

Caractérisation de la minéralisation des eaux de la nappe des grès du Trias (Sud-Est Tunisien) par les méthodes géochimiques et statistiques

Characterization of the mineralization of the Triassic water table (South-East Tunisia) by geochemical and statistical methods

HAMZAOUI AZAZA F^a*, BOUHLILA R^b & GUEDDARI M^a

Abstract : This study consists in the identification of the factors which influence the water quality parameters in the Triassic aquifer, located in the South–East of Tunisia.

Major elements concentrations as well as temperature, pH and salinity were monitored in 2005 from 14 wells capturing the Triassic aquifer. Exploratory analyses of experimental data have been carried out by statistical analysis (Principal Component Analysis, PCA and Hierarchical Cluster Analysis, HCA) and geographic information system (GIS) in an attempt to discriminate the sources of the variation of water quality variations.

The distribution of the salinity shows the same regional zonation as that one observed for chloride, sodium, sulfate, magnesium and calcium. Spatial distribution of salinity indicates that wells situated in the upstream zones are characterized by the lowest dissolved salts concentrations. This fact can be explained by the significant rain infiltration along the rivers.

Water chemistry is mainly dominated by the dissolution/precipitation of minerals (calcite, dolomite, anhydrite, gypsum and halite). Results obtained from PCA indicate that variables responsible for water quality composition are mainly related to soluble salts variables (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} and K^+). The results of the HCA showed three groups of water types. Samples from group 1 are mostly located in preferential recharge areas. Samples that belong to the other two groups characterize waters from the aquifer system under rather confined conditions.

Keywords : S.E. Tunisia, Trias water table, geochemics, mineralization, saturation, statistical analysis

Résumé : Cette étude consiste à identifier les facteurs influençant la qualité des eaux de la nappe des grès du Trias, située au Sud-Est Tunisien.

Les principaux éléments majeurs ainsi que la température, le pH et la salinité ont été suivis durant les saisons hivernale et estivale de l'année 2005 dans 14 forages répartis dans la zone d'étude.

Les résultats des analyses chimiques ont été traités par des méthodes hydrochimiques et statistiques (analyse en composantes principales, ACP et analyse de classification hiérarchique, ACH). Un système d'information géographique (SIG) a été établi dans le but d'étudier la variation spatio-temporelle de la salinité.

La distribution spatiale de la salinité montre la même allure évolutive que celle observée pour le chlorure, le sodium, les sulfates, le magnésium et le calcium. Il en ressort que les forages situés dans la partie amont de la nappe sont caractérisés par les plus faibles teneurs en sels dissous. Ceci s'expliquerait par l'importance de l'alimentation superficielle.

La minéralisation des eaux est principalement régie par les phénomènes de dissolution et de précipitation des minéraux (calcite, dolomite, anhydrite, gypse et halite). Les résultats obtenus par l'ACP indiquent que les variables qui contrôlent la salinisation des eaux sont le Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} et K^+ . Les résultats de l'ACH ont montré l'existence de trois groupes d'eau. Les échantillons du groupe 1 sont situés dans les zones de recharge préférentielle. Les échantillons qui appartiennent aux deux autres groupes sont situés dans la partie confinée de la nappe.

Mots clés : S.E.Tunisie, Nappe des grès du Trias, géochimie, minéralisation, échange cationique, indice de saturation, analyses statistiques

^aUnité de recherche de Géochimie et de Géologie de l'Environnement, Faculté des Sciences de Tunis (FST).

^bLaboratoire de Modélisation en Hydraulique et Environnement, Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis (ENIT)

* Auteur de correspondance : Fadoua Hamzaoui-Azaza

E-mail: fadoua_fst@yahoo.fr.

Tel.: 0021622528181.

INTRODUCTION

Depuis l'Antiquité, l'eau a toujours été considérée comme une source renouvelable et inépuisable. De nos jours, plusieurs pays sont touchés par l'épuisement de leurs ressources en eau, du fait des conditions climatiques et de l'accroissement de la demande (BLINDA & THIVET, 2009), résultat inéluctable de la croissance démographique et du développement socio-économique. La Tunisie, située entre la Méditerranée et le Sahara, est influencée par deux climats bien distincts, l'un méditerranéen au nord et l'autre saharien au sud, qui sont à l'origine d'une importante variation spatio-temporelle des ressources en eau. En effet, les précipitations moyennes annuelles varient de 100 mm à l'extrême sud à plus de 1500 mm à l'extrême nord du pays (JEDOUI, 2000). Ce gradient pluviométrique fait de la Tunisie un pays à ressources en eau renouvelables relativement rares.

Le sud tunisien forme une vaste zone de reliefs très variés, marqué par une aridité constante où dominant les processus climatiques sahariens caractérisés par une forte sécheresse (ROMANGEY & GUILLAUME, 2004). La zone est caractérisée par un déficit hydrique important et passe, depuis des années, par des épisodes de sécheresse caractérisés par des pluies faibles qui ont des conséquences dévastatrices sur les processus de développement socio-économique dans ces régions. Face à cette situation, l'exploitation des nappes profondes, qui contiennent des réserves considérables, demeure indispensable pour répondre à des besoins d'ordre industriels, agricoles, touristiques et domestiques continuellement croissants (MAMOU & KASSAH, 2002). La nappe des grès du Trias, située dans le Sud-Est tunisien et faisant partie du système aquifère multicouches de la Jeffara, est très sollicitée pour satisfaire les besoins croissants en eau dans la région de Médenine. En effet, depuis 1994, l'exploitation de cette nappe ne cesse d'augmenter. Cette augmentation résulte du renforcement du pompage sur les forages exploités par la Société nationale de distribution des eaux (DGRE, 2005) : en 2005 l'exploitation globale a atteint 155 l/s alors que les ressources mobilisables sont estimées à 150 l/s (YAHYAOU, 2007).

La surexploitation de cette nappe, au cours des dernières décennies, a posé divers problèmes d'ordres quantitatif et qualitatif (YAHYAOU, 2007), ce qui pourrait rendre les réserves progressivement (dans les années à venir) inexploitable. Il est évident que la gestion efficace et durable des ressources en eau implique une excellente connaissance de leur disponibilité, de leur qualité et de leur variabilité dans le temps et dans l'espace. C'est dans ce contexte que s'insère cette étude qui a pour objectif de préciser les caractéristiques hydrochimiques des eaux de la nappe des grès du Trias et d'étudier l'évolution spatio-temporelle de la minéralisation de ses eaux via des méthodes géochimiques et statistiques; ceci afin d'assurer une gestion rationnelle de ces ressources dans la région de Médenine.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La nappe des grès du Trias (figure 1) de Médenine-Bir Lahmar est délimitée :

- Au sud-ouest et à l'ouest par le piémont oriental de la falaise du Dahar. C'est une limite naturelle correspondant aussi à une limite d'affleurement du Trias gréseux.
- Au nord-ouest par la fermeture périclinale du dôme de la Jeffara qui correspond au promontoire permien de Tebaga de Médenine.
- Au nord-est par les affleurements du Jurassique supérieur et du Crétacé.

