



Aptitude des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Sidi El Hani à l'irrigation (Centre-Est de la Tunisie) (Ability of groundwater of the basin of Sidi El Hani for irrigation (Center East of Tunisia))

S. M'nassri¹, L. Dridi¹, A. El Amri¹, M. Hachicha², R. Majdoub^{1*}

¹ *Département du Génie des Systèmes Horticoles et du Milieu Naturel. Université de Sousse, Institut Supérieur Agronomique de Chott Meriem, Tunisie.*

² *Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts, Ariana, Tunisie.*

Received 16 May 2016, Revised 28 Jun 2016, Accepted 01 Jul 2016

**Corresponding author. E-mail: rmajdoub@yahoo.com; Tel: (+216 23 228 230)*

Résumé

Dans la plaine d'Ouled Chamekh, la nappe phréatique de la cuvette de Sidi El Hani constitue la principale source d'approvisionnement en eau pour l'irrigation. Cette nappe est largement menacée par la salinisation qui constitue une contrainte majeure pour le développement de l'agriculture dans la région de Mahdia (Tunisie centrale). Une caractérisation hydrochimique des eaux de cette nappe a été réalisée suite à des prélèvements d'échantillons au niveau de 49 puits pendant les mois de Mars et Avril 2015. Les analyses des eaux ont permis d'établir les faciès chimiques et leur classification selon l'abaque de Stuyfzand et d'en déduire l'aptitude de ces eaux à l'irrigation et les risques de salinisation. Les résultats ont permis de distinguer deux faciès chimiques : un faciès chloruré-sodique et un faciès mixte chloruré et sulfaté calcique et magnésien. La classification de Stuyfzand a indiqué que les eaux sont saumâtres-salées avec une alcalinité modérément élevée. Concernant leur aptitude à l'irrigation, les eaux ont une minéralisation moyenne dans la partie Ouest de la plaine et une forte minéralisation associée à des risques salin et alcalin élevés aux alentours d'Oued Chérta, de sebkha Chérta et de sebkha Sidi El Hani.

Mots clés: Salinisation, Eaux souterraines, Faciès géochimiques, Classification de Stuyfzand, Mahdia, Tunisie.

Abstract

In the plain of Ouled Chamekh, groundwater of Sidi El Hani is the main supply source for irrigation. It is widely threatened by salinization, which represent a major constraint for the development of agriculture in Mahdia region (Central Tunisia). An hydrochemical characterization of groundwater was carried out on the basis of water samples collected at 49 wells during the months of March and April 2015. The water analyses have allowed the determination of the chemical facies and their classification according to the Stuyfzand abacus and deduce therefrom the suitability of the waters for irrigation and risk of salinization. Results have identified two chemical facies: a chlorinated-sodium facies and a mixed chlorinated and sulfated calcium and magnesium. Stuyfzand classification indicated that the waters are brackish and salty with an alkalinity moderately high. Regarding their ability to irrigation, waters showed a moderate mineralization in the Western part of the plain and a strong mineralization associated with high saline and alkaline risks around Oued Cherita, sebkha Cherita and sebkha Sidi El Hani.

Keywords: Salinization, Groundwater, Geochemical Facies, Stuyfzand classification, Mahdia, Tunisia.

Introduction

En milieux arides et semi-arides, la rareté des ressources hydriques fait naître un risque majeur de pénurie [1, 2] qui s'accroît face à la pression démographique et aux besoins économiques croissants notamment le

développement agricole [3, 4, 5]. L'utilisation des eaux en agriculture est une nécessité pour assurer les besoins alimentaires [6, 7]. Cependant, l'insuffisance en eaux de surface et la surexploitation des ressources souterraines en eau entraîne la salinisation de ces eaux [8, 9, 10, 11].

En Tunisie, la salinisation est un aspect majeur de la dégradation de la qualité des aquifères, générée par plusieurs processus à savoir : la dissolution des roches [12], l'intrusion marine dans les zones côtières [13, 14, 15], la remontée des eaux salées par les aquifères sous-jacents [16, 17] et l'évaporation et le retour des eaux d'irrigation [18, 19]. Dans la région de Mahdia (Centre Est de la Tunisie), les ressources en eaux sont rares et de mauvaise qualité. La délégation d'Ouled Chamekh, située dans le Nord-Ouest de Mahdia, a connu un essor socio-économique engendré par l'intensification agricole avec le recours à l'irrigation. Après quelques années, la nappe phréatique de la cuvette de Sidi El Hani, située entre deux sebkhas, celle de Sidi El Hani et celle de sebkha Chérита, accuse des signes de détérioration par la salinisation des eaux.

Face à cette problématique, l'Etat tunisien a retenu la valorisation optimale des ressources en eaux [20] dont la connaissance de la qualité des aquifères et l'évaluation des possibilités de leur utilisation pour l'irrigation [21, 22, 23, 24]. C'est dans ce cadre d'idée, que la présente étude a été entreprise dans la plaine d'Ouled Chamkeh.

2. Matériel et méthodes

2.1. Site d'étude

Le site d'étude est localisé au Nord-Ouest du Gouvernorat du Mahdia en Tunisie centrale entre les latitudes $10^{\circ}10'$ et $10^{\circ}25'$ E et les longitudes $35^{\circ}12'$ et $35^{\circ}35'$ N (Figure 1). S'étendant sur une superficie de 346 km^2 , la plaine d'Ouled Chamekh est limitée par la délégation de Sidi Amor Bouhajla à l'Ouest (Gouvernorat de Kairouan), au Nord-Est par la sebkha Sidi El Hani et au Sud par les délégations de Souassi, Chorbane et de Hbira et par sebkha Chérита.

La région possède un bioclimat aride supérieur tempéré avec des précipitations variables dans le temps et l'espace. La moyenne annuelle de la pluviométrie est de l'ordre de 270 mm/an [25]. La température varie entre 9°C (au mois de Janvier) et 33°C (aux mois de Juillet et Août). Sur le plan hydrographique, la zone d'étude est caractérisée par un réseau d'oueds endoréiques peu développé composé essentiellement par Oued Cherita reliant sebkha Cherita à celle Sidi El Hani.



Figure 1 : Localisation du site d'étude

2.2. Contextes géologique et hydrogéologique

Selon la carte géologique au 1/50000 (feuille No 72), les séries stratigraphiques qui affleurent dans la zone d'étude s'étalent du Mio-Pliocène au Quaternaire [26, 27, 28, 29]. De point de vue hydrogéologique, la nappe d'étude est un aquifère superficiel logé dans le Mio-Plio-Quaternaire. Elle s'étend sur toute la plaine et elle est connue sous le nom de la nappe phréatique de la cuvette de Sidi El Hani. Le niveau de cet aquifère varie, en moyenne, de 3 à 26 m par rapport au sol. Il est formé dans les formations argilo-sableuses du Mio-Pliocène et dont l'alimentation est assurée en partie par l'infiltration des eaux de pluie et/ou par la drainance des nappes sous-jacentes.

