



CARACTERISATION STATISTIQUE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION NORD DU BASSIN DU HODNA, M'SILA. SUD-EST ALGÉRIEN

STATISTICAL CHARACTERIZATION OF GROUNDWATER QUALITY OF THE NORTHERN AREA OF THE BASIN OF HODNA, M'SILA. SOUTHEASTERN ALGERIA

BELHADJ M.Z.¹, BOUDOUKHA A.², AMROUNE A.³, GAAGAI A.², ZIANI D.².

¹Département de Génie civil, Faculté de Technologie,
Université du 20 Août 1955 Skikda. Algérie.

²Laboratoire de recherche en hydraulique appliquée,
Université de Benboulaid Batna 2. Algérie.

³Faculté des sciences, Département des sciences agronomiques,
Université de M'Sila. Algérie.

boudoukha_abderrahmane@yahoo.fr

RESUME

L'exploitation intensive des ressources en eaux souterraines dans la région de Hodna a fortement influencé le fonctionnement hydrochimique de l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire situé dans la partie nord du bassin de Hodna M'Sila, au Sud-Est de l'Algérie. Cette situation a entraîné une baisse générale du niveau piézométrique des eaux souterraines. L'objectif de cette étude est de définir les principaux facteurs qui régissent la chimie de l'eau souterraine de cet aquifère à l'aide de 54 échantillons d'eau. L'eau issue des zones d'infiltration a un faciès carbonaté. Puis le long de l'écoulement vers le Sud, elle passe progressivement à une eau chlorurée, sulfatée calcique et magnésienne en relation avec la dissolution des formations salées des terrains et du lac salé. La présence de nitrates est liée à l'activité agricole. Les techniques statistiques multivariées telles que l'analyse des composantes principales et le regroupement hiérarchique ont été appliquées aux données sur la qualité des eaux souterraines de l'aquifère. Ces techniques statistiques ont montré la présence de trois groupes de salinité. Il

change progressivement d'amont en aval (Nord-Sud) d'eau non salée vers une eau fortement salée près de Chott. L'infiltration d'eau dans le groupe 1 est mélangée progressivement le long du flux d'eau souterraine pour obtenir une charge d'eau plus élevée au groupe 3 dans la zone de décharge.

Mots clés : Hydrogéochimie, Aquifère, Statistique, Contamination, Pollution, M'Sila.

ABSTRACT

The intensive exploitation of groundwater resources in the region of Hodna has greatly influenced the hydrochemical functioning of the Mio-Plio-Quaternary aquifer located in the northern part of the basin of Hodna M'Sila, south eastern Algeria. This has resulted in a general decline of the piezometric level of the groundwater level. The objective of this study is to define the main factors governing water chemistry wide plain with 54 groundwater samples. The initial facies on the limits as well as infiltration areas is carbonate. In the southern part of the plain water becomes charged with SO₄, Cl and in connection with the dissolution of salt formations and salt lake. The presence of nitrates is related to agricultural activity. The multivariate statistical techniques such as principal component analysis and hierarchical clustering were applied to data on the groundwater quality of the aquifer. These statistical techniques have shown the presence of three salinity groups It gradually changes from upstream to downstream (North-South) of unsalted water to a heavily salted water near the Chott. Water infiltration in group 1 is mixed gradually along the groundwater flow to achieve a higher water charge to group 3 in the zone of discharge.

Key words: Hydrogeochemistry, Groundwater, Statistic, Contamination, Pollution, M'Sila.

INTRODUCTION

La région de M'sila se trouvant à 250 Km au Sud-Est d'Alger, la capitale, par son climat aride à semi-aride fait partie d'une région naturelle où les ressources en eau souterraine constituent la principale source d'approvisionnement (Fig.1). Les eaux de surfaces mobilisées au Nord par le biais du barrage de Oued Ksob, arrivent à peine à subvenir aux besoins en eau d'irrigation de la partie nord. Par contre la partie sud, est alimentée principalement par les eaux souterraines de l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire. Le suivi de l'état piézométrique entre 2004

et 2012, a montré que la nappe est fortement sollicitée (Amroune et al., 2017). Ceci a entraîné une chute continue du plan d'eau dans les ouvrages d'exploitation d'environ 0.5 m.an^{-1} (Amroune et al., 2017). Cet aquifère est exploitée à l'aide de forages d'une profondeur moyenne allant de 100 à 200 m. De ce fait, le pompage dans cette nappe n'a cessé d'augmenter et les prélèvements deviennent supérieurs aux ressources régulatrices. La présence d'un important lac salé au Sud (Chott El Hodna) et la présence d'un certain nombre de pointements triasiques salés répartis à travers la région, pourraient contribuer à la détérioration de la qualité de l'eau et des sols. Cependant, pour mettre en évidence le phénomène et analyser son effet sur la salinisation des sols, une étude était nécessaire. C'est dans cette optique que ce situe notre travail.

