

Caractéristiques chimiques des eaux de la nappe du synclinal de Taoura, Souk Ahras (Nord-Est de L'Algérie).

Chemical characteristics of waters aquifer of the syncline of Taoura, , Souk Ahras (North-east of Algeria)

Farid Rouaibia ^{1*} & Larbi Djabri ^{1,2}

¹ Département d'Hydrogéologie, Faculté des Sciences de la Terre, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

² Laboratoire de Ressources en Eau et Développement Durable, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie

Soumis le : 16/01/2017

Révisé le 21/07/2017

Accepté le : 26/09/2017

ملخص

نوعية المياه الباطنية مشروطة بالمكونات التي تخترقها أثناء تدفقها كذلك المياه التي تعبر المكونات الكلسية تكون غنية بالبيكربونات والتي تعبر المكونات الملحية تكون غنية بالكبريتات أو بالكلورايير. هذه الملاحظة يمكن أن تطبق على المياه الباطنية الكلسية لمدينة تاورا الممونة من طرف مياه الأمطار أو من طرف المياه الآتية من مختلف المناطق المنحدرة التي تصب في اتجاه الحوض الهيدروغرافي مجردة-ملاق جنوب شرق مدينة سوق أهراس. الدراسات الجيولوجية المنجزة تبين بأن المكونات الظاهرة تكون شكل مقعر هذه الأخيرة تحتوي على مستوى من المياه الباطنية ما يخفي الطبقة الكتومة التي يتم استغلالها عن طريق الآبار الارتوازية (T1, T3, T7, D3 D5). ملاحظة السلالم الطباقية تبين عدم تجانس في البنية ما يعطي للمياه تنوع في تركيبها الكيميائية. إن دراسة وتحليل العينات تبين بأن مياه المنطقة المدروسة غنية بنسبة كبيرة بالبيكربونات و الكالسيوم في حين بعض النقاط تتميز بغناها بالكلورايير و الكبريتات, هذه الأيونات يتبعها الصوديوم و الكالسيوم مما يثبت أثر المكونات على نوعية المياه التي تخترقها. المياه المأخوذة تستعمل في السقي و الشرب وبمذا خطر التلوث لا يمكن تجاوزه وهذا ما يثبت تركيز النترات (< 50 مغ/ل).

الكلمات المفتاحية: طبقة كراسية- مجردة-ملاق- الجيولوجية- التلوث- نوعية المياه .

Résumé

La nappe karstique de Taoura est alimentée à partir des eaux de précipitations ou par les eaux en provenance des différentes zones drainant le bassin versant transfrontalier Medjerda-Mellegue dans la partie Sud-est de la ville de Souk Ahras. Les études géologiques réalisées ont montré que les formations à l'affleurement forment un synclinal, ce dernier contient un niveau aquifère, qui recèle une nappe captive, exploitée par plusieurs forges (T1, T3, T7, D3, D5). L'observation des logs stratigraphiques montre une hétérogénéité lithologique. Les prélèvements et les analyses réalisés, ont montrés que les eaux de la zone d'étude sont en grandes partie riches en bicarbonates et en calcium. Cependant quelques points se caractérisent par la domination des chlorures et des sulfates. Ces anions s'accompagnent de sodium ou de calcium, confirmant ainsi l'impact des formations traversées sur la qualité des eaux. Les eaux prélevées sont utilisées pour l'irrigation et l'AEP. De ce fait les risques de pollutions sont quasi inévitables, confirmée par les concentrations élevées des nitrates (> 50 mg/l).

Mots Clés : Nappe karstique- Medjerda-Mellegue- Géologique-Pollution- Qualité des eaux.

Abstract

The karst aquifer of Taoura is fed from waters of rainfall or by waters from the different draining zones the basin pouring cross-border Medjerda-Mellegue in bet it south of the East of the city of Souk Ahras. Accomplished geological studies showed that trainings in outcrop form a syclinoriums, this last contains a water-bearing level, which conceals a captive tablecloth. This last is exploited by several smithy (T1, T3, T7, D3, D5). The observation of logs stratigraphic shows lithological heterogeneity, what is going to confer on water a variation of its chemical composition. Sample and analyses accomplished, showed that waters of the zone of study are in big left rich in and in calcium, bicarbonate however some points are characterized by the domination of chlorides, sulphates, these anions are accompanied by sodium or by calcium. Confirming so the impact of trainings crossed on the quality of waters. Taken a sample waters are used for irrigation and AEP. Of this fact risks of pollutions are quasi unavoidable, are confirmed by concentration of nitrates (> 50 mg / l).

Keywords: Karst aquifer- Medjerda-Mellegue- Geological- pollution-Quality of waters.

* Auteur correspondant : rf_0310@hotmail.fr

1. INTRODUCTION

Les eaux sont emmagasinées dans deux types de milieux, le premier dit poreux et le second dit fissuré. Le second type est particulièrement présent en Europe mais peu développé au Maghreb. En Algérie le karst a une extension limitée, il est présent au Nord dans quelques régions telles que Tlemcen (B. Colignon, 1986) [1], la Kabylie (A. Abdeslam, 2001) [2], Constantine (M. Djebbar, 2005) [3], Tébessa (H. Zerrouki, 2014) [4], Chéra (F Baali, 2006) [5] et Souk Ahras (Y. Bouroubi, 2009) [6]. Par contre dans le Sud Algérien, le karst est présent dans la région de Biskra (A. Messameh, 2012) [7], Ouargla (M. Djidel, 2012) [8]. Le réservoir karstique se caractérise par sa discontinuité et doit répondre à certaines conditions, telles que obéir au schéma du karst élaboré par C. Drogue (1969, 1971) [9]. Ce dernier définit le karst comme étant un paysage qui résulte de processus particuliers d'érosion, voire la karstification. Ces processus sont gouvernés par la mise en solution des roches carbonatées par l'infiltration de l'eau des pluies chargée en CO₂ gazeux atmosphérique et biologique. En surface les carbonates Karstifiés offrent différentes formes telles que les dolines, les poljés. Les paysages souterrains tels que les grottes et les gouffres, sont sculptés par les écoulements d'eau souterraine. Dans les carbonates karstifiés, les eaux circulent et émergent des exutoires avec un débit assez important.

La genèse et la structure originale du karst sont connues à travers différents travaux de recherches sur le karst, anciens et récents, sur le fonctionnement du système karstique [9-12].

Les mécanismes responsables de la constitution d'un karst [13], relèvent deux ensembles de processus :

- les processus chimiques de dissolution de la roche (l'eau solvant).
- le moteur fournissant l'énergie nécessaire au transport et à l'évacuation du soluté (l'eau agent de transport).

Ces deux ensembles de processus constituent le potentiel de karstification d'un massif carbonaté. Le solvant est l'eau contenant du CO₂ pédologique dissous, le moteur est la gravité (charge Hydraulique).

Le présent travail porte sur un système, caractérisé par l'interférence de deux nappes :

-la première, contenue dans des formations sédimentaires, caractérisant ainsi un milieu poreux reposant sur un karst.

-la seconde karstique recouverte par le karst situé au niveau d'un synclinal comblé par des formations sédimentaires (sables, argiles...). Ce comblement fait que les formations karstiques se trouvent dissimulées sous les formations à l'affleurement rendant toute interprétation difficile.

Le synclinal de Taoura, occupe un sous bassin d'environ 826 km² de superficie, il est situé aux confins de la frontière Algéro-Tunisienne, au Sud-est de Souk Ahras [14]. Le système est à lithologie et structuration complexe (terminaison Nord-est de l'avant pays atlasique) comprend plusieurs aquifères qui mettent à jour de nombreuses sources froides et très peu de sources chaudes [15].

La nappe de Taoura est de type karstique et est située au Sud-est de la ville de Souk Ahras. Cet aquifère s'étend jusqu'à la frontière Tunisienne [16]. Les eaux issues de cette nappe sont destinées à l'alimentation en eau potable de plusieurs localités et à l'irrigation de nombreux périmètres, d'où un double risque :

- le premier est lié à la surexploitation de la nappe,
- le second reste l'exposition des eaux de la nappe à la pollution par le retour des eaux d'irrigation.

