

HYDROGEOCHIMIE, ET VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN VERSANT DE BOUMERZOUG -NORD EST ALGERIE-

Oualid BOUTERAA^{1,2}, Azeddine MEBARKI³, Zeineddine NOUACEUR⁴, Benoit LAIGNEL⁵

¹Laboratoire de Géologie et de l'Environnement (LGE), Faculté des Sciences de la Terre, de Géographie et d'Aménagement du Territoire, Université des frères Mentouri- Constantine1, Algérie.

²Département des sciences de la nature et de la vie, université de M'sila, Algérie.

³Laboratoire LASTERNE, Faculté des Sciences de la Terre, de Géographie et d'Aménagement du Territoire, Université des frères Mentouri- Constantine1, Algérie.

⁴UMR IDÉES CNRS 6226, Université de Rouen, 1 Rue Thomas Becket 76821 Saint Aignan Cedex, France.

⁵UMR CNRS 6143 M2C, Université de Rouen, 1 Rue Thomas Becket 76821 Saint Aignan Cedex, France.

Résumé

L'hydrochimie des eaux souterraines du bassin versant de Boumerzoug a été utilisée pour la caractérisation de la variation de leur qualité spatio-temporelle. Soixante douze puits ont été pris en considération et répartis entre trois plaines à savoir : la plaine d'El Khroub, de Fesguia, et de Ain Kercha. La géochimie des eaux indique que le faciès Ca-Mg-SO₄-Cl, Ca-Mg-SO₄ et les phénomènes d'échange cationique avec les minéraux argileux prédominent les trois aquifères. L'analyse statistique a généré des facteurs qui résument les éléments majeurs en deux groupes, le premier est lié à la minéralisation totale c'est à dire relation eau-roche. Le second est lié aux activités agricoles (les nitrates). Sodium Alcanity Ratio combiné avec les valeurs de la conductivité électrique dans le digramme de l'équipe du laboratoire américain de salinité, indique que les eaux souterraines de la plaine d'El Khroub appartiennent à la catégorie C3S1 (haute salinité et faible teneur en sodium). Vers le sud les eaux sont de qualité C3S1 et C4S1 (très haute salinité et faible teneur en sodium). Le diagramme de Wilcox montre que la qualité des eaux d'irrigations varie d'une plaine à une autre. Cette qualité est bonne à excellente dans la plaine d'El Khroub, médiocre à bonne à Ain Kercha, et mauvaise à médiocre à Fesguia. Les concentrations des carbonates, des bicarbonates, du calcium et du magnésium sont sans danger pour l'irrigation puisque l'indice du carbonate de sodium résiduel RSC est inférieur à 1.25.

Mots clés : Hydrochimie, eaux souterraines, bassin versant, qualité, géochimie, faciès, analyse statistique, irrigation.

Abstract

The groundwater hydrochemistry of the Boumerzoug basin was used to characterize the variation of their spatio-temporal quality. Seventy-two wells were considered and distributed among three plains: the plain of El Khroub, Fesguia, and Ain Kercha. Water geochemistry indicates that the Ca-Mg-SO₄-Cl and Ca-Mg-SO₄ facies, and reverse ion exchange phenomena dominate the three aquifers. Statistical analysis has generated factors that summarize the major elements in two groups. The first is related to the total mineralization reflects water-rock interaction. The second is related to agricultural activity (nitrates). USSL diagram indicates that the groundwater of the El Khroub plain belongs to category C3S1 (high salinity and low sodium). To the south the waters are of quality C3S1 and C4S1 (very high salinity and low sodium content). According to Wilcox classification, the quality of irrigation water is good to excellent in the plain of El Khroub, mediocre to good in Ain Kercha, and bad to mediocre in Fesguia. The concentrations of carbonate, bicarbonate, calcium and magnesium are safe for irrigation (RSC < 1.25).

Key words: groundwater, hydrochemistry, Basin, quality, geochemistry, facies, Statistical analysis, irrigation.

ملخص

استخدمت كيمياء المياه الجوفية لحوض بومرزوق لوصف التغير المكاني والزمني في نوعيتها، تم خلالها استعمال اثنتي عشرة بئر موزعة على ثلاث سهول هي: سهل الخروب، فسقية، وعين كرشة. تشير جيوكيمياء المياه إلى أن عناصر الكلور، السلفات، والكالسيوم وظواهر التبادل العكسي للأيونات الموجبة مع المعادن الطينية تسود جميع المياه الجوفية. التحليل الإحصائي لتركيز المياه يلخص العناصر الرئيسية في مجموعتين: الأولى مصدرها العلاقة ماء-صخر، أما الثانية فيتعلق بالنشاط الزراعي (النترات). يشير مخطط USSL إلى أن المياه الجوفية لسهل الخروب من فئة C3S1 (الملوحة العالية والصوديوم المنخفض). أما المياه الجوفية جنوب الحوض فهي من فئة C3S1 و C4S1 (نسبة عالية جدا من الملوحة ومحتوى منخفض من الصوديوم). نوعية مياه الري حسب مخطط ويلكوكس تختلف من سهل إلى آخر، جيدة إلى ممتازة في سهل الخروب، متوسطة إلى جيدة في عين كرشة، وسيئة إلى متوسطة في فسقية. تركيز الكربونات، البيكربونات، الكالسيوم والمغنيسيوم في المياه الجوفية لا يمثل خطرا لري الأراضي الزراعية (مؤشر كربونات الصوديوم أقل من 1.25).

الكلمات المفتاحية : كيمياء المياه، حوض، جيوكيمياء، المياه الجوفية، نوعية المياه، التحليل الإحصائي، ري.

1. INTRODUCTION

L'importance de l'eau est d'une importance primordiale pour la vie humaine. Elle joue un rôle capital dans le développement et le maintien de l'écosystème. En cas de disponibilité limitée des ressources en eau de surface, les eaux souterraines sont considérées comme une alternative fiable pour les utilisations industrielles, domestiques et agricoles, en particulier dans les régions arides et semi-arides.

Localisé dans un territoire semi-aride, le bassin versant de Boumerzoug se trouve confronté à des problèmes majeurs d'ordre hydrique où confrontation besoins/ressources est traduite par une mauvaise répartition spatiale de l'eau vue l'étendue du territoire (1832 Km²) et dans le temps (saisons et années), engendrant ainsi un épuisement des nappes d'eau souterraines, seule ressource d'eau disponible dans le bassin. De ce fait, le contrôle et le suivi de la qualité des eaux souterraines est d'une grande importance dans le cadre d'une gestion durable de cette ressource vulnérable. Ce vaste territoire a fait l'objet de plusieurs études dont le but était la caractérisation qualitative des ressources en eau dans le bassin [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]. Cette qualité peut nous renseigner sur les facteurs qui régissent l'évolution de leur faciès hydrochimique; leur aptitude à la consommation domestique, et à l'usage agricole.

Dans ce contexte, l'utilisation des différentes techniques graphiques et statistiques permet d'une part, la spécification de la qualité des eaux souterraines en vue de leur utilisation, et d'autre part, déceler et lier les différents facteurs qui caractérisent leurs faciès chimiques.

Le but envisagé par la présente étude est d'apporter des informations plus ou moins détaillées sur la variation spatiale de la qualité des eaux souterraines du bassin, et d'en préciser certains caractères essentiels à leur évolution saisonnière qui sont liés d'une part à la géochimie des roches, et d'autre part aux problèmes d'utilisation de l'eau liés aux activités humaines.