CONTEXTE NATUREL

La région de M'Sila se trouve piégée dans un système hydrographique endoréique appartenant au grand bassin Algérois-Hodna-Soummam. Il s'agit d'une dépression topographique limitée au Nord par la chaîne tellienne, au Sud par la chaîne atlasique, à l'Ouest par les monts de Bibans et à l'Est par les monts des Aurès. Ces deux dernières limites constituent la jonction des deux principales chaînes tellienne et atlasique. Cette plaine d'une altitude moyenne de 450 m se trouve entre les latitudes $35^{\circ}30'N$ et $35^{\circ}50'N$ et les longitudes $04^{\circ}20'E$ et $4^{\circ}50'E$ (Fig. 1). La région est caractérisée par un climat aride à semi-aride, avec des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 215 mm et une température moyenne annuelle de $19^{\circ}C$ (Amroune, 2008). L'évapotranspiration réelle moyenne annuelle est de l'ordre de 197 mm soit 92 % des précipitations. Le déficit agricole annuel est de l'ordre de 728 mm pour la station de M'Sila qui se trouve à l'intérieur du bassin. La précipitation efficace est donc limitée ce qui suggère une autre zone d'alimentation de la nappe. La présence de reliefs carbonatés et gréseux fracturés sur les limites nord et sud, peuvent constituer une limite à flux imposé. Cette fracturation résulte du choc entre la chaîne atlasique et la chaîne tellienne. Elle est multidirectionnelle et affecte l'ensemble des niveaux Hodnéens. Les séries lithologiques sont complètes et s'étalent du Trias au Quaternaire (Guiraud, 1973 ; Kieken, 1970). Les formations du Mio-Plio-Quaternaire reposent sur une structure synclinale du Secondaire montrant une variation latérale de faciès. La région est caractérisée par une complexité structurale qui résulte de la mise en place des diapirs du Trias. Ce Trias exotique est formé par des argiles et des marnes variolées et gypsifères à glaçons calcaire-dolomitiques qui affleure au Nord Est et au Nord-Ouest. Cette

formation correspond à de gros paquets de roches stratifiées montrant des calcaires gris rubanés à intercalations de marnes jaunâtres et des dolomies grises d'aspect bréchiq (Kieken, 1962). Le Jurassique est formé par des calcaires et des dolomies avec quelques passages de marnes datés du Dogger. Le Crétacé est représenté par des marnes à la base et des faciès grés-dolomitiques au sommet. Le Paléocène est formé par des marnes grises noires feuilletées, pyriteuses, des marno-calcaires, des calcaires noirs à lits ou à boules de silex, d'argiles vertes et de lits gypseux, de gros bancs de gypses à passés de sel gemme et de marnes blanches et des grés de couleur rouge (Kieken, 1970). Le Néogène est formé par des marnes gris verdâtre à brun verdâtre, souvent sableuses ou gypseuses, alternant avec quelques passées de grés friables. Cette formation est surmontée par des grés conglomératiques. Ces grés représentent une période de régression dans le bassin du Hodna. On a également des conglomérats à galets bien roulés alternant avec des marnes. Au centre de la plaine, le Néogène est représenté par des niveaux irréguliers de conglomérats alternant avec des grés et des marnes sableuses.

Le Quaternaire est d'origine continentale, les formations quaternaires sont discordantes sur un substratum Néogène et parfois Paléocène et sont souvent protégées par des croûtes calcaire-gypseuses (Guiraud, 1973). Actuellement, les principales formations aquifères, sont les niveaux appartenant au Mio-Plio-Quaternaire formant le cœur de la plaine de M'Sila. Cet aquifère est captif et se trouve dans des sables, des graviers, des galets et des conglomérats. Le toit est formé par des argiles et des marnes alors que le substratum est formé par des marnes gypseuses du Miocène.

Durant les 03 campagnes piézométriques qui ont été effectuées durant l'année 2006, (mai, septembre et décembre) et celle de mai 2012, la nappe a gardé la même structure (Amroune et al., 2017). Cet état est caractérisé par la présence d'une dépression piézométrique au centre de la plaine où l'activité agricole est intense (Fig.1). Cet aquifère est caractérisé par une transmissivité qui varie entre 8.10^{-5} et 2.10^{-2} m²/s et un coefficient d'emmagasinement qui varie entre 10^{-5} à 10^{-4} , caractérise cette nappe captive (Amroune, 2008).

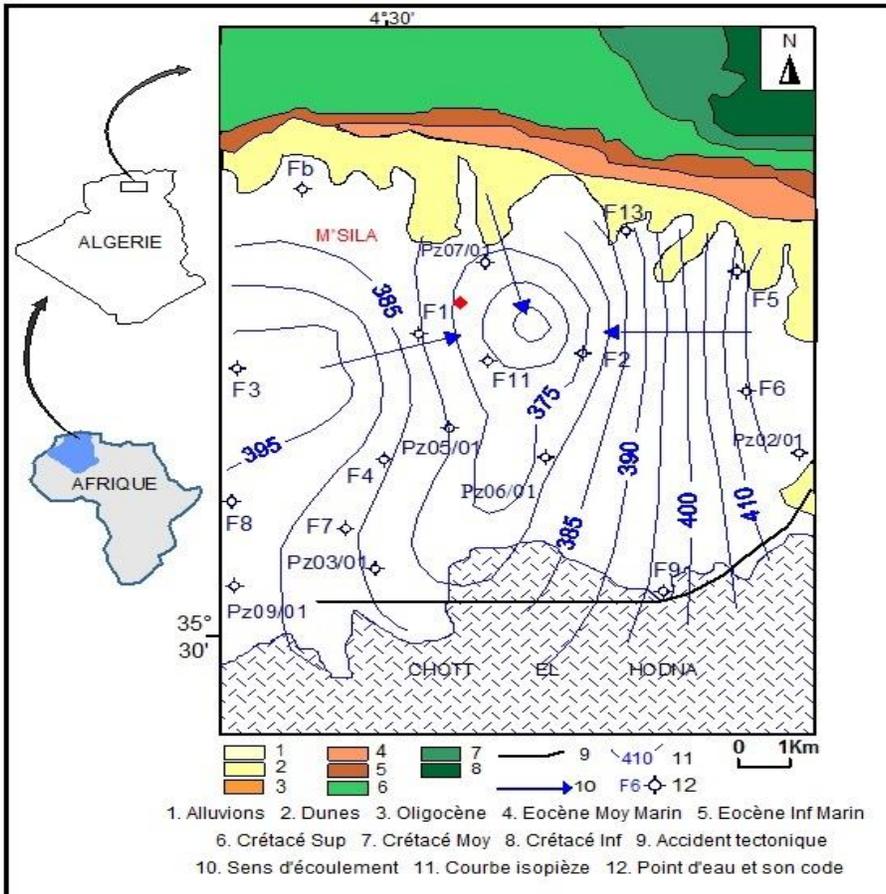


Figure 1 : Carte piézométrique sur la plaine alluviale de la région nord du bassin du Hodna, M'Sila.