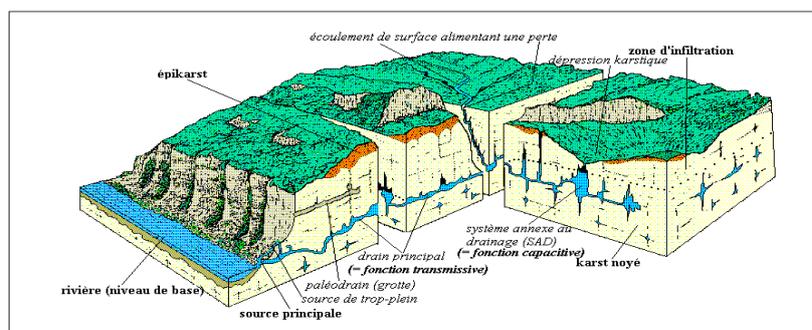


Figure 1. Représentation schématique d'un aquifère karstique [10].

2. SITUATION GEOGRAPHIQUE

La zone d'étude est située à trente kilomètres au Sud de la ville de Souk Ahras (Fig.2). Elle est limitée :

- au nord par les communes de Khedara, Ouled Moumen, Ain Zana et Ouled Driss,
- au sud par la commune de Sidi Fredj et la Wilaya de Tébessa,
- à l'est par la frontière algéro-tunisienne et
- à l'ouest par le chef-lieu de la wilaya, Zarrouria, M'Daourouch et Oued Kebrit.

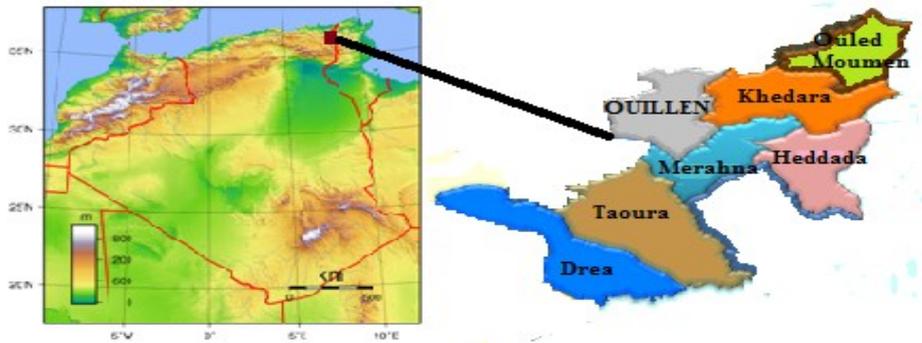


Figure 2. Situation géographique de la zone d'étude

3. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE : (Notion de Karst, de Piézométrie, d'Hydrodynamique et de Géophysique)

3.1 Géologie

Les données géologiques combinées aux informations extraites des colonnes litho- stratigraphiques des forages, indiquent la superposition de plusieurs formations géologiques, ces dernières peuvent receler des nappes d'eau. La paléo-géologie de la région montre que ces formations se sont formées lors de l'orogénèse des chaînes tello-rifaines ou Maghrébides, au moment de l'édifice alpin. De ce fait, les formations d'âges Mésozoïque et Cénozoïque ont subi les effets des phases tectoniques en succession caractérisant la région de Souk Ahras [17]. Ainsi, la zone d'étude comprend au Nord des terrains allochtones composés d'unités du domaine interne, du domaine des Flyschs et du domaine externe, au Sud et à l'Est jusqu'aux confins Algéro-tunisiens, affleure un ensemble intensément plissé et fracturé de l'avant pays atlasique [18]. La région de Taoura, se caractérise par des structures anticlinales de direction SW-NE. Ces structures sont d'âge allant du Crétacé à l'Eocène [19]. Les failles de direction NW-SE et NE-SW (Fig. 3), sont de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres. Les failles verticales ont structuré l'ensemble des terrains en effondrements au cours du Plio-quaternaire. Ce qui explique la discontinuité des nappes et la disparition de l'aquifère karstique au niveau de la plaine Drea - M'Daourouch.

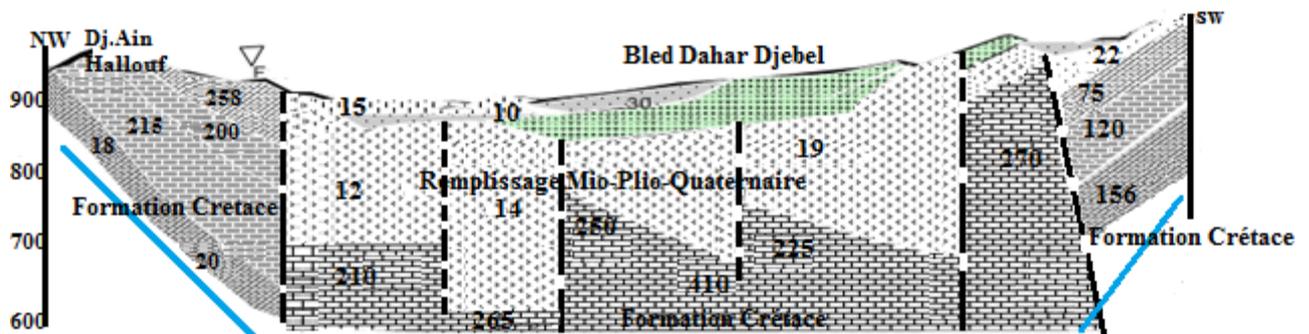


Figure 3. Une tectonique cassante entraînant la discontinuité des nappes.

3.2 Hydrogéologie de la zone d'étude

Les études réalisées, montrent la présence de deux nappes (Fig. 3 et 4) :

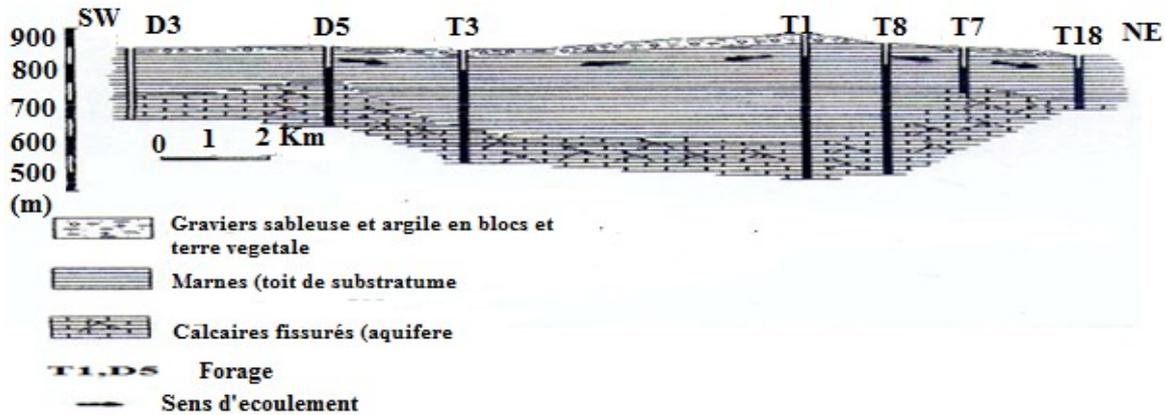


Figure 4. Coupe hydrogéologique dans le synclinal de Taoura.

- la première, libre (d'environ 40 m d'épaisseur) contenue dans les formations Mio-Plio-Quaternaire, riches en marnes, conglomérats, sables, graviers ... constituant le remplissage du synclinal de Taoura. Cette nappe est surtout captée par les puits domestiques dans la partie Nord-est vers Merahna [20].
- la seconde considérée comme captive, constituée par des marnes et des calcaires fissurés, datés du Maestrichtien inférieur au Campanien moyen. La nappe occupe le centre de Taoura et disparaît vers le Sud-ouest lors la formation de la chaîne anticlinale vers Madour.

3.3 Indications Piézométriques

Le présent travail porte sur la nappe libre. Les cartes piézométriques réalisées se rapportent aux années 2011 et 2012. L'observation de ces cartes (Fig. 5 et 6), montre un écoulement dirigé des bordures vers le centre de la plaine, ce qui laisse supposer un apport latéral des eaux. Nous remarquons également une convergence des écoulements à l'ouest de Heddada et Merahna, traduisant une exploitation de l'aquifère au niveau de ces deux contrées.