2.3. Contexte pédologique

Sur le plan pédologique, la région d'Ouled Chamekh est caractérisée par cinq types de sols (Figure 2). Les sols halomorphes sont situés au Nord de la plaine, ils occupent généralement les fonds des dépressions, avec une texture dégradée. Les sols isohumiques châtiens sont relativement profonds avec une profondeur qui varie de 60 à 100 cm et une texture dominée par le sable et le limon. Ces sols sont relativement riches en matière organique et favorables à l'exploitation agricole. Ils reposent sur une substitution formée de limon à nodule quaternaire. Les sols peu évolués d'apport se développent sur un substratum argileux. Ils ont une profondeur qui varie de 70 à 120 cm, une texture sablo-limoneuse et ils sont pauvres en matière organique. Les sols minéraux bruts, au Sud-Ouest, sont de faible épaisseur, de texture dominée par le sable grossier et ils sont pauvres en matière organique. Les sols bruns calcaires sont peu profonds, de 15 à 30 cm et reposent sur une croûte calcaire. La texture est très variable, allant du sablo-argileux au argilo-sableux caractérisée par une charge caillouteuse en surface et une faible teneur en matière organique.

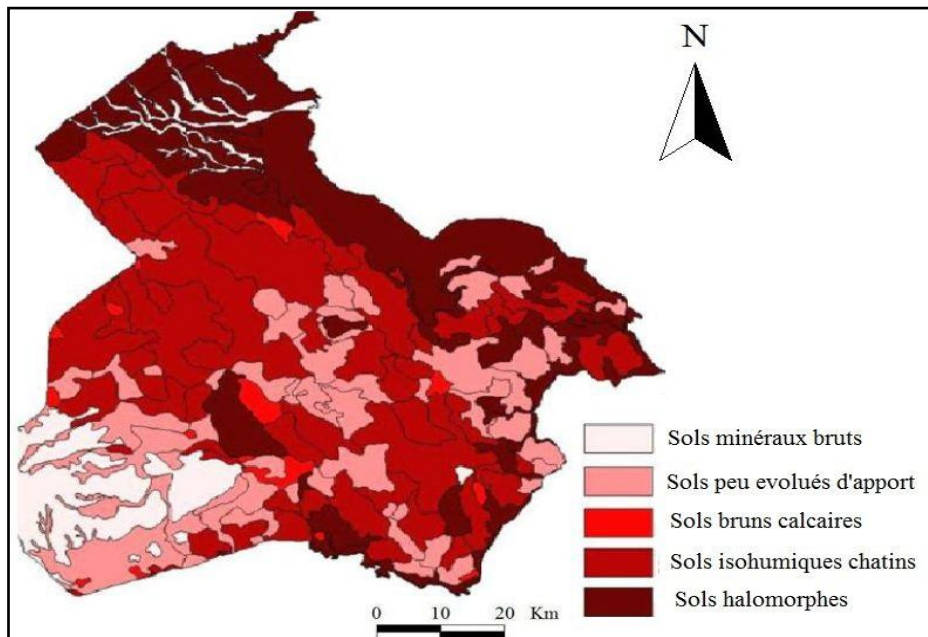


Figure 2 : Carte pédologique de la plaine d'Ouled Chamekh [établie à partir de 29]

2.4. Utilisation des terres

L'utilisation des terres dans la plaine d'Ouled Chamekh est liée principalement aux types des sols. Les sols sont généralement de texture sablo-limoneuse à sablo-argilo-limoneuse en profondeur. La carte d'occupation des sols, présentée dans la figure 3, établie à partir de la carte agricole de la Tunisie, a montré que l'olivier est la culture dominante (environ 75% de la superficie totale). Des cultures maraichères de printemps et d'été sont cultivées, également, en intercalaire avec les oliviers. Ces cultures sont irriguées avec les eaux souterraines. Aux alentours des sebkhas Sidi El Hani et Chérta, les sols possédant une nappe superficielle salées sont colonisés par des halophytes.

2.5. Echantillonnage et analyses physico-chimiques

Une campagne d'échantillonnage a été effectuée au niveau de 49 points d'eaux pendant les mois de Mars et Avril 2015 (Figure 4). Le prélèvement des eaux a été effectué selon la norme ISO 5665 pour l'analyse des paramètres physiques et chimiques. Le pH, la température (T) et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés sur le terrain à 25°C. Les analyses chimiques en éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- et SO_4^{2-}) ont été effectuées à l'Institut Supérieur Agronomique de Chott Meriem (ISA-CM) et à l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF). Les concentrations en Cl^- et HCO_3^- ont été dosées par Titrimétrie. Le Ca^{2+} et le Mg^{2+} ont été déterminés par Complexométrie. Le Na^+ et le K^+ ont été analysés à l'aide d'un spectrophotomètre à flamme et le SO_4^{2-} a été déterminé par un spectrophotomètre calorimétrique [30]. Les résultats des analyses chimiques ont permis de calculer le Bilan Ionique (BI) selon l'équation 1, avec une erreur admissible ne dépassant pas 5% [31] :

$$BI (\%) = \left[\frac{(\sum \text{cations} - \sum \text{anions})}{(\sum \text{cations} + \sum \text{anions})} \right] * 100 \text{ Eq.1}$$

