristallines (58-1 856  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), avec une moyenne de 513  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Fig. 65). Les valeurs les plus élevées ne sont pas liées à un processus naturel de dissolution minéralogique. C'est la forte concentration en nitrates qui contribue à l'augmentation de la CE, et pas seulement dans les formations cristallines (Fig. 66). Dans ce contexte, tous les échantillons (sauf un d'une formation cristalline) dont la CE est supérieure à 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  sont très contaminés par les nitrates, ce qui est aussi lié à de fortes teneurs en potassium. Il est important de savoir si cette anomalie est due à un problème d'échantillonnage (ce qui est probable) ou à la forte contamination des puits. Hormis ce problème, tous les échantillons ont une CE faible (GFB, GI, GGQ, SAC2 < 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ou moyenne (autres formations de l'IC et CTQ < 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Comparé à la partie sud-est du Mali, le CTQ a des valeurs plus faibles au Burkina Faso (en moyenne 390  $\mu\text{S}/\text{cm}$  - 535  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Au Mali, 60 % des échantillons du CTQ oriental ont des valeurs comprises entre 500 et 2 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (annexe II).

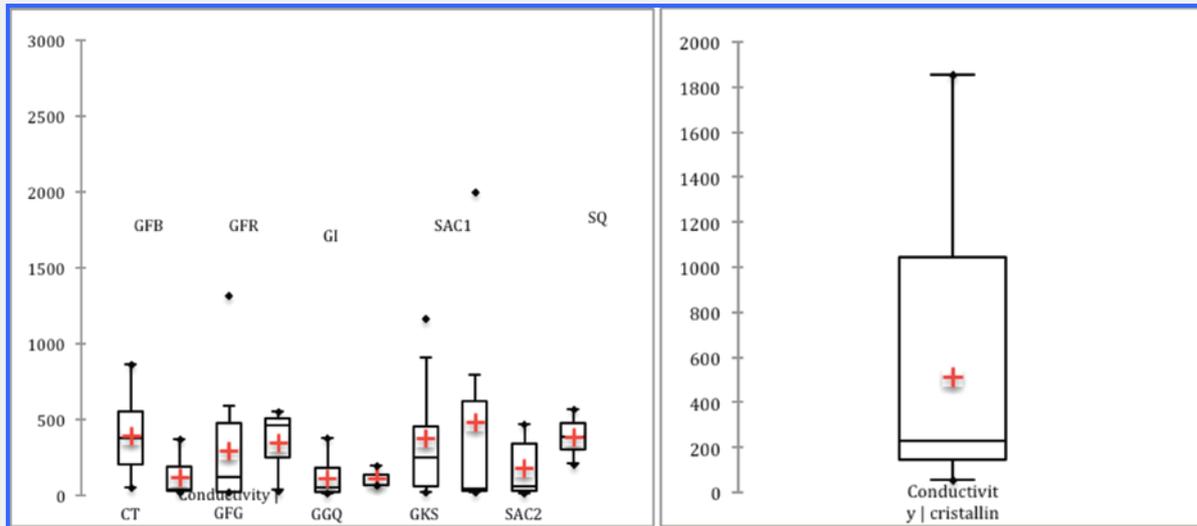


Figure 65 : Variabilité et distribution de la CE dans les différentes formations géologiques.

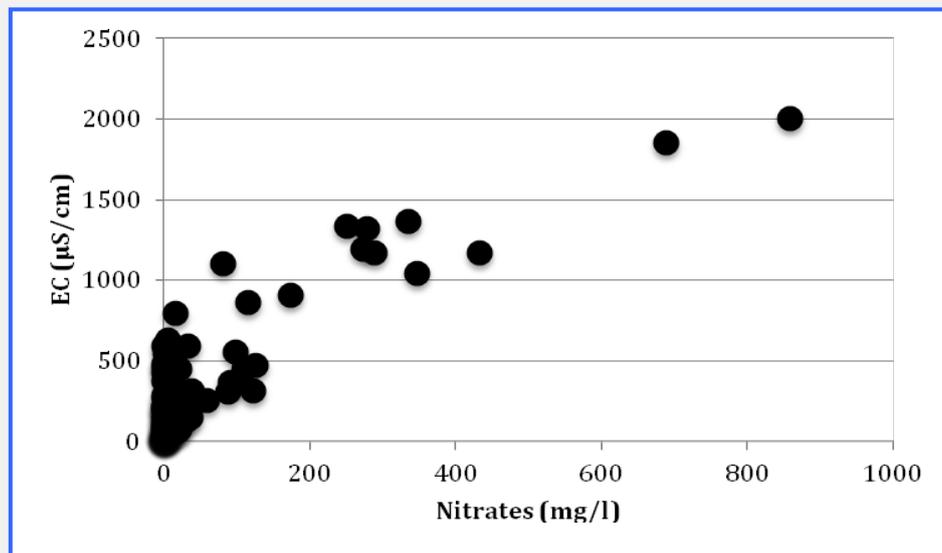


Figure 66 : Relation entre la teneur en nitrates et la conductivité électrique.

Il ressort de la comparaison des valeurs de MDT et de conductivité électrique (Fig. 67) qu'il y a une très bonne corrélation entre ces deux paramètres.

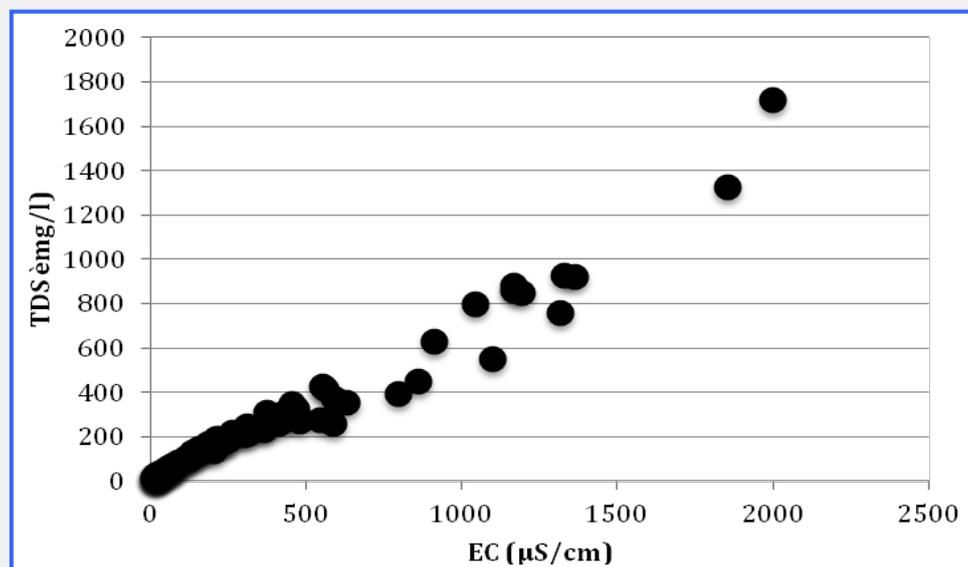


Figure 67 : Relation entre conductivité électrique et MDT pour tous les échantillons.

## - - Température

Les températures moyennes de l'eau varient peu entre les formations géographiques et se situent dans la fourchette des valeurs de températures atmosphériques annuelles (30-31 °C). Certaines valeurs maximum (CTQ et GKS) devraient être considérées avec méfiance pour l'utilisation dans le calcul de l'équilibre thermodynamique car elles pourraient s'expliquer par le rééquilibrage de la température des eaux souterraines avec la température atmosphérique au moment de la mesure (Fig. 68).

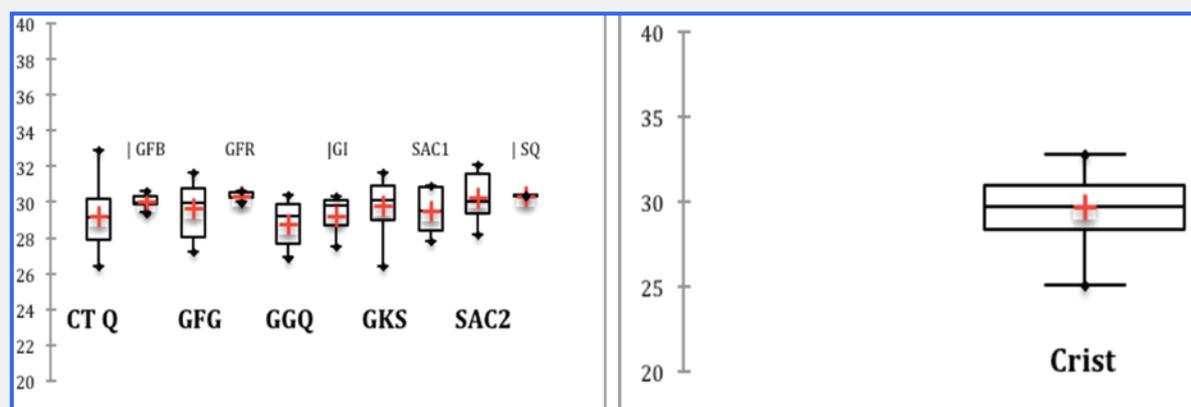


Figure 68 : Variabilité et distribution de la température dans les différentes formations géologiques.

D'après Huneau *et al.* (2011), les eaux souterraines des GGQ ont en moyenne les températures les plus faibles, environ 28-30 °C, ce qui traduit probablement leur origine profonde. Les températures de celles des SAC2 sont plus élevées, une situation liée à l'origine plus superficielle de l'eau dans le bassin central.

## - - pH

La fourchette des valeurs semble normale (5 à 7,5) pour toutes les formations, mais il faudra peut-être revoir les chiffres pour certains points où le pH est acide (< 4,5)(Fig. 69). Les valeurs de pH correspondent aux faciès de grès et de limon. D'après Huneau (2011), les valeurs de pH de la plupart des échantillons provenant des niveaux carbonatés sont proches du pH neutre, comme pour le CT et les GFR. Le pH de l'eau des niveaux les plus siliceux a clairement tendance à être plus acide. Même si les résultats des deux études sont essentiellement similaires, on peut noter que chez Huneau *et al.* (2011), le pH est systématiquement plus élevé (0,5 à 1). Dans la formation cristalline, il est très stable, légèrement acide, en conformité avec la teneur en silice de l'eau.

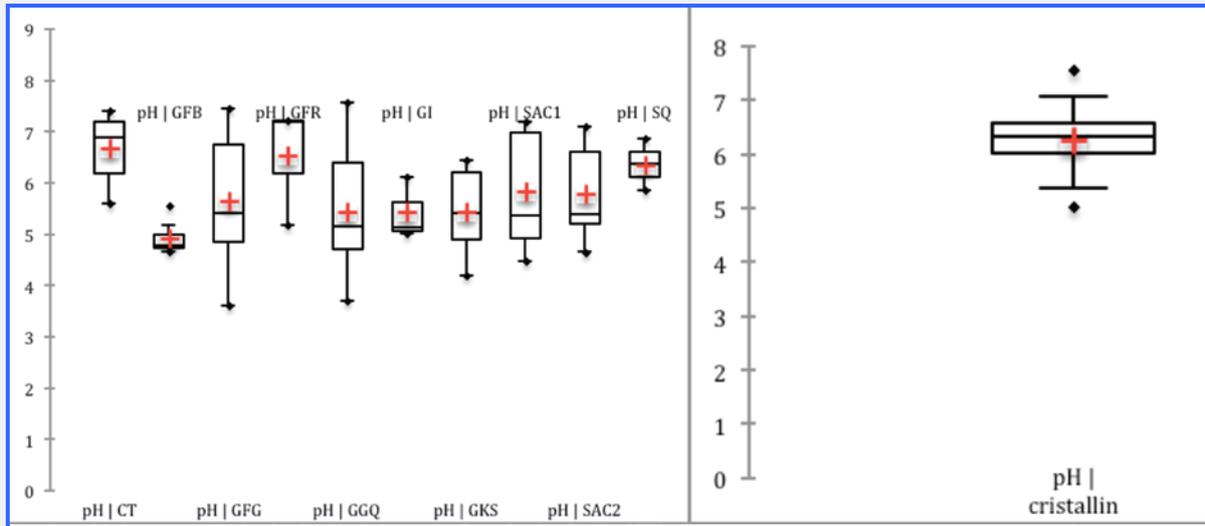


Figure 69 : Variabilité et distribution des valeurs de pH dans les différentes formations géologiques.

### - - Cations

La teneur en calcium (Fig. 70) dans les formations cristallines est en moyenne de 23 mg/l ; elle est plus élevée que celle de la lithologie limoneuse de l'infra-cambrien, alors que le calcium devrait être moins abondant dans les formations cristallines que dans la lithologie limoneuse. Si on observe les concentrations en calcium et en sulfates, on s'aperçoit qu'elles sont toutes deux élevées et étroitement corrélées ( $r^2 = 0,85$ ), ce qui laisse à penser qu'elles ont une origine commune, en fait un processus de contamination (Fig. 71). La formation du CT a une concentration moyenne de 21 mg/l, soit une des plus élevées, avec une grande variabilité (1-56 mg/l), et l'hydrolyse des limons et des limons dolomitiques est dominante dans les niveaux du CT. Il en est de même pour la lithologie de l'infra-cambrien composée de limons et de limons dolomitiques, les SAC1, les GFR avec une moyenne de 22 mg/l et, dans une moindre mesure, les GKS et les GFG. Les GFB, les GGQ et les GI ont des valeurs plus faibles, en moyenne inférieures à 5 mg/l, en conformité avec leur lithologie plus siliceuse. Ces résultats sont en harmonie avec ceux des formations de l'ICT et du CTQ au Mali.

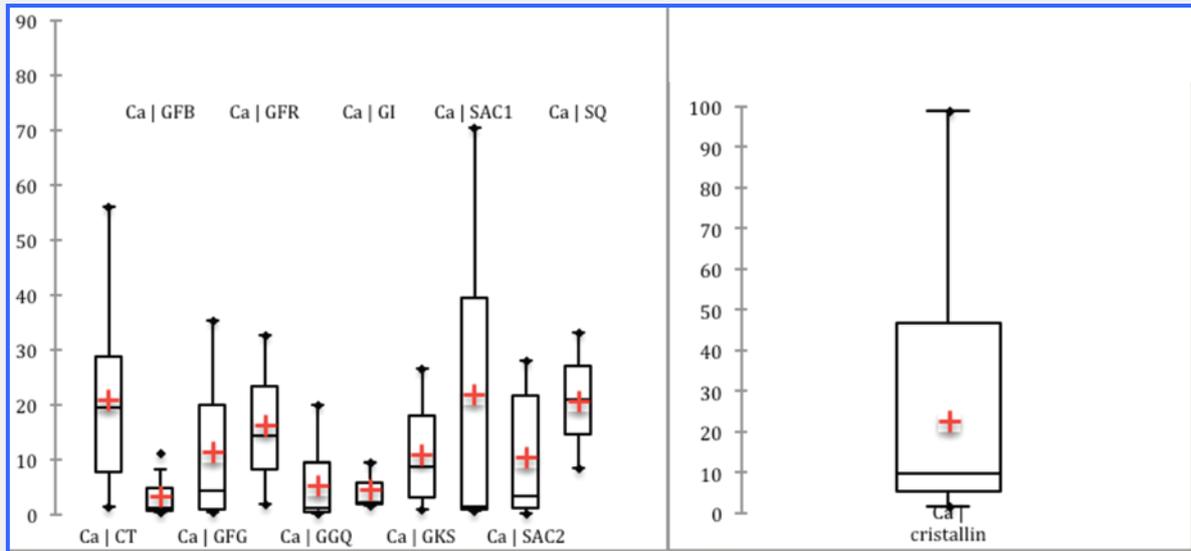


Figure 70 : Variabilité et distribution des teneurs en Ca dans les différentes formations géologiques.

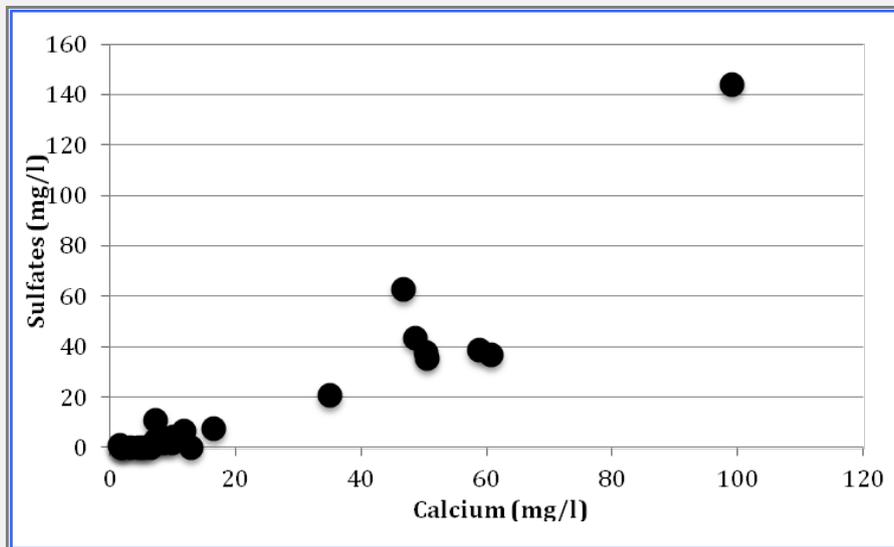


Figure 71 : Relation entre les teneurs en calcium et en sulfate des formations cristallines.

Le comportement du magnésium (Fig. 72) dans les échantillons des formations cristallines est similaire à celui du calcium, avec une moyenne de 44 mg/l, mais les valeurs sont plus élevées pour certains points ( $> 100$  mg/l), pour un niveau de base de 15 à 20 mg/l, et concordent avec celles des nitrates ( $r^2 = 82$ ), une situation due aussi à une influence anthropique (Fig. 73). En ce qui concerne les formations du CT et de l' infracambrien, le magnésium suit le calcium en fonction de la lithologie, avec des valeurs moyennes de 35 mg/l (SAC1, GFR, et GKS). Là encore, les valeurs ayant trait aux GFB, aux GGQ et aux GI sont plus faibles. Dans la zone malienne, la teneur en magnésium est en moyenne de 10 mg/l dans la formation de l'ICT, et est inférieure à celle de l'ensemble de l' infracambrien du Burkina Faso ; la lithologie pourrait être plus siliceuse ou sans profil dolomitique. Les valeurs sont similaires pour la formation du CTQ.

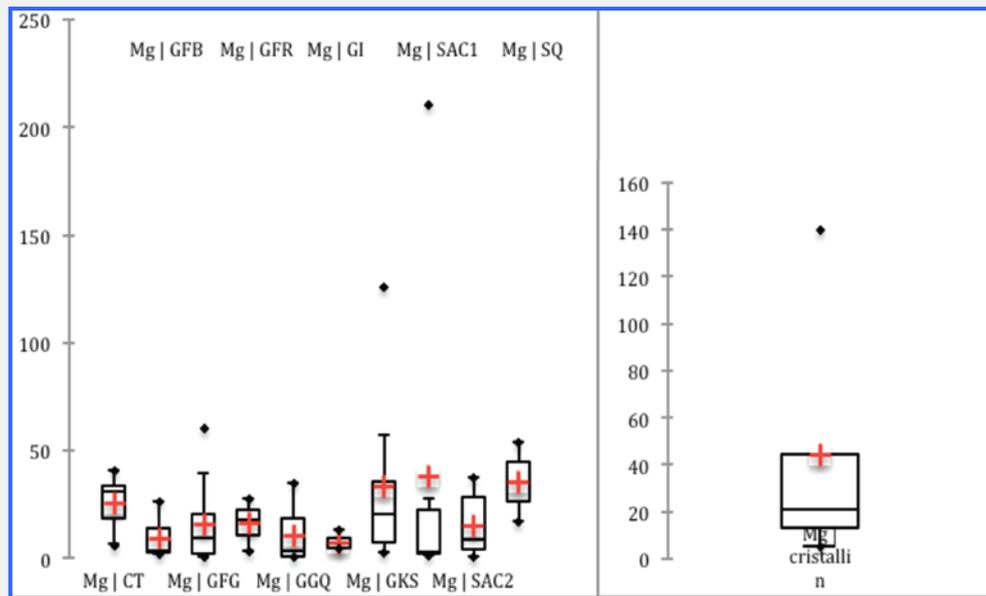


Figure 72 : Variabilité et distribution des teneurs en Mg dans les différentes formations géologiques.

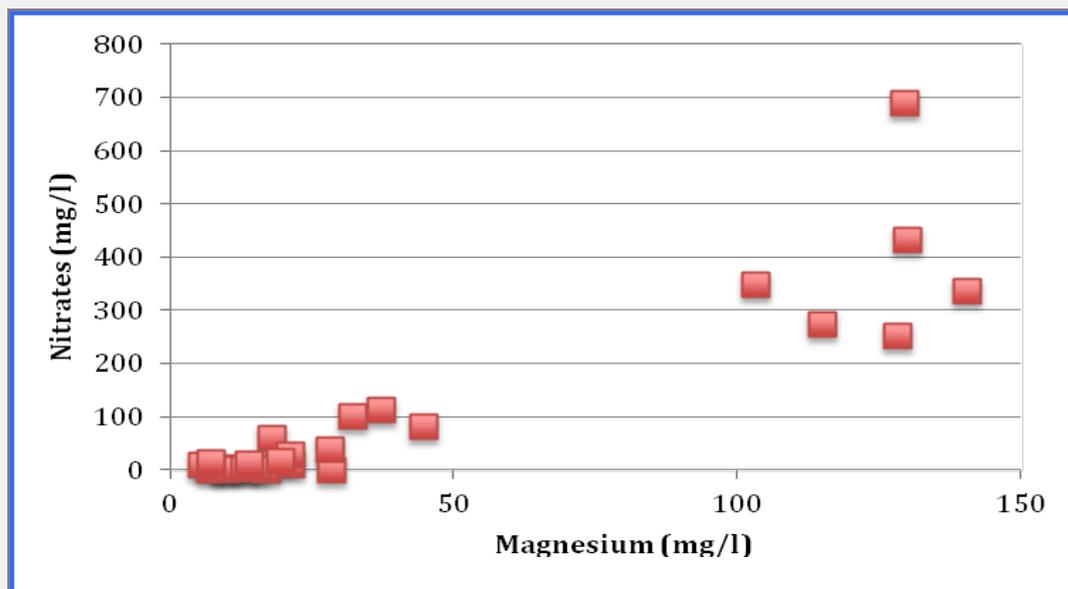


Figure 73 : Relation entre les teneurs en magnésium et en sulfate dans la formation du CT.

Les teneurs en sodium (Fig. 74) des formations cristallines sont les plus élevées. Le niveau est faible dans la formation du CT (moyenne de 7 mg/l) et dans celle de l'infrcambrien (2-10 mg/l), et plus élevé dans les GFR et les GKS, avec une forte variabilité. Les échantillons des GKS dont la teneur est plus élevée ont des teneurs en chlorure également plus élevées en raison d'influences anthropiques (Valenza *et al.*, 2000 ; Celle-Jeanton *et al.*, 2009). La fourchette est la même pour les teneurs en sodium pour l'ICT et le CTQ en zone malienne.

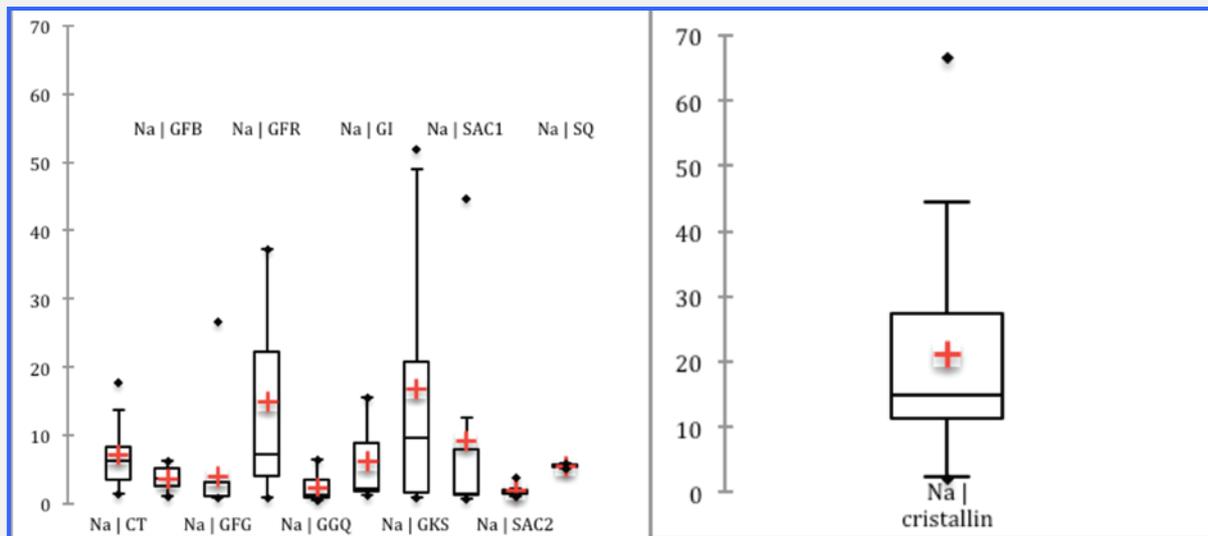


Figure 74 : Variabilité et distribution des teneurs en Na dans les différentes formations géologiques.

- Le niveau des teneurs en potassium (Fig. 75) est généralement faible (valeurs médianes inférieures à 6,5 mg/l) dans l'ensemble des formations, et certains échantillons (du cristallin, des GKS, des GFG, des SAC1, des GFB) ont des concentrations comprises entre 25 et 190 mg/l et des teneurs en nitrates et en chlorure élevées, ce qui constitue la signature d'une influence anthropique. La fourchette est la même en ce qui concerne les teneurs en potassium dans la zone malienne pour l'ICT et le CTQ.

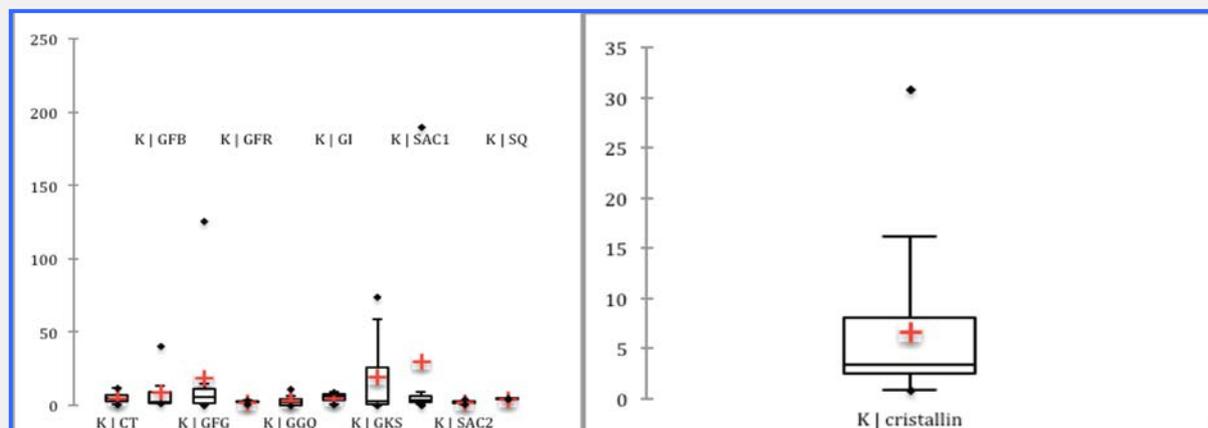


Figure 75 : Variabilité et distribution des teneurs en K dans les différentes formations géologiques.

