

## Variations spatiales des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines de la plaine alluvionnaire de Guelma, (Nord-est algérien)

K. BENMARCE, A. CHOUABBI & L. BOUABSA

Université Badji Mokhtar, Laboratoire de géodynamique et de la ressource naturelle, B.P. 12, 23000 Annaba, Algérie.

Email: kabenmarce@yahoo.fr, abdelmajid.chouabbi@univ-annaba.org, lakhdar.bouabsa@univ-annaba.dz

**ملخص :** إن منطقة الدراسة الواقعة في شمال شرق الجزائر هي منطقة منخفضة وهذا بسبب حركات الضغط و التوسع التي حدثت في بداية الميوسين، هي منطقة مليئة بالطمي من نفس الفترة على شكل مصطبات ترابية، جزء منها مزود بطبقة من الحجر الجيري واقعة في منابعها. يتمحور هذا البحث حول الاختلافات الفضائية للخصائص الفيزيائية-الكيميائية للمياه الجوفية للمنطقة المنخفضة. تم أخذ عينات للمياه الجوفية من سبعة 7 منابع (بما في ذلك خمسة تقع في المنطقة المنخفضة و اثنين على حدودها المباشرة) في نهاية شهر أبريل 2009 (موسم الأمطار) و تحليلها. تم تحديد 16 معامل في عينات المياه : درجة الحموضة ،  $T^{\circ}C$ ، التوصيل الكهربائي (EC)،  $Ca^{2+}$ ،  $Mg^{2+}$ ،  $Na^{+}$ ،  $K^{+}$ ، الكلورين،  $SO_4^{2-}$ ،  $NO_3^{-}$ ، TH (العسر الكلي)، TAC (لقب القلوية كاملة)، أورثو فوسفات  $(PO_4^{3-})$ ،  $Mn^{2+}$  و  $Al^{3+}$ .

التغيير في قيم درجة الحموضة ما بين 7.7 و 10.7 عرض الطابع الأساسي لجميع المياه تحليلها، و الموصلية الكهربائية تتراوح بين 1030 S / سم إلى 2020 S / سم يظهر زيادة من المنبع إلى المصب و لوحظ وجود ارتباط كبير بين التوصيل الكهربائي (EC) وغيرها من المعامل ( $Ca^{2+}$ ،  $Mg^{2+}$ ،  $Na^{+}$ ،  $K^{+}$ ، الكلورين،  $HO_3^{-}$  و  $AL^{3+}$  باستثناء  $NO_3^{-}$ ،  $SO_4^{2-}$ ،  $PO_4^{3-}$  و  $Mn^{2+}$ .

الأيونات السائدة هي الكلوريدات و الكبريتات و الكاتيونات و هي ممثلة أساسا بالكالسيوم و المغنيزيوم. مكن تطبيق أساليب الاستكشاف المتعددة المتغيرات (التحليل العاملي) من التعرف على المعايير الأكثر أهمية التي تصف نوعية هذه المياه، و وضع تقسيم مساحي لكيمياء المياه. أظهر المعامل I (ي) الذي يمثل التمدن زيادة هذا المعيار من منبع إلى مصب الطبقة، مكن المعامل الثاني الممثل للتلوث الأنتروبي من التعرف على محيط مخفض في الجانب الأوسط للطبقة المحدد بين محيطين مؤكسدين و جوانبهما من المنبع إلى المصب حسب اتجاه التدفق.

**الكلمات الأساسية :** المياه، و المياه الجوفية الطمي، سحنة الكيميائية التلوث تمدن.

**Résumé :** La zone d'étude qui se situe au nord-est algérien est une dépression résultant de mouvements de compression et d'extension survenus au début du Miocène, comblée d'alluvions du même âge disposées en terrasses et alimentées en partie par la nappe des travertins située à leur amont. Cette recherche s'articule autour des variations spatiales des caractéristiques physicochimiques des eaux souterraines de la dépression. Les eaux souterraines de 7 sources (dont cinq situées dans la dépression et deux sur ses bordures immédiates) ont été prélevées à la fin du mois d'avril 2009 (saison des pluies) puis analysées. 16 paramètres ont été déterminés dans les échantillons d'eau : pH,  $T^{\circ}C$ , conductivité électrique (C.E),  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^{+}$ ,  $K^{+}$ , Cl-,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^{-}$ , TH (dureté totale), TAC (titre alcalimétrique complet), ortho phosphate ( $PO_4^{3-}$ ),  $Mn^{2+}$  et  $Al^{3+}$ . La variation des valeurs du pH entre 7,7 et 10,7 montre un caractère basique de toutes les eaux analysées, celle de la conductivité électrique entre 1030  $\mu S/cm$  et 2020  $\mu S/cm$  montre un accroissement de l'amont à l'aval. Une corrélation significative a été observée entre la conductivité électrique (CE) et d'autres paramètres ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^{+}$ ,  $K^{+}$ , Cl-,  $HCO_3^{-}$  et  $Al^{3+}$  exceptés  $NO_3^{-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $PO_4^{3-}$  et  $Mn^{2+}$ ). Les anions dominants sont les chlorures et les sulfates et les cations dominants sont représentés essentiellement par le calcium et le magnésium.

L'application des méthodes exploratoires multivariées (analyse factorielle) a permis d'identifier les paramètres les plus pertinents qui décrivent la qualité de ces eaux et de définir une zonation de la chimie des eaux. Le facteur I représentant la minéralisation a mis en évidence l'augmentation de ce paramètre de l'amont vers l'aval de la nappe. Le second facteur représentant la pollution anthropique a permis d'identifier un milieu réducteur dans la partie centrale de la nappe limité entre deux milieux oxydants à ses extrémités amont et aval. Les faciès chimiques chloruré et sulfaté calcique et magnésien des eaux sont liés à la nature lithologique des terrains traversés. L'accroissement des teneurs des paramètres est enregistré surtout à l'aval de l'aquifère selon le sens de l'écoulement.

**Mots clés :** eau, aquifère, alluvions, faciès chimiques, minéralisation, pollution.

**Abstract :** The study area is a depression resulting from movements of compression and expansion occurred in the early Miocene that has undergone sedimentation forming terraces of the same age and supplied in part by the aquifer of travertine located in its upstream. This research focuses on the spatial variations of the physicochemical characteristics of groundwater depression. Groundwater with seven springs were taken during the rainy season, at the end of April 2009, in order to be analyzed in the laboratory. For the analysis, sixteen parameters were determined from water samples: pH, T°C, electrical conductivity (EC), Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, TH (total hardness), TAC (as total alkali), ortho-phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), Mn<sup>2+</sup> and Al<sup>3+</sup>. The application of multivariate methods (factor analysis) was used to identify the most relevant parameters that described the quality of water. The first factor I representing the mineralization showed an increase of this parameter from upstream to downstream of the aquifer. The second factor II represented the anthropogenic pollution that could identify a reducing environment in the central part found between two oxidizing environmental boundaries; upstream and downstream. The change in pH values between 7.7 and 10.7 showed a basic character of all analyzed water, the electrical conductivity of values between 1030 µs/cm and 2020 µs/cm showed an increase from upstream to downstream. A significant correlation was observed between the electrical conductivity (EC) and other parameters (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and Al<sup>3+</sup>; except for NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> and Mn<sup>2+</sup>). The dominant anions were chlorides and sulfates, and the dominant cations were represented mainly by calcium and magnesium. Chemical facies of water that were chlorinated and sulfated with magnesium were related to the surrounding lithology. Increased contents of the parameters were mainly recorded downstream of the aquifer following the direction of flow.