2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant de Boumerzoug tributaire du grand bassin Kebir-Rhumel est situé à l'Est de l'Algérie (fig.1), entre les monts de Constantine et les monts d'Ain Mlila. Le bassin est soumis à un climat semi-aride avec l'influence de celui sub-humide plus au Nord. Cela se manifeste par une saison pluvieuse au printemps pour le secteur Sud, et une saison pluvieuse en hiver pour le secteur Nord [4].

La géologie du bassin est caractérisée par trois ensembles lithostratigraphiques [8] [9] [10]: Un ensemble inférieur carbonaté néritique d'âge Jurassique-Crétacé; recouvert d'un autre à dominante marneuse allant du Sénonien supérieur

au Paléocène; et enfin un ensemble supérieur comprenant une série détritico-hétérogène Mio-Plio-Quaternaire.

Le Boumerzoug présente des ressources en eau souterraines très importantes qui dépendent directement ou indirectement des massifs calcaires environnants et également des précipitations. Certains de ces eaux souterraines exultent dans les calcaires mêmes, et d'autres sont drainées par des terrains continentaux, conglomérats pontiens, calcaires lacustres pliocènes ou alluvions quaternaires [2].

L'aquifère de la vallée de Boumerzoug-El Khroub est constitué par des dépôts alluviaux (Mio-Plio-Quaternaire) où les variations latérales de faciès sont très importantes. Si certains sondages montrent deux niveaux aquifères séparés par un niveau marneux d'où la présence d'une nappe superficielle (Quaternaire) et nappe captive (Mio-Pliocènes), d'autres sondages montrent la communication entre les deux aquifères et on ne parle donc que d'une seule nappe Mio-Plio-Quaternaire. L'écoulement souterrain s'effectue d'Est en Ouest vers la vallée de l'Oued Boumerzoug (fig.2). Dans le secteur Sud, la plaine de Fesguia est caractérisée par une nappe superficielle circulant dans le Mio-Plio-Quaternaire alimentée généralement par les éboulis du piedmont après infiltration des précipitations d'une part, et d'autre part à partir des drains constitués par les grands accidents [11]. L'écoulement général se fait du Sud vers le Nord et d'Est en Ouest. Vers Ain Kercha, l'aquifère supérieur est constitué de formations Mio-Plio-Quaternaire essentiellement de graviers, argiles, graviers et calcaires. Les formations carbonatées sont profondes aux bordures Nord-ouest et au centre, et sont profondes vers le Sud-Est [2].

3. MATERIELS ET METHODE

L'enquête préliminaire sur le terrain nous a mené à choisir soixante-douze puits afin de couvrir l'ensemble des plaines de la zone d'étude, de façon à représenter le plus exactement possible les eaux souterraines. Ces puits sont utilisés essentiellement à des fins domestiques et agricoles.

L'échantillonnage a été effectué en période des hautes (février-mars 2013) et des basses eaux (Aout 2013) pour un total de 144 échantillons d'eau souterraines. Le prélèvement a été effectué après une courte durée de pompage (10 minutes) dans des bouteilles en polyéthylène et stockés dans une glacière. Immédiatement après l'échantillonnage, le potentiel hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE), et la température (T°C) étaient mesurés sur le terrain en utilisant un multi-paramètre de type **HANNA Hi-9813-6**.

Par la suite, les échantillons ont été analysés en laboratoire pour leurs constituants chimiques

majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^-).

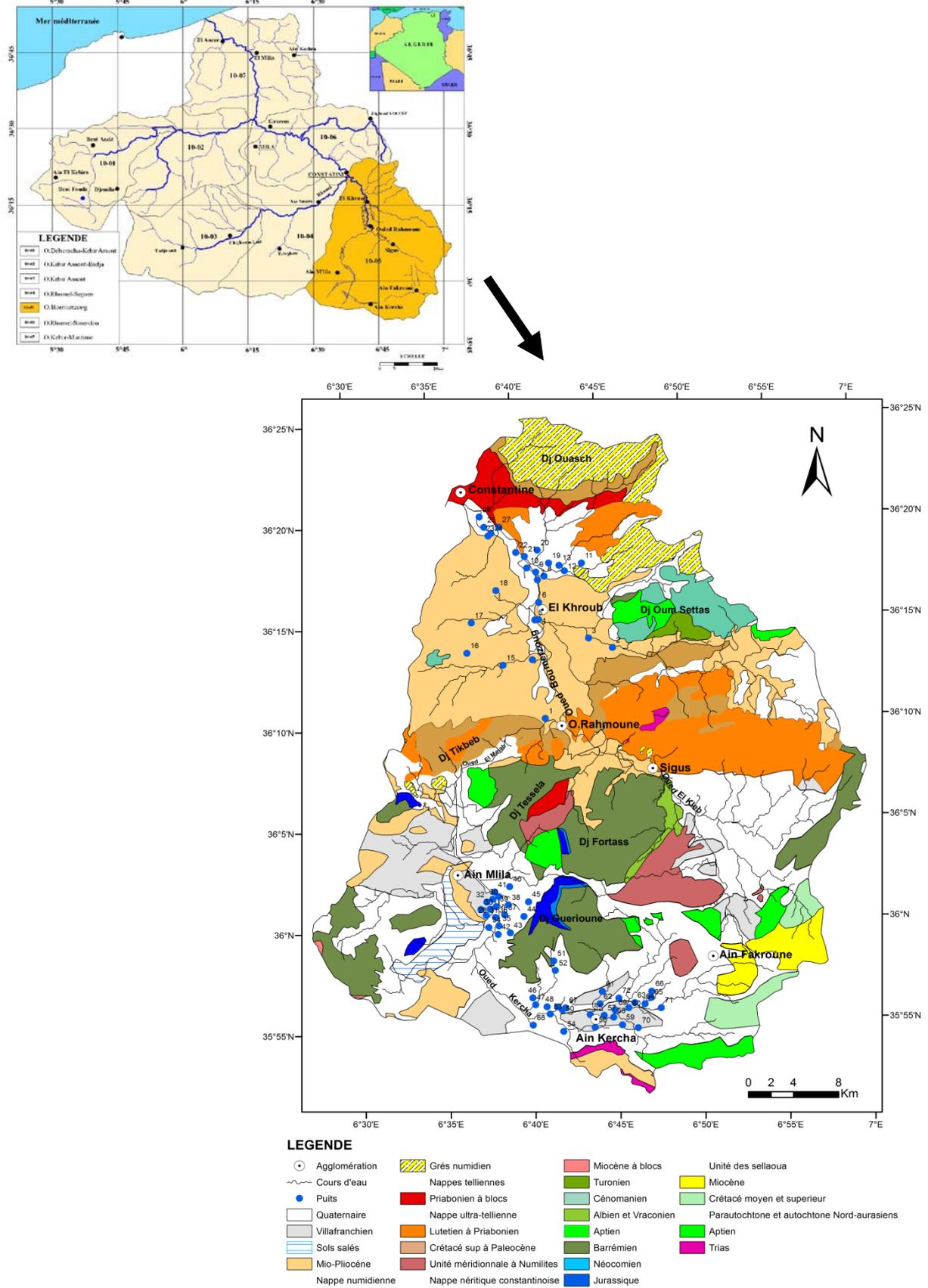
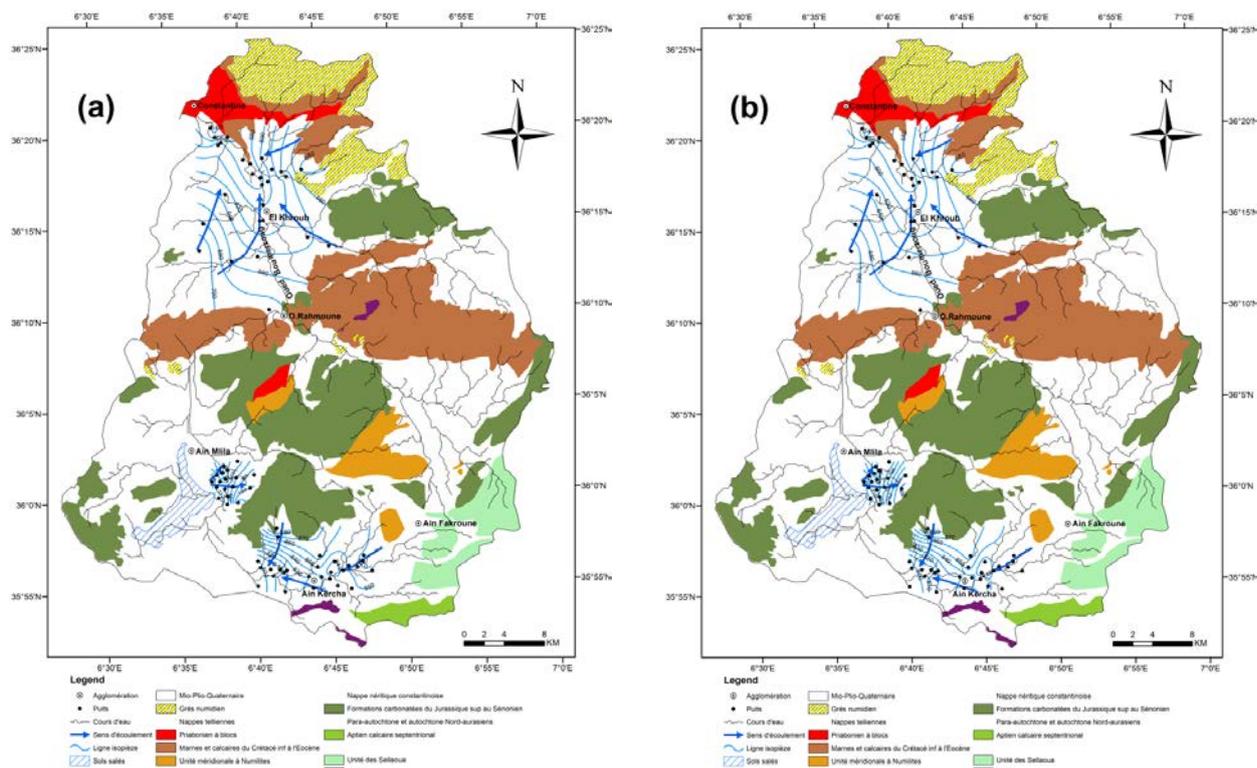


