

**STATISTICAL AND HYDROCHEMICAL CLASSIFICATION OF UNDERGROUND
WATERS IN A MULTI-LAYER AQUIFER SYSTEM IN AN ARID
ZONE :APPLICATION TO CHOTT EL GHARBI BASIN (EXTREME WEST OF
ALGERIA)**

A. Boudjema^{1*}, S. Guettaia¹, N. Brinis²

¹Laboratoire N°25. Promotion des ressources hydriques, minières, pédologiques, législation de l'environnement et choix technologiques, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen 13550, Algérie

²Laboratoire de mobilisation et de la gestion des ressources en eau. Université de Batna, Route de Biskra, 05000 Batna, Algérie

Received: 06 January 2019 / Accepted: 20 April 2019 / Published online: 01 May 2019

ABSTRACT

The studied area, so called Chott El Gharbi shelters a multilayer aquifer system. The hydro-chemical tool shows that the results of the groundwater analyzes of the aquifer system of the Chott El Gharbi region revealed that they are sulphated-calcium and magnesian. Water infiltrated at the Bajo-Bathonian and Mio-Plio-Quaternary carbonate formations is enriched with HCO₃⁻ and SiO₂ along its underground route. Also, the presence of a Triassic evaporitic formation or the Cenomano- Turonian argilo-gypsum formation enriches these waters with SO₄²⁻, Cl⁻, K⁺, Mg²⁺, Na⁺ and Ca²⁺.

Thermodynamics has shown that these waters are under saturated evaporitic elements, which gives them a greater power of dissolution than that of carbonates which are in equilibrium or sometimes even supersaturated and tend to precipitate.

Key words: Chott El Gharbi; multilayer; system hydro-geochemical; analyzes statistical study, saturation index.

Author Correspondence, e-mail: baryte2003@yahoo.fr

doi: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v11i2.16>



1. INTRODUCTION

La qualité des eaux souterraines est influencée par de nombreux facteurs, tels que la chimie de l'eau d'infiltration, la nature géologique de la roche réservoir, la décomposition de la matière organique [13]. 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, ce qui leur confère un effet moindre sur la composition chimique de l'eau [14]. 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 [6]. Plusieurs techniques ont été élaborées par de nombreux chercheurs, tels que la thermodynamique et les statistiques [12,15,21,23], et pour étudier, évaluer et caractériser la variation chimique des eaux souterraines le long de son écoulement. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude qui a pour but d'évaluer le caractère hydrogéochimique des eaux souterraines de la région du Chott El Gharbi et d'expliquer les phénomènes à l'origine de la minéralisation de ses eaux. Cette étude est basée sur différentes méthodes hydro-chimiques, des techniques d'analyse statistique multi-variée, et enfin la thermodynamique.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Cadre général

L'aire étudié est situé à 530Km au Sud-Est d'Alger, c'est un bassin endoréique, appelé ainsi le Chott El Gharbi. Il constitue la terminaison occidentale des hautes plaines oranaises. Il est limité par: (figure1)

- ✓ Les Monts de Tlemcen, au Nord.
- ✓ Les Monts des Ksour, au Sud.
- ✓ Les Djebels Antar et Amrag, à l'Est.
- ✓ Les Monts de Tadrara au Maroc, à l'Ouest.

Ce bassin qui occupe une surface d'environ 7000Km² est le siège d'un vaste système aquifère multicouche. Il est bordé par deux structures majeures (la région montagneuse du Sud de

Tlemcen, au Nord et Djebel Ksour, au Sud). Cette zone est caractérisée par des surfaces plus ou moins planes et dépressions.

Le climat qui règne dans ce bassin est de type aride, avec des tendances sahariennes marquées par des précipitations faibles et irrégulières, avec une moyenne annuelle qui ne dépasse guère les 239 mm/an. Les températures sont modérées avec des moyennes mensuelles comprises entre 07 et 28°C.

Le réseau hydrographique de cette zone d'étude est dense. Il est représenté par des oueds totalement secs. Tandis que les eaux des pluies diluviennes coulent dans de vastes dépressions de faibles profondeurs où elles s'évaporent rapidement.

En dehors d'une étude sommaire réalisée par l'ANRH [2] et quelques études géo-électriques assez localisées [8], il n'y a aucune étude pour quantifier le potentiel hydrique des ressources en eau du chott El Gharbi ou pour déceler l'origine de la minéralisation de ces eaux.