**Keywords :** water ; aquifer ; alluvium ; chemical facies ; mineralization ; pollution

## 1. Introduction

La composition chimique des eaux souterraines dépend de la nature géologique du sol d'où elles proviennent, mais aussi des substances réactives qu'elles auraient pu rencontrer lors de l'écoulement [Fédrigoni et al. 2001, in : Chénini, 2009, Jordana et Batista, 2004, Magesan et al. 2003]. Ainsi, les éléments minéraux dissous dans l'eau durant son parcours déterminent sa qualité [Thais, 2004, Jain et al. 2005, Glynn et Plummer 2005]. Cependant, cette qualité peut être altérée lorsque des substances extérieures entrent en contact avec la nappe aquifère. Tel est le cas des substances indésirables voire toxiques qui dégradent l'eau souterraine et compromettent son usage, notamment en tant qu'eau destinée à l'alimentation des populations.

L'utilisation intensive des ressources naturelles et l'accroissement des activités humaines ont engendré de graves problèmes sur la qualité des eaux souterraines [Mor et al. 2006]. Dans les pays en développement, obtenir de l'eau saine pour la consommation humaine est devenu un sérieux problème du fait d'un manque de protection de l'environnement.

Dans notre cas, la nappe est très convoitée pour l'alimentation en eau potable de la population, compte tenu de l'importance de son potentiel hydrique. Elle offre également des terres très fertiles pour l'activité agricole. Ces opportunités l'exposent, d'une part, à une surexploitation, et d'autre part, à une dégradation éventuelle de la qualité de ses eaux par les fertilisants et engrais chimiques essentiellement azotés qui peuvent transiter vers les eaux de la nappe [Kloppmann, 2003, Bolduc et al., 2006, Gourcy et al., 2011, Boualla, 2011, Deh et al., 2012].

Les travaux antérieurs réalisés dans la zone d'étude ont mis en évidence une pollution d'origine agricole des eaux souterraines, utilisant pour cela la méthode du calcul de l'indice de contamination [Chaoui et al., 2007], la méthode DRASTIC standard développée par les services de l'agence américaine de la protection de l'environnement USEPA [Aller et al., 1987, in : Djabri et Hani, 2005, Panagopoulos et al., 2006, Hamza et al., 2008] et par l'analyse des paramètres physicochimiques [Kloppmann et al., 2011, Schoeller, 1962, Schoeller, 1963, In : Bakalowicz, 2013]. Selon le rapport interne établi par la Sogréah (2005) pour le compte de la direction des ressources en eau de la wilaya de Guelma, l'hypothèse d'une éventuelle alimentation de la nappe alluvionnaire par celle des travertins a été émise.

Cette étude a été réalisée en fin de période de recharge de la nappe, à la fin du mois d'avril 2009. Elle s'articule sur la caractérisation qualitative des eaux souterraines et leur comportement hydrochimique dans l'espace de la nappe alluvionnaire à partir du traitement des paramètres physico-chimiques utilisés comme traceurs naturels [Schoeller, 1963, In : Bakalowicz, 2013], la détermination des paramètres les plus pertinents qui décrivent le comportement des eaux par l'analyse en composantes principales [Hotelling, 1933, In : Nagabhsushan et Kumar, 2007, Husson et al., 2010] et enfin la mise en évidence de l'alimentation de la nappe alluvionnaire par la nappe des travertins émise en hypothèse dans le rapport de la Sogréah (2005).

### 1.1 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située au Nord-est algérien, à 60 km au Sud de la ville d'Annaba (Figure 1). Elle fait partie de la chaîne des Maghrébines de l'Algérie orientale [Vila, 1980] et s'étend entre 7° et 7°30' Est et entre 36° et 36°30' Nord, entre 180 et 250 m d'altitude.

Elle est soumise à un climat semi-aride tempéré caractérisé par deux saisons bien distinctes : l'une pluvieuse et froide allant du mois d'octobre au mois de mai et l'autre sèche et chaude durant les autres mois de l'année. Les moyennes annuelles de pluie et de températures enregistrées sont respectivement de 536 mm et 20 °C [Benchaïba et Gaagai, 2012]. Elle est entourée de diverses nappes de

charriage, donnant naissance aux actuelles montagnes [Vila, 1980, Vila et al., 1968, Raoult, 1975, Lahondère, 1987] : Mahouna (1411m) au Sud, Haouara (1292m) au Nord et Débar (1060m) au Nord-Ouest. Les reliefs sont constitués de terrains allochtones appartenant pour l'essentiel au domaine tellien constitué de marnes et de carbonates d'âge Méso-Cénozoïque [Algéo, 2004].

