Qualité hydro chimique des eaux de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et évaluation de sa vulnérabilité à la pollution

Hydrochemical quality of the groundwater of the unconfined aquifer in Oued Righ region and assessement of its vulnerability to pollution

Mohamed Salah Belksier *, Salah Chaab & Fella Abour

Laboratoire de Géologie, Université Badji Mokhtar, BP 12, 23000, Annaba, Algérie.

Soumis le : 07/09/2015 *Révisé le :16/03/2016* *Accepté le :12/04/2016*

الملخص

في المنطقة الصحراوية واد ريغ حيث ان الطلب على المياه مهم جدا بسبب النمو السكاني والتنمية الزراعية، واستغلال المياه الجوفية العميقة للجيب المائي المتداخل القاري و المركب النهائي قد ولدت فائضا للمياه مما ادى الى ارتفاع المياه في المناطق المنخفضة وقد أثر هذا الوضع على الحالة الهيدروديناميكية والهيدروكيميائية للمياه السطحية.

والهدف من هذا العمل هو تحديد نوعية المياه ومدى ملاءمتها للري واثبتت هذه الدراسة ان المياه تتميز بملوحة مرتفعة جدا وكذلك حساسية الطبقة المائية الحرة للتلوث في المناطق الحضرية والبحيرات والشطوط كبيرة جدا.

الكلمات المفتاحية: *الجيب المائي، كيمياء المياه، الحساسية للتلوث، واد ريغ، الجزائر*

Résumé :

Dans la région désertique de l'Oued Righ, pour satisfaire la demande en eau, très importante à cause de la croissance démographique et du développement de l'agriculture, on a eu recours à l'exploitation des nappes profondes du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal qui s'est faite d'une manière irrationnelle et qui a engendré un surplus d'eau, entrainant la remontée du niveau d'eau de la nappe phréatique superficielle , jusqu'à inonder les endroits, particulièrement de basse altitude, dans les zones de Meghaier et Djemaa. Cette situation hydrodynamique a influé sur la qualité des eaux.

L'objectif de ce travail est de définir la qualité hydrochimique des eaux de la nappe libre et leur aptitude à l'irrigation en caractérisant le risque de salinité. L'interprétation des analyses physico-chimiques montrent une forte conductivité électrique, traduisant une salinité élevée. L'utilisation de la méthode de GOD montre que la nappe phréatique de l'Oued Righ à une vulnérabilité forte à modéré. Les zones urbaines, les chotts et les zones agricoles présentent une vulnérabilité forte.

Mots clés *: nappes aquifères- hydrochimie- vulnérabilité- GOD- Oued Righ- Algérie*.

Abstract:

In the desert region of the Wadi Righ, the significant water demand, because of the population growth and the development of the agriculture, is satisfied by the intensive exploitation of the deep aquifers of "Continental Intercalaire" and "Complex Terminal". The surplus of extracted water has caused a rise of the groundwater table of the upper unconfined aquifer, which has flooded some places, particularly low-lying zones, in the regions of Meghaier and Djemaa. This hydrodynamic situation influenced the quality of waters.

The objective of this work is to define the hydrogeologic, hydrodynamic and physicochemical aspects of the upper aquifer in the first step and in the second to evaluate its vulnerability to anthropogenic and agricultural pollution. The use of the GOD method shows that the ground water of Righ Wadi is classified from high to moderate vulnerability. The agricultural areas, chotts and urban zones are characterized by a high vulnerability.

Key-words*: aquifers- hydrochemistry- vulnerability- GOD- Wadi Righ - Algeria*

* *Auteur correspondant : mouhbelksier@yahoo.fr*

©UBMA - 2016

1. INTRODUCTION

La qualité des eaux dans le monde a connu ces dernières années une grande détérioration, à cause des rejets industriels non contrôlés, de l'utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que l'exploitation irrationnelle des ressources en eau. Ces derniers ont produit une modification chimique de l'eau en la rendant impropre aux usages souhaités.