## -- Anions

Le bicarbonate (Fig. 76) est l'anion prédominant dans les eaux souterraines, avec une teneur de 50 mg/l pour 56 % des échantillons et une forte variabilité globale (6 à 293 mg/l). Comme pour le calcium et le magnésium, les valeurs les plus faibles sont celles des formations cristalline, des GI et des GFB. Les valeurs sont similaires dans la formation du CT en zone malienne et plus faibles dans celle de l'infra-cambrien (58 mg/l au lieu de 78 mg/l).

Les teneurs en chlorure (Fig. 77) sont faibles (< 5 mg/l) en tant que niveau naturel, comme indiqué. Au-dessus de cette limite, il y a entre les chlorures, les nitrates, le sodium et le potassium une forte corrélation essentiellement liée à une influence anthropique. Les formations cristallines sont les plus touchées et 25 % de leurs échantillons contiennent du chlorure d'origine anthropique (maximum 111 mg/l).

- Comme nous l'avons montré, l'excès de sulfates dans les formations cristallines est d'origine anthropique et la formation du CT est aussi touchée (Fig. 78). Par contre, dans la formation de l'IC, seuls les GKS, les GFG, les SAC1 et les GFB sont concernés par le problème des fortes teneurs en sulfates, et les autres apports anthropiques (nitrates, potassium, chlorures) pourraient être liés au fait que le niveau de l'eau est proche de la surface du sol. Ce type de pollution est en général strictement limité aux abords des puits ou des forages et lié à la très mauvaise protection autour des points de pompage (absence de toute zone de protection). Il n'est pas rare de voir sur ces sites des points d'abreuvement des bovins et des latrines aux abords des forages. Les concentrations en nitrates ou en sulfates sont élevées dans les échantillons de quelques forages (Figures 79 et 80). Elles sont souvent liées à la mauvaise qualité du revêtement des puits villageois et aux contaminations par infiltration et mélange des eaux de surface qui sont contaminées par le fumier et les eaux usées, étant donné que la plupart des forages d'échantillonnage sont dans des villages et servent essentiellement à fournir de l'eau potable.

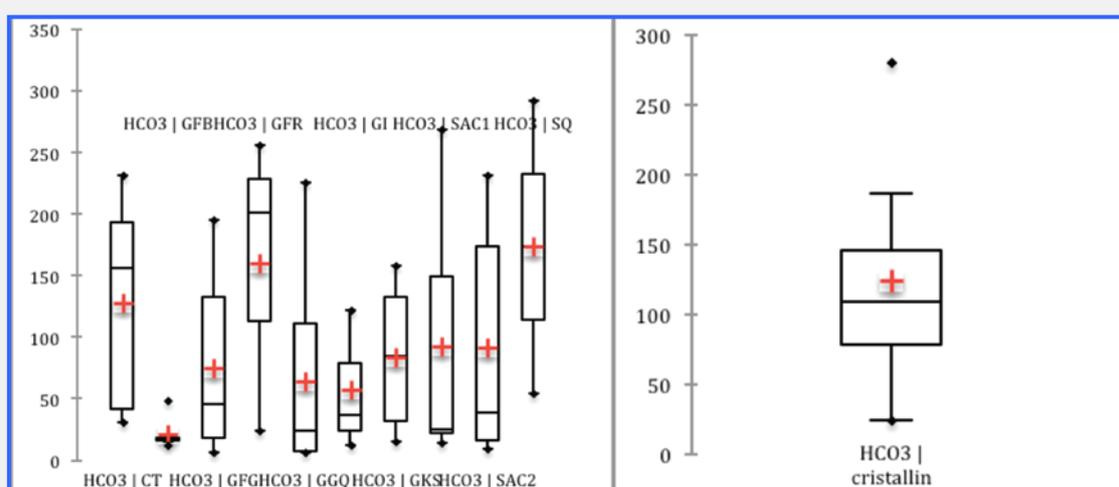


Figure 76 : Variabilité et distribution des concentrations en  $\text{HCO}_3$  dans les différentes formations géologiques.

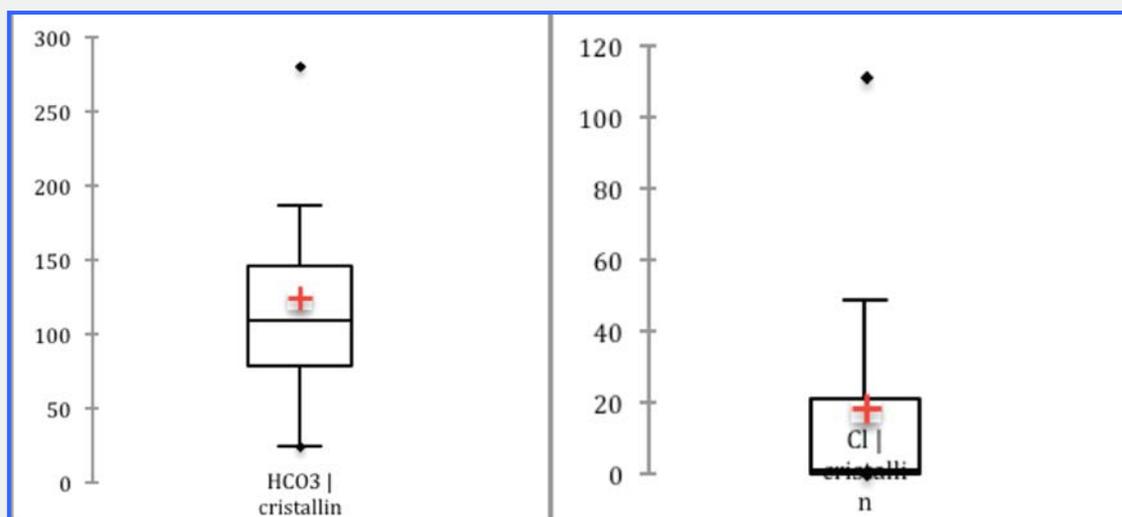


Figure 77 : Variabilité et distribution des teneurs en Cl dans les différentes formations géologiques.

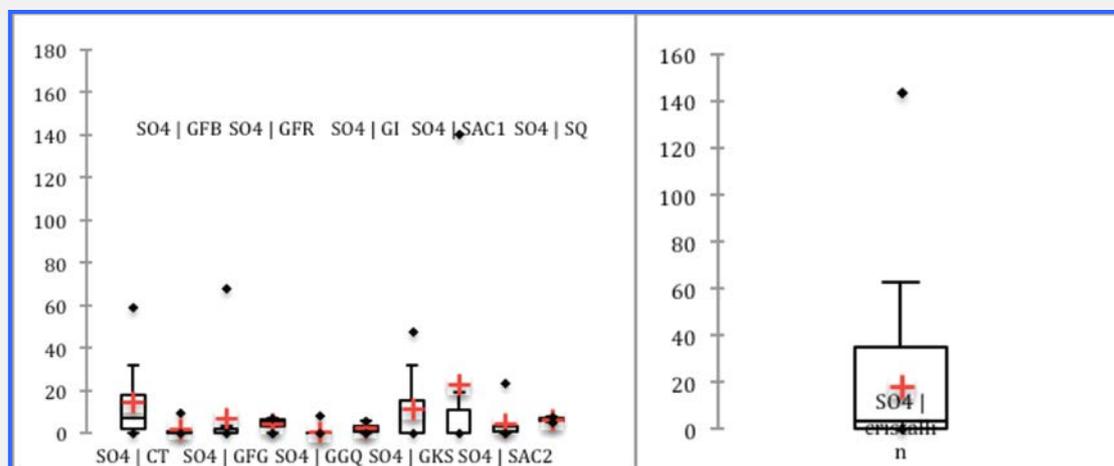


Figure 78 : Variabilité et distribution des concentrations en  $SO_4$  dans les différentes formations géologiques.

Les teneurs en nitrates dans la zone d'étude (Fig. 79) sont très variables ; 43 % d'entre elles sont inférieures à 10 mg/l et 28 % sont supérieures à 25 mg/l, avec un maximum de 860 mg/l dans les SAC1 où les nitrates constituent le principal anion. Aucune contamination aux nitrates n'a été décelée dans les formations de GGQ, de GFR et de SAC2. Il ressort des données de Huneau *et al.* (2011) que les teneurs en nitrates sont élevées dans quelques échantillons, mais la valeur maximum enregistrée n'est que de 160 mg/l.

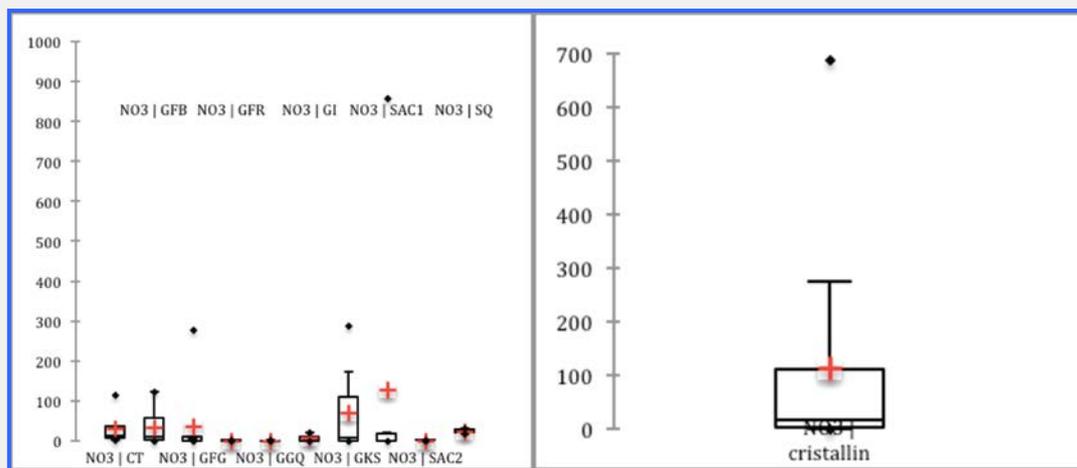


Figure 79 : Variabilité et distribution des teneurs en nitrates dans les différentes formations géologiques.

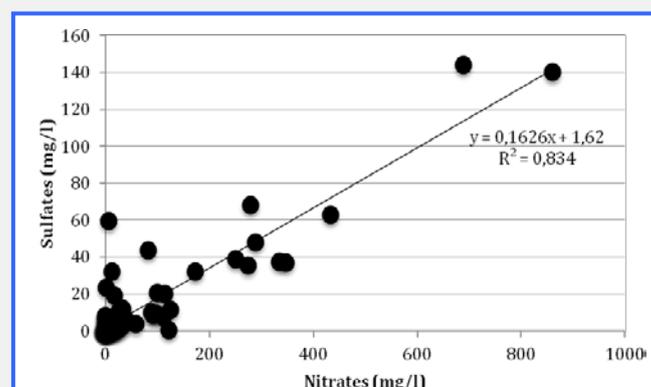


Figure 80 : Relation entre les teneurs en  $\text{NO}_3$  et en  $\text{SO}_4$  de l'ensemble des échantillons.

Les teneurs en silice varient de 2 à 51 mg/l ; les valeurs les plus élevées sont celles des eaux souterraines du CT mais, en moyenne, celles des eaux souterraines de la formation cristalline sont plus élevées, ce qui est conforme à leur composition chimique (Fig. 81). Il y a une faible variabilité entre les divers profils lithographiques dans la formation de l'infra-cambrien. La fourchette est la même en ce qui concerne les teneurs en silice pour l'ICT et le CTQ en zone malienne.

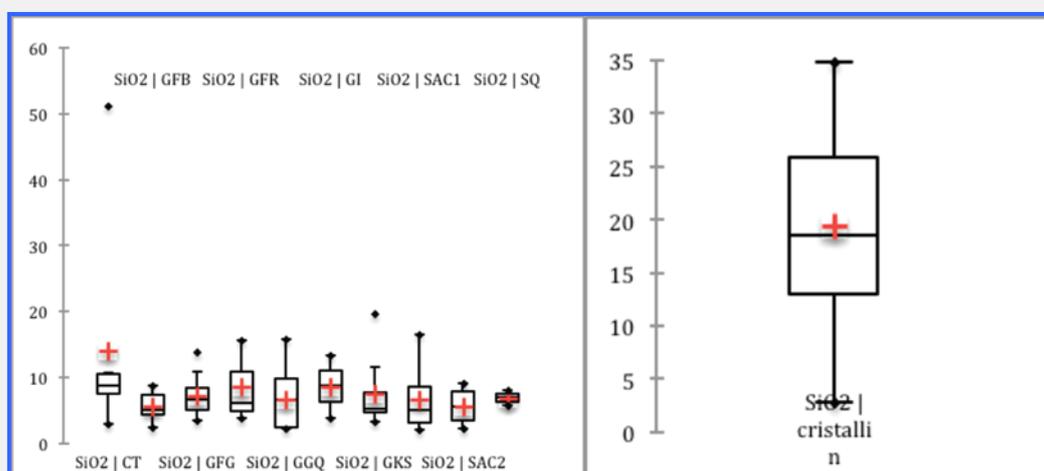


Figure 81 : Variabilité et distribution des concentrations en  $\text{SiO}_2$  dans les différentes formations géologiques.

## - - Isotopes de l'eau

La fourchette des valeurs pour tous les aquifères est de -5,2 à -2,2 ‰ pour l'oxygène 18 et de -37,7 ‰ à -18,8 ‰ pour le deutérium (Fig. 82). Dans la même zone, Huneau *et al.* (2011) ont fait état de valeurs comprises entre -3,1 et -7,2 ‰ pour l'oxygène 18 et entre -20,3 et -48,8 ‰ pour le deutérium.

Toutefois, la comparaison des valeurs moyennes pour chaque groupe fait ressortir une faible variabilité - 1 ‰ pour  $^{18}\text{O}$  et 6 ‰ pour  $^2\text{H}$ , chiffres en harmonie avec la valeur isotopique pondérée des précipitations annuelles. La variabilité observée pour la formation cristalline est faible (-3,4 à -5 ‰ pour l'oxygène 18 et -20,1 à -31,2 ‰ pour le deutérium) et est proche du signal isotopique actuel des précipitations, estimé à environ -4,4 ‰ ( $\delta^{18}\text{O}$ ) et -26 ‰ ( $\delta^2\text{H}$ ). Compte tenu de la composition isotopique des eaux souterraines, on peut affirmer que l'évaporation des eaux de pluie avant l'infiltration dans les aquifères est très limitée. La formation du CT a la variabilité la plus élevée, mais reste dans la fourchette des valeurs normales pour les aquifères superficiels (-2,2/-5,3 ‰ pour l'oxygène 18 et -18,8/-36,5 ‰ pour le deutérium). Les valeurs ayant trait aux formations de l'infracambrien (-4,5/-5,1 ‰ pour l'oxygène 18 et -27,3/-32,6 ‰ pour le deutérium) sont très homogènes. Par rapport aux teneurs en isotopes de la partie malienne de l'ICT de la bordure sud-est du bassin de Taoudéni, les valeurs pour le Mali sont plus faibles, avec pour 73 % des échantillons des chiffres inférieurs à -5 ‰ (annexe II), 4,5/-6,1 ‰ pour l'oxygène 18 et -26,1/-40,8 ‰ pour le deutérium. S'agissant des échantillons de la formation du CTQ (partie plus proche du Burkina Faso), il y a une amplitude plus grande en ce qui concerne les plus appauvris (maximum -6 ‰ pour  $\delta^{18}\text{O}$  et -38 ‰ pour  $\delta^2\text{H}$ ) et les plus enrichis (minimum -0,8 ‰ pour  $\delta^{18}\text{O}$  et -14,1 ‰ pour  $\delta^2\text{H}$ ). L'enrichissement est dû à la faible profondeur des puits.

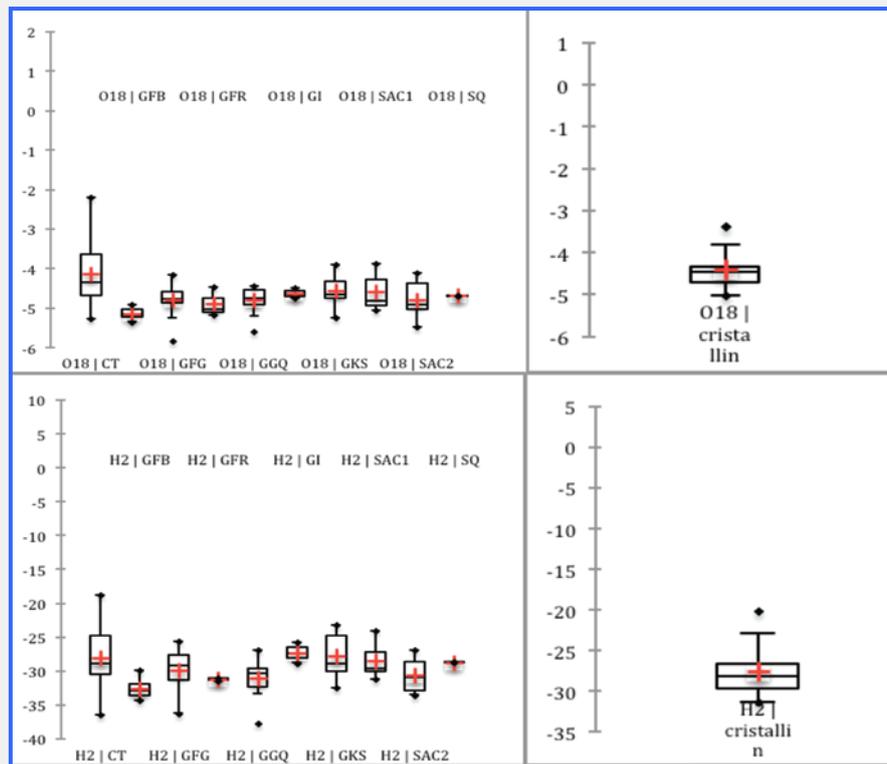


Figure 82 : Distribution des teneurs en  $^{18}\text{O}$  et en  $^2\text{H}$  dans les différentes formations géologiques.

Dans leur vaste étude, Huneau *et al.* (2011) ont utilisé des données (110 points) provenant de projets antérieurs de l'AIEA exécutés dans la même zone entre 1996 et 2003 (Fig. 83). La distribution des teneurs en isotopes des eaux souterraines des formations de l'infra-cambrien est à peu près similaire à celle trouvée par Huneau, excepté dans les GKS où les valeurs sont plus élevées (2 ‰ pour  $\delta^{18}\text{O}$ ). Les chiffres sont un peu plus faibles dans les échantillons de la formation du CT (1 ‰ pour  $\delta^{18}\text{O}$ ).

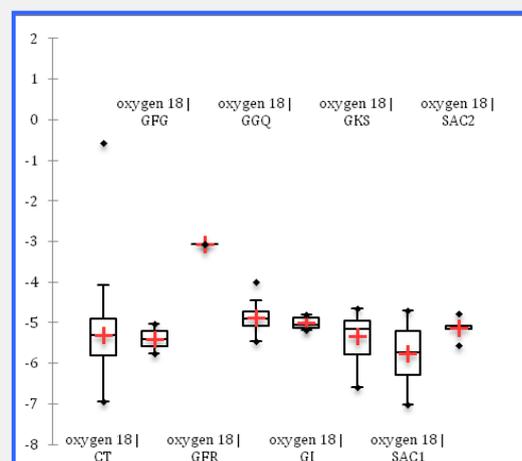


Figure 83 : Distribution des valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  dans les différentes formations géologiques (Huneau *et al.*, 2011).

## - - Excès de deutérium (d)

Il n'y a pas de signe d'évaporation pour 70 % des échantillons d'eau des formations cristallines ( $d > 8 ‰$ ) et, en ce qui concerne les autres points, on observe un léger processus d'évaporation excepté un seul ( $d = 0,1 ‰$ ) pour lequel le résultat semble suspect (Fig. 84). Une signature d'évaporation est observée dans tous les échantillons d'eau de la formation du CT ( $3,6 < d < 7,2 ‰$ ), excepté un ( $d = -1,3 ‰$ ) où le puits a 67 m de profondeur, et cette donnée est aussi suspecte. Dans les formations de l'IC, l'excès de deutérium est du même ordre ; il n'y a pas de signe de processus d'évaporation pour 54 % des échantillons alors qu'on observe une très légère évaporation ( $6 < d < 8 ‰$ ) pour les autres points, les valeurs étant plus faibles - entre 4,3 et 6 ‰ - pour seulement neuf points (sur un total de 59 échantillons). Par comparaison avec la zone malienne, les eaux de l'ICP et du CTQ au Burkina Faso sont moins marquées par le processus d'évaporation, probablement parce que les puits sont plus profonds.

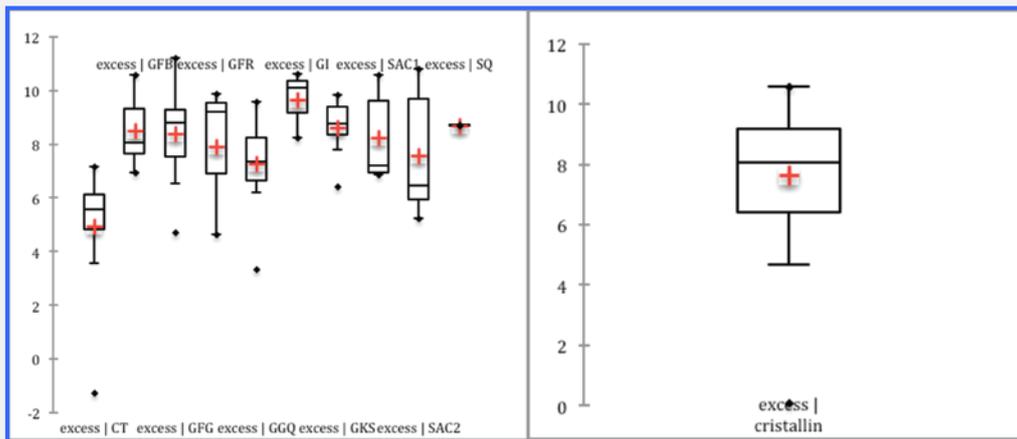


Figure 84 : Distribution des valeurs d'excès de deutérium dans les différentes formations géologiques.

## - - Tritium

Il y a des données sur le tritium (première campagne), et des échantillons ont été collectés dans 18 formations cristallines, 28 de l'infra-cambrien et sept du CT. Tous les échantillons, sauf un (B248-GGK) dont la valeur se situe dans les mesures d'erreur, contiennent du tritium. Les teneurs en tritium varient de 0,6 à 4,9 UT dans les formations cristallines, de 1,2 à 4,9 UT dans celles du CT et de 0,5 à 8,7 UT dans celles de l'infra-cambrien, et varient entre elles. Les valeurs ayant trait aux GFR et aux SAC1 sont plus faibles et homogènes (Fig. 85). Celles relatives aux échantillons des autres profils lithologiques de l'IC sont plus variables, et les chiffres supérieurs à 3 UT sont en harmonie avec une importante réalimentation actuelle comme cela est montré dans la discussion relative aux données du Mali. La variation de celles-ci est la même que pour le CTQ, plus élevée pour l'ICT (0,3 à 9,1 UT) et ce, en

moyenne d'une UT. Par rapport aux données de l'ancien projet de l'AIEA utilisées par Huneau *et al.* (2011), la variation des valeurs ayant trait au CT est plus élevée, et celles qui sont supérieures à 6 UT (14 échantillons, maximum 13,3 UT) sont liées à la réalimentation pendant la période du pic de tritium, l'échantillonnage datant de plus de 10 ans. Pour comparer avec nos données, il faudrait corriger ces données de la décroissance radioactive (Fig. 86). Au contraire, les valeurs de tritium de l'infra-cambrien montrent que les teneurs sont plus faibles que les nôtres d'une UT, ce qui est en contradiction avec l'hypothèse d'une importante recharge actuelle. Les valeurs de tritium de la seconde campagne sont comprises entre 0 (huit échantillons) et 3,8 UT dans les échantillons d'eaux souterraines, et 4,5 UT (eaux de surface), une variation plus faible que dans la première campagne. Il n'y a pas de tritium dans un échantillon (C22) d'eau de surface (source ?).

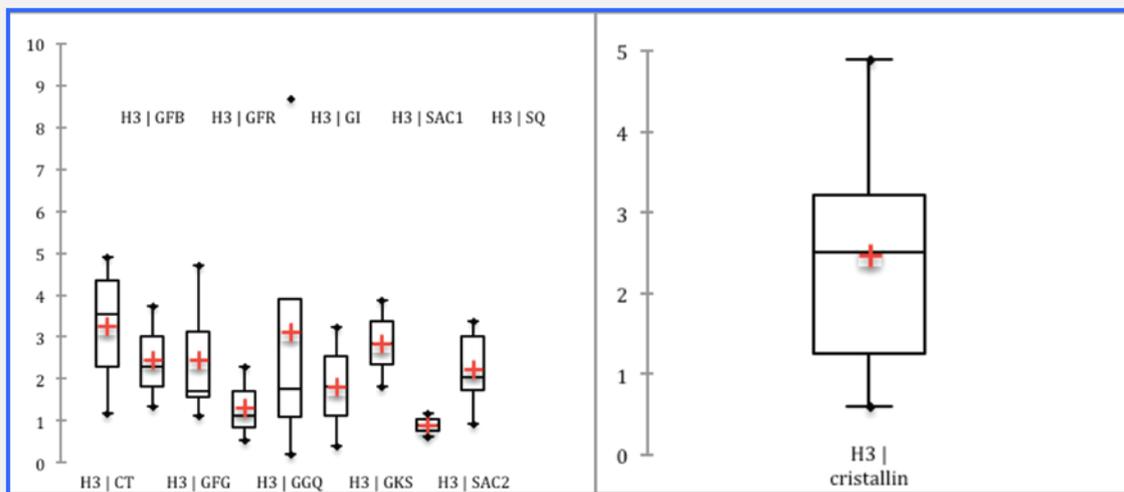


Figure 85 : Distribution des teneurs en tritium dans les différentes formations géologiques.

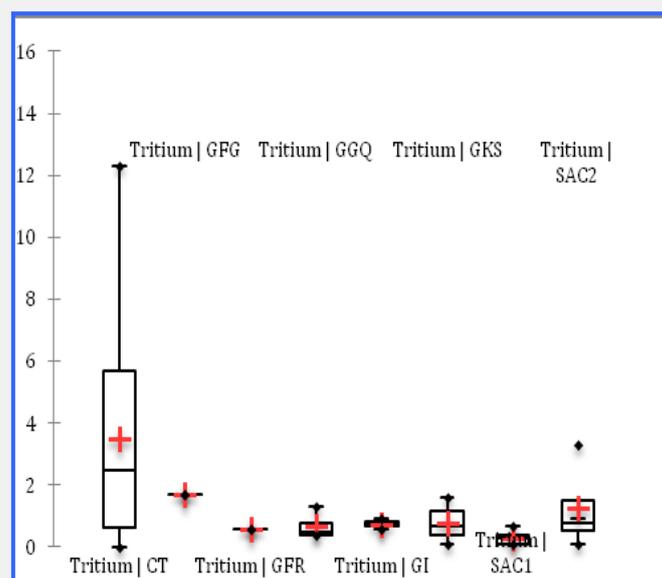


Figure 86 : Distribution des teneurs en tritium dans les différentes formations géologiques. (Huneau *et al.*, 2011).