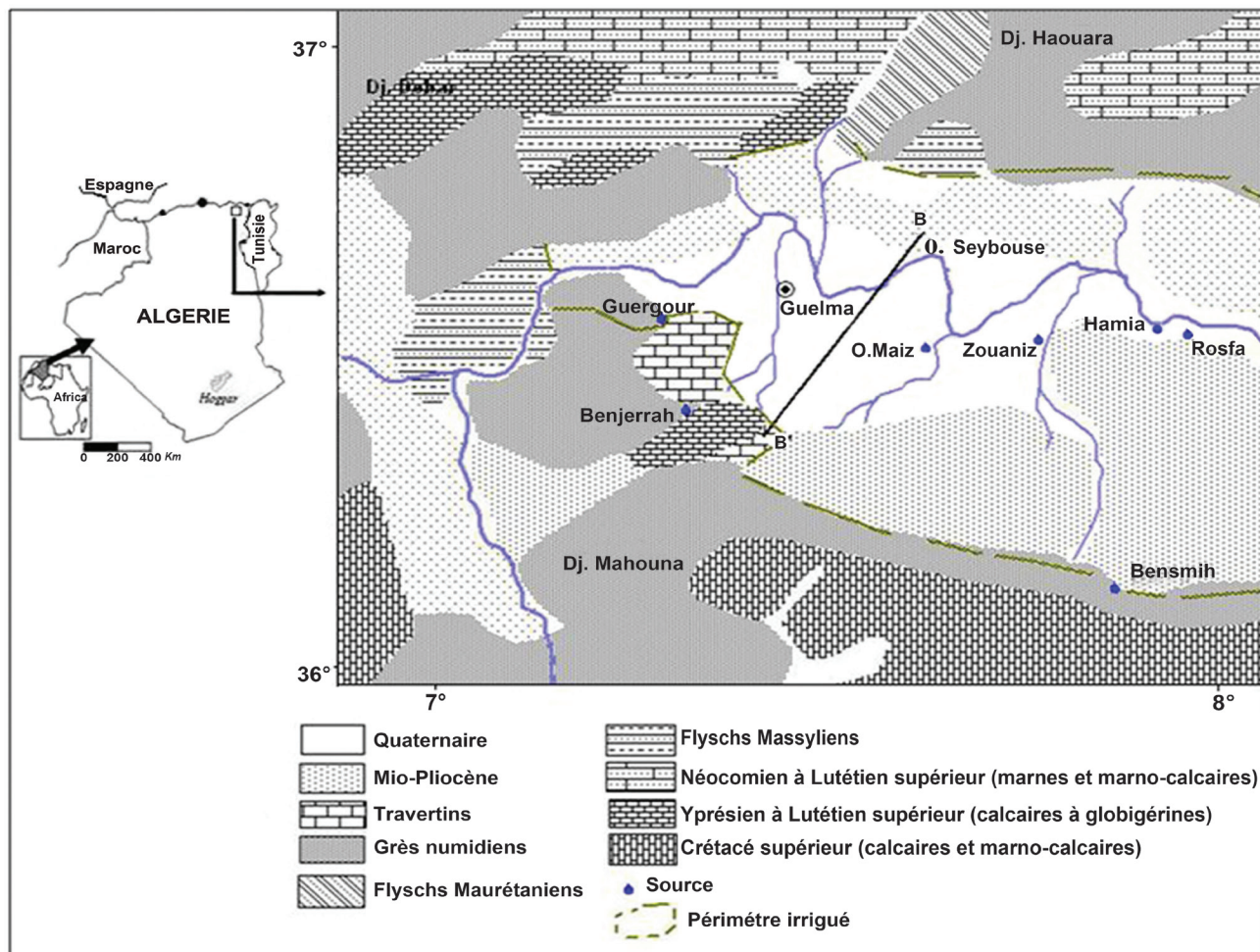


Fig. 1 Localisation des sources étudiées dans le bassin de Guelma (Extrait de la carte géologique de Vila, 1980)

C'est une dépression remplie d'alluvions plio-quaternaires formant des terrasses (haute, moyenne et basse) disposées en gradins sur la rive droite de l'Oued Seybouse et reposant sur un substratum marneux gypsifère d'âge Miocène. La puissance maximale de la nappe est localisée au centre et s'amincit progressivement vers ses extrémités [Sogréah, 2005]. Cette disposition géométrique est vérifiée par les logs stratigraphiques des forages de reconnaissance et d'exploitation réalisés par la direction des ressources en eau de la wilaya de Guelma pour l'alimentation en eau de la population.

Son sol est un périmètre d'irrigation sollicité par une activité agricole intense, où l'usage des engrais chimiques

est pratiqué d'une façon plus ou moins intensive [Djabri et al., 2003, Djabri et Hani. 2005, Laaraba et Haj Zobir, 2009]. En période hivernale, la nappe est alimentée par les eaux de pluie et en partie par la nappe des travertins située à l'amont des écoulements à une altitude moyenne de 300 m. En période estivale, elle est alimentée par les eaux d'irrigation à partir de l'Oued Seybouse « return flow », [Hani, 2003].

L'établissement d'une carte piézométrique (figure 2) a permis de déterminer un écoulement souterrain suivant une direction sud-nord, depuis la nappe des travertins vers l'Oued Seybouse.



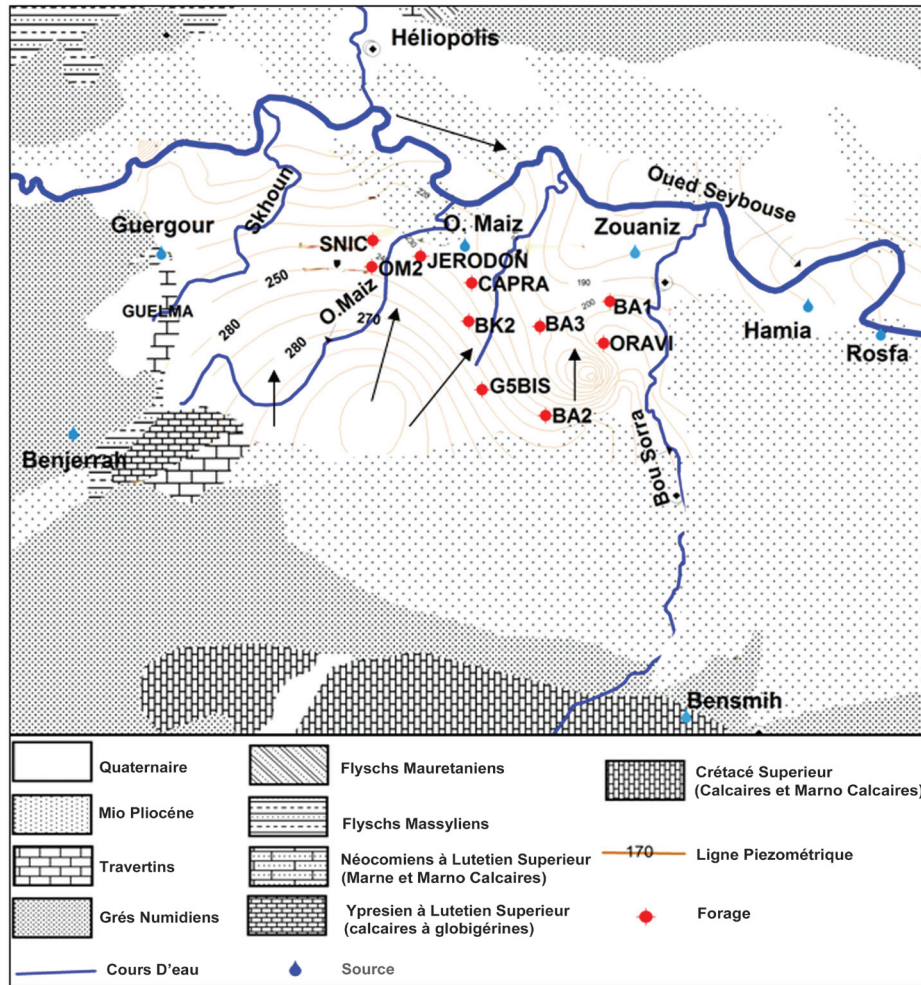


Fig. 2 Carte piézométrique de la nappe de Guelma (Avril 2009)

## 2. Matériel et méthodes

Les eaux de sept sources ont été prélevés dans les mêmes conditions météorologiques et hydrodynamiques (30 avril /2009), période qui correspond à la recharge de la nappe alluvionnaire par les précipitations et la moyenne journalière de pluie enregistrée est de 52 mm (figure 3).

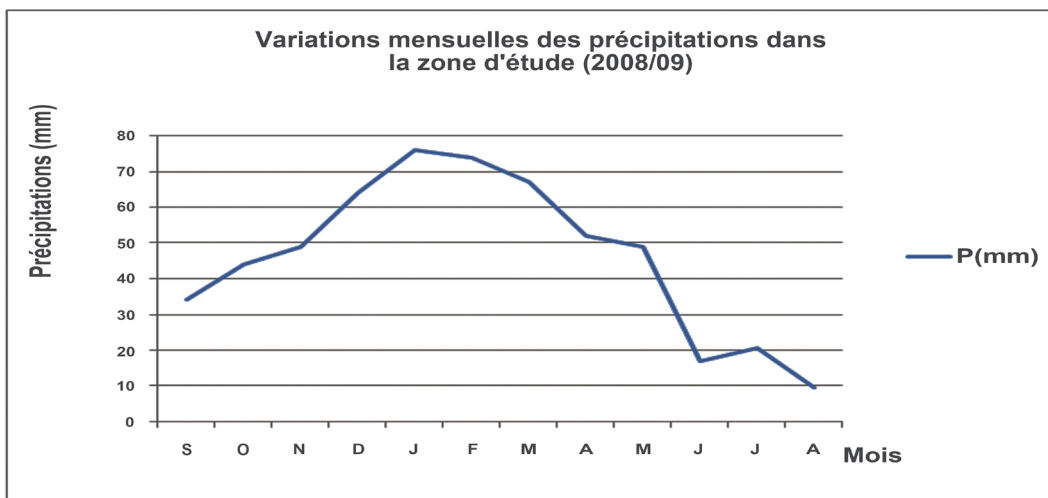


Fig. 3 Variations mensuelles des précipitations dans la zone d'étude (2008/09)

