

Apport des Paramètres Physico-Chimiques des Eaux à l'amélioration de la Connaissance de l'aquifère du Continental Intercalaire/Continental Hamadien de la Région de Tahoua (Bassin des Iullemeden, Niger)

Abdel Kader Hassane Saley,

Laboratoire Géosciences Paris Sud (GEOPS), Université Paris-Sud (UPS),
Université Paris-Saclay, Bâtiment, Orsay Cedex France, Département de
Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Abdou Moumouni,
Rive droite Niamey, Niamey, Niger

Issoufou Sandao,

Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques,
Université Abdou Moumouni, Rive droite Niamey, Niamey, Niger

Jean-Luc Michelot,

Laboratoire Géosciences Paris Sud (GEOPS), Université Paris-Sud (UPS),
Université Paris-Saclay, Bâtiment, Orsay Cedex France

Ousmane Boureïma,

Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques,
Université Abdou Moumouni, Rive droite Niamey, Niamey, Niger

Doi: 10.19044/esj.2019.v15n12p444 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2019.v15n12p444](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2019.v15n12p444)

Résumé

La zone d'étude se localise dans la région de Tahoua, située au cœur du bassin des Iullemeden. Dans cette région on trouve le système aquifère du Continental Intercalaire/Continental Hamadien à nappe libre et captive, de grande extension et de forte potentialité hydrique. Il est actuellement très sollicité pour l'alimentation en eau potable des populations, l'abreuvement des animaux, l'irrigation et les besoins en eau des industries extractives. Malheureusement l'état de la connaissance de celui-ci reste très insuffisant, malgré les nombreuses études qui ont été menées. Cette étude vise à contribuer à l'amélioration de celle-ci. L'approche méthodologique basée sur le prélèvement et l'analyse de trente échantillons d'eau de forage et leur traitement à partir des différents logiciels (ArcGis, Diagrammes et Statistica) ont permis d'atteindre plusieurs résultats intéressants. Les températures des eaux varient de 32° à 46°C prouvant que les eaux sont issues de très grandes profondeurs. Pour l'utilisation de ces eaux, il s'avère nécessaire de prendre certaines précautions. Les valeurs du pH sont comprises entre 6,14 et 8,39,

donnant un caractère agressif à certaines eaux. Les valeurs de la conductivité de la plupart des eaux sont inférieures à $700 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, donc celles-ci sont faiblement minéralisées et conformes aux normes OMS. Ces eaux appartiennent à deux principaux faciès : bicarbonatés sodiques et bicarbonatés calciques à magnésiens. Les eaux sont aptes à la consommation humaine avec 67% d'entre elles qui sont d'excellente qualité, 13% de bonne qualité, 10% de qualité moyenne et 10% seulement de mauvaise qualité. Le carbonate de sodium résiduel des eaux montre que plus de 70% des points d'eaux ont une bonne qualité pour l'irrigation et se situent dans la partie sud et est de la région.

Mots-clés : Bassin des Iullemeden, Continental Intercalaire/Continental Hamadien, Qualité des eaux, Région de Tahoua, Paramètres physico-chimiques

Contribution of the Physicochemical Parameters of the Waters to the Improvement of the Knowledge of the Continental Intercalaire/Continental Hamadien Aquifer of the Tahoua Region (Iullemeden Basin, Niger)

Abdel Kader Hassane Saley,

Laboratoire Géosciences Paris Sud (GEOPS), Université Paris-Sud (UPS),
Université Paris-Saclay, Bâtiment, Orsay Cedex France, Département de
Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Abdou Moumouni,
Rive droite Niamey, Niamey, Niger

Issoufou Sandao,

Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques,
Université Abdou Moumouni, Rive droite Niamey, Niamey, Niger

Jean-Luc Michelot,

Laboratoire Géosciences Paris Sud (GEOPS), Université Paris-Sud (UPS),
Université Paris-Saclay, Bâtiment, Orsay Cedex France

Ousmane Boureïma,

Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques,
Université Abdou Moumouni, Rive droite Niamey, Niamey, Niger

Abstract

The study area is located in the Tahoua region, located in the heart of the Iullemeden basin. In this region we find the aquifer system of Continental Intercalaire / Continental Hamadien with free and captive aquifer, of great extension and high water potential. It is currently in great demand for the drinking water supply of the populations, the watering of the animals, the irrigation and the water needs of the extractive industries. Unfortunately the state of knowledge of it remains very insufficient, despite the many studies that have been conducted. This study aims to contribute to the improvement of this one. The methodological approach based on the sampling and analysis of thirty samples of drilling water and their treatment from the different software (ArcGis, Diagram and Statistica) made it possible to achieve several interesting results. The water temperatures vary from 32° to 46°C proving that the waters are from very deep depths. For the use of these waters, it is necessary to take certain precautions. The pH values are between 6.14 and 8.39, giving some waters an aggressive character. The conductivity values of

most waters are less than 700 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, so they are weakly mineralized and conform to WHO standards. These waters belong to two main facies : sodium bicarbonates and calcium magnesium bicarbonates. The waters are fit for human consumption with 67% of them being of excellent quality, 13% of good quality, 10% of average quality and only 10% of poor quality. The residual sodium carbonate in the water shows that more than 70% of the water points are of good quality for irrigation and are located in the southern and eastern part of the region.

Keywords: Iullemeden Basin, Continental Intercalaire/Continental Hamadien, Water Quality, Tahoua Region, Physico-chemical parameters

Introduction

Le recours aux ressources en eau souterraine dans le monde est de plus en plus privilégié suite à la dégradation de la qualité des eaux de surface, liée aux activités anthropiques. Dans la zone d'étude, actuellement confrontée à un sérieux problème de dégradation de la qualité des nappes phréatiques en liaison avec les activités anthropiques et la croissance démographique, l'aquifère du Continental Intercalaire/Continental Hamadien (CI/CH), le plus bas, représente la principale source en eau sollicitée pour les différents usages. C'est pourquoi, depuis le début du 21^{ème} siècle, le nombre des forages captant cet aquifère a considérablement augmenté, avec un débit d'exploitation actuel estimé à plus de 1.5 m^3/s . Même si ces prélèvements sont sans grande conséquence sur la réserve actuelle du système aquifère du bassin des Iullemeden, globalement estimé à environ 2000 km^3 (OSS, 2017), il convient d'améliorer la connaissance de cette ressource, sollicitée pour l'alimentation en eau potable (Amadou et al., 2014) d'une population qui augmente de manière exponentielle (INS, 2014), pour l'abreuvement du bétail, pour les besoins en eau des industries extractives qui se multiplient et pour l'irrigation qui prend de l'ampleur. Malgré les travaux et études déjà menés sur cet aquifère (OSS, 2008 ; MEELD, 2010 ; DRHAT, 2008 ; MHA, 2014 ; SPEN, 2015), sa connaissance reste encore très insuffisante. L'objectif principal de cette étude est de contribuer à travers des paramètres physico-chimiques à améliorer la connaissance de l'aquifère du CI/CH. Les objectifs spécifiques sont le prélèvement des échantillons d'eau de forage, les mesures *in-situ* des paramètres physiques des eaux, les analyses chimiques au laboratoire et le traitement des résultats physico-chimiques par des logiciels adéquats (ArcGis, Diagrammes, Statistica, Illustrator). L'article comporte trois grandes parties dont les généralités, le matériel et méthodes et les résultats et discussion.

I. Généralités

1.1. Situation géographique et divisions administratives

La zone d'étude, la région de Tahoua, d'une superficie d'environ 114 425 Km² s'inscrit entre 13°20' et 18°40' de Latitude Nord et entre 3°50' et 7° de Longitude Est. Elle couvre environ plus d'1/5^{ème} de la superficie totale du bassin des Iullemeden qui s'élève à 635 000 Km², compris entre 10° et 22° de latitude Nord et 1° et 9° de longitude Est, et encadré par : le Bouclier Targui au Nord ; le Fossé de Gao au Nord-Ouest ; le Bouclier de Man à l'Ouest ; le Bouclier Nigérien au Sud ; le fossé de Maiduguri au Sud-Est et le Graben de Tefidet-Kafra-Ténére-Termit à l'Est (Greigert, 1966a), (Fig. 1).