## - - Faciès hydrochimique

Les paramètres chimiques de l'eau exprimés en meq/l sont utilisés pour en définir le faciès chimique. Il ressort essentiellement du tableau 7 que  $\text{HCO}_3^-$  est l'anion dominant et  $\text{Mg}^{2+}$  le cation dominant pour les formations cristallines, et pour toutes les formations de l'Infracambrien et du continental terminal.  $\text{Ca}^{2+}$  est dominant dans quelques échantillons avec  $\text{HCO}_3^-$  ( $\text{Mg}^{2+}$ ) dans les eaux souterraines de l'IC et du CT. Lorsque  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  sont dominants, cela est lié à de fortes contaminations anthropiques avec des teneurs en nitrates élevées.

Tableau 7 : Teneurs en cations et en anions exprimées en meq/l

	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$
<b>CRIST</b>		25			21			4
<b>GI</b>		3			2			1
<b>GKS</b>		8			5			3
<b>GGQ</b>		10	1		11			
<b>GFR</b>	1	2			3			
<b>SAC2</b>		6			6			
<b>GFG</b>	2	10			9			3
<b>SAC1</b>	1	5		1	6			1
<b>GFB</b>		6	1		4			3
<b>SQ</b>		2			2			
<b>CT</b>	1	9			9			1

Les nitrates sont les anions dominants dans certains échantillons et sont essentiellement les deuxièmes plus abondants. Ces concentrations de nitrates, les plus élevées, semblent suspectes, et il convient de vérifier le protocole d'échantillonnage (bonnes conditions de prélèvement, respect strict de l'intégrité de la chaîne du froid entre le terrain et le laboratoire, conservation des échantillons au congélateur ou stockage à froid et analyse chimique dans des délais raisonnables). Les principaux risques associés à ces conditions climatiques (climat chaud et sec ou chaud et humide) sont l'apparition d'algues ou de bactéries et l'augmentation des teneurs en nitrates de l'eau.

Le diagramme de Piper de tous les échantillons (Fig. 87) permet de montrer les caractéristiques des principaux faciès chimiques. Contrairement aux données du Mali, celles du Burkina Faso se regroupent essentiellement en type chimique  $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+}$ , avec quelques points de type  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ . Il convient de noter une légère évolution vers des eaux de type plus alcalin. La forme en diamant témoigne de la grande dispersion des échantillons d'eaux souterraines ; elle n'est pas due à la dissolution d'un minéral particulier mais au flux de nitrates, et ne devrait pas être prise en considération pour déterminer les processus géologiques de la dissolution. Les eaux des formations cristallines ont un faciès  $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  montrant la diversité des roches cristallines plus ou moins alcalines de la zone d'étude. Le faciès de la formation du CT se caractérise probablement par deux composantes, l'une,  $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ , l'autre,  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ , liées à des faciès plus ou moins dolomitiques ou calciques. Les eaux de l'infra-cambrien (GKS, GFG, GGQ, SAC2, SAC1 et GFB) font apparaître une évolution du magnésium au magnésium-sodium/potassium. Le principal processus n'est pas l'échange de cations mais une évolution anthropique. Pour les GKS (deux échantillons : B221, B222), les valeurs de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{NO}_3^-$  augmentent, pour les GFG (B249), celles de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  augmentent aussi, tandis que pour les SAC1 (B285), la situation reste inchangée, et que les valeurs de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{NO}_3^-$  augmentent pour les GFB (B259, B261).

Les échantillons de la seconde campagne ont un faciès  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  plus hétérogène, que l'on peut qualifier de plus alcalin. On peut noter que les nitrates peuvent atteindre des niveaux élevés (311 mg/l) mais inférieurs à ceux de la première campagne (problèmes d'échantillonnage au cours de cette campagne ?) et que seuls quatre échantillons d'eaux souterraines atteignent ces niveaux. La CE des eaux de surface est comprise entre 28 et 565  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (moyenne de 140  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) et sans apport anthropique évident (pas ou peu de nitrates, sulfates ou chlorures), excepté pour A8 où les nitrates sont l'anion dominant (16,5 mg/l).

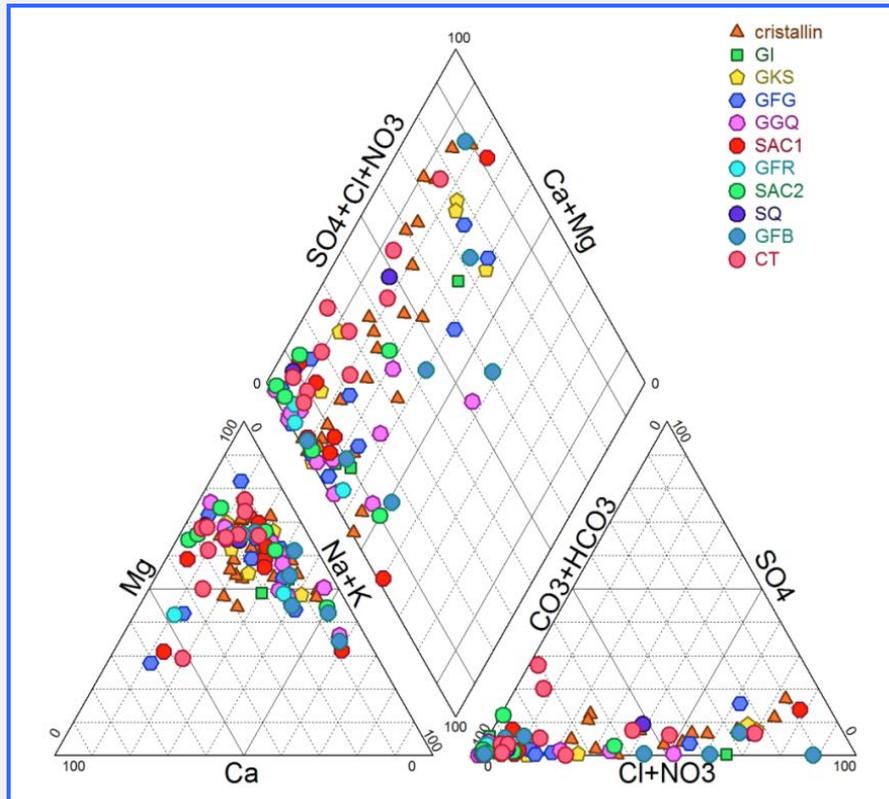


Figure 87 : Diagramme de Piper pour tous les échantillons d'eaux souterraines.

### - - Équilibre entre eaux souterraines et minéraux

L'indice de saturation de l'eau a été calculé pour certains minéraux classiques à l'aide du logiciel PHREEQC. On peut noter que les mesures de la teneur en fer totale sont systématiquement de 0,01 mg/l dans la base de données de l'AIEA. Il convient de valider ces mesures qui semblent suspectes. Ces valeurs indiquent essentiellement que l'eau est sursaturée en hématite et en goethite. Les autres minéraux importants, qui pourraient avoir des interactions dans notre environnement géochimique, sont la calcite, la dolomite et le quartz.

Les eaux souterraines des formations cristallines, de l'ICT et du CIT sont essentiellement sous-saturées en calcium, mais quelques échantillons sont en situation d'équilibre (Fig. 88). Dans la formation de l'infra-cambrien, le faciès plus siliceux dénote principalement des valeurs d'indice de saturation plus faibles avec une moyenne de -4,3 (GI, GKS, GGQ, GFB). On peut noter que l'échantillon en situation d'équilibre appartient à la formation de GGQ, ce qui montre que la lithologie n'est pas homogène. S'agissant de la dolomite (Fig. 89), un plus grand nombre d'échantillons sont en situation d'équilibre et la distribution est similaire à celle du calcium.

En ce qui concerne le quartz, la plupart des échantillons se situent dans la zone de stabilité, et les principales roches de la zone d'étude sont composées de grès contenant des minéraux de

quartz ou du ciment de silice. Certains échantillons d'eau des roches cristallines et des formations du CT sont sursaturés en dolomite. Dans les formations de l' infracambrien, les échantillons des GI, des GGQ et des GFG, qui sont plus riches en silice, ont des indices de saturation plus élevés (Fig. 90).

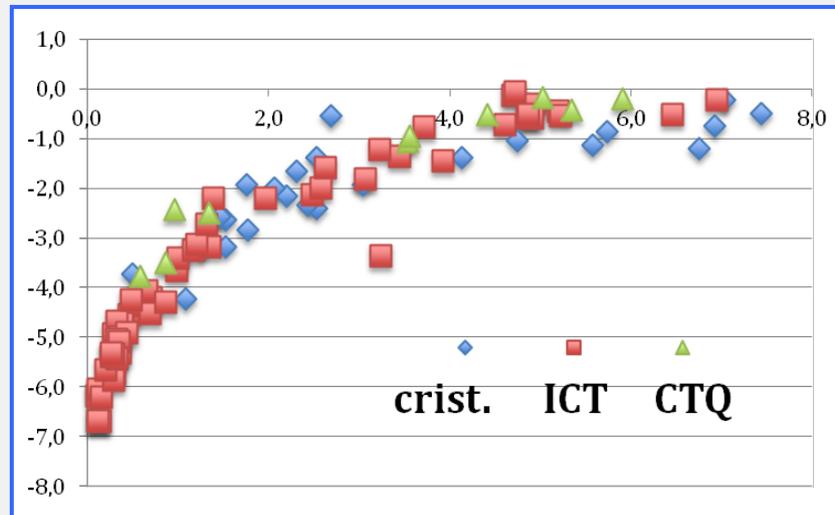


Figure 88 : Indice de saturation des échantillons d'eaux souterraines par rapport à la calcite.

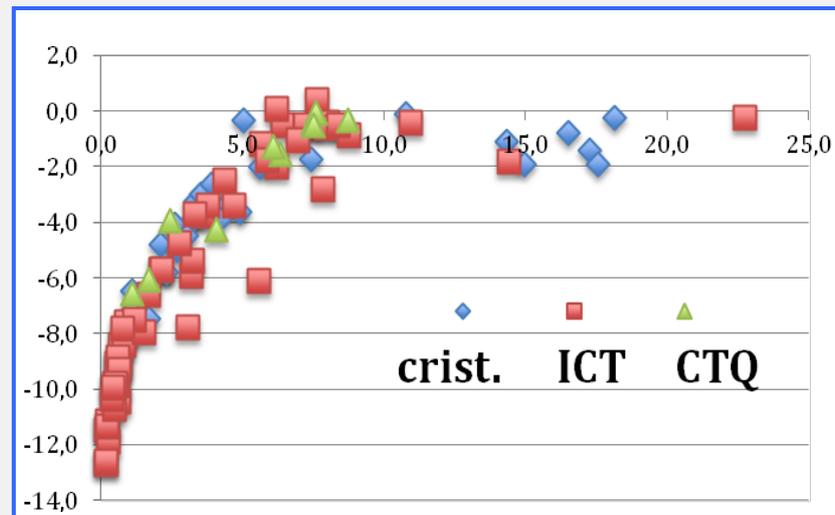


Figure 89 : Indice de saturation des échantillons d'eaux souterraines par rapport à la dolomite.

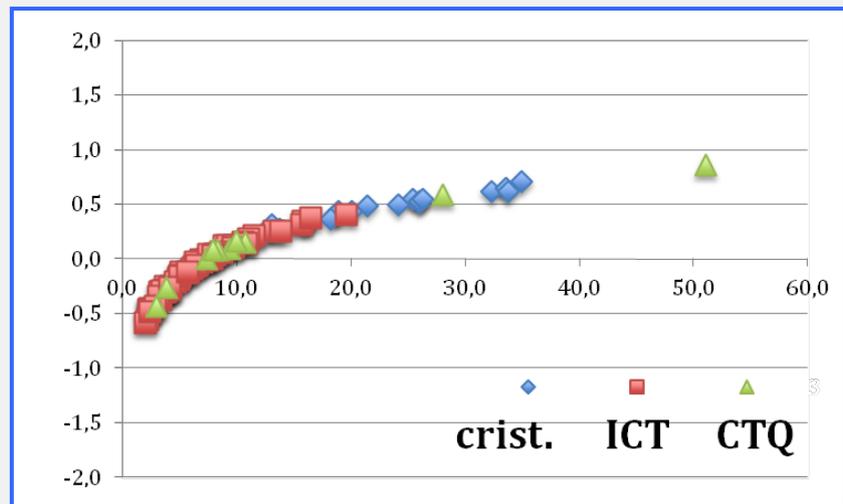


Figure 90 : Indice de saturation des échantillons d'eaux souterraines par rapport au quartz.

La figure 91 montre l'état d'équilibre des eaux en ce qui concerne les minéraux silicatés. Elles sont essentiellement en équilibre avec la kaolinite vers une évolution dans le domaine de l'argile de smectite ou le feldspath. Cette évolution est surtout évidente pour les eaux des formations cristallines et du CT. Les diagrammes de stabilité des eaux souterraines des formations de l'infracambrien sont présentés à la figure 91. On ne peut observer différentes grappes de points basées sur la lithologie des formations géologiques.

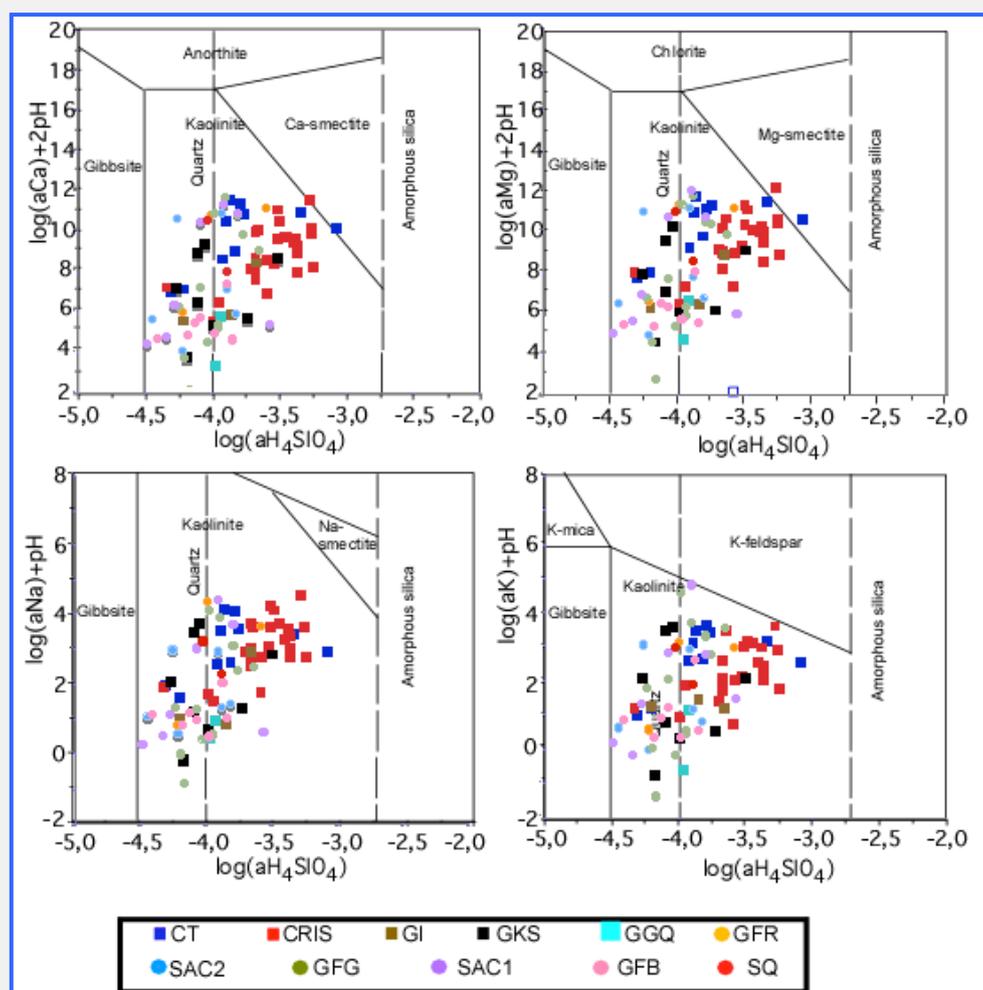


Figure 91 : Diagramme de Korjinsky, diagramme du champ de stabilité des minéraux silicatés.

### - - Analyse de corrélation multiple

Les résultats sont présentés dans le tableau 8 et les figures 92 et 93 (49 observations ont fait l'objet d'analyses complètes).

Tableau 8 : Variance totale par axe

	F1	F2	F3	F4	F5
<b>Valeur</b>	7 049	2 755	1 601	1 355	1 187
<b>Variabilité (%)</b>	44 056	14 758	11 078	6 702	5 776
<b>Taux cumulé</b>	44 056	58 804	69 882	76 583	82 359

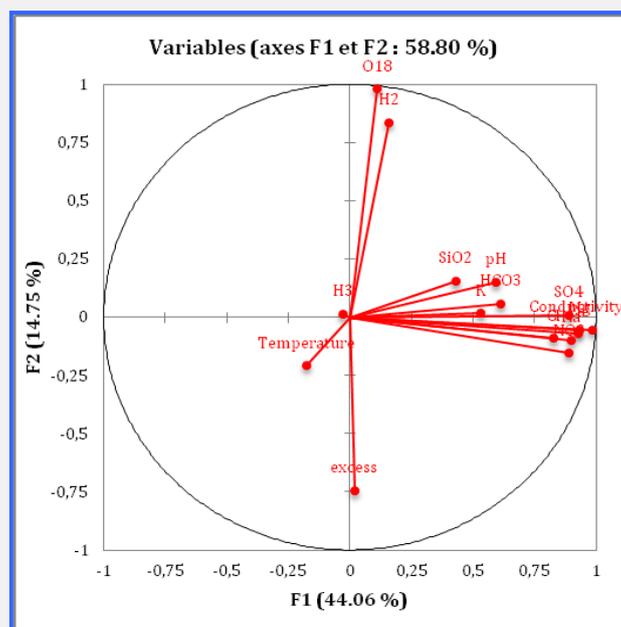


Figure 92 : Analyse en composantes principales des eaux souterraines (paramètres).

F1 représente la minéralisation, mais en relation avec la contamination des eaux souterraines par les nitrates et les sulfates, et F2 les isotopes stables de l'eau et en corrélation inverse avec l'excès de deutérium. F3 n'ajoute aucune information nouvelle.

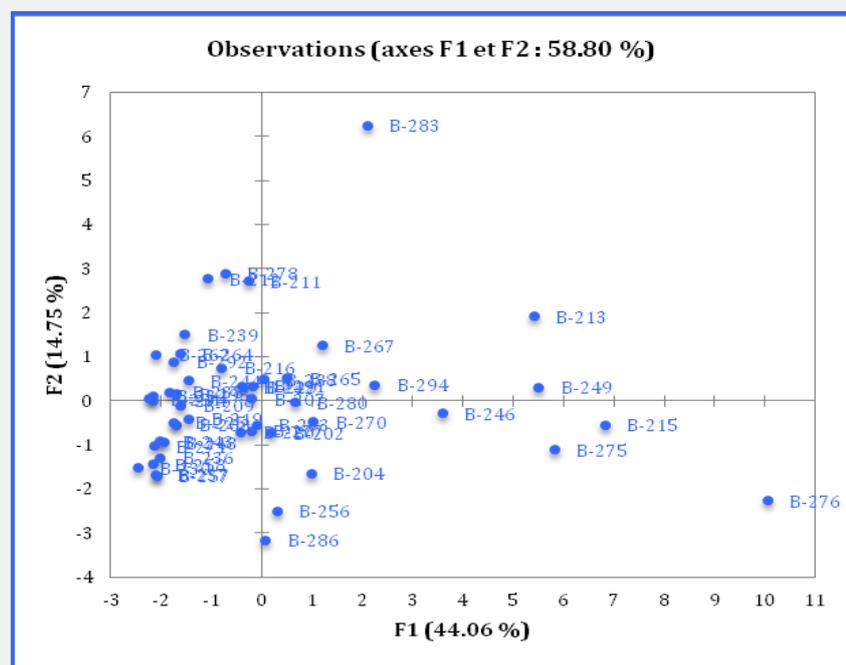


Figure 93 : Analyse en composantes principales des eaux souterraines (échantillons).

On peut identifier deux groupes d'échantillons distincts pour chaque axe en fonction des paramètres de F1 et F2. F1 a trait aux échantillons les plus minéralisés et F2 aux échantillons les plus enrichis en isotopes et donc à un excès de deutérium plus faible. L'analyse en composantes principales ne permet pas de faire la distinction par rapport aux formations géologiques, lesquelles sont essentiellement similaires en termes de géochimie.

## - Distribution spatiale des paramètres des eaux souterraines (travaux préliminaires)

Les cartes sont présentées en fonction de la formation géologique - formations cristallines, de l'infra-cambrien et du CT - et des cartes détaillées ont été établies pour toute la lithologie de l'infra-cambrien. On n'observe aucun modèle spatial précis dans les aquifères des formations cristallines, et il semble évident qu'en raison de la variété de la minéralogie, de la structure, des failles dans la zone, les aquifères sont discontinus et la variabilité des paramètres chimiques dépend des conditions locales, notamment avec le processus de contamination. Celle-ci semble toutefois avoir un impact plus important dans la partie nord, avec les chlorures, les sulfates et les nitrates, que dans la partie sud, où on n'observe aucune contamination pour 65 % des points. Les valeurs isotopiques ayant trait aux échantillons de la partie nord sont relativement plus faibles, l'excès de deutérium est légèrement plus élevé, la profondeur des puits est similaire dans les parties nord et sud, et le léger processus d'évaporation observé dans la partie sud est peut-être dû aux conditions d'infiltration moins favorables. On note que les concentrations en tritium suivent le même schéma, et sont en moyenne plus élevées (3,5 UT) dans la partie nord que dans la partie sud (1,8 UT). On observe pour les isotopes stables et le tritium une tendance similaire vers des conditions hydrodynamiques favorables à une recharge plus efficace dans la partie nord. Il s'agit évidemment d'une interprétation préliminaire, mais cette hypothèse pourrait être confirmée par l'analyse du carbone 14.

Les 10 échantillons du CT ne permettent de déterminer aucun schéma précis de la chimie et des données isotopiques, et le nombre de points est insuffisant pour dégager des tendances. La comparaison avec les données du CT au Mali fait ressortir des différences surprenantes entre les deux côtés de la frontière. La CE est plus élevée en zone malienne où 60 % des valeurs sont supérieures à 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (500-2 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ; dans la zone du Burkina Faso, 30 % des valeurs sont comprises entre 500 et 900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , le pH est neutre au Burkina Faso et essentiellement basique au Mali (> 8-11), les concentrations en nitrates sont plus élevées au Burkina Faso, les teneurs en oxygène 18 sont plus faibles au Mali et celles en tritium plus élevées au Burkina Faso (moyenne 3,3 UT) ; au Mali, 25 % des échantillons ne contiennent pas de tritium. Aucune interprétation ne semble possible à l'heure actuelle pour expliquer ces grandes différences.

Les eaux de l'infra-cambrien dénotent une structuration spatiale sud-ouest/nord-est, en harmonie avec la direction d'écoulement établie par Dakouré (2003) avec la carte

potentiométrique. La CE est plus élevée et le pH est plus basique dans la partie nord. Alors qu'il n'y a aucune tendance claire en ce qui concerne la distribution spatiale des isotopes stables, les valeurs d'excès de deutérium diminuent de la partie sud-ouest à la partie nord-est et il n'y a pas de corrélation avec la profondeur des puits. Aucun schéma précis ne se dégage en ce qui concerne le tritium. Les cartes spatiales ayant trait aux chlorures, aux sulfates et aux nitrates indiquent une même structuration due à un processus de contamination unique. La comparaison avec les données de l'ICT au Mali montre que la CE est plus élevée au Burkina Faso (300 à 2 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  contre 0 à 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  au Mali), et que le pH, les teneurs en isotopes stables et l'excès de deutérium sont similaires. Les valeurs de tritium sont en moyenne plus élevées au Mali.

## - - Résultats des analyses isotopiques et discussion

### • Teneurs en isotopes des eaux souterraines

Pour compléter et achever la discussion relative aux teneurs en isotopes des eaux souterraines, nous avons comparé celles des précipitations modernes (voir la discussion sur le Mali) et celles des différentes formations géologiques (Fig. 94).

Les teneurs en isotopes interannuelles des précipitations estimées sont de  $-4,4 \text{ ‰}$  ( $\delta^{18}\text{O}$ ) et  $-25,8 \text{ ‰}$  ( $\delta^2\text{H}$ ) ; elles ont augmenté pour 73 % des échantillons (minimum  $-5,84 \text{ ‰}/-36,2 \text{ ‰}$ ) au cours de la première campagne et pour 63 % des échantillons (minimum  $-6,48 \text{ ‰}/-38 \text{ ‰}$ ) au cours de la seconde. En ce qui concerne les échantillons du Mali, ils sont moins appauvris mais les chiffres sont plus faibles que les valeurs de référence des précipitations. Il ressort des données utilisées par Huneau *et al.* (2011) pour la même zone que les teneurs sont plus faibles et que 92 % d'entre elles sont inférieures à  $-4,4 \text{ ‰}$ , avec un minimum de  $-7,2 \text{ ‰}$ . C'est le problème connu de la différence entre les teneurs en isotopes des précipitations actuelles et celles des eaux souterraines peu profondes, une différence qui ne semble pas logique. En ce qui concerne l'excès de deutérium, on peut tirer la même conclusion qu'avec les données du Mali, avec un excès trop bas. Dans la seconde campagne, certains échantillons les plus enrichis (valeurs supérieures à  $-2 \text{ ‰}$  ( $^{18}\text{O}$ )) sont des échantillons d'eaux de surface, avec des valeurs isotopiques maximales ( $2,91 \text{ ‰}/6,5 \text{ ‰}$ ).

Pour d'autres aquifères multicouches du CT situés à la même latitude au Niger, les valeurs ayant trait aux eaux des aquifères superficiels (CT3) sont alignées sur la droite météorique locale (DML, proche de la DMM) avec une dispersion d'environ  $1,5 \text{ ‰}$  autour de la valeur interannuelle des teneurs en isotopes des précipitations ( $-4,5 \text{ ‰}$  pour  $\delta^{18}\text{O}$  et  $-28 \text{ ‰}$  pour  $\delta^2\text{H}$ ), et pour les eaux souterraines, des valeurs allant de  $-5,8 \text{ ‰}$  à  $-2,9 \text{ ‰}$  pour  $^{18}\text{O}$  et

de -39 ‰ à -21 ‰ pour  $^2\text{H}$ , avec des moyennes respectivement de -4,7 ‰ et de -30 ‰ (Favreau *et al.*, 2000). En 1993, les valeurs ayant trait à ces aquifères vont de 0,8 à 20 UT (Leduc *et al.*, 1997) et pour les activités de  $^{14}\text{C}$  du CID vont de 60,4 à 97,1 pMC avec une moyenne de 83,4 (Favreau *et al.*, 2002). En ce qui concerne l'aquifère captif (CT2 et CT1), les valeurs moyennes sont de  $-7,5 \text{ ‰} \pm 0,2 \text{ ‰}$  pour l'oxygène18 et de  $-58 \text{ ‰} \pm 1 \text{ ‰}$  pour le deutérium, avec de faibles valeurs pour le carbone 14 ( $< 5 \text{ pMC}$ ) (réalimentation au cours du DGM) et un excès de deutérium de 2,6 ‰ (Le gal La Salle *et al.*, 1994). Le contexte isotopique des eaux souterraines pourrait alors s'expliquer par le mélange des eaux de l'aquifère superficiel et de l'aquifère plus profond. Il ressort des données utilisées par Huneau *et al.* (2011) que les valeurs pour le carbone 14 vont de 1 à 122 pMC (valeur moyenne de 83,4 pMC) et, dans un graphique sur la relation ente la teneur en oxygène 18 et l'activité du carbone 14, on observe une tendance inverse, avec des valeurs actuelles plus faibles (Fig. 95).