MATERIEL ET METHODES

Pour examiner l'évolution des paramètres physico-chimiques, il a été procédé au prélèvement de 18 échantillons qui ont donné lieu à 54 analyses en parallèle avec les campagnes piézométriques de l'année 2006. Les paramètres physico-chimiques mesurés sont : le pH, la température de l'eau ($T^{\circ}\text{C}$) et la conductivité électrique ($\text{CE } \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), mesures effectuées in situ, calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^{+}), potassium (K^{+}), les sulfates (SO_4^{2-}), les chlorures (Cl^{-}), les bicarbonates (HCO_3^{-}) et les nitrates (NO_3^{-}) déterminés au laboratoire. Deux

flacons d'eau par échantillon sont pris pour chaque point d'eau. Le premier flacon est acidifié à un $\text{pH} < 2$ à l'aide de l'acide nitrique pur, est destiné à l'analyse des cations. Le deuxième flacon n'a subi aucun traitement, destiné à l'analyse des anions. On note que toutes les eaux ont été filtrées à $45 \mu\text{m}$ à l'aide des filtres seringues stériles (SFCA). Le pH, a été mesuré in situ à l'aide d'un appareil portatif type Multiline P4 de la marque WTW. La précision de ce paramètre est $\pm 1\%$. Les analyses chimiques ont été effectuées au laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) de Constantine. Trois méthodes d'analyses sont utilisées pour déterminer les concentrations des différents éléments chimiques. Le dosage des bicarbonates a été fait par titrimétrie, le reste des anions par spectrophotomètre (Photolab Spectral de marque WTW). Les cations ont été déterminés soit par l'absorption atomique à flamme (Perkin Elmer, 1100B) soit par titrage potentiométrique (Rodier, 2009).

Deux techniques statistiques multivariées ont été appliquées au traitement de ces données chimiques des eaux souterraines de la plaine de M'Sila, la classification ascendante hiérarchique (CAH) et l'analyse en composantes principales (ACP). Le but de ces traitements est de déterminer les principaux facteurs qui contrôlent le chimisme de ces eaux souterraines. Ces méthodes statistiques multivariées ont été largement appliquées pour enquêter sur des phénomènes de l'environnement à travers le monde (Anazawa et Ohmori, 2005 ; Güler et Thyne, 2004 ; Güler et al., 2002 ; Laaksoharju et al., 1999) et en Algérie (Belkhiri et al., 2010 a et b ; Belkhiri et al., 2011 a et b ; Boudoukha et Bouguerne, 2010 ; Brinis et al., 2009 ; Brinis, 2011 ; Bouguerne et al., 2017 ; Gaagai et al. 2017 ; Godbane et al., 2016 ; Bencer et al., 2016 ; Ziani et al., 2016). L'utilisation combinée de l'analyse de l'ACP et la CAH, a permis la classification des échantillons d'eau dans des groupes distincts sur la base de leurs caractéristiques hydrochimiques. Ces outils statistiques multivariées ont été utilisées avec succès pour étudier et classer différents types de sédiments (Huisman et Kiden, 1998 ; Tebens et al, 2001), et les processus hydrogéochimiques (Cameron, 1996 ; Duffy et Brandes, 2001 ; Gupta et Subramanian, 1998 ; Momen et al., 1996). La CAH et l'ACP ont également été utilisés pour identifier les variations temporelles et spatiales de la chimie de l'eau dans le lac de George à New York. De même Tariq *et al.*, (2005) ont utilisé ces techniques multivariées pour étudier les éléments traces au niveau des effluents de tannerie en Peshawar au Pakistan. Leur étude a porté sur des échantillons des effluents de tannerie, les eaux souterraines et des sols à l'aide d'outils multivariées qui ont pu mettre en relation des espèces chimiques importantes de trois milieux (eaux souterraines, de surface et tannerie). Ce travail porte sur la force de techniques multivariées pour caractériser les

variations hydrochimiques dans la plaine de M'Sila. Ces analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel STATISTICA ® (1998) version free.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Caractéristiques hydrochimiques

Les caractéristiques statistiques des analyses chimiques des échantillons d'eau souterraine ont été présentées dans le tableau 1. Les échantillons d'eau souterraine de la zone d'étude ont des valeurs de pH allant de 7.1 à 8.2, ce qui indique que l'eau souterraine de la région est légèrement alcaline. La conductivité électrique (CE) varie entre 1016 et 3600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La dureté est également très forte ($> 54^\circ\text{F}$), ceci est dû à la forte concentration du calcium et du magnésium où 33 à 44% des points d'eaux ont des teneurs supérieures aux normes de potabilité de l'OMS (WHO, 2006). Le faciès chimique dominant est le chloruré, sulfaté calcique et magnésien avec 77% des échantillons. L'eau issue des zones d'infiltration a un faciès carbonaté. Puis le long de l'écoulement vers le Sud, elle passe progressivement à une eau chloruré, sulfaté calcique et magnésien en relation avec la dissolution des formations salées des terrains et du lac salé. La présence de nitrates est liée à l'activité agricole. Ceci est à mettre en liaison avec les formations carbonatées et les formations salifères du Chott El Hodna (Fig. 2).

Tableau 1 : Paramètres statistiques des éléments physico-chimiques des eaux souterraines. Tous les paramètres sont exprimés en mg/l excepté T °C, CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ et pH sans unité.

