

Contribution de l'analyse multivariée et des SIG pour la caractérisation hydrochimique de la nappe phréatique de la plaine de Sidi Bouzid (Tunisie centrale)

[Contribution of the multivariate analysis and the GIS for Hydrochemical characterization of phreatic aquifer to the plain of Sidi Bouzid (Central Tunisia)]

Kaouther Ncibi¹, Noureddine Gaaloul², and Anis Gasm¹

¹Faculté des Sciences de Tunis,
Université de Tunis El Manar, Campus Universitaire,
2092 El Manar, Tunisia

²Institut National des Recherches en Génie Rural, Eaux, Forêts,
Rue Hédi Karray BP. 10,
2080 Ariana, Tunisia

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This study attempts to define the various geochemical processes responsible for the phreatic groundwater chemical evolution, using statistical methods and hydrochemical approaches. The phreatic aquifer in the plain of Sidi Bouzid is located in central Tunisia, the latter is characterized by an semi-arid to arid climate and irregular rainfall. The chemical water classification shows the dominance of a chlorinated calcium and magnesium sulfate type facies. The mineral-water interaction is at the expense of sulphates and to a lesser extent with carbonates. A statistical analysis of the physico-chemical data has been performed by the principal component analysis, a total of three components has been extracted, as it represents 87.040% of the total variance of the all data. The projection of the variables on the factorial designs shows two groups of individuals: the first grouping is where the highest concentrations of total dissolved solids, potassium, chlorides and sodium were observed, the second grouping consists of individuals where the water is less mineralized located upstream of the basin. The evaluation of the suitability of water for irrigation is provided by the calculation of various parameters. According to the results obtained 48.75% of the area of the plain is excellent, 26.71% is good, 13.60% is permissible and 10,94% unsuitable for irrigation. The areas of these zones are respectively 312; 171; 87 and 70 km²

KEYWORDS: Principal Component Analysis, GIS, hydrochemistry, irrigation, water resources, Sidi Bouzid.

RESUME: L'aquifère de la plaine de Sidi Bouzid se situe dans un bassin néogène qui repose en partie sur le Trias extrusif, occupant un plateau pénéplané qui se situe entre la structure jurassique écaillée de l'Axe Nord-Sud à l'Est et les structures en anticlinaux crétacés faiblement plissés de l'Atlas tunisien à l'Ouest. Cette zone est caractérisée par un climat aride à semi-aride et des précipitations irrégulières. La classification chimique des eaux montre la dominance d'un faciès de type chloruré et sulfaté calcique et magnésien. L'interaction eaux-minéraux se fait aux dépens des sulfates et de façon moindre avec les carbonates. L'analyse statistique des données physico-chimiques a été réalisée par l'analyse en composante principale, un total de trois composantes a été extrait, où il représente 87,04 % de la variance totale. La projection des variables sur les plans factoriels montrent deux regroupements d'individus : le premier regroupement présente les concentrations les plus élevées de total des sels dissous, potassium, chlorures et sodium a été observé à l'Est de la zone d'étude, le deuxième regroupement est constitué des individus où les eaux sont moins minéralisées situées à l'amont de la nappe. L'évaluation de l'aptitude des eaux à l'irrigation est présentée par le calcul de divers paramètres. Selon les résultats obtenus 48,75 % de la

superficie de la plaine est excellente, 26,71 % est bonne, 13,60 est médiocre et 10,94 % n'est pas adaptée pour l'irrigation qui sont de mauvaise qualité. Les superficies de ces différentes zones sont respectivement de 312 ; 171 ; 87 et 70 km².

MOTS-CLEFS: Analyse en Composante Principale, SIG, hydrochimie, irrigation, ressource en eaux, Sidi Bouzid.

1 INTRODUCTION

Les ressources en eaux souterraines à travers le monde sont considérées comme une précieuse source pour répondre à l'agriculture, l'utilisation domestique et aux exigences industrielles. Cela est particulièrement vrai pour les régions arides à semi-arides où les précipitations sont rares et l'approvisionnement en eau de surface est pratiquement négligeable. Dans ces régions, autre que la grave pénurie, les ressources en eau sont également caractérisées par une importante variabilité spatio-temporelle. Ce qui rend important la connaissance des bases hydrochimiques d'un aquifère, cette dernière suggère l'évaluation et la compréhension des procédés chimiques naturels qui se produisent dans l'aquifère et qui est un facteur clé pour définir l'origine de la minéralisation et la qualité des eaux.

Des études menées dans les régions arides et semi-arides ont montré l'importance de l'évaluation des eaux souterraines pour la gestion de toute stratégie de développement intégré. Plusieurs auteurs ont utilisé la statistique et la géostatistique à l'étude de la gestion des ressources des eaux souterraines afin d'obtenir de bons résultats.

La Tunisie, par sa position géographique est soumise à l'influence de deux climats aride et semi-aride qui sont à l'origine d'une variabilité spatio-temporelle des ressources en eaux. Ces dernières sont inégalement réparties à travers le pays avec environ 60% situées dans le Nord, 18% dans le Centre et 22% dans le Sud [1]. Les ressources en eaux souterraines sont évaluées à 2100 millions de m³ par an, réparties en 700 millions de m³ par an provenant des 212 nappes phréatiques et 1400 millions de m³ par an provenant de 267 nappes profondes dont 650 millions sont non renouvelables. Les nappes souterraines constituent une part importante des ressources en eau du pays (43 %), dont à peu près 1/3 dérivent des nappes phréatiques [2].

En Tunisie centrale l'eau fournie aux populations provient généralement des nappes d'eaux souterraines [3]. D'où, une caractérisation hydrochimique est nécessaire pour une meilleure évaluation (qualitative) des ressources en eaux souterraines [4] pour des fins agricole. En se concentrant sur la nappe phréatique de la plaine de Sidi Bouzid, la présente étude est basée sur l'évaluation hydrochimique en utilisant des informations multivariée. L'utilisation intégrée de l'ACP et de la géostatistique aide à l'évaluation spatiale de la cartographie de la qualité de l'eau souterraine. Donc ce travail tente de donner une information hydrochimique afin d'identifier le principal processus hydro-géochimique qui contrôle la qualité de l'eau et l'origine de la minéralisation des eaux de la nappe phréatique dans la plaine de Sidi Bouzid et la cartographie de la qualité des eaux à l'irrigation. Enfin une carte finale de qualité d'eau est réalisée afin d'identifier son aptitude à l'irrigation et qui vise à aider pour donner une meilleure gestion des ressources en eaux dans la zone d'étude.

2 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

La plaine de Sidi Bouzid est située en Tunisie centrale entre 35 ° 12'30 " et 34 ° 53'30" de latitude Nord et 9 ° 10'0" et 9 ° 40 '0" de longitude Est (figure 1), elle couvre une superficie de l'ordre de 640 Km². Elle est bordée au Nord par Jbal Liswda et par une limite de type hydraulique matérialisée par la zone d'évaporation de Negada (Sebkhat) ; le principal exutoire des eaux de la nappe, au Sud par Jbal Al Kbar, à l'Est par l'axe Nord-Sud, et à l'Ouest par Jbal Hamra, Jbal Ar-rakhmat et Jbal Al Hfay. Cette région est caractérisée par un climat méditerranéen aride à semi-aride avec des précipitations annuelles irrégulières et des périodes de sécheresse. La pluviométrie moyenne annuelle et la température annuelle sont, respectivement, 230 mm et 19°C. En outre, l'évaporation potentielle est estimée par 2370 mm/an [5].

Le bassin-versant de la plaine correspond en réalité à deux sous-bassins et qui sont, du Nord vers le Sud : le sous-bassin de l'oued El Fekka et le sous-bassin de l'oued Sarigh Dhiba. Ce bassin versant est caractérisé par un réseau hydrographique assez dense formé par un réseau de premier ordre groupant les principaux oueds : Oued El Fekka et Oued Sarigh Dhiba. Oued El Fekka traverse la zone d'étude de l'Ouest vers l'Est et Oued Sarigh Dhiba se trouve au Sud de la plaine. Ce réseau principal est alimenté par un deuxième de second ordre, formé par des ravins et des oueds secondaires descendants des principaux reliefs (figure 1).

Les ressources en eaux dans la zone d'étude ont une grande importance économique pour cette région agricole. Un volume d'eau très important est utilisé pour l'irrigation. La pratique de l'agriculture et l'horticulture ont un rôle important

dans l'utilisation des terres dans la zone d'étude ; 2122ha forêt et 84472ha terres labourables réparties en périmètres irrigués publics et privés (figure 1) (plus que trois-quarts de la plaine), la culture annuelle et de l'olivier. Ces cultures nécessitent de grandes quantités d'eau afin d'obtenir un rendement élevé.

Géologiquement, cette région appartient au domaine atlasique tunisien, caractérisé par des plis généralement orientés NE-SE qui peuvent contenir des pointements triasiques ([6], [7], [8], [9], [10], [11]). Les terrains affleurants s'étalent du Trias (ère secondaire) jusqu'au Quaternaire. Pour l'hydrogéologie, le système aquifère de cette plaine est situé dans des couches Mio-Plio-quaternaire. L'aquifère est formé essentiellement des lentilles de sable dans lesquelles s'intercalent des formations moyenne à haute perméabilité de nature sablo-argileuse, argilo-sableuse et argileuse [5].