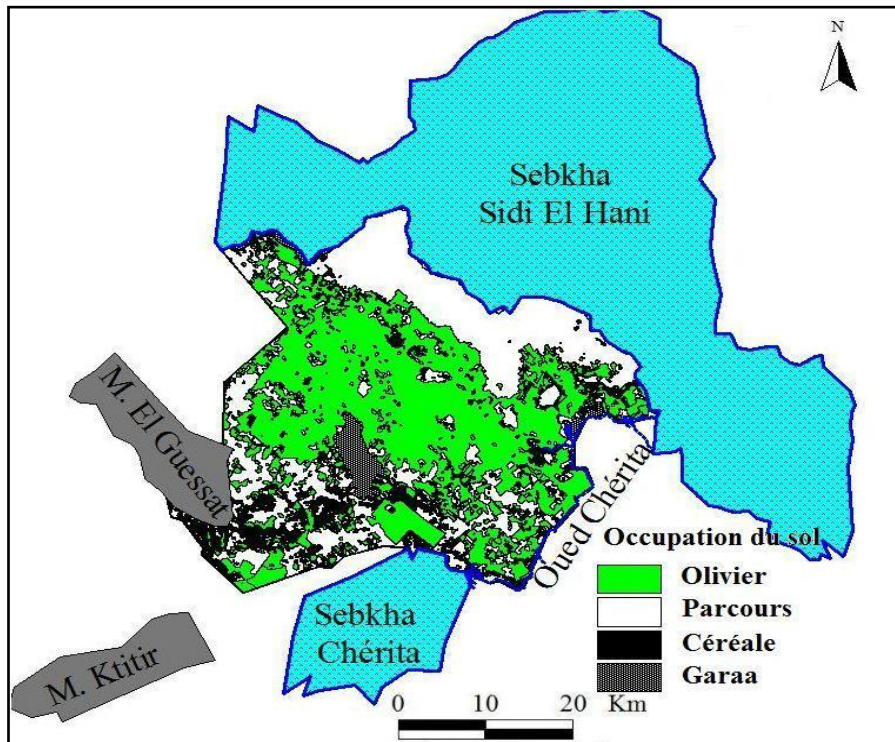


Figure 3 : Carte d'occupation du sol de la plaine d'Ouled Chamekh [établie à partir de 29]

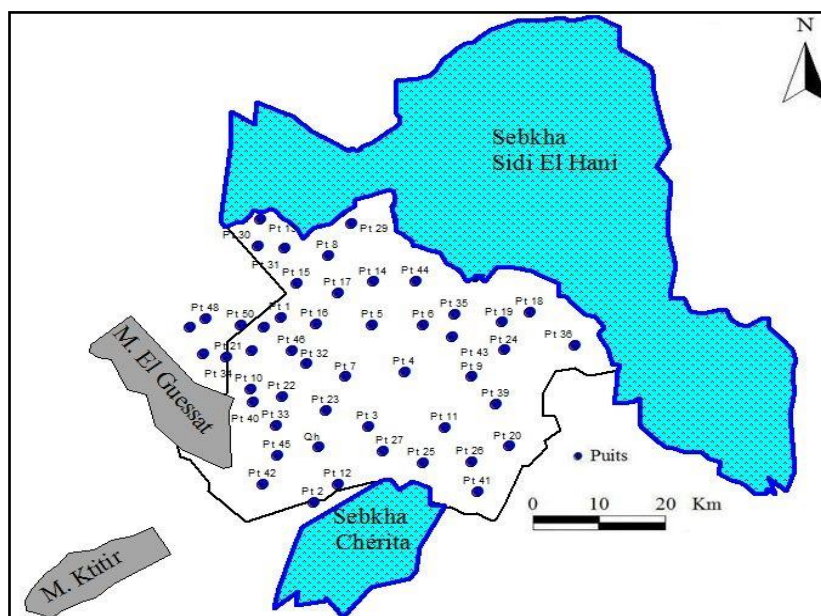


Figure 4 : Localisation des points d'échantillonnage

2.6. Méthodes hydrochimiques

Les méthodes hydrochimiques de caractérisation et de classification des eaux adoptées dans cette étude reposent essentiellement sur le diagramme de Piper [32] et la classification de Stuyfzand [33]. Le diagramme de Piper permet de représenter les faciès cationique, anionique et global. La classification de Stuyfzand est utilisée pour déterminer les caractéristiques chimiques à savoir le type principal, le type, le sous-type et la classe. Le type principal et le type sont déterminés sur la base de la teneur en chlorure et de l'indice de l'alcalinité. La

classification en sous-type est déterminée à partir des cations et des anions dominants. La classe est déterminée à partir de la somme de Na^+ , K^+ et Mg^{2+} [34] en s'appuyant sur l'équation 2 de Stuyfzand qui calcule l'Indice d'Echange de Base (IEB) pour un aquifère dolomique.

$$\text{IEB} = \text{Na} + \text{K} - 0,8768 \text{ Cl} \quad \text{Eq.2}$$

2.7. Méthodes qualitatives

Les paramètres qualitatifs utilisés, en plus de la conductivité électrique (CE), pour évaluer la qualité des eaux souterraines pour des fins d'irrigation sont exposés dans le tableau 1. Il s'agit du pourcentage de Sodium (Na%), du Taux d'Adsorption du Sodium (SAR), du taux d'Adsorption du Magnésium (MAR), de l'Indice de Perméabilité (IP), et du Carbonate de Sodium Résiduel (RSC).

Le choix d'une eau pour l'irrigation dépend de la concentration totale de sels solubles évaluée par la CE. Une salinité élevée peut être préjudiciable à la croissance des plantes [35]. Le Na% a été évalué par l'équation 3 [36]. Le calcul de ce pourcentage permet d'apprécier la dégradation éventuelle de la structure du sol et l'altération de ses propriétés [37]. Un excès de sodium ($\text{Na}\% > 80$) peut également être à l'origine de toxicité chez certaines plantes. Le SAR a été déterminé par l'équation 4 [38]. Le rapport de MAR (équation 5) met en évidence l'importance du magnésium pour le sol et la plante. Il est considéré comme un élément indispensable lorsque le MAR est inférieur à 50. Dans le cas contraire, cet élément chimique devient nuisible [36]. L'IP a été calculé par l'équation 6 [39]. Ainsi, trois classes ont été retenues. Les classes I et II, avec un maximum de 75% définissent une bonne aptitude des eaux à l'irrigation. Cependant la classe III regroupe les points ayant un IP inférieur à 25% et pour lesquels les eaux sont inappropriées à l'irrigation. Le RSC met en relief l'abondance des carbonates et des bicarbonates. Ces éléments peuvent nuire à la fertilité du sol lorsque le RSC dépasse 1,5 méq/l.

Tableau 1 : Équations d'évaluation des paramètres qualitatifs

Paramètre	Equation
Na%	$\text{Na \%} = \frac{\text{Na+K}}{\text{Na+K+Ca+Mg}} * 100 \quad \text{Eq.3}$
SAR	$\text{SAR} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{(\text{Ca+Mg})/2}} \dots\dots\dots \text{Eq.4}$
MAR	$\text{MAR} = \frac{\text{Mg}}{\text{Ca+Mg}} \quad \text{Eq.5}$
IP	$\text{IP} = \frac{\text{Na} + \sqrt{\text{HCO}_3}}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na}} * 100 \quad \text{Eq.6}$
RSC	$\text{RSC} = [(\text{HCO}_3 + \text{CO}_3) - (\text{Ca} + \text{Mg})] \quad \text{Eq.7}$

Les concentrations ioniques sont exprimées en meq/l

2.8 Régionalisation des résultats

La répartition spatiale des indicateurs d'évaluation de l'aptitude des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Sidi El Hani à l'irrigation est illustrée par des représentations graphiques sous forme de cartes d'iso-teneurs. La cartographie de la distribution spatiale de ces paramètres a été réalisée à l'aide d'un Système d'Information Géographique SIG ArcView 3.2. L'interpolation spatiale de ces paramètres est basée sur l'approche géostatistique en utilisant la méthode de krigeage qui permet une estimation linéaire avec le minimum de variance [40, 41].