Figure 1 : Cadre géographique et géologique de la zone d'étude

HYDROGEOCHIMIE, ET VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN VERSANT DE BOUMERZOUG -NORD EST ALGERIE-



**Figure 2 : Carte piézométrique des eaux souterraines:
(a) période des hautes eaux, (b) période des basses eaux**

Les méthodes d'analyse sont celles préconisées par Rodier [12]. Ils ont été réalisés au niveau du laboratoire d'hydrochimie à l'institut des sciences de la terre et de l'aménagement du territoire, de l'université des Frères Mentouri, Constantine 1.

Les concentrations en Ca^{2+} et Mg^{2+} ont été mesurées par la méthode volumétrique en présence d'une solution aqueuse d'E.D.T.A, cette méthode a également servi pour le dosage des bicarbonates titrer avec l'acide chlorhydrique 0,1 N.

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. La mesure des sulfates et des nitrates a été effectuée par méthode spectrophotométrique, et celle du sodium et du potassium par un photomètre à flamme.

3.1. Analyse statistique

La représentation graphique des concentrations sous forme de diagramme aide à comprendre l'évolution chimique des eaux pendant leur séjour souterrain, ce qui permet d'évaluer leur aptitude à la consommation et l'irrigation des terres agricoles. Cette représentation est précédée par l'analyse statistique, qui est d'une grande utilité dans la compréhension du faciès des eaux souterraines, grâce à l'analyse en composantes principales (ACP). L'ACP est une méthode d'analyse multivariée qui permet la réduction d'un grand nombre de variables en groupes distinctives dans un espace multidimensionnelles. Ces différents groupes

associés aux facteurs permettent de déceler les phénomènes à l'origine de leurs groupement [13] [14] [15]. Le traitement statistique des données a été effectué en faisant appel au logiciel XLSTAT 2014.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Hydrogéochimie des eaux souterraines

L'analyse statistique des éléments chimiques des échantillons d'eau souterraine est consignée dans le tableau 1. Les valeurs de la CE des échantillons de la zone d'étude variaient de 460 à 6660 $\mu S/cm$ et celles du pH variaient de 6,8 à 8,2 indiquant ainsi des eaux fortement minéralisées et légèrement alcalines pendant les deux campagnes.

L'ordre d'abondance des cations majeurs est de $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$ pour la plaine d'El Khroub et Ain Kercha et $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+$ pour la plaine de Fesguia. Tous les échantillons ont dépassé la limite souhaitable en Ca^{2+} pour l'eau potable (75mg/l) [16] [17] [18] à l'exception des huit puits enregistrés surtout en période de basses eaux, cependant seulement 36% d'entre eux ont dépassé celle de Mg^{2+} (50mg/l), dont plus de 82% sont surtout concentrés au niveau de la plaine de Fesguia et Ain Kercha (82%).

Les concentrations des anions majeurs ont suivi l'ordre de $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$ pour la plaine d'El Khroub et Ain Kercha et $SO_4^{2-} > Cl^- > HCO_3^-$ pour la plaine de Fesguia. Plus de 50% des échantillons ont dépassé la limite acceptable en Cl^- (200mg/l), alors que 33 % des valeurs des sulfates étaient

supérieures à celles prescrits par l'organisation mondiale de la santé OMS. Les teneurs en nitrates indiquent que seulement 21% des puits excèdent les normes requises pour la consommation. Toutes ces concentrations indiquent que les eaux fortement minéralisées sont surtout rencontrées dans la plaine de Fesguia et Ain Kercha pour les deux compagnes de mesure. Pour la plaine d'El Khroub, le faciès chimique des eaux est très varié. La présence des sulfates, des chlorures et du sodium est probablement due aux lessivages des argiles liées aux formations triasiques. Quant aux calciums et bicarbonates, ils pourraient être liés aux calcaires lacustres, mais aussi aux marnes gypsifères du Mio-

Pliocène. A Fesguia, la présence du faciès bicarbonaté calcique et surtout magnésien est vraisemblablement assimilé aux calcaires dolomitiques du Jurassique des massifs environnants. Quant à l'origine des sels tels que SO_4^{2-} , le Na^+ et Cl^- , elle est liée aux formations argileuses, aux sols salés et à la présence du Trias. Vers Ain Kercha, la mise en place du faciès chloruré et sulfaté calcique est due à la présence des sols salés (sebkha) et des formations gypsifères qui augmente la teneur en Ca^{2+} , Cl^- et SO_4^{2-} . La présence du faciès bicarbonaté calcique est due à la présence des formations lacustres du Mio-Pliocène.