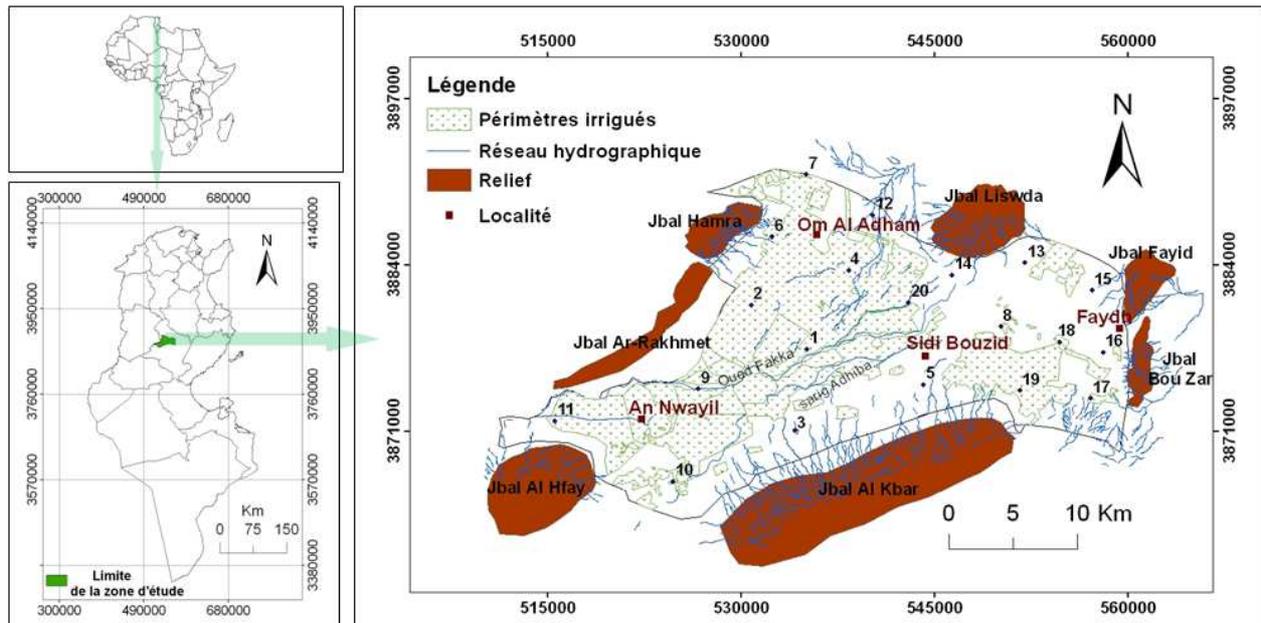


Fig. 1. Carte de localisation de la zone d'étude

3 MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1 ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE

Un total de 20 puits servis en Octobre 2014. Le réseau d'échantillonnage a été bien choisi ce qui permet d'acquérir des données représentatives sur la variabilité spatiale de la qualité des eaux souterraines de l'aquifère étudiée (figure 1). Les paramètres physiques (Température, pH, CE) sont mesurés sur le terrain. Les échantillons sont analysés pour les éléments majeurs : sodium (Na^+), potassium (K^+), calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), chlorure (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}), bicarbonates (HCO_3^-) et pour les traces : cadmium (Cd), fer (Fe), zinc (Zn), plomb (Pb) et manganèse (Mn). L'analyse chimique a été réalisée dans le laboratoire de l'Institut National de Recherche Agronomique de Tunis. Les techniques utilisées sont pour les majeurs : Ca^{2+} et Mg^{2+} par complexométrie, Na^+ et K^+ par le spectrophotomètre à flamme, Cl^- et le HCO_3^- par titrage, SO_4^{2-} par turbidimètre et pour les traces par absorption atomique. La précision analytique de la mesure des ions est déterminée en calculant l'erreur absolue en équilibre ionique, qui se trouve dans tous les échantillons dans la norme limite de 5%, par la formule suivante :

$$E (\%) = [(\sum \text{cations} - \sum \text{anions}) / (\sum \text{cations} + \sum \text{anions})] * 100$$

3.2 MÉTHODES ANALYTIQUES

Pour comprendre le processus hydro-géochimique qui se déroule dans l'aquifère, nous avons utilisé les méthodes suivantes :

Le diagramme de Piper a été tracé en utilisant les concentrations des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et des anions (SO_4^{2-} , HCO_3^- et Cl^-) mesurés en milliéquivalents par litre, il représente l'évolution hydrochimique des eaux souterraines dans la zone

d'étude ([12], [13]). Pour mieux comprendre les changements chimiques qui peuvent se produire dans l'eau lorsqu'elle se déplace à travers le sol, l'interaction de la chimie des minéraux et de l'eau des aquifères entre eux peut être examinée ([14], [15], [16]). Un aspect de ces interactions géochimiques est la dissolution ou la précipitation des minéraux le long de trajets d'écoulement dans le système sol-eau. L'indice de saturation (IS) est un paramètre très important dans l'étude des équilibres eaux- minéraux [17]. Une valeur de IS est égale à zéro indique que l'eau est à l'équilibre (saturée) par rapport à la phase minérale. Une valeur négative indique une sous-saturation (dissolution du minéral est possible), et une valeur positive indique une sur-saturation (précipitations du minéral est possible). L'IS est déterminé par la formule suivante :

$$IS = \text{Log} (PAI / Pks)$$

Avec :

PAI : le produit d'activité ionique des espèces chimiques en solution ;

Pks : produit de solubilité d'équilibre en phase solide à la température spécifiée.

L'utilisation du programme Phreeqc [18], nous permet de calculer les indices de saturation de la calcite, de l'aragonite, du gypse, de la dolomite, de l'halite et de l'anhydrite.

Aussi l'analyse en composantes principales par le logiciel SPSS (Version 18) a été utilisée pour analyser les données sur les eaux souterraines dans notre étude, qui permettent de regrouper des échantillons d'eau souterraine et la réalisation des corrélations entre les paramètres chimiques et les échantillons d'eau. Cette approche statistique se trouve essentiellement pour valider la première approche (l'interaction eau-sédiment).

L'analyse en composante principale (ACP) est une méthode statistique exploratoire permettant de réduire un grand nombre de variables à un petit nombre de variables qui sont les principales composantes ([19], [20], [21]). Elle permet de définir les vecteurs propres d'une variance-covariance ou une matrice à partir d'un ensemble de données de corrélation correspondant à une première matrice de N lignes d'observations par P colonnes de variables ([22], [23]). Par ailleurs, l'ACP combine deux ou plusieurs corrélations des variables ([24], [25], [26]). Cette approche a été utilisée pour extraire des variables connexes et déduire les processus qui contrôlent la chimie de l'eau ([27], [28], [29]).

Ainsi la cartographie de la qualité des eaux à l'irrigation a été déterminée par l'évaluation de l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation qui dépendait des effets des concentrations des minéraux dans l'eau sur les sols et les plantes [30]. L'effet des sels sur les sols entraîne des changements dans la structure du sol, la perméabilité et, par conséquent, il affecte la croissance des plantes. Dans notre cas un système de classification pour évaluer l'aptitude de l'eau à usage d'irrigation a été déterminé à travers six indices qui sont : la conductivité électrique (CE), le rapport d'adsorption du sodium (SAR), le pourcentage en sodium (%Na), l'alcalinité résiduelle des eaux (RSC), l'indice de perméabilité (IP) et le pourcentage de magnésium (%Mg).

La conductivité électrique est un bon moyen pour la mesure de la salinité afin de dégager le danger sur les cultures. L'excès de salinité diminue l'activité osmotique des plantes et interfère donc avec l'absorption d'eau et des nutriments du sol [31].

Le rapport d'adsorption du sodium (SAR) est un paramètre important pour déterminer l'aptitude des eaux souterraines à des fins d'irrigation car il mesure le danger de l'alcali-sodium pour les cultures [32]. Le sodium pénètre dans l'aquifère par la pluie et par la dissolution des roches. En raison de ses effets sur les sols et les plantes, il est considéré parmi les principaux facteurs régissant l'eau d'irrigation [33]. Ce rapport est déterminé en utilisant la formule suivante:

$$SAR = (Na^+ / (\sqrt{Ca^{2+} + Mg^{2+}}) / 2)$$

Où les concentrations de tous les ions sont indiquées en milliéquivalent par litre.

Le Na^+ est un cation important qui se détériore au-delà de la structure du sol et réduit le rendement des cultures [34]. Lorsque la concentration de Na^+ est élevée dans l'eau d'irrigation, Na^+ tend à être absorbé par les particules d'argile et sera remplacé par les ions de Mg^{2+} et Ca^{2+} . Ce processus d'échange de Na^+ dans de l'eau par Ca^{2+} et Mg^{2+} dans le sol réduit la perméabilité. C'est pour cela que le pourcentage en Sodium est considéré comme un indice important pour l'évaluation de l'eau destinée à l'irrigation. Le %Na est calculé selon la formule ci-dessous:

$$\%Na = (Na^+ + K^+) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+) \times 100$$

Où les concentrations de tous les ions sont indiquées en milliéquivalent par litre.