Le climat de la région est de type méditerranéen et caractérisé par deux saisons contrastées : l'une sèche et chaude et l'autre plutôt humide. La moyenne annuelle des précipitations est de 144 mm, l'évapotranspiration moyenne est d'environ 1210 mm/an, nettement supérieure à la pluviosité. On observe donc un déficit hydrique théoriquement quasi permanent (JEDOUI, 2000).

La zone d'étude est découpée par un réseau d'oueds qui se rejoignent progressivement pour constituer quatre grandes voies d'eau, d'est en ouest, s'appelant oued Smar, oued Morra, oued Om Zessar et oued Zeuss qui rejoignent soit la mer de Bougrara pour les deux premiers soit le golfe de Gabès pour les deux autres.

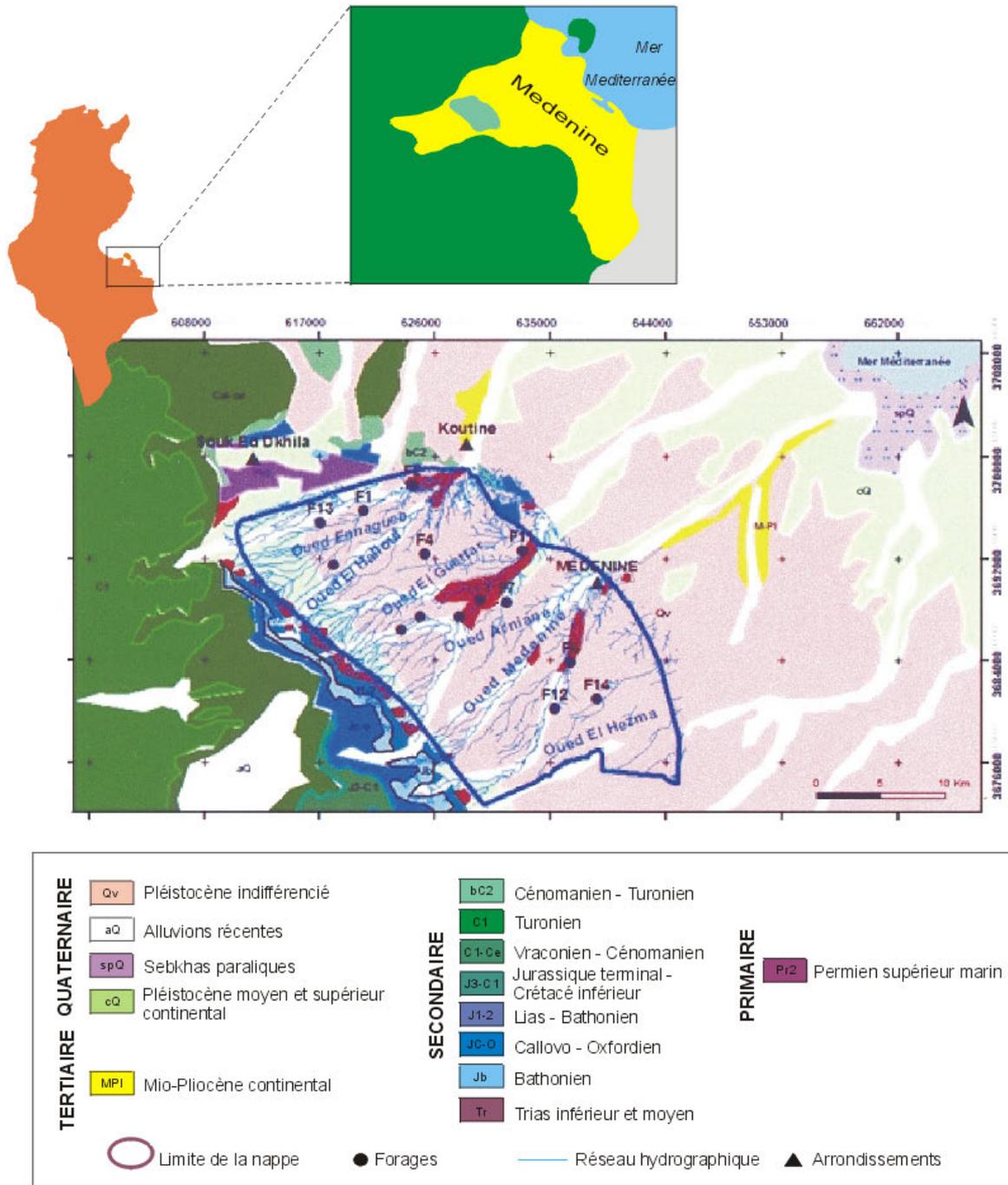


Figure 1: Localisation et géologie de la région d'étude

La géologie de la région est caractérisée par la présence d'alternances de formations d'origine continentale et d'autres d'origine marine (BOUAZIZ, 1986) et la série stratigraphique qui affleure dans la zone d'étude va du Permien supérieur jusqu'au Quaternaire (BUSSON, 1967).

Le dôme triasique du Sud Tunisien se présente comme une vaste combe à la place du dôme, ou anticlinal de la Jeffara. Il est limité par la chaîne de Matmata à l'ouest et les failles d'effondrement de Médénine à l'est. Il se termine au nord par une fermeture périclinale avec le jbel de Tebaga de Médénine au nord et au nord-ouest et les formations du Jurassique et du Crétacé de Zeuss-Koutine au nord-est. Les premières centaines de mètres de ce dôme sont constituées, tant en affleurements qu'en sondages, par les formations suivantes (YAHYAOU, 2007).

- Les grès de Sidi Stout (Trias inférieur) et les grès de Kirchaou (Trias moyen);
- Le Trias supérieur argilo-carbonaté et évaporitique.