Sur le plan administratif, la région de Tahoua, l'une des huit régions du Niger, est composée de douze départements dont : Abalak, Bagaroua, Birni N'Konni, Bouza, Illela, Keita, Madaoua, Malbaza, Tahoua, Tassara, Tchintabaraden et Tillia. Elle est limitée par la région d'Agadez au Nord, celles d'Agadez et de Maradi à l'Est, la République Fédérale du Nigéria au Sud, les régions de Dosso et de Tillabéry, et la République du Mali à l'Ouest (Fig. 1).

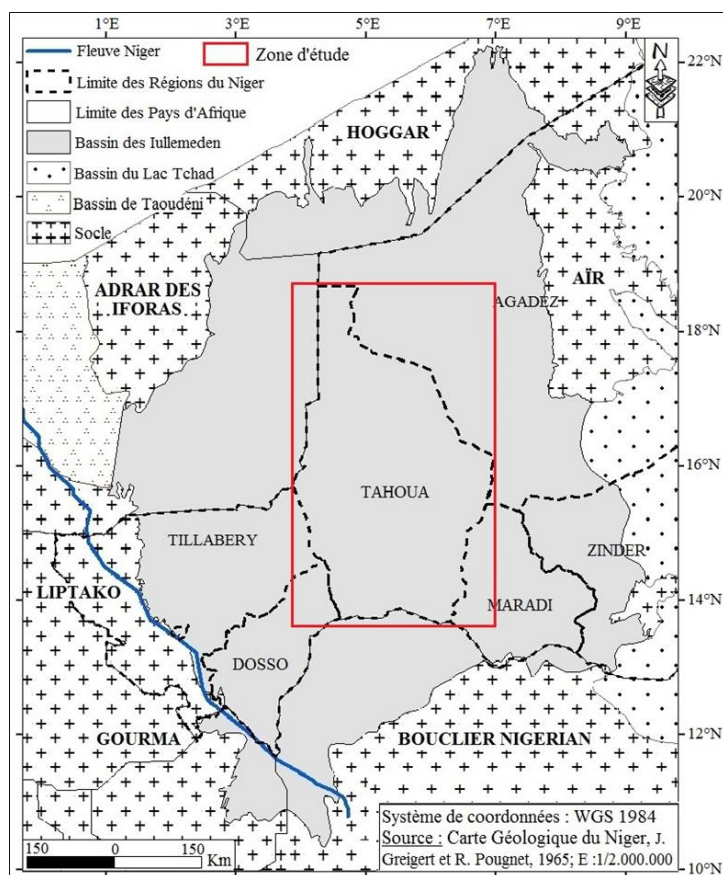


Figure 1 : Carte de situation géographique du bassin des Iullemeden (Greigert et Pougnet, 1965)

1.2. Aspects socioéconomiques

La population de la région de Tahoua est estimée à 3 327 260 habitants, avec un taux d'accroissement intercensitaire annuel moyen de 4,6% (INS, 2014). Les trois principales activités économiques de la région sont : le commerce, l'agriculture et l'élevage.

1.3. Climat et Hydrographie

Le climat de la région de Tahoua est caractérisé par deux (2) saisons. Une sèche, dominée par des vents chauds et secs et une saison pluvieuse, dominée par des vents froids et humides.

Les trois (3) grandes zones climatiques du Nord au Sud de la région sont :

- La zone saharienne, au Nord du 17° de latitude Nord, caractérisée par un cumul pluviométrique annuel inférieur à 150 mm ;
- La zone sahélo-saharienne, localisée entre 15° et 17° de latitude Nord, caractérisée par un cumul pluviométrique annuel compris entre 150 à 300 mm ;
- Et la zone sahélienne, au Sud du 15° de latitude Nord, à forte activité agricole, avec une pluviométrie annuelle comprise entre 300 à 600 mm.

Le réseau hydrographique de la zone d'étude, est composé par des larges vallées, à écoulement saisonnier et intermittent dont : celles de la Tarka, de la Maggia, de Badaguichiri, de Zourourou, d'Abalak, du Tadiss, enfin celle de l'Azaouak. On note l'existence de plusieurs marres, temporaires, semi-permanentes et permanentes. Parmi les marres permanentes, on peut citer celles de Tabalak (la plus grande), d'Allela, de Tounfafi, de Fari, de Bagga, de Kao, etc.

1.4. Morphologie

Morphologiquement, la région de Tahoua est caractérisée par deux grands ensembles :

- Les zones de plaines, à pente faible, rencontrées dans la partie Sud et Nord de la région, précisément dans le département de Birni N'Konni, au Sud-est de celui de Madaoua, à l'Ouest d'Illéla et de Tahoua, enfin au Nord avec le Tamesna et l'Azaouagh ;
- Les zones de plateaux, à pente élevée, localisées dans les départements de Keita et de Bouza, présentant des altitudes moyennes pouvant dépasser 700 mètres.

1.5. Géologie et Hydrogéologie

1.5.1. Géologie

Le contexte géologique de la région de Tahoua est marqué par cinq (5) groupes de dépôts sédimentaires (Greigert, 1966a), composés du bas en haut (Fig. 2) par les suivants :

- **Les dépôts continentaux du Crétacé inférieur** : le Continental Intercalaire (Néocomien à Albien), constitué par des dépôts fluviaux, lacustres et deltaïques. Il est composé essentiellement des grès, des sables argileux et des argiles. Au-dessus et au Sud du Continental Intercalaire, se trouve le Continental Hamadien (Crétacé supérieur), constitué essentiellement par des grès grossiers plus ou moins argileux. Il se rencontre dans la partie Sud de la région d'étude ;
- **Les dépôts marins du Crétacé supérieur** : ils sont composés des argiles, des grès calcaires, des calcaires blancs, des argiles gypsifères, des alternances calcaires marines à débris de foraminifères et d'huîtres, et calcaires continentaux à gastéropodes, ostracodes et de vertébrés dinosauriens et des marnes fossilifères ;
- **Les dépôts marins du Paléocène/Eocène** : constitués par des calcaires, des marno-calcaires à operculinoïdes, des marnes et des schistes argileux, de faible profondeur ;
- **Les dépôts continentaux du Cénozoïque** : ce sont les formations du Continental Terminal (Kilian, 1931 cité par Guero, 2003), qui sont détritiques, quartzo-kaoliniques, à faciès sidérolitiques d'âge post-Eocène moyen et anté-Quaternaire ;
- **Les dépôts du Quaternaire** : ils sont constitués par des dunes fixées recouvrant indifféremment les formations sous-jacentes (Crétacés et Tertiaires), des dunes vives dans la partie Nord de la région, et d'alluvions des vallées de la région de Tahoua (Guero, 2003).