	Maximum			Minimum			Moyenne			Ecart type		
	Jui	Sep	Déc	Juin	Sep	Déc	Jui	Sept	Déc	Jui	Sep	Déc
T	22	22	22	21.5	21.7	21.5	21.8	21.9	21.8	1.2	1.3	1.2
pH	8.2	8.1	8.1	7.1	7.2	7.1	7.63	7.7	7.65	0.41	0.45	0.48
CE	3600	3586	3544	1016	1082	1055	2347	2421	2367	727	772	741
Ca²⁺	436	452	432	88	99	88	191	193.3	202.3	107	100.4	97.1
Mg²⁺	222	228	221	72	81	75	125	126	124	42.2	42.1	42.9
Na⁺	550	554	555	45	77	51	256	254	257.7	160	154.1	158.1
K⁺	9	8	9	0	0	0	2.6	2.6	3.1	2.4	2.1	2.5
Cl⁻	840	845	836	70	75	74	402	377.8	375	260	233.7	234.1
SO₄²⁻	1394	1388	1388	272	277	275	821	816	819	320	320	317
HCO₃⁻	353	350	353	204	210	210	283	285.2	286.1	47.8	46.9	47
NO₃⁻	89	101	100	0	1	0	19.2	20.8	21	27.4	30	29.7

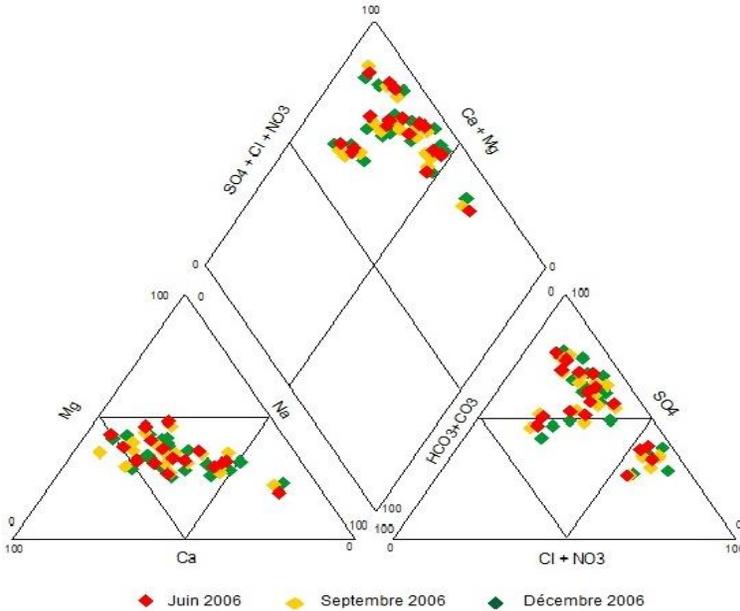


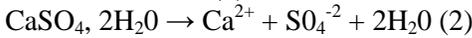
Figure 2 : Diagramme de PIPER appliqué aux eaux souterraines de la région de M'Sila.

Analyses en composantes principales (ACP)

L'analyse effectuée est une ACP centrée réduite qui a été réalisée sur un tableau de 9 variables (CE , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- et NO_3^-) et de 54 individus, échantillons prélevés lors des trois campagnes. L'interprétation de cette ACP se fera selon l'ordre d'apparition des résultats donnés par le logiciel.

Le premier résultat de l'ACP qui apparait, est le coefficient de corrélation qui est couramment utilisé pour estimer la relation entre deux variables. C'est un outil statistique simple pour montrer le degré de liaison entre deux variables. La matrice de corrélation des neuf variables a été présentée dans le tableau 2. Les valeurs de la CE présentent une grande corrélation positive (0.522 à 0.688) avec l'ensemble des éléments excepté avec K^+ et NO_3^- . Ceci traduit la participation de ces éléments à l'acquisition de la charge saline des eaux souterraines. Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- présentent une forte corrélation positive (0.69 à 0.78), indiquant une source commune. De même que pour SO_4^{2-} et Ca^{2+} (0.56) et SO_4^{2-} et Mg^{2+} (0.67). Les fortes teneurs de Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} et SO_4^{2-} , détectés dans certains

échantillons peuvent suggérer la dissolution de sels de chlorure et de sulfates selon les formules 1 et 2.



La dissolution des minéraux sulfurés d'une manière générale comme la pyrite (Stumm, et Morgan, 1970 ; Droubi et al., 1976) aboutie à l'apparition des sulfates dans l'eau selon les processus (3) à (6).

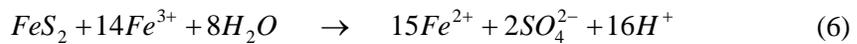
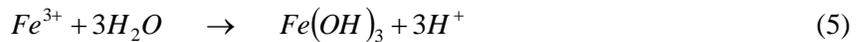
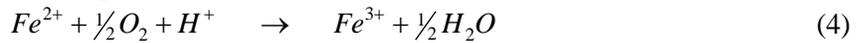
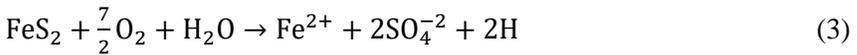


Tableau 2 : Coefficient de corrélation entre les variables

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	CE
Ca	1								
Mg	0.783	1							
Na	-0.391	-0.027	1						
K	0.452	0.495	0.011	1					
Cl	-0.084	0.245	0.723	0.512	1				
SO4	0.567	0.671	0.664	0.591	0.607	1			
HCO3	0.693	0.611	0.324	0.490	0.481	0.215	1		
NO3	0.902	0.728	-0.402	0.589	-0.104	0.602	-0.097	1	
CE	0.646	0.612	0.522	-0.328	0.564	0.638	0.688	-0.310	1