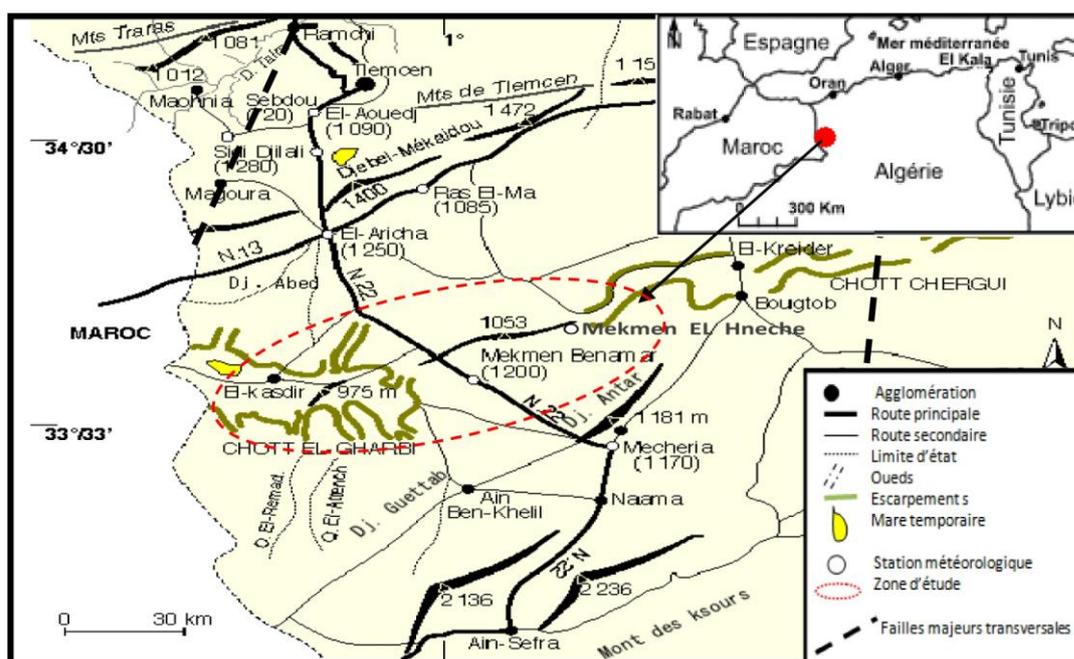


Fig.1. Carte géographique de la zone du Chott El Gharbi (BRL ingénierie, 2008)

2.2. Cadre géologique et hydrogéologique

Le secteur étudié est situé au centre d'un synclinal, orienté Est-Ouest et qui s'étire sur plus de 1000 km. Limité au sud par l'Atlas Saharien et au Nord par l'Atlas tellien, ce secteur est recouvert par une couche uniforme allant du Tertiaire continental au Plio-Quaternaire au

niveaux des dépressions. Les formations du Miocène continental affleurent dans les falaises, montrant ainsi un pendage subhorizontal. Tandis que les affleurements jurassiques constituent les chaînes bordières du plateau aussi bien qu'au Sud qu'à l'Est, tels que: Djebel Bouamoud, Djebel Antar où dominent les dolomites du Jurassique moyen.

2.2.1 Analyse litho-stratigraphique (figure2)

Au Miocène, le bassin de chott El Gharbi commence à s'évoluer pour arriver à sa forme endoréique fermée et isolée de la mer. La subsidence, ensuite l'érosion lui permis d'acquérir son état actuel. Le remplissage Mio-Pliocène du chott débute, en général par des brèches argileuses à éléments calcaires, surmontées par des marnes ou marno-calcaires. Ce remplissage se termine par une carapace calcaire, constituant les falaises qui bordent le chott. Les matériaux quaternaires sont peu épais, ce sont des alluvions récentes comblant le fond d'oueds ainsi que des sables sous forme de dunes.

✓ Le substratum des formations de couverture n'a été reconnu nulle part dans la zone d'étude. A l'échelle régionale les formations sédimentaires de ce domaine vont du Trias au Cénozoïque, avec des affleurements essentiellement jurassiques dans la partie Est. Ces formations ont été subdivisées en quatre ensembles principaux [4] :

- a) Un ensemble triasique argileux- salifère accompagné de basaltes.
- b) Une épaisse série carbonatée à la base, marneuse au sommet, datée du Lias- Bajocien moyen.
- c) Une série détritique argilo-gréseuse avec des intercalations de formation carbonate, attribuée au Bathonien-Albien.
- d) Une série argilo-gypseuse avec des intercalations de bancs dolomitiques surmontée de calcaires et de marnes. Cet ensemble est daté du Cénomano-Turonien.

✓ Les formations tertiaires sont constituées par le remaniement du matériel détritique du Crétacé, résultant du démantèlement des reliefs de l'Atlas saharien par les phénomènes d'érosion.

✓ Au niveau du secteur étudié, le Quaternaire est représenté par plusieurs types de dépôts:

- a) Les colluvions de piedmont sont représentées par des dépôts de pente, de teintes

sombres constituées par des cailloutis à ciment carbonaté.

b) Les alluvions anciennes sont constituées par un mélange de graviers, de sables et d'argiles, avec parfois des lentilles de grés tendres de teinte grise claire.

c) Les alluvions récentes: sont représentées par des dépôts de comblement du fond des vallées et correspondent à une formation sablo-argileuse qui jalonne les lits d'oueds.