En plus de la SAR et %Na, l'excès de la somme de carbonate et de bicarbonate dans l'eau souterraine au profit de la somme de calcium et le magnésium influe également sur l'inadaptation des eaux souterraines pour l'irrigation. Cela s'appelle l'Alcalinité résiduelle des eaux (RSC). Le RSC est calculé en utilisant la formule donnée ci-dessous [35]:

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

Où les concentrations sont indiquées en milliéquivalent par litre.

La perméabilité du sol est affectée par l'utilisation à long terme de l'eau d'irrigation et est influencée par le contenu de sodium, de calcium, de magnésium et de bicarbonate dans le sol [36]. L'indice de perméabilité est déterminé par l'équation suivante [37] :

$$\text{IP} = (\text{Na}^+ + \text{VHCO}_3^- / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+)) \times 100$$

Où les concentrations sont indiquées en milliéquivalent par litre.

Le pourcentage de magnésium ou danger de magnésium exprime la mesure de l'effet du magnésium dans l'eau d'irrigation. L'excès de magnésium affecte la qualité des sols qui peut se traduire en faible rendement des cultures. Le %Mg est calculé comme suit [38]:

$$\% \text{Mg} = (\text{Mg}^{2+} / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})) \times 100$$

Où toutes les concentrations sont indiquées milliéquivalent par litre.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 CHIMIE DES EAUX DE LA NAPPE ET FACIÈS HYDROCHIMIQUE

Les résultats des données de la qualité des eaux souterraines ont été présentés statistiquement sous forme de minimum, maximum, moyenne et écart-type (tableau 1). Le tableau 1 montre que le pH des échantillons d'eau varie de 7,09 à 7,640 avec une moyenne de 7,427, ce qui indique des conditions basiques à alcalines. Les valeurs de TDS varient de 1218 mg/l à 6202 mg/l avec des valeurs moyennes de 2591,75 mg/l ceci indique que les eaux sont très alcalines et dures surtout au Nord et à l'Est de la nappe ; zone d'exutoire de la nappe. Basés sur les valeurs moyennes des paramètres chimiques, les cations sont dans l'ordre d'abondance suivant $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Cd}$ tandis que les anions révèlent un ordre d'abondance comme suit $\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_3$.

L'interprétation des faciès hydrochimiques est un outil utile pour la détermination du mode d'écoulement et l'origine des histoires chimiques des eaux souterraines [39]. Le diagramme de Piper pour les échantillons d'eau explique clairement les variations des concentrations des cations et des anions dans la région d'étude. Il montre que tous les échantillons ont un faciès hydrochimique de type chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne, sauf les deux échantillons numéro 6 et 12 qui ont un faciès de type chloruré sodique et potassique (figure 2). D'où ils ont la même origine.

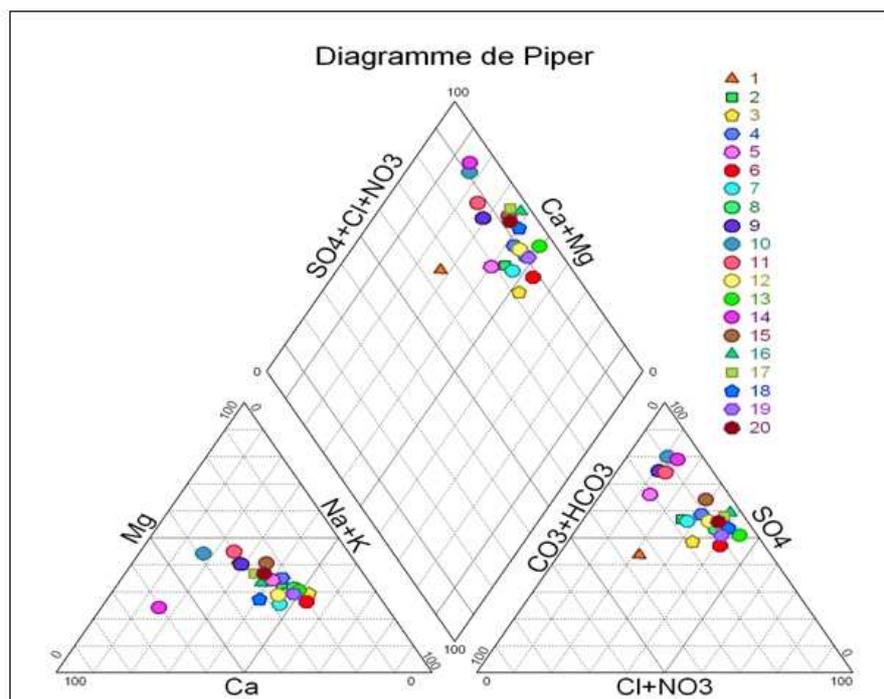


Fig. 2. Diagramme de Piper des eaux de la nappe de la zone d'étude

Tableau 1. Description statistiques de la composition chimique

N°	min	max	moyenne	Ecart type	N°	min	max	moyenne	Ecart type
pH	7,09	7,64	7,427	0,178	Ca (mg/l)	92,08	631,44	258,4	150,808
TDS (mg/l)	1218	6202	2591,75	1378,181	Mg (mg/l)	82,272	442,608	185,498	98,948
Fe (mg/l)	0,010	0,124	0,078	0,253	Na (mg/l)	97,00	1058,0	418,57	259,215
Zn (mg/l)	0,001	0,783	0,055	0,174	K (mg/l)	5,10	17,20	7,865	3,045
Mn (mg/l)	0,009	0,035	0,018	0,007	Cl (mg/l)	80,26	1480,33	535,288	416,825
Cd (mg/l)	0,004	0,028	0,012	0,006	HCO ₃ (mg/l)	149,04	609,36	259,536	92,406
Pb (mg/l)	0,001	0,134	0,037	0,031	SO ₄ (mg/l)	572,544	3141,888	1302,154	682,688

4.2 INTERACTION EAUX SÉDIMENTS

L'indice de saturation (IS) des minéraux (figure 3) indique que l'eau souterraine est sous-saturée en gypse (valeurs de IS varient de -1.06 à -0.01) et en anhydrite (IS varie de -1.28 à -0.22). Ce qui montre que ces minéraux se dissolvent dans l'eau souterraine le long du chemin où il y a des fortes concentrations de Ca²⁺ et SO₄²⁻. La sous-saturation vis-à-vis de l'halite (IS varie de -6.65 à -4.54) montre que la dissolution des sels gemme est importante dans les eaux souterraines, ceci peut être expliqué par l'augmentation des ions de sodium et de chlorure, ce qui indique un long temps de séjour. Pour la dolomite les eaux en aval de la nappe (échantillons numéro 1, 4, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 et 20) ont des valeurs de IS supérieures à zéro, donc ces eaux sont sur-saturées vis-à-vis de ce minéral. Les mêmes échantillons sont aussi sur-saturés vis-à-vis de la calcite sauf les échantillons numéro 6 et 8. Donc la précipitation de ces minéraux est généralement à l'Est de la nappe. Ainsi, cette précipitation provoque un équilibre des concentrations de Ca²⁺. Pour l'aragonite tous les échantillons sont sous-saturés vis-à-vis de ce minéral sauf les échantillons numéros 1, 14 et 18 ceci explique qu'il y a une dissolution de ce minéral.

La plupart des points d'eaux de la nappe sont sur-saturés vis-à-vis de la calcite et de la dolomite et sont sous-saturés par rapport à l'aragonite, au gypse, à l'anhydrite et l'halite ce qui explique que la nature des solutés n'est pas influencée par l'interaction eaux minérales carbonatés mais se fait aux dépens des minéraux sulfatés et de l'aragonite par dissolution.

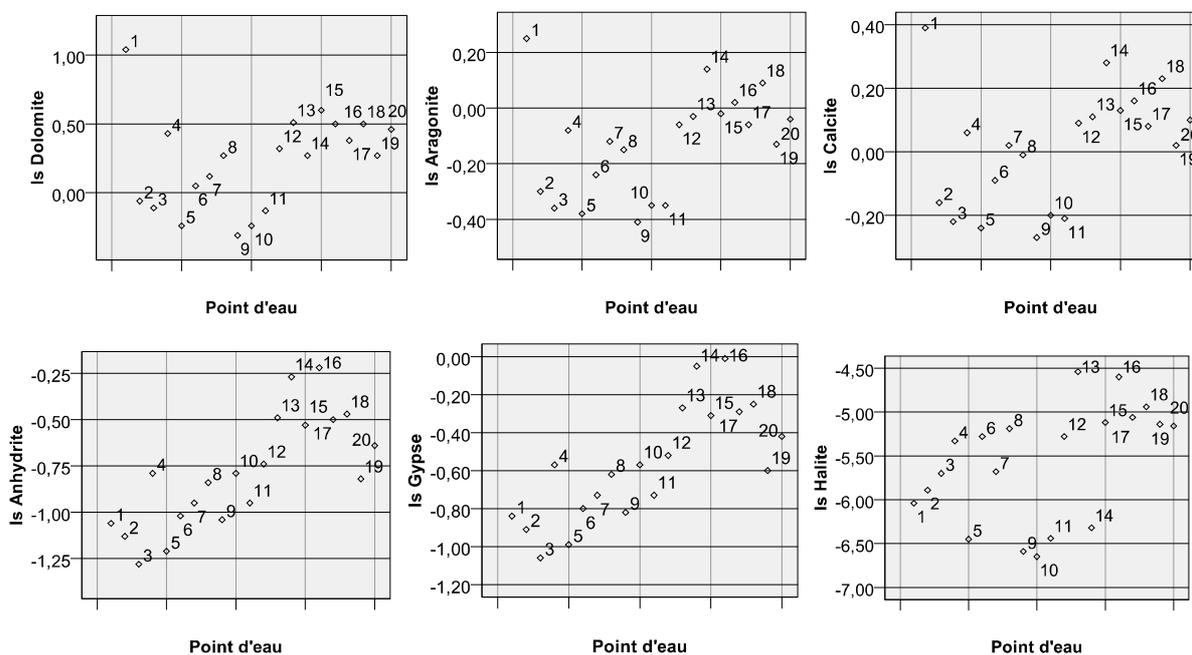


Fig. 3. Indice de saturation vis-à-vis aux principaux minéraux (carbonatés/sulfatés)

4.3 ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE

L'analyse statistique des données physico-chimiques de 14 variables et 20 individus (puits) a été réalisée par l'analyse en composante principale (ACP).