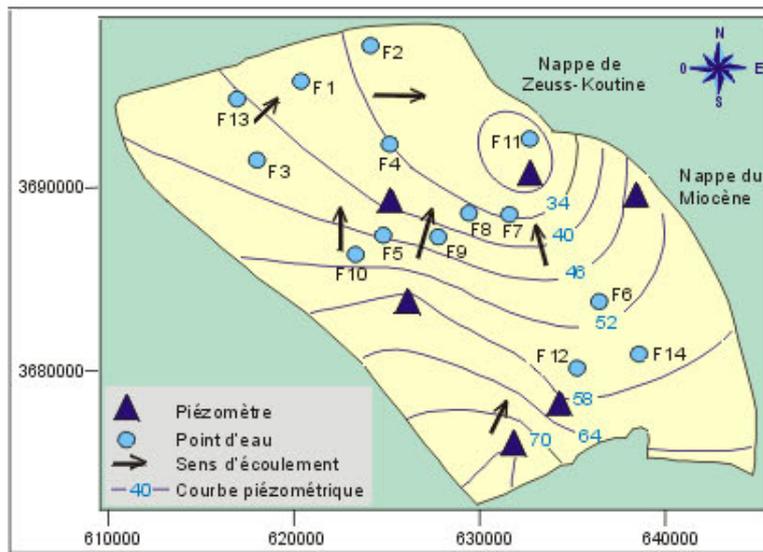


Figure 2: Carte piézométrique de la nappe des grès du Trias

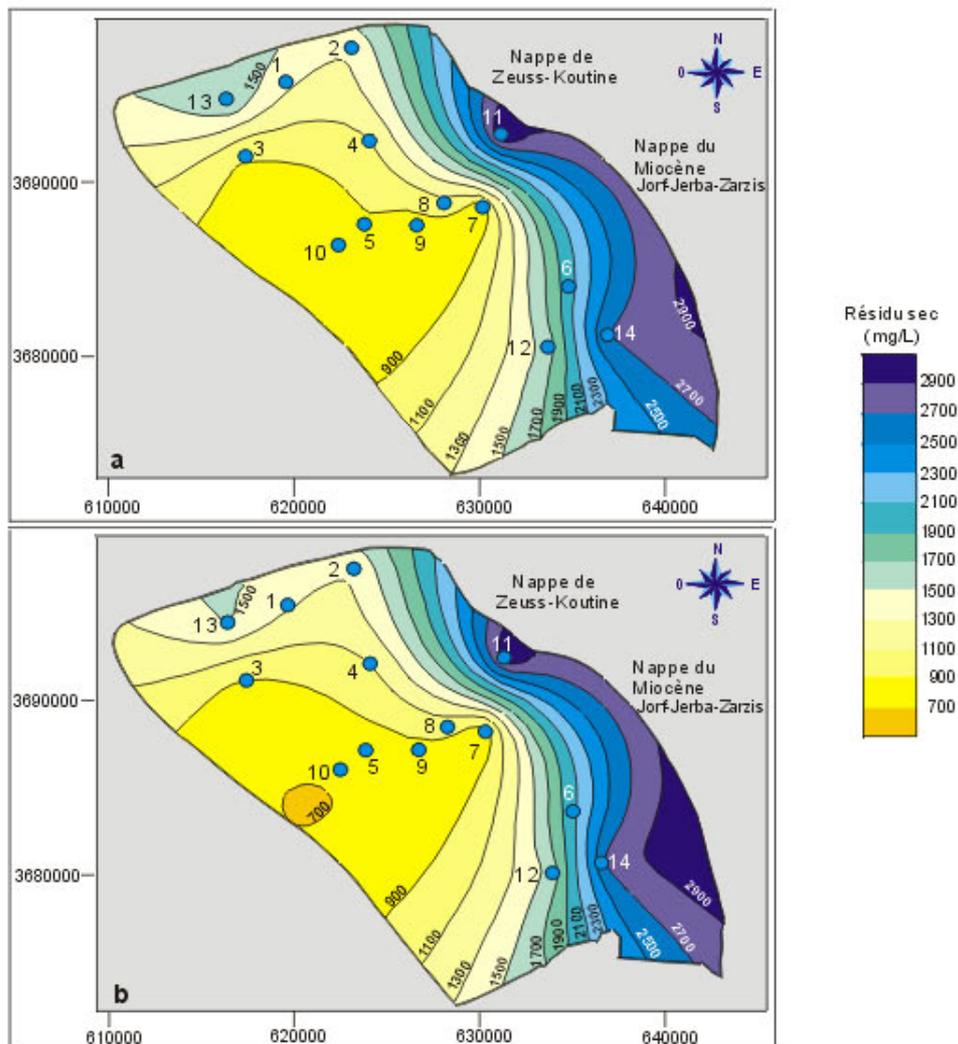


Figure 3: Répartition spatiale de la salinité (mg/L) dans la nappe des grès du Trias
 a: saison estivale 2005 - b: saison hivernale 2005

HYDROGEOLOGIE DE LA NAPPE DES GRES DU TRIAS

L'aquifère capté dans la zone d'étude est le Trias inférieur et moyen argilo-gréseux et sableux. L'examen des substrats des lits d'oueds montre les relatives bonnes à très bonnes aptitudes à l'infiltration permettant de préjuger d'une excellente alimentation de la nappe. Cette alimentation est favorisée au niveau de la bande centrale de la plaine où les grès sont affleurants (KHALLILI, 1984)]. Dans cette zone les formations aquifères sont à faible profondeur et la densité du réseau hydrographique y est forte. Les exutoires de la nappe sont situés vers le nord-est (nappe de Zeuss-Koutine) (HAMZAOUI-AZAZA *et al.*, 2011) et au nord (la mer).

Les transmissivités estimées lors des essais de pompage de ces forages, varient entre 6.10^{-5} et $5,8.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Les plus fortes perméabilités se situent au niveau de la partie centrale qui est affectée par plusieurs failles. Le coefficient d'emmagasinement est de 2,5 % (KHALLILI, 1991)].

Les données piézométriques, récoltées auprès de la Direction Générale des Ressources en Eau [DGRE, 2005], ont permis de tracer la carte piézométrique de cette nappe. On y constate un écoulement général orienté SW-NE (figure 2) avec une zone d'alimentation, ou de recharge, située entre le piedmont de la chaîne de Dahar et la faille de Médenine qui correspond à la zone d'affleurement des grès triasiques. En aval de la faille de Médenine, les grès s'enfoncent sous le Jurassique et le Crétacé et ne sont plus en continuité hydraulique latérale avec le compartiment amont. Ce sont plutôt les nappes de Koutine et du Miocène qui prennent le relais (KHALLILI, 1991 ; YAHYAOU, 2007).

MATERIELS ET METHODES

Echantillonnage et analyses au laboratoire

Un suivi saisonnier des paramètres d'évaluation de la qualité des eaux de la nappe des grès du Trias a été effectué durant la saison hivernale et la saison estivale de l'année 2005 (HAMZAOUI-AZAZA, 2011). L'échantillonnage a concerné 14 forages bien répartis sur la nappe.

Les analyses des eaux prélevées ont été effectuées dans le laboratoire de la station de traitement des eaux potables à Tunis. Ce laboratoire a été certifié par le Conseil français d'Accréditation, d'Audit et de Contrôle COFRAC à l'ISO 17025, la dernière version des normes internationales en matière de compétence des laboratoires.

Les teneurs en chlorures ont été déterminées par la méthode de titration (méthode de Mohr). Les sulfates ont été dosés par gravimétrie. L'alcalinité a été déterminée par la méthode potentiométrique

Le sodium et le potassium ont été analysés à l'aide d'un photomètre d'émission en flamme. Les balances ioniques calculées sont généralement inférieures à 5 %.