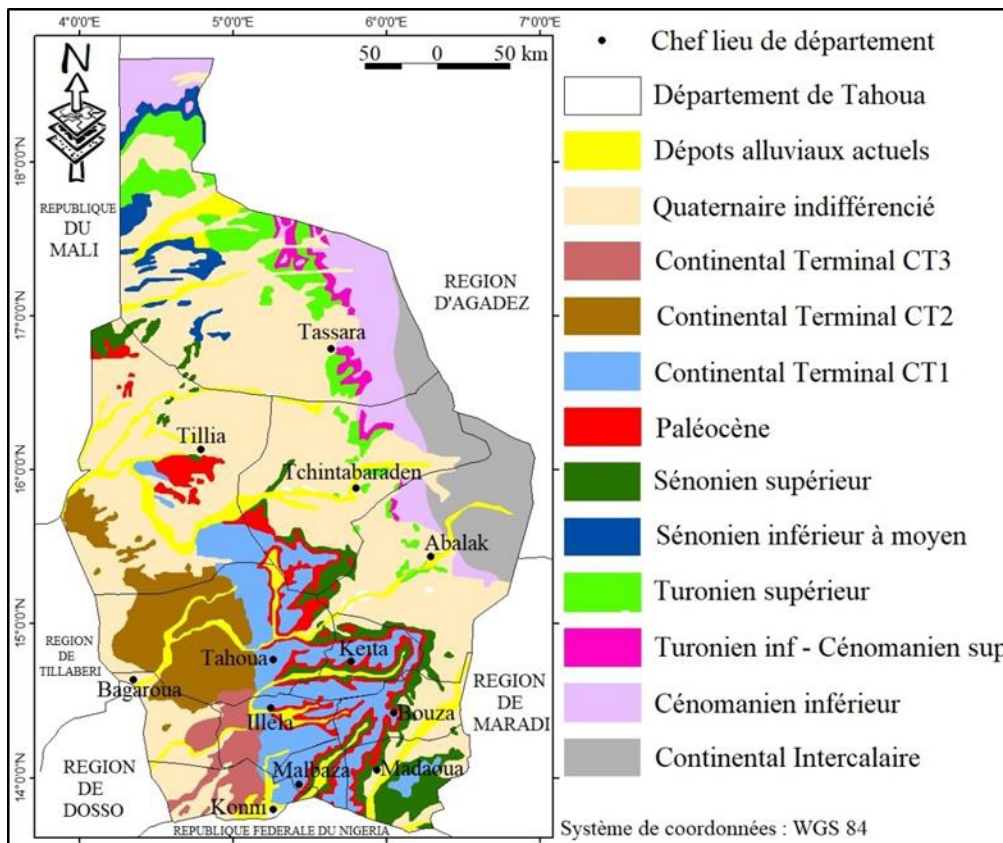


Figure 2 : Carte Géologique de la région de Tahoua (Greigert et Pougnet, 1965)

1.5.2. Hydrogéologie

On distingue du bas en haut les aquifères suivants :

- **Continental Intercalaire/Continental Hamadien** : transfrontalier, à grande potentialité. Il est à nappe libre à l’Est de l’axe Tassara-Abalak, et devient captif sur le reste de la région à l’Ouest de l’axe (Greigert, 1978). Les profondeurs de captage, augmentent de plus en plus de l’Est vers l’Ouest pour atteindre plus de 800 mètres de profondeur au forage de Takanamat. Le niveau statique varie localement de 200 mètres à moins de 5 mètres voire artésien (Konni) ;
- **Crétacé supérieur marin** : il est d’extension limitée, débits dérisoires et une forte minéralisation faisant d’eux des aquifères non sollicités. Ils ne sont présents que dans la partie Nord de la région de Tahoua (nappes des calcaires à Silex), (Greigert, 1978) ;
- **Paléocène** : il est connu dans des couches calcaires, d’extension très limitée, il est capté à moindre profondeur, avec des débits faibles ;
- **Continental Terminal (CT)** : à système aquifères multicouches, subdivisé en 3 horizons aquifères CT₁ et CT₂ captifs et CT₃ libre.

Seules les nappes du CT₁ et CT₂ sont présentes et exploitables dans la région, avec des débits pouvant atteindre 25 m³.h⁻¹ localement ;

- **Quaternaire** : il est capté par des forages à la tarière et des puits. Il présente un intérêt particulier à cause de leur facilité d'accès, mais malheureusement, il est à débit dérisoire et très menacé ces dernières années par les mauvaises pratiques des populations (défécation à l'air libre, utilisation intensive d'engrais chimique et pesticides comme moyen de fertilisation des terres agricoles).

II. Matériel et méthodes

2.1. Matériel

Le matériel utilisé comprend l'ensemble des données et des outils suivants :

2.1.1. Données

Les principales données, collectées pour la mise en œuvre de cette étude, sont les suivantes :

- Paramètres climatiques (pluie, évapotranspiration, humidité relative de l'air, température) ;
- Cartes topographiques (échelle 1/200 000) et la carte géologique (échelle 1/2 000 000) de l'ensemble du bassin des Iullemeden ;
- Données physico-chimiques, portant sur trente échantillons pour lesquels sont analysés des ions majeurs, ainsi que des dosages de fer total et de fluor ;
- Fiches techniques de forage (coordonnées géographiques et paramètres physiques des eaux) ;
- Rapports sur les divers travaux menés dans la région.

2.1.2. Outils

Il s'agit, entre autres :

- Des flacons et bouteilles (polyéthylène) d'échantillonnage d'eau ;
- Des équipements de terrain (pH-mètre, conductimètre, filtres de 0,45 micromètres de diamètre de pores, solutions d'acide sulfurique, ruban adhésif, GPS), et de laboratoire (spectromètre d'absorption atomique, chromatographe ionique, solutions chimiques) ;
- Des logiciels de cartographie « ArcGis », de références bibliographiques « EndNote, Zotero » de dessin « Illustrator CS6 », d'analyse statistique « Statistica » et d'hydrochimie « Diagrammes ».

2.2. Méthodes

2.2.1. Campagne de prélèvement

Une campagne d'échantillonnage d'eau a été effectuée sur 30 forages entre mi et fin septembre 2016. Ces ouvrages captant le système aquifère du

CI/CH, sont repartis de manière à couvrir l'ensemble de la région. Tous les échantillons ont été prélevés au niveau des robinets placés à la tête du forage. Les flacons d'échantillonnage et de prise d'eau pour les mesures in situ des paramètres physiques (pH, T° et CE) sont rincés au préalable trois fois avec l'eau à échantillonner. Deux flacons de 125 mL chacun ont été prélevés par forage : l'un pour l'analyse des anions et l'autre pour l'analyse des cations. 2 à 3 gouttes d'acide sulfurique ont été versées dans les flacons destinés à l'analyse des cations, en prévention des éventuelles variations de certains éléments chimiques. Ces échantillons, bien conditionnés sont transportés au laboratoire Géoscience Paris-Sud en octobre 2016.

2.2.2. Techniques analytiques

C'est le spectromètre d'absorption atomique qui a servi au dosage des cations majeurs et du fer total. Les erreurs maximales observées sur la série, pour les teneurs en Ca, Mg, Na, K et Fe, sont respectivement 8,7%, 3,6%, 4,6%, 4,8% et 8,8%. Les dosages des teneurs en SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , F^- et NO_2^- , ont été réalisés par chromatographie ionique. Le HCO_3^- est déterminé par titrage. Toutes ces analyses ont été réalisées en début d'octobre 2016, au Laboratoire Géoscience Paris-Sud, à Orsay.

2.2.3. Traitement des données

○ Balance ionique

Les balances ioniques ont été calculées pour déterminer la fiabilité des analyses à partir de l'équation (1).

$$B_i = \frac{\sum \text{Cations} - \sum \text{Anions}}{\sum \text{Cations} + \sum \text{Anions}} \times 100 \leq \pm 6 \%$$

(1)

Avec,

B_i : balance ionique exprimée, en % ;

Concentrations des cations et anions, en méq/L.

○ Formule ionique

La formule ionique permet de comparer d'une part les cations entre eux et d'autre part les anions entre eux. Elle s'obtient pour les cations en divisant la valeur en milliequivalent par litre de chaque cation par la somme totale des cations et en multipliant le coefficient par 100. On procède de la même façon pour les anions. Ensuite, les ions cations d'une part et ceux des anions d'autre part sont classés par ordre décroissant.

○ **Représentation graphique**

Les faciès chimiques des eaux, ont été déterminés grâce au diagramme tri-linéaire de piper. C’est un diagramme composé de deux triangles représentant les faciès cationique et anionique et d’un losange supérieur résumant le faciès général de l’échantillon, groupant à la fois les cations et les anions (Piper, 1994 ; Fetter, 1994 ; Valles, 2008 ; in Besbes, 2010).

○ **Dureté de l’eau**

Les principaux ions responsables de la dureté dans une eau sont principalement le calcium (Ca²⁺) et le magnésium (Mg²⁺) ; les ions strontium, baryum, fer, et manganèse y contribuent également (Sawyer et Mc Carty, 1967). La dureté de l’eau est calculée par le titre hydrotimétrique, qui traduit la capacité de l’eau à réagir avec le savon (Yapo et al., 2010). Il est donné par la formule (2), exprimé en ppm de carbonate de calcium (CaCO₃) ou en degré français (°f). Un degré français (°f) est égale à 10 mg/L de CaCO₃.

$$^{\circ}th = Ca^{2+} \times \frac{CaCO_3}{Ca} + Mg^{2+} \times \frac{CaCO_3}{Mg} \tag{2}$$

Avec,

°th : titre hydrotimétrique, en °f ou en ppm de CaCO₃

Ca, Mg, C et O : masse molaire, en g/mol

Ca²⁺ et Mg²⁺ en mg/L

Les résultats de la dureté de l’eau permettent de classer celle-ci en plusieurs groupes (Tableau 1).