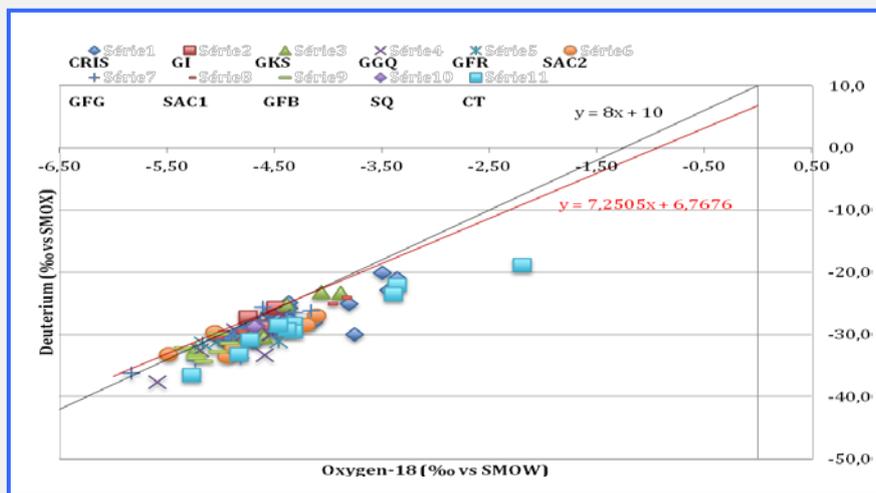


Figure 94 : Relation entre l'oxygène 18 et le deutérium dans des échantillons d'eaux souterraines (campagne 1).

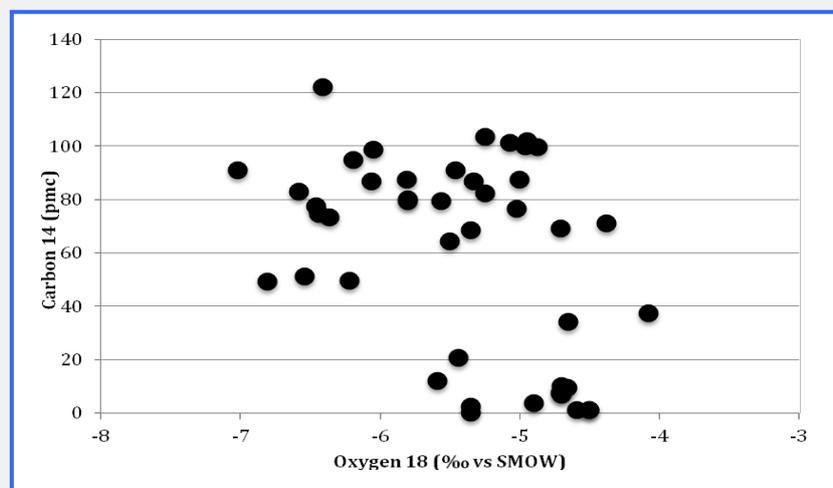


Figure 95 : Relation entre la teneur en oxygène 18 et l'activité du carbone 14 dans des échantillons d'eaux souterraines (Huneau *et al.*, 2011).

### • Teneurs en isotopes des eaux de surface

Les teneurs en isotopes sont comprises entre -5,34 et 2,91 ‰ pour l'oxygène 18 et entre -31,4 et 6,6 ‰ pour le deutérium. Dans le graphique de la relation entre la teneur en oxygène 18 et l'activité du carbone 14, les différents points sont alignés, ce qui est le signe d'un processus d'évaporation (marqué en particulier avec les points > -4 ‰ pour l'oxygène 18 (Fig. 96)).

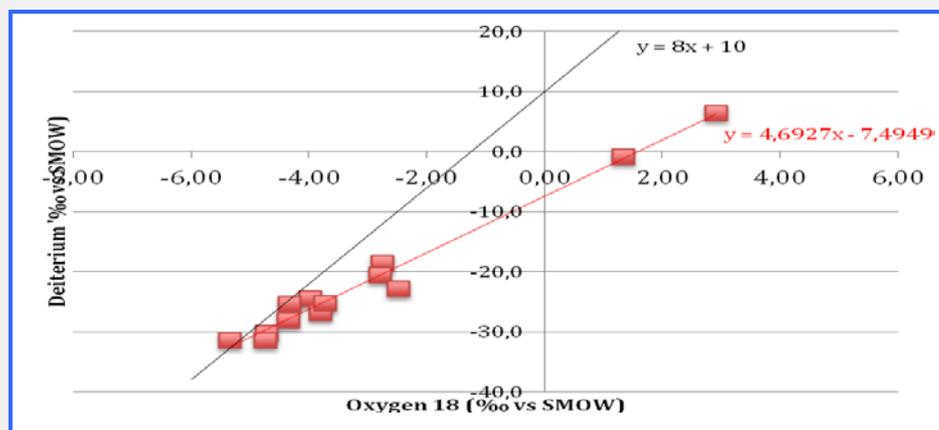


Figure 96 : Relation entre les teneurs en  $\delta^{18}\text{O}$  et en  $\delta^2\text{H}$  dans les échantillons d'eaux de surface (campagne 2).

## 5. CONCLUSIONS

Le présent rapport constitue une première synthèse des activités du projet RAF/7/011 soutenu par l'AIEA visant à améliorer la connaissance de cette ressource en eaux souterraines partagées. Celle-ci constitue le principal réservoir d'eau disponible dans les parties occidentale et septentrionale de ce bassin où les conditions climatiques sont arides et les précipitations et l'écoulement des eaux de surface sont faibles et extrêmement temporaires. Trois pays (Mauritanie, Mali et Burkina Faso) participent à ce projet avec des objectifs et des rôles différents compte tenu d'autres travaux en cours dans cette zone dans le cadre du projet RAF/7/011.

Les résultats ayant trait à la Mauritanie sont préliminaires et incomplets. Il n'y a pas de données chimiques, à part les mesures sur le terrain, mais certains résultats ont été enregistrés au cours de la première campagne sur l'analyse des isotopes stables et du tritium. La méthodologie utilisée dans les deux campagnes a été un échantillonnage en fonction de la direction d'écoulement théorique dans deux zones adjacentes. Malheureusement, il n'y a aucune interprétation géologique qui permettrait de comparer les résultats des deux campagnes dont les données de pH sont très différentes. Cela est probablement dû au fait

qu'on a à faire à différentes couches géologiques, peut-être avec deux systèmes aquifères. En outre, il n'y a malheureusement pas d'informations détaillées sur la surface potentiométrique de l'aquifère. Néanmoins, il s'agit d'un nouveau projet, avec de nouvelles connaissances sur les conditions de minéralisation et de réalimentation. Les analyses isotopiques ont conduit à des résultats intéressants sur la possibilité d'une recharge locale actuelle, éventuellement faible mais qui, en termes de gestion des ressources en eaux, constitue un fait important.

Au Mali, l'échantillonnage a été réalisé à très grande échelle, dans quatre formations géologiques (continental terminal, continental intercalaire, cambrien, et infracambrien). Le principal résultat du projet est qu'il a permis d'effectuer une première étude dans la partie ouest du Mali et une étude plus détaillée de la partie est où le contexte est mieux connu dans la mesure où de nombreuses études de haut niveau y ont été réalisées. Des données géologiques, chimiques, isotopiques et hydrodynamiques sont disponibles, et un premier modèle local a été proposé. Des résultats intéressants ont été obtenus en ce qui concerne la chimie des eaux souterraines. Ainsi, il est établi que les eaux de l'ICT, de l'ICP et du CTQ ont un faciès  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ . En ce qui concerne les eaux des formations du CAM et du CIT, on note de grandes variations des données chimiques, avec des faciès comme  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  et  $\text{SO}_4\text{-Na}$ . Un processus d'échange de cations a été mis en évidence dans la plupart des aquifères. L'autre résultat est la contamination généralisée aux nitrates, et seuls quelques points présentent un faible niveau naturel.

Il ressort des résultats des analyses isotopiques que les teneurs en tritium sont élevées, ce qui est le signe d'une recharge récente. Les teneurs en isotopes stables des eaux sont plus faibles, avec des valeurs d'excès de deutérium également plus faibles que celles des précipitations actuelles.

La zone d'étude est plus petite au Burkina Faso (bordure est du bassin de Taoudéni). Les principaux résultats font ressortir un faciès chimique homogène  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$  avec une légère évolution vers un faciès alcalin  $\text{HCO}_3\text{-}$ , ce qui n'est pas lié à un processus d'échange de cations mais à un niveau élevé de contamination par les nitrates, et aussi par le potassium, des chlorures, des sulfates et le sodium.

Les résultats des analyses isotopiques font ressortir une signature d'isotopes stables similaire à celle du Mali, avec des valeurs plus faibles, et un excès de deutérium également plus faible que dans les précipitations actuelles. Les études précédentes démontrent que la recharge est

importante ou très faible en fonction de la lithologie de l' infracambrien, avec des activités du carbone 14 allant de 1 à 122 pMC.

## Recommandations

L'un des objectifs finals de ce projet est d'optimiser la gestion des eaux souterraines pour éviter non seulement une baisse de niveau dans l'utilisation de cette ressource dans un contexte de changement climatique, mais aussi tous les problèmes connexes, comme la contamination et la salinisation.

Les recommandations suivantes sont suggérées :

- La mise en œuvre de politiques publiques aux niveaux national et régional pour améliorer la gestion des ressources en eaux souterraines (quantité et qualité de l'eau prélevée) grâce au reboisement, aux nouvelles techniques agricoles, à la diminution de l'irrigation des cultures, à l'utilisation optimale des eaux de surface et des eaux souterraines, à la protection des zones voisines des puits et des forages, à des installations de traitement des eaux usées, etc.
  
- L'amélioration des capacités des établissements publics d'enquêtes hydrogéologiques (SIG, outils numériques, appareils d'analyse, etc.), l'acquisition de matériel de terrain (DGPS, mesures continues du niveau de l'eau, etc.) en vue d'améliorer la connaissance géologique des formations étudiées, d'homogénéiser la classification lithologique (une géologie commune et son utilisation) et de définir l'étendue et la profondeur de l'aquifère partagé.
  
- Le recours à des piézomètres et le suivi de réseaux de travail à long terme. Cela permettra de mieux comprendre l'hydrodynamique locale et régionale, de déterminer les possibles interactions entre aquifères ainsi que la direction d'écoulement et les paramètres hydrodynamiques. Toutes ces données sont nécessaires pour élaborer un modèle hydrogéologique commun et proposer un modèle numérique pour chaque réservoir.
  
- La datation des eaux souterraines ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ) pour permettre de mieux évaluer le temps de séjour.

- La comparaison des récents résultats et des études précédentes en vue de renforcer l'interprétation hydrodynamique, et de mettre en évidence toute évolution géochimique des eaux souterraines (augmentation de la contribution anthropique par exemple) et de déceler toute anomalie d'échantillonnage ou d'analyse. Il faudrait intégrer les résultats des anciennes études chimiques et isotopiques dans une base de données commune.
- L'amélioration des synergies entre les contreparties, en particulier dans les zones où l'aquifère partagé est surexploité (cas de la partie est du bassin de Taoudéni, entre le Mali et le Burkina Faso).

## 6. RÉFÉRENCES

**Note : Certaines références ci-dessus ne sont pas dans le texte et portent sur les paramètres environnementaux généraux à l'échelle du pays**

Alpha A., Traoré A.Z., Mariko A., Banton O., Villeneuve J.P., Ait-Ssi L., 1991. Hydrogéologie et contamination de la nappe phréatique alimentant la ville de Bamako. Rapport des travaux réalisés dans le cadre d'une subvention du Centre de recherches pour le développement international du Canada (CRDI), Ottawa, Canada.

Antea Group et JMB-Consult, 2012. Gestion intégrée et concertée des ressources en eau des systèmes aquifères d'Iullemeden, de Taoudéni/Tanezrouft, et du fleuve Niger. Rapport de synthèse hydrogéologique. Rapport OSS-GICRSAIT n° 12.

Antea Group et JMB-Consult, 2012. Gestion intégrée et concertée des ressources en eau des systèmes aquifères d'Iullemeden, de Taoudéni/Tanezrouft, et du fleuve Niger. Rapport de synthèse hydroclimatologique. Rapport OSS-GICRSAIT n° 12.

Antea Group et JMB-Consult, 2013. Gestion intégrée et concertée des ressources en eau des systèmes aquifères d'Iullemeden, de Taoudéni/Tanezrouft, et du fleuve Niger. Rapport de synthèse Télédétection. Rapport OSS-GICRSAIT n°13.

Auvray C., 1960. Monographie du Niger, B : la cuvette lacustre. Paris, Orstom, 12-45.

BEATH, 1995. Gestion des ressources en eau en Mauritanie. Gestion des ressources en eau en Mauritanie (Ministère de l'hydraulique et de l'énergie - OMVS - PNUD, 1995, 56 p.

Bertone F., Ph. Renard J., Kerrou P., Moix2 & P., 2007. Perrochet, An assessment of the groundwater resources in the western margin of the Taoudeni basin, Mauritania Aquifer systems management, Garcy's legacy in a world of impending water shortage. Hydrogeology, 10, 149-160.

Beyerle U., Rueedi J., Leuenberger M., Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Kipfer R., Dodo A., 2003. Evidence for periods of wetter and cooler climate in the Sahel between 6 and 40 kyr BP derived from groundwater. Geophys. Rés. Lett. 30, 1173.

Boulet R., 1976. Notice des cartes de ressources en sols de la Haute-Volta. ORSTOM, Paris. 97 p.

British Geological Survey, 2002. Groundwater Quality: Burkina Faso. NERC 2002.

British Geological Survey, 2002. Groundwater Quality: Mali. NERC 2002.

Bureau hydrologie ORSTOM, 1981. Atlas hydrologique de la Mauritanie, ORSTOM.

Carl Bro – DHI – IWACO, 2001. État des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion. Ministère de l'environnement et de l'eau, Secrétariat général, Direction générale de l'hydraulique.

Celle-Jeanton H., Travi Y., Loye-Pilot M.D., Huneau F., Bertrand G., 2009. Rainwater chemistry at a Mediterranean inland station (Avignon, France): local contribution versus long range supply. Atmos. Rés. 91, 118–126. doi:10.1016/j.atmosres.2008.06.003.

Coulibaly A., 2003. Profil fourrager MALI. Rapport FAO.

- Dakouré D., 2003. Étude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni (Burkina-Faso, Mali), essai de modélisation. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie (UPMC), 222 p.
- Dakouré D., 2010. Multi-disciplinary approach to improve the knowledge of southeastern border of Taoudeni sedimentary basin. International Conference “Transboundary Aquifers: Challenges and New Directions” (ISARM2010).
- Dhaoui Z., Zouari K., Taupin J.-D., Farouni R., 2016. Hydrochemical and isotopic investigations as indicators of recharge processes of the Continental Intercalaire aquifer (Eastern piedmont of Dahar, southern Tunisia). *Env. Earth Sc.*, 75, DOI 10.1007/s12665-016-5990-x.
- FAO, 2014. Stratégie et plan d’action de mise en œuvre de l’Initiative de la Grande muraille verte. Rapport.
- Friedel M.J. et Finn C., 2008. Hydrogeology of the Islamic Republic of Mauritania. Open-File Report 2008–1136, U.S. Geological Survey.
- Favreau G., Leduc C., Marlin C., Dray M., Taupin J.D., Massault M., Le Gal La Salle C. et Babic M., 2002. Estimate of recharge of a Rising Water-Table in Semiarid Niger from  $^3\text{H}$  and  $^{14}\text{C}$  Modeling. *Groundwater*, vol. 40, n°2, 144-151.
- Fews Net, 2012. A Climate Trend Analysis of Burkina Faso. Fact Sheet 2012–3084 USGS.
- Fontes J.-C., Andrews J.N., Edmunds W.M., Guerre A. et Travi Y., 1991. Paleorecharge by the Niger River (Mali) deduced from groundwater geochemistry. *Water Resources Research* 27: doi: 10.1029/90WR01703. issn: (0043-1397).
- Fontès J. et Guinko S. (1995). *Carte de la végétation et de l’occupation du sol du Burkina Faso. Notice explicative*. Toulouse, Institut de la carte internationale de la végétation ; Ouagadougou, Institut du développement rural - Faculté des sciences et techniques, 67 p.
- Garcia M.G., De Hidalgo M., Blesa M.A. (2001), Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province Argentina. *J Hydrol*, 9, 597-610.
- Gasse F., 2000. Hydrological changes in the African tropics since the Last Glacial Maximum. *Quat. Sci. Rev.* 19, 189–211.
- Gombert P., 1998. Synthèse sur la géologie et l’hydrogéologie de la série sédimentaire du sud-est du Burkina Faso. Rapport technique, Programme RESO, ATG, IWACO, Ouagadougou.
- Gourcy L., Aranyosy J.F., Olivry J.C., Zuppi G.M., 2000. Space and time variations in the isotopic composition ( $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ ) of Niger inland delta water (Mali). *C. R. Acad. Sci. Paris, Earth Planet Sci.*, 331, 701–707.
- Groen J., Schuchmann J.B. et Geirnaert W., 1988. The occurrence of high nitrate concentration in groundwater in villages in northwestern Burkina Faso. *Journal of African Earth Sciences*, 7, 999-1009.
- Guiguen N., 1985. Études hydrologiques complémentaires de la cuvette lacustre du Niger, Rapport final. Autorité du bassin du Niger, projet Hydroniger, Orstom, Bamako, 71 p.
- Hoerling M., Hurrell J., Eischeid J., et Phillips A. (2006), Detection and attribution of twentieth-century northern and southern African rainfall change, *J. Clim.*, 19, 3989–4008.
- Hottin G. et Ouédraogo O.F., 1976. Carte de la Haute-Volta. Direction de la géologie et des mines. France, BRGM.

- Kagone I. H., 2001. BURKINA FASO FAO, Country Pasture/Forage Resource Profiles. FAO report.
- Huneau F., Dakouré D., Celle-Jeanton H., Vitvar T., Ito M., Traoré S., Compaoré N.F., Jirakova H., Le Coustumer P., 2011. Flow pattern and residence time of groundwater within the south-eastern Taoudeni sedimentary basin (Burkina Faso, Mali). *Journal of Hydrology*, 409, 423–439.
- IWACO, 1989. Étude du bilan d'eau du Burkina Faso - Tome 2 : Inventaire des ressources en eau, Ministère de l'eau.
- Jerzykiewicz T., 2011. Geology of the southern margin of the Taoudeni basin (Bamako area Progress Report (Mali), June-July 2011 (Geoclastica Consulting Ltd).
- Koussoubé Y., 2010. Hydrogéologie des séries sédimentaires de la dépression piézométrique du Gondo (Bassin du Gourou) - Burkina Faso / Mali. Thèse UPMC.
- Koussoubé Y., Upton K. et Ó Dochartaigh B.É., 2016. Africa Groundwater Atlas: Hydrogeology of Burkina Faso. British Geological Survey.  
[http://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Hydrogeology\\_of\\_Burkina\\_Faso](http://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Hydrogeology_of_Burkina_Faso).
- Lebel T. et Ali A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *J. Hydr.*, 375(1-2) p. 52-64.
- Leduc C., Taupin J.D. et Le Gal La Salle C., 1996. Estimation de la recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal (Niamey, Niger) à partir des teneurs en tritium. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t.323, série IIa, p. 599-605.
- Leduc C., Favreau , Schroeter P., 2001. Long-term rise in a Sahelian water-table: the Continental Terminal in South-West Niger. *J. Hydr.*, 243, 43-54.
- Le Gal La Salle C. & J-C. Fontes, Andrews J.N., Schroeter P. & Atahiro Karbo, Futeld K.L., 1995. Old groundwater circulation in the lullemeden basin (Niger): preliminary results of an isotopic study. Application of Tracers in Arid Zone Hydrology (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1994. IAHS Publ. n°.232, 129-139.
- Lepretre R., 2015. Évolution phanérozoïque du Craton Ouest Africain et de ses bordures Nord et Ouest. Thèse Université. Paris Sud.
- Mahé, 2009. Surface/groundwater interactions in the Bani and Nakambé tributaries of the Niger and Volta basins, West Africa. *Hydrological Sciences Journal*-, 54 (4 Special issue: Groundwater and Climate in Africa), p. 704-712. ISSN 0262-6667.
- Mc Sweeney C., Lizcano M. et G., 2006. Climate Change Country Profiles Mali. PNUD.
- Moussu H., Trompette R., (1966a). Notice explicative de la carte hydrogéologique au 1/200.000, Atar –BRGM pour le compte de la direction des services techniques du Ministère de la construction, des travaux publics et des transports. RIM.
- Moussu H., Trompette R., (1966b). Notice explicative de la carte hydrogéologique au 1/200 000, Chinguetti. BRGM pour le compte de la direction des services techniques du Ministère de la construction, des travaux publics et des transports. RIM.
- Ngugi D.K., 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.
- Nouaceur Z., 2009. Évolution des précipitations depuis plus d'un demi-siècle en Mauritanie. *Geographia Technica*. Numéro spécial, 2009, 361-366.

- Obuobie E. et Barry B., 2012. Burkina Faso, in Groundwater Availability and Use in Sub-Saharan Africa; a review of fifteen countries. Pavelic, P. *et al.* (Eds). International Water Management Institute, Sri Lanka.
- OSS, 2015. Burkina Faso, Atlas des Cartes d'occupation du sol. ISBN : 978-9973-856-83-3.
- OSS, 2014. Mali, Atlas des Cartes d'occupation du sol. ISBN : 978-9973-856-78-4.
- OSS, 2015. Mauritanie, Atlas des Cartes d'occupation du sol. ISBN : 978-9973-856-81-4.
- Quédraogo I., 1994. Géologie et hydrogéologie des formations sédimentaires de la boucle du Mouhoun (Burkina Faso). Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 116 p.
- Quédraogo C., 1998. Cartographie géologique de la région Sud-Ouest du Burkina Faso au 1/200 000 – synthèse géologique. AQUATER/BUMIGEB.
- Ozer P., Houtondji Y.C., Gassani J., Djaby B., De Longueville F., 2014. Évolution récente des extrêmes pluviométriques en Mauritanie (1933-2010). XXVII<sup>e</sup> Colloque de l'Association internationale de climatologie, 2-5 juillet 2014 – Dijon (France).
- Pana, 2007. Programme d'action national d'adaptation aux changements climatiques au Mali. PNUD.
- PNUE, 2009. Actualisation du Projet de démonstration 1 (PD1) : Mécanisme d'alerte précoce d'annonce des crues fondé sur une meilleure connaissance du milieu physique du complexe MOUHOUN-SOUROU (Burkina – Mali). Projet PNUE-FEM Volta. Numéro du projet: 53885.
- Rooney A.D., Selby D., Houzay J.-P., Renne P. R., 2010. Re–Os geochronology of a Mesoproterozoic sedimentary succession, Taoudeni basin, Mauritania: Implications for basin-wide correlations and Re–Os organic-rich sediments systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 289, 486-496.
- Sea F., Tanguay M.G., Trudel P. et Perrault G., 1990. Preliminary results of a study on gold dispersion in the laterite deposits of a gold zone in Misseni, Mali. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 27, 1686-1698.
- Shahin M., 2006. Water Resources and Hydrometeorology of the Arab Region. Springer.
- Smedley P. L., Edmunds W.M., West J.M., Gardner S.J. et Pelig-Ba K.B., 1995. 2 : Health problems related to groundwater in the Obuasi and Bolgatanga areas, Ghana. British Geological Survey Technical Report, WC/95/43, 122 pp.
- SOGREAH, 1988. Projet Mali Sud II - Sous-projet hydraulique villageois - Rapport final, Ministère de l'agriculture - CMDT.
- SOGREAH, 1994. Étude des ressources en eau souterraine de la zone sédimentaire de la région de Bobo-Dioulasso - Modélisation des nappes des grès GKS, GFG, GGQ et SAC – Utilisation des modèles MONA, ESTRA, TRAFI et SIMUTRA., DRH-HB.
- Soule A.O., 2003. Profil fourrager MAURITANIE. Rapport FAO.
- Taupin J.D., Gaultier G., Favreau G., Leduc C., Marlin C., 2002. Isotopic variability of Sahelian rainfall at different time steps in Niamey (Niger, 1992–1999): climatic implications. *C. R. Geosci.*, 334, 43-50.
- Taupin J.D., Coudrain-Ribstein A., Gallaire R., Zuppi G.M. et Filly A., 2000. Rainfall characteristics ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta^2H$ , T and Hr) in Western Africa, regional scale and influence of irrigated areas. *J. Geophys. Res.*, 2000, Vol (105) (D9), p.11911-11924.

- Traoré A.Z., Bokar H., Sidibe A., Upton K. & Ó Dochartaigh B.É., 2016. Africa Groundwater Atlas: Hydrogeology of Mali. British Geological Survey. [http://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Hydrogeology\\_of\\_Mali](http://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Hydrogeology_of_Mali).
- Travi Y., Gac J.Y., Fontes J.Ch., Fritz B., 1987. Reconnaissance chimique et isotopique des eaux de pluie au Sénégal. *Géodynamique* 2 (1), 43-53.
- Trompette R., 1973. Le Précambrien supérieur et le Paléozoïque inférieur de l'Adrar de Mauritanie, bordure occidentale du bassin de Taoudéni, Afrique de l'Ouest : un exemple de sédimentation de craton. Thèse Université de Provence, Marseille, France.
- Upton K. & Ó Dochartaigh B.É., 2016. Africa Groundwater Atlas: Hydrogeology of Mauritania. British Geological Survey.]. [http://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Hydrogeology\\_of\\_Mauritania](http://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Hydrogeology_of_Mauritania).
- Valenza A., Grillot J.C. et Dazy J., 2000. Influence of groundwater on the degradation of irrigated soils in a semi-arid region, the inner delta of the Niger River, Mali. *Hydrogeol. J.* 8, 417–429.
- UN, 1983. Ground Water in West Africa. Natural Resources/Water Series No. 18, United Nations, pp 53-65.
- United States Agency for International Development, 2012. Climate vulnerabilities and development in Burkina Faso and Niger Background paper. Global Climate Change Office, Climate Change Resilient Development Project, technical report, Washington.
- Venema, H.D., Schiller E.J., Adamowski K. et Thizy J.-M. « A Water Resources Planning Response to Climate Change in the Senegal River Basin », *Journal of Environmental Management*, 1997, vol. 49, no 1, p. 125–155.
- Villeneuve M., Paleozoic basins in West Africa and the Mauritanide thrust belt. *Journal of African Earth Sciences*, 43, 166-195
- Whycos, 2006. Niger – Hycos. Système d'information hydrologique au service d'une gestion intégrée des ressources en eau pour le bassin du Niger.