Traitement hydrochimique des données

Mise en évidence des échanges de base

L'utilisation de l'indice d'échange de base (i.e.b.) permet de mettre en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain. Par définition, l'i.e.b est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau. Il est obtenu par la relation suivante (DIB, 2010 ; SCHOLLER, 1956):

$$\text{i.e.b.} = [\text{rCl} - \text{r}(\text{Na} + \text{K})] / \text{rCl}$$

- Si l'i.e.b. est négatif alors les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'eau sont échangés contre les ions K^+ et Na^+ des formations encaissantes.
- Si l'i.e.b. est positif alors les ions Na^+ et K^+ de l'eau sont remplacés par les ions Mg^{2+} et Ca^{2+} des formations encaissantes.
- Si l'i.e.b. = 0 alors il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et celle du terrain encaissant.

Mise en évidence de la minéralisation

La dissolution d'un minéral dans l'eau peut être décrite par un état d'équilibre : quand l'eau est en contact avec un minéral, la concentration de la solution augmente pour atteindre un maximum pour des conditions physico-chimiques données. On dit alors que la solution est saturée en ce minéral. L'état de saturation est exprimé par l'indice de saturation (CIDU et *al.*, 2009):

$$I_s = \log (K) - \log (PI)$$

Avec K la constante d'équilibre et PI le produit ionique.

Trois cas sont possibles :

$I_s < 0$ signifie une sous-saturation d'une solution par rapport à un minéral;

$I_s = 0$ indique un état de saturation;

$I_s > 0$ démontre une sursaturation.

Dans notre étude, les indices de saturation par rapport aux minéraux (halite, gypse, anhydrite, calcite, dolomite et aragonite) et les équilibres chimiques ont été calculés à l'aide du programme PhreeqC (PARKHURST et *al.*, 1999).

Etude statistique

Pour toute étude géochimique, l'étude séparée de chacune des variables est une phase importante lors de l'analyse du comportement chimique, mais elle est souvent insuffisante. Il faut donc analyser les données en tenant compte de leur caractère multidimensionnel.

Pour étudier les sources de salinisation des eaux, deux méthodes statistiques ont été utilisées : l'analyse en composantes principales (ACP) et l'analyse de classification hiérarchique (ACH).

L'analyse en composantes principales

L'ACP est une méthode descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique le maximum d'informations contenues dans une base de données. Cette base est constituée, en lignes par des «individus» (forages, sources) sur lesquels sont mesurées des «variables quantitatives» (les éléments majeurs et les éléments traces) disposées en colonnes. Elle permet de réduire le nombre de variables afin de projeter le nuage de points dans un sous-espace bidimensionnel engendré par des couples d'axes factoriels ou facteurs (CLOUTIER et *al.*, 2008 ; YIDANA et *al.*, 2008).

L'analyse de classification hiérarchique.

Cette méthode consiste à définir un critère d'agrégation des classes qui peut être défini par la mesure du degré de ressemblance ou de dissemblance qui existerait entre les échantillons (TEMPL et *al.*, 2008). Il existe plusieurs mesures pour évaluer la distance ou le degré de ressemblance entre les échantillons. La distance euclidienne demeure la mesure de similarité la plus utilisée. Les partitions sont représentées par un arbre de classification ou un «dendrogramme». Le nombre de classes obtenues dépend du niveau de la coupure de l'arbre choisi «phenon line». Les critères d'agrégation sont utilisés pour la détermination des classes et reviennent à rassembler les échantillons suivant plusieurs méthodes. En comparant les solutions trouvées par les différentes méthodes, la méthode de Ward semble avoir donné les résultats les plus pertinents (CLOUTIER et *al.*, 2008).

Standardisation des données.

La standardisation des données permet de mettre, dans une même hiérarchie, des variables internes mesurées avec des échelles non comparables en attribuant à chaque variable un poids équivalent (EL YAOUTI et *al.*, 2009). La valeur standardisée de la variable est notée Z_{ij} (DE ANDRADE et *al.*, 2008 ; ROYA et *al.*, 2008), X_{ij} désigne la valeur réelle de la variable, X_m représente la valeur moyenne de la variable:

$$Z_{ij} = (X_{ij} - X_m) / S_i$$

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats de l'analyse chimique des eaux des forages montrent généralement une stabilité de leurs propriétés physico-chimiques durant les deux saisons de l'année 2005 (tableau 1).

Les eaux de la nappe de grès du Trias ont une minéralisation relativement faible, comparée à celle des eaux des autres nappes avoisinantes (la nappe du Miocène et la nappe de Zeuss-Koutine présentant des teneurs moyennes en résidus secs de l'ordre de 6500 mg/l et 3500 mg/l (DGRE, 2005) respectivement). En effet, durant l'année 2005, le résidu sec de la nappe des grès du Trias varie de 790 à 3055 mg/l en saison hivernale, et de 720 à 3028 mg/l en saison estivale. Les teneurs les plus fréquentes sont entre 720 et 1187 mg/l.

Les analyses chimiques montrent que la minéralisation totale des eaux augmente d'une façon logique dans le sens d'écoulement (figure 3). Les plus faibles valeurs caractérisent la zone amont de la nappe qui est captée à des profondeurs inférieures à 200 m et bénéficie d'une infiltration superficielle à travers les lits des oueds qui descendent du Dahar. En revanche, le maximum de minéralisation a été identifié au sud et à l'est de la nappe. Ceci s'expliquerait par l'enfouissement de l'aquifère, dans la zone aval, sous une épaisse série d'argile qui constitue un écran imperméable limitant l'infiltration des eaux superficielles, et donc le renouvellement des eaux (YAHYAOU, 2007).

Ainsi, nous pouvons mettre en évidence une zonalité de la minéralisation avec deux domaines distincts :

- Un domaine au nord et à l'ouest de la nappe qui correspond à la zone de recharge (représenté par les forages F1, F2, F3, F4 et F13) où la salinité des eaux est relativement faible. Ceci s'expliquerait par l'importance de l'alimentation superficielle qui se fait essentiellement le long des Oueds d'Om Tmar et de Smar qui sont amplement aménagés par des ouvrages de recharge (Seuils en gabions dans les lits des oueds, banquettes en terre dans les talwegs et les petits cours d'eau, ouvrages de dérivation et d'épandages) à partir des eaux de ruissellement (KHALLILI, 1991).

- Un domaine à l'est de la nappe (représenté par les forages F11 et F14) avec une minéralisation supérieure à 2500 mg/l. Ce domaine se distingue par une minéralisation nettement plus forte par rapport à la distribution générale de la salinité. Cette augmentation de la salinité est expliquée par l'épaississement de la couche argileuse et l'apparition de la couverture jurassique, représentée par des buttes de Tajeras ce qui réduit l'alimentation directe à travers les lits des oueds (KHALLILI, 1991).

Les diagrammes de corrélation (figure 4) montrent que les concentrations de Na^+ , de Cl^- , de Ca^{2+} , de SO_4^{2-} et de Mg^{2+} sont très bien corrélées avec la salinité, avec des coefficients de corrélations supérieurs à 0,90. Ceci indiquerait que la minéralisation des eaux de la nappe est contrôlée principalement par les teneurs de ces éléments, qui sont considérés les ions dominants.