Tableau 1 : Statistique des paramètres hydrochimiques des eaux souterraines

| | Plaine d'El Khroub | | | | Plaine de Fesguia | | | | Plaine d'Ain Kercha | | | | OMS |
|---------------------------------|--------------------|--------|---------|------------|-------------------|--------|---------|------------|---------------------|--------|---------|------------|------|
| | Min | Max | Moy | Ecart type | Min | Max | Moy | Ecart type | Min | Max | Moy | Ecart type | |
| CE | 460 | 2950 | 1419,63 | 566,05 | 750 | 6660 | 3608,61 | 1999,13 | 630 | 6170 | 2098,46 | 837,62 | 1500 |
| PH | 7,2 | 8 | 7,51 | 0,19 | 6,8 | 8,2 | 7,37 | 0,25 | 6,8 | 8 | 7,35 | 0,30 | 8,5 |
| T° | 13 | 21 | 16,76 | 1,54 | 15 | 18 | 15,90 | 0,56 | 13 | 20 | 16,88 | 1,47 | - |
| Ca ²⁺ | 56,11 | 220,44 | 133,82 | 43,08 | 64,13 | 368,74 | 214,09 | 103,02 | 40,08 | 212,42 | 132,96 | 38,28 | 75 |
| Mg ²⁺ | 4,68 | 162,96 | 38,37 | 31,88 | 14,28 | 203,64 | 77,68 | 49,29 | 6,96 | 102,96 | 44,88 | 21,95 | 50 |
| Na ⁺ +K ⁺ | 8,68 | 120,7 | 46,14 | 31,62 | 21,5 | 110,17 | 65,61 | 22,22 | 11,97 | 149,27 | 82,03 | 34,03 | 200 |
| HCO ₃ ⁻ | 140,3 | 597,8 | 300,64 | 86,31 | 128,1 | 597,8 | 250,10 | 85,93 | 52,46 | 622,2 | 295,02 | 140,39 | 120 |
| Cl ⁻ | 17,75 | 319,5 | 130,54 | 76,36 | 35,5 | 1420 | 318,27 | 257,04 | 17,75 | 312,4 | 229,59 | 87,39 | 250 |
| SO ₄ ²⁻ | 15 | 565 | 110,57 | 111,39 | 80 | 1280 | 484,58 | 343,40 | 25 | 450 | 156,38 | 105,76 | 250 |
| NO ₃ ⁻ | 0,1 | 74 | 19,12 | 21,37 | 0 | 163 | 51,59 | 52,57 | 0 | 86 | 21,78 | 24,74 | 50 |
| SAR | 0,23 | 2,37 | 0,88 | 0,55 | 0,54 | 1,62 | 0,99 | 0,23 | 0,31 | 3,51 | 1,58 | 0,67 | - |
| Na% | 5,32 | 34,95 | 15,95 | 7,56 | 10,75 | 28,54 | 15,28 | 4,22 | 8,27 | 50,37 | 25,14 | 8,71 | - |
| RSC | -17,43 | 1,80 | -4,92 | 3,76 | -29,40 | -1,78 | -13,00 | 7,54 | -14,02 | 2,00 | -5,51 | 3,69 | - |

4.2. Analyse en composante principale (ACP)

Pour réduire le nombre de variables et séparer les groupes chimiques les plus importants, on fait appel à l'analyse des composantes principales (ACP) qui permet d'extraire les facteurs qui contrôlent la variabilité chimique en représentant les processus dominants l'évolution hydrochimique des eaux souterraines. Dans la plaine d'El Khroub, la dispersion des éléments majeurs indiquent que trois importants facteurs expliquent 71.92% de la variance de l'ensemble des données (tableau 2). La plupart de la variance est contenue dans le facteur F1 (39,96%), associée aux variables CE, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, HCO₃⁻ et Cl⁻. Ce composant reflète l'interaction eau-roche. Le facteur F2 explique 19,34% de la variance et est principalement liée aux sulfates et pH (la dissolution des minéraux argileux d'origine triasique). Le F3 qui explique 12.61 % de la variance, représente le composant de l'activité anthropique (agricole) puisqu'il est lié principalement aux nitrates. L'ensemble des données de la plaine de Fesguia indiquent que deux facteurs résument 65% de la variance. Le facteur F1 qui explique 47.58 % de la variance totale, a des charges élevées en CE, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, Cl⁻, et

SO₄²⁻, montre probablement le résultat de lessivages des terrains géologiques (dominance des terrains gypsifères). Cependant le F2 qui n'explique que 18.36 % de la variance, contient les charges élevées en HCO₃⁻ et NO₃⁻. Le HCO₃⁻ peut résulter de la dissolution des minéraux carbonatés, alors que les nitrates sont surtout liés à l'activité agricole. Les concentrations des eaux souterraines de la plaine d'Ain Kercha ont été réduites par trois facteurs qui résument 72.97% de la variance. Le facteur F1 et F2 expliquent respectivement 35.27% et 27.98% de la variance. Ces deux facteurs reflètent les signatures de la recharge d'eau naturelle et l'interaction eau-roche. Par contre le facteur F3 n'explique que 9.72 % de la variance avec un chargement des nitrates. Le nitrate n'a pas de source lithologique significative et doit être associé aux activités anthropiques essentiellement agricoles.

4.3. Faciès chimique des eaux

4.3.1. Diagrammes binaires

Une bonne compréhension de la géologie du site, de la minéralogie et de l'hydrogéologie est importante afin de développer le caractère hydrogéochimique des aquifères.

HYDROGEOCHIMIE, ET VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN VERSANT DE BOUMERZOUG -NORD EST ALGERIE-

Tableau 2 : Principaux facteurs de l'analyse en composantes principales

| | Plaine d'El Khroub | | | Plaine de Fesguia | | Plaine d'Ain Kercha | | |
|-------------------------------------|--------------------|--------------|--------------|-------------------|---------------|---------------------|--------------|-------------|
| | F1 | F2 | F3 | F1 | F2 | F1 | F2 | F3 |
| CE | 0,966 | 0,157 | 0,068 | 0,879 | 0,183 | 0,75 | 0,30 | 0,05 |
| Ca²⁺ | 0,818 | -0,038 | -0,013 | 0,812 | -0,313 | 0,76 | 0,20 | -0,07 |
| Mg²⁺ | 0,669 | 0,507 | 0,270 | 0,798 | 0,469 | 0,31 | 0,75 | -0,18 |
| Na⁺+K⁺ | 0,668 | -0,517 | 0,068 | 0,878 | -0,075 | 0,80 | -0,02 | 0,38 |
| HCO₃⁻ | 0,575 | -0,268 | -0,463 | 0,285 | 0,852 | 0,56 | -0,61 | 0,04 |
| Cl⁻ | 0,765 | 0,049 | 0,058 | 0,634 | -0,126 | 0,89 | 0,28 | -0,04 |
| SO₄²⁻ | 0,532 | 0,740 | 0,099 | 0,905 | 0,043 | 0,04 | 0,87 | 0,09 |
| NO₃⁻ | -0,209 | 0,015 | 0,768 | 0,253 | -0,687 | -0,30 | 0,34 | 0,84 |
| T° | 0,087 | -0,549 | 0,601 | -0,286 | 0,486 | 0,17 | -0,75 | 0,26 |
| pH | -0,501 | 0,678 | 0,007 | -0,609 | 0,170 | -0,64 | 0,46 | 0,02 |
| Valeur propre | 3,996 | 1,934 | 1,261 | 4,658 | 1,836 | 3,53 | 2,80 | 0,97 |
| Variabilité (%) | 39,964 | 19,342 | 12,612 | 46,579 | 18,360 | 35,27 | 27,98 | 9,72 |
| % cumulé | 39,964 | 59,305 | 71,918 | 46,579 | 64,939 | 35,27 | 63,25 | 72,97 |