Tableau 1 : Classification des eaux en fonction de leur dureté calcique et magnésique (Environnement Canada, 1977)

Nature des eaux	Eau douce	Eau modérément dure	Eau dure	Eau très dure
Valeur du °th	°th < 6°f	6°f < °th < 12°f	12°f < °th < 18°f	°th > 18°f

○ **Aptitude des eaux à la consommation humaine et aux usages domestiques**

Pour déterminer l’aptitude des eaux à la consommation humaine et aux usages domestiques, deux méthodes ont été utilisées : la première consiste à comparer les teneurs en mg/L des ions et les valeurs des paramètres physiques des eaux aux normes OMS. Pour la deuxième méthode, elle consiste à comparer les concentrations des ions et les valeurs des paramètres physiques à la grille simplifiée pour l’évaluation globale des eaux (Nouayti et al., 2015). Au niveau de cette grille simplifiée (Tableau 2), les couleurs bleue, verte, jaune et rouge correspondent respectivement à des classes de qualité

excellente, bonne, moyenne et mauvaise, pour les six éléments chimiques (CE, pH, Cl, SO₄, NO₃ et F) qui composent le tableau 2.

Tableau 2 : Grille simplifiée pour l'évaluation de la qualité globale des eaux souterraines (Nouayti et al., 2015)

	Conductivité électrique	pH	Cl	SO ₄	NO ₃	F
	($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	(unités pH)	Anions (mg.L^{-1})			
Excellente	< 400	6,5 – 8,5	< 200	<100	5	< 0,7
Bonne	400 – 1300	6,5 – 8,5	200 – 300	100 – 200	5 – 25	0,1 – 1
Moyenne	1300 – 2700	6,5 – 9,2	300 – 750	200 – 300	25 – 50	1 – 2
Mauvaise	2700 – 3000	<6,5 – >8,5	750 – 1000	300 – 750	50 – 100	² – 5

○ **Aptitude des eaux à l'irrigation**

L'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation est déterminée par plusieurs méthodes. Celle utilisée dans cette étude est la méthode du carbonate de sodium résiduel (RSC). Elle est déterminée par l'équation (3).

$$RSC = (CO_3 + HCO_3) - (Ca + Mg) \tag{3}$$

Avec,

CO₃, HCO₃, Ca et Mg : concentrations en méq/L.

La valeur du RSC, ainsi calculée, permet une classification en trois catégories des eaux (Tableau 3).

Tableau 3 : Classification de l'aptitude des eaux à l'irrigation en fonction de la valeur du RSC (Sandao et al., 2015)

Valeur du RSC	Aptitude de l'eau pour l'irrigation
] ← – 1,25]	eau de bonne qualité pour l'irrigation
] 1,25 – 2,50 [eau de qualité moyenne pour l'irrigation
[2,50 – → [eau salée et impropre pour l'irrigation

III. Résultats et Discussion

3.1. Paramètres physico-chimiques

3.1.1. Paramètres physiques

Les paramètres physiques (potentiel hydrogène, conductivité électrique et température) des eaux mesurés *in-situ* montrent que :

○ **Potentiel Hydrogène**

Les valeurs du potentiel hydrogène (pH) des eaux varient entre 6 et 8 unités pH. Les faibles pH observés dans la partie libre pourraient s'expliquer par le contact entre le CO₂ issu de l'atmosphère et des sols et la nappe. Par contre dans la partie captive, où le système est fermé, l'hydrolyse des silicates consomme des protons et le pH croît (Bourrié, 2015). Néanmoins, dans la partie Sud-ouest où la nappe reste captive, on constate des valeurs de pH

légèrement acide, qui pourraient s'expliquer par l'émanation de CO₂ profond ou par la présence de l'hydrogène sulfuré (HS). Ce caractère acide des eaux dans cette partie Sud et libre de l'aquifère procure à celles-ci une nature corrosive sur les équipements de forage, les moyens d'exhaure et des conduites d'eau, nécessitant par conséquent de matériels d'équipement en aciers inoxydables ou en plastiques PVC. Le caractère plus basique des eaux du Continental Intercalaire au Nord-ouest de la région pourrait être dû à une hydrolyse plus poussée des silicates que dans les eaux du Continental Hamadien au Sud (Fig. 3).

- **Conductivité électrique**

Les valeurs de la conductivité électrique sont comprises entre 47 à 668 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, montrant des eaux faiblement minéralisées. La répartition spatiale des valeurs de la conductivité électrique (Fig. 4), montre que la minéralisation des eaux dans la partie Sud est plus faible que dans celle du Nord. Cette différenciation pourrait s'expliquer par le temps d'interaction eau-roche, qui serait plus long au Nord où le CI est capté qu'au Sud où c'est le CH qui est exploité (Hassane Saley, 2018) ;

- **Température**

Les valeurs de la température des eaux varient de 32° à 46°C. Les températures les plus basses sont observées dans la partie Est de la région, où la nappe est libre (Fig. 5). Elles reflètent la température moyenne de l'atmosphère (Abdou Babaye, 2012). Par contre, au centre et vers la partie Ouest de la région, on observe les plus fortes températures qui sont dues aux profondeurs équipées des forages. Par conséquent elles sont liées au gradient géothermique dû à l'épaisseur des couches sus-jacentes. Ces fortes températures des eaux dans les parties centrale et occidentale de la région nécessitent des refroidissements de celles-ci avant leurs différents usages.

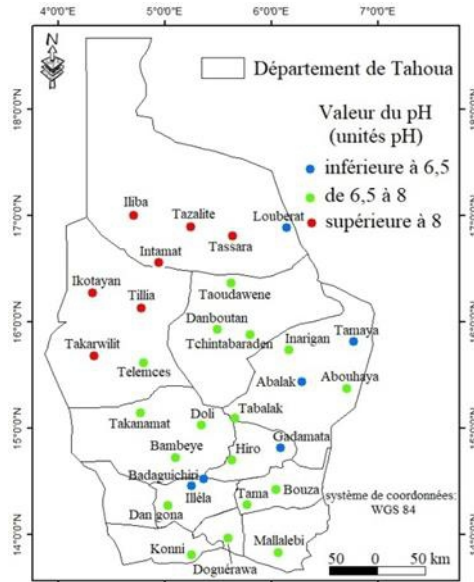


Figure 3 : Carte du pH des eaux (09/2016)

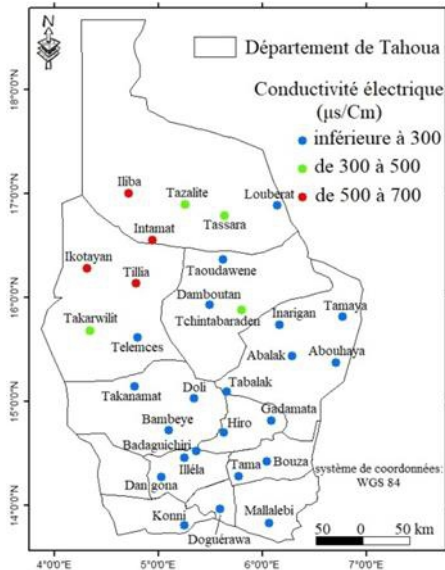


Figure 4 : Carte de la conductivité (09/2016)

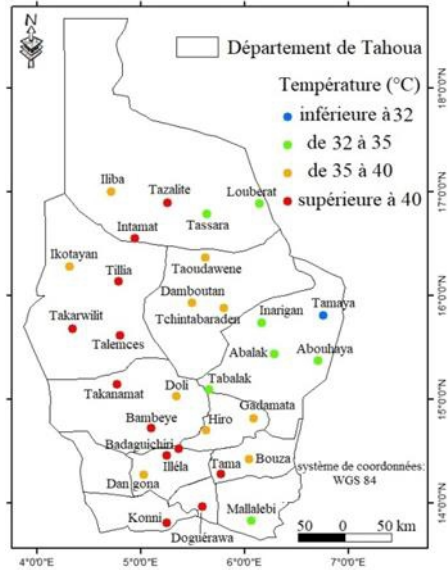


Figure 5 : Carte de la température (09/2016)

3.1.2. Paramètres chimiques

○ Balances ioniques

Les balances ioniques des trente (30) échantillons dosés sont inférieures à $\pm 5\%$, confirmant ainsi la fiabilité des analyses chimiques. Ceci permet donc l'utilisation de l'ensemble des résultats.