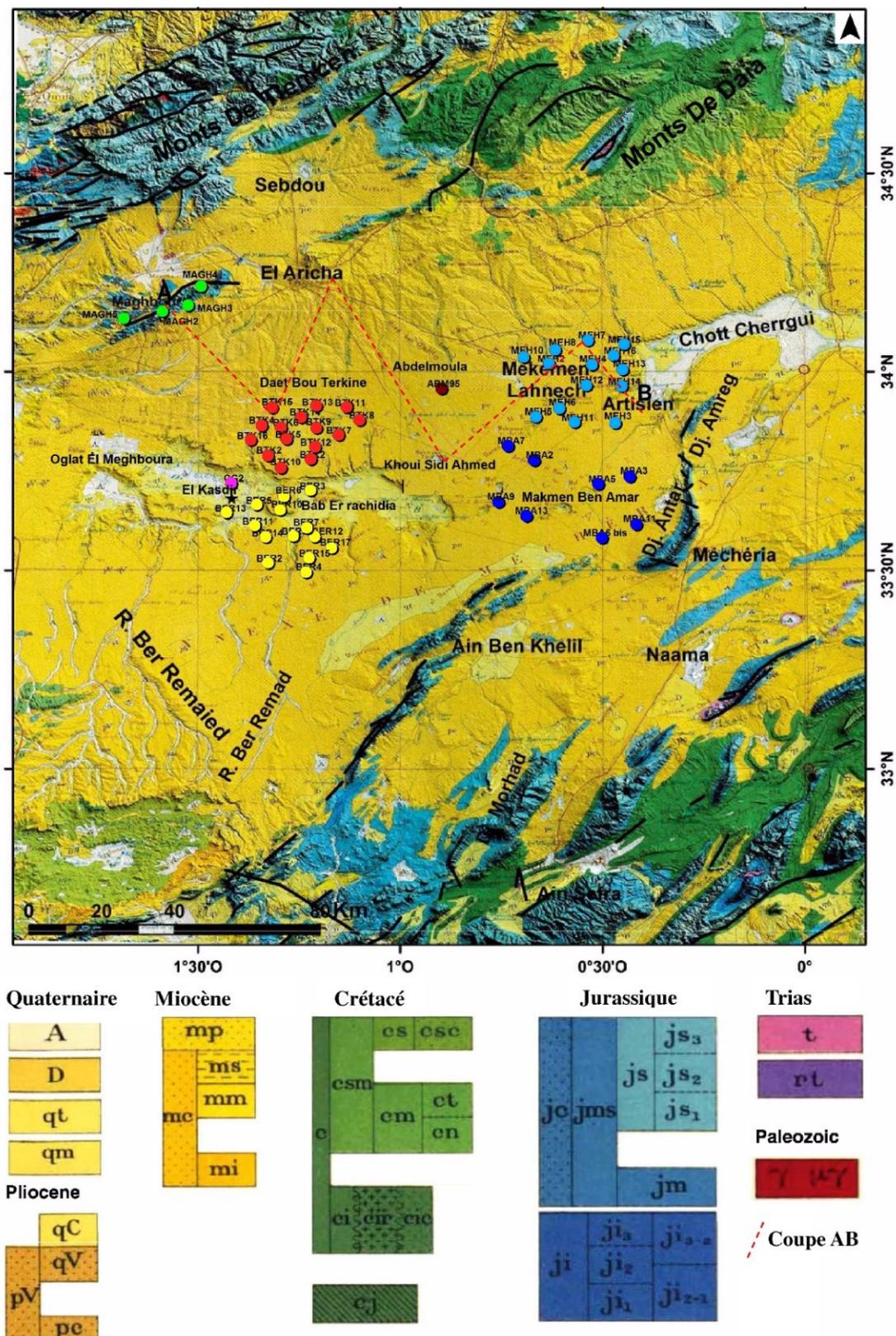


Fig.2. Carte géologique de la zone du Chott El Gharbi (Takorabt, 2018)

2.2.2. Analyse structurale (figure3)

Les études structurales basées sur la prospection géophysique [8] et l'exploitation des images satellitaires ont montré que la région du chott El Gharbi est affectée par un réseau de faille, dont les directions préférentielles sont NE-SO, NO-SE, E-O et N-S [25].

Aussi, ces études ont mis en évidence un réseau de faille affectant cette région, de la surface jusqu'au substratum.

2.2.3. Etudes hydrogéologiques

- Les études hydrogéologiques ont montré que cette zone abrite un système aquifère multicouche formé par:

- Les alluvions du Quaternaire: elles sont formées par des sables (10m à 30m), et peuvent constituer des aquifères d'importance locale, lorsqu'elles occupent les dépressions. Ce sont donc de petites nappes superficielles qui peuvent fonctionner de manière indépendante. Le mur de ces nappes est constitué par des argiles sableuses, relativement imperméable.

- Les calcaires lacustres du Mio-pliocène se présentent généralement dans la partie septentrionale du bassin du Chott El Gharbi, sous forme de lentilles assez étendues, et peuvent être rencontrés dans des profondeurs comprise entre 400m et 200m [2]. Ces calcaires sont parfois fissurés et altérés, possédant souvent une bonne perméabilité. Ce sont donc aussi, des petites nappes qui peuvent fonctionner de manière indépendante.

- Les grès du Barrémo-Albien: sont intercalés par des calcaires et d'argiles. L'épaisseur de cette formation est comprise entre 100m et 150m au centre du bassin et diminue vers le Sud pour atteindre 50m seulement. Dans notre zone d'étude, ces grès sont recouverts par les dépôts du Tertiaire [2]. Vers l'Ouest et le Sud-Ouest, les grès se biseautent avant de disparaître. Les forages réalisés dans la région d'El Kasdir, Bouterkine et Oglet Moussa n'ont pas traversé les grès [3].