La vallée de l'oued Righ est une large fosse de direction nord- sud, prenant son origine au Sud (la palmeraie d'El-Goug) et débouchant sur le chott Mérouane.

Sur la base des données collectées dans la région, l'objectif de ce travail est de définir les aspects hydrogéologiques, hydrodynamiques et hydrochimiques et la potabilité des eaux de la nappe superficielle et leur aptitude à l'irrigation en caractérisant le risque de salinité des eaux de la nappe superficielle. L'accent est mis sur l'évaluation de sa vulnérabilité aux influences anthropiques et la détermination de la salinité de ses eaux souterraines dans les zones arides et son impact sur leur qualité, sachant qu'elle conditionne leur aptitude à l'irrigation.

Les eaux souterraines présentent l'unique ressource de l'eau existent de la région de Sahara septentrionale, mais leur qualité reste toujours un sujet actualité nationale et un facteur conditionnant le développement démographique et économique des régions sud-est de l'Algérie. Ce sujet a fait l'objet de nombreux travaux dont ceux de Khachana S et al [1], ceux de Bouselsal B et al [2] et ceux de Guendouz A et al [3].

2. CONTEXTE PHYSICO-GEOGRAPHIQUE

La figure 1 montre une carte de situation géographique de la région et présente la zone d'étude. La région de l'Oued Righ se situe au Sud-Est de l'Algérie, plus précisément au Nord-Est du Sahara sur la limite Nord du Grand Erg Oriental et la bordure sud du massif des Aurès.Sur le plan administratif, la vallée de l'oued Righ est limitée :

- Au Nord par la wilaya de Biskra et la commune de Tolga.
- Au Sud-Ouest par les oasis d'Ouargla.
- A l'Est par la vallée de l'Oued Souf.

La région de l'Oued Righ se présente comme une cuvette synclinale du bas Sahara et fait partie d'une large fosse de direction Nord-Sud.

Tous les terrains, depuis le Cambrien jusqu'au Tertiaire sont dissimulés en grande partie sous le Grand Erg Oriental. Seuls quelques affleurements sont observés sur les bordures. Les terrains paléozoïques affleurent au Sud (Fig. 1).

3. CONTEXTES GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Les terrains mésozoïques et ceux du début du Cénozoïque constituent l'essentiel des affleurements des bordures. Les dépôts continentaux tertiaires et quaternaires occupent le centre de la cuvette. Dans la série géologique deux ensembles hydrogéologiques Post Paléozoïques importants se distinguent : le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal (Fig. 2) [4].

L'étude climatique basée essentiellement sur les données pluviométriques et de la température disponibles, collectées aux deux stations de Touggourt et de Guemar, dont les coordonnées sont représentées dans le tableau 1.

Le climat de la région est très aride et caractéristique du Sahara avec deux périodes différentes : très chaud et sec l'été et assez froid en hiver de 2 à 8 °C, avec parfois des gelées la nuit entre Novembre et Février. Les différences de températures diurnes et nocturnes sont très élevées (jusqu'à 30°C en été).

Selon la méthode de calcul du bilan hydrologique de Thornthwaite, le bilan est déficitaire et la RFU, à l'exception du mois de Janvier où elle atteint une valeur maximale de 4.31 mm, reste nulle durant toute l'année.

Tableau 1 : les coordonnées géographiques des stations de Touggourt et de Guemar

station	Altitude	Latitude	Longitude
Guemar	64m	33°30'	06°47'
Touggourt	85m	33°04'N	06°05'E