○ **Formule ionique**

L'ordre d'importance des anions des eaux est le suivant :

$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, ainsi pour toutes les eaux du Continental Intercalaire/Continental Hamadien on constate que les bicarbonates sont dominants. Par contre, le nitrate est l'anion le plus faiblement représenté, indiquant l'absence d'une pollution anthropique.

Pour les cations, cet ordre d'importance relative des ions est variable comme suit :

$\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ ou encore $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$. Ceci permet de définir deux principaux groupes eaux au sein desquelles le sodium est dominant dans les eaux de la partie Nord et le calcium dans celles de la partie Sud. Dans les deux cas, le magnésium occupe la dernière position et le potassium conserve sa place.

○ **Diagramme de Piper**

Le diagramme de Piper élaboré pour les eaux de l'aquifère du CI/CH montre qu'il existe deux principaux faciès (Fig. 6) : bicarbonaté sodique et bicarbonaté calcique à magnésien. On constate que la minéralisation au niveau du faciès de type bicarbonaté sodique est plus importante qu'au niveau du faciès bicarbonaté calcique à magnésien.

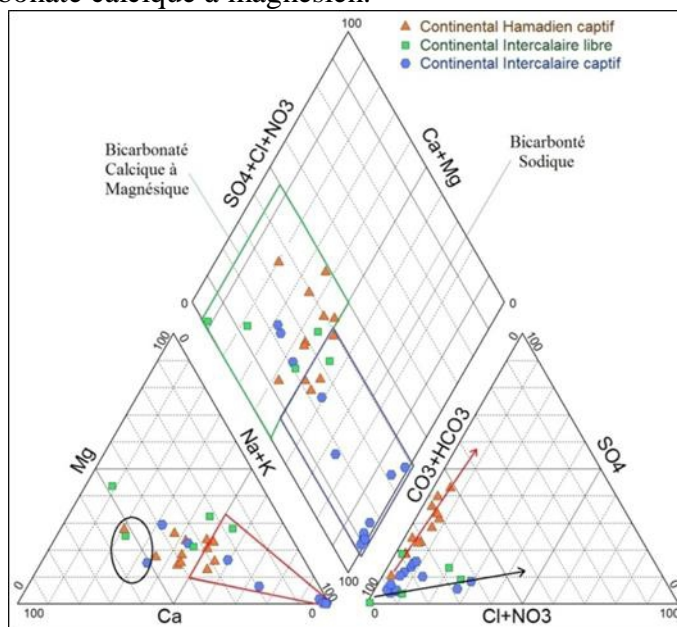


Figure 6 : Faciès chimique des eaux de l'aquifère du CI/CH (Tahoua)

○ **Diagramme de Stiff**

La représentation spatiale des hexagones issus du diagramme de Stiff confirme les faciès déjà déterminés par le diagramme de Piper et permet

surtout de visualiser leur répartition spatiale. Ainsi les échantillons du CI, à faciès bicarbonaté sodique, localisés dans la partie Nord à Nord-ouest de la zone d'étude, se distinguent des échantillons du CH à faciès bicarbonaté calcique à calco-magnésien, localisés dans la partie Sud de la région (Fig. 7). Cette différenciation de faciès entre le Nord et le Sud pourrait être liée aux phénomènes d'échange cationique entre la nappe et les argiles des réservoirs. Ces argiles sont plus importantes dans le réservoir du CI au Nord que dans celui du CH au Sud.

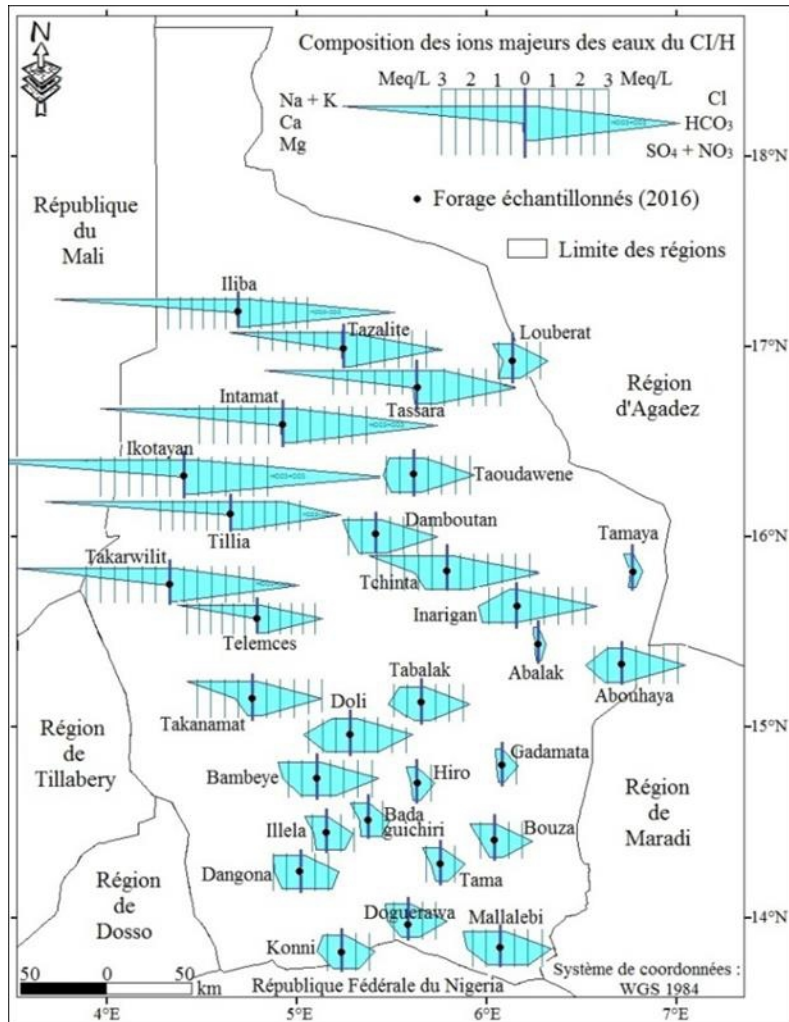


Figure 7 : Représentation spatiale de la composition chimique des eaux de l'aquifère du CI/CH du bassin des Iullemeden de la région de Tahoua à partir de la méthode de Stiff

○ **Corrélation entre différents éléments physicochimiques**

La matrice de corrélation entre les paramètres physico-chimiques des eaux (Tableau 4) montre que :

- La conductivité est significativement corrélée aux ions bicarbonate, sodium et chlorure avec des coefficients de corrélation respectivement de 0,96 ; 0,94 et 0,69. Cela montre que ce sont ces éléments qui contrôlent la minéralisation des eaux. Ces ions sont également fortement corrélés au pH : montrant que les fortes valeurs des bicarbonates impliquent une augmentation du pH ;
- Le calcium et le magnésium sont significativement corrélés avec un coefficient de corrélation de 0,87. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que ces deux ions proviennent d'une même origine minérale ;
- Le sodium et le chlorure sont corrélés de façon relativement significative avec un coefficient de corrélation de 0,61. Ceci pourrait être dû à des phénomènes de dissolution de la halite ;
- Le sulfate et le fer sont corrélés de façon significative, avec un coefficient de corrélation de 0,51. Cela pourrait s'expliquer par les phénomènes d'oxydation de la pyrite (FeS₂) ;
- La température (T°) n'est corrélée significativement d'avec aucun élément. Ceci suggère simplement que la minéralisation des eaux du CI/CH n'est pas contrôlée par la température ;
- Les nitrates enfin, ne présentent aucune corrélation avec les autres éléments. Ils sont liés aux phénomènes de pollution anthropique.

