



## **ANALYSE STATISTIQUE ET GEOCHIMIQUE DE LA DYNAMIQUE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES DU SYNCLINAL DE GHASSIRA ALGERIE ORIENTALE**

**BRINIS N.<sup>1</sup>, BOUDOUKHA A.<sup>2</sup>, AHMED HAMEL A.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Laboratoire de mobilisation et de gestion des ressources en eau. Univ- de Batna.

<sup>2</sup>Laboratoire de recherche en hydraulique appliquée. Université de Batna.

<sup>3</sup>DRE Biskra, doctorant à l'université de Mentouri, Constantine.

nafaa\_brinis@yahoo.fr

### **RESUME**

Ce travail a été réalisé au niveau du synclinal de Ghassira dans la vallée de Oued El-Abiod dans les Aurès dans l'est algérien où les eaux souterraines sont utilisées pour la consommation humaine et pour l'irrigation. Les différentes nappes exploitées appartiennent à plusieurs entités lithologiques (carbonatées et évaporitiques...). La combinaison de la géologie, statistique a permis d'étudier l'origine de la chimie de ces eaux. Il s'agit d'une eau d'origine évaporitique dans 80% des cas et accessoirement carbonatée 20%. Les phénomènes qui ont générés ces deux classes sont multiples et sont essentiellement en liaison avec la composition lithologique des aquifères.

**Mots clés :** Ghassira, faciès chimique, carbonates, évaporites, statistique.

### **ABSTRACT**

This paper is about groundwater's quality in Ghassira which is located in El-Abiod valley in eastern Algeria. The water is used for human consumption and irrigation. The different layers belong to several types of rocks (limestone and evaporate ...). To study the behaviour of dissolved salts in this water, we have used geology of the aquifers and statistics. This combination gives us information about minerals those are responsible of water's quality. 80% of analyzed samples are influenced by evaporate rocks (gypsum, halite...) and

20% by limestone. Many processes have generated these two classes and are relating, especially, with the rocks of aquifers.

**Keywords:** Ghassira, water types, limestone, evaporates, statistics.

## INTRODUCTION

La qualité des eaux souterraines est influencée par de nombreux facteurs, telles que la chimie de l'eau d'infiltration, la nature géologique de la roche réservoir et les facteurs anthropiques. Frapé et al, 1984. Néanmoins, la dissolution des minéraux de la roche encaissante dans l'eau, est le facteur prédominant qui contrôle la composition chimique de ces eaux. Certains minéraux comme les carbonates et les évaporites se dissolvent rapidement et modifient considérablement la composition chimique de l'eau, tandis que d'autres minéraux comme les silicates, se dissolvent plus lentement et donc ont un effet moindre sur la composition chimique de l'eau. Garrels et McKenzie, 1967. La température de l'eau joue également un rôle essentiel dans le contrôle de la composition chimique de l'eau souterraine. Boudoukha et Athamena, 2012. Les études antérieures comme celles de Hartman et al., (2005), Adams et al., (2001), Alberto et al., (2001) ont montré également que la chimie des eaux souterraines est principalement fonction de l'interaction entre l'eau et la composition minéralogique de la couche aquifère. Les processus hydrochimiques qui se produisent à l'intérieur de ce système, sont la dissolution, précipitation et l'échange de base. Ces phénomènes se produisent le long de l'écoulement souterrain et dépendent également du temps de séjour qui contrôle l'évolution de la composition chimique des eaux souterraines. Apodaca et al., 2002. Plusieurs techniques ont été appliquées pour étudier, évaluer et caractériser la variation chimique des eaux souterraines le long de l'écoulement souterrain par de nombreux chercheurs tels que la thermodynamique et les statistiques (Plummer et al, 1990; Rosenthal et al, 1998; Eary et al, 2002; Güler et Thyne, 2002). Ce travail consiste à faire l'état de la qualité chimique des eaux souterraines du synclinal de Ghassira qui fait partie de la vallée d'Oued el-Abiod se trouvant au cœur des Aurès en Algérie orientale (Figure 1).

## CADRE NATUREL

Le synclinal de Ghassira se trouve dans la vallée de l'oued el-Abiod qui est située au cœur des Aurès, à mi-chemin entre Biskra et Batna où règnent trois types de climat :