Pour comprendre le processus hydrogéochimique des nappes, on a eu recours aux diagrammes binaires des principaux éléments majeurs. Les diagrammes qui concernent la variation des éléments carbonatés (Ca²⁺/HCO₃⁻ et Ca²⁺+Mg²⁺/HCO₃⁻) indiquent une dispersion au-dessus de la ligne de calcite et de dolomie, ce qui laisse croire que ces éléments ont une deuxième origine qui pourrait être lié aux minéraux argileux et aux évaporites. Ceci a été confirmé par le diagramme (Ca²⁺/SO₄²⁻) (fig.3), qui indique néanmoins l'origine gypsifère du calcium surtout en période de basse eaux où les apports des massif carbonatés diminuent par rapport à celles des terrains salifères qui composent la structure des aquifères des plaines de Fesguia et de Ain Kercha. L'excès des chlorures par rapport au sodium (Na⁺/Cl⁻) confirme l'origine argileux du Ca²⁺ et Mg²⁺ par processus d'échanges cationiques. Les minéraux argileux ont une structure en feuillet chargées négativement sur lesquelles les cations peuvent être fixés et échangés [19].

4.3.2. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper [20] permet d'identifier les faciès géochimiques des eaux et leur évolution spatio-temporelle en se basant sur les calculs des proportions relatives des éléments analysées. Ce diagramme est considéré comme l'un des méthodes graphiques les plus couramment utilisés dans classification des eaux en déterminant les similitudes et des différences entre les échantillons d'eau qui se distinguent en ensembles de groupes, et déterminer par conséquence le modèle d'écoulement souterrain. L'analyse du diagramme révèle par ordre d'abondance, l'existence de trois faciès chimiques pour les deux compagnes de mesure (fig.4) :

- Le faciès Ca-Mg-SO₄-Cl et Ca-Mg-SO₄ caractéristiques d'un enrichissement de l'eau au cours de son séjour souterrain.

- Le faciès Ca-Mg-HCO₃ qui caractérise les eaux proches des formations carbonatées ;