Les calcaire-dolomitiques du Bajo-bathonien: formation qui présente en générale un réseau de fissures, de diaclases qui peuvent lui confère une perméabilité élevée, à l'exception de la zone située à l'Ouest de Djebel Antar. Dans cette zone ces formations passent à une série schisto-gréseuse moins perméable. Le substratum de cet aquifère est constitué soit par la série saline du Trias au Nord d'El Kasdir, soit par les marno-calcaires du Lias [3].

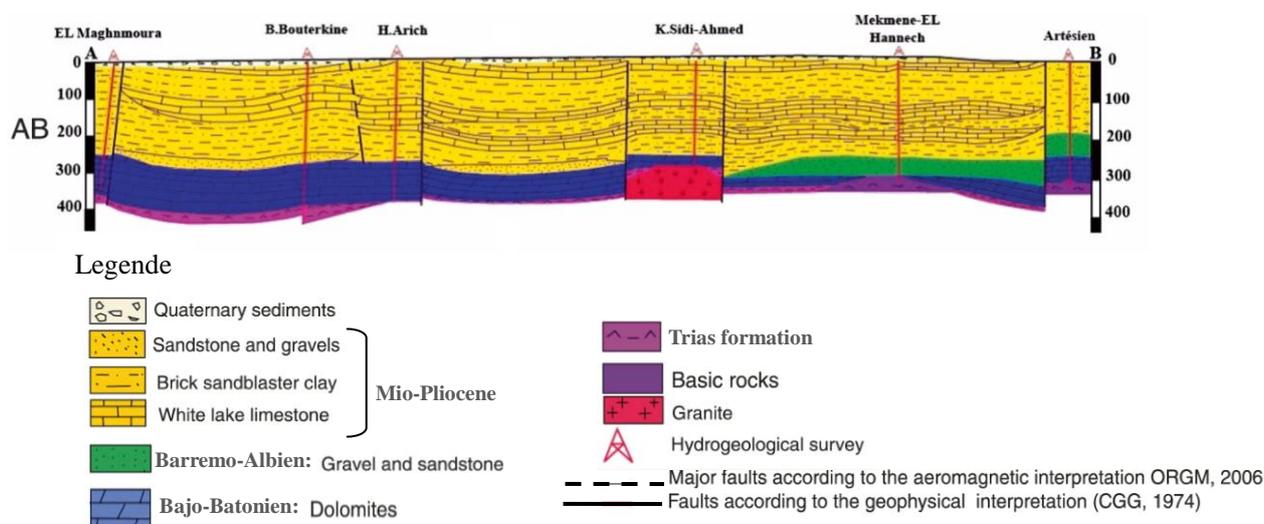


Fig.3. Coupe AB au niveau du Chott El Gharbi (Takorabt, 2018)

2.3. Stratégie d'échantillonnage

Les points des eaux échantillonnés, pour le mois de Janvier 2016, dans la région de Chott El Gharbi, sont répartis comme suit: (figure2)

Les eaux souterraines constituent une mémoire qui apporte en surface des indications sur le réservoir profond [6]. Leurs études géochimiques représentent un outil de reconnaissance qui, de manière complémentaire aux autres approches (géologiques, géophysiques, hydrodynamiques, etc), permet de mieux déterminer leurs origines. Pour aborder ce contexte, un échantillonnage a intéressé 54 points d'eau répartis sur cinq régions (Mekmen Benammar, Mekmen El Henèche, Bouterkine, Oglat El Meghbouira et Bab Er Rachidia) dont les eaux ont fait l'objet d'analyses chimiques (Tableau 1).

Les échantillons prélevés au niveau des forages ont été pris généralement après 15 min de pompage, et cela pour éliminer les eaux souterraines stockées dans l'ouvrage. Ces échantillons ont été prélevés à l'aide des flacons en polypropylène, lavés à l'acide. Chaque échantillon a été filtré immédiatement sur le site, à l'aide de filtres de 0,45µm d'acétate de cellulose. Le filtrat pour les analyses des cations a été stocké dans des flacons de 250 cm³ en polyéthylène auquel de l'acide nitrique ultrapur Merck a été ajouté pour atteindre un pH<2.. 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 et conservés dans un réfrigérateur à une température inférieure à 4 °C jusqu'à ce qu'ils soient analysés avec un délai d'une semaine au maximum. La conductivité électrique (CE) a été mesurée sur le terrain à l'aide d'un multi-paramètre WTW (P3MultiLine pH / LFSET). Les éléments chimiques analysés sont : calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), Sodium (Na^+), potassium (K^+), chlorure (Cl^-), bicarbonate (HCO_3^-), sulfate (SO_4^{2-}), nitrate (NO_3^-), silice (SiO_2). Trois méthodes d'analyse ont été utilisées pour déterminer les concentrations des différents éléments chimiques. La teneur en bicarbonates et en chlorures a été déterminée par titrimétrie. Les cations ont été dosés à l'aide d'une absorption atomique à flamme de type Perkin Elmer, 1100B et par titrage potentiométrique comme proposé par [23]. Les nitrates ont été déterminés selon la technique préconisée par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. La balance ionique pour chaque analyse est inférieure à 8%. Les résultats d'analyses ont été reportés dans le tableau 1.