Le critère de Kaiser (Kaiser, 1960) a été appliqué afin de déterminer le nombre total de facteurs significatifs. Selon ce critère, seuls les facteurs ayant une valeur propre supérieure ou égale à 1 seront acceptés comme sources possibles de variance dans les données. Deux composantes principales (CP) ont été retenues et les résultats montrent que les deux CP représentent plus de 70.94 % de la variance totale, ce qui est assez bon et peut être utilisée pour identifier les principales variations dans l'hydrochimie. CP1 représente 55.52% de la variance et il est déterminé par Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et CE. Tableau 3. C'est le facteur de la salinité suite à une contamination par les

éléments carbonatés et les éléments évaporitiques. CP2, qui représente 15.42 % de la variance totale est déterminé négativement par K^+ , NO_3^- . Ce facteur est celui de l'action anthropique liée à l'activité agricole. La région est le siège d'une forte activité agricole où les engrais les plus couramment employés dans nos régions sont le nitrate d'ammonium, l'urée de phosphore et de potassium, les superphosphates, le chlorure de potassium et dans une moindre mesure, le sulfate d'ammonium, de sodium, le nitrate de calcium et le sulfate de potassium. Cette catégorie d'azote est la plus importante en masse et la plus difficile à évaluer. Boudoukha et al., 2012. Ces deux facteurs montrent clairement que les eaux souterraines de la région, suivent deux processus différents dans la dissolution des minéraux. Celui des évaporites et celui des carbonates. Le processus se termine par une pollution anthropique liée à l'activité agricole. CP1 et CP2 sont supposées donc être représentatifs du processus d'acquisition du chimisme de l'eau suite à l'interaction eau-roche et à pollution agricole.

Tableau 3 : Liaison variables-facteurs.

	F1	F2
Ca²⁺	0.58	0.49
Mg²⁺	0.73	-0.54
Na⁺	0.96	0.00
K⁺	0.04	-0.79
HCO3	0.60	-0.17
Cl	0.93	0.12
SO4	0.73	-0.30
NO3	0.03	-0.78
CE	0.64	0.54
Eigen value	3.90	1.19
Variability (%)	55.52	15.42
Cumulated %	55.52	70.94

Des analyses de groupement

Une analyse de groupement a été effectuée pour déterminer si les échantillons peuvent être regroupés en familles hydrochimiques statistiquement distincts qui peuvent être importantes dans le contexte géologique et environnemental. Un certain nombre d'études ont utilisé cette technique pour réussir à classer les échantillons d'eau (Alther, 1979 ; Williams, 1982 ; Farnham et al., 2000 ; Alberto et al., 2001 ; Meng et Maynard, 2001 ; Brinis, 2011 ; Belkhiri et al., 2010 a et b ; Bouguerne et al., 2017 ; Gaagai et al., 2017). Les comparaisons fondées sur des paramètres multiples à partir d'échantillons différents ont été

faites et des échantillons ont été regroupés en fonction de leurs paramètres. Cette technique est connue sous le nom de classification en Q-mode. Dans la présente étude, Q-mode a été utilisé pour classer les échantillons en groupes hydrochimiques distincts. La méthode de Ward (Ward, 1963) a été utilisée dans cette analyse. Un schéma de classification (CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^-) ont été utilisés dans cette analyse. Pour l'analyse statistique, toutes les variables ont été transformées en logarithme puis normalisées par la suite selon la méthode décrite par (Güler et al., 2002). Cette analyse de groupement montre trois groupes d'eau souterraine comme le montre le dendrogramme. Fig. 3. Le groupe 1 formé par la CE liée à Na^+ , Cl^- et HCO_3^- semble être un facteur majeur de distinction entre les groupes. Fig. 3A. Ce paramètre augmente du Nord vers le Sud selon le sens d'écoulement des eaux souterraines. Le groupe 2 est formé par le reste des éléments qui caractérisent la contamination naturelle et l'action anthropique (Fig. 3B et Fig. 4). Le zonage de ces groupes se superpose à celui de la carte piézométrique et de la carte de conductivité électrique de l'eau. Le groupe 1 est composé de 4 forages (Fb et Pz 07/01, F5 et F13), il est caractérisé par une eau faiblement salée ($\text{CE} < 1860 \mu\text{S}/\text{cm}$). Ce groupe est essentiellement dominé par les bicarbonates et le calcium. Les sulfates sont parfois présents. Ce groupe occupe la partie Nord de la plaine. Le groupe 2 est représenté par 4 forages (F1, F3, F6 et Pz 02/01). La conductivité électrique moyenne de ce groupe est de $2200 \mu\text{S}/\text{cm}$, avec une dominance du calcium, du magnésium et des sulfates. Ce type d'eau peut être interprété comme la première étape des interactions eau-roche qui se produisent dans les solutions diluées, qui s'explique par l'abondance des formations carbonatées de l'aquifère et les formations salées du Chott El Hodna. Ce groupe peut être considéré comme un terme de passage entre le groupe 1 se trouvant en amont et le groupe 3 en aval. Le groupe 3 comporte le reste des échantillons (plus de 55 %) caractérisé par une $\text{CE} > 2250 \mu\text{S}/\text{cm}$. Ce groupe est caractérisé par de fortes teneurs en Na^+ et Cl^- . La dissolution du gypse, et du sel de l'argile et celui de la marne gypseuses se provenant au niveau du Chott, pourrait être responsable de cette élévation.

Mécanisme de la salinité

Cette étude a montré que l'analyse quantitative des données hydrochimiques en utilisant des techniques statistiques multivariées classiques peut aider à élucider les facteurs hydrodynamiques et géologiques qui contrôlent la chimie de l'eau. Le système intégré de l'analyse statistique a montré que tous les points d'eau ont un faciès chimique local dû aux interactions eau-roche. La CE des eaux

souterraines du groupe 1 est généralement inférieur à 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces eaux proviennent de l'infiltration des eaux de précipitations faiblement minéralisées.