Les teneurs de K^+ et de HCO_3^- ne sont pas corrélées avec la salinité; elles présentent des coefficients de corrélation respectivement de 0,71 et -0,21. Ceci montre que la variation de la salinité n'est pas influencée par celles des teneurs des ions bicarbonates et des ions potassium.

Les cartes de répartition spatiale des teneurs des éléments étudiés, à l'exception des bicarbonates, sont similaires pour les deux saisons. Elles montrent les mêmes tendances évolutives que celles de la salinité.

Dans les diagrammes Na^+ en fonction de Cl^- et Ca^{2+} en fonction de SO_4^{2-} (figure 5), la majorité des points analytiques est située sous la droite de dissolution de gypse; traduisant, d'une part, un déficit en calcium qui pourrait être attribué à une précipitation de calcite et/ou à un échange de base (Ca/Na) sur les minéraux argileux et d'autre part, un relatif excès de sodium.

Faciès géochimique

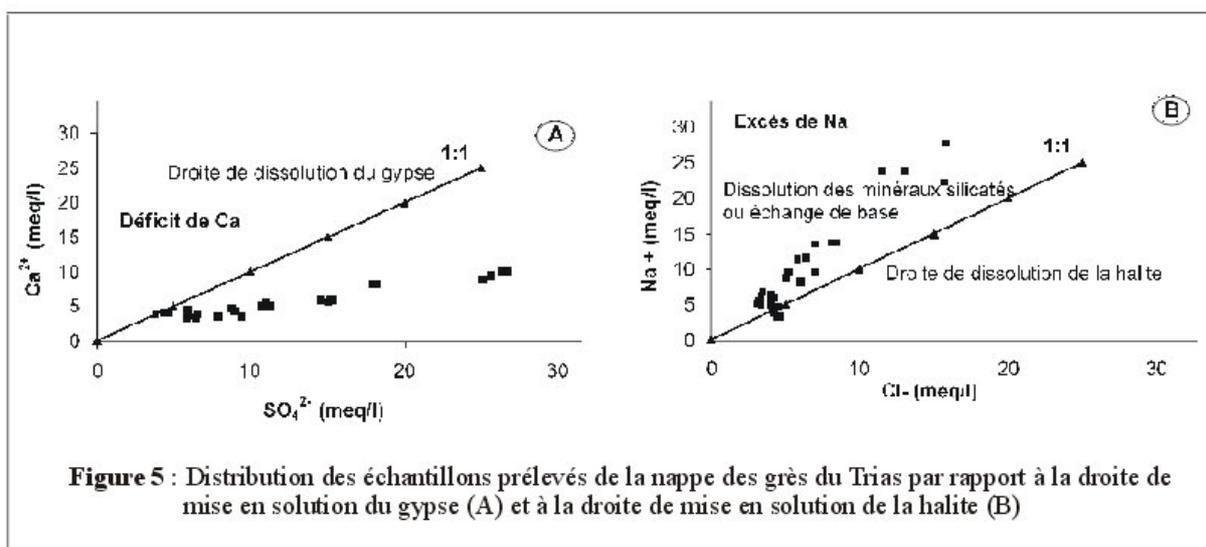
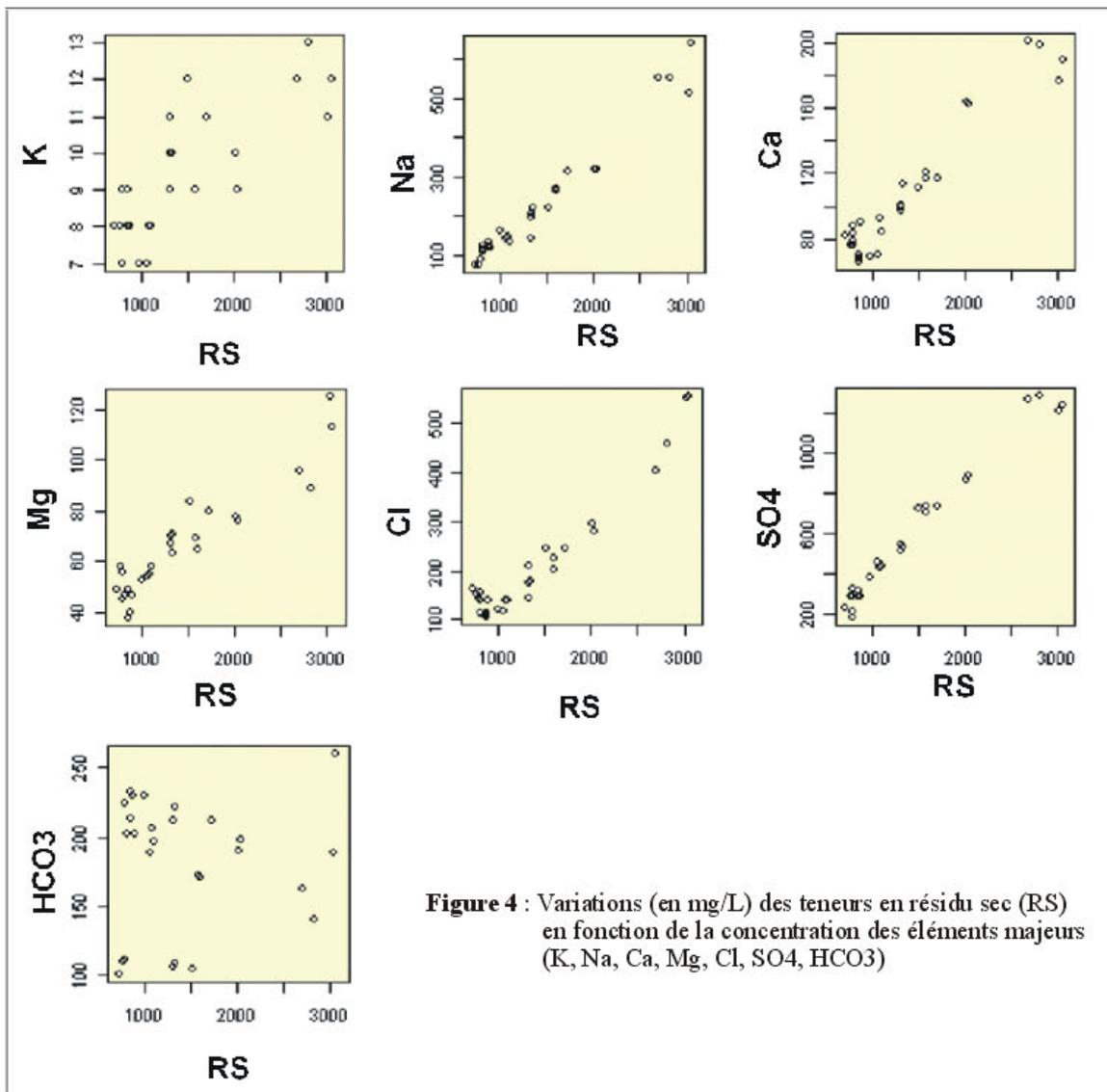
Les représentations des compositions des eaux en éléments majeurs dans le diagramme de Piper (PIPER, 1944) montrent la prédominance de trois types de faciès (figure 6) :

- un faciès chloruré-bicarbonaté sodi-calcique, pour les eaux des forages F3, F4, F5, F7, F9 et F10, localisés dans la partie amont de la nappe qui correspond à la zone de recharge ;
- un faciès mixte, pour les eaux des forages F1, F2 et F8, dans la partie centrale de la nappe ;

- un faciès sulfaté-sodique, qui caractérise les eaux des forages F6, F11, F12, F13 et F14, localisés dans la zone de décharge de la nappe.