La corrélation s'effectue entre toutes les variables deux à deux, les coefficients de corrélation entre ces variables sont donnés par la matrice de corrélation (tableau 4). Le tableau 4 montre que le total des sels dissous (TDS) est fortement corrélé avec les éléments majeurs SO_4^{2-} (0,936), Cl^- (0,963), Mg^{2+} (0,953), Na^+ (0,933), K^+ (0,900) et Ca^{2+} (0,788) à l'exception des Bicarbonates (HCO_3^-) qui montre une faible corrélation avec la TDS. La même chose pour les sulfates (SO_4^{2-}) est fortement corrélée avec tous les éléments majeurs sauf les Bicarbonates. Le cation Ca^{2+} est bien corrélé avec les trois éléments traces métalliques Mn, Cd et Pb avec des valeurs respectivement 0.914, 0.784 et 0.811.

Le tableau 3 de la variance totale expliquée indique que les trois premières composantes principales représentent un ensemble de 87,040% de la variance totale dans l'ensemble des données, dans lequel la première composante principale est 59,666%, la deuxième composante principale est 18,772% et la troisième composante principale est 8,602% de la variance totale.

Les variables chimiques et les valeurs propres pour les trois premières composantes principales peuvent être utilisées pour évaluer le processus hydrogéochimique dominant. Les concentrations de Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , Cd, K^+ , SO_4^{2-} , Pb, et de TDS ont des valeurs avec des charges élevées positives (de 0,817 à 0,982) pour la première composante principale. Dans la deuxième composante principale la concentration de Zn a une charge positive élevée (0,911). Pour la troisième composante, les concentrations de Fe et HCO_3^{2-} indiquent que les charges sont positives modérées (0,728 à 0,733) (figure 4).

Les valeurs positives élevées des ions Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , Cd, K^+ , SO_4^{2-} , Pb, et de TDS sur le premier axe de la composante principale suggèrent que la première composante principale est associée à une combinaison de différents processus hydrogéochimiques qui augmentent la minéralisation de l'eau (TDS) (tableau 2). Les valeurs positives élevées de l'ion Na^+ et les très fortes concentrations de TDS observées sur la première composante sont liées aux ions Cl^- et SO_4^{2-} qui sont un indicateur du type des roches en particulier les roches évaporitiques en dissolution dans l'eau. Les charges positives élevées des ions K^+ et Mg^{2+} pour la première composante indiquent la source de l'altération des minéraux de feldspath et de ferromagnésium et sont aussi liées à la précipitation de la dolomite notamment pour l'ion Mg^{2+} . Les valeurs positives élevées de

Na⁺ sont liées à l'existence des minéraux argileux déposés dans cette région et aussi à la dissolution de l'halite. Les hautes charges de Cd et Pb sont liées à une pollution, ces deux éléments n'ont pas de source lithologique connue, ils sont attribués à une activité industrielle.

Dans la deuxième composante principale, les valeurs positives élevées et modérées de Zn et de Mn sont liées aussi à une pollution, d'où une activité industrielle. La charge positive modérée de Ca²⁺ est un indicateur de l'existence des roches calcaires et par la suite la précipitation des minéraux de calcite. Les valeurs positives modérées de HCO₃²⁻ et de Fe pour la troisième composante indiquent une réaction de CO₂ dans le sol avec une précipitation des silicates et des carbonates. En règle générale, le passage de la dissolution à la précipitation des minéraux carbonatés dans l'eau pendant l'interaction eau-sédiment dépend de la quantité de CO₂. Pour le Fe²⁺ sa valeur positive dans la deuxième composante est liée à une activité anthropique (figure 4).

La corrélation des variables montre l'existence de trois associations : la première constituée de TDS, Cl⁻, Na⁺, Mg²⁺, Cd, K⁺, SO₄²⁻, Pb et Mn: cette association est corrélée positivement avec toutes les composantes; elle montre que les eaux sont influencées par une lithologie constituée des carbonates et des évaporites. La deuxième est constituée de Zn et Ca: cette association est corrélée positivement avec le facteur F1 et F2, elle représente les eaux fortement influencées par les carbonates dans les milieux tendant à la basicité. La Troisième est composée de Fe et HCO₃⁻: cette association est corrélée négativement avec le facteur F1 et F2. Elle représente les eaux fortement influencées par une lithologie de nature évapo-argileuse (essentiellement gypseuses) et silicatée (figure 4).

Tableau 2. Matrice des composantes.

Paramètres	TDS	Cl	Na	Mg	Cd	K	SO ₄	Pb	Mn	Zn	pH	Ca	Fe	HCO ₃	
Composante	1	0,982	0,973	0,952	0,952	0,939	0,917	0,878	0,817	0,784	-0,185	-0,580	0,685	0,090	-0,089
	2	0,169	0,024	-0,089	0,163	0,205	-0,019	0,448	0,355	0,555	0,911	-0,724	0,694	0,139	-0,183
	3	0,001	-0,032	0,006	0,051	0,068	-0,120	-0,078	0,214	0,166	-0,103	-0,139	-0,076	0,733	0,728

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

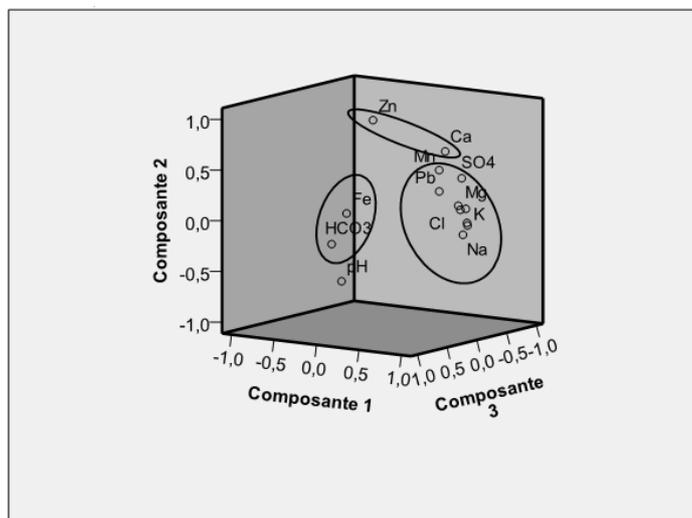


Fig. 4. Corrélations des variables (diagramme des composantes dans l'espace)

Pour la projection des individus sur les plans factoriels F1, F2 et F3, nous utilisons les composantes principales les plus intéressantes pour observer la distribution des variables et des individus. Dans ce cas, il y a trois axes principaux (Figure 5). La figure 5 représente les projections des variables sur les plans factoriels F1, F2 et F3 qui montrent deux regroupements d'individus : le premier regroupement est constitué des individus (4, 8, 13, 15, 16, 17, 18, 19 et 20). Il est corrélé positivement avec le facteur F1. Ce sont les échantillons situés en partie aval de la nappe où les concentrations les plus élevées ont été observées : TDS (6202 mg/l pour l'échantillons numéro 16) K⁺, Cl⁻ et Na⁺ (avec des valeurs respectivement 17,2mg/l ; 1480,33 mg/l et 1058 mg/l pour l'échantillon 13), et SiO₄²⁻ (3141,888 mg/l pour l'échantillons 16) et montrant un

phénomène en rapport avec les processus de dissolution des sels piégés dans les sédiments de l'aquifère à ce domaine. Le deuxième regroupement est constitué des individus 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12 et 14. Ce deuxième regroupement est corrélé négativement avec le facteur F1. Il représente les échantillons situés à l'Ouest de la zone d'étude où les eaux sont moins minéralisées et avec des faibles valeurs en Ca^{2+} .