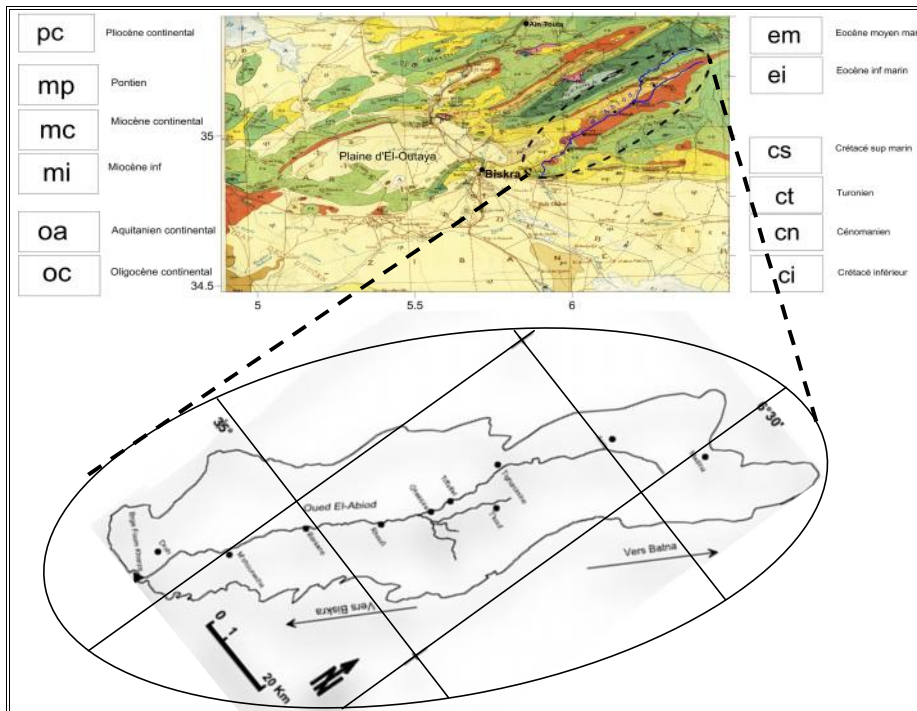
- Sur la partie septentrionale, on a un climat de type méditerranéen avec des précipitations de l'ordre de 450 mm/an et des périodes d'enneigement de 23 à 25 jours/an.

*Analyse statistique et géochimique de la dynamique des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du synclinal de Ghassira, Algérie orientale*

- Sur la partie médiane on a un climat subsaharien avec des précipitations de l'ordre de 200 à 300mm/an.
- Enfin un climat aride sur la partie sud avec des précipitations ne dépassant pas les 200 mm/an.

La température moyenne annuelle varie entre 14 et 21°C (selon les endroits). Mebarki, 2009.

La vallée de Ghassira se présente comme une vallée allongée entre les grands reliefs de Dj Azreg (1937m) et celui de Dj Zellatou (1994m).



**Figure 1 :** Carte de situation et géologie de la région d'étude (Extrait de la carte géologique de l'Algérie, 1951-1952)

La région présente une série stratigraphique qui s'échelonne du Trias au Quaternaire (Wildi, 1983), comportant ainsi plusieurs aquifères potentiels superposés. Le Jurassique et le Crétacé sont caractérisés par des aquifères captives, multicouches à extension régionale, constitués essentiellement de roches gréseuses et carbonatées. On y rencontre souvent des passages imperméables de marnes. Par endroit apparaissent des niveaux carbonatés. L'Eocène inférieur est l'aquifère le plus exploité à l'aide de forages qui peuvent débiter plus de 90 l/s. Il est constitué de calcaires à silex, d'âge Yprésien–Lutétien inférieur. Il comporte parfois des formations gypsifères. L'épaisseur de

cet aquifère diminue du Nord vers le Sud où il se trouve enfouis sous 300 m de dépôts de l'Oligo-Miocène.

Le Miocène est formé de poudingues, sables et grés intercalés d'argiles, cet ensemble se termine par les conglomérats du Pliocène. Il s'agit de dépôts de remplissage souvent en continuité avec les alluvions du Quaternaire. Ces formations constituent un aquifère en majorité libre.

D'après les multiples travaux et études réalisés dans la région, le taux des infiltrations atteint 10% des précipitations. Hamel, 2008. Ces formations ont été structurées en un vaste synclinal, plissé, intensément fracturé allongé sur 80 km, selon une direction NE-SW et d'une largeur de 15 km (Figure 1).

## MATERIEL ET METHODES

L'échantillonnage a intéressé 20 points d'eau, durant l'année 2006. Ces échantillons ont été pris au niveau des forages après 15 min de pompage et après stabilisation de la température de l'eau pour éliminer les eaux souterraines stockées dans l'ouvrage. Ces échantillons ont été prélevés à l'aide de 2 flacons en polypropylène lavés à l'acide. Chaque échantillon a été filtré immédiatement sur le site à l'aide de filtres de 0,45 µm d'acétate de cellulose. Le filtrat pour les analyses des cations a été stocké dans des flacons de 250 cm<sup>3</sup> en polyéthylène et immédiatement acidifié à pH<2 par ajout d'acide nitrique Merck.TM ultrapur. Les échantillons dont l'eau est destinée à l'analyse des anions n'ont pas été acidifiés. Tous les échantillons ont été conservés dans une glacière à une température inférieure à 4 °C et transférés au Laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) de Constantine et conservés dans un réfrigérateur à une température inférieure à 4 °C jusqu'à ce qu'ils soient analysés dans un délai d'une semaine au maximum. La conductivité électrique (CE) et le pH ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'un multi-paramètre WTW (P3 Multi-Line pH / LFSET). Les éléments chimiques analysés sont le calcium (Ca<sup>2+</sup>), magnésium (Mg<sup>2+</sup>), sodium (Na<sup>+</sup>), potassium (K<sup>+</sup>), chlorure (Cl<sup>-</sup>), bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Les méthodes utilisées sont celles préconisées par Rodier, 1996. La balance ionique est généralement inférieure à 8% (Tableau 1).