Tableau 4 : Matrice de corrélation sur les paramètres physico-chimiques des eaux de l'aquifère du CI/CH (Tahoua)

Variable	pH	T (°C)	CE	Ca	Mg	Na	K	Fe	HCO3	Cl	SO4	NO3
pH	1											
T (°C)	0,22	1										
CE	0,83	0,21	1									
Ca	-0,11	-0,24	-0,21	1								
Mg	-0,26	-0,31	-0,23	0,87	1							
Na	0,79	0,25	0,94	-0,52	-0,52	1						
K	-0,64	-0,06	-0,69	0,51	0,38	-0,81	1					
Fe	-0,08	0,31	0,01	0,24	0,18	-0,09	0,24	1				
HCO3	0,83	0,14	0,96	-0,26	-0,25	0,93	-0,78	-0,07	1			
Cl	0,53	0,23	0,69	-0,22	-0,25	0,67	-0,46	-0,04	0,51	1		
SO4	0,16	0,27	0,19	0,44	0,28	-0,01	0,37	0,51	0	0,16	1	
NO3	0,15	-0,36	0,14	-0,18	-0,14	0,2	-0,25	-0,13	0,08	0,27	-0,17	1

3.2. Aptitude des eaux à la consommation humaine et aux usages domestiques

3.2.1. Dureté de l'eau

La dureté des eaux de l'aquifère du CI/CH, déterminée par le titre hydrotimétrique varie de 0 à 13°f. Elle classe les eaux de cet aquifère (Fig. 8)

en 3 catégories, dont plus de 63% qui sont douces, 30% modérément dures et enfin 7% des eaux considérées comme dures, (environnement Canada, 1977). Les eaux dures entraînent un certain nombre de désagrément : entartrage des canalisations et des chauffe-eau, consommation excessive de savon lors des usages domestiques (difficilement moussante), cuisson des légumes plus longue, et dépôt de tartre au fond des marmites et casseroles lorsqu'elles sont portées à ébullition (Hubert et al., 2002 ; Lasm et al., 2008 ; Yapo et al., 2010 ; Lagnika et al., 2014).

3.2.2. Fluor

Plus de 96% des échantillons (Fig. 9) analysés présentent des teneurs en fluor en dessous de la norme OMS (1,5 mg/L). Le pourcentage restant représenté par le village d'Ikotayan montre une teneur supérieure à la norme (1,52 mg/L). Dès lors des mesures idoines pourraient être prises pour le forage d'Ikotayan, mais aussi pour celui de Tillia assez proche du seuil (1.01 mg/L). L'excès de fluor dans les eaux de boisson peuvent être toxique et engendrer des caries dentaires (Jordana et al., 2004) ou même des fluoroses dentaires ou osseuses à forte dose (Brouwer et al., 1988 cité par Amadou et al., 2014).

3.2.1. Nitrates

Les teneurs en nitrates varient de 0 à 26 mg/L dans les eaux de l'aquifère du CI/CH. 100% des eaux de cet aquifère présentent des valeurs en nitrates inférieures à la norme OMS (50 mg/L), donnant ainsi à ces eaux une excellente qualité pour la boisson. La valeur maximum observée dans le forage de Tassara, représenté par le rond rouge (Fig. 10), semble être liée aux activités de pastoralisme intense dans ce secteur où la nappe étant libre. Il est donc nécessaire de prendre des précautions pour limiter cette pollution anthropique.

3.2.2. Fer

Les teneurs en fer varient de 0,01 à 4,27 mg/L. la valeur limite du fer pour une eau potable est estimée à 0,2 mg/L (Gilli et al, 2016). 50 % des eaux de l'aquifère du CI/CH présentent des valeurs inférieures à cette norme (0,2 mg/L) et environ 50% des valeurs sont supérieures (Fig. 11). Le fer, en dehors de son caractère indésirable (tache les habilles, brûle la pâte) il serait également à la base de certaines maladies cardiovasculaires et de cancers, à des taux plus élevés.