©UBMA - 2016

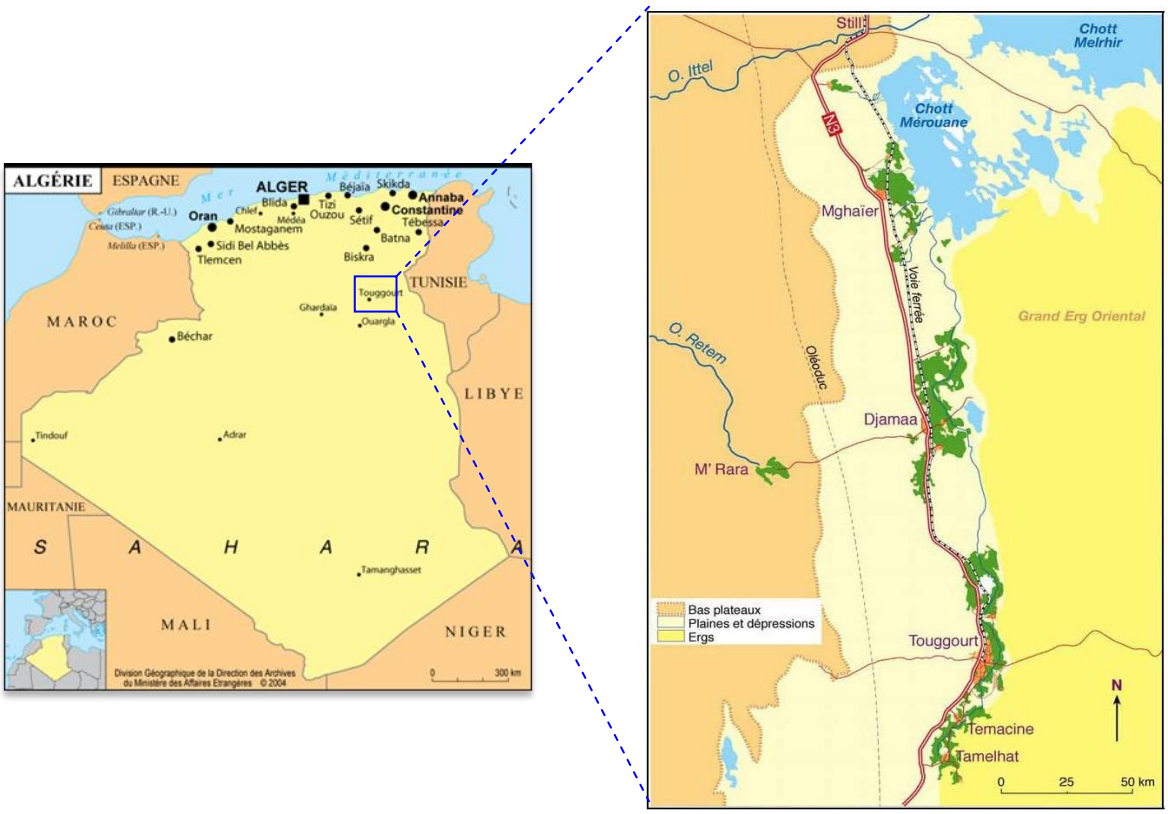

Figure. 1: Carte de situation géographique de la région d'Oued Righ [4]