Ces eaux se chargent en bicarbonates et en carbonates suite à la dissolution surtout des calcaires et forment alors le groupe 1. Le fort gradient hydraulique permet le transit rapide de ces eaux vers la plaine où la pente est beaucoup plus faible et l'écoulement devient très lent. Ceci permet alors à l'eau d'acquérir une minéralisation plus importante en contact avec les formations évaporitiques pour former le groupe 3 caractérisé par une $\text{CE} > 2250 \mu\text{S}/\text{cm}$. L'activité agricole dans la zone du groupe 3 permet d'expliquer l'apport en azote. Sur cette base, et au regard de l'analyse multivariée, la zone étudiée peut être divisée en trois zones de composition chimique de plus en plus importante dans le sens de l'écoulement. Ce modèle chimique de la plaine de M'sila est caractérisé au Nord par la présence du groupe 1 où domine le faciès bicarbonaté, au Sud par la présence du groupe 3 à forte salinité. Le groupe 2 étant intermédiaire avec des caractéristiques carbonatées et évaporitiques. On peut considérer les groupes 1 et 2 constituent les eaux de recharge, alors que celles du groupe 3 peuvent être rattachées à la zone de décharge (Fig. 5°).

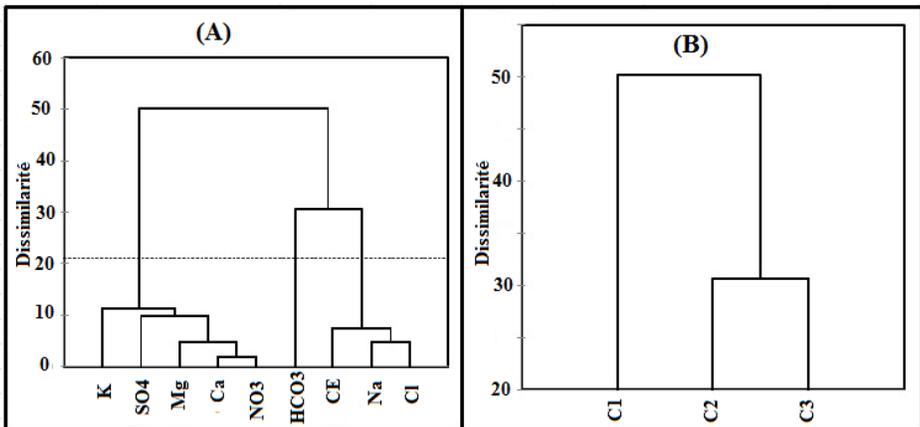


Figure 3 : Classification ascendante hiérarchique des variables et des observations.

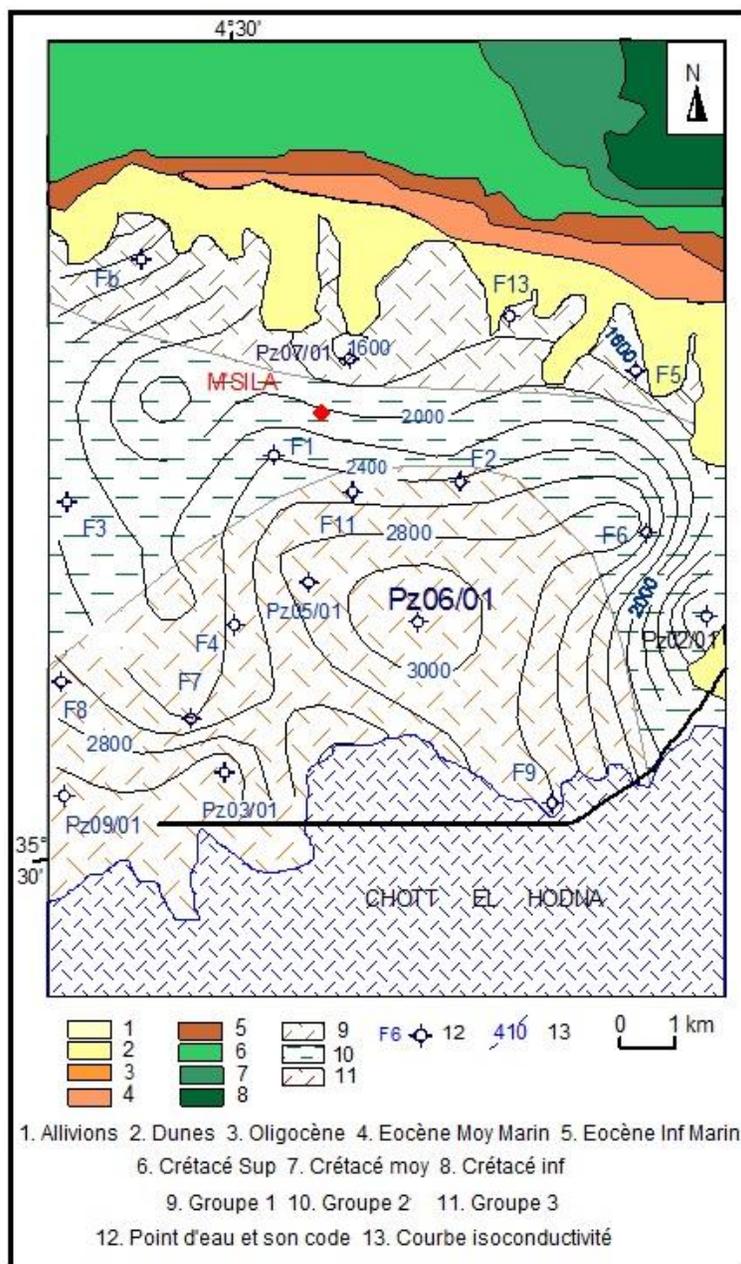


Figure 4 : Carte de variations de la conductivité électrique et de zonage.