Les échantillons d'eau prélevés sont mis dans des bouteilles en polyéthylène de capacité 1,5 litre, préalablement lavées à l'acide nitrique 1M puis à l'eau distillée. Sur le terrain avant remplissage des bouteilles, celles-ci ont été lavées trois fois avec l'eau à prélever. Le remplissage des bouteilles a été fait à ras bord puis le bouchon vissé afin d'éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère. Les échantillons d'eau ont été ensuite transportés dans une glacière à 4°C au laboratoire pour analyse dans l'heure qui suit le prélèvement. Les paramètres physico-chimiques caractéristiques de la qualité des eaux souterraines ont été déterminés selon les méthodes usuelles d'analyse [Rodier J., 2009] et qui sont les suivantes :

Les mesures in situ ont concerné les paramètres physiques (T, pH, conductivité) à l'aide d'un appareil multiparamètres WTW 340i. Les ions calcium et magnésium sont déterminés par complexométrie par titrage avec le sel disodique de l'EDTA (Ethylen Diamine tétra-acétique). La dureté calcique est déduite de la dureté totale et magnésienne. La mesure de l'alcalinité est basée sur la neutralisation d'un certain volume de l'échantillon par l'acide sulfurique (H2SO4 N/50). Les chlorures sont déterminés par la méthode de Mohr (Argentimétrie). Les sulfates sont déterminés par précipitation par le chlorure de baryum. La mesure turbidimétrique sur le trouble est obtenue à  $\lambda = 435 \text{ nm}$  à l'aide d'un spectromètre du type : SE 120. KARL KOLB. Les nitrates sont obtenus par méthode de réduction au cadmium. La lecture est automatique sur l'auto-analyseur de type SKALAR à  $\lambda = 540 \text{ nm}$ . Le sodium et le potassium sont déterminés par spectrophotomètre à émission de flamme sur appareil de type : JENWAY.PFP7.  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , par spectrophotomètre visible, NV202. Ret. RG232. Etuve Binder, balance analytique: 0,1 mg Sartorius, agitateur magnétique : agimatique.  $\text{Al}^{3+}$ , par volumétrie inverse.

L'analyse statistique des données obtenues a été effectuée par le logiciel SPAD 5.5.

**Application de l'Analyse en Composantes Principales (ACP)**

L'ACP est une méthode statistique multidimensionnelle descriptive, utilisable comme aide à l'interprétation d'une matrice de données [Hotelling, 1933, In : Nagabhushan et Kumar, 2007, Husson et al., 2010]. La matrice des données physico-chimiques comporte m analyses (ou éléments mesurés). Cette méthode, en cherchant les directions préférentielles d'allongement d'un nuage de points sur ces directions préférentielles (axes factoriels) lesquelles, sont des combinaisons linéaires des variables de départ. Chaque variable contribuant au facteur intervient avec un coefficient appelé vecteur propre. Pour l'analyse des teneurs chimiques, dont les gammes de variations peuvent être disparates, il convient de dépendérer ces variables en les centrant et en les réduisant. Les teneurs sont ainsi centrées sur une moyenne nulle et divisées par l'écart type. La variance apportée par chacune des variables est dès lors égale à 1, et donc l'inertie (variance) totale du nuage de points égale à  $1 \times n$  variables sur m individus. Le premier axe factoriel est celui qui explique le plus grand pourcentage de cette variance totale, le second explique ensuite le plus grand pourcentage de variance résiduelle.

Dans notre cas, l'ACP a été réalisée sur 13 variables et 7 individus (sources).

**3. Résultats**

Dans le secteur d'étude, les eaux souterraines étudiées proviennent d'un aquifère alluvionnaire constitué de terrasses et alimenté en partie par la nappe des travertins située à son amont. La profondeur de l'eau par rapport à la surface du sol dans l'aquifère varie entre 8 et 25 mètres et les écoulements souterrains se font du sud vers le nord. Les valeurs des paramètres de la qualité des eaux qui ont été déterminées sont représentées dans le tableau 1.

**Tableau 1.** Résultats des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la nappe alluvionnaire de Guelma (avril/2009)

Nom de source	C.E $\mu\text{m/s}$	Ph	T °C	TH °F	Tac °F	Ca <sup>2+</sup> mg/l	Mg <sup>2+</sup> mg/l	K <sup>+</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Mn <sup>2+</sup> mg/l	Al <sup>3+</sup> mg/l	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> mg/l
Guergour	1104	7,7	18	53	35	145	41	2,2	98	405	115	130	175	0	2,7	0,31
Benjerah	1030	7,9	19	49	27	117	40	2	80	320	150	130	18	0	2,7	0,23
O.Maiz	1092	10,7	17	87	28	130	40	3	65	335	125	98	23	0	2,7	0,33
Zouaniz	1585	8,8	18	52	28	150	35	2,2	60	335	150	58	98	0	2,7	0,32
Hamia	2020	9,3	19,5	87	37	200	90	5	126	448	354	230	90	0	5,4	0,27
Rosfa	1954	8,4	18,8	75	37,4	178	74	8	93	482	300	110	31	0	5,4	0,27
Bensmih	1215	8,7	19,7	47	28	140	19	0,8	70	335	150	168	13	0,5	5,4	0
moyenne	1428,57	8,78	18,57	64,28	31,49	151,43	48,43	3,31	84,57	380	192	132	64	0,07	3,85	0,25
<b>Norme</b>	<b>1500</b>	<b>6,5 - 8,5</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>50</b>	<b>0,05</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>

Le pH des eaux étudiées varie entre 7,7 et 10,7 avec une moyenne de 8,7. On remarque que 57 % des sources ne rentrent pas dans l'intervalle recommandé par l'O.M.S. (6,5 – 8,5), et possèdent un caractère alcalin. Ce sont les sources O. Maiz, Zouaniz et Hamia situées à l'aval de la nappe et Bensmih dans sa partie sud-est. Les autres sources, soit 43 %, possèdent un pH situé dans la fourchette des valeurs de l'O.M.S.

La température de l'eau qui émerge, influence la presque totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques [Chapman et Kimstach 1996 : *in* Derwich et al., 2010]. Elle est liée au mode de circulation de l'eau. La profondeur qu'une eau peut atteindre selon le gradient géothermique local : 3 °C /100 m [Ouali et al., 2007], sa vitesse de remontée et son mélange avec les eaux de subsurface, conditionnent ce paramètre [Schöeller, 1963, *in* : Bakalowicz, 2013, Prasad et Narayana, 2004]. Les températures des eaux étudiées, varient entre 17°C et 19,7°C avec une moyenne de 18,57°C. Elles sont inférieures à la norme de 25°C.