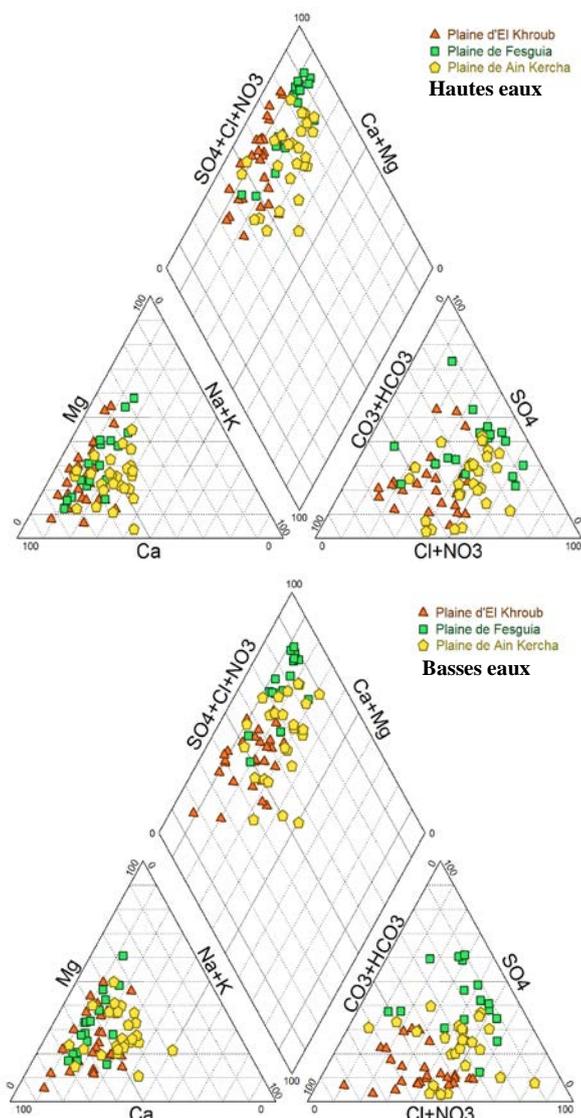


Figure 4 : Diagrammes de Piper : Faciès hydrochimique des eaux

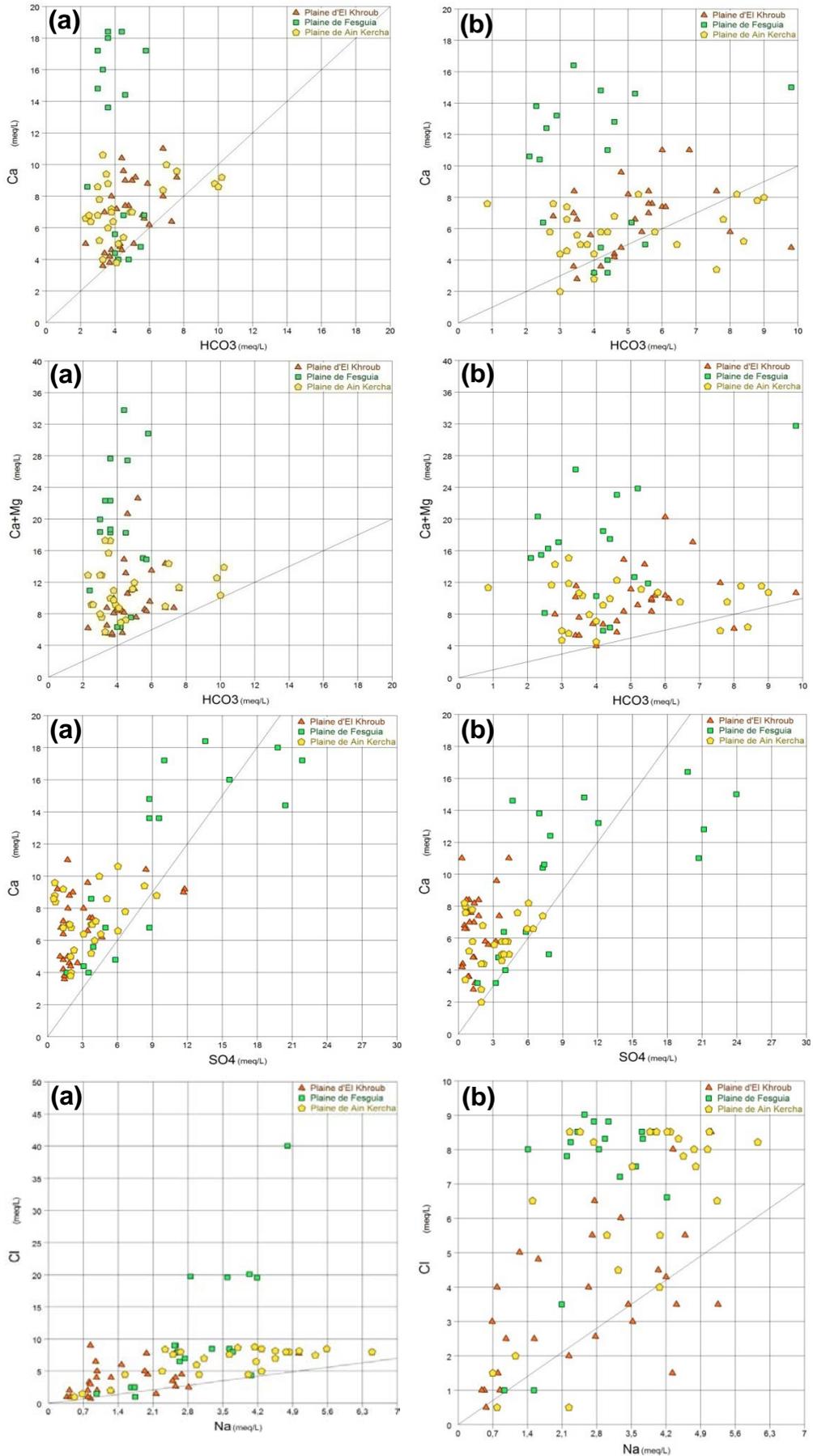
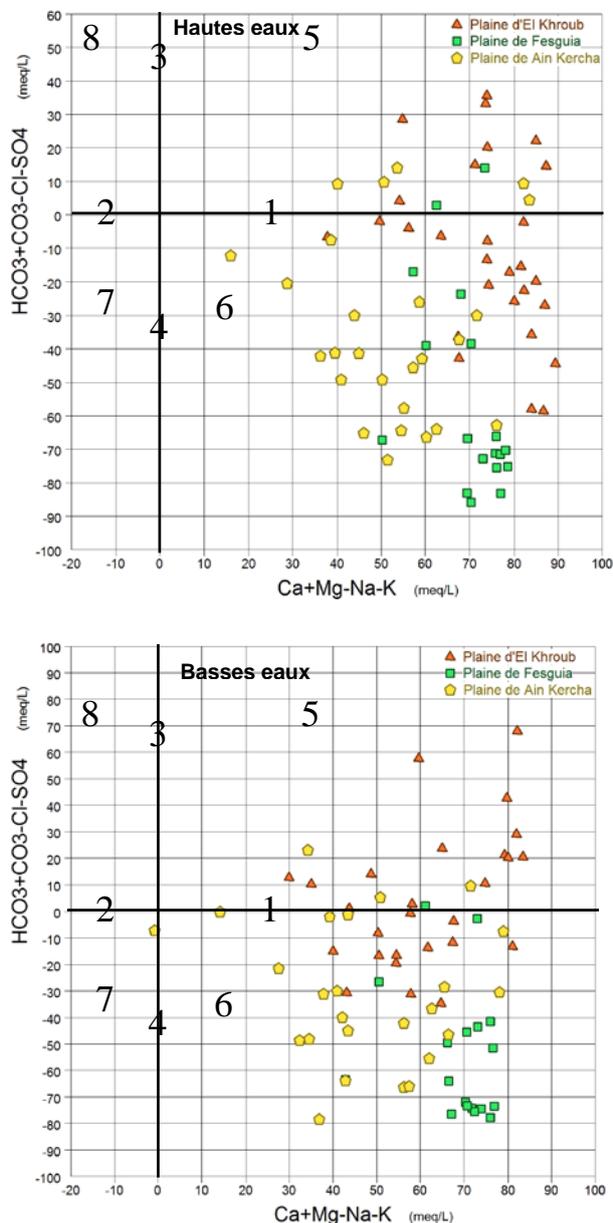


Figure 3 : Diagrammes binaires des éléments majeurs :
(a) période des hautes eaux (b) période des basses eaux

HYDROGEOCHIMIE, ET VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN VERSANT DE BOUMERZOUG -NORD EST ALGERIE-

4.3.3. Diagramme de Chadha

Pour comprendre les processus hydrochimiques, nous avons opté pour le diagramme de Chadha [21]. Ce diagramme est une version modifiée du diagramme de Piper et le diagramme étendu de Durov.



**Figure 5 : Diagramme de Chadha :
Processus de minéralisation des eaux souterraines**

Le diagramme (fig.5) montre que la plupart des échantillons d'eau souterraine sont dispersés dans le domaine du Ca-Mg-HCO₃ (Groupe 5) et Ca-Mg-Cl-SO₄ (Groupe 6), cela signifie que les alcalino-terreux (Ca²⁺+ Mg²⁺) et les anions acides forts (Cl⁻+SO₄²⁻) ont dépassé respectivement les éléments alcalins (Na⁺+K⁺) et les anions acides faibles (CO₃²⁻+HCO₃⁻). Cette configuration implique qu'on est en présence de deux types d'eau, d'une part on a des eaux de type Ca(HCO₃)₂ qui sont des eaux de

recharge (les processus de dissolution des minéraux carbonatés prédominent), et d'autre part des eaux de type CaCl₂ qui dominent les trois plaines pour les deux campagnes de mesure, indiquant que les phénomènes des échanges cationiques de (Mg, Ca)/Na sur les argiles prédominent.

4.4. Classification des eaux d'irrigation

L'utilisation des eaux souterraines à des fins agricoles dépend de leur concentration en sels minéraux qui peuvent causer un changement de la structure du sol influant ainsi sur la croissance des végétaux. L'équipe du laboratoire américain de salinité (The US Salinity Laboratory Staff) a établi des normes pour l'eau d'irrigation basé sur un diagramme utilisant le SAR (Sodium Alcanity Ratio) et la valeur de CE en tant que coordonnées [22]. Le diagramme USSL explique parfaitement l'effet combiné du danger de sodium et de salinité. Le SAR est donné par la formule suivante :

$$SAR = (Na^+) / [(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2]^{1/2};$$

Où toutes les concentrations sont exprimées en meq/l.

Le SAR varie entre 0.23 et 3.51. Le diagramme USSL indique que pour les deux campagnes de prélèvement, les eaux du secteur d'étude ne présentent aucun danger pour l'irrigation (classe S1). La combinaison du SAR et de la conductivité électrique (fig.6-7) indique que la plupart des eaux souterraines de la plaine d'El Khroub appartiennent à la catégorie C3S1 (haute salinité et faible teneur en sodium). Vers le sud du bassin où les valeurs de CE sont beaucoup plus importantes, les eaux des nappes appartiennent à la catégorie C3S1 et C4S1 (très haute salinité et faible teneur en sodium), donc ces échantillons conviennent aux plantes ayant une bonne tolérance au sel et donc une aptitude restreinte pour l'irrigation, en particulier dans les sols à drainage limité [23].

La qualité des eaux souterraines à des fins agricoles a été aussi appréciée à l'aide du diagramme de Wilcox [24], qui fait intervenir la conductivité électrique et le pourcentage de sodium (Na⁺%) qui se calcule comme suite :

$$Na^+ \% = (Na^+) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+);$$

Où toutes les concentrations sont exprimées en meq/l.

Le Na⁺% des eaux souterraines varient de 5.32% (Fesguia) à 50.37% (Ain Kercha). Le diagramme de Wilcox relatif au pourcentage de sodium et à la conductivité indique que la qualité des eaux d'irrigations varie d'une plaine à une autre. Cette qualité est bonne à excellente dans la plaine d'El Khroub, médiocre à bonne à Ain Kercha, et mauvaise à médiocre à Fesguia (fig.8-9).