Par ailleurs, nous notons une variation saisonnière, avec des maxima hivernaux et des minima à la fin de l'été, entre les deux périodes considérées. La zone Sud est caractérisée par la présence d'un dôme piézométrique (T3, D3, D4, D9 bis), traduisant ainsi l'existence d'une ligne de partage des eaux qui serait à l'origine des deux écoulements présents au niveau de la région. L'alimentation faite à partir de la zone comprise entre les reliefs et la plaine au Nord du synclinal est bordée par la chaîne montagneuse (Djebels Draâ Snouber 1064 m et Bousessou 1087m).

On constate un abaissement notable du niveau statique de la nappe provoqué par :

* la surexploitation, pour rappel les forages (T1, T3, T4, T7 T8, T11, T18, D3, D5, D10) sont tous productifs et captent la nappe karstique de Taoura.

* une faible recharge, l'infiltration efficace calculée est de l'ordre de 12 mm/an.

* la drainance ayant entraîné un abaissement des niveaux piézométriques de la nappe superficielle, démontant une perte des eaux vers la profondeur. Les analyses chimiques effectuées par nos soins indiquent le même faciès chimique (dominant bicarbonaté calcique, au niveau des deux nappes. Cela est confirmé par l'appartenance des bicarbonates et du calcium au même quadrant, dans le cercle de l'ACP.

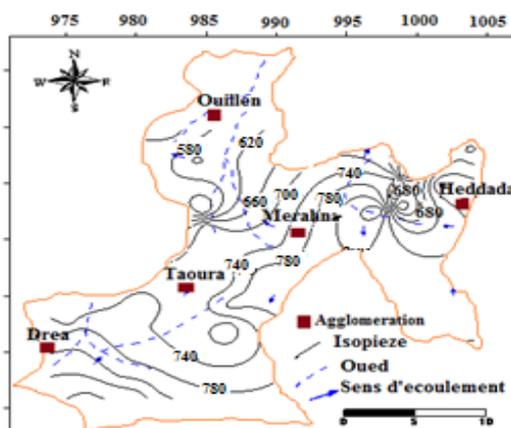


Figure 5. Carte piézométrique (Juillet 2011)

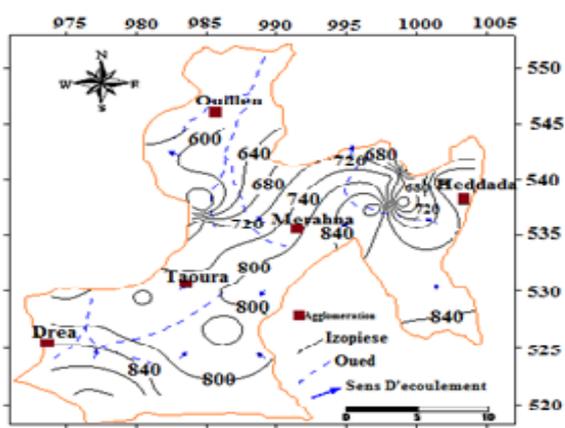


Figure 6. Carte piézométrique (Décembre 2012)

3.4 Caractéristiques Hydrodynamiques et Géophysiques

L'interprétation des données de pompage (6 pompages de longues durées, plus de 48 heures) indique des valeurs de transmissivité, comprises entre $1,2 \cdot 10^{-3}$ et $0,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ [21]. Les plus fortes valeurs, sont déterminées au niveau des forages T1, T3 et T15, ces derniers captant les formations du Turonien ; Maestrichtien et Cénomaniens. Ces ouvrages se localisent sur l'axe synclinal de la cuvette de Taoura. En aval de Taoura, au niveau des forages Ms1, Ms2 et Bir Louhichi, les caractéristiques hydrodynamiques calculées montrent des valeurs de transmissivité comprises entre $3,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et $0,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ [22]. Les valeurs ainsi obtenues, différentes des précédentes (plus faibles), indiquent vraisemblablement une variation de la lithologie. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement, varient entre $1,9 \cdot 10^{-3}$ et sont localisées dans la zone de Drea D3 et $2,6 \cdot 10^{-1}$, T7 et T8 observées dans la partie du synclinal de Taoura [23]. Par ailleurs le coefficient d'emmagasinement calculé $S = 2,6 \cdot 10^{-1}$, caractérise une nappe karstique.

La valeur de la perméabilité issue du dépouillement des essais par pompage, oscille entre $1,2 \cdot 10^{-5}$ et $2,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}\text{s}$.

La coupe géo-électrique (Fig. 3), montre un compartimentage du système. Cette situation est générée par les failles ayant affectées le synclinal [24]. Ce qui se traduit par une discontinuité des réservoirs d'eau et expliquerait la disparition des nappes au niveau des zones extrêmes. L'observation de la figure 3, confirme la présence de deux nappes superposées avec les caractéristiques suivantes :

- nappe libre avec une épaisseur variant de 50 à 100 mètres et une résistivité comprise entre 10 et 40 Ohm.m. Cette nappe est constituée par des grès, des sables, des conglomérats, des argiles..., caractérisant les formations du Mio-Plio-Quaternaire,
- nappe captive, du Maestrichtien, d'une résistivité de l'ordre de 50 à 100 Ohm.m. La profondeur du substratum atteint 700 m à 800 m. Les échanges hydrodynamiques se font grâce au système de failles qui affecte la zone.

4. MATERIELS ET METHODES

4.1 Echantillonnage de l'eau souterraine

Pour réaliser notre travail, nous avons prélevé 108 échantillons d'eau souterraine au cours de six campagnes à raison de 18 prélèvements par mois. Les prélèvements réalisés se rapportent au mois de mars, de juillet et de décembre pour les années 2011 et 2012.

Les paramètres physico-chimiques (Température, Conductivité, et pH), ont été mesurés sur site à l'aide d'un appareil multi variable WTW (P3pH/LF-SET) [25]. Pour doser les anions (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), nous avons utilisé la colorimétrie. Le dosage des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) a été réalisé par spectrophotométrie d'absorption atomique.

Pour chaque échantillon, nous avons prélevé deux bouteilles, la première acidifiée et va servir au dosage des cations et la seconde non acidifiée pour les anions. Les bouteilles ont été stockées dans un réfrigérateur à 4°C avant leur transport au laboratoire d'analyses.

Les paramètres chimiques ont été dosés au niveau du laboratoire de l'algérienne des eaux (A.D.E), et au niveau du laboratoire d'analyse de sol et des eaux (AGROSOL).

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 Statistique élémentaire

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 1.

Tableau 1. Statistique générale des paramètres mesurés dans les eaux

Variable	Min	Max	Moy	Ecart -type
Cond. ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	705,0	3500,0	1871,2	624,4
PH	6,8	8,3	7,8	0,3
T (°C)	9,0	46,0	16,2	6,4
Ca ²⁺ (mg/l)	8,3	376,0	115,8	70,1
Na ⁺ (mg/l)	5,3	186,0	60,5	40,2
K ⁺ (mg/l)	0,2	94,2	8,8	9,9
Mg ²⁺ (mg/l)	0,5	106,0	28,7	17,7
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	8,9	1167,0	285,1	217,3
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	15,2	341,0	135,1	72,9
Cl ⁻ (mg/l)	6,1	367,0	95,8	59,8
NO ₃ ⁻ (mg/l)	0,001	128,8	31,8	26,3
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0,0	6,8	0,685	1,2

L'observation du tableau 1, montre une importante minéralisation. En effet, la valeur moyenne de la conductivité est de l'ordre de $2000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, ce qui laisse supposer que les eaux sont chargées en cations et en anions. Le pH mesuré à la sortie des eaux, avec des valeurs oscillant entre 6,8 et 8,3 reste stable et est proche de la neutralité. Les concentrations en ions, montrent une domination des bicarbonates (anions) et du calcium (cations).