**Tableau 1** : Caractéristiques statistiques des analyses physico-chimiques. Teneurs sont exprimées en mg/l, CE en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , CV en % et pH sans unité.

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CE	pH
<b>Moy</b>	122,20	47,30	81,70	4,25	112,25	285,20	262,60	5,25	1307	7,32
<b>Min</b>	58,00	24,00	12,00	2,00	20,00	56,00	144,00	0,00	570	7,06
<b>Max</b>	222,00	72,00	450,00	8,00	705,00	530,00	305,00	19,00	3640	7,91
	36,75	12,58	105,52	1,61	163,26	121,63	36,29	4,52	715	0,20
<b>CV</b>	30	26	129	37	145	42	13	86	54	2

Moy. : Moyenne. Min. : Minimum. Max. : Maximum. . Ecart type. CV : Coefficient de variation.

Pour comprendre l'évolution de la chimie des eaux le long de l'écoulement souterrain, une simulation à l'aide du code PHREEQC (Parkhurst et Appelo, 1999) a été réalisée. Ce code permet de calculer le bilan massique de la solution aqueuse le long de l'écoulement souterrain. Cette simulation a permis de calculer les indices de saturation (IS) et aborder la spéciation des minéraux. Ceci a permis d'évaluer l'état de saturation de l'eau qui contrôle le chimisme et l'état d'équilibre avec les phases solides (Appelo and Postma, 1996; Drever, 1997). Généralement l'équilibre eau-roche est atteint lorsque IS=0. Si IS>0, l'eau est sursaturée, la précipitation des minéraux est nécessaire pour atteindre l'équilibre, par contre si IS<0, l'eau est sous-saturée, la dissolution des minéraux est nécessaire pour atteindre l'équilibre (Yidanaa et al., 2008), donc ces minéraux contrôlent la chimie de ces eaux.

Une analyse en composantes principales (ACP) a été également appliquée au traitement de ces données chimiques. Bien que l'ACP soit une méthode exploratoire et descriptive (Dagnélie, 2006) le but de ce traitement est de déterminer les principaux facteurs qui contrôlent le chimisme de ces eaux. Cette méthode statistique a été largement appliquées pour enquêter sur des phénomènes de l'environnement et les processus hydrogéochimiques à travers le Monde, (Anazawa et al., 2003 ; Güler et Thyne, 2004) et en Algérie (Belkhiri et al., 2010 ; Tiri et al., 2011 ; Tiri et al., 2014). Ce travail porte donc sur la force de cette technique pour caractériser les variations hydrochimiques dans la vallée d'Oued el-Abiod. Ces traitements ont été effectués à l'aide du logiciel XLSTAT 2007, version Demo.

L'analyse effectuée est une ACP centrée réduite qui a été réalisée sur un tableau de 10 variables (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CE et pH) et de 20 individus, échantillons prélevés sur le terrain. Le critère de Kaiser (Kaiser, 1960) a été appliqué afin de déterminer le nombre total de facteurs significatifs. Selon ce critère, seuls les facteurs ayant une valeur propre supérieure ou égale à 1 seront acceptés comme sources possibles de variance dans les données.

## **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

### **Variation des paramètres physico-chimiques**

On admet qu'un CV inférieur à 50% témoigne d'une certaine homogénéité dans l'amplitude des teneurs observées entre valeurs minimales et maximales traduisant une faible variation autour de la moyenne. Par contre les paramètres présentant un CV supérieur à 50% indiquent une grande déviation par rapport à la moyenne de l'ensemble des observations.

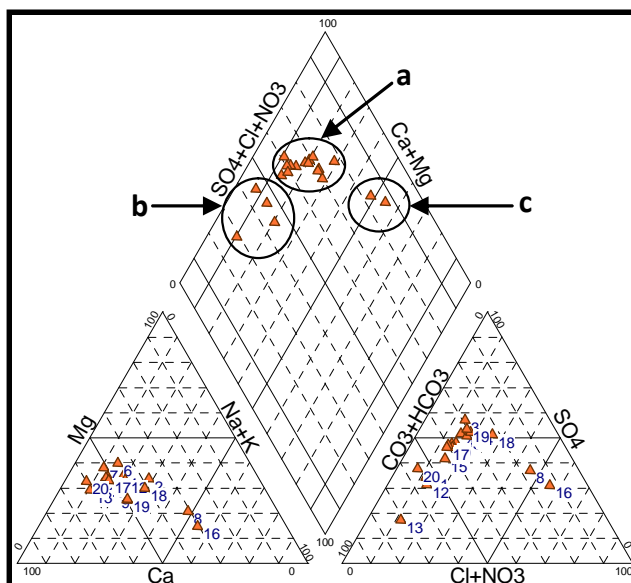
On remarque que ce paramètre est très élevé pour certains éléments tels que le sodium, les chlorures et les nitrates (Tableau 1). La grande variabilité des nitrates peut être expliquée par une utilisation sélective des engrais. Pour ce qui est du sodium et des chlorures, leur origine évaporitique leur permet d'acquies des concentrations élevées localement.