La conductivité électrique désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique et elle est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. Par conséquent, elle peut renseigner sur le degré de minéralisation d'une eau.

La conductivité électrique des eaux étudiées, varie entre 1030 µS/cm et 2020 µS/cm avec une moyenne de 1428,57 µS/cm. Les valeurs au dessus de la norme sont enregistrées au niveau des sources Zouaniz (1585 µS/cm), Hamia (2020 µS/cm et Rosfa (1954 µS/cm) situées à l'aval du sens d'écoulement. Elles représentent 42% des points d'eaux analysées. Au niveau des autres points (58%), les valeurs de la conductivité sont inférieures à la norme.

Les concentrations en ion calcium (Ca<sup>2+</sup>) varient entre 130 mg/l et 200 mg/l avec une moyenne de 151,43 mg/l et dépassent la norme dans l'ensemble des échantillons. Celles des ions magnésium (Mg<sup>2+</sup>)

varient entre 19 mg/l et 90 mg/l avec une moyenne de 48,43 mg/l. Les valeurs situées au dessus de la norme sont enregistrées à l'aval et représentent 28,57 % de l'ensemble des échantillons. Les ions potassium et sodium présentent des valeurs inférieures à la norme dans l'ensemble des échantillons. Leurs teneurs varient respectivement entre 0,8 mg/l et 8 mg/l avec une moyenne de 3,31 mg/l pour le potassium et entre 60 mg/l et 126 mg/l avec une moyenne de 84,57 mg/l pour le sodium. Les teneurs élevées sont enregistrées également à l'aval pour l'ion potassium avec un taux de 28 %. Pour le sodium, les valeurs enregistrées au dessus de la moyenne représentent 42,85 % de l'ensemble des échantillons, dont deux à l'aval et le troisième dans la partie sud ouest. Les teneurs en bicarbonates qui dépassent la norme admise dans l'ensemble de l'aquifère, varient entre 320 mg/l et 482 mg/l avec une moyenne de 380 mg/l. Les teneurs en ions chlorures varient entre 115 mg/l à l'amont et 354 mg/l à l'aval avec une moyenne de 192 mg/l qui se situe en dessous de la norme. Les valeurs maximales enregistrées au dessus de la norme et qui représentent 28,57 % de l'ensemble des échantillons prélevés se trouvent à l'aval dans le sens des écoulements souterrains. Pour les teneurs en sulfates, les deux valeurs extrêmes de 58 mg/l et 230 mg/l se trouvent à l'aval. Toutefois, toutes les valeurs sont inférieures à la norme. Les teneurs en nitrates des eaux varient entre 13 mg/l dans la partie sud-est de l'aquifère et 175 mg/l dans sa partie sud-ouest avec une moyenne de 64 mg/l. Les deux autres valeurs supérieures à la norme et à la moyenne se trouvent à l'aval de l'aquifère, ces valeurs représentent 42,85 % de l'ensemble des échantillons. Le seul échantillon contenant du manganèse avec une teneur dix fois supérieure à la norme se trouve dans la partie sud-est de l'aquifère, il représente 14,28 % de l'ensemble des échantillons. Le TAC se situe dans l'intervalle 320 mg/l de CaCO<sub>3</sub> à 482 mg/l de CaCO<sub>3</sub>, ce qui se traduit par de très fortes concentrations en ions bicarbonates provenant de la nappe des travertins qui alimente en partie la nappe alluvionnaire (figure 4).

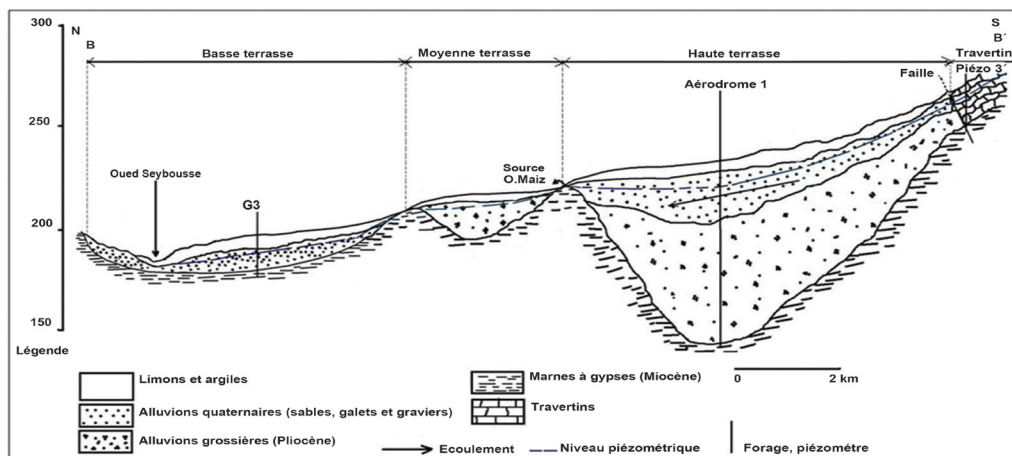


Fig. 4 Relation entre la nappe alluvionnaire et celle des travertins et niveau Piézométrique.



La dureté totale de l'eau (THt) est rattachée principalement à la quantité de calcium et de magnésium dans l'eau. Dans les échantillons d'eau, le THt varie entre 9,83 méq/l et 17,5 méq/l. Pour tous les points d'eaux étudiés, la valeur de THt est supérieure à la valeur guide de l'OMS qui est de 32 °F. Selon la classification de Durfor et Becker [Durfor C.N.and Becker E., 1964], les eaux de sources analysées dans la nappe alluvionnaire du bassin de Guelma possèdent une dureté élevée due aux teneurs élevées des ions calcium et magnésium. Ces concentrations sont attribuables à la lithologie des terrains traversés (travertins) et au substratum marneux gypsifère. Les fortes valeurs enregistrées à l'aval de l'aquifère (Hamia et Rosfa) sont attribuables à un enrichissement par dissolution. Les concentrations en potassium (K<sup>+</sup>) se situent entre 1 mg/l et 8 mg/l et sont dans la limite permise pour l'eau de boisson, leur origine est lithologique. Les concentrations en calcium sont élevées dans tout l'aquifère, celles du magnésium sont élevées à l'aval. Les ions chlorures, sulfates, nitrates, aluminium et ortho phosphates sont des constituants minéraux qui peuvent altérer la qualité de l'eau souterraine lorsque leurs concentrations dépassent la valeur guide. Les ions sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), à des concentrations supérieures à la valeur guide dans l'eau de boisson peuvent provoquer des diarrhées chez l'être humain [CDC-EPA, 1999]. Les concentrations en ions chlorures (Cl<sup>-</sup>) varient entre 150 mg/l en amont et 270 mg/l à l'aval. Celles des ions ortho

phosphate se situent entre 0 et 0,33 mg/l. Tous les points d'eaux étudiés ont présenté une concentration en PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> inférieure à la valeur limite de 0,5 mg/l. Les concentrations en ions sulfates se situent entre 85 mg/l et 200 mg/l. Elles sont dans la limite permise pour l'eau de boisson.