## ABRÉVIATIONS

- ACP** : Analyse en composantes principales
- AIEA** : Agence internationale de l'énergie atomique
- Ba** : Groupe Bakoye
- Bg&Bs** : Sédiments du birrimien protérozoïque inférieur
- BKF** : Burkina Faso
- CAM** : Cambrien
- CE** : Conductivité électrique
- CI** : Continental intercalaire
- Crist** : Cristallin
- CT** : Continental terminal
- CTQ** : Continental terminal quaternaire
- DMG** : Dernier maximum glaciaire
- DML** : Droite météorique locale
- DMM** : Droite météorique mondiale
- FIT** : Front intertropical
- GB** : Grès de Bandiagara
- GFB** : Grès de Fo-Bandiagara
- GFG** : Grès fins avec glauconite
- GFR** : Grès fins
- GGQ** : Grès à granules de quartz
- GI** : Grès inférieurs
- GK** : Grès de Koutiala
- GKS** : Grès de Kawara-Sindou
- GNIP** : Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations
- GSD** : Grès et silts dolomitiques
- GWB** : Eaux souterraines (forages)
- GWD** : Eaux souterraines (puits creusés)
- ICP** : Infracambrien plissé
- ICT** : Infracambrien tabulaire
- IRD** : Institut de recherche pour le développement
- IS** : Indice de saturation
- LRAE** : Laboratoire de radio-analyses et environnement

**MDT** : Matières dissoutes totales

**ND** : Niveau de détection

**SAC1** : Siltites, argilites et carbonates de Guena-Souroukoundinga (grès, schistes, dolomite)

**SAC2** : Siltites, argilites et carbonates de Samandeni-Kiéban

**SAI** : Système aquifère d'Iullemeden

**So** : Souroukoto

**SQ** : Grès de Koutiala

**ST** : Schistes de Toun

**St** : Sotuba

**T** : Température

**UT** : Unité de tritium

**ZCIT** : Zone de convergence intertropicale

# ANNEXES

## ANNEXE I - ANCIENNES DONNÉES

Burkina-Faso / Mali (Huneau *et al.*, 2011)

Échantillon Identifiant	Stratigraphie	X (UMT)	Y (UMT)	Date d'échantillonnage	T (°C)	CE (µS/cm)	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	δ <sup>18</sup> O (‰)	δ <sup>2</sup> H (‰)	<sup>3</sup> H* (UT)	δ <sup>13</sup> C (‰)	a <sup>14</sup> C (pMC)
1	CT	465 668	1 444 439	30/08/00	31,6	99	7,20	-	-4,84	-37,8	1,3	-	-
2	CT	455 022	1 434 779	30/08/00	33,2	160	6,60	165	-4,91	-39,8	1,9	-16,0	91,0 ± 3,5
3	CT	477 994	1 416 782	30/08/00	31,3	24	5,20	-	-4,88	-38,3	1,1	-	-
4	CT	410 950	1 407 945	31/08/2000	33,2	246	6,80	207	-5,25	-38,0	3,8	-12,8	49,1 ± 2,5
5	CT	493 000	1 606 000	01/09/2000	-	-	-	-	-4,90	-38,7	0,7	-	-
6	CT	455 000	1 570 000	30/08/00	-	-	-	-	-5,15	-35,8	0,0	-13,6	82,9 ± 0,8
7	CT	519 000	1 565 000	31/08/2000	-	-	-	-	-5,40	-38,8	0,6	-8,4	51,3 ± 0,5
8	CT	490 000	1 592 000	01/09/2000	-	-	-	-	-5,16	-34,5	0,7	-	-
9	CT	479 000	1 588 000	30/08/00	-	-	-	-	-5,80	-36,6	3,8	-10,3	54,9 ± 0,7
10	CT	491 000	1 592 000	30/08/00	-	-	-	-	-5,35	-34,4	1,9	-10,7	77,6 ± 0,7
11	CT	493 000	1 606 000	30/08/00	-	-	-	-	-6,19	-41,7	1,4	-11,8	74,7 ± 0,4
12	CT	492 000	1 612 000	31/08/2000	-	-	-	-	-0,57	-6,7	3,6	-11,2	122,1 ± 0,9
13	CT	520 000	1 605 000	01/09/2000	-	-	-	-	-5,33	-40,5	1,5	-9,4	73,2 ± 0,7
14	GFG	356 224	1 232 794	24/05/1997	-	16	-	6	-5,77	-29,8	1,7	-	-
15	GFG	354 468	1 247 561	23/05/2000	31,0	23	4,70	-	-5,02	-36,1	-	-	-
16	GFR	369 914	1 300 534	09/04/1999	29,7	738	8,48	363	-3,06	-	0,6	-7,4	49,7 ± 0,5
17	GGQ	342 471	1 237 005	23/05/1997	28,0	29	7,30	15	-5,05	-	0,5	-18,2	94,9 ± 0,9
18	GGQ	341 670	1 234 705	23/06/1984	-	-	-	-	-5,00	-29,1	0,5	-	-
19	GGQ	345 294	1 231 001	23/06/1984	-	-	-	-	-4,00	-23,9	1,1	-	-
20	GGQ	362 436	1 252 243	31/01/1998	31,7	70	7,38	35	-4,83	-	1,3	-17,1	86,7 ± 0,9
21	GGQ	266 435	1 211 742	25/05/1997	26,7	10	6,20	6	-4,90	-	0,4	-17,1	98,7 ± 0,9
22	GGQ	372 791	1 278 803	28/05/1997	30,4	122	6,50	65	-5,35	-34,0	0,4	-	-
23	GGQ	343 473	1 231 009	23/06/1984	-	-	-	-	-4,70	-27,7	0,7	-	-
24	GGQ	342 715	1 237 433	26/05/1997	29,1	46	6,20	32	-5,10	-29,7	0,4	-17,6	87,3 ± 0,8
25	GGQ	(342715)	1 237 433	23/03/1999	30,3	97	6,30	35	-5,46	-29,6	0,8	-15,2	79,3 ± 0,8
26	GGQ	419 064	1 310 054	22/05/2000	31,4	456	6,10	160	-4,73	-34,6	-	-13,7	80,0 ± 0,8
27	GGQ	386 762	1 264 602	23/05/2000	31,5	178	5,90	-	-4,45	-34,2	-	-	-
28	GI	310 040	1 179 107	19/03/1999	30,5	42	5,00	15	-4,80	-27,8	0,9	-	-
29	GI	310 680	1 179 468	03/03/2001	29,7	25	6,00	4	-4,87	-34,5	-	-	-
30	GI	310 796	1 178 515	03/03/2001	29,9	30	6,00	6	-5,06	-35,7	-	-	-
31	GI	310 250	1 189 874	25/05/2000	29,5	26	7,00	-	-5,18	-38,1	-	-	-

Échantillon Identifiant	Stratigraphie	X (UMT)	Y (UMT)	Date d'échantillonnage	T (°C)	CE (µS/cm)	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	δ <sup>18</sup> O (‰)	δ <sup>2</sup> H (‰)	<sup>3</sup> H* (UT)	δ <sup>13</sup> C (‰)	a <sup>14</sup> C (pMC)
32	GI	306 821	1 190 661	25/05/2000	28,1	20	6,90	-	-5,12	-37,5	0,6	-	-
33	GKS	426 785	1 337 034	22/05/2000	31,9	17	7,90	-	-5,11	-37,3	1,6	-	-
34	GKS	334 335	1 316 099	09/04/1999	31,1	475	6,85	325	-6,58	-	1,4	-9,9	12,1 ± 0,2
35	GKS	381 870	1 347 163	23/05/2000	32,9	435	7,20	202	-4,95	-37,7	0,7	-16,9	79,4 ± 3,2
36	GKS	374 773	1 451 032	31/08/2000	33,8	198	5,90	-	-6,06	-44,9	0,1	-	-
37	GKS	411 233	1 372 679	29/08/2000	32,2	67	5,50	-	-4,66	-37,8	0,3	-	-
38	GKS	351 257	1 221 388	24/05/1997	29,3	150	6,62	102	-5,25	-28,4	0,4	-15,0	64,4 ± 0,7
39	GKS	355 904	1 194 210	04/02/1998	29,7	123	6,32	60	-4,65	-	0,5	-15,8	91,0 ± 0,9
40	GKS	372 650	1 243 784	04/02/1998	30,0	455	7,30	323	-5,88	-	0,4	-9,4	20,6 ± 0,2
41	GKS	402 500	1 287 003	22/05/2000	30,6	71	5,30	16	-5,16	-35,3	-	-	-
42	GKS	386 700	1 264 233	22/05/2000	31,5	364	5,40	33	-4,78	-37,7	-	-	-
43	GKS	208 897	1 252 245	24/03/1999	28,9	430	7,30	43	-4,95	-	0,9	-14,7	68,4 ± 0,7
44	GKS	208 897	1 252 245	24/03/1999	29,0	430	7,40	43	-5,79	-	0,9	-11,2	0,3 ± 0,1
45	GKS	245 246	1 244 556	25/03/1999	29,2	392	7,20	250	-5,44	-	1,4	-8,7	2,3 ± 0,1
46	CT	345 085	1 529 662	22/05/1980	-	80	7,00	24	-4,50	-27,3	7,2	-	-
47	CT	228 979	1 454 979	04/03/1980	30,0	39	5,00	11	-5,80	-38,0	0,4	-19,0	86,9 ± 0,7
48	CT	234 402	1 454 926	06/03/1980	-	-	-	16	-6,95	-38,6	0,2	-	-
49	CT	234 402	1 454 926	06/03/1980	-	128	-	41	-6,15	-37,9	0,1	-	-
50	CT	324 581	1 424 697	24/05/1980	-	240	8,00	66	-5,00	-30,5	10,4	-	-
51	CT	199 809	1 433 142	05/03/1980	29,0	136	6,20	40	-5,40	-32,3	12,3	-17,3	103,6 ± 0,1
52	CT	321 276	1 472 656	07/03/1980	31,0	185	6,00	84	-5,35	-36,3	0,8	-16,3	82,2 ± 0,3
53	CT	288 699	1 463 672	23/05/1980	-	485	8,00	137	-4,70	-27,4	7,2	-	-
54	CT	288 627	1 454 452	20/05/1980	-	56	6,00	12	-5,34	-36,0	3,1	-	-
55	CT	324 792	1 457 883	21/05/1980	-	210	7,00	132	-5,90	-40,0	0,8	-	-
56	CT	230 732	1 449 427	04/03/1982	28,0	140	5,00	4	-5,20	-33,0	5,4	-	-
57	CT	339 455	1 492 822	22/05/1980	-	183	7,00	20	-4,50	-39,7	4,5	-	-
58	CT	319 131	1 421 044	24/05/1980	-	24	7,00	20	-5,00	-32,3	1,5	-	-
59	CT	292 074	1 432 297	24/05/1980	-	30	7,00	11	-5,30	-33,1	7,0	-	-
60	CT	312 171	1 461 655	20/05/1980	-	250	8,00	146	-4,71	-32,4	0,5	-	-
61	CT	291 978	1 419 389	07/03/1980	-	78	-	16	-5,30	-33,7	4,5	-	-
62	CT	319 582	1 489 262	22/05/1980	-	44	7,00	7	-4,70	-27,4	8,6	-	-
63	CT	319 582	1 489 262	22/05/1980	-	21	6,00	3	-4,90	-31,2	4,5	-	-
64	CT	230 606	1 436 515	06/03/1980	-	-	-	524	-5,72	-39,0	0,2	-	-
65	CT	230 606	1 436 515	05/03/1980	29,0	-	6,40	22	-5,05	-33,7	4,7	-13,1	101,2 ± 1,0
66	CT	230 606	1 436 515	05/03/1980	-	133	-	30	-4,95	-33,3	5,2	-	-
67	CT	230 606	1 436 515	06/03/1980	-	-	-	35	-4,59	-35,8	7,2	-	-
68	CT	227 024	1 440 240	20/05/1980	-	110	6,00	22	-5,62	-36,8	6,8	-	-

Échantillon Identifiant	Stratigraphie	X (UMT)	Y (UMT)	Date d'échantillonnage	T (°C)	CE (µS/cm)	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	δ <sup>18</sup> O (‰)	δ <sup>2</sup> H (‰)	<sup>3</sup> H (UT)	δ <sup>13</sup> C (‰)	a <sup>14</sup> C (pMC)
69	CT	231 787	1 370 096	08/03/1980	-	-	-	11	-6,54	-42,6	0,2	-	-
70	CT	231 787	1 370 096	08/03/1980	30,0	-	6,50	10	-6,49	-41,5	0,0	-19,4	76,6 ± 0,7
71	CT	231 787	1 370 096	08/03/1980	29,0	51	5,00	23	-6,81	-44,3	0,2	-	-
72	CT	231 787	1 370 096	08/03/1980	30,0	28	5,00	12	-5,74	-36,8	0,0	-18,8	87,3 ± 0,3
73	CT	339 511	1 502 040	22/05/1980	-	110	7,00	29	-3,10	-20,8	9,7	-	-
74	CT	228 906	1 447 601	06/03/1980	-	-	-	7	-6,06	-36,3	8,7	-	-
75	CT	290 336	1 441 530	20/05/1980	-	-	6,00	18	-5,50	-20,3	5,2	-	-
76	CT	294 175	1 471 006	07/03/1980	29,0	38	5,00	7	-5,56	-39,5	0,3	-20,0	99,9 ± 1,0
77	CT	294 175	1 471 006	06/03/1980	-	213	-	25	-4,38	-24,9	9,6	-	-
78	CT	294 175	1 471 006	06/03/1980	30,0	85	6,30	17	-5,24	-35,0	3,1	-18,4	101,9 ± 0,9
79	CT	328 325	1 444 954	21/05/1980	-	41	5,00	1	-4,60	-28,4	7,4	-	-
80	CT	293 979	1 445 191	07/03/1980	-	130	-	12	-4,96	-30,1	6,0	-	-
81	CT	313 927	1 454 267	21/05/1980	30,0	130	6,00	52	-6,05	-41,9	0,4	-	-
82	CT	230 624	1 438 360	20/05/1980	-	48	6,00	12	-5,50	-37,6	2,5	-	-
83	CT	229 071	1 464 202	04/03/1982	29,0	430	9,00	286	-	-	0,1	-11,5	3,6 ± 0,1
84	CT	336 100	1 533 405	22/05/1980	-	44	7,00	107	-4,78	-31,3	2,5	-	-
85	CT	326 801	1 489 214	07/03/1980	29,0	-	6,50	23	-4,08	-25,3	8,2	-18,4	99,7 ± 0,9
86	CT	192 776	1 451 672	05/03/1980	-	122	-	21	-6,47	-42,5	-	-	-
87	CT	192 776	1 451 672	05/03/1980	-	122	-	17	-6,36	-43,2	3,7	-	-
88	CT	192 776	1 451 672	05/03/1980	-	65	-	10	-6,80	-43,9	0,3	-	-
89	CT	192 776	1 451 672	05/03/1980	-	40	-	7	-6,46	-42,4	0,8	-	-
90	CT	292 227	1 452 580	24/05/1980	-	155	8,00	55	-5,30	-35,5	1,4	-	-
91	CT	250 587	1 445 550	06/03/1980	-	125	-	6	-6,44	-33,7	2,8	-	-
92	CT	284 868	1 436 040	24/05/1980	-	21	6,00	6	-5,00	-30,8	8,3	-	-
93	SAC1	342 654	1 237 311	23/05/1997	28,7	137	6,35	84	-5,20	-	0,3	-15,3	69,2 ± 0,7
94	SAC1	308 001	1 236 147	27/05/1997	28,5	532	7,84	330	-5,81	-36,6	0,4	-10,1	7,6 ± 0,1
95	SAC1	273 379	1.240.612.	03/02/1998	28,6	437	7,64	225	-6,22	-	-	-9,1	7,0 ± 0,1
96	SAC1	322 902	1 259 242	04/02/1998	-	624	7,20	51	-5,04	-32,7	0,4	-	-
97	SAC1	215 605	1 265 606	20/03/1999	28,9	440	7,20	293	-6,28	-40,0	0,7	-9,8	10,1 ± 0,1
98	SAC1	283 578	1 245 797	23/06/2000	29,9	235	6,90	244	-6,33	-47,0	0,1	-12,5	9,6 ± 1,7
99	SAC1	295 851	1 239 431	23/06/2000	31,1	294	7,00	310	-7,02	-48,8	0,4	-14,0	34,2 ± 2,1
100	SAC1	296 221	1 239 845	23/06/2000	30,4	267	7,30	329	-5,59	-45,3	0,1	-	-
101	SAC1	299 525	1 244 280	24/06/2000	30,4	290	7,50	256	-5,74	-42,8	0,1	-8,9	1,0 ± 0,1
102	SAC1	299 684	1 245 508	24/06/2000	31,1	538	7,50	311	-5,65	-41,5	0,1	-9,2	1,0 ± 0,1
103	SAC1	296 716	1 227 319	19/06/2000	29,3	388	7,60	147	-6,41	-45,8	0,2	-10,7	1,1 ± 1,0
104	SAC1	416 492	1 310 000	22/05/2000	31,6	37	4,90	-	-4,71	-32,5	-	-	-
105	SAC1	320 136	1 241 775	24/06/2000	31,4	222	8,50	168	-5,00	-36,0	0,6	-11,1	71,2 ± 3,0

Échantillon Identifiant	Stratigraphie	X (UMT)	Y (UMT)	Date d'échantillonnage	T (°C)	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	$\text{HCO}_3^-$ (mg/l)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$^3\text{H}$ (UT)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$a^{14}\text{C}$ (pMC)
106	SAC2	302 156	1 300 558	20/04/1999	30,0	386	8,40	286	-5,55	-	0,9	-10,2	$37,4 \pm 0,4$
107	SAC2	449 918	1 376 917	29/08/2000	-	-	-	-	-5,07	-37,2	3,3	-	-
108	SAC2	367 058	1 333 247	23/05/2000	31,2	675	7,10	-	-5,07	-39,2	-	-	-
109	SAC2	395 561	1 437 950	31/08/2000	34,8	31	5,10	-	-5,16	-38,5	0,7	-	-
110	SAC2	304 390	1 285 501	19/06/2000	31,5	317	7,40	276	-4,77	-40,0	0,1	-12,2	$53,4 \pm 2,6$

## ANNEXE II - DONNÉES DU PROJET RAF/7/011 SOUTENU PAR L'AIEA

## Mesures du tritium Mauritanie

Numéro de l'échantillon	Code de l'échantillon	Code du laboratoire	Type d'échantillon	Date	Tritium UT	Erreur de mesure du tritium
1	406/A561/1	333	GWB	2015/09/07	< 0,4	
2	407/A561/2	344	GWB	2015/09/09	2,8	±0,3
3	408/A561/3	270	GWB	2015/09/09	2,3	±0,3
4	409/A561/4	273	GWB	2015/09/12	1,1	±0,2
5	410/A561/5	274	GWB	2015/09/12	1,4	±0,2
6	411/A561/6	275	GWD	2015/09/12	< 0,4	
7	412/A561/7	277	GWB	2015/09/12	1,0	±0,2
8	413/A561/8	281	GWB	2015/09/11	3,0	±0,3
9	414/A561/9	282	GWD	2015/09/11	< 0,4	
10	415/C575/1	283	GWD	2015/09/11	< 0,4	
11	416/C575/2	284	GWB	2015/09/11	< 0,4	
12	417/C575/3	334	GWB	2015/09/12	2,0	±0,3
13	418/C575/5	335	GWB	2015/09/15	1,6	±0,2
14	419/C575/6	336	GWB	2015/09/14	0,7	±0,2
15	420/C575/7	337	GWB	2015/09/15	1,9	±0,3
16	421/C575/8	338	GWB	2015/09/16	0,8	±0,2
17	422/C575/9	339	GWB	2015/09/16	1,3	±0,2
18	423/F581/1	340	GWB	2015/09/16	2,0	±0,3
19	424/F581/2	341	GWB	2015/09/16	2,8	±0,3

## Première campagne : Mauritanie

Identifiant de notre laboratoire	Identifiant de l'échantillon	Nom du site d'échantillonnage	Campagne	Longitude	Latitude	Altitude	CE	pH	T °C	Alcalinité	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Excès de deutérium ‰	Tritium (UT)
W-21535	333	F13 Atar	19 sept.	-13,11538	20,62127	297	1230	8,5	31,0	226,0	-4,85	-33,31	5,5	0,0
W-21536	344	Tawaz solaire	19 sept.	-12,9408	20,57	267	865	8,4	29,9	160,0	-3,16	-22,67	2,6	2,8
W-21537	270	JREIF F1	19 sept.	-12,4542	20,8517	300	540	9,5	35,0	200,0	-3,06	-22,14	2,3	2,3
W-21538	273	TIRBANE	19 sept.	-13,0291	19,9586	233	1490	8,5	33,0	233,0	-4,3	-28,7	5,7	1,1
W-21539	274	F1 AOUJEFT	19 sept.	-13,0603	20,0272	228	510	9,9	32,0	194,0	-4,43	-27,98	7,5	1,4
W-21540	275	Lemoilih P007	19 sept.	-13,1954	20,2085	173	866	9,1	35,0	220,0	-4,65	-34,2	3,0	0,0
W-21541	277	CHINGUETTI F3	19 sept.	-12,36677	20,45861	496	461	7,6	31,0	171,0	-5,42	-37,14	6,2	1,0
W-21542	281	OUADANE F2014	19 sept.	-11,6401	20 942	434	395	8,7	32,0	126,0	-4,1	-27,92	4,9	3,0
W-21543	282	N°Tomadi	19 sept.	-11,9304	20,9584	535	1332	7,6	31,0	374,0	-4,9	-37,51	1,7	0,0
W-21544	283	Oued Amlellek P012	19 sept.	-12,0886	20,8895	517	3331	8,3	30,0	219,0	-3,92	-31,85	-0,5	0,0
W-21545	284	AD63	19 sept.	-11,62153	20,93929	431	1090	9,1	34,0	114,0	-5,72	-37,25	8,5	0,0
W-21546	334	Terjit F saoudien	19 sept.	-13,10592	20,27456	284	549	9,2	36,0	126,0	-4,03	-26,85	5,4	2,0
W-21547	335	Terjit F1 goudron	19 sept.	-13,1117	20,2704	297	860	9,4	34,0	286,0	-4,04	-27,22	5,1	1,6
W-21548	336	Aoujeft	19 sept.	-13,05259	20,00952	226	378	9,2	34,0	140,0	-3,91	-26,38	4,9	0,7
W-21549	337	Timnit F1	19 sept.	-12,89944	19,91414	212	1398	9,5	32,5	226,0	-3,61	-22,68	6,2	1,9
W-21550	338	Timnit F2	19 sept.	-12,90462	19,89334	212	917	8,4	31,6	228,0	-5,33	-38,15	4,5	0,8
W-21551	339	Daaji F1	19 sept.	-12,7601	19,84757	279	1375	8,8	31,9	126,0	-3,3	-24,5	1,9	1,3
W-21552	340	Daaji F2	19 sept.	-12,7608	19,84667	279	1591	8,5	31,5	160,0	-4,22	-28,16	5,6	2,0
W-21553	341	Tenwamen F1	19 sept.	-12,7045	19,74281	315	574	9,0	32,0	166,0	-5,15	-35,41	5,8	2,8

**Deuxième campagne : bassin de Taoudéni en Mauritanie**

Code de l'échantillon	Nom du site d'échantillonnage	Date d'échantillonnage	Type d'échantillon	Latitude	Longitude	Altitude (m)/sol	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	Temp. (°C)	Alcalinité : $\text{CaCO}_3$ , mg/l
348	NIMLANE	22/07/2016	GWD	18 352	-11,67	309	1478	6,84	32,1	160
351	Titemlel	20/07/2016	GWB	18,5583	-11,0731	502	1085	7,51	30	140
352	D'Boulgui	22/07/2016	GWD	18,3995	-11,5966	407	994	6,96	30,4	239
359	SALA	22/07/2016	GWD	18,2563	-11,8168	282	397	6,12	32,9	208
363	BIR ZIK 1	19/07/2016	GWD	18,5808	-9,80667	280	516	7,38	31,4	99
364	TICHITT F5DH	19/07/2016	GWB	18,4206	-9,4989	171	952	7,14	32,9	155
365	Gawya AEP11	15/07/2016	GWB	18,4569	-10,8183	502	1608	6,7	30,3	70
366	BIR LEKCHEB 1	15/07/2016	GWD	18,5125	-10,3461	223	178	5,9	39,4	63
367	BIR KHAT EL WAHCHIYA	15/07/2016	GWD	18,4067	-10,5608	466	1906	7,5	30,6	271
370	Lehouetat	21/07/2016	GWB	18 657	-11 579	343	620	7,15	30	83
371	Rachid F3	21/07/2016	GWB	18 784	-11 686	265	798	6,67	31,9	138
372	Agnane	21/07/2016	GWD	18,8103	-11,7718	225	1549	8,85	30,6	240
373	F1 Tidjikja	20/07/2016	GWB	18,5328	-11,41137	390	1005	7,02	30,7	170
384	Nbeika F Solaire	22/07/2016	GWB	17,9817	-12,2603	122	384	6,65	31,6	180

Mali : 3<sup>e</sup> campagne

Nom du site d'échantillonnage	Code du site	Latitude	Longitude	Altitude	Nom de l'échantillon	Date d'échantillonnage	Type d'échantillon	Profondeur maximum	Nom de l'aquifère
Kourounde	B-501	14,050278	-3,522500	300	Kourounde	2013/06/18	GWB	56	CTQ
Dounde	B-502	13,961111	-3,712500	318	Dounde	2013/06/19	GWB	54	CTQ
Koboho	B-503	13,975000	-3,693333	466	Koboho	2013/06/19	GWB	50	CTQ
Bankass	B-504	14,076111	-3,526667	234	Bankass	2013/06/19	GWB	65	CTQ
Dimbal	D-501	14,028333	-3,591667	296	Dimbal	2013/06/19	GWD	37	CTQ
Koyentombo	D-502	14,085833	-3,533056	293	Koyentombo	2013/06/19	GWD	27	CTQ
Segue	B-505	13,845278	-3,750833	464	Segue	2013/06/20	GWB	96	ICT
Yolo	D-503	13,899444	-3,746667	376	Yolo	2013/06/20	GWD	30	ICT
Tissagou	D-504	13,656944	-3,820000	400	Tissagou	2013/06/20	GWD	50	ICT
Tanga	D-505	13,614722	-3,849444	314	Tanga	2013/06/20	GWD	65	ICT
Toun	D-506	13,546944	-3,909722	334	Toun	2013/06/20	GWD	39	ICT
Bobosso	D-507	13,662222	-3,672778	271	Bobosso	2013/06/20	GWD	38	CTQ
Songore	B-506	13,555000	-3,470000	253	Songore	2013/06/21	GWB	44	CTQ
Sirakele	D-508	13,438889	-3,813056	153	Sirakele	2013/06/21	GWD	30	CTQ
Thiondougou	D-509	13,235556	-3,583889	258	Thiondougou	2013/06/21	GWD	52	CTQ
Souhe	D-510	13,230556	-3,486389	264	Souhe	2013/06/21	GWD	42	CTQ
Poura-fitini	D-511	13,595000	-3,624722	262	Poura-fitini	2013/06/21	GWD	60	CTQ
Diallassagou	B-507	13,737500	-3,629444	255	Diallassagou	2013/06/22	GWB	25	CTQ
Pissa	B-508	13,728333	-3,404167	256	Pissa	2013/06/22	GWB	32	CTQ
Baye	B-509	13,625556	-3,368333	251	Baye	2013/06/22	GWB	33	CTQ
Koulogon-peulh	B-510	13,817500	-3,441667	259	Koulogon-peulh	2013/06/22	GWB	46	CTQ
Koporo-na	B-511	13,130556	-3,357500	259	Koporo-na	2013/06/23	GWB	40	ICP
Wol - konsangou	B-512	14,195278	-3,429167	320	Wol - konsangou	2013/06/23	GWB	60	ICP
Koporo-pen	B-513	14,225556	-3,300556	259	Koporo-pen	2013/06/23	GWB	40	ICP