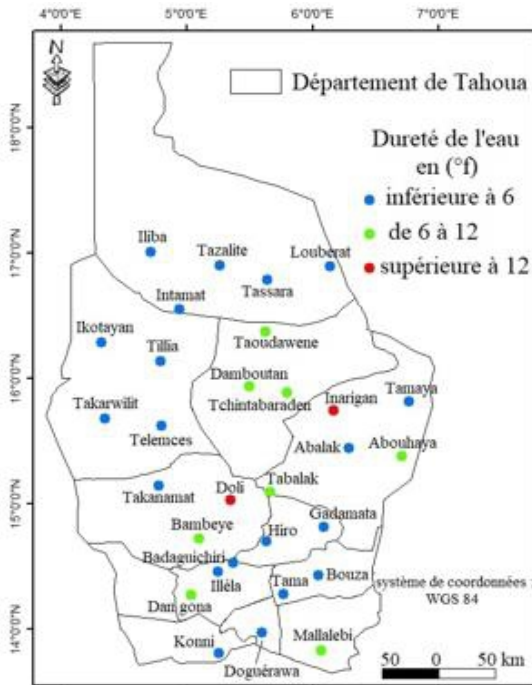


Figure 8 : Carte de dureté des eaux du CI/CH

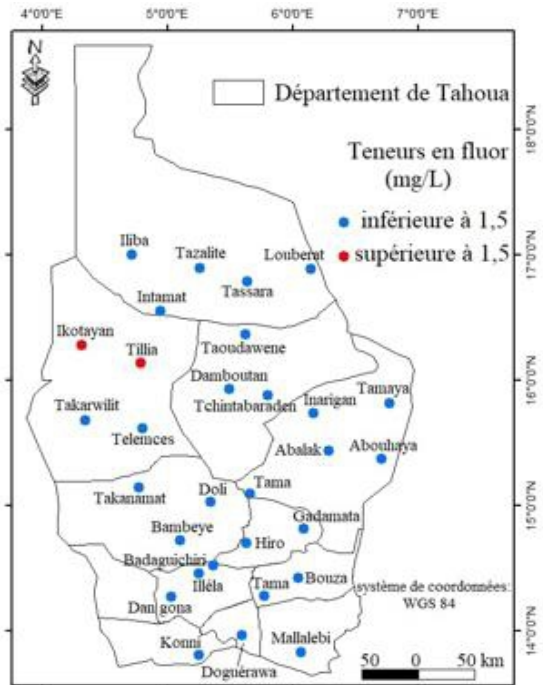


Figure 9 : Carte de fluor des eaux du CI/CH

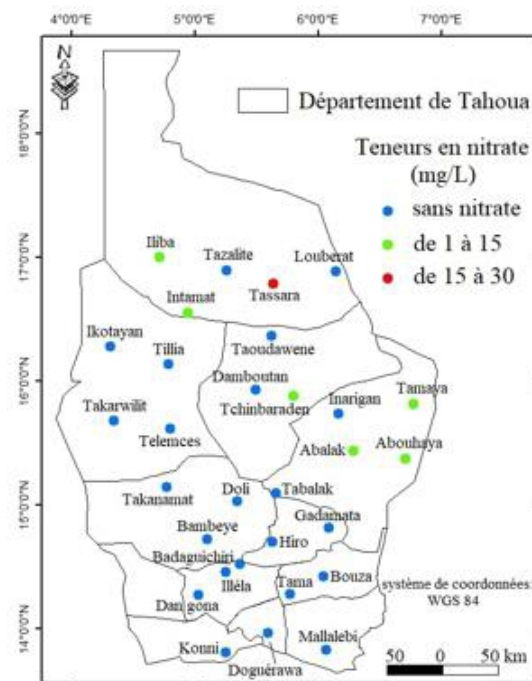


Figure 10 : Carte de nitrate des eaux du CI/CH

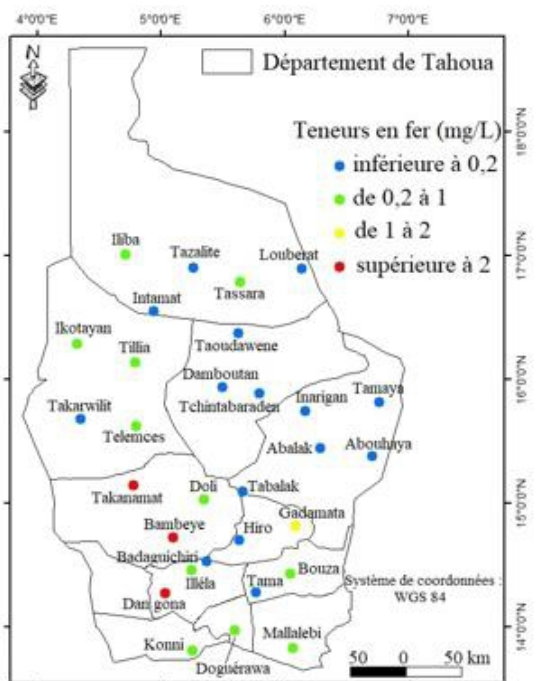


Figure 11 : Carte du fer des eaux du CI/CH

3.2.3. Qualité globale des eaux

Elle est définie par la grille simplifiée d'évaluation de la qualité globale des eaux (Nouayti et al., 2015). Cette dernière indique à travers l'histogramme (Fig. 12) que 67% des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Continental Hamadien sont d'excellente qualité, 13% de bonne qualité, 10% de qualité moyenne et seulement 10% de mauvaise qualité.

Ainsi, on peut déduire que 90% des eaux sont de moyenne à excellente qualité pour la consommation humaine. Concernant les 10% des eaux de mauvaise qualité (Fig. 12), celles-ci sont liées aux faibles valeurs de pH, représentées par le forage de Tamaya (6,15), de Louberat (6,41) et de Badaguichiri (6,43), (Fig. 13), cela pourrait être corrigé par une exposition plus ou moins longue de l'eau à l'air libre. Cependant, le fer, dépassant la norme (OMS, 1986) dans 50% des forages n'a pas été traité par rapport à cette grille.

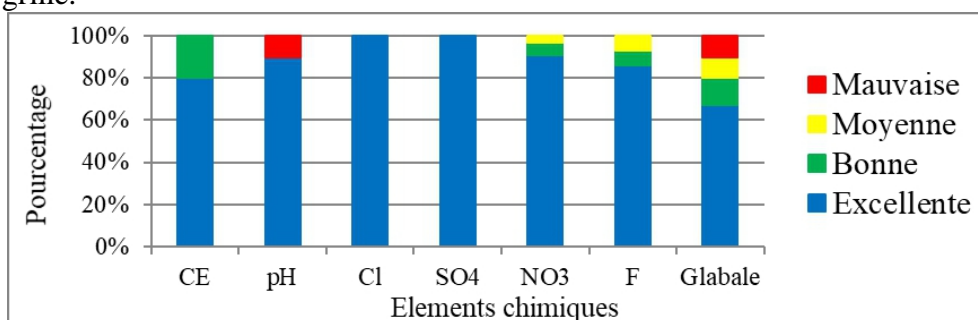


Figure 12 : Histogramme de l'état de la qualité des eaux de l'aquifère du CI/CH

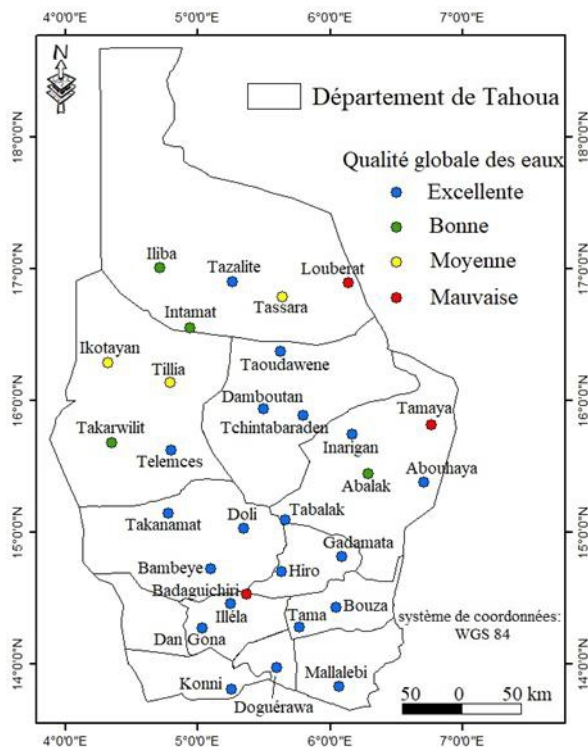


Figure 13 : Carte de la qualité globale des eaux du CI/ CH

3.3. Aptitude des eaux à l'irrigation

L'évaluation de l'aptitude des eaux à l'irrigation peut se faire par l'application de plusieurs méthodes (Bradaï et al., 2009 ; Gouaidia et al., 2013 ; Gbombélé Soro et al., 2016). Dans cette étude, c'est le carbonate de sodium résiduel (RSC) qui est utilisé pour cette tâche. Les valeurs du RSC obtenues, pour les eaux sont comprises entre -0,33 et 7,18. Ces valeurs sont regroupées en trois classes de qualité de l'eau à l'irrigation (Fig. 14), qui sont :

- Les eaux de bonne qualité pour l'irrigation, représentant 67%. Cette classe concerne toutes les eaux du Continental Hamadien, du Continental Intercalaire libre et seulement 10% des eaux du Continental Intercalaire captif ;
- Les eaux de qualité moyenne pour l'irrigation, constituées de 6%. Elle regroupe uniquement les eaux du Continental Intercalaire captif, rencontrées au centre de la région ;
- Les eaux salées et impropres pour l'irrigation, présentant 27%. Il s'agit des eaux des forages situés dans la partie Nord-ouest de la région de Tahoua, captant les nappes captives du Continental Intercalaire.

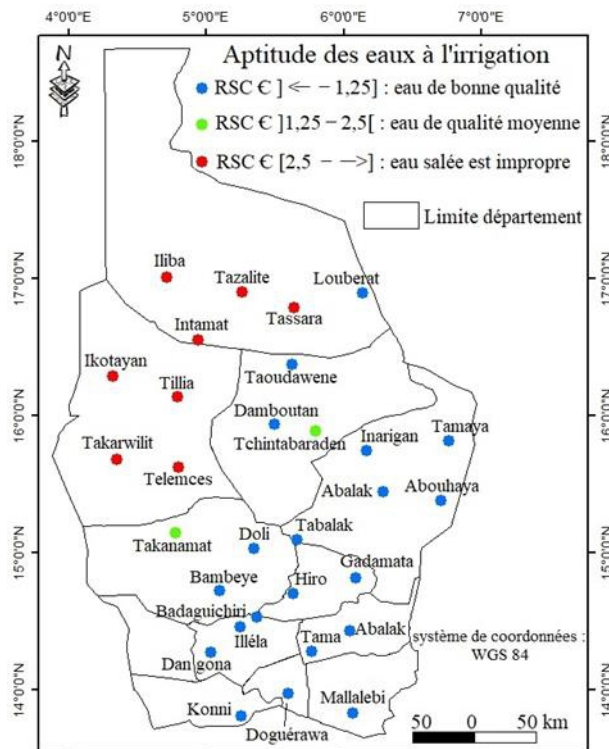


Figure 14 : Répartition spatiale des valeurs de RSC des eaux de l’aquifère du CI/CH (Tahoua)

Conclusion

Cette étude a porté sur l’analyse des paramètres physico-chimiques des eaux du système aquifère du CI/CH, pour une meilleure compréhension des caractéristiques physico-chimiques de ces eaux. Ainsi, les principaux résultats issus de l’étude sont : (i) les fortes valeurs de la température des eaux (32 à 46°C), déjà connue, seraient essentiellement dues au gradient géothermique lié à l’épaisseur des couches sus-jacentes, (ii) 10% des eaux de la nappe présentent des valeurs très faibles de pH (en dessous du seuil minimal de la norme OMS, 1986), (iii) 50% des eaux ont des teneurs en Fer total supérieures à la norme OMS pour des eaux de consommation humaine, (iv) des fortes teneurs assez élevées des ions Calcium et Magnésium, rendant 37% des eaux modérément dures à dures. Ce qui nécessiterait certaines précautions pour l’usage de ces eaux à des faits domestiques (consommation, cuisson des légumes, lessive), agricoles ou industriels (production de vapeur au niveau des centrales à charbon).