Table 1. Résultats des analyses physico-chimiques

	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	SiO_2	TDS
Min	167	33	2	91	27	12	37	2	10	540
Moy	234.87	161.06	7.50	325.48	105.15	63.78	110.23	5.02	15.91	1038.54
Max	373	872	23	1840	644	194	566	23	23	3206
Ecart type	39.05	174.94	4.19	278.63	81.71	32.76	111.39	4.223	2.47	584.58
CV	17	109	56	86	78	51	101	84	16	56

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Afin de comprendre l'origine et le mécanisme de la minéralisation, une série d'analyse étaient appliquée sur cette campagne d'analyse, telle que:

3.1 Faciès chimique des eaux (figure 4).

La distinction des faciès chimiques est déterminée par le diagramme de Piper [20]. Ce dernier est une représentation graphique des proportions en équivalents des cations et anions sur deux diagrammes ternaires distincts.

La position de ce tracé indique la composition relative des eaux souterraines en termes de

paires cation-anion qui correspond à quatre sommets du champ [20].

La projection des résultats des analyses d'eau sur le diagramme de Piper, révèle que la plupart des types d'eau sont Ca-SO₄, Mg-SO₄, à l'exception de quelques faciès, Ca-HCO₃ et Mg-HCO₃ situés à la région de Mekmen El Henèche ou Na-Cl situé dans la région de Bouterkine.

Les faciès sulfatés calciques et sulfatés magnésiens sont dus à la présence des formations évaporitiques, d'âge Cénomano-Turonien, mais la source commune du calcium et du magnésium dans les eaux souterraines est située dans le calcaire et la dolomite présents dans les roches sédimentaires. Les ions chlorures sont dus soit à la présence de l'eau de mer ancienne emprisonnée dans les sédiments, ou à une formation salifère [5]. La présence de faciès chlorés sodiques dans la région de Bouterkine est due à la présence de formations salifères triasiques.

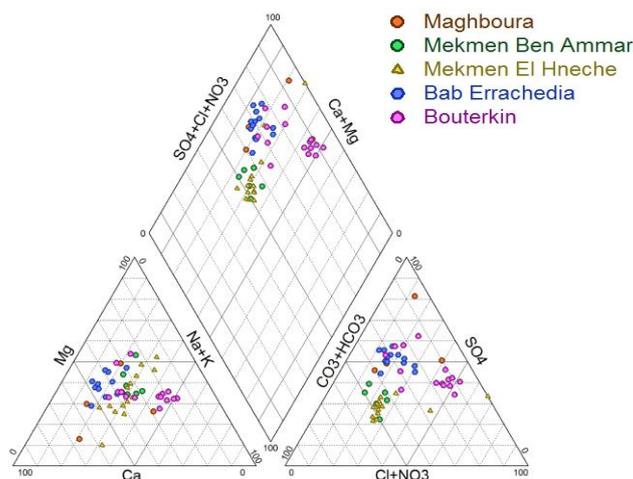


Fig.4. Diagramme de Piper appliqué sur
Les eaux du système aquifère du Chott El Gharbi

3.2 Analyse statistique

3.2.1 Analyse Hydro-chimique

L'examen statistique porté sur les analyses chimiques (tableau 1), est réalisé par l'XLSTAT 2018 (version démo). Cet examen a montré que la salinité représentée par la valeur moyenne de TDS est de 1038.54mg/l, elle augmente d'Est vers l'ouest. Elle passe de 540 mg/l (MEH08) à 3206 mg/l (MAGH 03), et diminue du Nord vers le Sud (3011 mg/l au niveau de la région

BTK4, et 708 mg/l à BER15). Les faibles salinités (TDS <1000 mg / l) sont localisés à l'Est et au Sud, cela suggère que ces régions sont des zones de recharge par l'infiltration des précipitations, et sont aussi pauvre en formations évaporitiques et salifères. La présence de haute salinité (TDS>1000mg/l) dans les régions du Nord et de l'Ouest (région de Bouterkine et Maghboura) explique la présence des formations salines du Trias et argilo-gypseuses du Cénomano-Turonien.

Aussi cette étude nous a montré que certains échantillons ont des concentrations en éléments chimiques qui dépassent les normes de potabilités, suivant la réglementation algérienne pour les eaux destinées pour la consommation [20]:

20% des échantillons ont des concentrations en Na^+ qui dépassent la concentration maximale acceptable pour l'eau de boisson (200 mg/l). 2% des échantillons ont des concentrations en K^+ supérieures aux normes de potabilité (20mg/l). 3,7% des échantillons ont des concentrations en Ca^{2+} qui dépassent les normes (200 mg/l). 2% des échantillons dépassent la concentration maximale acceptable pour les eaux destinées à la consommation (150 mg/l).