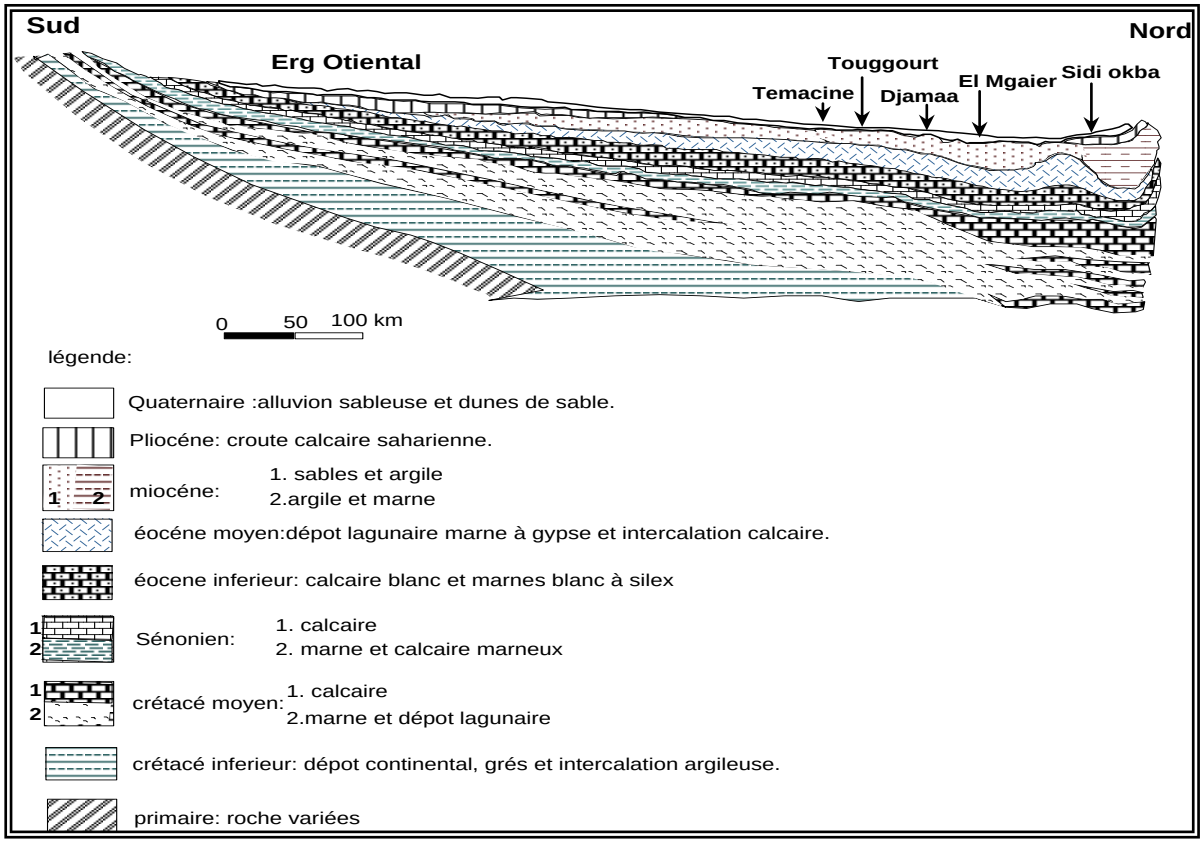

Figure. 2 : Coupe géologique N-S passant par la cuvette Secondaire Saharienne et par le Bassin de l'Oued Righ (A.Cornet, 1962) modifie 2009. [4]

©UBMA - 2016

Dans le bassin de l'Oued Righ, il existe deux systèmes aquifères [4] :

- le premier profond étendu, appelé Continental Intercalaire (CI), constitué en grande partie par des sables et des grès d'âge albien
- Le deuxième, le Complexe Terminal (CT) est multicouche, peu profond, moins étendu que le premier. Il est formé de deux ensembles différents : l'un continental, constitué par des sables, graviers et des grés d'âge mio-pliocene, formant la 1ére et la 2éme nappe du Complexe Terminal (CT1) (CT2) et l'autre, le CT3, est marin et est constitué par les calcaires d'âge sénonien-eocène.

Une nappe aquifère superficielle surmonte ces deux ensembles et est constituée de sables fins à moyens d'âge quaternaire à récent.

D'après les cartes piézométriques établies, le sens d'écoulement tend vers le Chott Merouane qui est l'exutoire naturel.

La nappe superficielle est présente dans toutes les oasis de la vallée. Elle est contenue dans les sables fin à moyens, d'âge quaternaire, contenant des cristaux de gypse. Sont épaisseur s'accroit du Sud vers le Nord avec une valeur moyenne d'une vingtaine de mètres.

La nappe est cylindrique au Sud de Djamaa (p5) légèrement divergente au Sud de Touggourt (p10) pour devenir concave à Touggourt (Fig. 3).