Lorsque la concentration du sodium est élevée dans l'eau d'irrigation, les ions Na⁺ ont tendance à

être absorbés par les particules d'argile, en déplaçant les ions Mg^{2+} et Ca^{2+} . Ce processus d'échange réduit la perméabilité et diminuant ainsi le drainage interne du sol. Ces valeurs augmentent vers l'amont du bassin et en période d'étéage.

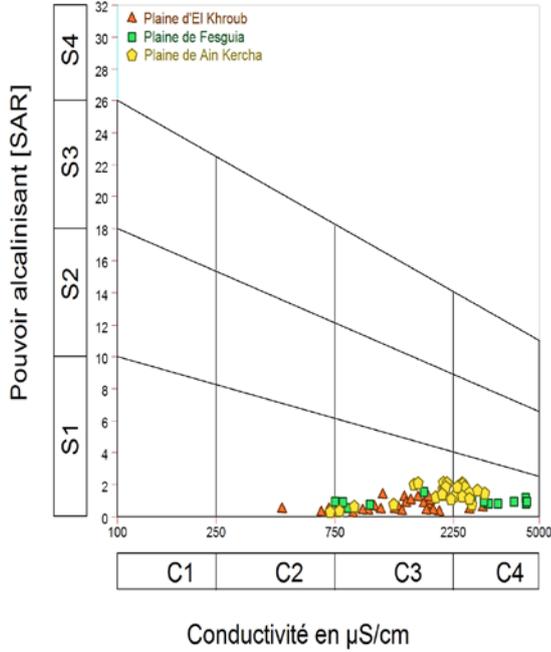


Figure 6 : Classification des eaux d'irrigation : Méthode du SAR (Hautes eaux)

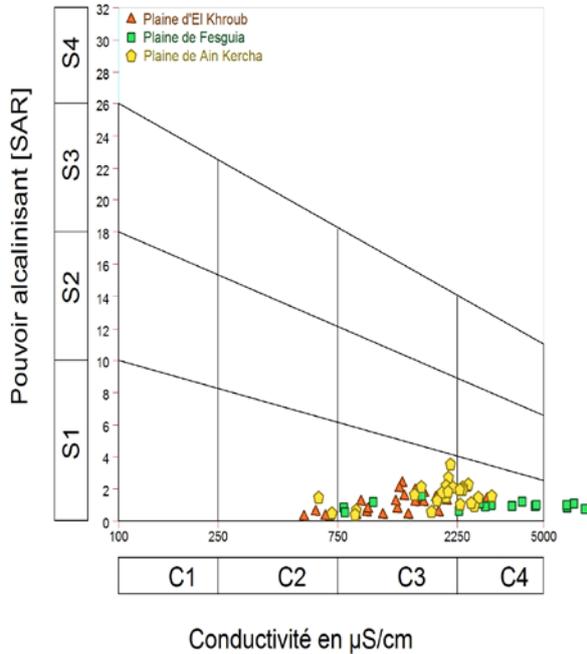


Figure 7 : Classification des eaux d'irrigation : Méthode du SAR (Basses eaux)

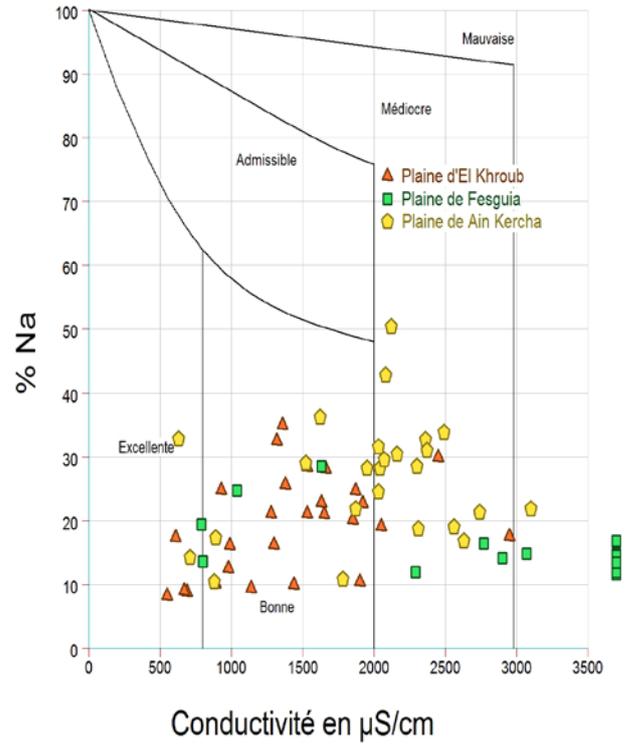


Figure 08 : Diagramme de Wilcox des eaux souterraines (hautes eaux)

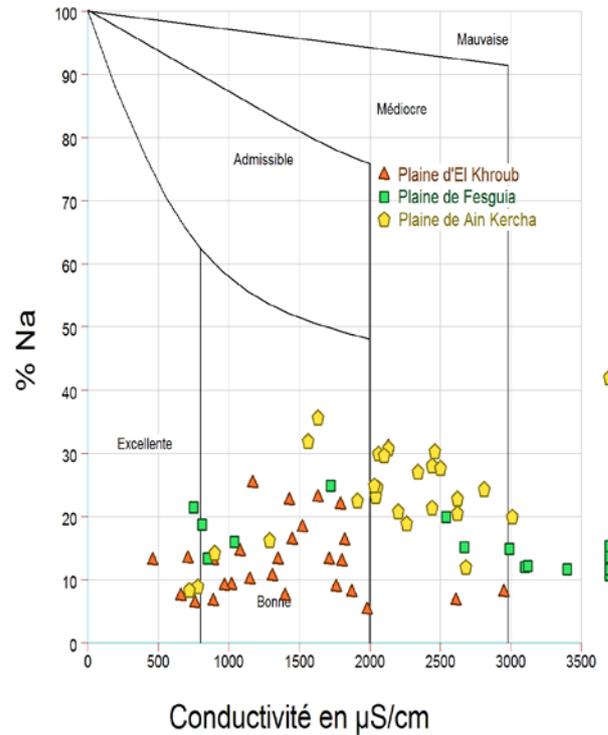


Figure 09 : Diagramme de Wilcox des eaux souterraines (Basses eaux)

Dans les eaux à forte concentration de carbonate et bicarbonate. Le calcium et le magnésium ont tendance à être précipiter à mesure que l'eau dans le sol devient plus concentré.

HYDROGEOCHIMIE, ET VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN VERSANT DE BOUMERZOUG -NORD EST ALGERIE-

Tableau 3 : Classification des eaux d'irrigation : Méthode du SAR, NA %, et RSC

| Paramètres | Normes | Classe d'eau | Nombre de Puits | |
|------------|-----------|--------------|-----------------|-------------|
| | | | Hautes eau | Basses eaux |
| SAR | 10 | Excellent | 72 | 72 |
| | 18 | Bonne | - | - |
| | 18-26 | Médiocre | - | - |
| | >26 | Mauvaise | - | - |
| Na% | 20 | Excellent | 46 | 37 |
| | 20-40 | Bonne | 25 | 35 |
| | 40-60 | Admissible | 1 | - |
| | 60-80 | Médiocre | - | - |
| | >80 | Mauvaise | - | - |
| CE | 250 | Excellent | - | - |
| | 250-750 | Bonne | 5 | 6 |
| | 750-2000 | Admissible | 32 | 31 |
| | 2000-3000 | Médiocre | 23 | 20 |
| | >3000 | Mauvaise | 12 | 13 |
| RSC | <1,25 | Bonne | 72 | 72 |
| | 1,25-2,5 | Modéré | - | - |
| | >2,5 | mauvaise | - | - |

L'indice du carbonate de sodium résiduel RSC est calculé pour mesurer leur effet sur l'irrigation.