On constate aussi que 3,7% des échantillons ont des concentrations en Cl^- qui dépassent la concentration maximale admissible pour l'eau potable (500 mg/l). Pour les sulfates (SO_4^{2+}), 22,22% des échantillons dépassent la concentration maximale acceptable pour l'eau de boisson (400 mg/l). Les concentrations des nitrates (NO_3^-) dans ces eaux sont inférieures à la limite souhaitable pour l'eau de consommation (50 mg/l).

3.2.2 Analyse de corrélation (tableau 1)

La matrice Pearson corrélation entre les paramètres physico-chimiques pour 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) [6]. Dans notre cas, plusieurs liaisons sont significatives mais à des degrés variables (Tableau 1). La matrice de corrélation montre une forte corrélation positive (0.718 à 0.919) entre le TDS et tous les éléments chimiques, à l'exception du HCO_3^- , NO_3^- et SiO_2 . Aussi une forte corrélation positive (0.587 à 0.978) entre le Cl^- et les ions SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ d'une part et le SO_4^{2-} et le Ca^{2+} , Mg^{2+} ,

Na⁺ et K⁺ d'autre part. D'autres fortes corrélations sont marquées entre le Mg²⁺, Na⁺ et K⁺, d'une part et entre le Na⁺ et le K⁺ d'autre part.

✓ L'apparition de ces fortes corrélations peuvent être interprétée suite à la dissolution des formations évaporitiques, selon les formules.



Tableau 2. Matrice de corrélation entres les paramètres mesurés

	TDS	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂
TDS	1									
HCO ₃ ⁻	-0.313	1								
Cl ⁻	0.853	-0.217	1							
NO ₃ ⁻	0.265	-0.420	0.231	1						
SO ₄ ⁻	0.919	-0.434	0.587	0.278	1					
Ca ⁺⁺	0.718	-0.417	0.294	0.155	0.901	1				
Mg ⁺⁺	0.835	-0.188	0.899	0.354	0.637	0.279	1			
Na ⁺	0.899	-0.195	0.978	0.211	0.666	0.369	0.890	1		
K ⁺	0.884	-0.116	0.917	0.138	0.673	0.420	0.803	0.960	1	
SiO ₂	0.150	0.236	0.294	0.145	-0.022	-0.152	0.310	0.270	0.252	1

Le tableau.1 nous montre que les CV pour la plupart des éléments (Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Na⁺, K⁺) sont supérieurs à 50%, témoignant ainsi d'une grande variation autour de la moyenne, et cela suite à leur origine évaporitique qui leur permet d'acquérir des concentrations élevées localement. Par contre, les éléments HCO₃⁻, SiO₂, Mg²⁺ et NO₃⁻ ont un coefficient de variation inférieur ou légèrement supérieur à 50% ,témoignant ainsi d'une certaine homogénéité, suite à une répartition assez régulière de la concentration de ces paramètres dans l'espace aquifère.

3-2-3 Analyse par composante principale (tableau 3).

L'analyse en composantes principales (ACP), est un outil permettant de comparer simultanément tous les éléments en question entre eux et de quantifier les relations qui les lient. Bien que l'ACP soit une méthode exploratoire et descriptive, le but du traitement est d'identifier les principaux facteurs qui contrôlent la chimie des eaux souterraines [9]. Cette méthode statistique multi-variée a été largement appliquée pour étudier les phénomènes environnementaux dans le monde [1,16,17] et en Algérie [5,26]. Ces outils statistiques multi variés ont été utilisés avec succès pour étudier les processus hydrogéochimiques [11,18]. Ce travail vise à faire la caractérisation des variations hydro-chimiques des éléments présents dans les eaux de la région, en appliquant l'analyse multi-variée

- Les résultats analytiques portés sur les 54 échantillons ont généré dix variables. Seuls les trois premiers facteurs qui représentent 86.18% de la variance totale (figure 4) peuvent interpréter d'une manière satisfaisante la minéralisation des eaux de ce système aquifère. F1 représente 57.16% de la variance et il est déterminé positivement par (TDS, SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ et à un degré moindre le Ca^{2+} , Tableau 3). C'est un facteur qui représente la minéralisation due aux minéraux évaporitiques, générés par les formations du Cénomano-Turonien. Par contre, F2 qui représente 17.71% de la variance totale est marqué positivement par (HCO_3^- et SiO_2), témoignant ainsi de la présence des formations carbonatées et gréseuses du Bajo-Bathonien, du Barremo-Albien, du Mio-Plio-Quaternaire (Tableau 3).

Le facteur F3 présente 11.32% de la variance totale et il est déterminé positivement par le NO_3^- , témoignant ainsi de la présence d'une faible activité agricole, car les concentrations de cet élément chimique ne dépassent pas les 50 mg/l.

Tableau 3. Résultats de l'ACP appliquée aux données physico-chimiques des eaux du système aquifère.