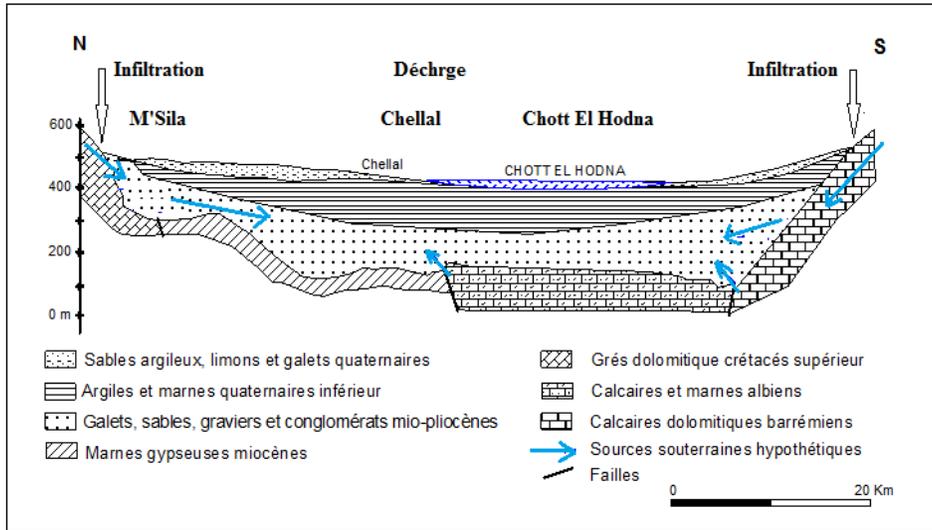


Figure 5 : Modèle de fonctionnement du système aquifère de M'Sila à Hodna.

CONCLUSION

L'analyse des données hydrogéochimiques à l'aide des techniques statistiques comme l'analyse en composantes principales et l'analyse de groupement peuvent aider à montrer l'impact du facteur géologique et anthropique dans le contrôle de la chimie de l'eau souterraine. L'ACP explique 70.94 % de la variance totale avec le facteur 1 celui de la minéralisation et le facteur 2 celui de l'action anthropique. L'CAH a montré que les eaux peuvent être regroupés en 2 familles de salinité de plus en plus grande du Nord vers le Sud. Ces eaux passent d'une eau Ca-Mg-HCO₃ moins salée, à une eau Ca-Mg-SO₄ plus ou moins salée qui correspond à un terme de passage entre les eaux d'infiltration au Nord et ceux du Sud plus salées le long de l'écoulement souterrain. La partie avale contient les eaux du groupe 3 plus salées que les précédentes et sont fortement marquées par la présence Cl et Na. Dans l'ensemble, on peut considérer que les groupes 1 et 2 constituent les eaux de recharge, alors que celles du groupe 3 peuvent être rattachées à la zone de décharge.

RÉFÉRENCES

- ALBERTO WD, DEL PILAR DM, VALERIA AM, FABIANA PS, CECILIA HA, DE LOS ANGELES BM. 2001. Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study: Suquia River Basin (Cordoba-Argentina). *Water Research*. 35 : 2881-2894.
- ALTHER G, 1979. A simplified statistical sequence applied to routine water quality analysis: a case history. *Ground Water*. 17 : 556-561.
- AMROUNE A, 2008. Hydrogéologie et qualité des eaux souterraines de la plaine de M'sila-Zone nord occidentale du bassin du Hodna-Algérie. Mémoire de magistère en hydraulique, Université de Batna. Algérie.
- AMROUNE A., BOUDOUKHA A., BOUMAZBEUR A, BENAABIDATE L., GUASTALD E. 2017. Groundwater geochemistry and environmental isotopes of the Hodna area, Southeastern Algeria. *Desalination and Water Treatment*. 73 (2017) 225–236.
- ANAZAWA K, OHMORI H, 2005. The hydrochemistry of surface waters in Andesitic Volcanic area, Norikura volcano, central Japan. *Chemosphere*. 59: 605-615.
- BELKHIRI L, BOUDOUKHA A, MOUNI L, 2010a. Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Ain Azel plain, Algeria, *Journal of Geography and Regional Planning*. 3(6) : 151-157.
- BELKHIRI L, BOUDOUKHA A, MOUNI L, BAOUZ L, 2010b. Multivariate statistical characterization of groundwater quality in Ain Azel plain, Algeria. *African Journal of Environmental Science and Technology*. 4(8) : 526-534.
- BELKHIRI L, BOUDOUKHA A, MOUNI L, BAOUZ T, 2011a. Statistical categorization geochemical modeling of groundwater in Ain Azel plain, Algeria. *Journal of African Earth Sciences*. 59 : 140–148.
- BELKHIRI L, BOUDOUKHA A. MOUNI L, 2011b. A multivariate Statistical Analysis of Groundwater Chemistry Data. *International Journal of Environment Research*. 5(2) : 537-544.
- BENCER S., BOUDOUKHA A., MOUNI L. 2016. Multivariate statistical analysis of the groundwater of Ain Djacer area (Eastern of Algeria). *Arab J Geosci*. 9:248 doi.org/10.1007/s12517-015-2277-6
- BOUDOUKHA A., BELHADJ M.Z., BENKADJA R. 2012. Impact d'une pollution anthropique et d'une contamination naturelle sur la qualité des eaux du barrage de Zit Emba. *Est algérien. La Houille Blanche*. 4:34-41.
- BOUGUERNE A., BOUDOUKHA A., BENKHALED A., MEBARKIA A. 2017. Assessment of surface water quality of Ain Zada dam (Algeria) using multivariate