3. Résultats et discussion

L'analyse des paramètres physiques et chimiques des eaux souterraines montre, dans l'ensemble, une hétérogénéité relative. En effet, le pH varie de 6,88 à 8,50 pour une moyenne d'environ 8, ce qui témoigne le caractère neutre à basique des eaux souterraines. La CE s'échelonne entre 3,75 et 12,00 dS/m, correspondant à un résidu sec, RS, variant entre 2,40 et 7,68 g/l. Pour les ions majeurs, les concentrations en sodium varient de 17,86 à 63,56 méq/l. La concentration en calcium varie entre 4,33 et 35,00 méq/l avec une moyenne de l'ordre 18 méq/l. Le magnésium s'échelonne entre 5,00 et 38,00 méq/ avec une moyenne de l'ordre de 19 méq/l. La

teneur en potassium est plus faible par rapport aux autres éléments. Elle varie de 0,36 à 1,80 méq/l avec une moyenne de l'ordre 1 méq/l. Les concentrations des anions Cl^- , HCO_3^- et SO_4^{2-} fluctuent, respectivement, entre 20,46 et 75,12 méq/l avec une moyenne de l'ordre de 44 méq/l, de 2,00 à 8,00 méq/l avec une moyenne de l'ordre de 5 méq/l et de 13,28 à 57,00 méq/l avec une moyenne de l'ordre de 29.

3.1. Classification hydrochimique

Selon les teneurs en chlorures, 6 puits présentent un type principal saumâtre de code "B" et 43 puits sont saumâtres-salés de code "b" (Tableau 2). En se basant sur la moyenne des éléments chimiques, le sous type des eaux se caractérise par la dominance des Cl^- , Na^+ , et SO_4^{2-} . Les concentrations en HCO_3^- mesurées varient entre 4 et 8 méq/l. De ce fait, l'alcalinité des eaux (types) est modérément élevée, elle est générée par la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et/ou de calcaire (CaCO_3) [42].

Tableau 2 : Classification de Stuyfzand

Type principal	Niveaux de la classification [Cl] (méq/l)	Code	Nombre des échantillons
Oligohaline	< 0,141	G	-
Oligohaline-fraiche	0,141 - 0,846	G	-
Fraiche	0,846 - 4,231	F	-
Fraiche-saumâtre	4,231 - 8,462	F	-
saumâtre	8,462 - 28,206	B	6
Saumâtre-salée	28,206 - 282,064	b	43
Salée	282,064 - 564,127	S	-
Très salée	> 564,127	H	-
Type	HCO ₃ (méq/l)		
Très faible	<0,5	*	-
Faible	0,5 – 1	0	-
Modérément faible	1 – 2	1	-
Modérée	2 – 4	2	-
Modérément élevée	4 – 8	3	49
Elevée	8 – 16	4	-
Très élevée	16 – 32	5	-
Plutôt extrême	32 – 64	6	-
Extrême	> 64	7	-
Classe	(Na+K+Mg) (méq/l)		
Déficit de (Na+K+Mg)	< $-\sqrt{1/2\text{Cl}}$	-	18
Equilibre de (Na+K+Mg)	$\geq -\sqrt{1/2\text{Cl}}$ et $\leq \sqrt{1/2\text{Cl}}$	0	-
Surplus de (Na+K+Mg)	> $\sqrt{1/2\text{Cl}}$	+	31

Pour la classe des eaux, l'équation 2 de Stuyfzand pour un aquifère dolomique a dévoilé deux classes, une classe de code (+) et l'autre est de code(-). Ces concentrations semblent être en provenance des processus de dissolution des évaporites (Halite, gypse et anhydrite) et des roches carbonatés [43], des échanges cationiques impliqués [43] ainsi que des apports des eaux d'irrigation et de fertilisants.

3.2. Faciès géochimique des eaux

La projection des points d'eaux dans le diagramme de Piper, a permis de montrer que les eaux souterraines de la cuvette de Sidi El Hani sont différents. Deux faciès géochimiques sont ressortis : un faciès mixte chloruré et

sulfaté calcique et magnésien pour la majorité des puits et un faciès chloruré sodique au niveau des points d'eaux situés au voisinage de sebkha Sidi El Hani (Figure 5). Cette variabilité de faciès met en évidence la complexité des processus hydrogéochimiques qui peuvent intervenir dans la salinisation des eaux souterraines notamment, le mélange des eaux, l'évaporation ainsi que la dissolution des roches évaporitiques tels que la halite, le gypse et l'anhydrite [9, 11].

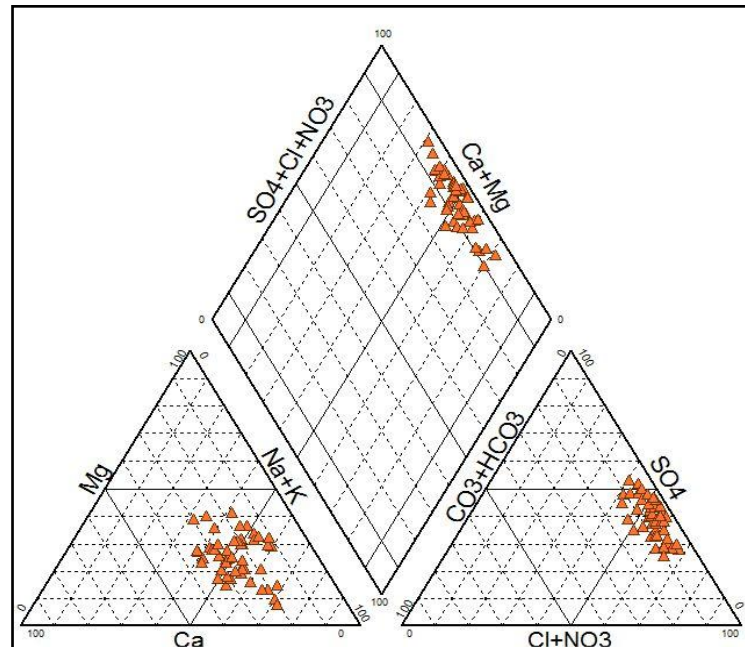


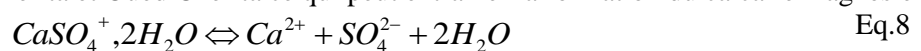
Figure 5 : Faciès géochimique des eaux souterraines de la cuvette de Sidi El Hani