Nom du site d'échantillonnage	Code du site	Latitude	Longitude	Altitude	Nom de l'échantillon	Date d'échantillonnage	Type d'échantillon	Profondeur maximum	Nom de l'aquifère
Tendjerli	B-514	14,369444	-3,195556	286	Tendjerli	2013/06/23	GWB	48	ICP
Madoudougou	B-515	14,396111	-3,075556	273	Madoudougou	2013/06/23	GWB	45	ICP
Yoro	B-516	14,278611	-2,133889	300	Yoro	2013/06/24	GWB	45	CTQ
Dioungani	B-517	14,316389	-2,740556	257	Dioungani	2013/06/24	GWB	80	CTQ
Yandiaga	B-518	14,071111	-3,190556	255	Yandiaga	2013/06/24	GWB	35	CTQ
Gangafani	D-512	14,381667	-2,397500	257	Gangafani	2013/06/24	GWD	60	CTQ
Fleuve Niger	R-502	12,630010	-7,998378	316	Fleuve Niger	2013/06/24	SRI		
Tene	B-519	13,411667	-4,582222	293	Tene	2014/05/22	GWB	60	CTQ
Tominian	B-520	13,285556	-4,401389	298	Tominian	2014/05/23	GWB	58	ICT
Messo	B-521	13,263889	-4,465556	305	Messo	2014/05/23	GWB	70	ICT
Hanekuy	B-522	13,237222	-4,502222	308	Hanekuy	2014/05/23	GWB	60	ICT
Bodwo	B-523	13,235833	-4,593333	316	Bodwo	2014/05/23	GWB	52	ICT
Benena	B-524	13,123056	-4,364600	320	Benena	2014/05/23	GWB	42	ICT
Mandiakuy	B-525	13,018889	-4,464360	299	Mandiakuy	2014/05/23	GWB	48	ICT
Bokuy	B-526	12,972500	-4,536944	400	Bokuy	2014/05/23	GWB	92	ICT
Kona	B-527	12,905278	-4,569444	340	Kona	2014/05/23	GWB	80	ICT
Makoina	B-528	12,870278	-4,569722	360	Makoina	2014/05/23	GWB	68	ICT
Marena	B-529	12,725278	-4,440556	310	Marena	2014/05/23	GWB	68	ICT
Minamba	B-530	12,393333	-4,396640	434	Minamba	2014/05/23	GWB	60	ICT
Mouni	D-513	12,856111	-4,605000	364	Mouni	2014/05/23	GWD	76	TIC
Mafoune	D-514	12,790833	-4,638056	424	Mafoune	2014/05/23	GWD	54	ICT
Goutchina	B-531	12,299167	-4,562778	398	Goutchina	2014/05/24	GWB	65,59	ICT
Sorobasso	B-532	12,523611	-5,747500	299	Sorobasso	2014/05/24	GWB	60	ICT
Koumbi	B-533	12,452222	-5,646111	314	Koumbi	2014/05/24	GWB	57	ICT
Yorosso	D-515	12,359722	-4,729440	417	Yorosso	2014/05/24	GWD	52	ICT
Kouri	D-516	12,185000	-4,813920	310	Kouri	2014/05/24	GWD	104	ICT
Karangana	D-517	12,224444	-5,965000	390	Karangana	2014/05/24	GWD	90	ICT

Nom du site d'échantillonnage	Code du site	Latitude	Longitude	Altitude	Nom de l'échantillon	Date d'échantillonnage	Type d'échantillon	Profondeur maximum	Nom de l'aquifère
Tandio	D-518	12,165833	-4,959240	341	Tandio	2014/05/24	GWD	81	ICT
Sougoumba	D-519	12,175000	-5,808611	356	Sougoumba	2014/05/24	GWD	58	ICT
Molobala	D-520	12,180000	-5,667778	326	Molobala	2014/05/24	GWD	70	ICT
Farakoro	D-521	12,245000	-5,634167	402	Farakoro	2014/05/24	GWD	51	ICT
Farakala	D-522	12,263333	-5,554444	317	Farakala	2014/05/24	GWD	60	ICT
Sincina	D-523	12,356667	-5,563889	380	Sincina	2014/05/24	GWD	60	ICT
Koutiala	B-534	12,362222	-5,527778	360	Koutiala	2014/05/25	GWB	92	TIC
Niessoumana	B-535	12,580556	-5,388056	297	Niessoumana	2014/05/25	GWB	70	ICT
CAA M'Pessoba	B-536	12,619167	-5,311667	319	CAA M'Pessoba	2014/05/25	GWB	55	ICT
M'Pessoba Ville	B-537	12,556667	-5,274444	319	M'Pessoba ville	2014/05/25	GWB	61,8	ICT
Kentieri	B-538	12,738333	-5,298889	299	Kentieri	25/05/2014	GWB	55	ICT
Niguena	B-539	13,077500	-5,813830	300	Niguena	25/05/2014	GWB	60	ICT
Douna PMH	B-540	13,212600	-5,922571	388	Douna PMH	25/05/2014	GWB	46	CTQ
Banankoroni	B-541	13,349167	-6,349360	290	Banankoroni	25/05/2014	GWB	70,5	CTQ
Tingoni	B-542	12,753690	-7,145250	271	Tingoni	25/05/2014	GWB	45	ICT
Djebougou	B-543	12,887500	-6,838910	336	Djebougou	2014/05/25	GWB	41	ICT
Fana AEP	B-544	12,772778	-6,958870	318	Fana AEP	2014/05/25	GWB	100	ICT
Marcakoungou	B-545	12,736900	-7,286768	340	Marcakoungou	25/05/2014	GWB	75,71	ICT
Diallabougou	D-524	13,415738	-6,230220	289	Diallabougou	25/05/2014	GWD	45	CTQ
Douna fleuve Bani	R-501	13,207231	-5,919385	277	Douna fleuve Bani	25/05/2014	SRI		
Gadougou Puits	D-525	14,871056	-6,766306	265	Gadougou Puits	2015/03/10	GWD	52	ICT
N'Galamankoura	B-546	14,143306	-6,013694	226	N'Galamankoura	2015/03/18	GWB	30	CTQ
Bagadadji	B-547	14,330917	-6,004250	270	Bagadadji	2015/03/18	GWB	25	CTQ
Kourouma	B-548	14,654222	-6,001250	274	Kourouma	2015/03/18	GWB	2	CTQ
Kogoni Bozo	B-549	14,731083	-6,023528	273	Kogoni Bozo	2015/03/18	GWB	2	CTQ
Kogoni ferme	B-550	14,718278	-6,029306	273	Kogoni ferme	2015/03/18	GWB	2	CTQ
Rattenga	B-551	14,687111	-6,024806	273	Rattenga	2015/03/18	GWB	2	CTQ

Nom du site d'échantillonnage	Code du site	Latitude	Longitude	Altitude	Nom de l'échantillon	Date d'échantillonnage	Type d'échantillon	Profondeur maximum	Nom de l'aquifère
Sika	B-552	14,674944	-6,018167	273	Sika	2015/03/18	GWB	15	CTQ
Markala Fleuve	R-503	13,289947	-4,587370	305	Markala Fleuve	2015/03/18	SRI		
Diabaly Koura	B-553	14,700722	-6,062333	273	Diabaly Koura	2015/03/19	GWB	20	CTQ
Guiré	B-554	14,650028	-6,695944	262	Guiré	2015/03/19	GWB	60	ICT
Gadougou Forage	B-555	14,869722	-6,765222	265	Gadougou Forage	2015/03/19	GWB	50	ICT
Famabougou	D-526	14,785500	-6,228028	267	Famabougou	2015/03/19	GWD	60	CTQ
Aboité	D-527	14,827056	-6,473639	267	Aboité	2015/03/19	GWD	85	ICT
Bougoudjiiré	D-528	14,881167	-6,848194	267	Bougoudjiiré	2015/03/19	GWD	55	CIT
Sikéré	D-529	14,901472	-7,030861	260	Sikéré	2015/03/19	GWD	65	CIT
Karonga	B-556	15,333194	-7,606111	256	Karonga	2015/03/20	GWB	21	CAM
Dilly	B-557	15,026667	-7,685000	256	Dilly	2015/03/20	GWB	60,0	CAM
Dembassalla	B-558	14,996722	-7,519667	271	Dembassalla	2015/03/20	GWB	15,0	CAM
Goumbou	B-559	14,990833	-7,453889	257	Goumbou	2015/03/20	GWB	60,0	TIC
Mourdiah	B-560	14,486444	-7,470306	306	Mourdiah	2015/03/20	GWB	25,0	ICT
Wolokoro	B-561	14,432583	-7,567361	304	Wolokoro	2015/03/20	GWB	27,0	ICT
Medina Kagoro	B-562	14,375500	-7,669389	299	Medina Kagoro	2015/03/20	GWB	60,0	ICT
N'Gai	B-563	14,323444	-7,857250	300	N'Gai	2015/03/20	GWB	21,0	ICT
Diadieougou	B-564	14,279139	-7,988639	350	Diadieougou	2015/03/20	GWB	25,0	ICT
Segué	B-565	14,103528	-8,036111	388	Segué	2015/03/20	GWB	25,0	ICT
Nara	D-530	15,063611	-7,161389	260	Nara	2015/03/20	GWD	60	CIT
Koumara	D-531	15,196444	-7,383444	260	Koumara	2015/03/20	GWD	19	CIT
Moussawelli	D-532	15,180861	-7,428833	267	Moussawelli	2015/03/20	GWD	30	CAM
Terrou	D-533	15,220139	-7,407361	266	Terrou	2015/03/20	GWD	30	CAM
Zida Touré	D-534	15,263306	-7,503111	272	Zida Touré	2015/03/20	GWD	30	CAM
Boullol	D-535	15,189417	-7,721250	300	Boullol	2015/03/20	GWD	25,0	CAM
Galafouga	B-566	13,657833	-8,036528	390	Galafouga	2015/03/21	GWB	40,0	ICT
Kolokani	B-567	13,584917	-8,038000	400	Kolokani	2015/03/21	GWB	35,0	TIC

Nom du site d'échantillonnage	Code du site	Latitude	Longitude	Altitude	Nom de l'échantillon	Date d'échantillonnage	Type d'échantillon	Profondeur maximum	Nom de l'aquifère
Tioribougou	B-568	13,384056	-7,994972	442	Tioribougou	2015/03/21	GWB	30,0	ICT
N'Golobougou	B-569	13,156028	-7,952667	390	N'Golobougou	2015/03/21	GWB	30,0	ICT
Niossombougou	B-570	13,095750	-7,939028	380	Niossombougou	2015/03/21	GWB	35,0	ICT
Djidieni	D-536	13,885806	-8,095250	392	Djidieni	2015/03/21	GWD	40,0	ICT
Sokolo	B-571	14,736083	-6,122472	270	Sokolo	2016/03/19	GWB	35	CTQ
Birou	B-572	14,565056	-7,451278	297	Birou	2025/03/20	GWB	30,0	ICT

Code du site	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CO <sub>3</sub>	Fe_tot	CE	T	pH	Alcalinité	Oxygène dissous
B-501	0,31	2	1,29	1,1	2,29	0,62	7,06	1,02			0,0001	29	33,0	6,3	6	8
B-502	14,46	4,4	3,27	3	6,48	0,78	11,1	13,56			0,0002	145	31,9	5,9	9	4
B-503	16,22	4,98	0,7	4	4,93	1,56	50,4	5,5			1,3007	154	33,2	7,0	41	11
B-504	10,98	6,94	5,25	3,5	4,48	3,14	38,41	8,17			0,0001	153	33,3	7,5	32	13
D-501	20,87	10,66	0,7	1,5	3,01	5,73	80,97	6,7			0	220	30,3	8,6	66	13
D-502	8,26	2,03	1,89	2,4	3,93	1,62	24,49	2,72			0,3505	80	32,0	7,1	20	10
B-505	32,96	18,14	1,89	11	3,85	32,82	160,56	1,74			0,0001	444	30,5	8,3	132	15
D-503	16,46	4,39	4,06	3,6	13,11	1,1	13,66	13,67			0,1192	172	31,3	6,8	11	16
D-504	5,16	2,46	4,06	1,6	5,87	1,05	14,5	3,56			0,0001	73	32,5	7,8	12	11
D-505	29,57	14,61	3,67	3,7	5,7	5,5	137,17	5,72			0,0001	320	30,2	8,2	112	10
D-506	12,47	6,23	6,83	2,4	9,8	10,61	36,26	5,53			0,0527	157	30,2	8,4	30	11
D-507	30,12	11,85	8,02	2,8	4,86	10,5	132	5,37			0,0001	327	31,8	8,6	108	8
B-506	77,61	90,24	74,2	11,6	7,65	196,01	545,95	17,08			0,0001	1236	31,0	8,7	448	6
D-508	8,06	3,86	3,67	2,9	7,62	1,38	15,25	6,48			0,0001	105	31,0	6,8	13	3
D-509	130,48	51,04	253,6	4,8	11,74	521,77	510,99	49,42			0,0001	2580	31,0	8,1	419	5
D-510	137,31	30,3	94	9,2	41,79	433,38	346,48	100,09			0,0001	2570	35,0	8,1	284	7
D-511	79,68	41,69	11,97	4,4	6,27	34,72	388,23	10,52			0,0002	713	34,8	8,7	318	4
B-507	127,07	5,51	209	6	23,25	571,21	171,41	9,11			0,0001	1751	31,0	8,7	141	5
B-508	66,43	66,81	32,15	15,5	6 052	34,89	518,5	15 588			0,0003	898	32,0	8,0	425	9
B-509	68,96	40,02	40,4	30	6 219	80 431	405,61	10 601			0,0002	1047	33,0	8,9	333	7
B-510	52,19	33,92	5,05	2,6	5 034	4 466	294,99	8 576			0	638	35,0	9,2	242	11
B-511	26,3	13,84	1,89	2,3	14,41	1 784	137,13	234 007			0	251	31,0	9,8	112	4
B-512	47,19	22,88	5,25	2,7	5 718	5 204	46,36	9 424			0,0002	531	34,0	8,5	38	3
B-513	35,55	19,5	2,68	2,1	5 437	2 337	185,56	6 789			0,0001	342	32,0	10,1	155	4
B-514	28,99	13,77	1,29	2,1	6 108	16 511	100,69	6 816			0,0199	260	33,0	10,4	83	4
B-515	38,25	21,25	2,28	1,9	8 527	5 844	148,41	14 113			0,0001	400	28,0	10,2	122	4
B-516	35,23	19,92	16,82	11	10 909	37 363	150,28	10 483			0,0001	518	31,0	10,3	123	4

Code du site	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CO <sub>3</sub>	Fe_tot	CE	T	pH	Alcalinité	Oxygène dissous
B-517	32,8	13,8	12,17	4,6	4,12	2,56	197,03	0,2			0,2151	491	31,6	9,1	162	3
B-518	17,18	9,01	18	2,5	4	2,54	135,24	0,4			0,0001	928	35,0	9,5	111	4
D-512	2,4	2,24	116,9	2,8	28,81	25,69	230,74	0,27			0,0418	494	32,0	9,2	189	3
R-502																
B-519	1,0	0,3	4,7	0,9	2,5	0,2		7,3	8,5		0,0	24	36,6	5,6	6	6
B-520	5,6	1,8	3,7	1,9	2,0	1,6		7,9	10,6		0,0	59	35,3	5,6	24	6
B-521	2,7	0,9	3,7	1,6	1,3	0,2		17,3	5,2		0,0	45	31,5	4,6	6	6
B-522	8,9	2,9	3,9	3,4	3,8	0,1		46,4	7,8		0,0	98	36,6	5,1	6	6
B-523	2,2	0,8	7,4	5,7	4,9	0,2		19,5	11,5		0,0	64	31,5	4,9	12	3
B-524	4,3	1,8	3,9	5,4	1,4	1,8		0,0	12,6		0,0	54	34,4	6,1	37	7
B-525	9,9	2,9	8,6	2,8	3,9	0,0		49,2	15,1		0,0	105	35,3	5,2	18	5
B-526	2,1	0,8	4,5	2,3	1,2	0,7		10,7	9,5		0,0	41	32,3	5,3	12	4
B-527	3,0	0,8	4,0	1,5	1,7	0,0		17,8	8,7		0,0	131	32,5	5,8	6	4
B-528	5,3	1,8	3,7	9,8	5,1	0,0		28,2	9,3		0,0	81	31,0	5,4	12	5
B-529	9,9	2,7	3,5	8,3	6,5	2,0		31,9	10,3		0,0	100	35,8	5,9	24	6
B-530	3,9	1,0	1,6	1,7	0,9	0,2		2,7	8,1		0,0	21	34,1	5,1	19	5
D-513	4,8	1,4	1,9	1,7	2,2	0,8		11,4	9,2		0,0	52	31,5	5,2	14	4
D-514	2,0	0,6	1,8	1,7	1,0	0,0		3,2	7,2		0,0	36	36,4	7,5	12	6
B-531	1,7	0,5	2,6	1,1	3,3	0,0		2,6	5,9		0,0	26	31,2	5,0	8	5
B-532	3,1	0,6	1,4	1,5	1,8	0,0		3,4	6,3		0,0	28	31,7	5,0	12	5
B-533	4,6	1,7	2,9	9,0	0,2	2,0		0,0	10,9		0,0	72	30,5	5,5	42	4
D-515	2,3	0,5	0,9	0,6	0,5	0,4		1,2	8,4		0,0	13	32,7	5,4	10	7
D-516	32,7	11,1	8,6	10,1	0,9	6,1		0,3	25,4		0,0	331	34,7	7,7	189	6
D-517	9,0	1,8	3,4	7,1	10,1	0,3		20,6	7,9		0,0	104	30,7	5,2	18	3
D-518	2,0	0,8	2,2	1,4	1,2	0,2		3,8	10,9		0,0	18	34,2	4,5	12	4
D-519	3,7	0,9	2,3	1,5	1,2	0,0		3,9	10,2		0,0	29	31,5	5,2	18	5
D-520	2,8	0,9	2,2	2,0	0,3	0,2		0,5	9,2		0,0	22	34,4	5,6	20	7

Code du site	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CO <sub>3</sub>	Fe_tot	CE	T	pH	Alcalinité	Oxygène dissous
D-521	3,7	0,8	1,5	0,9	1,2	0,0		4,2	10,1		0,0	32	33,0	5,1	16	5
D-522	4,4	1,6	1,9	1,2	0,5	0,0		0,9	14,4		0,0	29	30,5	5,6	26	4
D-523	3,3	1,0	1,1	0,9	0,3	0,0		1,0	7,7		0,0	23	33,7	5,3	18	5
B-534	3,0	0,8	2,9	1,0	2,1	1,0		9,0	7,3		0,0	28	30,0	5,0	9	4
B-535	4,6	1,4	2,7	1,8	0,5	0,6		3,4	9,2		0,0	33	29,3	5,2	24	4
B-536	3,9	1,3	3,0	1,6	0,6	0,4		1,9	7,9		0,0	26	29,0	5,1	25	4
B-537	3,0	1,2	2,6	1,5	2,6	1,9		0,6	7,7		0,0	24	35,0	5,6	16	6
B-538	3,9	1,0	2,9	3,1	1,2	0,4		4,9	6,3		0,0	35	32,2	6,1	23	7,2
B-539	3,0	0,6	1,9	0,6	0,8	0,0		1,1	8,4		0,0	20	34,6	6,8	16	6
B-540	8,9	3,8	8,8	1,6	5,6	1,5		19,3	22,1		0,0	107	31,5	6,0	42	4
B-541	21,4	14,5	3,1	1,2	1,3	0,0		0,0	30,8		0,0	249	35,3	8,0	142	6
B-542	24,8	17,2	4,6	5,8	2,6	3,5		29,5	20,7		0,0	292	31,3	6,5	142	5
B-543	16,9	5,9	4,7	2,7	12,4	0,1		50,5	8,2		0,0	166	30,0	5,2	27	5
B-544	6,2	3,9	1,9	7,2	0,2	0,5		0,0	20,1		0,0	77	30,7	5,7	52	3
B-545	5,8	2,4	1,8	7,5	0,2	0,4		0,0	15,2		0,0	66	31,6	5,9	46	6
D-524	12,4	35,6	2,7	2,2	3,8	1,3		2,1	30,4		0,0	323	32,2	7,4	211	4
R-501	7,5	3,3	4,6	3,3	1,5	0,7		3,8	8,5		0,0	76	28,4	6,7	48	7
D-525	35,7	35,6	140,6	9,6	29,5	152,6	231,8	153,5	29,8	12,0		1489	30,8	7,4		5
B-546	11,3	4,6	7,8	3,3	2,7	0,6	79,3	2,3	5,4	0,0		59	29,3	6,6		6
B-547	13,0	6,2	18,3	3,6	2,3	0,7	85,4	0,0	11,2	12,0		45	29,8	6,5		3
B-548	5,8	2,6	10,0	3,3	3,2	0,0	57,9	4,8	6,5	0,0		98	31,0	6,1		4
B-549	6,5	2,4	7,4	3,1	2,5	0,4	54,9	0,0	5,0	0,0		97	30,0	6,5		3
B-550	7,0	3,4	13,4	3,1	4,1	0,9	67,1	7,6	10,3	0,0		136	30,0	6,2		3
B-551	16,4	7,2	22,2	4,2	11,1	13,0	91,5	32,9	12,9	0,0		304	30,0	6,2		5
B-552	3,7	1,7	6,2	2,1	0,9	0,0	36,6	0,2	3,2	0,0		63	29,7	6,6		4
R-503	3,4	1,6	4,9	3,8	3,1	0,4	30,5	0,3	5,2	0,0		49	23,8	7,5		8
B-553	14,6	4,3	6,6	3,2	1,4	0,2	91,5	0,0	7,3	0,0		159	29,5	7,1		4

Code du site	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CO <sub>3</sub>	Fe_tot	CE	T	pH	Alcalinité	Oxygène dissous
B-554	81,2	73,2	207,3	22,2	53,7	430,7	317,2	105,2	33,9	36,0		213	30,7	7,3		6
B-555	49,8	60,9	89,6	10,5	45,2	211,0	183,0	82,4	27,9	24,0		1418	32,1	7,2		3
D-526	27,0	15,2	46,4	11,8	3,5	5,3	231,8	14,3	16,6	18,0		481	30,6	7,4		6
D-527	9,4	4,7	3,7	1,4	1,1	1,9	61,0	0,0	7,4	0,0		163	32,1	6,9		5
D-528	47,9	44,3	358,6	36,6	78,2	458,7	329,4	155,3	36,5	36,0		231	31,5	7,2		4
D-529	28,4	7,0	96,3	8,9	25,4	48,4	250,1	0,0	22,8	36,0		696	30,1	8,1		6
B-556	12,6	14,7	252,2	11,6	52,6	49,7	446,4	103,7	21,5	65,0		1640	29,7	8,6		6
B-557	28,0	12,2	70,7	4,5	20,4	14	146	96,4	14,3	24,0		801	32,4	7,49		8
B-558	22,1	20,8	112,9	3,0	36,2	88	183	86,1	18,2	24,0		1161	31,5	7,44		3
B-559	32,7	9,3	29,8	5,9	14,6	31	159	7,0	9,9	12,0		487	32,3	7,84		2
B-560	5,2	2,5	18,8	1,6	8,1	2	24	48,8	6,8	0,0		158	31,2	7,46		6
B-561	22,9	14,1	21,1	8,5	13,5	9	128	42,3	15,2	9,0		372	32,1	6,92		4
B-562	31,9	12,8	14,9	17,1	14,8	19	134	14,2	14,6	12,0		407	30,1	7,18		3
B-563	11,4	4,8	4,9	10,0	6,6	3	49	26,3	9,0	0,0		144	29,9	7,22		3
B-564	4,5	2,7	5,5	2,1	3,7	1	24	15,8	4,3	0,0		77	31,7	6,28		4
B-565	14,5	7,3	6,5	2,2	6,1	2	73	26,3	9,8	0,0		178	29,1	7,95		5
D-530	2,9	1,7	3,2	1,7	1,4	0,3	24,4	0,0	6,9	0,0		36	30,3	6,7		6
D-531	33,7	35,7	225,7	10,6	36,5	314,9	329,4	76,9	27,0	36,0		1847	30,8	7,2		4
D-532	18,0	27,4	234,8	10,7	80,7	120,2	278,2	227,9	22,5	48,0		1374	29,5	7,5		4
D-533	47,4	25,8	87,3	5,0	53,1	35,8	146,4	210,4	17,1	12,0		1118	31,3	7,2		4
D-534	251,0	86,8	167,2	53,8	209,2	98,3	195,2	926,6	33,6	0,0		2660	28,8	7,5		4
D-535	52,9	26,7	75,0	5,9	51,3	39	159	184,3	12,5	30,0		1024	29,8	7,42		5
B-566	7,9	4,5	6,2	7,5	1,3	3	61	2,7	7,9	0,0		121	30,1	6,22		4
B-567	13,6	14,5	22,0	10,5	5,8	6	134	0,0	12,5	12,0		278	31,1	7,08		4
B-568	9,2	9,2	5,7	5,7	5,0	0	49	51,4	9,9	0,0		188	29,5	7,43		5
B-569	4,7	0,0	41,0	1,7	13,7	6	92	3,3	9,5	6,0		356	29,5	10,64		5
B-570	23,8	24,4	6,1	2,8	0,4	2	183	15,1	13,7	12,0		393	29,1	7,84		3

<b>Code du site</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>K</b>	<b>Cl</b>	<b>SO<sub>4</sub></b>	<b>HCO<sub>3</sub></b>	<b>NO<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>3</sub></b>	<b>Fe_tot</b>	<b>CE</b>	<b>T</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinité</b>	<b>Oxygène dissous</b>
D-536	19,1	7,5	23,9	10,0	29,0	2	31	82,1	11,5	0,0		300	30,1	5,98		5
B-571	53,3	15,8	38,4	130,8	44,1	25,1	268,4	81,3	28,5	24,0		953	29,9	7,8		7
B-572	18,8	7,6	19,3	5,8	5,8	4	122	12,4	7,9	9,0		256	31,5	7,18		4