Les ions nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) sont présents dans la nature où ils font partie du cycle de l'azote. Ils représentent la forme la plus soluble de l'azote. Principalement utilisés comme engrais inorganiques pour la croissance des plantes et la synthèse de composés azotés organiques, les nitrates en excès peuvent se retrouver rapidement dans les eaux souterraines [Office of Drinking Water, 1987, Bolduc et al., 2006, Gourcy et al., 2011, Boualla, 2011, Deh et al., 2012]. Les déchets contenant de l'azote organique représentent aussi une source de nitrates obtenus à partir de différents processus bio-chimiques (ammonification et nitrification).

#### 4. Interprétation et discussion

##### 4.1 Zonation géochimique des eaux à partir d'une analyse multivariée

Une forte association est constatée d'une part, entre la conductivité (C.E.) et les ions Cl<sup>-</sup>(r=0,91), Ca<sup>2+</sup>(r=0,94), Mg<sup>2+</sup>(r=0,84), K<sup>+</sup>(r=0,78), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>(r=0,77), Na<sup>+</sup>(r=0,55), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>(0,77) et d'autre part, entre la C.E et les ions Al<sup>3+</sup>(r=0,67) (Tableau. 2).

**Tableau 2.** Matrice de corrélation des eaux souterraines de la nappe alluvionnaire de Guelma (avril/2009)

Paramètres	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	C.E	O <sub>2</sub>	Mn <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>2+</sup>	1,00												
Mg <sup>2+</sup>	0,93	1,00											
K <sup>+</sup>	0,73	0,83	1,00										
Na <sup>+</sup>	0,79	0,84	0,51	1,00									
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,84	0,86	0,88	0,77	1,00								
Cl <sup>-</sup>	0,95	0,96	0,80	0,74	0,79	1,00							
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,22	0,08	-0,09	0,39	0,30	-0,07	1,00						
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,54	0,56	0,10	0,77	0,33	0,57	0,01	1,00					
C.E	0,94	0,84	0,78	0,55	0,77	0,91	0,07	0,29	1,00				
O <sub>2</sub>	0,42	0,49	0,60	0,35	0,64	0,30	0,54	-0,27	0,42	1,00			
Mn <sup>2+</sup>	-0,22	-0,39	-0,43	-0,28	-0,38	-0,20	-0,37	0,29	-0,22	-0,87	1,00		
Al <sup>3+</sup>	0,69	0,61	0,52	0,48	0,54	0,75	-0,30	0,64	0,67	-0,23	0,47	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,15	0,26	0,34	0,14	0,31	0,06	0,47	-0,41	0,17	0,92	-0,95	-0,55	1,00

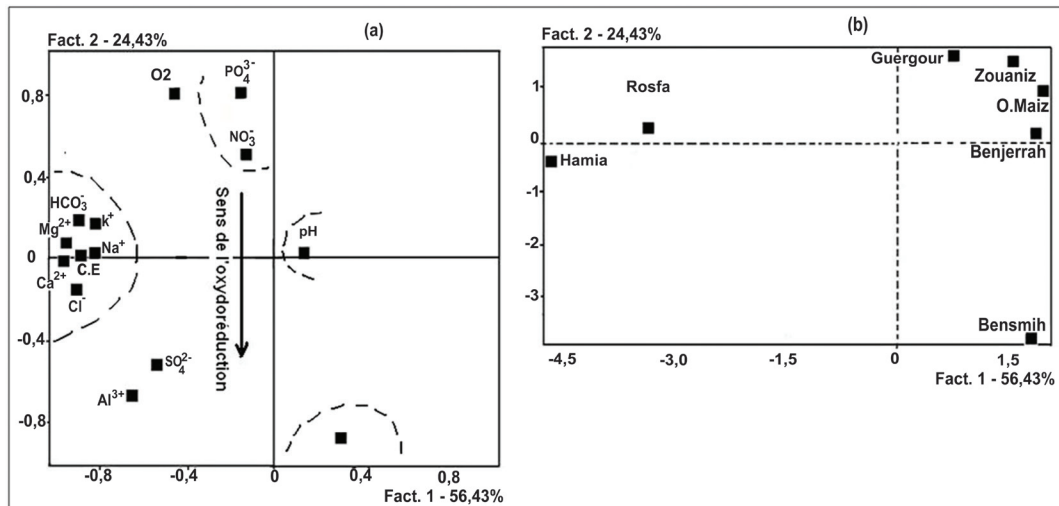
La projection des variables et des individus a été effectuée sur 2 axes, qui représentent 80,86% de la variance totale (figure 5).

La projection des variables montre le développement d'un groupe sur l'axe 1 (56,43 % de la variance) représenté par la conductivité, Ca<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Al<sup>3+</sup> et Cl<sup>-</sup> (figure 5a) qui expriment donc la minéralisation des eaux de la nappe alluvionnaire. L'axe 1 oppose l'ensemble des éléments chimiques constituant la minéralisation des eaux au pH. Ces éléments chimiques responsables du

faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien des eaux sont d'ailleurs les chlorures, les sulfates, le calcium et le magnésium.

Selon le facteur 2 (24,43 %), il y a opposition de deux groupes bien distincts. Il s'agit de l'ensemble formé de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et du groupe constitué de Mn<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et Al<sup>3+</sup>. Le premier évolue dans la nappe alluvionnaire où le sol est le siège d'activités agricoles intenses et caractérise des conditions de milieu oxydantes (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

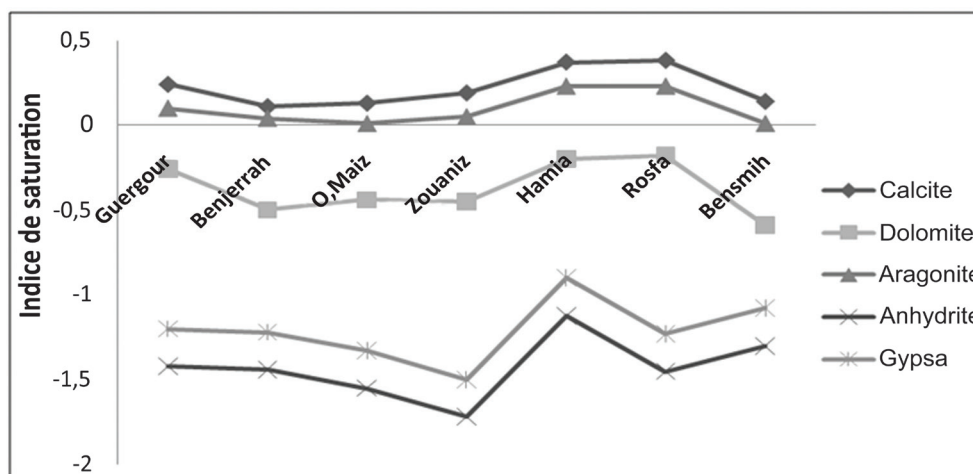
Le second possède une origine à chercher en profondeur et on assiste de ce fait à un phénomène d'oxydoréduction dans le sens de la flèche (figure 4a) ; milieu réducteur ( $Mn^{2+}$ ) au niveau des sources Hamia et Rosfa (figure 5b). L'augmentation de la minéralisation de l'amont vers l'aval est liée fidèlement à celle des teneurs en  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $HCO_3^-$  et à un degré moindre à celle des  $SO_4^{2-}$ .