5.2 Apports de l'analyse en composantes principales (ACP)

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur des variables centrées réduites. Les données portent sur l'ensemble des 18 points de prélèvement issus de la nappe souterraine de Taoura (2011-2012). Pour déterminer les origines de la minéralisation et les liens existants entre les différents éléments, nous avons réalisé une ACP. Cette dernière prend en considération toutes les analyses effectuées par nos soins. La matrice utilisée comprend 54 analyses et 9 éléments chimiques (Conductivité, calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorures, sulfates et bicarbonates ...). L'ACP a été réalisé en utilisant le logiciel statistica.

5.2.1 Matrice de corrélation

Les résultats obtenus sont condensés dans le tableau 2. L'observation du tableau montre une bonne corrélation entre les bicarbonates et la conductivité, le calcium et la conductivité, le calcium et les bicarbonates ce qui confirme l'origine de la dissolution d'apports des eaux karstiques mobilisées. La corrélation entre la conductivité et les deux éléments : calcium et bicarbonate est expliquée par la profondeur de la nappe; la minéralisation des eaux pouvant être liée à un long temps de contact entre l'eau – roche qui s'observe presque dans tout les forages localisés dans le synclinale. Par ailleurs, il existe une bonne corrélation entre les chlorures, les sulfates et le sodium ; les chlorures se corrént bien au sodium, ce qui laisse penser à une origine commune des deux éléments par dissolution de l'halite et les sulfates - sodium par de l'anhydrite et du gypse provenant des formations marneuses et évaporitiques et les activités agricoles. Enfin, les chlorures se corrént avec les nitrates, les sulfates et le magnésium, indiquant un autre pole de minéralisation.

Tableau 2. Matrice de corrélation Taoura

	CE	Ca ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
CE	1,00								
Ca ⁺	0,80	1,00							
Na ⁺	0,13	0,14	1,00						
K ⁺	0,05	0,30	0,60	1,00					
Mg ⁺	0,44	0,32	0,62	0,46	1,00				
HCO ₃ ⁻	0,86	0,96	0,28	0,27	0,34	1,00			
SO ₄ ²⁻	0,28	0,27	0,65	0,38	0,85	0,27	1,00		
Cl ⁻	0,11	0,05	0,91	0,45	0,62	0,18	0,59	1,00	
NO ₃ ⁻	0,11	0,17	0,61	0,65	0,68	0,16	0,72	0,52	1,00

La présence des nitrates (provenant des engrais) dans ce pôle indique une influence des formations de surface sur la qualité des eaux. Ainsi et comme l'indique le tableau 3, le nombre d'échantillons étant de 54, le coefficient de corrélation sera $r = 0,55$ ce qui nous permet de dégager les associations suivantes selon le tableau 3.

Tableau 3. Associations entre chimiques les éléments selon la valeur de r

Couple	Valeur r	Couple	Valeur de r
Conductivité-Ca	0,80	K-NO ₃	0,65
Conductivité-HCO ₃	0,86	Mg-SO ₄	0,85
Ca-HCO ₃	0,96	Mg-Cl	0,62
Na-K	0,60	Mg-NO ₃	0,68
Na-Mg	0,62	SO ₄ -Cl	0,59
Na-SO ₄	0,65	SO ₄ -NO ₃	0,72
Na-Cl	0,91	Cl-NO ₃	0,55
Na-NO ₃	0,65		

Par conséquent comme le montre le tableau 3, les eaux de la nappe du Mio-plio-Quaternaire peu profonde représentées par les puits et les sources, présentent une faible minéralisation. Les éléments de cette zone Cl⁻, NO₃⁻, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻ et Mg²⁺ sont corrélés positivement entre eux montrant qu'elle augmente progressivement dans le sens de l'écoulement [26]. De même, dans les eaux souterraines l'origine du Cl⁻, Mg²⁺ et Na⁺ est due aux effets de stockage dans l'épikarst et dans le sol.

Le synclinal de Taoura montre une certaine zonalité chimique liée à la nature lithologique des terrains traversés. Le caractère lithologique dominant, est le calcaire et l'épaisseur atteint 100 mètres.

5.2.2 Analyse du cercle ACP

Le cercle ACP (Fig. 7) formé par les axes F1/F2, fournissant 72 %, de l'information, montre selon l'axe F1 (51%) une opposition entre les eaux fortement minéralisées (partie négative de l'axe) et les eaux faiblement minéralisées situées sur la partie positive de l'axe.

En observant le cercle selon l'axe F2 (21 %), de l'information, nous remarquons, une opposition entre les eaux bicarbonatées et les eaux chlorurées ou sulfatées. Nous constatons que la conductivité accompagne les eaux bicarbonatées calciques. Donc la minéralisation est provoquée par la dilution des formations calcaires, ceci est en conformité avec la période de réalisation des analyses d'eau ; ces

dernières sont effectuées au mois de décembre (période de pluie). Nous remarquons également une pollution des eaux par les nitrates, ces derniers s'accompagnent du potassium, mettant en évidence une pollution des eaux par les engrais de type NPK [27].

Nous remarquons que le magnésium se situe presque sur l'axe et n'accompagne pas franchement les chlorures et les sulfates, ce qui laisse supposer différentes origines de cet élément.

La précédente interprétation a mis en évidence différentes associations, pour confirmer ces liens nous allons nous intéresser aux origines des ces associations.

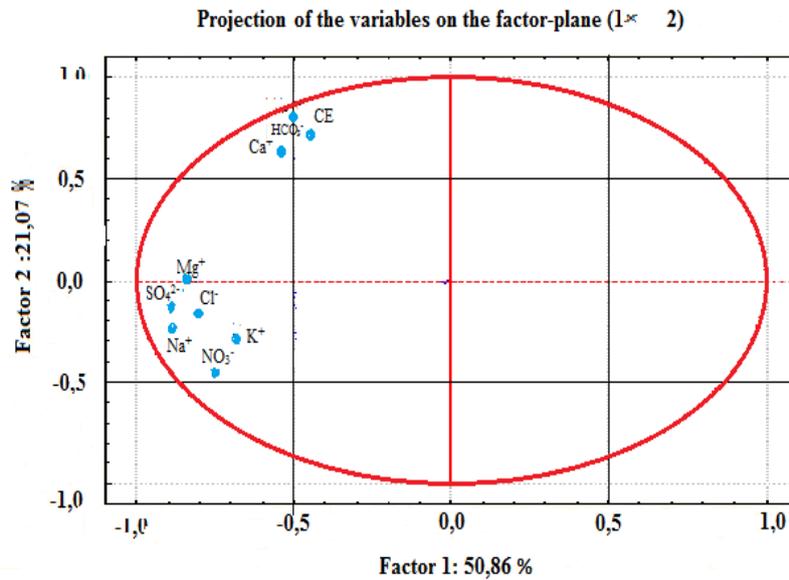


Figure 7. Cercle de l'ACP.

5.3 Etude des rapports caractéristiques et origine des éléments dominants

5.3.1 Diagramme $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ versus Ca^{2+}

Le graphe de la Figure 8 montre la présence de trois familles d'eau :

- une première famille dont les eaux ont une origine carbonatée caractérisée par les échantillons situés sous la droite, cela concerne un grand nombre d'échantillon.
- une deuxième famille où les eaux ont une origine sulfatée caractérisée par les échantillons situés au dessus la droite. Dans ce cas le nombre d'échantillon est faible,
- une famille dont l'origine est considérée comme mixte, cela concerne les échantillons, situés sur la droite. Il s'avère que ces échantillons sont peu nombreux par rapport à la première famille. Les bicarbonates présentent les corrélations les moins significatives avec les différents cations du fait que les cations ne proviennent pas uniquement des roches carbonatées mais également des évaporites [28].