	F1	F2	F3
TDS	0.984	-0.079	-0.130
HCO ₃ ⁻	-0.357	0.665	-0.400
Cl ⁻	0.912	0.296	0.017
NO ₃ ⁻	0.345	-0.209	0.839
SO ₄ ⁻	0.858	-0.406	-0.157
Ca ⁺⁺	0.614	-0.618	-0.272
Mg ⁺⁺	0.888	0.263	0.134
Na ⁺	0.942	0.256	-0.056
K ⁺	0.912	0.245	-0.169
SiO ₂	0.218	0.671	0.320

3.3 Indice de saturation. (Figure 5)

L'étude des équilibres chimiques des eaux souterraines du Chott El Gharbi et leur saturation vis-à-vis des minéraux est fondée sur le calcul des activités ioniques. Pour cela, le programme PHREEQC-2 (VERSION 2.10) est utilisé pour déterminer les indices de saturation de quelques minéraux spécifiques (la calcite, l'aragonite, la dolomie, le gypse, l'anhydrite, l'halite et le quartz).

J'ai changé la formule du IS et la phrase sera comme suit: Le calcul du SI a été effectué selon la formule 1.

$$I.S = \log (Q/K) \quad (1)$$

Q: est le produit ionique de la solution

K:est le produit de solubilité de la calcite.Les indices de saturation (IS) sont utilisés pour évaluer l'état de saturation de l'eau et contrôler la chimie et l'équilibre avec la phase solide [10]. Si l'on admet que l'état d'équilibre se fait dans l'intervalle de - 0.5 à + 0.5, on peut dire que les trois minéraux carbonatés ou ceux du Quartz sont à état d'équilibre, à l'exception de quelques eaux des forages qui sont sous saturées (inférieur à -0.5) ou totalement sursaturées

(supérieurs à -0.5).

Les minéraux évaporitiques pour les 54 échantillons montrent des degrés de saturation plus faibles (sous-saturés) que les minéraux carbonatés ou ceux du Quartz pour l'ensemble des échantillons analysés (Fig.06), ce qui permet à ces éléments de se présenter dans l'eau à des concentrations élevées. Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des eaux analysées.

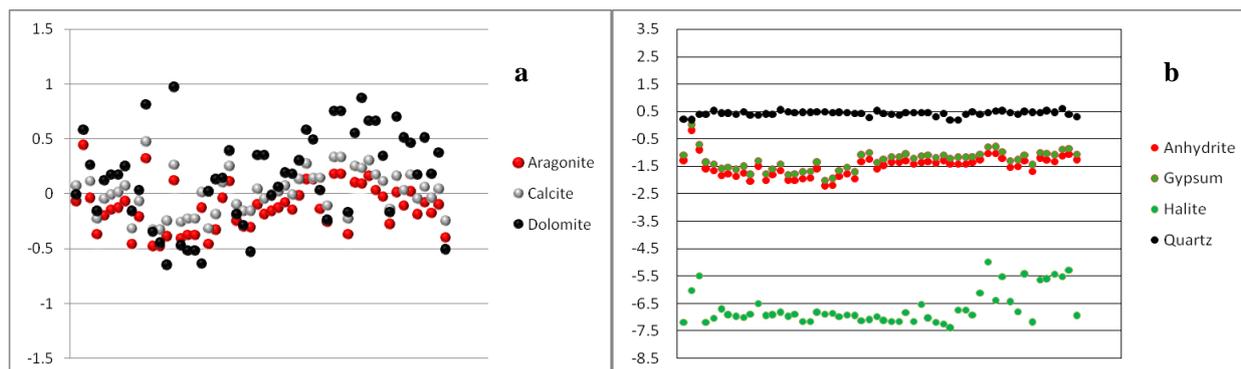


Fig.5. Valeurs des indices de saturation pour les formations carbonatées (a), les formations évaporitiques et quartzitiques (b)

4. CONCLUSION

Cette étude a permis d'apporter une contribution à la connaissance du fonctionnement hydro-chimique du système aquifère multicouche du Chott El Gharbi. Les faciès sulfaté-calciques et magnésiens sont les caractères les plus prédominants. Cette eau se concentre en éléments salés gypsifères le long de l'écoulement. Aussi, la thermodynamique a révélé que ces eaux sont sous saturées en éléments évaporitiques, ce qui leur confère un pouvoir de dissolution plus important que celui des éléments carbonatés qui sont en état d'équilibre ou parfois même sursaturés et tant à précipiter.

L'eau infiltrée au niveau des formations carbonatées du Bajo-Bathonien et du Mio-Plio-Quaternaire s'enrichit en HCO_3^- et en SiO_2 le long de son parcours souterrain. Aussi, la présence d'une formation évaporitique du Trias ou la formation argilo-gypseuse du Cénomano-Turonien, enrichit ces eaux en SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ et en Ca^{2+} . Ces mécanismes sont les responsables de cette évolution hydro-chimique dans ce système aquifère.