**Fig. 5** Analyse en composantes principales des eaux souterraines de la nappe alluvionnaire de Guelma (avril/2009)  
(a) : Projection des variables. (b) : Projection des individus

#### 4.2 Origines de la minéralisation des eaux souterraines

L'étude des indices de saturation (I.S) des eaux par rapport aux principaux minéraux, calculés avec le programme WATEQF [Simler, 2013], montre que les concentrations des principaux minéraux sont essentiellement sous le contrôle de l'équilibre de la calcite et de l'aragonite (figure 6).



**Fig. 6** Indices de saturation des eaux souterraines de la nappe alluvionnaire de Guelma par rapport aux principaux minéraux (avril/2009)

Les valeurs maximales des chlorures acquises par dissolution, se localisent à l'aval de la nappe alluvionnaire (Hamia : 354 mg/l et Rosfa : 300 mg/l), alors que les valeurs minimales inférieures à la norme se répartissent dans le reste de l'aquifère. Les teneurs en chlorures élevées ont pour origine le lessivage des formations lithologiques (évaporitiques)[Schoeller, 1962, In : Bakalowicz, 2013]. En raison de la contribution  $NO_3^-$  et  $PO_4^{3-}$  au deuxième

axe factoriel, dans sa partie positive et des variables  $Mn^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  et  $PO_4^{3-}$  au deuxième axe dans sa partie négative, le deuxième facteur a été interprété comme un indicateur du pouvoir d'oxydoréduction du milieu en liaison avec la profondeur de la nappe (milieu réducteur dans sa partie centrale 150 m de profondeur et oxydant dans ses extrémités amont et aval avec des valeurs élevées des nitrates ; 175 mg/l à l'amont et 90 et 98 mg/l à l'aval).



La concentration en  $\text{NO}_3^-$  à l'aval de l'aquifère suppose une contamination de l'eau [Kloppmann, 2003]. En effet, la présence des activités agricoles peut expliquer ces teneurs élevées en nitrates dans l'eau. Les points d'eaux restants ont présenté des concentrations en nitrates inférieures à 50 mg/l. Sous des conditions oxydantes, le manganèse est moins mobile que les autres ions [Jordana and Batista, 2004]. Sa présence uniquement dans la source Bensmih, à l'exception des autres sources, laisse supposer une alimentation de bas en haut et différente de celle des autres sources.

La moyenne des composantes sur le premier vecteur propre, par point de surveillance, indique que la minéralisation augmente de l'amont vers l'aval dans le sens des écoulements souterrains et que la partie centrale de la nappe est un milieu de mélange des eaux avec celles de la nappe des travertins.

La moyenne des composantes sur le deuxième vecteur propre, par point de surveillance, indique que la partie centrale de la nappe est un milieu réducteur et que ses bordures amont et aval sont des milieux oxydants.

## 5. Conclusion

La nappe alluvionnaire du bassin de Guelma est une dépression remplie de dépôts plio-quadernaires séparés par endroits par des lentilles argileuses et reposant sur un substratum marneux gypsifère d'âge Miocène. Elle est alimentée en partie par la nappe des travertins située à l'amont des écoulements.

A partir de l'analyse en composantes principales, on a pu déterminer une zonation du point de vue minéralisation : faible à l'amont de l'aquifère, proche de la moyenne dans sa partie centrale et élevée à l'aval. Pour la source de Bensmih, l'ACP a permis de mettre en évidence une zone d'alimentation qui diffère de celle des autres sources.

L'analyse des données analytiques observées sur sur le réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines de la nappe alluvionnaire a permis, d'identifier les trois principaux facteurs d'influence sur le chimisme des eaux ; la minéralisation, l'oxydoréduction et la pollution anthropique.

La teneur totale en sels minéraux des eaux de l'aquifère est due essentiellement à deux causes ; naturelle et anthropique. Les processus naturels sont dus aux conditions climatiques, l'évaporation, et la concentration par dissolution ; en ce qui concerne les processus anthropiques ; l'activité agricole.

En ce qui concerne le facteur de l'oxydoréduction ; la partie centrale de l'aquifère est considérée comme un milieu réducteur et ses deux extrémités amont et aval comme milieux oxydants. L'étude a également montré une pollution des eaux par les nitrates, surtout dans les deux bordures amont et aval de l'aquifère.

Dans le détail, la température des eaux souterraines de la nappe alluvionnaire est influencée par la température ambiante de la région qui agit à travers le couche de transition meuble et perméable. Le pH des eaux varie légèrement de neutre à alcalin. Cette alcalinité proviendrait de la dissolution des minéraux présents dans la nappe des travertins.

La charge minérale des eaux est le résultat final d'un ensemble de processus complexes qui s'effectue le long du parcours de l'eau depuis la zone d'alimentation en amont (travertins) jusqu'à l'aval (Benetts et al., 2005). Les réactions majeures reconnues comme responsables d'enrichissement ou d'appauvrissement des éléments sont l'échange  $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$  dû à l'interaction eau-roches carbonatées, l'échange de base  $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}$  et la dissolution des sulfates et des chlorures.

Les eaux souterraines chlorurées sulfatées calciques et magnésiennes, sont caractérisées par une minéralisation qui croît dans le sens des écoulement par mise en solution des éléments minéraux contenus dans les différentes formations lithologiques. Les ions chlorures, sulfates, calcium et magnésium sont responsables des faciès chimiques. L'hydrochimie des eaux de la nappe alluvionnaire a permis de déterminer l'origine de la minéralisation et de confirmer sa communication avec la nappe des travertins.

## Références Bibliographiques

- Algérie Géophysique (Algéo.), 2004. Etude géophysique de la plaine de Guelma. Rapport interne. Agence nationale des ressources en eau, Constantine Algérie.
- Aller L., Bennet T., Lehr J.H., Petty R.J. et Hacket G., 1987. DRASTIC : A standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings (EPA 600/2-87). Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, États-Unis, 455 p.
- Bakalowicz M., 2013. Henri Schœller, hydrogéologue pionnier du traçage naturel. Les eaux souterraines: hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évolution des ressources. Dix-neuvièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues. Bordeaux 30 Mai-2 Juin 2013. 27-31
- Benchaïba L et Gaagai A., 2012. Contribution à la modélisation de la relation des débits liquides et solides au niveau du barrage Hammam Dèbagh à l'Est Algérien. Société Lib. Edition Mersenne Vol. 4, n°120705. ISSN 2111-4706
- Bennetts D.A., Webb J.A., Stone D.J.M., Hill D.M., 2005. Understanding the Stalination process for groundwater in an area of southeastern Australia, using hydrochemical and isotopic evidence. J Hydrol, 304, 1-15.