Forage	Profondeur	RS	T°C	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	IEB
Saison hivernale 2005												
F1	98	1340	25	8	113	63	222	10	222	181	526	-0.28
F2	200	1320	28	8	100	70	206	9	212	174	541	-0.24
F3	125	860	25	8	70	38	122	8	233	107	280	-0.21
F4	168	1082	26	8	93	55	147	8	207	139	421	-0.12
F5	100	890	32	8	90	47	117	8	202	139	279	0.10
F6	144	2016	24	8	164	78	320	10	190	295	862	-0.12
F7	111	790	27	8	76	45	89	7	225	145	182	0.34
F8	200	1057	24	8	70	54	143	7	188	117	452	-0.28
F9	250	800	22	8	78	45	124	7	224	115	316	-0.14
F10	88	805	26	8	83	47	107	9	203	142	210	0.18
F11	150	3055	26	7	189	113	639	12	260	555	1233	-0.17
F12	377	1590	24	7	120	69	266	9	172	203	700	-0.35
F13	124	1720	26	8	117	80	315	11	212	246	732	-0.33
F14	370	2695	26	7	201	96	552	12	162	406	1263	-0.39
Saison estivale 2005												
F1	98	1326	30	8	101	71	194	11	109	212	516	-0.03
F2	200	1316	19	8	97	67	140	10	106	146	541	-0.03
F3	125	865	23	8	68	40	120	9	230	115	278	-0.03
F4	168	1100	16	8	84	58	135	8	197	139	432	-0.12
F5	100	796	23	8	88	56	111	9	112	156	282	-0.03
F6	144	2036	19	8	163	76	320	9	198	281	879	0.23
F7	111	770	25	8	76	58	76	8	110	152	284	-0.17
F8	200	990	15	8	69	53	160	7	230	119	379	0.45
F9	250	860	13	8	66	49	132	8	213	109	312	-0.40
F10	88	720	25	7	82	49	76	8	101	163	221	-0.28
F11	150	3028	23	7	177	125	515	11	189	552	1204	0.48
F12	377	1594	16	8	117	65	270	9	171	224	728	0.05
F13	124	1514	25	7	111	84	220	12	104	246	721	-0.25
F14	370	2822	14	8	199	89	552	13	140	458	1283	0.06

Tableau 1 : Physicochimie des eaux de la nappe des grès du Trias durant la saison hivernale et la saison estivale de l'année 2005 (la profondeur en m et les teneurs des éléments majeurs et du résidu sec en mg/l, IEB : Indice d'Echange de Base)



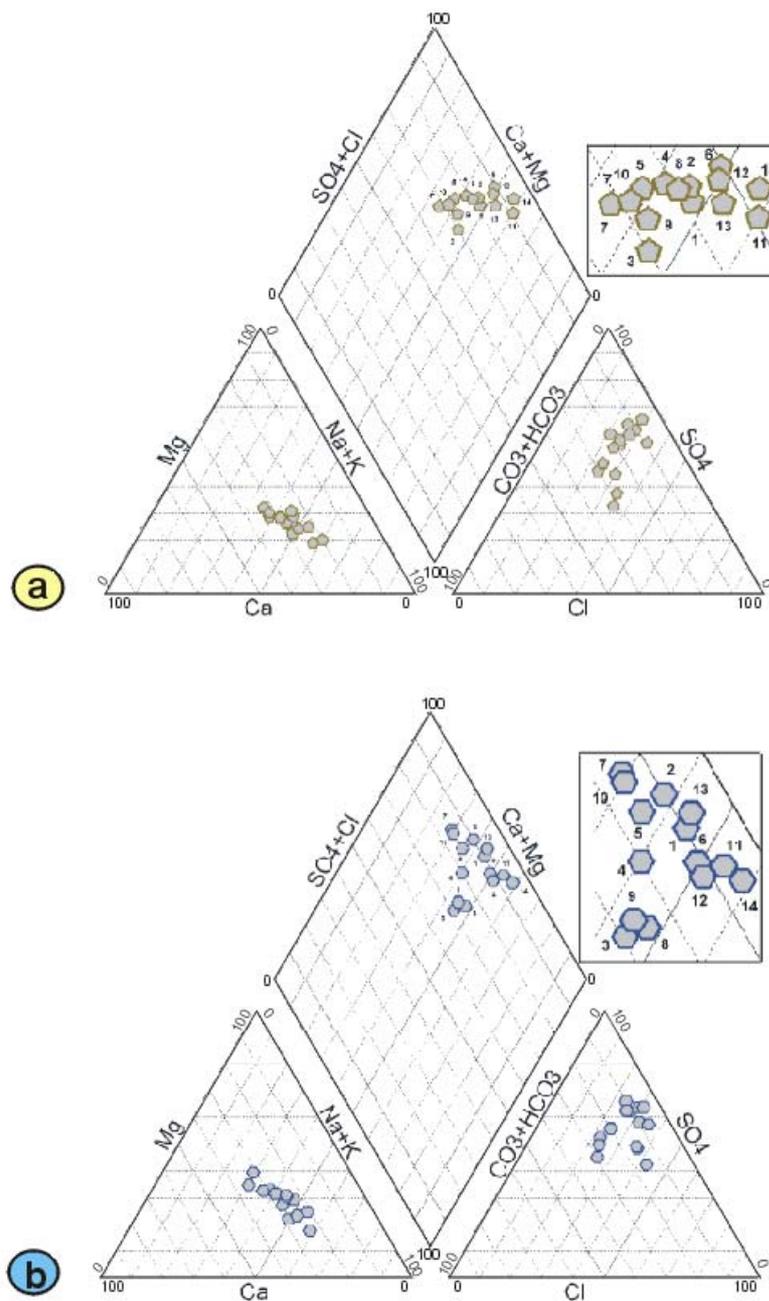


Figure 6 : Représentation de la composition chimique des eaux de la nappe des grès du Trias (Diagramme de Piper)