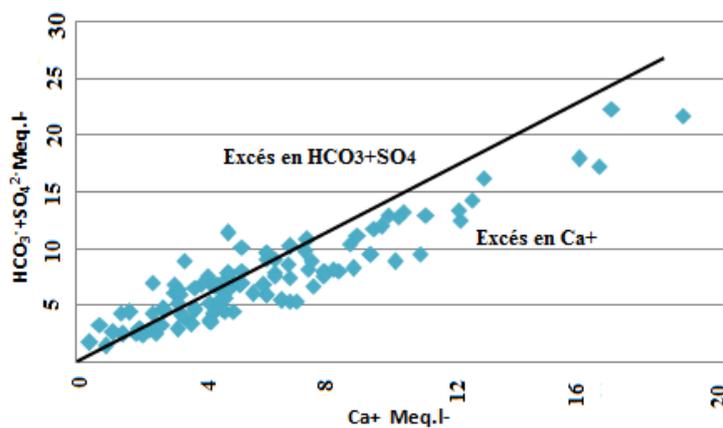


Figure 8. Diagramme $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ en fonction de Ca^{2+}

5.3.2 Diagramme Na^+ versus Cl^-

L'observation du diagramme de la figure 9, indique la présence de trois origines des éléments considérés :

- la première montre une origine commune des deux éléments ; elle concerne les points situés sur et autour de la droite,
- la seconde concerne les points situés au dessus de la droite ; elle concerne les points d'eau riche en sodium. Cette situation, porte sur un grand nombre d'échantillon, autour de 65%,
- la troisième correspond aux eaux riches en chlorures ; elle concerne les échantillons situés en dessous de la droite. Le diagramme indique que Na^+ et Cl^- peuvent avoir une origine commune, provenant de la dissolution des formations triasiques, riches en sel ou d'autres facteurs tels que l'échange de base, l'infiltration des eaux usées et du recyclage des eaux d'irrigation.

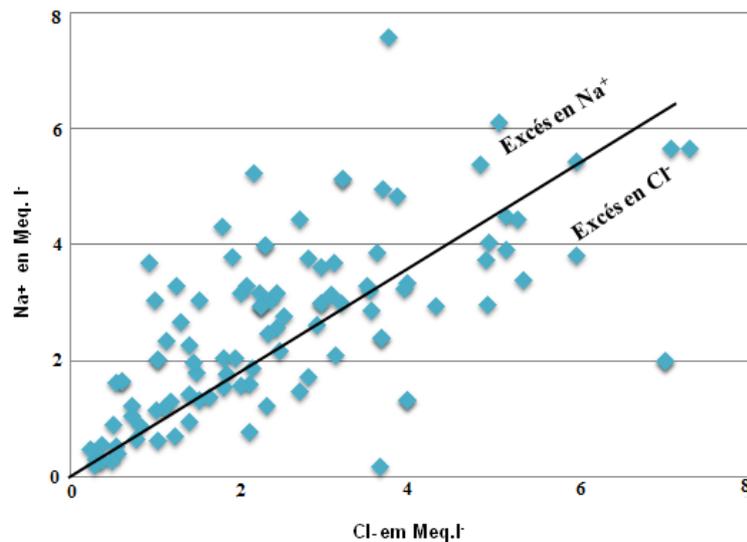


Figure 9 : Diagramme Na^{2+} en fonction de Cl^-

5.3.3 Diagramme HCO_3^- versus SO_4^{2-}

L'observation du diagramme de la figure 10, montre que les eaux sont très riches en carbonates. Ces dernières proviendraient de la dissolution des calcaires ou des échanges existant entre les deux nappes par drainante ascendante [29]. De ce fait il y a enrichissement des eaux par les carbonates. En effet les eaux des forages T1, T3, T7, T8, D5 et D3 sont très chargées en calcium, qui a une origine minéralogique due à la dissolution carbonatée, argile et dolomite, et SO_4^{2-} , Cl^- proviennent de la dissolution des formations salifères gypse et anhydrite (les affleurements du trias) [30], dont les indices de saturation indiquent une sous saturation des eaux vis-à-vis des minéraux carbonatés l'anhydrite ($-1.3 < \text{IS} < -2.4$), l'aragonite ($-0.3 < \text{IS} < -0.9$), la calcite ($-0.2 < \text{IS} < -0.7$) et la dolomite ($-0.8 < \text{IS} < -1.8$). Les formations triasiques interviennent également dans l'acquisition de la minéralisation, c'est le cas du gypse ($-1.3 < \text{IS} < -2.3$), la halite ($-6.6 < \text{IS} < -8.1$), ne joue pas un grand rôle dans la minéralisation observée.

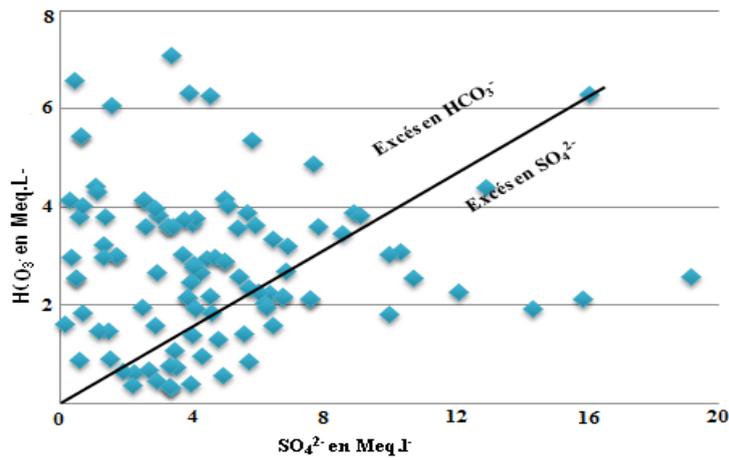


Figure 10. Diagramme HCO_3^- en fonction de SO_4^{2-}

5.3.4 Diagramme $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ versus $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$

Le figure 11 montre un alignement des éléments considérés suivant la droite, ce qui confirme l'hétérogénéité des formations constituant l'aquifère.

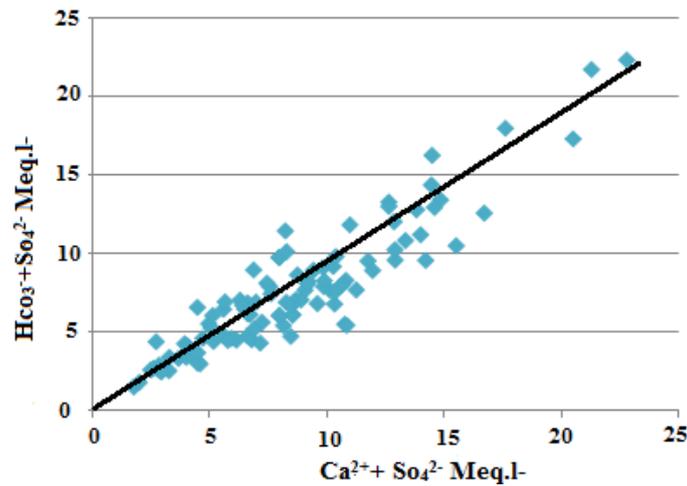


Figure 11. Diagramme $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ en fonction $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$

5.3.5 Graphe $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$

Ces deux ions sont issus de deux formations différentes, le SO_4^{2-} provient du gypse et le Cl^- provient de la dissolution de l'halite et probablement d'une pollution anthropique [31]. L'interprétation du graphe (Fig.12.), montre qu'il y a des points qui présentent un rapport ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$) supérieur à 1, indiquant une dominance des ions salifères par rapport à ceux des gypses. Et d'autres points d'eau présentent des valeurs du rapport inférieures à 1, indiquant une origine gypsifère comme il peut être associé à des formations plus récentes comme les argiles du Mio-Plio-Quaternaire [32].

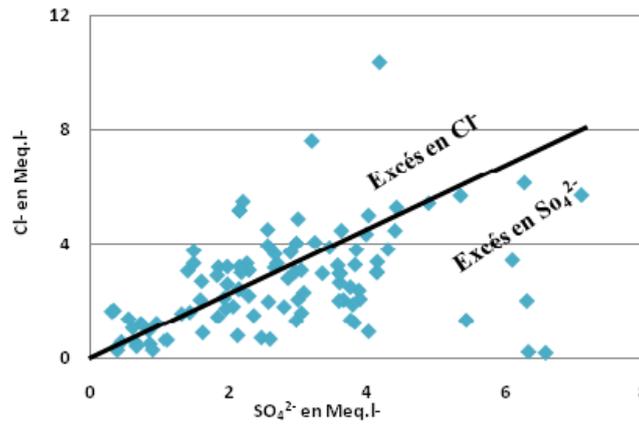


Figure 12. Evolution de Cl⁻/SO₄²⁻.