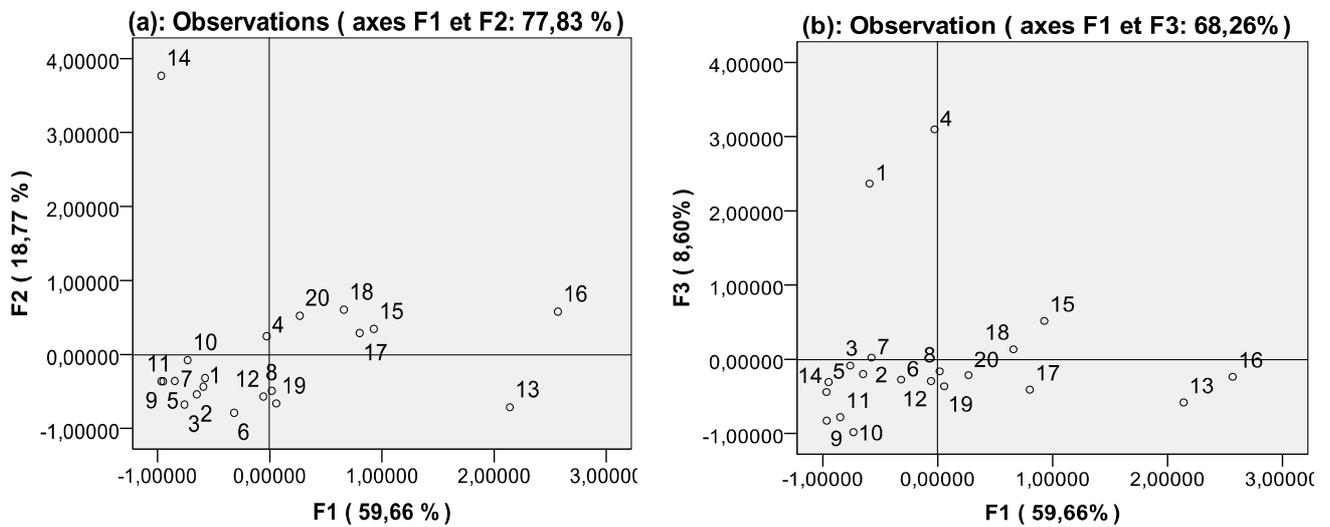


Fig. 5. Projection des individus sur les plans factoriels : (a) F1, F2 ; (b) F1, F3

Tableau 3. Variance totale expliquée

Composante	Valeurs propres initiales			Somme des carrés des facteurs retenus pour la rotation		
	Total	% de la variance	% cumulés	Total	% de la variance	% cumulés
1	9,178	65,558	65,558	8,353	59,666	59,666
2	1,813	12,950	78,508	2,628	18,772	78,438
3	1,195	8,532	87,040	1,204	8,602	87,040
4	0,905	6,462	93,502			
5	0,392	2,801	96,304			
6	0,169	1,209	97,512			
7	0,153	1,092	98,604			
8	0,102	0,732	99,336			
9	0,063	0,453	99,789			
10	0,017	0,121	99,909			
11	0,009	0,068	99,977			
12	0,002	0,015	99,992			
13	0,001	0,006	99,998			
14	0,000	0,002	100,000			

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

4.4 QUALITÉ DE L'EAU D'IRRIGATION

Le système de classification pour évaluer l'aptitude de l'eau à usage d'irrigation peut être déterminée à travers des paramètres indice de qualité tels que le rapport d'adsorption du sodium (SAR), le pourcentage en sodium (% Na), l'alcalinité résiduelle des eaux (RSC), l'indice de perméabilité (IP), la conductivité électrique (CE) et le pourcentage en magnésium (% Mg). Pour chaque paramètre une carte de répartition spatiale est déterminée en utilisant la méthode d'interpolation par krigeage ordinaire.

LE RAPPORT D'ADSORPTION DU SODIUM (SAR)

Les valeurs de SAR sont comprises entre 2,72 et 9. La classification classique de Riverside [33] des eaux, de la nappe phréatique de la plaine de Sidi Bouzid, selon son degré d'aptitude à l'irrigation montre que les eaux de la nappe se situent en général, dans six classes principales:

C3-S1 : eau de qualité admissible, convenant à l'irrigation des plantes qui présentent une bonne tolérance au sel sur des sols bien aménagés, et qui nécessite un contrôle périodique de l'évolution de la salinité. Ces eaux se trouvent en amont de la nappe.

C3-S2 : eau de qualité médiocre, fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces des cultures bien tolérantes au sel et sur des sols grossiers ou organique à bonne perméabilité, bien drainés et lessivés. Un contrôle périodique de l'évolution de la salinité sera indispensable.

C4-S1 : eau de qualité médiocre, fortement minéralisée ne convient pas à l'irrigation dans des conditions normales. Elle est utilisée si les espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés, lessivés et ont une bonne tolérance à la salinité et le sol est particulièrement bien drainé.

C4-S2 : eau de qualité médiocre, fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces ayant une très bonne tolérance à la salinité et sur des sols bien drainés et lessivés, échantillon numéro 18.

C5-S2 et C5-S3 : eau de mauvaise qualité, fortement minéralisée ne convient pas à l'irrigation. Qui se trouve près des exutoires de la nappe (les échantillons numéros 13, 16 et 18) (figure 8.b).

Tableau 4. La matrice de corrélation des échantillons d'eau

	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	SO ₄	Fe	Zn	Mn	Cd	Pb	pH	TDS
Ca	1,000													
Mg	0,749	1,000												
Na	0,581	0,833	1,000											
K	0,606	0,856	0,897	1,000										
Cl	0,690	0,888	0,980	0,912	1,000									
HCO ₃	-0,190	-0,092	-0,060	-0,158	-0,085	1,000								
SO ₄	0,918	0,926	0,776	0,801	0,845	-0,259	1,000							
Fe	0,048	0,143	0,111	0,053	0,063	0,093	0,127	1,000						
Zn	0,505	-0,067	-0,193	-0,094	-0,114	-0,117	0,240	-0,008	1,000					
Mn	0,914	0,873	0,669	0,644	0,748	-0,107	0,944	0,302	0,284	1,000				
Cd	0,784	0,945	0,851	0,799	0,890	0,010	0,914	0,058	0,008	0,861	1,000			
Pb	0,811	0,845	0,698	0,647	0,760	0,004	0,855	0,232	0,097	0,861	0,895	1,000		
pH	-0,868	-0,672	-0,496	-0,500	-0,602	0,032	-0,787	-0,184	-0,515	-0,873	-0,689	-0,731	1,000	
TDS	0,788	0,953	0,933	0,900	0,963	-0,097	0,936	0,099	-0,011	0,859	0,961	0,853	-0,690	1,000

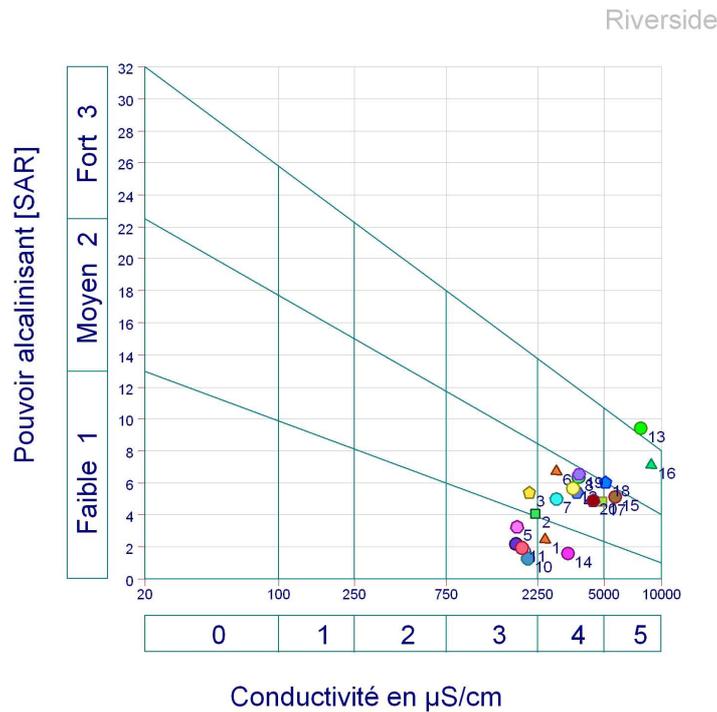


Fig. 6. Diagramme de Riverside

POURCENTAGE DE MAGNESIUM (%Mg)

Les valeurs de %Mg calculées à partir des eaux souterraines de la zone d'étude se situent entre 28,38 et 62,96 (Tableau 9). Si %Mg > 50% l'eau n'est pas appropriée et nuisible pour l'irrigation et il affecte négativement la croissance des cultures. Si %Mg < 50% indique que l'eau est appropriée pour l'irrigation.

Environ 85% des échantillons d'eau de la zone d'étude montrent des valeurs de %Mg dépasse 50%, donc ils ne sont pas appropriées pour l'irrigation. Le reste des eaux souterraines 15% situées au Nord et à l'Est de la nappe sont sans danger pour l'irrigation (figure 8.d), comme la valeur du risque de magnésium dans les moins de 50 (tableau 5). Donc nos échantillons d'eau reste une par conséquent, ils ne sont pas sûrs à des fins d'irrigation.