a Echantillons prélevés pendant la période estivale 2005

b Echantillons prélevés pendant la période hivernale 2005

Les numéros dans les encadrés correspondent aux échantillons prélevés

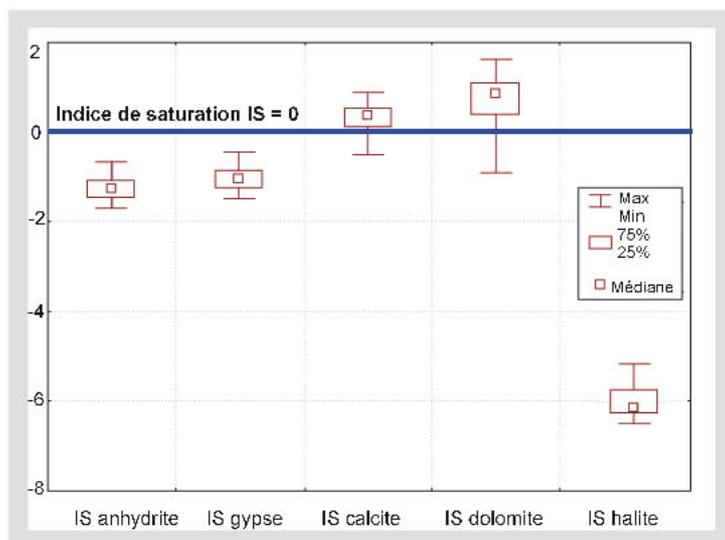


Figure 7 : Indices de saturation des eaux de la nappe des grès du Trias vis-à-vis du gypse, de l'anhydrite, de la calcite, de la dolomite et de la halite.

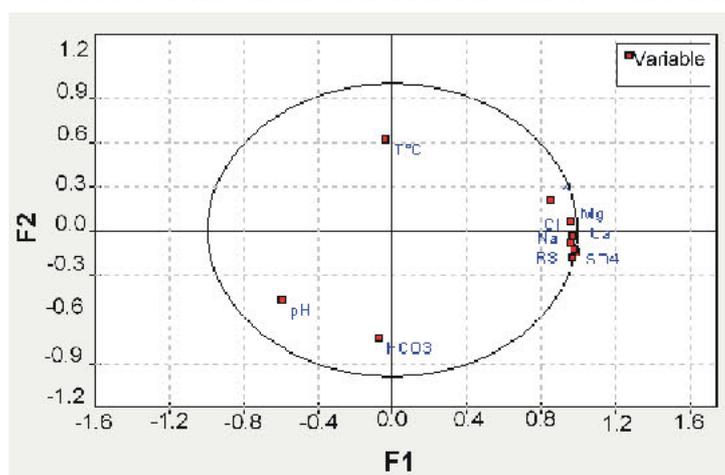


Figure 8 : Répartition des variables dans le cercle de corrélation suivant le plan factoriel F1-F2

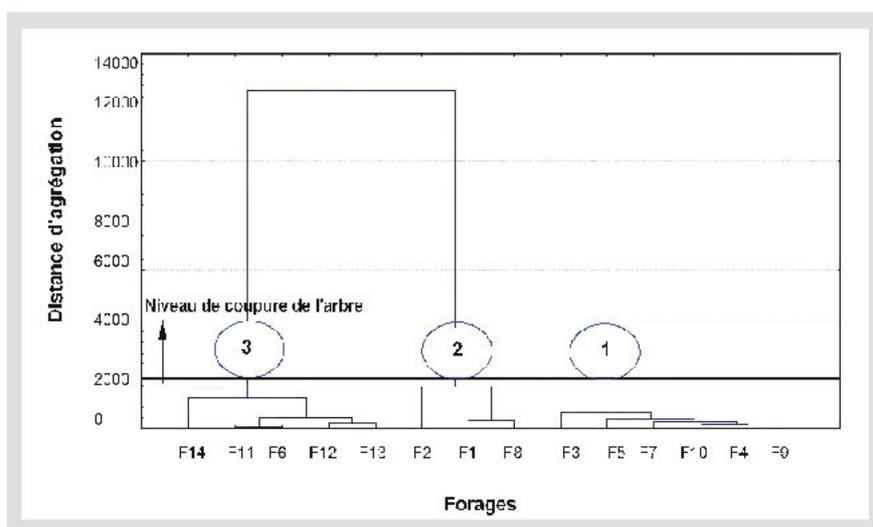


Figure 9 : Arbre de classification hiérarchique des eaux de la nappe de grès du Trias (Méthode de Ward, classification Euclidienne)

La variation du faciès hydrochimique, de l'amont vers l'aval, avec un enrichissement en sodium et en sulfates et un appauvrissement en magnésium et en bicarbonates, est en relation avec l'interaction eau-roche réservoir constituée essentiellement par des sables, des grès, du gypse et par une faible fraction argileuse.

Mise en évidence des échanges de base

L'interprétation des données des i.e.b. calculés montre que la majorité des points d'eau, ont des i.e.b. négatifs, les eaux échangent donc les ions (Ca^{2+} et Mg^{2+}) contre les ions Na^+ des argiles. Seuls les forages F7, F10, F11 et F13 présentent des i.e.b. positifs, où les ions Na^+ des eaux sont échangés contre les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} de la roche réservoir.

Mise en évidence de la minéralisation des eaux

Les boîtes à moustaches (boxplots) de la figure 7 montrent que la majorité des eaux de la nappe des grès du Trias sont saturées à sursaturées vis-à-vis de la calcite, de la dolomite et de l'aragonite, ce qui indique que la charge saline n'est pas influencée par l'interaction eau-minéraux carbonatés. En revanche, la totalité des eaux des forages exploitant la nappe des grès du Trias sont sous-saturés vis-à-vis des minéraux sulfatés (gypse et anhydrite), dont la dissolution contribue à l'acquisition des solutés et contrôle la minéralisation.

Etude statistique

L'ACP, appliquée sur les paramètres standardisés, confirme les résultats relatifs à la source de minéralisation obtenus précédemment. L'étude du spectre des valeurs propres montre qu'il y a deux axes à retenir pour l'interprétation des résultats puisqu'ils détiennent 80,43 % de la variance totale. Dans l'espace des variables, l'axe F1 apparaît comme un facteur de minéralisation (figure 8). Il est défini par la salinité et les teneurs en Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} et SO_4^{2-} et, dans une moindre mesure, par la teneur en K^+ . Ces différents éléments présentent des coefficients de corrélation élevés entre eux. En revanche, l'axe F2 est représenté par les bicarbonates, la température et le pH.

La représentation des eaux de la nappe des grès du Trias dans l'arbre de classification hiérarchique (figure. 9) montre une zonation géographique des forages :

- une première zone où les eaux sont les plus minéralisées (F6, F11, F12, F13 et F14), avec des valeurs relativement élevées du résidu sec et des teneurs des éléments majeurs.
- une deuxième zone où les eaux ont une salinité comprise entre 1000 et 1400 mg/l (F1, F2 et F8).
- une troisième zone où les eaux sont faiblement minéralisées ($\text{RS} < 1000$ mg/l) : forages F3, F4, F5, F7, F9 et F10.