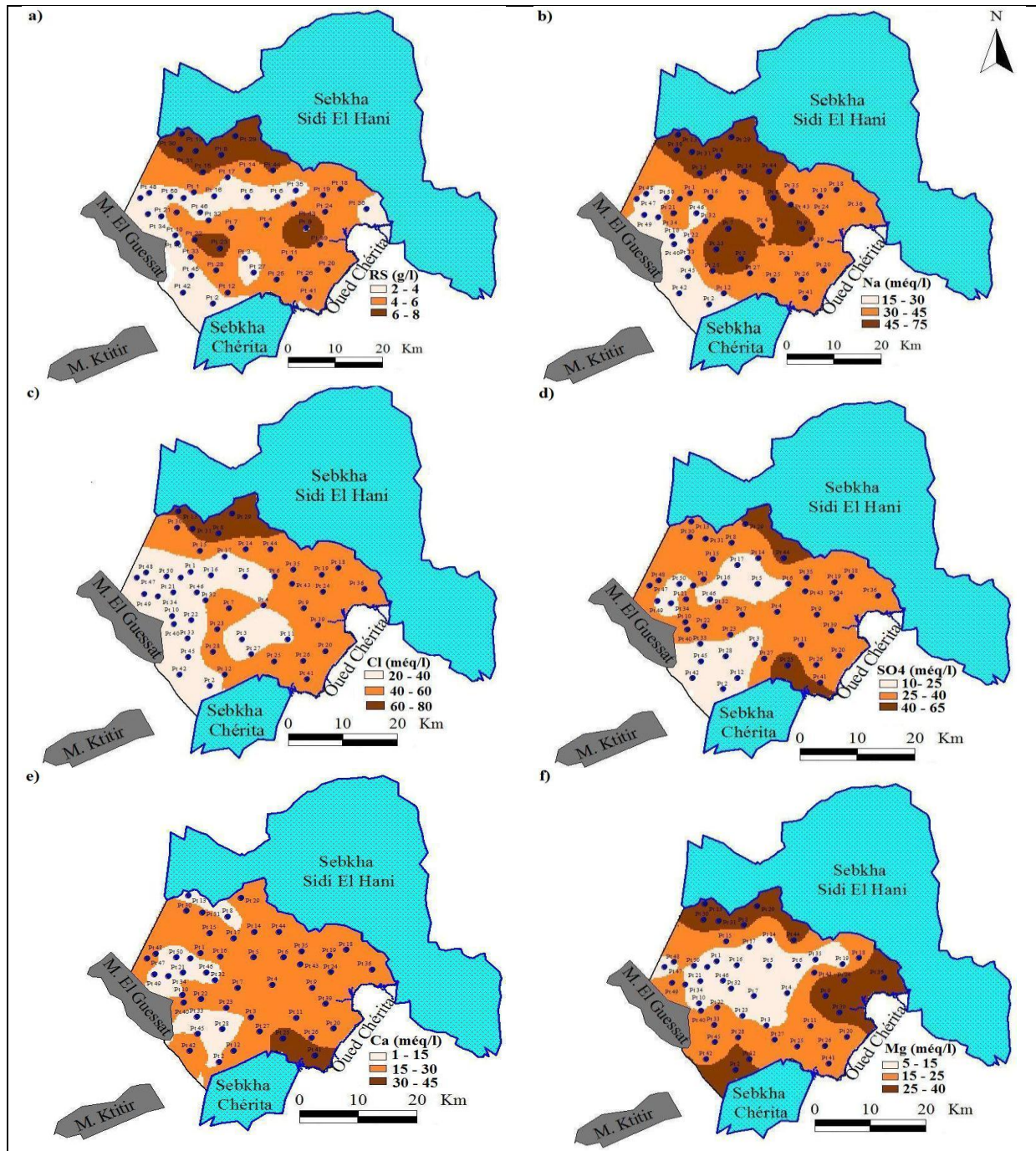
3.3. Répartition spatiale des éléments majeurs

La répartition spatiale du RS a montré une forte dispersion (Figure 6a). A l'Ouest de la délégation d'Ouled Chamekh, des valeurs de salinité relativement faibles sont observées en raison des affleurements des calcaires qui permettent une infiltration rapide des eaux de pluies [45]. En outre, à proximité de Jebel el Guessat, les puits ont des niveaux statiques assez profonds (15 m) ce qui leur procure une certaine protection vis-à-vis de l'évaporation et le retour des eaux d'irrigation [11, 46]. Cependant, les fortes concentrations sont essentiellement enregistrées dans les points situés au Nord de la cuvette de Sidi El Hani, où la salinité dépasse 6 g/l pour atteindre même 8 g/l. Pour ces points, le niveau de la nappe est proche du sol (4 m) ce qui a pour conséquence d'exposer d'avantage les eaux de la nappe à l'évaporation et à une éventuelle contamination par l'infiltration des eaux d'irrigation, qui constituent un apport important en sels. La salinisation des eaux peut être également attribuée aux marnes et aux gypses et/ou aux remontées des eaux salées piégées dans les séries sédimentaires dans les zones de captage des puits [13, 14]. De plus, la zone proche de sebkha Sidi El Hani est caractérisée par un faible gradient hydraulique, rendant la circulation des eaux très lente et favorisant l'augmentation de la concentration en sels dissous.

Les points d'eaux qui ont des fortes valeurs de RS sont majoritairement concomitantes avec celle du Na et du Cl dont les concentrations ont dépassé 50 méq/l (Figures 6b et 6c). Ces deux éléments chimiques peuvent être attribués à la dissolution des évaporites telles que la halite (NaCl). Quant à la teneur en sulfate, l'examen de la carte de répartition spatiale (Figure 6d) a relevé de fortes concentrations.

Les valeurs maximales sont enregistrées surtout au niveau des puits situés à proximité de sebkha Sidi El Hani et sebkha Chérta où les teneurs s'élèvent à 65 méq/l. Ceci est en relation avec la dissolution du gypse très abondant dans les formations mio-plio-quadernaire. En effet, la dissolution du gypse selon l'équation 8, doit fournir autant de moles de Ca^{2+} et de SO_4^{2-} . Pour le calcium, la figure 6e a montré que les concentrations maximales, de l'ordre de 45 méq/l, sont également observées au niveau de sebkha Chérta. La variation spatiale du calcium tient au fait que l'ion Ca^{2+} est impliqué dans plusieurs processus géochimiques tels que la précipitation des carbonates et/ou les processus d'échange de base. Les fortes concentrations en Mg^{2+} sont localisées dans les points proches de sebkha Sidi El Hani, sebkha Chérta et Oued Chérta ce qui peut entraîner la formation du calcaire magnésien :





a :RS ; b : Na ; c : Cl ; d : SO₄ ; e : Ca ; f : Mg

Figure 6 : Répartition spatiale des éléments chimiques de la nappe phréatique de Sidi El Hani.