## Burkina Faso : première campagne

Nom du site d'échantillonnage	Code du site	Latitude	Longitude	Altitude	Nom de l'échantillon	Date d'échantillonnage	Type d'échantillon	Profondeur maximum	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>
Badara	B-201	11,418028	- 4,350250	202	DGW01	2013/12/26	GWB	118	1,2	2,9	1,3	1,8	0,4	0,1	18,3
Koundougou	B-202	11,759333	- 4,512472	211	DGW02	2013/12/26	GWB	65	27,9	33,9	1,6	2,5	0,1	3,6	231,8
Toécé	B-203	11,806167	- 4,518028	207	DGW03	2013/12/26	GWB	64	33,1	53,8	5,2	4,6	2,6	5,0	292,8
Lanfiéra-Coura	B-204	11,538222	- 4,519000	192	DGW04	2013/12/26	GWB	62	14,3	27,9	37,3	3,2	1,0	7,0	256,2
Dingasso	B-205	11,060778	- 4,292306	211	DGW05	2013/12/26	GWB	68	35,0	32,1	33,4	3,8	21,1	20,6	183,0
Matourkou	B-206	11,069333	- 4,348417	220	DGW06	2013/12/26	GWB	101	5,0	9,8	1,1	10,1	0,3	0,1	67,1
Péni	B-207	10,950472	- 4,470444	219	DGW07	2013/12/26	GWB	61	7,9	26,3	8,8	15,0	15,8	9,9	36,6
Toussiana	B-208	10,834667	- 4,615222	208	DGW08	2013/12/26	GWB	61	1,7	4,7	2,2	6,4	1,4	0,1	12,2
Bérégadougou	B-209	10,775694	- 4,725389	214	DGW09	2013/12/27	GWB	72	2,3	5,1	1,3	8,9	0,9	1,4	36,6
Tiéfora	B-210	10,637444	- 4,840167	203	DGW10	2013/12/27	GWB	65	9,6	13,5	15,6	0,5	0,2	5,9	122,0
Banagourou	B-211	10,514667	- 3,970306	214	DGW11	2013/12/27	GWB	63	4,7	28,6	15,6	0,8	1,1	0,1	140,3
Toukoro	B-212	10,403611	- 3,864528	195	DGW12	2013/12/27	GWB	82	6,4	9,8	5,2	0,8	0,4	0,1	73,2
Noumoutiéougou	B-213	9,917306	- 4,276389	184	DGW13	2013/12/27	GWB	67	50,5	114,9	27,0	30,8	48,9	35,2	268,4
Mangodara	B-214	9,905611	- 4,355611	196	DGW14	2013/12/27	GWB	61	58,8	128,4	53,1	9,2	111,5	38,7	274,5
Logogniégnè	B-215	9,902528	- 4,520278	194	DGW15	2013/12/27	GWB	62	50,3	140,4	44,4	16,2	107,5	37,6	187,1
Timperba	B-216	10,156861	- 4,903583	197	DGW16	2013/12/27	GWB	73	1,9	9,7	14,9	2,8	0,9	0,1	73,2
Ziéougou	B-217	10,404611	- 5,060028	298	DGW17	2013/12/28	GWB	64	5,4	11,3	12,7	3,3	0,3	0,1	91,5
Dakoro	B-218	10,448778	- 5,152667	241	DGW18	2013/12/28	GWB	74	9,9	13,3	10,1	1,5	1,3	2,1	103,7
Fourkoura	B-219	10,329722	- 5,374139	217	DGW19	2013/12/28	GWB	66	1,8	7,3	11,2	3,4	0,1	0,1	61,0

Nom du site d'échantillonnage	Code du site	Latitude	Longitude	Altitude	Nom de l'échantillon	Date d'échantillonnage	Type d'échantillon	Profondeur maximum	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>
Loumana	B-220	10,578694	- 5,354750	280	DGW20	2013/12/28	GWB	68	16,8	28,1	11,5	3,2	5,5	0,2	146,4
Sindou	B-221	10,655556	- 5,162917	260	DGW21	2013/12/28	GWB	82	21,3	57,3	49,0	73,8	89,4	31,9	122,0
Sindou	B-222	10,657000	- 5,161722	270	DGW22	2013/12/28	GWB	76	26,6	126,0	52,1	58,8	88,9	47,7	158,6
Sindou	B-223	10,668972	- 5,173250	236	DGW23	2013/12/28	GWB	40	1,0	4,0	0,9	0,4	0,2	0,1	15,0
Kolasso	B-224	10,732194	- 5,263472	280	DGW24	2013/12/28	GWB	45	0,4	0,9	0,9	0,4	0,5	0,1	6,1
Kankalaba	B-225	10,757472	- 5,284250	286	DGW25	2013/12/29	GWB	39	1,9	9,8	1,1	1,4	0,8	0,1	36,6
Tourny	B-226	10,721528	- 5,118694	268	DGW26	2013/12/29	GWB	40	0,6	2,5	1,1	2,1	0,1	0,1	15,5
Douna	B-227	10,621389	- 5,089417	279	DGW27	2013/12/29	GWB	62	9,5	14,7	10,5	2,9	0,1	0,1	128,1
Wolonkoto	B-228	10,677139	- 4,988000	278	DGW28	2013/12/29	GWB	37	3,9	8,3	1,8	1,1	0,1	0,1	48,8
Toumousseni	B-229	10,581556	- 4,927194	263	DGW29	2013/12/29	GWB	51	12,9	16,9	10,6	3,1	0,2	0,1	146,4
Moussodougou	B-230	10,830389	- 4,940528	250	DGW30	2013/12/29	GWB	72	0,4	0,8	0,8	0,7	0,3	0,1	6,1
Bendougou	B-231	10,977278	- 4,867250	246	DGW31	2013/12/29	GWB	85	0,8	2,5	5,7	3,3	8,0	0,1	15,0
Potan	B-232	10,938056	- 4,796833	235	DGW32	2013/12/29	GWB	76	0,3	1,0	0,6	0,5	0,1	0,1	6,1
Kotoudéni	B-233	10,950972	- 5,020750	190	DGW33	2013/12/30	GWB	54	10,6	21,1	5,0	2,7	0,1	0,1	128,1
Kotoura	B-234	10,969944	- 5,277639	191	DGW34	2013/12/30	GWB	44	0,4	1,4	1,0	0,6	0,1	0,1	6,1
Oulonkoto	B-235	11,099167	- 5,147778	171	DGW35	2013/12/30	GWB	58	19,9	35,1	6,4	11,6	0,5	8,0	225,7
Soungalobougou	B-236	11,298611	- 5,105556	161	DGW36	2013/12/30	GWB	45	1,9	3,7	0,9	0,9	0,1	0,1	24,4
Fanfiéla	B-237	11,633333	- 5,283333	220	DGW37	2013/12/30	GWB	51	0,9	3,5	1,6	1,0	0,1	0,1	21,0
Banzon	B-238	11,325528	- 4,796806	200	DGW38	2013/12/30	GWB	26	1,6	3,4	1,2	3,2	0,1	0,1	24,4
Djigouèra	B-239	11,158889	- 4,875833	241	DGW39	2013/12/30	GWB	56	0,7	1,6	0,7	9,0	0,1	0,1	24,4

Nom du site d'échantillonnage	Code du site	Latitude	Longitude	Altitude	Nom de l'échantillon	Date d'échantillonnage	Type d'échantillon	Profondeur maximum	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>
Koumi	B-240	11,133583	- 4,428944	183	DGW40	2013/12/30	GWB	61	3,6	6,5	3,2	14,5	4,2	2,0	29,0
Kokorowé	B-241	11,179306	- 4,443333	231	DGW41	2014/01/06	GWB	86	1,9	3,6	0,8	6,7	0,1	0,1	30,5
Satiri	B-242	11,420778	- 4,103222	254	DGW42	2014/01/06	GWB	65	15,1	33,2	1,3	2,4	0,1	0,8	164,7
Bobo Dioulasso	B-243	11,177528	- 4,296278	261	DGW43	2014/01/06	GWB	118	1,1	3,0	0,9	1,6	0,1	0,1	18,3
Sirakélé	B-244	12,248083	- 3,136444	300	BGW01	2014/01/06	GWB	58	1,5	5,7	2,2	8,8	2,9	0,7	30,5
Kongosso	B-245	12,156722	- 3,164500	295	BGW02	2014/01/06	GWB	62	8,6	21,2	13,1	2,2	1,2	1,9	122,0
tounou	B-246	11,995944	- 3,349611	260	BGW03	2014/01/06	GWB	64	48,6	44,8	35,2	3,3	13,1	43,5	280,6
fakéna	B-247	12,021833	- 3,628111	310	BGW04	2014/01/06	GWB	56	8,2	16,3	1,4	6,0	0,1	0,1	95,0
ouarkoye	B-248	12,088028	- 3,668750	255	BGW05	2014/01/06	GWB	61	1,2	4,2	1,3	3,1	0,1	0,1	24,4
dampan	B-249	11,853528	- 3,749778	240	BGW06	2014/01/07	GWB	68	32,3	60,5	26,7	125,4	39,7	68,3	128,1
pié	B-250	12,175194	- 3,445889	257	BGW07	2014/01/07	GWB	58	0,9	2,9	1,1	0,8	0,1	0,1	18,3
koukatenga	B-251	12,348417	- 3,539556	270	BGW08	2014/01/07	GWB	50	0,1	1,2	2,0	0,3	0,1	0,1	8,5
dédougou	B-252	12,452861	- 3,429778	265	BGW09	2014/01/07	GWB	100	35,4	9,8	3,1	7,9	0,1	1,8	189,1
bagala	B-253	12,512556	- 3,555389	284	BGW10	2014/01/07	GWB	47	51,0	17,4	12,5	2,3	0,2	19,1	268,5
bendougou	B-254	12,471528	- 3,606806	276	BGW11	2014/01/07	GWB	85	28,2	28,1	3,2	3,3	0,2	2,6	195,2
sanaba	B-255	12,403528	- 3,814528	245	BGW12	2014/01/07	GWB	94	0,7	2,6	1,2	0,4	0,1	0,1	14,0
yasso	B-256	12,364333	- 4,032667	260	BGW13	2014/01/07	GWB	53	27,0	37,4	2,3	4,4	0,2	23,4	213,5
balavé	B-257	12,378306	- 4,158056	248	BGW14	2014/01/08	GWB	49	0,5	3,3	2,2	1,9	0,1	0,8	18,3
tansila	B-258	12,421056	- 4,384722	255	BGW15	2014/01/08	GWB	79	1,1	3,3	1,1	1,3	0,1	0,1	18,3
toula	B-259	12,616972	- 4,320000	283	BGW16	2014/01/08	GWB	67	11,2	26,4	4,5	13,5	14,2	0,2	18,3

Nom du site d'échantillonnage	Code du site	Latitude	Longitude	Altitude	Nom de l'échantillon	Date d'échantillonnage	Type d'échantillon	Profondeur maximum	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>
féléwé	B-260	12,666611	- 4,252444	275	BGW17	2014/01/08	GWB	59	0,5	2,1	3,6	2,1	0,5	1,0	18,3
ben	B-261	12,700028	- 4,351556	264	BGW18	2014/01/08	GWB	62	8,3	24,4	6,2	40,5	12,6	9,6	48,8
mollé	B-262	11,932583	- 4,318889	292	BGW19	08/01/2014	GWB	57	0,2	0,9	1,6	0,7	0,1	0,1	9,0
kouka	B-263	11,901889	- 4,341528	244	BGW20	08/01/2014	GWB	57	4,8	11,3	1,2	1,4	0,1	0,4	57,0
dissankuy	B-264	12,205028	- 4,043361	282	BGW21	08/01/2014	GWB	56	1,6	5,6	3,8	1,5	3,3	0,5	15,0
bourasso	B-265	12,633944	- 3,709389	263	BGW22	09/01/2014	GWB	40	32,6	17,7	7,1	2,2	0,1	5,6	201,3
dokuy	B-266	12,930111	- 4,178556	246	BGW23	09/01/2014	GWB	91	1,0	2,8	5,8	5,2	3,6	0,1	15,0
kononiba	B-267	12,825861	- 4,015917	251	BGW24	09/01/2014	GWB	58	22,1	33,5	3,2	2,2	1,6	32,1	148,0
teni	B-268	12,939917	- 4,086417	238	BGW25	09/01/2014	GWB	49	22,4	36,5	4,0	3,6	0,5	6,0	201,3
niankouini	B-269	12,970500	- 3,958306	275	BGW26	2014/01/09	GWB	56	1,6	6,4	1,4	0,9	0,1	0,9	30,5
bomborokuy	B-270	13,006972	- 3,961889	262	BGW27	2014/01/09	GWB	67	31,0	40,7	7,8	7,8	4,1	12,1	231,8
kolokan	B-271	13,081167	- 4,271222	249	BGW28	09/01/2014	GWB	55	1,2	2,3	2,9	1,6	0,4	0,1	12,2
soyé	B-272	13,307278	- 4,029000	280	BGW29	2014/01/09	GWB	86	8,5	17,2	6,0	4,0	6,1	7,8	54,9
kolokan goure diallo	B-273	13,283472	- 3,872306	267	BGW30	2014/01/09	GWB	78	14,9	32,6	7,3	11,9	11,0	8,3	36,6
gassan	B-274	12,809278	- 3,205500	248	BGW31	2014/01/10	GWB	84	0,6	2,2	1,2	0,5	0,1	0,1	10,5
touaré	B-275	13,058111	- 2,757611	239	BGW32	2014/01/10	GWB	54	46,8	130,1	39,2	15,3	45,5	62,8	109,8
tourouba	B-276	13,261694	- 2,544750	277	BGW33	2014/01/10	GWB	62	99,1	129,6	66,7	25,3	63,1	143,9	109,8
bangasso	B-277	13,314222	- 2,910250	261	BGW34	2014/01/10	GWB	68	8,5	18,0	17,1	5,0	4,3	3,6	67,1
sinzié	B-278	13,601944	- 2,993833	250	BGW35	2014/01/10	GWB	65	5,4	18,0	3,2	5,3	3,7	4,3	42,2
toungaré	B-279	13,271111	- 3,099639	286	BGW36	2014/01/10	GWB	64	9,9	39,9	3,0	53,9	19,9	11,4	54,9

Nom du site d'échantillonnage	Code du site	Latitude	Longitude	Altitude	Nom de l'échantillon	Date d'échantillonnage	Type d'échantillon	Profondeur maximum	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>
daka	B-280	13,163222	- 3,038083	248	BGW37	2014/01/10	GWB	59	11,8	28,2	20,9	3,8	0,8	6,8	128,1
diouroum	B-281	12,992667	- 3,115444	255	BGW38	2014/01/10	GWB	68	60,8	103,2	27,3	8,1	25,4	36,9	164,7
kassoum	B-282	13,072722	- 3,305583	274	BGW39	2014/01/20	GWB	61	16,6	31,6	1,2	4,6	0,1	3,6	146,4
niassan	B-283	13,093778	- 3,428611	244	BGW40	2014/01/20	GWB	67	36,5	30,8	13,7	4,6	0,8	59,3	195,2
débé	B-284	13,068833	- 3,428944	253	BGW41	2014/01/20	GWB	85	17,1	30,6	8,3	4,9	1,1	1,3	164,7
yanan	B-285	12,976611	- 3,444500	262	BGW42	2014/01/20	GWB	74	70,5	210,6	44,7	189,9	96,8	140,5	103,7
toroba	B-286	12,461278	- 3,235778	284	BGW43	2014/01/20	GWB	68	30,5	17,6	6,2	6,3	0,2	0,2	195,2
siguinvoussé	B-287	12,516750	- 3,080917	289	BGW44	2014/01/20	GWB	70	7,3	15,3	10,0	2,6	0,1	2,9	103,7
gossina	B-288	12,523806	- 2,874083	290	BGW45	2014/01/20	GWB	65	7,2	21,2	13,9	2,6	2,6	10,9	85,4
toma	B-289	12,760389	- 2,895250	247	BGW46	2014/01/20	GWB	61	16,6	37,2	20,2	6,2	8,0	7,3	103,7
yaba	B-290	12,864778	- 2,836944	261	BGW47	2014/01/20	GWB	64	3,2	14,0	13,7	2,5	0,1	0,1	79,3
bagnetenga	B-291	12,864028	- 2,745833	255	BGW48	2014/01/20	GWB	67	10,1	19,4	11,7	3,4	0,1	4,5	109,8
doubaré	B-292	13,861528	- 1,862750	236	BGW49	2014/01/20	GWB	88	2,0	7,3	2,8	0,9	0,1	0,1	24,4
yensé	B-293	13,898000	- 2,843806	242	BGW50	2014/01/20	GWB	68	3,2	9,7	5,3	0,9	0,5	0,1	42,7
niongono	B-294	14,088667	- 2,584806	280	BGW51	2014/01/20	GWB	73	56,2	19,2	17,8	10,8	8,0	20,2	189,1

Code du site	NO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CO <sub>3</sub>	Fe_tot	CE	T	pH	Alcalinité	TDS	<sup>18</sup> O	H2	H3	H3_ERR
B-201	1,3	2,0	ND	< 0,02	30	30,9	4,5	90	27	-4,84	-29,6		
B-202	1,0	7,4	ND	< 0,02	426	30,6	7,1	222	302	-4,94	-33,5	2,1	0,3
B-203	17,7	5,7	ND	< 0,02	564	30,3	6,9	275	415	-4,67	-28,7		
B-204	0,2	6,1	ND	< 0,02	457	30,5	7,2	242	347	-5,17	-31,5	0,5	0,3
B-205	99,2	13,1	ND	< 0,02	555	26,4	6,6	144	428	-4,55	-26,6		
B-206	0,1	5,1	ND	< 0,02	111	27,2	5,6	51	94	-4,79	-29,0		
B-207	88,4	3,3	ND	< 0,02	304	26,4	5,5	22	209	-4,60	-30,4	3,9	0,2
B-208	21,4	3,8	ND	< 0,02	69	27,5	5,0	1	50	-4,74	-27,3	3,2	0,3
B-209	0,7	8,6	ND	< 0,02	67	30,3	5,1	3	57	-4,49	-25,8	0,4	0,3
B-210	0,1	13,3	ND	< 0,02	195	29,8	6,1	90	167	-4,63	-28,8		
B-211	0,1	12,3	ND	< 0,02	220	30,5	6,1	114	191	-3,44	-22,8	0,6	0,2
B-212	0,1	15,9	ND	< 0,02	110	31,1	5,4	52	96	-3,36	-21,0	1,3	0,3
B-213	274,5	13,7	ND	< 0,02	1192	29,5	6,6	284	850	-3,50	-20,1	3,1	0,3
B-214	251,1	20,0	ND	< 0,02	1332	29,7	6,8	263	925	-3,75	-30,0		
B-215	335,0	18,7	ND	< 0,02	1364	29,7	6,4	185	918	-4,45	-29,2	2,4	0,3
B-216	2,9	13,1	ND	< 0,02	118	28,4	6,2		106	-4,33	-27,9	0,8	0,3
B-217	1,1	13,1	ND	< 0,02	137	26,8	5,8	64	126	-3,81	-25,1		
B-218	2,1	13,1	ND	< 0,02	190	25,1	6,2	93	144	-4,39	-28,1		
B-219	0,1	6,3	ND	< 0,02	88	29,2	5,0	43	85	-4,69	-29,2	1,3	0,2
B-220	12,6	11,5	12,0	< 0,02	307	28,7	4,6	139	236	-4,81	-29,8	1,8	0,3
B-221	173,5	4,9	12,0	< 0,02	910	29,2	6,2	128	630	-3,88	-23,3		
B-222	288,5	5,5	12,0	< 0,02	1168	30,0	6,4	149	859	-4,07	-23,2		
B-223	5,1	4,1	ND	< 0,02	26	31,7	4,2	4	27	-4,38	-25,2		
B-224	0,1	4,2	ND	< 0,02	19	30,5	3,6	2	9	-4,61	-25,6		
B-225	5,3	6,9	ND	< 0,02	56	28,2	4,9	19	57	-4,75	-28,7	4,7	0,3
B-226	0,1	3,9	ND	< 0,02	19	30,4	4,3	6	22	-4,86	-30,1		
B-227	0,1	19,6	ND	< 0,02	189	31,6	6,2	89	166	-4,68	-28,9		

Code du site	NO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CO <sub>3</sub>	Fe_tot	CE	T	pH	Alcalinité	TDS	<sup>18</sup> O	H2	H3	H3_ERR
B-228	0,1	4,9	ND	< 0,02	69	30,7	5,3	30	64	-4,72	-28,8		
B-229	0,1	16,2	ND	< 0,02	214	30,2	6,1	108	190	-4,37	-24,8	2,0	0,3
B-230	1,1	2,3	ND	< 0,02	18	27,3	3,7		10	-5,19	-32,6	8,7	0,3
B-231	2,3	2,4	ND	< 0,02	58	27,2	4,8	5	38	-4,86	-29,3		
B-232	0,1	2,4	ND	< 0,02	12	28,0	4,7		9	-4,47	-28,2		
B-233	0,1	15,8	ND	< 0,02	205	29,2	6,6	11	168	-4,80	-30,4		
B-234	3,1	2,4	ND	< 0,02	21	29,6	4,7	2	13	-4,43	-26,9	3,9	0,3
B-235	0,5	11,1	ND	< 0,02	376	29,6	7,6	174	308	-5,59	-37,7		
B-236	0,1	3,7	ND	< 0,02	28	30,0	5,2	11	32	-5,03	-31,0	1,1	0,2
B-237	0,1	2,2	ND	< 0,02	28	31,9	5,2	7	28	-5,06	-29,6	0,9	0,3
B-238	1,4	3,2	ND	< 0,02	33	28,4	5,4		35	-4,51	-29,2	1,2	0,2
B-239	0,1	16,5	ND	< 0,02	40	28,4	5,1	14	37	-4,00	-25,1	0,6	0,3
B-240	30,4	3,5	ND	< 0,02	124	27,6	5,2	13	93	-4,63	-28,0		
B-241	0,1	8,9	ND	< 0,02	47	26,9	5,4	18	44	-4,74	-30,6		
B-242	1,0	3,5	ND	< 0,02	286	28,5	6,6	143	219	-4,53	-30,0	1,7	0,3
B-243	0,1	6,9	ND	< 0,02	22	29,6	4,9	5	25	-4,90	-30,4	1,1	0,2
B-244	8,8	6,9	ND	< 0,02	74	28,3	5,5	15	61	-4,40	-27,2	4,1	0,3
B-245	9,0	34,9	ND	< 0,02	242	27,3	6,0	92	179	-4,91	-31,3		
B-246	82,1	18,9	ND	< 0,02	1101	28,1	7,1	396	551	-4,66	-28,2	3,4	0,3
B-247	1,6	10,6	ND	< 0,02	156	30,2	6,2	67	129	-4,54	-30,0		
B-248	0,1	7,3	ND	< 0,02	34	30,4	5,2	11	35	-4,93	-32,1	0,2	0,2
B-249	279,1	6,4	ND	< 0,02	1317	27,7	7,1	219	760	-4,32	-26,6	3,1	0,3
B-250	0,1	6,3	ND	< 0,02	21	30,3	5,0	3	24	-5,24	-32,5		
B-251	0,7	6,6	ND	< 0,02	15	30,1	4,5		13	-4,59	-33,4	1,1	0,2
B-252	0,1	9,8	12,0	< 0,02	589	29,6	7,0	297	259	-4,81	-33,8		
B-253	16,5	9,7	6,0	< 0,02	795	30,9	7,0	397	394	-5,02	-29,6		
B-254	22,1	5,1	ND	< 0,02	451	29,5	6,9	197	283	-5,06	-30,4		

Code du site	NO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CO <sub>3</sub>	Fe_tot	CE	T	pH	Alcalinité	TDS	<sup>18</sup> O	H2	H3	H3_ERR
B-255	0,1	2,8	ND	< 0,02	18	30,8	4,8		19	-4,80	-31,2		
B-256	1,6	3,4	ND	< 0,02	469	32,1	7,0	195	310	-5,48	-33,3	1,8	0,3
B-257	0,8	4,6	ND	< 0,02	24	30,3	5,2	74	28	-5,23	-33,5	2,3	0,3
B-258	0,1	6,5	ND	< 0,02	25	29,9	4,8	5	25	-5,16	-34,3	1,3	0,3
B-259	122,2	5,1	ND	< 0,02	314	29,9	4,7	16	211	-5,35	-32,2		
B-260	1,2	8,7	ND	< 0,02	24	30,6	4,8		29	-5,02	-29,9		
B-261	96,9	8,1	ND	< 0,02	367	29,8	5,6	28	247	-5,23	-33,8		
B-262	0,7	3,7	ND	< 0,02	14	29,3	4,7		13	-4,11	-26,9	3,0	0,3
B-263	1,0	8,0	ND	< 0,02	87	29,5	5,6	34	77	-4,89	-32,2		
B-264	2,6	9,2	6,0	< 0,02	38	28,2	5,2	11	40	-4,21	-28,4	3,4	0,3
B-265	1,8	15,7	6,0	< 0,02	547	30,6	7,2	261	274	-4,47	-31,1	2,3	0,3
B-266	18,0	2,4	ND	< 0,02	58	29,4	4,7		51	-5,03	-32,8		
B-267	12,6	51,1	ND	< 0,02	414	28,7	6,8	150	255	-4,32	-28,3	2,8	0,3
B-268	8,9	28,0	ND	< 0,02	394	29,6	7,2	189	283	-5,27	-36,5		
B-269	2,0	3,8	ND	< 0,02	48	28,3	5,8	17	44	-4,32	-29,5		
B-270	32,8	10,7	ND	< 0,02	594	30,2	7,1	242	368	-4,84	-33,2	1,2	0,3
B-271	8,9	4,1	ND	< 0,02	35	30,3	4,7		30	-4,92	-31,5	3,7	0,3
B-272	31,3	8,0	ND	< 0,02	205	30,4	5,9	34	136	-4,69	-28,8		
B-273	91,5	7,4	18,0	< 0,02	368	30,2	6,1	36	232	-4,73	-30,8	4,0	0,3
B-274	2,4	5,8	ND	< 0,02	18	30,7	4,7	2	18	-4,50	-29,5	1,6	0,3
B-275	432,7	25,4	ND	< 0,02	1168	29,7	6,4	90	882	-4,72	-28,9	3,2	0,3
B-276	689,1	21,5	ND	< 0,02	1856	28,9	6,3		1326	-4,98	-30,4	0,8	0,3
B-277	58,6	26,0	ND	< 0,02	250	32,4	5,9		182	-4,71	-27,7	2,6	0,3
B-278	37,4	9,4	ND	< 0,02	149	30,7	6,5		120	-3,36	-22,1	3,6	0,3
B-279	125,6	13,8	6,0	< 0,02	470	31,3	6,4		325	-4,16	-26,2		
B-280	38,2	32,4	6,0	< 0,02	311	31,2	7,6		245	-4,70	-31,2	4,9	0,3
B-281	346,9	33,6	24,0	< 0,02	1045	30,6	6,6		797	-4,59	-28,6		
B-282	0,1	10,8	12,0	< 0,02	265	31,7	6,7		216	-5,24	-34,2		

Code du site	NO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CO <sub>3</sub>	Fe_tot	CE	T	pH	Alcalinité	TDS	<sup>18</sup> O	H2	H3	H3_ERR
B-283	5,5	8,3	6,0	< 0,02	632	27,7	7,4		352	-2,20	-18,8	1,8	0,2
B-284	8,8	8,0	6,0	< 0,02	356	26,4	7,0		243	-3,39	-23,6		
B-285	859,7	7,5	ND	< 0,02	2000	27,8	7,2		1716	-3,86	-24,0		
B-286	0,2	7,8	12,0	< 0,02	481	31,5	7,5		268	-5,84	-36,2	1,7	0,3
B-287	0,8	26,0	ND	< 0,02	157	31,0	6,4		143	-5,03	-29,7		
B-288	27,1	26,3	ND	< 0,02	226	30,1	6,6		171	-4,37	-25,8	1,3	0,3
B-289	111,1	33,8	ND	< 0,02	445	32,8	6,7		310	-4,99	-30,5		
B-290	11,3	18,3	ND	< 0,02	147	32,0	6,3		124	-4,93	-30,4		
B-291	16,7	24,2	ND	< 0,02	233	31,0	6,6		176	-4,44	-27,5	3,2	0,3
B-292	14,2	2,9	ND	< 0,02	58	32,0	5,8		52	-4,13	-28,0	4,7	0,3
B-293	12,3	3,0	ND	< 0,02	91	32,9	5,6		75	-4,38	-29,3	4,7	0,3
B-294	114,9	10,0	12,0	< 0,02	863	27,4	7,2		448	-4,46	-28,5	4,9	0,3