CONCLUSIONS

L'étude de la minéralisation des eaux de la nappe des grès du Trias, durant l'année 2005, montre que les teneurs en résidu sec et en éléments majeurs sont peu variables d'une saison à l'autre. La répartition spatiale de la salinité indique que les eaux des forages F1, F2, F3, F4 et F5 sont les moins chargées en sels dissous. Ceci s'expliquerait par l'importance de l'alimentation superficielle qui se fait essentiellement à partir des eaux de ruissellement le long des oueds Om Tmar et Smar qui sont amplement aménagés par des ouvrages de recharge.

La qualité des eaux se détériore en allant vers l'est (F11 et F14) suite à l'apparition d'une couche argileuse limitant l'infiltration des eaux pluviales.

Les résultats obtenus par l'ACP indiquent que les variables qui contrôlent la salinisation des eaux sont le Na^+ , le Cl^- , le Ca^{2+} , le Mg^{2+} , le SO_4^{2-} et le K^+ . Les résultats de l'ACH ont montré l'existence de trois groupes d'eau avec la prédominance de trois types de faciès, chloruré-bicarbonaté sodi-calcique, faciès mixte et un faciès de type sulfaté-sodique.

Ainsi, nous notons, de l'amont vers l'aval, un enrichissement en sodium et en sulfates et un appauvrissement en magnésium et en bicarbonates. Les teneurs en calcium et en chlorures sont presque constantes.

La minéralisation des eaux de la nappe des grès du Trias, déterminée par les méthodes hydrochimiques et statistiques dépend de plusieurs facteurs tels que : la mise en solution des minéraux gypseux, le temps de contact eau-roche, l'échange de base avec les argiles de l'aquifère et les interactions avec les eaux de surface.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tous les personnels de la Société nationale de distribution des eaux de Tunis et la direction des ressources en eau de Médenine et plus particulièrement Mr Houssine Yahyaoui et Mr Taher Atoui pour leurs collaborations.

REFERENCES

- BEN ABDALLAH, H. & BEN OTHMÈNE T. 2009. Création d'une base de données des points d'eau de la nappe Zeuss-Koutine-grès du Trias de Médenine. Rapport PFE. Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, 60 p.
- BLINDA, M. & THIVET, G., 2009. Ressources et demandes en eau en Méditerranée : situation et perspectives. *Sécheresse*, 20: 9-16.
- BOUAZIZ, S., 1986. La déformation dans la plate forme du Sud Tunisien (Dahar et Jeffara) : Approche multiscalaire et pluridisciplinaire. Thèse de Doctorat de spécialité, Université de Sfax, 180 p.
- BUSSON, G., 1967. Le Mésozoïque Saharien. 1^{ère} partie : L'extrême Sud Tunisien. Série géologique. Paris: Centre Nation, 194 p.
- CIDU, R., BIDDAU, R. & FANFANI, L., 2009. Impact of past mining activity on the quality of groundwater in SW Sardinia (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 100: 125–132.
- CLOUTIER, V., LEFEBVRE, R., THERRIEN, R. & SAVARD, M.M., 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydro-geochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353: 294–313.
- DE ANDRADE, A.E., ARAUJO, H., PALACIO, Q., SOUZA, I.H., ALIPIO DE OLIVEIRA, R. & GUERREIRO, L.M.J., 2008. Land use effects in groundwater composition of an alluvial aquifer (Trussu River, Brazil) by multivariate techniques. *Environmental Research*, 106: 170–177.
- DGRE (Direction générale des ressources en eau), 2005. Annuaire de l'exploitation des nappes profondes. Rapport, Tunisie, 360p.
- DGRE (Direction générale des ressources en eau, 2005). Annuaire piézométrique. Rapport, Tunisie, 362p.
- DIB, I., 2010. L'impact de l'activité agricole et urbaine sur la qualité des eaux souterraines de la plaine de Gadaine - Ain yaghout (Est algérien). Université Hadj Lakhdar Batna, Faculté des sciences de l'ingénieur, Algérie, 127 p.
- EL YAOUTI, F., EL MANDOUR, A., KHATTACH, D., BENAVENTE, J. & KAUFMANN, O., 2009. Salinization processes in the unconfined aquifer of Bou-Areg (NE Morocco): A geostatistical, geochemical, and tomographic study. *Applied Geochemistry*, 24: 16–31.
- HAMZAOUI-AZAZA, F., 2011. Géochimie et modélisation des nappes de Zeuss-Koutine, des grès du Trias et du Miocène du Jorf-Jerba-Zarzis. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, 262 p.
- HAMZAOUI-AZAZA, F., KETATA, M., BOUHLILA, R., GUEDDARI, M. & RIBERIO, L., 2011, Hydrogeochemical characteristics and evaluation of drinking water quality in Zeuss-Koutine aquifer, south-eastern Tunisia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 174, 283–298.
- JEDOU, Y., 2000. Sédimentologie et géochronologie des dépôts littoraux quaternaires : Reconstitution des variations des paléoclimats et du niveau marins dans le Sud-Est Tunisien. Thèse Doctorat, université de Tunis, 338 p.
- KHALLILI, B., 1984. Ressources en eau du gouvernorat de Médenine. DGRE. Tunis, Rapp. Int, 8 p.
- KHALLILI, B., 1991. Etude hydrogéologique de la nappe des grès du Trias dans la zone de Médenine Bir Lahmar. DGRE Tunis, Rapp. Int, 24 p.
- MAMOU, A. & KASSAH, A., 2002. Eau et développement dans le Sud tunisien. Cahiers de CERES, Série : Géographie, n° 23, 286p.
- PARKHURST, D.L. & APPELO, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (version 2): a computer program for speciation, batch reaction, one dimensional transport, and inverse geochemical calculations. US Geol Surv Water Resour Invest. Rep 99–4259.
- PIPER, AM. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *American Geophysical Union, Trans.* 914-923.
- ROMANGEY, B. & GUILLAUME, H., 2004. L'accès à l'eau potable dans la Jeffara tunisienne : contradictions et nouvelles perspectives. *La houille blanche*, 1: 52-59.

- ROYA, P.D., SMYKATZ-KLOSS, W. & MORTONC, O., 2008. Geochemical zones and reconstruction of late Holocene environments from shallow core sediments of the Pachapadra paleo-lake, Thar Desert, India. *Chemie der Erde*, 68 : 313-322.
- SCHOLLER, H., 1956. Géochimie des eaux souterraines : *Application aux eaux de gisement de pétrole*. Paris, 213p.
- TEMPL, M., FILZMOSE, P. & REIMANN, C., 2008. Cluster analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 23: 2198–2213.
- YAHYAOU, H., 2007. Nappe des grès du Trias de Sahel el Ababsa de Médenine aspects hydrogéologiques et gestion rationnelle des ressources. Rapport DGRE , Tunisie, 5p.
- YIDANA, S.M., OPHORI, D. & BANOENG-YAKUBOB, B., 2008. A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data-The Ankobra Basin, Ghana. *Journal of Environmental Management*, 86: 80–87.