Tableau 5. Qualité de l'eau souterraine basée sur le pourcentage de magnésium [38]

% Mg	Classe d'eaux	échantillons
<50%	Bonne	7-14-18
>50%	Mauvaise	1-2-3-4-5-6-8-9-10-11-12-13-15-16-17-19-20

POURCENTAGE DE SODIUM (%NA)

Le calcul de %Na dans les échantillons d'eau souterraine dans la zone d'étude montre des valeurs entre 15,57 à 53,46% avec une moyenne de 38,46%. Selon la classification de Wilcox (1955) trois classes sont représentées (figure7) :

Bonne : localisée à l'Ouest dans la partie amont de la nappe, elle correspond aux eaux de minéralisation relativement faible, issues des formations carbonatées des bordures.

Médiocre : elle concerne des eaux moyennement minéralisées, avec un risque de salinisation moyen et d'alcalisation faible. Elle caractérise les eaux situant au centre de la nappe.

Mauvaise: cette classe caractérise la partie aval de la nappe où les eaux ont une forte minéralisation, présentant un risque de salinisation des sols important, mais à alcalisation moyenne. On la rencontre près des exutoires de la nappe (figure 8.e).

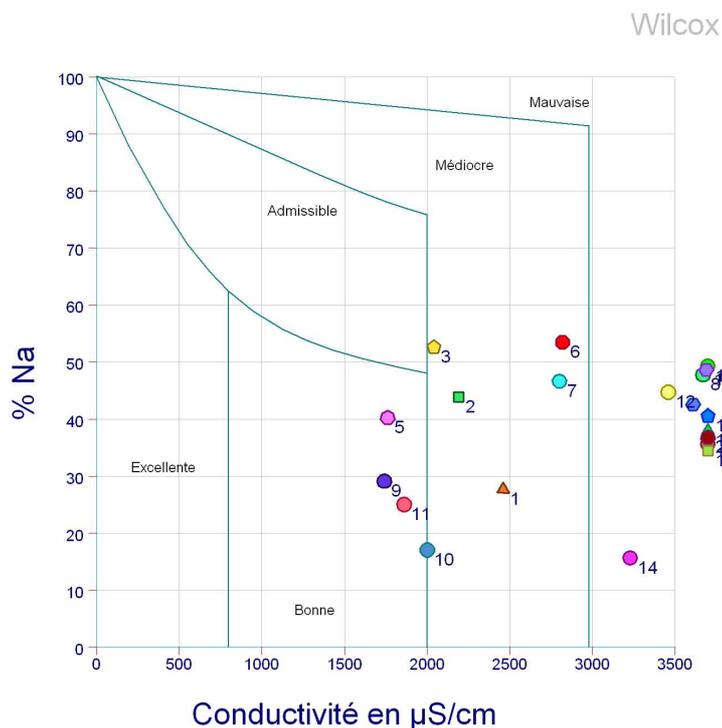


Fig. 7. Diagramme de Wilcox

LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE (CE)

Les résultats de la conductivité électriques obtenus montrent que les valeurs de la CE des eaux de la nappe sont élevées à très élevées qui peut atteindre 8000 $\mu\text{S/cm}$ d'où une salinité excessive (tableau 6 et 9). Les valeurs très élevées sont situées au nord et à l'est de la zone d'étude (figure 8.a).

Tableau 6. Qualité de l'eau d'irrigation basée sur la conductivité électrique

CE ($\mu\text{S/cm}$)	Classe d'eaux	Caractéristiques	échantillons
0-250	Faible	À faible salinité de l'eau peut être utilisée pour l'irrigation sur la plupart des sols avec risque faible de la salinité du sol va se développer.	---
251-750	Moyen	L'eau à moyenne salinité peut être utilisée pour l'irrigation, si un drainage modéré se produit.	---
751-2,250	Elevée	Eau à haute salinité ne convient pas pour une utilisation sur le sol avec un drainage restreint. Même avec un drainage adéquat, la gestion spéciale pour le contrôle de la salinité peut être nécessaire.	2, 3, 5, 9, 10, 11
> 2,250	Très élevée	Eau à très forte salinité, n'est pas appropriée pour l'irrigation dans des conditions normales.	1, 4, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20

ALCALINITE RESIDUELLE DES EAUX (RSC)

Les valeurs de RSC calculées dans les échantillons d'eau souterraine de la zone d'étude se trouvent entre -7.5 et -65.28 avec une moyenne de -24,05 (tableau 9). Toutes les valeurs sont inférieures à 1.25 meq/L, ce qui révèle que tout le site d'échantillonnage est bon à des fins d'irrigation (figure 8.f).

RSC négatif indique que l'accumulation de sodium est peu probable puisque le calcium et le magnésium sont au-delà de ce qui peut être précipité sous forme de carbonates (tableau 5).

Tableau 7. Qualité de l'eau souterraine basée sur l'alcalinité résiduelle des eaux [33]

RSC	Classe d'eaux	échantillons
< 1,25	Bonne	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15-16-17-18-19-20
1,25 – 2,5	Médiocre	---
>2,5	Mauvaise	---

INDICE DE PERMÉABILITÉ (IP)

L'indice de perméabilité calculé pour les échantillons d'eaux dans notre étude se trouve entre 19,38 et 60,75% avec une moyenne de 43,69 (tableau 9). Si la valeur de IP est inférieure à 25, l'échantillon relève la classe médiocre qui indique que l'eau souterraine n'est pas adaptée pour l'irrigation. Les eaux de la classe bonnes, IP est entre 25 et 75. Les échantillons avec IP supérieur à 75 sont classés comme excellente pour l'irrigation. Le calcul de ce paramètre montre clairement que 90% des échantillons d'eaux sont bons pour l'irrigation (tableau6, figure 8.c).

Tableau 8. Qualité de l'eau souterraine basée sur l'indice de perméabilité [37]

IP	Classe d'eaux	Puits représentatifs
<25	Médiocre	10 - 14
25 - 75	Bonne	1-2-3-4-5-6-7-8-9-11-12-13-15-16-17-18-19-20
>75	excellente	---

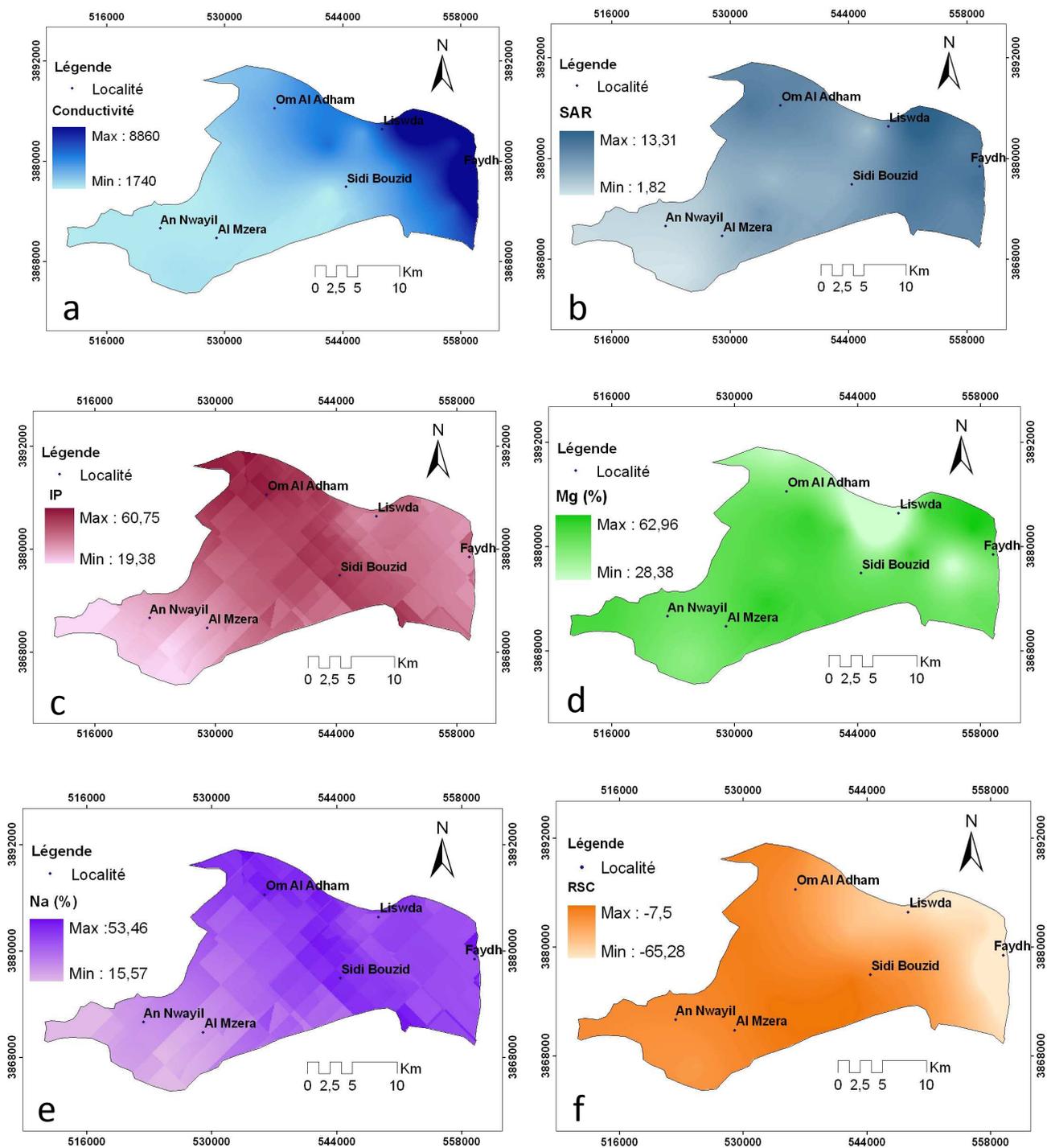


Fig. 8. La répartition spatiale des paramètres de qualité de l'eau d'irrigation dans la plaine de Sidi Bouzid : (a) CE, (b) SAR, (c) IP, (d) Mg%, (e) Na% et (f) RSC

ELABORATION DE CARTE DE QUALITE D'EAU POUR L'IRRIGATION

Les classes de qualité des eaux définies dans cette étude ont été cartographiées. Pour obtenir la carte finale de qualité on a fait recours à la superposition des différents cartes obtenues des six paramètres déjà traités auparavant, on a attribué un poids à chaque paramètre afin de connaître le paramètre régissant le plus la qualité des eaux pour l'irrigation.