La variation du reste des paramètres par rapport à la valeur moyenne est de l'ordre de 30%. Ceci est dû à une répartition assez régulière de la concentration de ces paramètres dans l'espace aquifère.

### **Caractéristiques hydrochimiques globales des eaux**

L'examen du tableau des données montre que les eaux sont caractérisées par une faible alcalinité (pH entre 7,06 et 7,91) et par une minéralisation moyenne exprimée par la CE allant de 570 à 3640  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

La projection des résultats des analyses chimiques sur le diagramme de Piper (figure 2) montre que les eaux de la région sont généralement chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes et représentent 70% des cas. Accessoirement, ces eaux sont soit bicarbonatées calciques et magnésiennes (20%) soit chlorurées sodiques et potassiques ou sulfatées sodiques (10%). On remarque donc que les eaux sont fortement influencées par les évaporites.



**Figure 2:** Projection des échantillons sur le diagramme de piper.

Légende : **a** : Famille des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes; **b** : Famille des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes; **c** : Famille des eaux chlorurées sodiques et potassiques ou sulfatées sodiques.

### Thermodynamique

L'interprétation thermodynamique a été réalisée en utilisant la simulation de la concentration des ions majeurs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) sous l'effet de l'évaporation isotherme ( $25^\circ\text{C}$ ) par le logiciel thermodynamique « Phreeqci 2.8 ». Cette simulation montre que la valeur moyenne des IS des minéraux carbonatés indique une sursaturation et donc une tendance à la précipitation (Figure 3). Par contre, les minéraux évaporitiques se trouvent sous-saturés, notamment la halite (Figure 4).

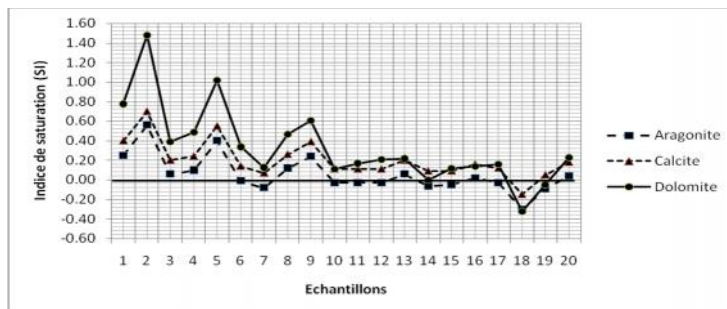


Figure 3 : Evolution de l'indice de saturation des minéraux carbonatés.

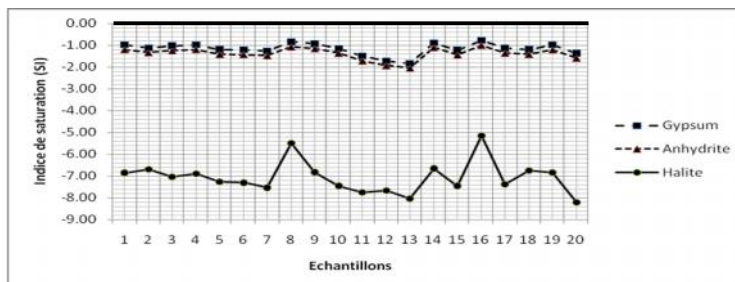


Figure 4 : Evolution de l'indice de saturation des minéraux évaporitiques.

### Origine des minéraux évaporitiques

L'importance du faciès évaporitique nous conduit à chercher parmi les minéraux générateurs de ce faciès lesquels sont caractéristiques des eaux étudiées. Les éléments tels que Ca, Mg, Na, SO<sub>4</sub>, Cl peuvent provenir de plusieurs types de minéraux évaporitiques, nous citons à titre d'exemple, la halite (Na, Cl), les gypses (CaSO<sub>4</sub>), l'Epsomite (Mg SO<sub>4</sub>), La mirabilite (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) etc....

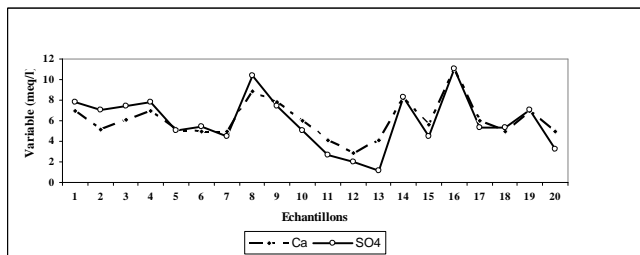
Par ailleurs, on vérifiera lequel des cations est dominant dans les minéraux sulfatés et ceux chlorurés. On commence par la combinaison des sulfates avec les éléments : Ca, Mg et Na.