3.4. Aptitude des eaux souterraines à l'irrigation

Les indices d'évaluation de l'aptitude des eaux souterraines de la cuvette de Sidi El Hani à l'irrigation sont relatés dans le tableau 3. Le Na% montre une grande variation. Il s'échelonne entre 31,85 et 65,00 méq/l. La CE fluctue de 3,75 à 12 dS/m et le SAR de 5 à 16 avec une moyenne de l'ordre de 9. Par ailleurs, les valeurs du MAR, IP et RSC fluctuent respectivement de 25,00 à 73,53, de 33,33 à 74,45 et de -64,00 à -14,00 méq/l avec une moyenne respective de 53,50 et -31,76 méq/l.

Les résultats de Na% ont montré que 5 puits ont une bonne qualité des eaux, 41 puits représentent une qualité acceptable et 3 puits seulement signalent une mauvaise qualité. Le calcul du MAR a mis en évidence que 29 puits présentent des concentrations inférieures à 50, donc utilisables pour l'irrigation. Néanmoins, 20 puits sont

inappropriés à l'irrigation en raison de fortes teneurs en magnésium, et susceptibles d'engendrer la salinisation des sols et la diminution de leur fertilité, entraînant ainsi la réduction des rendements des cultures. Les valeurs de IP obtenues ont mis en évidence une seule classe de la catégorie 2. Elles varient entre 25 et 75%, ce qui rend leurs utilisations dans l'irrigation acceptables [39]. Pour la totalité des échantillons d'eaux analysés, les valeurs de RSC sont faibles, ne dépassant 1,25 méq/l, ce qui élimine alors les effets néfastes de carbonates et de bicarbonates.

Tableau 3 : Aptitude des eaux souterraines à l'irrigation selon différents indices de classification

Paramètre	Classe	Nombre des échantillons
Na% (méq/l)		
<20	Excellente	-
20-40	Bonne	5
40-60	Acceptable	41
60-80	Douteuse	3
>80	Inacceptable	-
CE (dS/m)		
<0,25	Excellent	-
0,25-0,75	Bonne	-
0,75-2	Acceptable	
2-3	Douteuse	
>3	Inacceptable	49
SAR		
Classe		
2-10	Faible	35
10-26	Elevé	14
> 26	Très élevé	-
MAR		
<50	Acceptable	29
>50	Inacceptable	20
IP		
>75	Bien	-
25-75	Bonne	49
<25	Inacceptable	-
RSC (méq/l)		
<1,25	Bien	49
1,25-2,5	Douteuse	-
>1,5	Inacceptable	-

En termes de minéralisation totale, les CE reflètent des eaux souterraines fortement salées susceptibles d'affecter les rendements des cultures.

Concernant le risque lié au sodium, les SAR de 35 puits sont inférieurs à 10 présentant ainsi un risque minimal d'accumulation de sodium. Cependant, 14 puits ont un SAR se situant dans l'intervalle 10 et 26, ce qui correspond à des risques d'alcalinisation élevés [47, 48]. Des teneurs élevées en sodium dans les eaux d'irrigation peuvent saturer le complexe d'échange cationique, et causer la destruction de la structure du sol à cause de la dispersion d'argile. Les valeurs élevées du SAR ont été notées dans les points situés à proximité de sebkha Sidi El Hani. En se basant sur la salinité globale ainsi que le SAR, le diagramme de Richards (Figure 7) a permis de classer les eaux souterraines de la zone d'étude de qualité médiocre à mauvaise pour 35 puits et de qualité mauvaise pour les autres. Il est à signaler qu'il s'agit d'une norme très stricte qui appliquée dans le contexte de la nappe de Sidi El Hani, pénalise fortement la qualité de ses eaux. Toutefois, ces eaux peuvent convenir aux plantes tolérantes aux sels et aux sols légers, des conditions qui caractérisent bien la zone de Sidi El Hani.

Les cartes de répartition spatiale du Na%, CE, SAR, MAR, IP et RSC de la zone d'étude, présentées dans la figure 8a, 8b, 8c, 8d, 8e et 8f ont dévoilé que ce sont les points d'eaux situés à proximité de sebkha Sidi El Hani qui ont dépassé largement les limites admissibles. De ce fait, l'utilisation des ces points d'eaux à des fins

agricoles risque de fragiliser les propriétés physiques du sol, notamment la structure. D'ailleurs, d'après la carte agricole de la région de Mahdia [29], la plaine d'Ouled Chamekh se caractérise par la dominance de la texture limono-argileuse et sablo-argileuse. Ce type de texture favorise l'adsorption du Na sur le complexe argilo-humique. Ce qui pose des problèmes de dégradation des propriétés physiques et chimiques des sols, par conséquent, la diminution de la fertilité qui entraîne une réduction des rendements des cultures et parfois même la disparition du couvert végétal.