- statistical techniques. *International Journal of River Basin Management*. 15(2), 133–143.
- BOUDOUKHA A, BOUGURNE A, 2010. Les métaux lourds dans les eaux de surface de Oued Bousselem ; discussion des données analytiques. *Geomaghreb*. 6 : 97-104.
- BRINIS N. BOUDOUKHA A, DJABRI L, MANIA J, 2009. La salinité des eaux souterraines de la zone Est de la plaine d’El Outaya. Région de Biskra. Algérie. *Bulletin de Service Géologique National*. 20 (1) : 49-61.
- BRINIS N, 2011. Caractérisation de la salinité d’un complexe aquifère en pays aride – Cas de l’aquifère d’El Outaya – Région Nord-Ouest de Biskra. Algérie. Thèse de doctorat en Hydraulique, Université de Biskra. Algérie.
- CAMERON E, 1996. The hydrochemistry of the Fraser River, British Columbia: seasonal variation in major and minor components. *Journal of Hydrology*. 182: 209-215.
- DROUBI A, CHEVERRY C, FRITZ B, TARDY Y. 1976. Géochimie des eaux et des sels dans les sols des polders du lac Tchad: Application d'un modèle thermodynamique de simulation de l'évaporation. *Chemical Geology*. 17 : 165-177.
- DUFFY C, BRANDES D, 2001. Dimension reduction and source identification for multispecies groundwater contamination. *Journal of Contaminant Hydrology*. 48 : 151-165.
- FARNHAM I, STETZENBACH K, SINGH A, JOHANNESSEN K, 2000. Deciphering groundwater flow systems in Oasis Valley, Nevada, Using trace element chemistry, multivariate statistics, and Geographical Information System. *Mathematic Geology*. 32 : 943-968.
- GAAGAI A., BOUDOUKHA A., BOUMEZBEUR A., BENAABIDATE L. 2017. Hydrochemical characterization of surface water in the Babar watershed (Algeria) using environmetric techniques and time series analysis. *International Journal of River Basin Management*. 15(3): 361-372.
- GHODBANE M., BOUDOUKHA A., BENAABIDATE L. 2016. Hydrochemical and statistical characterization of groundwater in the Chemora area, Northeastern Algeria. *Desalination and Water Treatment*. 57(32) 14858-14868.
- GUIRAUD R, 1973. Evolution post-triasique de l’avant pays de la chaîne alpine d’après l’étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse de doctorat, Université de Nice. France.
- GÜLER C, THYNE G, MCCRAY J, TURNER A, 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*. 10 : 455-474.

- GÜLER C, THYNE G, 2004. Hydrologic and geologic factors controlling surface and Groundwater chemistry in Indian wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. *Journal of Hydrology*. 285: 177–198.
- GUPTA L, SUBRAMANIAN V, 1998. Geochemical factors controlling the chemical nature of water and sediments in the Gomte River, India. *Environmental Geology*. 36 : 102-108.
- HUISMAN D, KIDEN P, 1998. A geochemical record of late Cenozoic sedimentation history in Southern Netherlands. *Geologie en Mijnbouw*. 76 : 277-292.
- KAISER H, 1960. The application of electronic computers to factor analysis. *Education Psychology Measurement*. 20 : 141-151.
- KIEKEN M, 1962. Notice explicative de la carte géologique au 1/50 000e, M'sila (168), Première édition. Service de la carte géologique de l'Algérie, Alger.
- KIEKEN M, 1970. Résumé des connaissances acquises au cours des vingt dernières années dans le Hodna, le Titteri et la partie occidentale des Biban. *Bulletin B.R.G.M, section IV, N°1. Département d'Alger*.
- LAAKSOHARJU M, GURBAN I, SKARMAN C, SKARMAN E, 1999. Multivariate mixing and mass balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information. *Applied Geochemistry*. 14 : 861-871.
- MENG S, MAYNARD J, 2001. Use of statistical analysis to formulate conceptual models of geochemical behavior: water chemical data from Butucatu aquifer in Sao Paulo State, Brazil. *Journal of Hydrology*. 250 : 78-97.
- MOMEN B, EICHLER L, BOYLEN C, ZEHR J, 1996. Application of multivariate statistics in detecting temporal and spatial patterns of water chemistry in Lake George, New York. *Ecology Modelling*. 91 : 183-192.
- RODIER J, 2009. *L'analyse de l'eau*. Edition Dunod. Paris.
- STATISTICA® 6.0 for Windows, 1998. Statistic Soft, Inc, Tulsa OK. USDA.
- STUMM W, MORGAN J, 1970. *Aquatic chemistry*. Wiley-Interscience, New York.
- Tariq R et al, 2005. Multivariate analysis of trace metal levels in tannery effluents in relation to soil and water: a case study from Peshawar, Pakistan. *Journal of Environment Management*. 79 : 20-29.
- TEBENS L, VELDKAMP A, KROONENBERG S, 2001. The impact of climate change on the bulk and clay geochemistry of fluvial residual channel infillings: the Late Weichselian and Early Holocene River Meuse sediments (The Netherlands). *Journal of Quaternary Science*. 13 : 345-356.
- WARD J, 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *American Journal of Statistic Association*. 69 : 236–244.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO), 2006. World Health Organization, Guidelines for drinking water quality, vol.1, Recommendations, Geneva.

WILLIAMS R, 1982. Statistical identification of hydraulic connections between the surface of a mountain and internal mineralized sources. *Groundwater*. 20 : 466-478.

ZIANI D., BOUDOUKHA A., BOUMAZBEUR A., BENAABIDATE L., FEHDI C. 2016. Investigation of groundwater hydrochemical characteristics using the multivariate statistical analysis in Ain Djacer area, Eastern Algeria. *Desalination and Water Treatment*. 57 (2016) 26993–27002