L'observation des graphiques (Figures 5, 6 et 7) montre avec certitude que le calcium est celui qui suit parfaitement l'évolution des sulfates, alors que le magnésium et le sodium présentent eux aussi une dynamique semblable -dans une certaine limite- à celle des sulfates, mais les teneurs sont relativement faibles. Il est clair donc, que parmi les minéraux évaporitiques sulfatés, c'est bien le gypse qui caractérise la minéralisation des eaux étudiées. D'ailleurs, le faciès sulfaté calcique est présent à 70%.

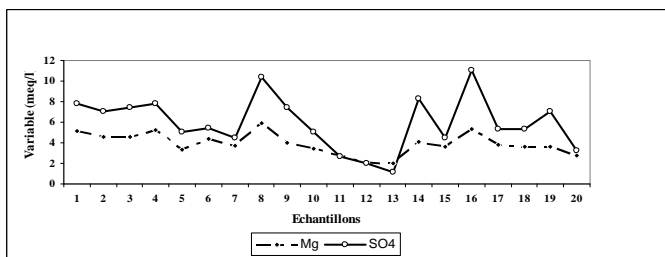
Concernant les minéraux évaporitiques chlorurés, il paraît clairement (Figure 8) que le sodium évolue parfaitement avec les chlorures, les deux courbes se confondent. On peut dire qu'en dépit des 10% que représente le faciès chloruré



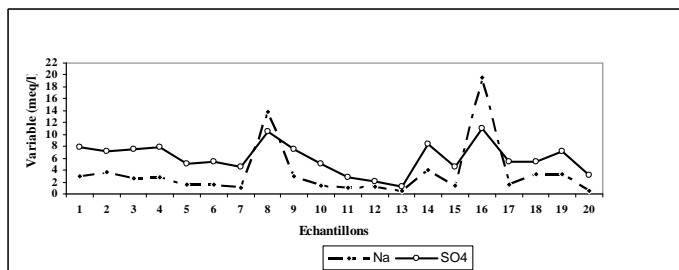
dans les eaux de la région, la seule source de ces deux éléments reste sans doute la halite.



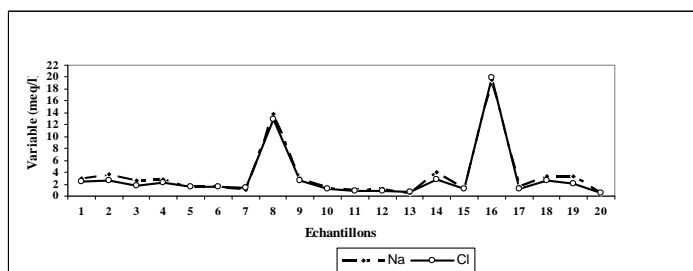
**Figure 5 :** Evolution des sulfates et du calcium.



**Figure 6 :** Evolution des sulfates et du magnésium.



**Figure 7 :** Evolution des sulfates et du sodium.



**Figure 8 :** Evolution des chlorures et du sodium.

### Origine des minéraux carbonatés

Le faciès carbonatés ne représente que 20% des échantillons analysés mais il est important d’identifier lequel des minéraux de cette catégorie est dominant dans les eaux. Entre les minéraux caractéristiques des roches carbonatés nous citons à titre d’exemple : la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) et la dolomite  $\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$ . Il convient donc, de vérifier l’évolution des bicarbonates avec le calcium et le magnésium. Les figures 9 et 10 ne montrent pas une évolution simultanée nette des bicarbonates avec le calcium, pour la simple raison que le calcium issu du gypse et plus important que celui généré par la calcite, la courbe du calcium dépasse celle des bicarbonates, alors que pour le magnésium, on remarque une dynamique commune par rapport à quelques échantillons.

Pour mieux comprendre le chimisme des eaux étudiées, on va combiner ces quatre éléments ( $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , Ca, Mg) dans le même graphique sous forme de rapports Ca/Mg avec  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  (Figure 11), à partir duquel, on peut dire que :

- Le calcium évolue surtout avec les sulfates et à un degré très faible (5 échantillons) avec les bicarbonates,
- l’absence de tout rôle important du magnésium dans les eaux étudiées, ceci peut être dû à ses teneur assez faible et/ou la participation de ce dernier à une phase solide (SI dolomite entre -0.32 et 1,48).

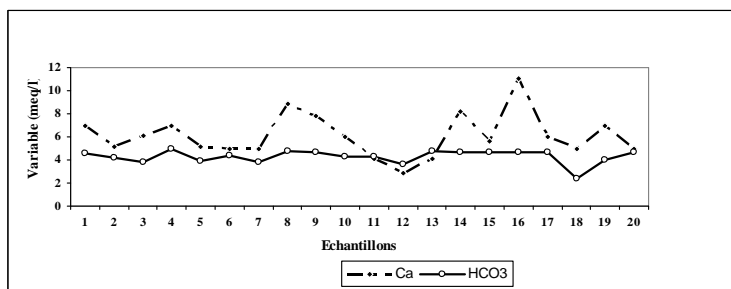


Figure 9 : Evolution des bicarbonates et du calcium.