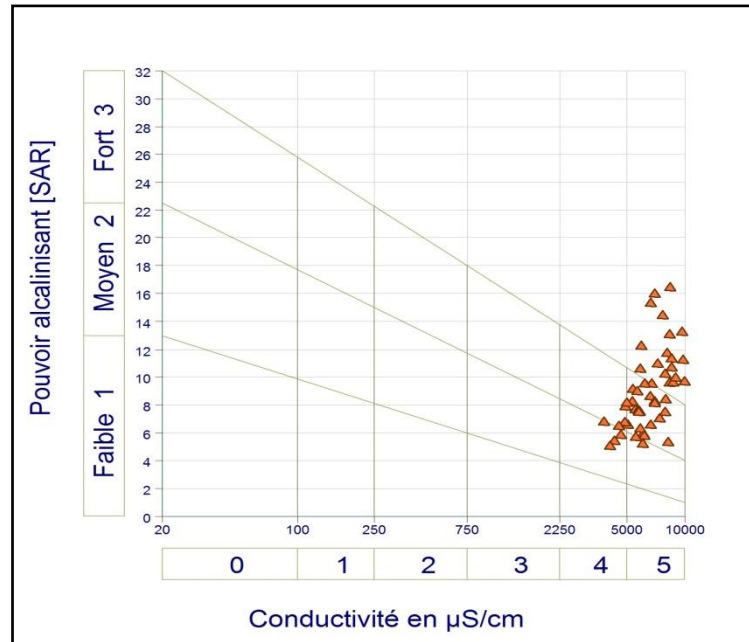
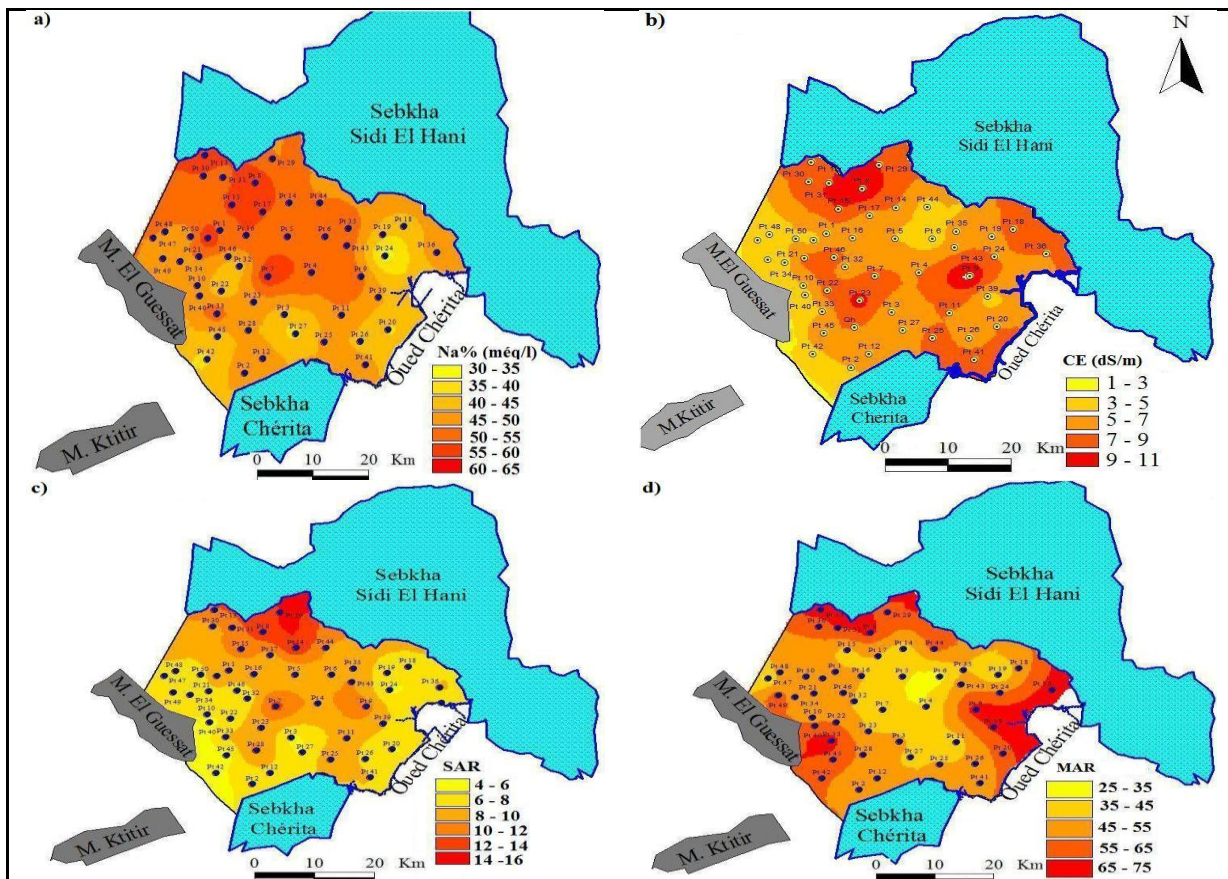
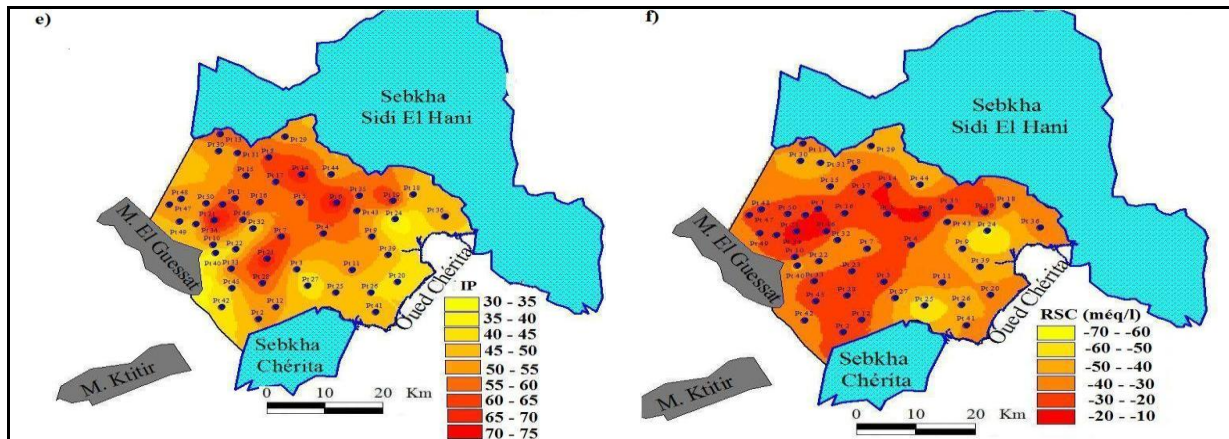


Figure 7 : Classification des eaux d'irrigation en fonction de la CE et du SAR





a : Na%; b : CE; c : SAR; d : MAR ; e : IP; f: RSC

Figure 8 : Répartition spatiale des éléments qualitatifs

Conclusion

Des paramètres physico-chimiques et des méthodes hydrochimiques ont été utilisés en vue de caractériser la qualité des eaux souterraines de la cuvette de Sidi El Hani utilisées en irrigation. L'étude a été basée sur 49 échantillons d'eau de puits. Les résultats ont dévoilé des caractéristiques physico-chimiques, relativement, variables. Le diagramme de Piper a permis d'identifier deux faciès : un faciès mixte chloruré et sulfaté calcique et magnésien, et un faciès chloruré sodique. La classification de Stuyfzand a montré que les eaux sont saumâtres et saumâtres-salées, d'alcalinité modérément élevée et la présence de deux classes de code (+) et (-). Ces classes témoignent des échanges de base entre les eaux et les minéraux argileux. La répartition spatiale des paramètres chimiques a dévoilé que les fortes concentrations en RS, Cl et Na sont enregistrées à proximité de sebkha Sidi El Hani.

L'analyse des indicateurs de la qualité des eaux pour un usage en irrigation a montré, globalement, une qualité médiocre à mauvaise. Cependant, dans le contexte semi-aride et particulièrement dans les conditions pédologiques de la région d'étude, cette eau pourrait être utilisée en irrigation sous des conditions de bonne gestion et de pratiques culturales, notamment l'adoption des cultures tolérantes aux sels, la pratique de lessivage. La carte d'occupation du sol témoigne bien la présence de cultures conduites sous ces conditions. De plus, il est à signaler que les eaux des puits situés aux alentours d'Oued Chérита, de sebkha Chérита et de sebkha Sidi El Hani montrent des risques salin et alcalin élevés.