- Bolduc S., Larocque M., Pichonnet G., 2006. Vulnérabilité de l'eau souterraine à la contamination par les nitrates sur le bassin versant de la rivière Noire (Montérégie, Québec). *Rev. Sci. Tech. Eau*, 19(2): 87-99.
- Boualla N., 2011. Contamination des eaux souterraines du bassin de la sebkha d'Oran par les nitrates. *SciencesLib*. Editions Mersenne ; volume 3, n° 110507 ISSN 2111-4706.
- CDC-EPA., 1999. Health effects from exposure to high levels of sulfate in drinking water study. EPA 815-R-99-001, January.
- Chaoui W., Bosnobra H. et Chaoui K., 2007. Etude de la vulnérabilité à la pollution des eaux superficielles et souterraines dans la région de Boucheggouf.
- Chapman D., Kimstach V., 1996. Selection of water quality variables. *Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring*, Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon, London, pp. 59-126.
- Chénini I et Ben Mammou A., 2009. Hydrochimie et caractérisation qualitative des ressources en eau d'un système aquifère multicouche en zone aride : Application au bassin de Maknassy (Tunisie centrale) sécheresse, 20(2), 217-222.
- Deh S.K., Kouamé K.J., Saley M.B., Tanoh K.J.J., Anani E.K.A., SigNo K.H., Jourda J.P. et Biemi J., 2012. Evaluation de la vulnérabilité spécifique aux nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) des eaux souterraines du District d'Abidjan (sud de la cote d'ivoire). *Int. Journ. Biol. Chem. Sci.* 6(3) : 1390-1408. ISSN 1991-8631.
- Derwich E., Benaabidate L., Zian A., Sadki O., Belghity D., 2010. Caractérisation physico-chimique des eaux de la Nappe alluviale du haut Sebou en aval de sa Confluence avec oued fes. *Larhyss Journal*. n° 08, pp. 101-112.
- Djabri L., Hani A., Laouar R., Mudry J. et Louhi A., 2003. Potentiel pollution of groundwater in the valley of the Seybouse River, north-east Algeria. *Environmental geology*, 44: 733-744.
- Djabri L. et Hani A., 2005. La method DRASTIC, un moyen moderne pour l'étude de la vulnérabilité des nappes: application aux nappes superficielles Guelma-Boucheggouf-Annaba. *Sciences de la terre, eau et environnement*, N° 27.
- Durfor C.N., Becker E., 1964. Public water supplies of the 100 largest cities in the US. *US-Geological Survey Water Supply Paper*, 1812, 364.
- Fedrigoni L., Krimissa M., Zouari K., Maliki A., Zouppi GM., 2001. Origine de la minéralisation et comportement hydrogéochimique d'une nappe phréatique soumise à des contraintes naturelles et anthropiques sévères : exemple de la nappe de Djébiana (Tunisie). *C R Acad Sci Paris, (Science de la terre et des planètes)* ; 332 : 665-71.
- Glynn P.D. & Plummer L.N., 2005. Geochemistry and the understanding of groundwater systems. *Hydrogeology Journal*. 13, 263-287.
- Gourcy L., Hérivaux C., Buscarlet E., Surdyk N., Thiery D., 2011. Modélisation du transfert des nitrates couplée avec une analyse socio-économique afin de donner les outils pour la gestion des eaux souterraines. Application de la nappe alluviale de la plaine de l'Ain. Manuscrit auteur publié dans « Groundwater conference 2011-Gestion des ressources en eau souterraine, Orléans, France 2011 ».
- Hamza M.H., 2008. Evolution de la vulnérabilité à la pollution de la nappe cotière alluvionnaire de Meltine Ras Jebel Raf-Raf (nord-est tunisien), selon les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS et SI. *Revue des sciences de l'eau*, vol. 21, n° 1, p. 75-86.
- Hani A., 2003. Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques: application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse de doctorat, univ. BADJI Mokhtar, Annaba, 210 p.
- Hotelling (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *J.Educ.Psy.*24, p 417-441, p 498-520.
- Husson F., Josse J. et Pagès J., 2010. Principal component methods-hierarchical clustering-Partitional clustering : Why would we need to choose for visualizing data ? *Technical report-Agrocampus*, p. 17.
- Jain P., Sharma J.D., Sohu D., Sharma P., 2005. Chemical analysis of drinking water of villages of Sanganer Tehsil, Jaipur District. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, Vol. 2, N°4373-379.
- Jordana S., Batista E., 2004. Natural groundwater quality and health. *Geologica Acta*, Vol.2, N°2, 175-188.
- Kloppmann W., 2003. Etude isotopique de la pollution azotée de la nappe d'Alsace entre Sierentz et Ottmarsheim. Rapport inédit BRGM, BRGM/RP-52331-FR, 69 p.18 fig.
- Kloppmann W., Bourhane A., Asfirane F., 2011. Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau. Emploi des outils géochimique, isotopiques et géophysiques. Rapport inédit BRGM, BRGM/RP-60026-FR 129 p.
- Laaraba A et Hadj Zobir S., 2009. Pollution organique des eaux de l'Oued Seybouse (plaine alluviale de Guelma, Nord-Est Algérien). *Bulletin des Sciences Géographiques* n°23.
- Lahondere J.C., 1987. Les séries ultra telliennes d'Algérie nord orientale et les formations environnantes dans leur cadre structural. Th. Doct. Es sciences. Université Paul Sabatier, Toulouse. 1- 242.
- Magesan, G.N., Vogeler, I., Clothier, B.E., Green, S.R. et Lee, R., 2003. «Solute movement through an allophanic soil». *Journal of Environmental Quality*, 32(6): 2325-2333.

- Mor S., Ravindra K., Dahiya R.P., Chandra A., 2006. Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site. *Environ Monit Assess*, N°118, 435-456.
- Nagabhsushan P., Kumar P., 2007. Principal Component Analysis of histogram Data. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. EdsISNN Part II LNCS 4492, 1012-1021.
- Office Of Drinking Water (O.D.W), 1987. Estimated national occurrence and exposure to nitrate and nitrite in public drinking water supplies. US Environmental Protection Agency.
- Ouali S., Khellaf A. & Beddari K., 2007. Etude des ressources géothermiques du Sud algérien. *Revue des ressources renouvelables*. vol 10 n° 3, 407-417.
- Panagopoulos G.P., Antonakos A.K., Lombrakis N.J., 2006. Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrgeol. J.*, 14: 894-911.
- Prasad B.G., Narayana T.S., 2004. Subsurface water quality of different sampling stations with some selected parameters at Machilipatnam Town. *Nat. Env. Poll. Tech.* 3 (1), 47-50.
- Raoult J.F., 1975. Chevauchement d'âge éocène dans la dorsale du Djebel Bou Aded (Est de la chaîne numidique, Algérie). *C.R.Acad.sc.*, (D), t. 266, p. 861-864, Paris.
- Rodier J., 2009. L'analyse de l'eau ; eaux naturelles, eaux résiduelles, eaux de mer. Chimie, physico chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats. 8<sup>ème</sup> édition Dunod, Paris. 1383 pages.
- Schoeller H. 1962. Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. Masson, Paris, 642 p.
- Schoeller M. 1963. Recherches sur l'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines. E.Drouillard éd., Bordeaux, 231 p.
- Simler R. 2013. Logiciel Diagrammes. Téléchargeable sur : <http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>
- Sogréah (Société française d'ingénierie), 2005. Etude d'actualisation et de finalisation du plan national de l'eau. Région hydrographique Centre et Est- Rapport de mission 2, volet 6 : hydrogéologie. Vol. 2, 164 -168.
- Thais P. A., 2004. Etude du transfert d'eau et de solutés dans un sol à nappe superficielle drainée artificiellement. Thèse Doct. ENGREF, Paris, 210 p.
- Vila J.M., Busnardo R., Devries A., Magne J., Sigal J., 1968. Données stratigraphiques sur la série renversée et charriée du Djebel Bousbaa et étude de son cadre structural (région de Guelma, constantinois, Algérie). B.S.G. Paris France, (7), X, 206-212.
- Vila J.M., 1980. La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Th. Doct. Es sciences naturelles, Paris 3 tomes, 665 pages, 199 figures, 40 planches.