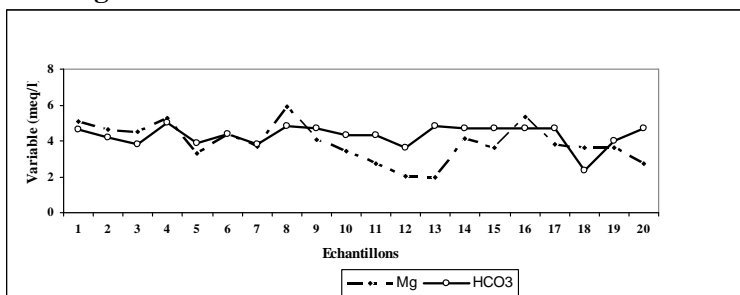


Figure 10 : Evolution des bicarbonates et du magnésium.

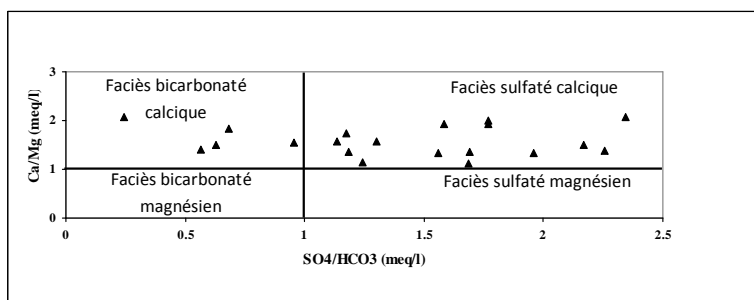


Figure 11 : Evolution des paramètres chimiques dominants dans les eaux.

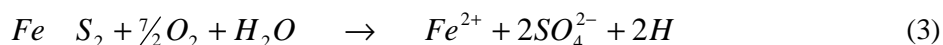
## Analyse statistique

### • Matrice de corrélation

L'apport de la corrélation entre les paramètres physico-chimiques dans les eaux souterraines aide à comprendre certains phénomènes dégagés par l'interaction eau-roche. Elle permet de donner une approche sur l'origine commune de certains paramètres. On admet qu'une corrélation est significative, si la valeur du coefficient de corrélation « r » est comprise entre + 0,5 et 1 (relation positive) et -0,5 et -1 (relation négative). Dans notre cas plusieurs liaisons sont significatives mais à des degrés variables (Tableau 2). La matrice de corrélation issue de cette ACP, montre que la CE présente une liaison significative (0,534 à 0,956) avec  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$  et  $SO_4^{2-}$ . Ceci traduit la participation de ces éléments à l'acquisition de la charge saline des eaux.  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  présentent une forte corrélation positive entre eux (0,767), indiquant une origine commune. De même que pour  $Ca^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$  (0,912) et  $SO_4^{2-}$  et  $Mg^{2+}$  (0,923) et  $Ca^{2+}$  et  $Na^+$  (0,816) qui possèdent également une très bonne corrélation positive. Les fortes teneurs de  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$ , détectés dans certains échantillons peuvent suggérer la dissolution des sels de chlorures et de sulfates selon les formules 1 et 2.



Les sulfates peuvent également provenir de la dissolution dans l'eau, des minéraux sulfurés comme la pyrite ou la marcassite (Droubi et al., 1976) selon la formule 3.



**Tableau 2 :** Matrice de corrélation entre les paramètres mesurés

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	CE	pH
Ca	1									
Mg	<b>0,767</b>	1								
Na	<b>0,816</b>	<b>0,644</b>	1							
K	0,458	0,132	<b>0,581</b>	1						
Cl	<b>0,792</b>	<b>0,608</b>	<b>0,995</b>	<b>0,553</b>	1					
SO4	<b>0,912</b>	<b>0,923</b>	<b>0,759</b>	0,351	<b>0,713</b>	1				
HCO <sub>3</sub>	0,419	0,274	0,200	-0,132	0,213	0,236	1			
NO <sub>3</sub>	0,265	0,067	0,232	0,260	0,254	0,084	0,340	1		
CE	<b>0,917</b>	<b>0,767</b>	<b>0,972</b>	<b>0,534</b>	<b>0,956</b>	<b>0,879</b>	0,271	0,215	1	
pH	-0,422	-0,091	-0,241	-0,393	-0,252	-0,175	-0,242	-0,481	-0,282	1

• **Analyse en composantes principales (ACP)**

L'analyse effectuée est une ACP centrée réduite. Selon le critère de Kaiser, seuls deux facteurs ont été retenus (F1 et F2) qui représentent 73% de la variance totale, ce qui est assez bon et peut être utilisée pour identifier les principales variations dans l'hydrochimie. F1 représente 57 % de la variance et il est déterminé positivement par (CE, SO4, Cl, Ca, Mg, Na). C'est le facteur de la contamination par les éléments carbonatés et salifères. F2 qui représente 16 % de la variance totale, n'est marqué par une opposition entre le pH et les nitrates indice de pollution agricole. Figure 12.