Le RSC est calculé selon la formule suivante [25]:

$$\text{RSC} = (\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Où toutes les concentrations sont exprimées en meq/l.

Selon le ministère de l'Agriculture des États-Unis, une eau à RSC supérieur à 2.5 n'est pas adaptée à l'irrigation. En se basant sur les normes du RSC, tous les échantillons avaient un RSC inférieur à 1.25, donc ces eaux étaient sans danger pour l'irrigation.

5. CONCLUSION

L'objectif de ce manuscrit est la caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines et leurs variations spatio-temporelles dans une unité géographique qui est le bassin versant. L'analyse hydrochimique des différents échantillons révèle dans l'ensemble des eaux légèrement alcalines et fortement minéralisées.

La prédominance du faciès sulfaté et chloruré calcique dans les eaux des nappes indique un enrichissement progressif provoqué par le lessivage des formations géologiques, donc les phénomènes d'échange inverse de cations prédominant. L'analyse en composantes principales (ACP) montre une structure typologique à deux voir même trois facteurs, néanmoins, elle indique l'individualisation de deux groupement : le premier groupe rassemble la plupart des éléments majeurs, c'est le groupe de la minéralisation (l'interaction eau-roche). Le deuxième groupe représente le

composant de l'activité anthropique (agricole) puisqu'il est principalement lié aux nitrates.

La combinaison du SAR avec la CE dans le diagramme USSL montre que les eaux souterraines du secteur Nord ont une haute salinité et faible teneur en sodium (C3S1), cependant celles du secteur Sud ont une très haute salinité et faible teneur en sodium (C3S1 et C4S1). Le diagramme de Wilcox indique que la qualité des eaux d'irrigations est bonne à excellente dans la plaine d'El Khroub, médiocre à bonne à Ain Kercha, et mauvaise à médiocre à Fesguia. L'indice du carbonate de sodium résiduel (RSC) est inférieur à 1.25 désignant des eaux sans danger pour l'irrigation.

REFERENCES

- [1]-Benloucif A., Madaoui N., (1999), Etude hydrogéologique du massif de DJ Gueriou et la plaine de Fesguia (Ain M'lila), relation karst et aquifère poreux. Mémoire d'ingénieur, Université des frères Mentouri-Constantine1. 161 p.
- [2]-Boularak M., (2003), Etude hydrogéologique du bassin versant de Boumerzoug. Vulnérabilité des eaux souterraines et impact de la pollution sur la région d'El Khroub. Mémoire de Magister (Hydrogéologie). Université des frères Mentouri-Constantine1. 179 p.
- [3]-Bouteraa O., Touaimia K., (2004), Synthèse hydrogéologique des plaines de Taxas, Ain Kercha et Ain Babouche. Mémoire d'ingénieur, Université des frères Mentouri-Constantine1. 123 p.

- [4]-**Bouterraa O.**, 2008, Gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de Boumerzoug (Kebir-Rhumel): perspectives et développement durable. Mémoire de Magister. Département de géologie, Université Badji Mokhtar, Annaba, 152 p.
- [5]-**Durozoy G.**, (1958), Les ressources en eau des massifs calcaires crétacés de la région de Constantine. Thèse de Doctorat. Université d'Alger. 299 p.
- [6]-**Durozoy G.**, (1952), Hydrogéologie des massifs calcaires crétacés des monts de Constantine. Etude préliminaire. XIX^e Congrès géologique international (la géologie et les problèmes de l'eau en Algérie), Alger. t.2. p 95-111.
- [7]-**FARAH A.S.**, (1991), Etude du comportement hydrochimique d'un oued en zone méditerranéenne semi-aride d'Afrique du Nord et de ses causes naturelles et anthropiques: l'oued Rhumel, Constantinois Algérie. Thèse de Doctorat. Université d'Orléans. France. 272 p.
- [8]-**Vila J.M.**, (1980), La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens, Thèse doctorat d'état des Sciences, Université de Paris VI, 2 tomes, 586 p.
- [9]-**Lahonder J.C.**, (1987), Les séries ultratelliennes d'Algérie Nord-Orientale et les formations environnantes dans leur cadre structural. Paul Sabatier, Toulouse, France, 242p.
- [10]-**Coiffait P.F.**, **Villa J.M.**, (1977), Carte géologique de l'Algérie au 1/50000. Feuille N°74. El Aria : avec notice explicative. Publ. Serv. Carte géol. Algérie.
- [11]-**Voute C.**, (1967), Essais de synthèse de l'histoire géologique des environs d'Ain Fakroune, Ain Babouche, et des environs limitrophes. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, Nlle Série, 2 t, 390 p.
- [12]-**Rodier J.**, (2005), L'analyse de l'eau naturelle, eaux résiduaires, eau de mer, 8^{ème} Edition, Dunod, Paris, 1384 p.
- [13]-**Güler C.**, **Thyne G.**, **McCray J.E.**, **Turner A.K.**, (2002), Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeol J* 10:455-474.
- [14]-**Helena B.**, **Pardo R.**, **Vega M.**, **Barrado E.**, **Fernandez J.M.**, **Fernandez L.**, (2000), Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis. *Water Research* 34:807-816.
- [15]-**Singh C.K.**, **Kumar A.**, **Shashtri S.**, **Kumar A.**, **Kumar P.**, **Mallick J.**, (2017), Multivariate statistical analysis and geochemical modeling for geochemical assessment of groundwater of Delhi, India. *Journal of Geochemical Exploration* 175:59-71.
- [16]-**WHO** (1993), Guidelines for drinking water quality, 2nd Ed. Vol.1: pp188. Recommendations, Geneva and World Health Organization.
- [17]-**WHO** (2004), Guidelines for drinking water quality: training pack. WHO, Geneva.
- [18]-**WHO** (2011), Guidelines for drinking-water quality, 4th edn. World Health Organization, Geneva.
- [19]-**Clark ID.**, (2015), Groundwater geochemistry and isotopes. CRC Press Taylor & Francis Group (Boca Raton (Fla.), London, New York: pp 421
- [20]-**Piper AM.**, (1944), A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Trans. Am. Geophysical Union*, 25: 914-928.
- [21]-**Chadha DK.**, (1999), A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. *Hydrogeol J*:431-439.
- [22]-**Richard LA.**, (1954), Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agricultural handbook*, vol 60. USDA, Washington, DC, p 160
- [23]-**Belkhiri L.**, **Boudoukha A.**, **et Mouni L.**, (2010), Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Ain Azel plain, Algeria. *Journal of Geography and Regional Planning* Vol. 3(6), pp. 151-157.
- [24]-**Wilcox LV.**, (1955), Classification and use of irrigation waters. U.S. Department of Agriculture Circular 969. Washington, DC: U.S. Dept. Agric., pp. 19.
- [25]-**Eaton EM.**, Significance of carbonate in irrigation water. *Soil Science*. 1950; 69: 123-133.