Code du site	MDT	EC_in_Lab	pH_in_Lab	<sup>18</sup> O	H2	H3	H3_ERR
B-501				-4,85	-33,7	-0,2	0,0
B-502				-3,74	-24,7	2,1	0,1
B-503				-5,58	-38,2	-0,3	0,0
B-504				-5,17	-33,2	0,6	0,0
D-501				-5,49	-38,5	-0,5	0,0
D-502				-5,00	-35,3	-0,7	0,0
B-505				-5,52	-33,3	0,3	0,0
D-503				-5,15	-29,5	3,0	0,1
D-504				-6,13	-36,1	7,0	0,1
D-505				-5,59	-33,8	1,9	0,1
D-506				-5,81	-35,1	3,4	0,1
D-507				-6,03	-38,0	-0,9	0,1
B-506				-1,44	-18,7	0,3	0,1
D-508				-4,37	-29,5	2,7	0,1
D-509				-4,18	-27,7	3,0	0,6
D-510				-3,02	-25,9	0,7	0,1
D-511				-5,15	-35,1	1,6	0,3
B-507				-5,90	-39,4	0,1	0,1
B-508				-1,89	-23,1	0,1	0,4
B-509				-0,79	-14,1	1,8	0,4
B-510				-5,51	-36,4	0,6	0,1
B-511				-5,37	-35,2	-0,7	0,2
B-512				-4,53	-31,2	-1,1	0,2
B-513				-4,91	-32,8	0,1	0,0
B-514				-6,30	-41,5	1,6	0,3
B-515				-5,35	-35,7	1,4	0,3
B-516				-4,29	-27,2	4,3	0,9

Code du site	MDT	EC_in_Lab	pH_in_Lab	<sup>18</sup> O	H2	H3	H3_ERR
B-517				-4,21	-25,7	2,1	0,4
B-518				-3,83	-25,6	4,7	0,9
D-512				-4,42	-30,7	2,6	0,5
R-502				-3,00	-18,3		
B-519	23	30,7	6,54	-5,02	-31,4	6,1	0,3
B-520	49	55,2	6,87	-4,80	-31,6	2,7	0,3
B-521	34	36,2	7,22	-4,79	-29,1	4,4	0,3
B-522	75	90,7	6,74	-4,73	-30,1	5,5	0,3
B-523	53	58,2	6,97	-4,52	-26,1	3,5	0,3
B-524	55	56,4	7,08	-5,26	-34,5	2,1	0,3
B-525	96	113,3	6,77	-5,21	-32,9	8,1	0,3
B-526	35	36,3	7,14	-5,54	-34,1	6,0	0,3
B-527	35	37,5	6,97	-4,49	-30,1	3,6	0,3
B-528	66	84,2	6,84	-5,14	-33,8	4,8	0,3
B-529	89	100,3	6,80	-5,26	-29,8	2,2	0,3
B-530	31	22	6,87	-5,14	-32,2	3,2	0,3
D-513	38	50,3	7,03	-5,76	-37,3	2,4	0,3
D-514	23	31,1	6,88	-4,98	-29,7	5,1	0,3
B-531	20	18	7,50	-4,88	-32,9	4,4	0,3
B-532	24	22	7,19	-4,27	-29,9	5,9	0,3
B-533	63	67	7,27	-5,68	-40,8	3,7	0,3
D-515	16	12	6,99	-5,30	-33,6	2,0	0,3
D-516	259	322	7,57	-6,04	-40,8	0,9	0,3
D-517	70	101	7,83	-4,40	-30,9	3,0	0,3
D-518	24	15	7,36	-5,47	-34,4	5,4	0,3
D-519	32	27	7,44	-5,17	-34,1	4,1	0,3
D-520	29	21	7,53	-6,03	-40,3	2,4	0,3

Code du site	MDT	EC_in_Lab	pH_in_Lab	<sup>18</sup> O	H2	H3	H3_ERR
D-521	28	27	7,38	-4,18	-27,5	6,4	0,3
D-522	37	27	7,35	-5,27	-34,0	2,7	0,3
D-523	26	20	7,34	-4,83	-34,4	5,3	0,3
B-534	29	28	7,34	-4,56	-34,3	6,5	0,3
B-535	39	30	7,18	-5,08	-38,5	4,8	0,3
B-536	38	31	7,23	-5,24	-36,4	6,0	0,3
B-537	30	22	7,33	-4,89	-37,8	5,5	0,3
B-538	40	33,0	7,2	-5,10	-34,5	2,0	0,3
B-539	24	17	7,27	-5,82	-39,6	0,8	0,3
B-540	92	99	7,16	-5,38	-35,6	6,3	0,3
B-541	184	240	7,18	-5,00	-29,7	1,2	0,3
B-542	230	291	7,24	-6,24	-37,6	1,7	0,3
B-543	120	164	7,49	-6,35	-39,7	2,6	0,3
B-544	72	73	7,35	-6,32	-39,6	9,1	0,3
B-545	64	62	7,29	-6,64	-41,9	0,4	0,3
D-524	271	309	7,85	-6,72	-42,8	1,7	0,3
R-501	73	81	7,08	0,48	-8,5	6,7	0,3
D-525	801	1489	7,82	-4,68	-37,9	3,5	0,3
B-546	112	59	7,81	-3,50	-23,2	2,0	0,3
B-547	141	44,7	8,00	-1,21	-11,1	3,7	0,3
B-548	88	98,2	7,70	-0,40	-8,8	2,7	0,3
B-549	77	96,7	7,65	1,34	1,0	2,7	0,3
B-550	107	135,8	7,73	-0,03	-6,0	1,6	0,3
B-551	198	304	7,81	-1,11	-12,8	1,7	0,3
B-552	51	63	7,74	0,20	-5,0	3,0	0,3
R-503	48	49,1	7,11	-1,14	-11,7	3,5	0,3
B-553	122	159	7,78	-1,34	-11,5	3,2	0,3

Code du site	MDT	EC_in_Lab	pH_in_Lab	<sup>18</sup> O	H2	H3	H3_ERR
B-554	1327	213	7,98	-3,85	-31,7	3,4	0,3
B-555	756	1418	7,90	-5,26	-42,2	1,0	0,3
D-526	373	481	8,01	-5,60	-40,6	0,9	0,3
D-527	83	163,4	7,62	-6,37	-48,4	0,5	0,2
D-528	1545	231	8,01	-4,32	-31,3	2,9	0,3
D-529	500	696	8,02	-1,91	-18,6	0,4	0,3
B-556	1008	1640	8,38	-4,15	-30,7	3,4	0,3
B-557	416,3	801	7,86	-5,26	-37,2	1,08	0,31
B-558	576,7	1161	8,05	-4,07	-30,7	2,22	0,34
B-559	300 675	487	8,08	-7,19	-51,5	-0,24	0,30
B-560	111 113	157,7	7,33	-5,24	-33,1	3,63	0,33
B-561	268,24	372	7,91	-5,75	-38,6	2,08	0,33
B-562	271 045	407	7,86	-6,39	-44,3	0,73	0,32
B-563	115 739	143,6	7,72	-5,30	-33,9	3,58	0,34
B-564	59,72	77,3	7,71	-5,19	-34,0	1,42	0,29
B-565	138 293	178	7,41	-5,94	-37,9	2,62	0,34
D-530	36	36,3	7,26	-5,40	-41,4	0,2	0,3
D-531	1099	1847	8,02	-4,83	-32,7	1,5	0,3
D-532	1046	1374	8,19	-5,88	-46,6	2,7	0,3
D-533	623	1118	7,77	-1,07	-16,8	3,6	0,3
D-534	1988	2660	7,76	-4,52	-32,5	2,0	0,3
D-535	624,19	1024	7,95	-4,78	-34,0	1,51	0,35
B-566	94 552	121,1	7,50	-5,61	-39,2	0,84	0,32
B-567	218,48	278	7,98	-6,04	-43,2	0,37	0,22
B-568	135 112	187,6	7,77	-5,46	-36,8	3,15	0,32
B-569	167 636	356	9,35	-5,89	-41,8	0,51	0,34
B-570	269 895	393	8,27	-3,32	-21,3	1,58	0,33

Code du site	MDT	EC_in_Lab	pH_in_Lab	<sup>18</sup> O	H2	H3	H3_ERR
D-536	204 075	300	7,26	-5,51	-35,6	2,42	0,27
B-571	681	953	8,08	-2,59	-23,1	2,4	0,3
B-572	204 341	256	7,74	-6,09	-41,9	-0,14	0,31

**Burkina Faso : 2<sup>e</sup> campagne**

Nom de l'échantillon	(nom local)	Aquifère	a)	Latitude N/S DDMMSS.DD		Longitude W/E DDMMSS.DD		Altitude (m)	Cond μS/cm	Temp. °C	pH unités	Alc mg/l
Doubaré	A8	Sédimentaire	0	13°51'41,6''N	13,86138889	02°51'45,8''O	-2,8625	264	58,7	26	5,7	0,28
Yensé	A9	Sédimentaire	68	13°54'33,4''N	13,90916667	02°50'32,6''O	-2,84222222	268	426	31,3	6,7	4,7
ZiéDougou	A10	Sédimentaire	64	10°24' 16,4''N	10,40444444	05°03'36,1''O	-5,06	301	147	28,4	6,43	1,61
Badara	A11	Sédimentaire	0	10°27' 32,8''N	10,45888889	05°05'31,7''O	-5,09194444	289	64	20,5	7,33	0,34
Badara	A12	Sédimentaire	71	10°26' 55,7''N	10,44861111	05°09'09,8''O	-5,1525	313	221	28,3	6,92	2,11
Tébéna	A13	Sédimentaire	66	10°19' 47,0''N	10,32972222	05°22'26,9''O	-5,37388888	323	105,8	28,8	6,5	1,01
Loumana	A14	Sédimentaire	68	10°34' 43,4''N	10,57861111	05°21'17,0''O	-5,35472222	329	342	29,8	6,40	3,01
Kankalaba	A15	Sédimentaire	39	10°45' 27,0''N	10,7575	05°17'03,3''O	-5,28416666	513	60	29	6,92	0,45
Tourny	A16	Sédimentaire	40	10°46' 19,7''N	10,77194444	05°09'23,9''W	-5,15638888	477	39,9	23,5	7,20	0,39
Douna	A17	Sédimentaire	62	10°40' 40,7''N	10,67777778	05°06'08,2''W	-5,10222222	320	32,6	21,4	7,50	0,35
Sirifessora secteur 3	A18	Sédimentaire	17	10°39' 25,3''N	10,65694444	05°09'42,0''O	-5,16166666	346	1439	27,2	5,98	3,7
Sindou	A19	Sédimentaire	21	10°39' 20,2''N	10,65555556	05°09'46,3''O	-5,16277777	335	1109	27,5	7,22	2,6
Sabaribougou	A20	Sédimentaire	40	10°37' 16,9''N	10,62111111	05°05'21,8''O	-5,08916666	318	190,3	29,6	6,94	2
Niangoloko secteur 03	A21	Sédimentaire	0	10°17' 12,9''N	10,28666667	04°54'53,9''O	-4,91472222	341	180,4	28,7	7,17	1,12
Tounfadéni	A22	Sédimentaire	60	10°09' 24,7''N	10,15666667	04°54'12,9''O	-4,90333333	311	125,9	30	6,56	1,18
Timperba école	A23	Sédimentaire	73	10°09' 55,9''N	10,16527778	04°54'14,1''O	-4,90388888	328	166	30,5	6,80	1,58
Idoro	A24	Sédimentaire	68	10°15' 17,2''N	10,25472222	04°51'38,8''O	-4,86055555	346	601	29,6	7,8	1,61
Ouangolodougou	A25	Sédimentaire	71	10°06' 21,0''N	10,10583333	04°46'57,3''O	-4,7825	328	998	29,6	6,80	3,48
NASSO	C17	Sédimentaire	0	11°11'27,1''N	11,19083333	04°26'25,9''O	-4,44027777	349	80,1	26,9	5 816	0,95
NASSO F1	C18	Sédimentaire	110	11°11'26,4'' N	11,19055556	04°26'03,7''O	-4,43416666	354	134,2	29,8	6,39	1,45
NASSO F3	C 19	Sédimentaire	95	11°11'43,7'' N	11,19527778	04°26'03,6''O	-4,43416666	351	17,5	30,9	5,01	0,27
NASSO F4	C20	Sédimentaire	86	11°11'58,3''N	11,19944444	04°26'02,3''O	-4,43388888	350	15,2	31,5	4,9	0,21
NASSO F2	C21	Sédimentaire	158	11°11'16,5''N	11,18777778	04°26'11,4 O	-4,43638889	355	98,7	32,4	5,92	0,92

Nom de l'échantillon	(nom local)	Aquifère	a)	Latitude		Longitude		Altitude (m)	Cond $\mu$ S/cm	Temp. °C	pH unités	Alc mg/l
				N/S DDMSS.DD		W/E DDDMMSS.DD						
NASSO	C22	Sédimentaire	0	11°10'45,4"N	11,17916667	04°26'36,1"W	-4,44333333	359	46,9	30	5,25	0,61
TOUKORO-SAMBLA	C23	Sédimentaire	0	11°11'21,0"N	11,18916667	04°31'03,3"W	-4,5175	354	591	25,4	7,02	6,9
NOUMOUSOBA	C24	Sédimentaire	0	11°08'53,1"N	11,14805556	05°16'47,2"W	-5,27972222	340	46,1	22,2	5,56	0,42
KARTASSO	C25	Sédimentaire	65	11°08'54,8"N	11,14833333	05°15'15,6"W	-5,25416666	472	96,6	29,1	5,68	1,33
OULONKOTO	C26	Sédimentaire	49	11°05'57,0"N	11,09916667	05°05'52,0"W	-5,09777777	447	406	29,9	7,53	4,1
DJAN	C27	Sédimentaire	62	11°09'43,1"N	11,16194444	04°52'38,6"O	-4,87722222	414	613	30,6	7,1	6,69
MONDON	C28	Sédimentaire	0	11°10'05,4"N	11,16805556	04°48'58,1"W	-4,81611111	379	208	27,1	6,99	2,26
BAZON	C29	Sédimentaire	46	11°19'31,9"N	11,32527778	04°47'48,6"O	-4,79666667	380	32,1	28,7	5,24	0,29
SAMANDENIE	C30	Sédimentaire	0	11°27'46,2"N	11,46277778	04°27'51,6"O	-4,46416667	340	105,5	20,8	6,85	1,08
DINGASSO	C31	Sédimentaire	74	11°42'28,5"N	11,70777778	04°49'01,1"O	-4,81694444	337,7	631	27,3	7,65	7,04
DINGASSO	C32	Sédimentaire	76	11°42'28,5"N	11,70777778	04°49'01,1"O	-4,81694444	350	386	28,1	6,7	4,5
KOSSARA	C33	Sédimentaire	0	11°10'39,6"N	11,1775	04°43'36,1"O	-4,72666667	782	56,5	23,7	7,13	0,7
NASSO	C34	Sédimentaire	118	11°11'55,4"N	11,19861111	04°26'04,8"W	-4,43444444	346	20	31,1	4,63	0,16
NASSO	C35	Sédimentaire	98	11°11'56,8"N	11,19888889	04°26'03,3 O	-4,43416667	347	58,7	30,5	5,09	0,4
LERY	C36	Sédimentaire	0	12°45'04,2"N	12,75111111	03°26'10,0"O	-3,43611111	350	136,4	26,3	7,1	1,46
YARAN	C37	Sédimentaire	63	12°58'30,8"N	12 975	03°26'37,2"O	-3,44361111	264	730	30,04	7,2	5,87
DEBE	C38	Sédimentaire	30	13°04'07,9"N	13,06861111	03°25'44,6"W	-3,42888889	262	335	32,4	6,65	3,32
NIASSAN	C39	Sédimentaire	75	13°05'37,7"N	13,09361111	03°25'42,8"O	-3,42833333	261	626	31,8	7,1	6,03
DI	C40	Cristallin	0	13°12'24,9"N	13,20666667	03°24'09,8"O	-3,4025	263	162,1	27,2	7,55	1,76
KASSOUM	C41	Cristallin	56	13°04'21,8"N	13,0725	03°18'20,2 O	-3,30555555	285	324	32,2	6,46	3,23
GASSAN CSPS	C42	Cristallin	61	12°48'43,4"N	12,81194444	03°12'19,9"W	-3,20527778	272	16	30,07	5,4	0,33
Nowkuy	C43	Cristallin	0	12°30'18,2"N	12 505	03°33'13,3"W	-3,55361111	265	222	22,1	7,39	2,4
KODOUGA-BADALA	C44	Cristallin	30	12°30'37,8"N	12,51027778	03°33'42,6"O	-3,56166666	263	43,1	27,8	5,5	0,3

Nom de l'échantillon	Date d'échantillonnage	CE (µS/cm) lab	pH lab	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	F <sup>-</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	Na <sup>+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	TDS (mg/l)	<sup>2</sup> H	erreur	<sup>18</sup> O	erreur	<sup>3</sup> H	erreur
		Réf 20 °C	Unité pH	(mg/l)										%	<sup>2</sup> H	%	<sup>18</sup> O	UT	<sup>3</sup> H
A8	14 02 2016	53	7,05	15,1	< ND	1,43	16,53	< 0,01	2,74	1,29	1,43	5,04	43,56	-24,39	0,91	-3,98	0,18	1,66	0,3
A9	14 02 2016	425	8,48	244	< ND	6,68	5,04	8,92	10,37	3,27	21,29	46,33	345,88	-34,24	0,90	-5,72	0,19	0,34	0,3
A10	04 02 2016	136	7,64	87	0,13	0,44	0,66	< 0,01	11,97	3,13	4,76	9,29	117,24	-26,24	1,15	-4,92	0,17	3,97	0,3
A11	04 02 2016	28	7,01	18,3	< ND	0,84	< 0,01	< 0,01	1,44	1,33	1,07	2,19	25,18	-18,57	1,15	-2,75	0,15	2,46	0,3
A12	04 02 2016	188	7,72	115,9	< ND	1,55	1,27	< 0,01	11,66	1,67	10,54	11,61	154,21	-25,00	1,06	-4,76	0,12	1,29	0,3
A13	04 02 2016	86	7,48	53,9	< ND	0,29	< 0,01	< 0,01	10,73	3,24	1,37	5,38	74,92	-24,59	0,48	-4,64	0,16	1,72	0,3
A14	04 02 2016	327	7,78	164,7	< ND	9,85	16,46	1,06	13,23	3,48	18,32	25,31	252,42	-26,88	1,14	-4,20	0,10	0,77	0,3
A15	04 02 2016	54	7,6	30,5	< ND	1,34	5,23	< 0,01	1,18	1,13	1,49	7,38	48,25	-28,77	1,10	-4,46	0,12	3,43	0,3
A16	04 02 2016	31	7,2	23,1	< ND	0,62	< 0,01	< 0,01	1,87	2,15	1,32	2,93	31,98	-23,15	1,51	-3,78	0,15	2,69	0,3
A17	04 02 2016	30	7,01	18,3	< ND	1,02	2,22	< 0,01	1,88	2,40	1,39	2,73	29,94	-15,60	1,00	-2,56	0,05	1,69	0,3
A18	04 02 2016	1381	8,02	201,3	< ND	108,9 1	311,2 5	61,85	66,60	77,69	30,21	123,3 1	981,12	-22,60	1,10	-3,78	0,12	2,80	0,3
A19	04 02 2016	1084	7,78	140,3	< ND	101,6 8	214,5 5	45,09	56,27	96,55	24,16	64,15	742,75	-22,35	0,77	-3,51	0,18	2,67	0,3
A20	04 02 2016	184	7,23	109,8	< ND	0,55	< 0,01	< 0,01	11,77	3,23	8,95	12,91	147,22	-28,38	1,06	-4,82	0,19	0,65	0,3
A21	05 02 2016	173	7,01	91,4	0,24	2,66	4,94	1,89	16,96	2,82	3,46	14,62	138,74	-25,38	1,14	-4,33	0,11	0,57	0,3
A22	05 02 2016	118	7,16	73	0,20	0,93	2,89	< 0,01	14,66	2,44	1,85	7,86	103,63	-25,42	1,45	-4,26	0,11	0,03	0,3
A23	05 02 2016	156	7,21	97,6	< ND	0,90	1,84	< 0,01	18,08	3,27	2,05	11,76	135,49	-28,06	1,20	-4,69	0,17	0,21	0,3
A24	05 02 2016	554	8,01	103,7	<	30,06	155,2 3	14,88	40,54	3,99	5,47	58,85	412,71	-23,52	0,84	-4,46	0,16	2,21	0,3
A25	05 02 2016	934	7,36	201,3	< ND	83,66	225,4 1	40,01	51,27	2,83	45,76	96,83	747,07	-24,15	1,40	-4,14	0,19	1,40	0,3
C17	04 02 2016	75	7,13	48,8	< ND	0,52	< 0,01	< 0,01	0,95	2,72	4,17	6,82	63,97	-31,38	0,92	-5,34	0,19	0,54	0,3

Nom de l'échantillon	Date d'échantillonnage	CE (µS/cm) lab	pH lab	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	F <sup>-</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	Na <sup>+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	TDS (mg/l)	<sup>2</sup> H	erreur	<sup>18</sup> O	erreur	<sup>3</sup> H	erreur
		Réf 20 °C	Unité pH	(mg/l)										‰	<sup>2</sup> H	‰	<sup>18</sup> O	UT	<sup>3</sup> H
C18	04 02 2016	131	7,19	85,4	< ND	0,49	< 0,01	< 0,01	1,05	5,46	7,03	12,30	111,72	-31,12	0,50	-4,95	0,15	0,66	0,3
C19	04 02 2016	16	6,01	12,2	< ND	0,16	< 0,01	< 0,01	0,71	1,01	0,92	1,83	16,82	-32,79	1,32	-4,22	0,15	0,08	0,3
C20	04 02 2016	13	7,22	8,2	< ND	0,35	< 0,01	< 0,01	0,77	0,57	0,45	1,10	11,43	-30,69	1,30	-5,25	0,12	0,32	0,3
C21	04 02 2016	91	7,39	51,2	< ND	3,79	< 0,01	< 0,01	2,66	3,44	4,23	7,71	73,03	-31,17	0,92	-5,53	0,13	0,51	0,3
C22	04 02 2016	45	7,19	24,4	< ND	0,45	< 0,01	< 0,01	0,88	6,38	1,63	2,18	35,92	-30,26	1,14	-4,71	0,14	0,09	0,3
C23	04 02 2016	565	7,21	317,2	< ND	4,67	< 0,01	2,38	4,33	4,60	37,13	50,29	420,60	-31,46	0,84	-4,74	0,18	0,35	0,2
C24	05 02 2016	17	7,69	9,8	< ND	0,74	< 0,01	< 0,01	1,00	0,88	0,53	1,69	14,63	-28,03	1,49	-4,36	0,19	1,60	0,3
C25	05 02 2016	95	7,53	61	< ND	0,48	< 0,01	< 0,01	0,85	10,16	3,67	6,88	83,05	-32,14	0,45	-5,61	0,16	0,25	0,2
C26	05 02 2016	384	7,22	207,4	< ND	7,30	< 0,01	11,89	11,46	10,95	16,30	36,00	301,29	-38,00	1,27	-6,48	0,16	0,83	0,3
C27	05 02 2016	595	7,41	298,9	< ND	8,73	8,33	8,88	6,40	10,35	32,15	55,55	429,28	-27,92	0,98	-4,18	0,06	0,42	0,3
C28	05 02 2016	204	7,65	115,9	< ND	2,28	0,00	0,29	1,41	13,92	9,99	17,66	161,45	-26,93	1,10	-3,80	0,19	1,19	0,3
C29	05 02 2016	30,5	6,36	16,8	< ND	0,71	1,90	< 0,01	1,38	2,50	1,08	1,87	26,24	-27,60	0,90	-4,03	0,12	1,03	0,3
C30	06 02 2016	103,5	6,77	67,1	< ND	1,18	0,88	< 0,01	1,82	3,72	5,53	8,94	89,16	-20,56	1,29	-2,79	0,19	2,56	0,3
C31	06 02 2016	611	7,74	329,4	< ND	7,16	< 0,01	14,02	61,04	11,98	25,88	25,54	475,01	-38,89	0,46	-5,66	0,08	0,18	0,3
C32	06 02 2016	378	6,96	207,4	< ND	4,92	0,92	15,32	18,78	10,22	21,25	24,86	303,67	-35,48	0,94	-5,58	0,19	0,34	0,3
C33	06 02 2016	55,5	6,89	36,6	< ND	0,36	< 0,01	< 0,01	1,29	1,58	2,99	5,22	48,05	-25,25	1,40	-3,72	0,18	1,05	0,3
C34	06 02 2016	13,48	5,95	9,1	< ND	0,29	< 0,01	< 0,01	0,86	0,67	0,45	1,20	12,57	-27,39	0,92	-4,63	0,09	0,01	0,3
C35	06 02 2016	31	6,01	19,3	< ND	0,21	< 0,01	< 0,01	0,91	3,34	0,89	2,17	26,81	-30,07	1,20	-5,41	0,14	1,07	0,3
C36	17 02 2016	132,2	6,98	83,2	< ND	2,08	0,63	1,12	2,74	4,41	6,49	13,03	113,69	-0,81	1,48	1,34	0,18	3,00	0,3
C37	17 02 2016	594	7,68	252,2	< ND	7,15	5,19	87,22	11,13	7,20	37,32	55,52	462,92	-18,55	1,18	-2,66	0,15	0,77	0,3
C38	17 02 2016	524	7,71	244	< ND	5,98	11,00	2,85	8,80	4,13	18,35	44,42	339,52	-24,14	1,13	-3,57	0,15	2,81	0,3
C39	17 02 2016	565	7,42	268,4	< ND	5,95	7,91	54,30	13,87	6,04	31,76	51,88	440,10	-18,85	0,95	-1,74	0,14	1,86	0,3
C40	17 02 2016	154,3	7,33	103,4	< ND	1,12	< 0,01	0,65	2,19	4,99	7,36	16,90	136,61	6,49	0,77	2,91	0,16	4,52	0,3
C41	17 02 2016	287	7,11	170,8	< ND	1,07	< 0,01	4,51	1,77	4,41	16,13	30,93	229,63	-34,73	1,48	-5,07	0,17	0,49	0,3
C42	17 02 2016	12,8	6,98	4,1	< ND	0,35	3,04	0,00	1,29	0,32	0,16	0,91	10,17	-28,67	0,08	-4,29	0,17	0,47	0,3
C43	18 02 2016	221	6,77	128,1	< ND	1,37	1,71	1,83	2,76	3,97	13,29	21,05	174,09	-22,78	0,91	-2,49	0,07	1,69	0,3
C44	18 02 2016	39	7,72	10,5	< ND	0,78	12,82	< 0,01	4,71	0,57	0,44	2,69	32,51	-26,55	0,92	-4,37	0,04	3,79	0,3