5.3.6 Diagramme HCO₃⁻ + SO₄²⁻ Versus Cl⁻

Le graphe de la figure13, montre une compétition entre les formations calcaires et les formations salines. Sur le graphique, on observe que les bicarbonates s’accompagnent de sulfates et s’opposent aux chlorures. Ces derniers ont deux origines possibles :

- naturelles, les formations à l’affleurement,
- anthropiques, par le retour des eaux d’irrigation.

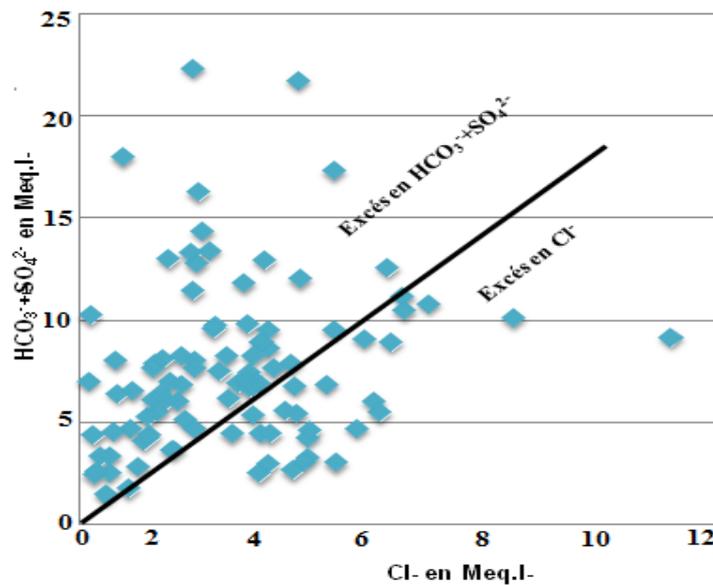


Figure 13. Diagramme HCO₃⁻ + SO₄²⁻ en fonction de Cl⁻

5.4 Détermination des faciès chimiques

5.4.1 Diagramme Ca²⁺/ HCO₃⁻ et SO₄²⁻ - f (Na⁺ /Cl⁻)

L’observation du diagramme de la figure 14, montre la présence de deux faciès chimiques, le premier indiquant des eaux bicarbonatées et ou sulfatées sodiques, par contre le second faciès montre des eaux chlorurées calcaïques. La présence des eaux bicarbonatées s’accompagnent par le sodium issu de l’échange de base.

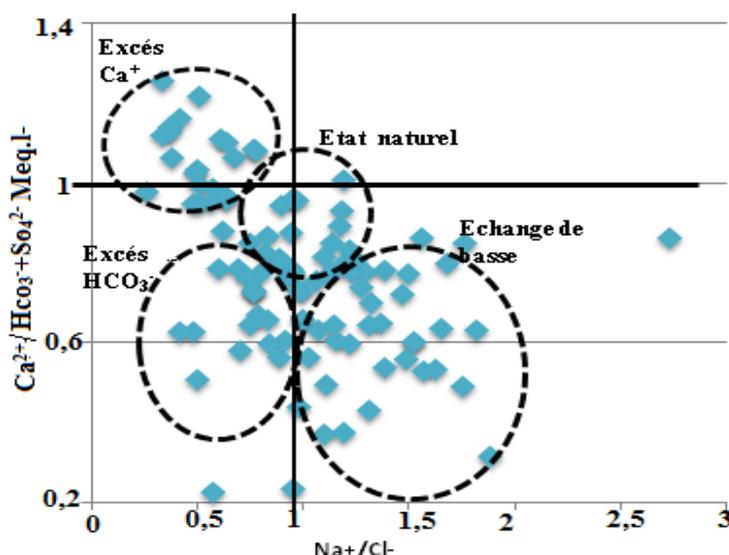


Figure 14. Faciès chimique des eaux.

5.4.2 Confirmation de l'échange de base

IEB représentant l'indice d'échange de base, est sans unité, Cl⁻ est la concentration en milliéquivalent des ions chlorures, (Na⁺+K⁺) est la concentration en milliéquivalent de la somme des ions sodium et potassium. Cet indice définit le sens des échanges ioniques entre l'eau et les terrains encaissants. Il est donné par l'équation 1.

$$IEB = Cl^- - (Na^+ + K^+) / Cl^- \tag{1}$$

Les concentrations sont exprimées en meq/l.

- si I.E.B = 0 ; cela implique qu'il n'y a pas d'échanges,
- si I.E.B. < 0 ; Ca²⁺ et Mg²⁺ sont échangés par Na⁺ et K⁺
- si I.E.B. > 0 ; Na⁺ et K⁺ sont échangés par Ca²⁺ et Mg²⁺.

Les résultats obtenus sont reportés sur le tableau 4. L'observation de ce tableau montre que les valeurs des IEB sont en majorité négatives, ce qui démontre un échange de base entre les alcalins et les alcalino-terreux, conduisant ainsi à un enrichissement en sodium au niveau des forages T1, T11, D3 et D5. Les eaux échangent donc les ions (Ca²⁺ et Mg²⁺) contre les ions Na⁺ des argiles. Seuls les forages T3, T7 et T15 présentent des IEB positifs, où les ions Na⁺ des eaux sont échangés contre les ions Ca²⁺ et Mg²⁺ de la roche réservoir. L'existence des échanges de base entre le Na⁺ et le Ca²⁺ ou Na⁺ et le Mg²⁺, est confirmée par les valeurs de l'indice d'échange ; elles sont comprises entre - 7,06 et + 4,19 (Fig.15). Notons qu'aucune valeur de l'IEB n'est nulle, confirmant ainsi une interaction entre l'eau et la roche.

Tableau 4. Valeurs de l'indice d'échange

Ouvrage\ Périodes	Période basse Eaux 2011	Période Haute Eaux 2011	Période basse Eaux 2012	Période Haute Eaux 2012	Période basse Eaux 2013	Période Haute Eaux 2013
T1	0,28	-0,07	0,29		-0,82	-0,49
T7	1,45	-0,76	-0,34		-0,15	-1,29
T8	0,36	-0,18	-0,06	-0,55	0,36	0,03
T3	1,95	-0,22	2,15	-0,67	-0,47	-1,95
T11	4,19	-0,59	0,78	0,69	0,66	3,42

D3	1,05	0,24	0,56	1,31	-0,2	0,13
D5	0,71	0,008	1,44	0,25	0,92	1,21
Puit Ogla	-1,59	-2,36	-2,18	-2,54	-1,48	-1,59
Ain El Geni	-1,19	-2,66	-1,72	-1,61	-1,59	-1,44
Puit Boukbech	1,07	-2,04	1,73	3,24	-1,64	1,63
Bir Louhichi	1,44	1,98	2,1	0,68	2,40	-0,1
Hamma Tassa	-2,31	-2,04	-1,64	-1,59	-1,73	-1,02
Ain Boussebetta	-2,31	-2,59	0,86	0,28	-0,10	-0,66
Puit EL khengua	-0,85	-0,32	-1,19	-1,32	-0,82	-1,31
Ain Tamatmat	1,96	-0,67	-0,14	1,07	-0,22	-1,73
Ain Laredjenia	1,96	0,001	-0,47	-0,043	-1,32	1,06
Ain Trab	0,02	-7,06	-4,46	-3,24	-1,73	-4,4