Pour l’aptitude des eaux à l’irrigation, on note les eaux très salées (27%), non appropriées à l’irrigation, surtout dans la partie Nord–ouest, à cause des longs temps de séjour et des phénomènes d’échanges cationiques avec le milieu aquifère, qui serait plus argileux dans ces secteurs. En effet, les

fortes valeurs des pH et les teneurs élevées en bicarbonates dans cette partie confirme qu'on est en système fermé (Greigert, 1978 ; Hassane Saley, A. K, 2018). On note une différenciation de faciès chimiques entre la partie Sud ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$) de celle du Nord ($\text{HCO}_3\text{-Na}$) qui pourrait être expliquée par : (i) l'altération des Feldspaths, (ii) les phénomènes des échanges cationiques (iii) les contrastes minéralogiques de l'aquifère. D'où la nécessité de poursuivre les investigations pour expliquer davantage ces chimismes des eaux souterraines.

References:

1. Abdou Babaye, M. S. (2012). Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger). *Thèse de doctorat, Université de Liège-Belgique et Université Abdou Moumouni de Niamey-Niger*, 265p.
2. Amadou, H., Laouali, M. S., et Manzola, A. S. (2014). Caractéristique hydrochimique des eaux souterraines de la région de Tahoua (Niger). *Journal of Applied Biosciences*, 81 (1), 7161-7172.
3. Besbes, M. (2010). Hydrogéologie de l'ingénieur. Livre, *Centre de Publication Universitaire*.
4. Bourrié, G. (2015). Relation entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres de CO_2 dans les eaux nature. *Lettre de l'association (AFES)*, 1976, pp. 145-159. hal-01189766.
5. Bradaï, A., Douaoui, A., et Marlet, S. (2009). Qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols dans la plaine du Bas-Cheliff, Algérie. *Cirad*, 7p., *Colloque-CD-rom*. « Cirad-00366475 ».
6. DRHAT. (2008). Monographie de la région de Tahoua. 103p.
7. Environnement Canada. (1977). Qualité des eaux de surface au Canada — Un aperçu. Direction de la qualité des eaux. *Direction générale des eaux intérieures*.
8. Gbombélé Soro, R. K. O., Tanina Soro, D., Traoré, A., N'guessan Fossou, R. M., et Soro, N. (2016). Aptitudes à l'agriculture des eaux souterraines du département d'Agboville (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, édition Volume. 12, N°21. ISSN : 1857-7881 (Print) et ISSN 1857-7431. Doi: 10.19044/esj.2016.v12n21p81 ; URL:<http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n21p81>
9. Gilli, E., Mangan, C., et Mudry, J. (2016). Hydrogéologie : Objet, méthodes, application. *Collection DUNOD*, 4^{ème} édition, 356p.
10. Gouaidia, L., Guefaïfia, O., Boudoukha, A., et Hemila, M. L. (2013). Evaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risque de dégradation des sols : exemple de la plaine de Meskiana,

- Nord-Est Algérien. *Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicales*, 37, 1 : 81-92.
11. Greigert, J. (1966a). Description des formations crétaées et tertiaires du bassin des Iullemeden (Afrique occidentale). *BRGM ed.*, 229 p. Paris, France.
 12. Greigert, J. (1978). Atlas des eaux souterraines de la République du Niger. Etat des connaissances. *Rapport BRGM, 79 AGE001*. Orléans, France.
 13. Greigert, J., et Pougnet, R. (1965). Carte géologique de la République du Niger au 1 : 2 000 000. *BRGM, ed. Paris, France*.
 14. Guero, A. (2003). Étude des relations hydrauliques entre les différentes nappes du complexe sédimentaire de la bordure Sud-Ouest du bassin des Iullemeden (Niger) : approches géochimique et hydrodynamique. *Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11-Orsay*, 265p.
 15. Hassane Saley, A. K. (2018). Évaluation des ressources en eau de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua (bassin des Iullemeden, Niger) : impacts climatiques et anthropiques. *Thèse de doctorat, Université Paris-Sud et Université Abdou Moumouni de Niamey-Niger*, 295p.
 16. Hubert, J., Hubert, C., Jungers, P., Daudon, M., et Hartemann, P. (2002). Eaux de boisson et lithiase calcique urinaire idiote. Quelles eaux de boisson et quelle cure de diurèse? *Progrès en Urologie*, 12, 692-699.
 17. INS. (2014). Le Niger en chiffre 2014. Edité par direction de la coordination et du développement de la statistique (DCDS). 128, rue de la Sirba, BP 13416, Niamey-Niger.
 18. Jordana, S., and Batista, E., (2004). Natural groundwater quality and health. *Geologica Acta : an international earth science journal. Volume 2, N°2, ISSN: 1695-6133. Université de Barcelona-Espana*.
 19. Lagnika, M., Ibikounlé, M., Montcho, J-P.C., Wotto, V.D., et Sakiti, N.G. (2014). Caractéristiques physico-chimiques de l'eau des puits dans la commune de Pobè (Bénin, Afrique de l'Ouest). *Journal of Applied. Bioscience*. 79 : 6887-6897, ISSN 1997-5902.
 20. Lasm, T., Yao, T.K., Oga, M.S., Kouame, F.K., Jourda, J.P., et Baka, D. (2008). Analysis of the physico-chemical characteristics of groundwater in proterozoic land region of the Tiassale Area (Southern Cote D'Ivoire). *European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Volume. 20 n°3*.
 21. MEELD. (2010). Projet d'hydraulique villageoise dans la région de Tahoua : réalisation de 24 forages profonds. 204p.

22. MHA. (2014). Rapport sur les indicateurs de l'eau potable et de l'assainissement pour l'année 2013, du Comité technique permanent de validation des indicateurs de l'eau et de l'assainissement. *République du Niger*.
23. Nouayti, N., Khattach, D., et Hilali, M. (2015). Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc). Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas, Morocco). *Journal of Materials Environmental. Science*. 6 (4): 1068-1081. CODEN : JMESCN.
24. OMS. (1986). Directives de qualité pour l'eau de boisson. Vol. 2. *Critères d'hygiène et documentation à l'appui*
25. OSS. (2017). Gestion intégrée et durable des systèmes aquifères et des bassins partagés de la région du Sahel : *rapport du projet régional de coopération technique RAF/7/°11, appuyé par l'AIEA*. 118p.
26. OSS (2008). Gestion concertée des ressources en eau partagées d'un aquifère transfrontalier sahélien : le Système Aquifère d'Iullemeden, synthèse n°2. *Rapport interne, 20p. Tunis, Tunisie*.
27. Sandao, I., Abdou Babaye, M. S., Ousmane, B., and Michelot, J.-L. (2015). Ground Water suitability for irrigation in the Korama basin, Southern Zinder, Niger. *International Journal of Research in Agriculture and Forestry*. Volume 2, ISSN. 2394-5907 (print) & ISSN. 2394-5915 (online).
28. Sawyer, C. N., and Mc Carty, P. L. (1967). Chemistry for sanitary Engineers, and classification of naturally soft and naturally hard waters to sources and hardness of their water supplies. *Journal of Hydrology*.
29. SPEN. (2015). Projet de renforcement et d'extension des réseaux d'AEP dans 18 centres secondaires de la SPEN : travaux de réalisation, d'équipement et de raccordement de 20 forages gros diamètres. 66p.
30. Yapo, O.B., Mambo, V., Seka, A., Ohou, M.J.A., Konan, F., Gouzile, V., Tidou, A.S., Kouame, K.V., et Houenou, P. (2010). Evaluation de la qualité des eaux de puits à usage domestique dans les quartiers défavorisés de quatre communes d'Abidjan (Côte d'Ivoire) : Koumassi, Marcory, Port-Bouet et Treichville. *International Journal of Chemistry Sciences*. 4(2) : 289-307, 19p.