Références

1. Bouzourra H., Bouhlila R., Elango L., Salma F., Ouslati N., *Environ. Sci. Pollut. R. J.* 22 (2014) 2643.
2. Rajesh R., Krindha K., Elango L., *Water Qual. Exp. Health.* 7 (2015) 515-524.
3. Kumar S.P.J., Elango L., *Arab. J. Geosci.* 7 (2013) 2641-2653.
4. Hajd Ammar F., Chakir N., Zouari K., Deschamps P., *J. Afr. Earth Sci.* 100 (2014) 81-95.
5. Hamdi M., M'nassri S., Dridi L., Majdoub R., Abida H., *Euro. J. Sci. Research.* 129 (2015) 33-42.
6. Agoubi B., Kharroubi A., Abida H., *Arab. J. Geosci.* 6 (2013) 1163-1172.
7. Majdoub R., Hachicha M., El Amri A., Melki M., *Euro. J. Sci. Research.* 80 (2012) 499-507.
8. Zammouri M., Seigfreid T., El Fahem T., Kriaà S., Kinzelbach W., *Hydrogeol. J.* 15 (2007) 1357-1375.
9. Bekkoussa B., Jourde H., Batiot Guilhe Ch., Meddi M., Khaldi A., Azzaz H., *Hydrolog. Sci. J.* 58 (2013) 1111-1127.
10. Saidi S. Bouri S., Hassine S., Ben Dhia H., *Desalination and Water treat.* 52 (2014) 1-11.
11. Kraiem Z., Zouari K., Bencheikh N., Agoun A., Abidi B., *Hydrolog. Sci. J.* 60 (2015) 1-15.
12. Alassane A., Trabesli R., Dovonon L., Odeloui D., Boukari M., Zouari K., Mama D., *J. Water Res. and Prot.* 7 (2015) 496-515.
13. Capaccioni B., Birero M., Paletta C., and Didero L., *J. Hydrolog.* 307 (2005) 1-16.
14. De Montety V., Radakovitch O., Vallet-Coulomb Ch., Blavoux B., Hertmitte D., Vallès V., *App. Geochem.* 23 (2008) 2337-2349.
15. Kouzana L., Benassi R., Ben Mammou A., Felfoul M., *J. Afr. Earth Sci.* 58 (2010) 242-252.

16. Trabelsi R., Zairi M., Ben Dhia H., *Hydrogeol. J.* 15 (2007) 1341-1355.
17. Lucas Y., Shimitt A.D., Chabaux F., Clément A., Fritz B., Elsass Ph., Durand S., *App. Geochem.* 25 (2010) 1644-1663.
18. M'Hiri A., Tarhouni J., Hachicha M., Lebdi F., *Etude et gestion des sols.* 5 (1998) 257-268.
19. Hachicha M. *Séchresse.* 18 (2007) 45-80.
20. El Amri A., Dridi L., Barhoumi Y., Zairi M., *Inter. J. Innov. And Sci. Resear.* 9 (2014) 344-353.
21. Hamzaoui-Azaza F., Ketata M., Bouhlila R., Gueddari M., Riberio L., *Environ Monit Assess.* 174 (2011) 283-298.
22. Vetrimurugan E. Elango L. and Rajmohan. *Inter. J. of Environ. Sci. and Tech.* 10 (2013), pp. 473-486.
23. Kumar S.K., Logeshkumaran A., Magesh N.S., Prince S.G., Chandrasekar N., *J. App. Water Sci.* (2015) 335-343.
24. Xiao J., Jin Zhangdong., Wang J., Zhang F., *Environ. Earth Sci.* 73 (2015) 3697-3708.
25. Institut National de Météorologie. (2014). Sousse, Tunisie.
26. Castany G., *Annales des mines et de la géologie.* 3 (1948) 126.
27. Amari A., Bedir M., *Géodynamique.* 4 (1989) 49-65.
28. Khomsi S., Bédir M., Soussi M., Ben Jamia M.G., Latrache K.B.H., *COMPTEs RENDUS GEOSCI.* 338 (2006) 41-49.
29. Commissariat Régional au Développement Agricole (CRDA) de Mahdia, Cartes Agricoles, Gouvernorat de Mahdia. (2000).
30. American Public Health Association, *Standard Methods (19 th ed).* Washington. (1995) 500.
31. Freeze R.A., Cherry J.A., *New Jersey: Englewood Cliffs.* (1979) 604.
32. Piper A.M., *Transactions American Geophysical Union.* 25 (1944) 914-928.
33. Stuyfzand P.J., IAHS Publ. 182 (1989) 89-98.
34. Mollema P.N., Antonellini M., Dinelli E., Gabbianelli G., Greggio N., Stuyfzand P.J., *App. geochem.* 34 (2013) 207-221.
35. Hassen I., Hamzaoui-Azaza F., Bouhlila R., *Environ Monit Assess.* (2016) 188-135.
36. Raghauth H.M., *Groundwater Wiley Eastern Ltd New Delhi,* (1989) 563.
37. Eaton F.M., *Soil Science.* 69 (1950) 123-134.
38. Wilcox L.V., *U.S. Geological Departement Agriculture.* Circ. 969 (1953) 19.
39. Doneen I. D., *University of California.* (1964) 96.
40. Lark R.M. *Euro. J. Soil Sci.* 51 (2000) 717-728.
41. Triki I., Hentati I., Trabelsi N., Zairi M., *Géomatique Expert.* 9 (2014) 55-63.
42. Appelo C.A.J., Postma X., 1993., *Balkema, Rotterdam.* (1993) 536.
43. Monti Y., Mjemah I.C., Bakundukize C., Van Camp M., Martens K., Walraevens K., *Environ. Earth Sci.* 70 (2013) 1091-1111.
44. Fadili A., Najib S., Mehdi K., Riss J., Makan A., Boutayeb K., Guessir H., *J. Afr. Earth Sci.* 116 (2016) 233-247.
45. Yermani M., Zouari K., Michelot J.L., Mamou A., Moumni L., *J. Sci. Hydrolog.* 48 (2003) 95-108.
46. Trabelsi R., Zairi M., Smida H., Ben Dhia H., *Géosci. de surface (Hydrol-Hydrogeol).* 337 (2005) 515.
47. Ramesh K., Elango L., *Environ. Pollut. J.* 6(2006) 497-504.
48. Shabbir R., Saeed A.S., *Arab. J. Sci. Eng.* 40 (2015) 2033-2047.

(2016); <http://www.jmaterenvironsci.com>