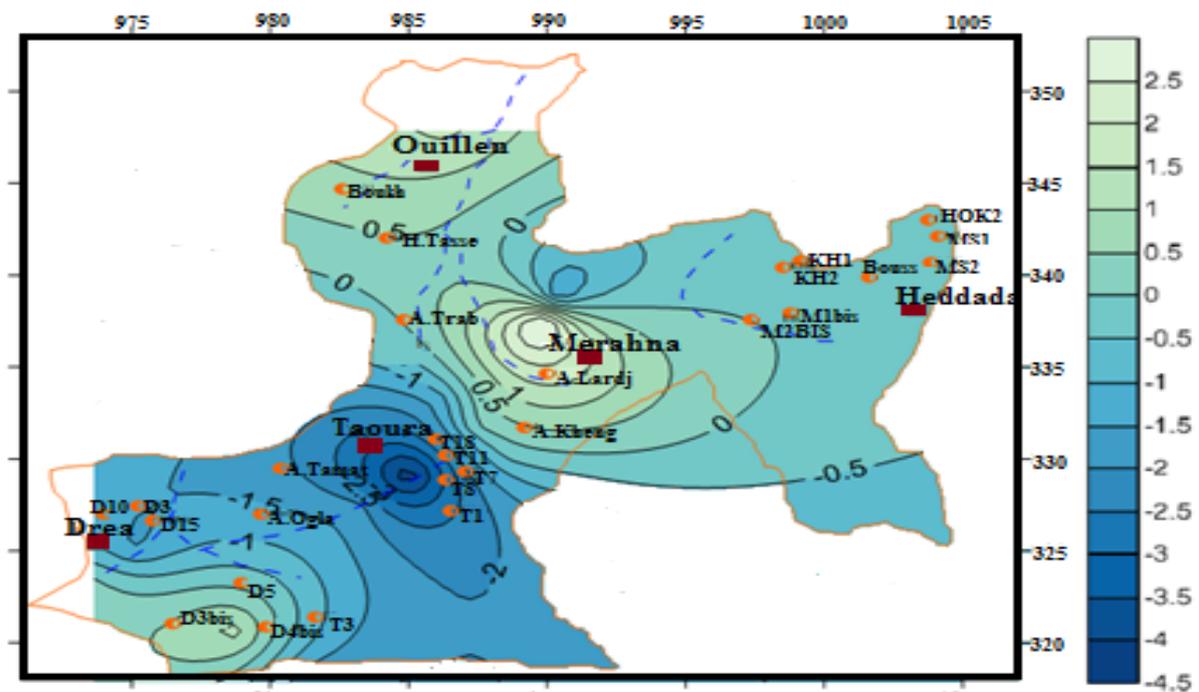


Figure15. Carte d'échange de période basse 2012.

5.4.2.1 Répartition géographique des indices d'échange de base

L'observation de la carte (Fig. 15), montre que les échanges de base sont plus prononcés au niveau de Merahna et de Taoura. Au niveau de ce secteur, les écoulements sont lents et la perméabilité importante (carte piézométrique) facilite ainsi l'échange de base.

La prédominance des valeurs négatives de l'IEB indique un échange de base lié aux minéraux argileux qui fixent le calcium présent dans les eaux de la nappe après libération du sodium.

5.5 Relations entre les ressources en eau et la lithologie

Les relations entre les éléments chimiques Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} et HCO_3^- qui caractérisent les formations géologiques de la région, montrent la dominance des ions carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-) par rapport aux ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) et aux ions salifères (Na^+ , Cl^-). Ainsi, les eaux bicarbonatées ont pour origine le karst de Taoura, elles sont captées par les forages du synclinal de Taoura (T7, T8,

T11) et ceux de Drea (D3, D5) avec une profondeur qui varie entre 100 à 250 m [33]. Le karst est contenu dans les formations datées du maestrichtien inférieur au Turonien à lithologie calcaire et à intercalations marneuses [34]. Les eaux captant l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire, cet aquifère est constitué de formations hétérogènes. Dans ces formations sont implantés les puits domestiques caractérisés par une forte conductivité $2700\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ traduisant une salinité élevée. C'est le cas des puits de Bir Louhichi, Ain Tamatmat, Ain El Geni, El Khengua et Ain Laredjenia qui sont très chargés en sulfates et en chlorures, ils sont situés au niveau de la partie Est et Nord-Est de la région. Cela reste favorisé par l'épaisseur de la formation de transit des eaux de surface (zone non saturée) qui atteint plus de 20 m, notons également que l'encaissant (Substratum) de la nappe est constitué par les argiles calcaires appartenant au maestrichtien supérieur, ce qui donne les valeurs contrastées de l'indice d'échanges de base. Le pôle gypseux caractérisé par des eaux sulfatées calciques présentes au niveau des puits Boukhebech, Hamma Tassa et Ain Trab, est situé au NE de la nappe au pied des monts de Djebel Boukebech contenant les affleurements gypsifères triasiques.

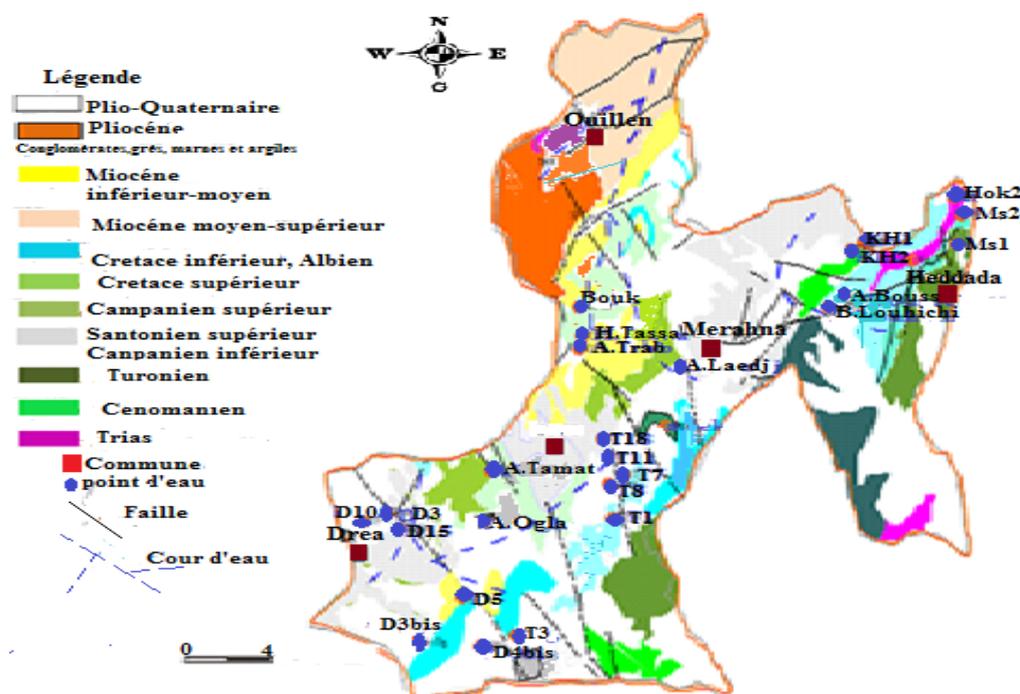


Figure16. Carte géologique et la position des points de ressource en eau de la nappe de Taoura.

6. CONCLUSION

Le présent travail porte sur une zone caractérisée par la présence de deux nappes superposées et appartenant à deux milieux différents ; le premier est poreux et caractérise la nappe contenue dans les formations Mio Plio Quaternaire, par contre le second milieu est de type fissuré et se rapporte à la nappe karstique profonde.

Ainsi en examinant la géologie du terrain, nous remarquons que les formations Mio Plio Quaternaire, constituées de matériel hétérogène (sable, argiles marnes, graviers...), recouvrent les calcaires karstiques mais de manière discontinue. Cette discontinuité est liée à la tectonique cassante présente dans la région. En l'effet, les jeux de faille ont entraînés un compartimentage de la zone d'étude, ce qui a eu pour conséquence une variation de la profondeur du karst, c'est-à-dire tantôt il est proche de la surface du sol, tantôt il est profond. La présence de ces failles, favorise le phénomène de drainance, confirmant ainsi les résultats issus des essais par pompage.

Les cartes piézométriques réalisées mettent en évidence une alimentation de la nappe superficielle par les bordures. Cet apport latéral va influencer la composition chimique des eaux des nappes.

Cette situation nous a conduits à utiliser plusieurs méthodes pour la détermination de la qualité des eaux et son origine. En premier, nous avons réalisé une analyse en composantes principales (ACP) et qui a démontré une opposition entre les eaux bicarbonatées calciques à l'origine de la minéralisation observée et le reste des éléments. Dans une seconde phase, nous avons recherché les liens éventuels entre les éléments chimiques. Ainsi, des plusieurs graphiques qui ont été réalisés, nous avons remarqué l'existence de bonnes correspondances entre $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ versus $\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+$ et Na^+ versus Cl^- . La présence du sodium dans les eaux est liée au processus d'échanges de bases, cette tendance est confirmée par les indices calculés.