6. REFERENCES

- [1] Anazawa K, Ohmori H. The hydrochemistry of surface waters in andesitic volcanic area, Norikura volcano, central Japan. *Chemos*, 2005,59:605 – 615
- [2] Azzaz A .Hydrogeological study of Chott el Gharbi. Report on the execution of two drillings. National Agency for Hydric Resources, ANRH,1986
- [3] Azzaz A. Hydrogeological study of Chott el Gharbi. Study report, National Agency for Hydric Resources, ANRH, 1996
- [4] Bassoulet J P .Contribution à l'étude stratigraphique du Mésozoïque de l'Atlas saharien occidental , Algérie, .Thèse,Sci.Nat, ParisVI, 1973, 497p.
- [5] Belkhiri L, Boudoukha A, Mouni L, Baouz T .Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater a case study: Ain Azel plain, Algeria. *Geod*, 2010,159:390 – 398
- [6] Bencer S .State of water resources in the region of Ain Djacer and estimating the chemical quality of groundwater, Magister memory,Univ Batna,Algeria, 2005
- [7] BRL Ingénierie. Rapport d'étude de transfert des eaux de la nappe du Chott El Gharbi vers les agglomérations au sud de Tlemcen, au nord de Naâma et à l'ouest de Sidi Bel Abbés, Algérie, 2008, 289p
- [8] CGG. Etude géophysique de la région de Chott El Gharbi. Campagne générale de la Géophysique. Algérie,1971
- [9] Dagnélie P .Theoretical and applied statistics, Tome 2, inferences and a two-dimensional. Edis. Boeck & Larcier, Bruxelles-Univ,2006
- [10] Drever J I .The geochemistry of natural waters, 3rd edn. Prentice Hall, New Jersey,1997
- [11] [Duffy C, Brandes D .Dimension reduction and source identification for multispecies groundwater contamination. *J Conta Hydro* ,2001,48:151 – 165
- [12] Eary L E, Runnels D D, Esposito K J. Geochemical controls on groundwater composition at the Cripple Creek Mining, District, Colorado, *Appl. Geochem*,2002,18:1-24
- [13] Frapé S K, Fritz P, McNutt R H. Water-rock interaction and chemistry of groundwaters from the Canadian Shield, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, 48:1617-1627
- [14] Garrels R.M, Mackenzie F T. Origin of the chemical compositions of some springs

and lakes. Equilibrium Concepts in Natural Waters, Am. Cancer Soc, Washington DC,1967

[15] Güler C. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data . Hydrogeology Journal, 2002,10: 455 – 474

[16] Güler C, Thyne GD. Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. J Hydrol, 2004,285:177 – 198

[17] Laaksoharju M, Gurban I, Skarman C, Skarman E. Multivariate mixing and mass balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information. Appl Geochem, 1999, 14:861 – 871

[18] Khedidja A, Boudoukha A () Risk assessment of agricultural pollution on groundwater quality in the high valley of Tadjenanet Chelghoum Laid (Eastern Algeria). Desal Water Treat 2014, 52:4174 – 4182

[19] OGRA (Official Gazette of The Republic of Algeria). Executive decree n° 11 – 125 of relating to the quality of water for human consumption, March 22,2011

[20] Piper A M. A (1944) Graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Transactions of the American Geophysical Union, 1944,25:914 – 923

[21] Plummer L N. A computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. US Geological Survey ater Resources Investigation. Report 76–13,1976

[22] Rodier J. L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8e édition, DUNOD (éditeur), Paris, 1996,1365 p

[23] Rosenthal E, Jones B.F, Weinberger G. The chemical evolution of Kurnub, Group paleowater in Sinai-Negev-a mass balance approach, Appl. Geochem, 1976, 13: 553-569

[24] Takorabt M, Cherif Toubal A, Haddoum H, Zerrouk S (2018) Determining the role of lineaments in underground hydrodynamics using Landsat 7 ETM+ data, case of the Chott El Gharbi Basin (western Algeria).Arabian Journal of Geosciences, 2018.

<https://doi.org/10.1007/s12517-018-3412-y>

[26] Thilagavathi R, Chidambaram S, Prasanna MV, Thivya C, Singaraja C () A study on groundwater geochemistry and water quality in layered aquifers system of Pondicherry region, southeast India. Appl Water Sci, 2012, doi: 10.1007/s13201-012-0045-2

[27] Tiri A, Lahbari N, Boudoukha A . Multivariate statistical analysis and geochemical modeling to characterize the surface water of Oued Chemora Basin, Algeria. Nat Res Resa, 2014,23:379 – 391

RESUME

Les résultats des analyses portées sur les eaux souterraines du système aquifère de la région du Chott El Gharbi, ont révélé que ces eaux sont sulfatés-calciques et magnésiennes.

L'eau infiltrée au niveau des formations carbonatées du Bajo-Bathonien et du Mio-Plio-Quaternaire s'enrichie en, HCO_3^- et en SiO_2 le long de son parcours souterrain. Aussi, la présence d'une formation évaporitique du Trias ou la formation Argilo gypseuse du Cénomano-Turonien, enrichissent ces eaux en SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ et en Ca^{2+} . Ces mécanismes sont les responsables de cette évolution hydro-chimique dans ce système aquifère.

La thermodynamique a montré que ces eaux sont sous saturées en éléments évaporitiques, ce qui leur confère un pouvoir de dissolution plus important que celui des éléments carbonatés qui sont en état d'équilibre ou parfois même sursaturés et tendent à précipiter.

Mots clés: Chott El Gharbi, système multicouche, analyses hygéo-chimiques, étude statistique.

How to cite this article:

Boudjema A, Guettaia S, Brinis N. Statistical and hydrochemical classification of underground waters in a multi-layer aquifer system in an arid zone: application to Chott El-Gharbi basin (extreme west of Algeria). J. Fundam. Appl. Sci., 2019, 11(2), 786-803.