L'attribution des poids aux paramètres repose sur l'analyse statistique des six paramètres. Les résultats de cette analyse statistique de ces six paramètres sont présentés sous forme de minimum, maximum, moyenne, écart-type et coefficient de variation (tableau 9). Le tableau 9 montre que le paramètre le plus élevé est la conductivité électrique (moyenne =3702,5). Basés sur les valeurs moyennes, ces paramètres sont classés dans l'ordre d'abondance suivant $CE > \%Mg > IP > \%Na > SAR > RSC$. Ce qui indique que le paramètre CE représente le grand risque sur la qualité des eaux.

En examinant le coefficient de variation (qui permet des comparaisons lorsque les unités de mesure sont différents) calculé pour chaque paramètre (tableau 9), on peut retenir une idée sur le degré de variation de la qualité des eaux imposé par chaque paramètre, on déduit que :

Le paramètre alcalinité résiduelle des eaux (RSC) contribue énormément à la variabilité de la qualité des eaux (62,65%) suivi par la conductivité électrique (53,17%) et Le rapport d'adsorption du sodium (SAR) (44,25 %). Les paramètres les plus statiques et qui ne contribuent pas beaucoup sur la qualité des eaux sont le pourcentage de sodium (28,52%), l'indice de perméabilité (25,35%) et le pourcentage en magnésium (13,94%).

On attribuant à chaque paramètre le poids convenable (tableau 10) quatre classes sont représentées sur la carte finale de la qualité (figure 9). L'intersection des cartes de répartition spatiale de ces paramètres donne une carte qui varie de l'excellente, bonne, médiocre à mauvaise eaux à l'irrigation successivement en allant du Sud Ouest (zone de recharge) vers le Nord (zone des dépressions salines). Selon les résultats obtenus 48,75% de la superficie de la plaine ont des eaux excellentes pour l'irrigation, 26,71% est bonne, 13,60 est médiocre et 10,94% n'est pas adaptée pour l'irrigation qui sont de mauvaise qualité dont ils ont une superficie respectivement d'environ 312 ; 171 ; 87 et 70 km².

Tableau 9. Statistique des paramètres indice de qualité d'eau d'irrigation

	COND	SAR	%Na	RSC	%Mg	IP
Maximum	8860	13,31	53,46	-7,5	62,96	60,75
Minimum	1740	1,82	15,57	-65,28	28,38	19,38
moyenne	3702,5	6,73	38,46	-24,05	55,17	43,69
Ecat-type	1968,83	2,98	10,96	15,06	7,69	11,07
Coefficient de variation (%)	53,17	44,25	28,51	62,65	13,94	25,35

Tableau 10. Poids des six paramètres indice de qualité d'eau pour l'irrigation

Paramètres indice de qualité	Poids
CE : conductivité électrique	2
SAR : rapport d'adsorption du sodium	1
RSC : alcalinité résiduelle des eaux	2
Na% : pourcentage en sodium	1
Mg% : pourcentage de magnésium	1
IP : indice de perméabilité	1

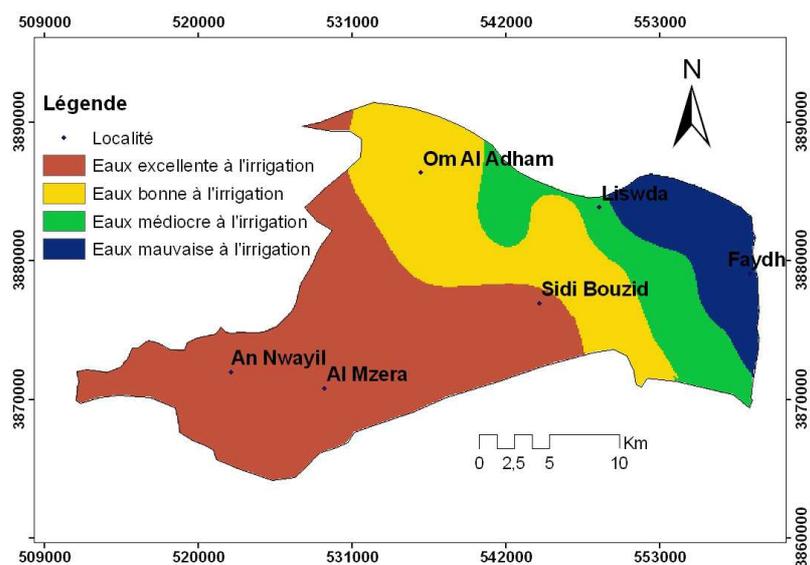


Fig. 9. La carte de qualité pour l'irrigation de l'aquifère phréatique de la plaine de Sidi Bouzid

5 CONCLUSION

L'étude hydrochimique des eaux souterraines de l'aquifère de la plaine de Sidi Bouzid a permis de caractériser cette ressource naturelle. Les analyses physicochimiques montrent que les eaux sont basiques et minéralisées dans l'ensemble. Les eaux de la région se regroupent autour de deux principales familles d'eaux dont les eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes qui sont les plus rencontrées. La caractérisation hydrochimique a permis de montrer que les différents processus responsables de l'acquisition du chimisme des eaux souterraines sont principalement : le temps de séjours des eaux en contact avec l'encaissant, l'interaction ; la dissolution/précipitation des minéraux et d'une manière moindre l'infiltration des substances liées aux activités anthropiques. La plupart des eaux souterraines de la nappe phréatique de la zone d'étude sont légèrement sur-saturées vis-à-vis aux minéraux carbonatés (Aragonite, calcite et la dolomite) indiquant leur précipitation dans l'aquifère. Quelques échantillons sont sous-saturés par rapport aux minéraux carbonatés indiquant que ces minéraux peuvent se dissoudre par les eaux souterraines agressives. Les eaux souterraines sont sous-saturées en minéraux sulfatés (gypse, l'anhydrite et halite), indiquant que plus de minéraux de sulfate vont se dissoudre en augmentant leur état de saturation.

L'analyse en composante principale a montré que l'étude de la minéralisation des eaux souterraines étudiées dépend de trois facteurs principaux. Les écarts exprimés sont respectivement 59,66%, 18,77% et 8,60% pour la F1, F2 et F3. Les trois premiers facteurs (F1-F2-F3) comptent pour 87,04% et étaient suffisants pour l'étude. Le facteur 1 est essentiellement indiqué par la minéralisation totale, par les éléments majeurs chlore, sodium, Magnésium, potassium et sulfates et par les Traces cadmium, plomb et manganèse. Le facteur 2 est illustré par le zinc et le calcium. Le troisième facteur est recommandé par le fer et les bicarbonates. L'illustration graphique dans les plans factoriels a montré deux classes. La première catégorie comprend les échantillons d'eau avec la TDS la plus élevée dont l'acquisition ionique est contrôlée par le temps de séjour et la minéralisation et des teneurs en sulfates, en calcium et en manganèse. La deuxième classe contient les eaux modérément minéralisées. Elle est le plus souvent caractérisée par les valeurs de TDS qui sont les plus faibles. Les résultats obtenus à partir de l'APC confirment que les variables responsable de la minéralisation de l'eau sont principalement liées à la TDS et aux espèces ioniques en solution (SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Cl^- , Na^+ , K^+ et Ca^{2+}) et les éléments traces sont liées à des origines industrielles.

La pertinence des eaux souterraines à des fins d'irrigation a été évaluée à partir de six paramètres de qualité la conductivité électrique (CE), le pourcentage de magnésium (%Mg), indice de perméabilité (IP), le rapport d'adsorption du sodium (SAR), pourcentage en sodium (%Na) et de l'alcalinité résiduelle des eaux (RSC). 48,75% des eaux de cet aquifère sont excellente à l'irrigation qui sont situées à l'Ouest de la zone d'étude, pour le reste de l'aquifère il est souhaitable que ces eaux soient sous surveillance périodique.