De plus, cette présente étude a révélé, que la qualité des eaux de la zone d'étude reste influencée par les facteurs naturels, particulièrement les formations géologiques présentes au niveau de la zone.

Nous avons également remarqué une baisse des niveaux d'eau dans les puits ceci s'explique par la drainance et ou les aléas climatiques.

REFERENCES

- [1] Collignon B., (1986). Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des monts de Tlemcen (Algérie). Thèse de doctorat, Université d'Avignon, France. 282 p.
- [2] Abdesselam M., Mania J., Mudry J., Gélard J.P., Chauve P., Lami H. et C. Aigoun (2000). Arguments hydrogéochimiques en faveur de Trias évaporitique non affleurant dans le massif du Djurdjura (dorsale kabyle, élément des Maghrébides). Rev. Sci. Eau 13 (2) : 155-166.
- [3] Djebbar M., (2005). Caractérisation du système karstique hydrothermal Constantine-Hamma Bouziane -Salah Bey dans le Constantinois central (Algérie nord orientale) Thèse de doctorat d'état de l'Université de Constantine. 250 p.
- [4] Zerrouki H., (2013). Aspects quantitatifs et qualitatifs de la source de bouakkous : impact le champ captant d'ain chabro (zone semi-aride Tebessa). Doctorat de l'Université d'Annaba. 168 p.
- [5] Baali F. (2001). Etude hydrogéologique hydrochimique de la région karstique de Chéria N-E Algérien. Magister Univ. Annaba Algérie, 100 p.
- [6] Bouroubi Ouadfel Y., & Djebbar, M., (2014). Characterization of Taoura's multilayers system by the geochemical tracers of carbonates and the evaporites (oriental extreme Algeria). Am. J. Sci. Ind. Res., 3 (5): 305-314.
- [7] R. Kardache, R Lounis, M Abdesselam, N Hannachi, L Djabri (2013) : Karstologie en zone aride : formations karstifiées du Sud Est Algérien. Méthodes et Outils. Revue Courrier du Savoir – N°17, Décembre 2013, pp.71-76
- [8] Djidel M., (2008). Alteration of the Aquifer Water in Hyperarid Climate, by Wastewater: Cases of Groundwater from Ouargla (Northern Sahara, Algeria) American Journal of Environmental Sciences 4 (6): 569-575.
- [9] Mangin A., (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doctort. Sciences, Université de Dijon. 601 p.
- [10] Drogue C., (1969). Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques, d'après l'exemple de quelques karsts péri-méditerranéens. Thèse d'Etat, Montpellier, 455 p.
- [11] Bakalowicz M., (2002). Hydrogéologie karstique. Cours DEA H.H.G.G. Université Paris-6. Caractéristiques et concepts. Méthodes d'exploration, d'exploitation et de gestion active, 278 p.
- [12] Marsaud B. ; (1996). Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse Doct. en Sciences, Université de Paris XI Orsay. 301p.
- [13] Peyraube N., Lastennet R. & Denis A., (2012). Geochemical evolution of groundwater in the unsaturated zone of a karstic massif, using the PCO_2 — SiO_2 relationship. J. Hydrology, 430 p.
- [14] Senani S., (2011). Estimation et gestion des eaux souterraines de la wilaya de Souk-Ahras région de Taoura Memoire de Magister en Hydraulique, Université Mohamed Cherif Messaadia , 182 p.
- [15] Djabri L., Zerrouki H., Bouhsina S., Hani A., Mudry J., Djabri Y., (2011). Aspects quantitatifs et qualitatifs des eaux transitant par la grotte. 9 th conférence on limestone hydrogeology, 2011, Besancon, France. pp 125-127.
- [16] Guasmi I., (2009). Pollution des eaux et pouvoir auto-épurateur de l'Oued Medjerda (Nord Est Algérien).Thèse de doctorat de l'Université d'Annaba, 240 p.
- [17] David L., (1953). L'âge Pliocène d'une partie des formations continentales de la région de Souk Ahras. Rapport de Première édition Etude géologique des monts de la haute Medjerda. Carte géol. Algérie, pp 216-218.
- [18] Aunay B., (2003). Evolution géologique, mise en place de la certification et thermalisme des aquifères péri-méditerranéen., colloque international montpellier avril 2003 Publ. no. 278, pp 22
- [19] Bahir, M., Jalal, M., Mennani, A. & Laftouhi, N. , (2001), Potentialités hydrogéologiques du synclinal de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc) . Estudios Geol. , 57, pp 47-52.

- [20] Bourouga M., (2015). Déminéralisation des eaux de forage de la région d'Ouled Abbés et son impact sur l'environnement (Souk Ahras, extrême Nord-Est Algérien). Mémoire de Magister en Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie 120 p.
- [21] Dahdouha N., (2012). Etude diagnostique des forages partie essai par pompage. Bureau d'étude. Rapport de fin de sondage « Forage nappe de Taoura, Wilaya de Souk Ahras. Algérie .
- [22] Lannani. K.,& Abdouni. L., (2008). Etude géo-électrique par sondage électrique dans la région de Taoura. Mémoire d'ingénieur d'état, Université de Annaba, 81p.
- [23] Strojexport Prague., & progress. ;(1977). modifié Progress (2010). Bureau d'étude Prospection Géophysique sur le synclinal de Taoura-Bordj M'raou, Souk-Ahras .Algeria 87p.
- [24] Bousnoubra H., (2002). Ressources en eaux des régions de Skikda, Annaba, El Tarf, Guelma, Souk-Ahras (N-E Algérien) (Evaluation, gestion et perspective; Vulnérabilité et protection), Thèse de doctorat d'état, 159 p.
- [25] Rodier J., (2009). L'Analyse de l'eau, 9ème édition, DUNOD, 1527 p.
- [26] Issiaka S., Aristide DG. & Innocent KK., (2006). Vulnerability assessment of Abidjan Quaternary Aquifer using the DRASTIC method. In Groundwater pollution in Africa, Xu Y, USHER B
- [27] Mudarra M., & Andreo B., (2011). Relative importance of the saturated and the unsaturated zones in the hydrogeological functioning of karst aquifers: The case of Alta Cadena (Southern Spain). J. Hydrology, N° 397, pp 26380.
- [28] Gouaïdia L.Guefaïfia O, Boudoukha A, Hemila M.L (2004) Application des méthodes statistiques pour expliquer le chimisme de la nappe alluvionnaire de Meskiana. Colloque international Terre et Eau. Université d'Annaba 04,05& 06 décembre 2004, pp 30-34.
- [29] Debieche TH., J Mania, J Maudry (2004).Utilisation des rapports caractéristiques dans la détermination de la salinité des eaux souterraines. Colloque international Terre et Eau. Annaba 4, 5 & 6 Décembre 2004, pp 20-24
- [30] Amrani S. & Hinaje S., (2014). Utilisation des analyses hydro-géochimiques et des analyses en composantes principales (A.C.P) dans l'explication du chimisme des eaux souterraines de la nappe plio-quaternaire entre Timahdite et Almis Guigou (Moyen Atlas, Maroc). Science Lib Editions Mersenne : volume6, N° 140306, 14p.
- [31] Danquigny C., Emblanch C., Blondel T., Garry B., Roche A. & Sudre, C. ; (2010). Influence of Great Flood on the Functioning of Karst Aquifer: Example of the Fontaine de Vaucluse Karst System (SE France), 4th International symposium on karst, Malaga, pp 115-121.
- [32] Athmani A.S., (2011). Evaluation de la qualité des eaux de surface cas du bassin versant Oued Medjerda Souk-Ahras, Mémoire de Magister, Université Mohamed Cherif Messaadia Souk-Ahras, 162 p.
- [33] B.N.E.D.E.R. (Bureau national des études pour le développement rural), (2012). Etude d'exécution des périmètres irrigués de Sidi Badr et Hemissi. Mission I et II : Etude préliminaire et hydrologique, 25 p.
- [34] Chadi M., (2004). Cadre géologique et structural des séries crétacées néritiques du constantinois (Est- Algérien). Thèse de doctorat. Université Mentouri Constantine. 180 p.