Donc F1 représente la minéralisation due aux minéraux évaporitiques générés par les formations triasiques et/ou les niveaux à gypses du Lutétien et de l'Oligocène. Sur le cercle des variables, ce pôle (évaporitique) est bien visible à droite de l'axe F1 (Figure 12). Les éléments concentrés dans ce pôle peuvent provenir de la halite et du gypse. L'augmentation de la teneur en sulfates entraîne non seulement l'augmentation du calcium mais aussi du magnésium. Le gypse renferme toujours une proportion plus ou moins élevée en magnésium (Schoeller, 1962). Ceci confirme la dominance des familles évaporitiques.

F2 a une inertie moins importante que le premier et il est marqué par une opposition entre le pH et les nitrates. La mise en place d'une réaction de dénitrification pendant laquelle la consommation de protons nécessaires pour réduire les nitrates ou les nitrites en azote moléculaire et/ou en oxyde d'azote gazeux, provoque une augmentation du pH (Boubaker et al., 2014). La réaction mise en jeu est la suivante :



Sur le plan F1/F2 des individus, la majorité des échantillons se regroupent au centre du cercle indiquant une minéralisation moyenne, cependant, quelques

points (8 et 16) sont caractérisés par une minéralisation assez importante (Figure 12).

Les deux facteurs montrent donc que les eaux souterraines de la région, suivent un seul processus dans la dissolution des minéraux (évaporites et carbonates) et sont supposées être représentatifs du processus d'acquisition du chimisme de l'eau lié à l'interaction eau-roche.

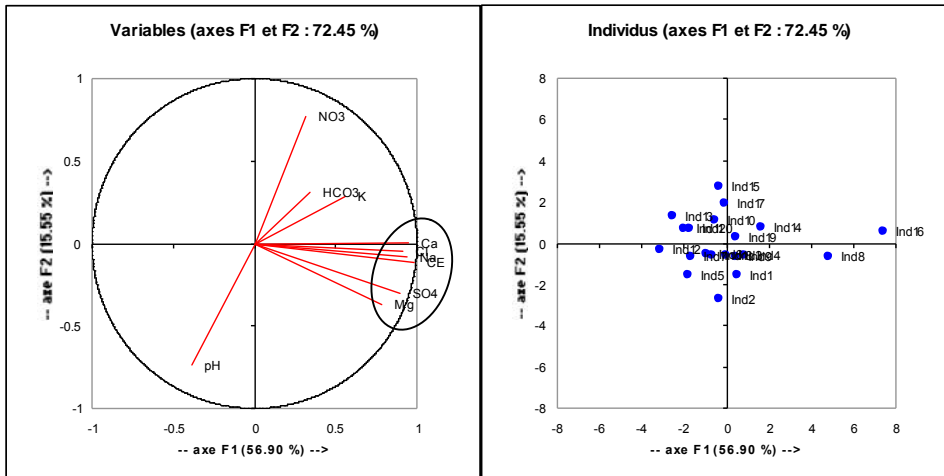


Figure 12 : Projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1/ F2

## CONCLUSION

Les eaux souterraines exploitées dans le synclinal de Ghassira sont influencées à la fois par les minéraux des roches évaporitiques et ceux des roches carbonatées. En effet, ces deux types de roches constituent l'essentiel des aquifères exploités dans la région. Le groupe évaporitique est dominant avec 80% des échantillons analysés suite à la dissolution du gypse et de la halite. Le groupe des eaux carbonatées ne représentent que 20% des échantillons en liaison avec la dissolution des calcaires. L'étude statistique par ACP met en évidence les liens existants entre les paramètres chimiques responsables de la minéralisation et laisse apparaître deux pôles évaporitiques et carbonatés. L'étude hydrochimique et thermodynamique à l'aide du logiciel Phreeqc aboutie au même résultat et montre l'existence de deux groupes chimiques : l'un évaporitique et l'autre carbonaté.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADAMS S., TITUS R., PIETERSEN K., TREDoux G., HARRIS C. (2001). Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in western Karoo, South Africa, J. Hydrol., Vol.241, Issues 1-2, 91–103.