Le modèle proposé, développé à l'aide de SIG, permet d'identifier facilement et localiser les risques potentiels liés à la qualité de l'eau d'irrigation à l'échelle régionale en vue de prendre des mesures préventives et correctives, ce qui nécessite une gestion prudente à l'échelle de l'exploitation

REFERENCES

- [1] N. Galoul, "Water resources and management in Tunisia," *International Journal of Water*, n°6, pp. 92- 116, 2011.
- [2] N. Gaaloul, "Gestion intégrée des ressources en eaux souterraines : cas de la plaine du Cap Bon," *La houille blanche*, no.5, pp. 38 – 44, 2008.
- [3] R. Koschel and M. Zarrouk, "Etude hydrogéologique préliminaire de la nappe phréatique de Sidi Bouzid". *DGRE, Tunis, Rapport interne*, 47p, 1976.
- [4] C. Jeong, "Mineral-water interaction and hydrogeochemistry in the Samkwang mine area, Korea," *Geochemical Journal*, no. 35, pp. 1 – 12, 2001.
- [5] W. Aydi, S. Saidi, M. Chalbaou, S. Chaibi, H. Ben Dhia, "Evaluation of the Groundwater Vulnerability to Pollution Using an Intrinsic and a Specific Method in a GIS Environment: Application to the Plain of Sidi Bouzid (Central Tunisia)," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 2013, no. 38, pp. 1815 – 1831, 2013.
- [6] A. M'Rabet, "Le crétacé inférieur en Tunisie," *Thèse Doc., Univ. Paris VI, France*. 78p, 1973.
- [7] J. Ouali, "Structure et évolution géodynamique du chaînon Nara- Sidi Khalif (Tunisie centrale)," *Thèse Doc., Univ. Rennes-I, France*, 234p, 1984.
- [8] A. Kadri, "Evolution tectonosédimentaire (Aptien-Quaternaire) des Jebels Koumine, Hamra et Lessouda (Tunisie centrale)," *Thèse Doc., Univ. Paris Sud, Centre d'Orsay, France*. 183p, 1988.
- [9] M. Rabhi, "Contribution à l'étude stratigraphique et analyse de l'évolution géodynamique de l'Axe Nord-Sud et des structures avoisinantes (Tunisie centrale)," *Thèse Doc., Fac. Sci. Tunis, Tunisie*, 238p, 1999.
- [10] L. Dassi, "Etude hydrogéologique, hydrochimique et isotopique du système aquifère du bassin de Sbeitla (Tunisie centrale)," *Thèse Doc., Fac. Sci. Sfax, Tunisie*, 324p, 2004.
- [11] H. Azaiez, H. Gabtni, I. Bouyahya, D. Tanfous, S. Haji, M. Bedir, "Lineaments Extraction from Gravity Data by Automatic Lineament Tracing Method in Sidi Bouzid Basin (Central Tunisia): Structural Framework Inference and Hydrogeological Implication," *International Journal of Geosciences*, vol. 2, no.4, pp. 373-387, 2011.
- [12] A.M. Piper, "A graphical procedure in the geochemical interpretation of water," *Trans Am Geophys Union*, pp. 914–928, 1944.
- [13] H. Schoeller, "Geochemistry of groundwater. In Groundwater studies," *An international guide for research and practice, UNESCO, Paris*, 18p, 1977.
- [14] S. Sabljak, "Hydrochimie et hydrodynamique de la nappe phréatique au Noger Sud oriental," *Diplôme des études approfondies, Univ. Paris Sud, France*, 187p, 1998.
- [15] I. Chenini, A. Ben Mammou, "Hydrochimie et caractérisation qualitative des ressources en eaux d'un système aquifère multicouche en zone aride : application au bassin de Maknassy (Tunisie centrale)," *Sécheresse*, vol. 20, no. 2, pp. 217-222, 2009.
- [16] P. Bhattacharya, O. Sracek, B. Eldvall, R. Asklund, G. Barmen, G. Jacks, J. Koku, J.E. Gustafsson, N. Singh, B. Brokking Balfors, "Hydrogeochemical study on the contamination of water resources in a part of Tarkwa mining area, Western Ghana," *Journal of African Earth Sciences*, Elsevier, pp. 72-84, 2012.
- [17] B.J. Merkel, P.F. Britta, "Groundwater Geochemistry : A practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems," *Springer*, 208p, 2002.
- [18] D.L. Parkhurst, C.A.J. Appelo, "Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3-A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical calculations," *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, 497p, 2013.
- [19] G. Qian, G. Gabor, R. P. Gupta, "Principal components selection by the criterion of the minimum mean difference of complexity," *Journal of Multivariate Analysis*, vol. 49 pp. 55-75, 1994.
- [20] V. Cloutier, R. Lefebvre, R. Therrien, M.M. Savard, "Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydro-geochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system," *Journal of Hydrology*, vol. 353, no. 3, pp. 294-313, 2008.
- [21] A. Baccini, "Statistique Descriptive Multidimensionnelle". *Publications de l'Institut de Mathématiques de Toulouse*, 33p, 2010.
- [22] F. Hamzaoui-Azaza, R. Bouhlila, M. Gueddari, "Geochemistry of fluoride and major ion in the groundwater samples of Triassic aquifer (South Eastern Tunisia), through multivariate and hydrochemical techniques," *Journal of Applied Sciences Research*, vol. 5, no. 11, pp. 1941–1951, 2009.

- [23] K. A. Michel, Y. K. Alphonse, A.A. Yves, B. Jean, "Application of statistical and Hydrochemical methods to the analysis of the groundwater in the Guiglo-Duekoué area (Western area of Ivory Coast)," *International journal of geomatics and geosciences*, vol. 2, no. 4, pp. 939-952, 2012.
- [24] R. Santos, L. Ribeiro, A. Carvalho Dill, "The use of multivariate statistical analysis to evaluate spatial and temporal water contamination in Germunde coal mine (Portugal)," *The 9th International Mine Water Congress*, pp. 439- 450, 2005.
- [25] M. Ben Alaya, S. Saidi, T. Zemni, F. Zargouni, "Suitability assessment of deep groundwater for drinking and irrigation use in the Djefara aquifers (Northern Gabes, south-eastern Tunisia)," *Environmental Earth Sciences*, vol. 71, pp. 9 -41, 2013.
- [26] S. Amrani, S. Hinaje, "Utilisation des analyses hydrogéochimiques et des analyses en composantes principales (A.C.P) dans L'explication du chimisme des eaux souterraines de la Nappe plio-quadernaire entre Timahdite et Almis Guigou (moyen atlas, maroc)," *ScienceLib Editions Mersenne*, no. 6, pp. 1-14, 2014.
- [27] A. Mustapha, A. Z. Aris, "Multivariate statistical analysis and environmental modeling of heavy metals pollution by industries," *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 21, no. 5, pp. 1359 – 1367, 2012.
- [28] Y. Nazzal, F. K. Zaidi, I. Ahmed, H. Ghrefat, M. Naeem, N. S.N. Al-Arifi, S. A. Al-Shaltoni, K. M. Al-Kahtany, "The combination of principal component analysis and geostatistics as a technique in assessment of groundwater hydrochemistry in arid environment," *Current Science*, vol. 108, no. 6, pp. 1138- 1145, 2014.
- [29] G. Huang, Z. Chen, J. Sun, "Water quality assessment and hydrochemical characteristics of groundwater on the aspect of metals in an old town, Foshan, south China," *Journal of Earth System Science*, vol. 123, no. 1, pp. 91 – 100, 2014.
- [30] M. Usman, R. Liedl , U.K. Awan, "Spatio-temporal estimation of consumptive water use for assessment of irrigation system performance and management of water resources in irrigated Indus Basin, Pakistan," *Journal of Hydrology*, vol. 525, pp. 26-41, 2015.
- [31] J. L. Costa, V. C. Aparicio, "Quality assessment of irrigation water under a combination of rain and irrigation," *Agricultural Water Management*, vol. 159, pp 299-306, 2015.
- [32] T. Subrahmani, L. Elango, S.R. Damodarswamy, "Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Chithar river basin, Tamil Nadu, India," *Environmental Geology*, vol. 47, pp. 1099– 1110, 2005.
- [33] L. A. Richards, "(US Salinity Laboratory) Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils," *US Department of Agriculture hand book*, 60p, 1954.
- [34] G. Narasimha, A. Sridevi, V. Buddolla, C.M. Subhosh, R. B. Rajasekhar, "Nutrient effects on production of cellulolytic enzymes by *Aspergillus niger*," *African Journal of Biotechnology*, vol. 5, no. 5, pp. 472- 476, 2006.
- [35] H. M. Raghunath, "Ground Water, 2nd Edition" *New age international publishers*, 522p, 2003.
- [36] M. Vasanthavigar, K. Srinivasamoorthy, K. Vijayaragavan, R. Rajiv Ganthi, S. Chidambaram, P. Anandhan, S. Vasudevan, "Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India," *Environnementan Monitoring and Assessment*, vol.171, pp. 595-609, 2010.
- [37] L. D. Doneen, "Notes on water quality in agriculture," Water Science and Engineering Paper, *University of California*, 1964.
- [38] R. S. Ayers, D. W. Westcot, "Water quality for agriculture FAO irrigation and drain," no. 29, 109 p,1985.
- [39] G. Udayalaxmi, D. Himabindu, G. Ramadass, "Geochemical evaluation of groundwater quality in selected areas of Hyderabad. AP, India," *Indian Journal of Science and Technoogy*, vol. 3, no. 5, pp. 546-553, 2010.