- ALBERTO W.D., DEL PILAR D.M., VALERIA A.M., FABIANA P.S., CECILIA H.A., DE LOS ANGELES B.M. (2001). Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study: Suquia River Basin (Cordoba-Argentina), *Water Res.*, Vol.35, Issue 12, 2881-2894.
- ANAZAWA K., OHMORI H., TOMIYASU T., SAKAMOTO H. (2003). Hydrochemistry at a volcanic summit area, Norikura, central Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.67, Issue 18, Supplement 17.
- APODACA L.E., JEFFREY B.B., MICHELLE C.S. (2002). Water quality in shallow alluvial aquifers, Upper Colorado River Basin, Colorado, *J. Am. Water Res. Assoc.*, Vol.38, Issue 1, 133-143.
- APPELO C.A.J., POSTMA D. (1996). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, Balkema, Rotterdam, 536p.
- BELKHIRI L., BOUDOUKHA A., MOUNIL., BAOUZ T. (2010). Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater, A case study: Ain Azel plain (Algeria). *Geoderma*, Vol.159, Issues 3-4, 390-398.
- BOUBEKER A., BELOUATEK A., CHOUGUI A., ZAITER K. (2014). Traitement du lixiviat par différents types de membranes en céramique, *Int. J. Envi. Glob. Chan.*, Vol. 2, Issue 3, 95-100.
- Boudoukha A., Athamena M. (2012). Caractérisation des eaux thermales de l'ensemble sud sétifien, Est algérien, *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol.25, n°2, 103-119.
- DAGNELIE P. (2006). *Statistique théorique et appliquée, Tome 2 : Inférences à une et à deux dimensions*, Bruxelles-université, Ed. De Boeck Larcier.
- DREVER J.I. (1997). *The Geochemistry of Natural Waters*, third ed., Prentice Hall, New Jersey, 436p.
- DROUBI A., CHEVERRY C., FRITZ B., TARDY Y. (1976). Géochimie des eaux et des sels dans les sols des polders du lac Tchad: Application d'un modèle thermodynamique de simulation de l'évaporation, *Chemical Geology*, Vol.17, 165-177.
- EARY L.E., RUNNELS D.D., ESPOSITO K.J. (2002). Geochemical controls on groundwater composition at the Cripple Creek Mining District, Colorado, *Appl. Geochem.*, Vol.18, Issue 1, 1-24.
- FRAPE S.K., FRITZ P., MCNUTT R.H. (1984). Water-rock interaction and chemistry of groundwaters from the Canadian Shield, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, Vol.48, Issue 8, 1617-1627.
- GARRELS R.M., MACKENZIE F.T. (1967). Origin of the chemical compositions of some springs and lakes, In: *Equilibrium Concepts in Natural Waters.*, Am. Cancer Soc., Washington DC.
- GÜLER C., THYNE G.D. (2004). Hydrologic and geologic factors controlling surface and Groundwater chemistry in Indian wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. *J. Hydrol.*, Vol.285, Issues 1-4, 177-198.

- GÜLER, C., THYNE, G.D., 2002. Geochemical evolution of surface and groundwater in Indian Wells-Owens valley area and surrounding ranges, southeastern California, USA, GSA Abstr. Prog., Vol.33, Issue 4, A16.
- HAMEL A. (2009). Hydrogéologie des systèmes aquifères en pays montagneux a climat semi-aride. Cas de la vallée d'Oued El Abiod (Aurès), Mémoire de Magister de l'université Mentouri, Constantine, Algérie, 178p.
- HARTMAN J., BERNA Z., STUBEN D., HENZE N. (2005). A statistical procedure for the analysis of seismotectonically induced hydrochemical signals: A case study from the Eastern Carpathians, Romania, Tectonophys., Vol.405, Issues 1-4, 77-98.
- KAISER H.F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis, Educ. Psychol. Meas., Vol.20, Issue 1, 141-151.
- MEBARKI A. (2009). Ressources en eau et aménagement en Algérie, les bassins hydrographiques de l'Est, Office des Publications Universitaires, O.P.U., Algérie.
- PARKHURST D.L., APPELO C.A.J. (1999). User's Guide to PHREEQC, Version 2, a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations, USGS Water-Resources Investigation Report 99-4259. Denver, Colorado, USGS.
- PLUMMER L.N., BUSBY J.F., LEE R.W., HANSHAW B.B. (1990). Geochemical modeling of the Madison aquifer in parts of Montana, Wyoming, and South Dakota, Water Resour. Res., Vol.26, n°9, 1981-2014.
- RODIER J. (1996). L'analyse de l'eau, 8<sup>ème</sup> édition. Dunod, Paris, France.
- ROSENTHAL, E., JONES, B.F., WEINBERGER, G. (1998). The chemical evolution of Kurnub, Group paleowater in Sinai-Negev-a mass balance approach, Appl. Geochem., Vol.13, Issue 5, 553-569.
- SCHOELLER H. (1962). Les eaux souterraines. Ed. Masson, Paris.
- TIRI A., BELKHIRI L., BOUDOUKHA A., LAHBARI N. (2011). Characterization and evaluation of the factors affecting the geomistry of surface water of Koudiat Medouar basin, Algeria, Afr. J. Environ. Sci. Technol., Vol.5, Issue 5, 355-362.
- TIRI A., LAHBARI N., BOUDOUKHA A. (2014). Hydrochemical characterization of surface water in the Timgad watershed, East Algeria, Desalin. Water Treat., 1-10, DOI 10.1080 /19443994.2014.972983.
- WILDI W. (1983). La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène, Rev. Geol. Dynam. Geogr. Phys., Paris, Ed. Masson, 201-297.
- YIDANA S.M., OPHORI D., BANOENG-YAKUBO B. (2008). A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data-The Ankobra Basin, Ghana, J. Environ. Manage. Vol.86, Issue 1, 80-87.