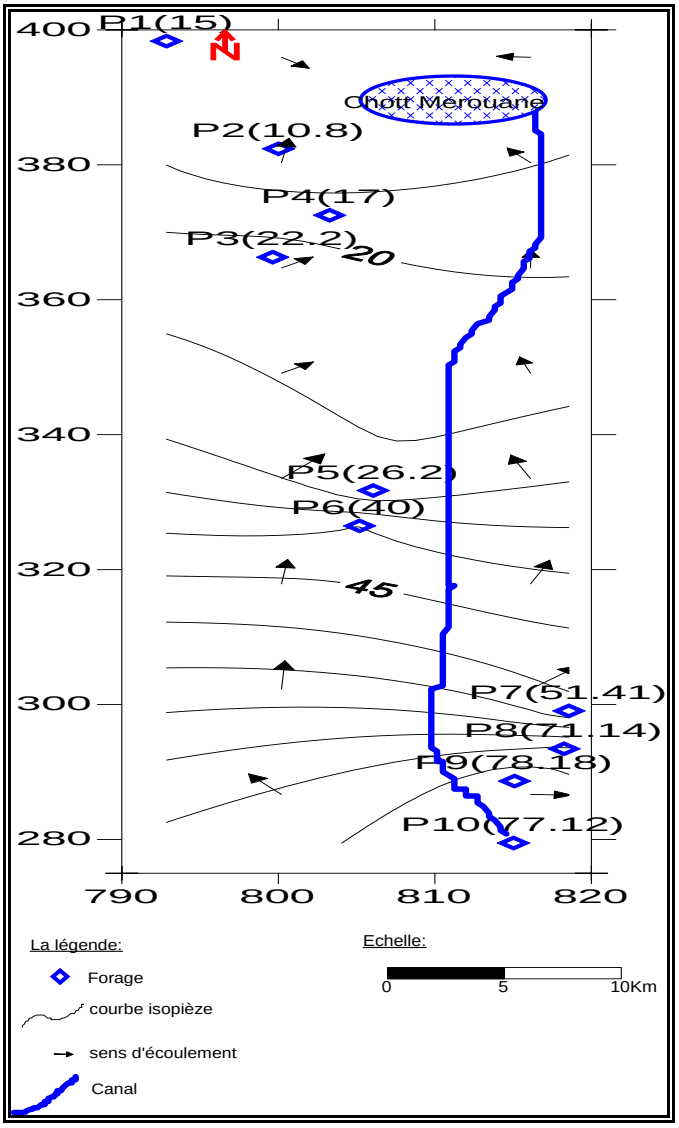

Figure. 3: Carte piézométrique de la nappe libre (Juin 2006) [4]

©UBMA - 2016

4. MATERIELS ET METHODES

4.1. Echantillonnage

Pour réaliser cette étude, nous avons effectué une compagne de prélèvement en Octobre 2015, dans les puits de la nappe phréatique (Tab.2 et Fig.4). Les paramètres physiques (pH, température et conductivité) ont été déterminés in situ, grâce à un appareil multiparamètre portatif. Les échantillons, utilisés dans ce travail
devant être analysés au laboratoire de l'ANRH Ouargla, ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène après être filtrés et acidifiés pour les cations. Le calcium, le magnésium et le chlore ont été dosés par titrimétrie, les sulfates par photocolorimétrie et enfin le sodium et le potassium au moyen d'une spectrométrie d'absorption atomique à flamme [1]

.

Tableau 2 : les Noms des puits dans la zone d'étude

Symbole de puits	Nom de Puits
P1	Oum Tiour
P2	Barkadjia
P3	El-Meghaier
P4	Sidi Khlil
P5	El-Bared
P6	Djamaa
P8	Sidi Amrane
P9	Choucha
P10	Elhamraia
P11	Blidet Amor bis
P12	Blidet Amor
P13	Temacine
P14	Sidi mahdi
P15	Hay Rimel
P16	Tebesbest
P17	Touggourt
P18	Megarine
P19	Harhira
P20	El Annet

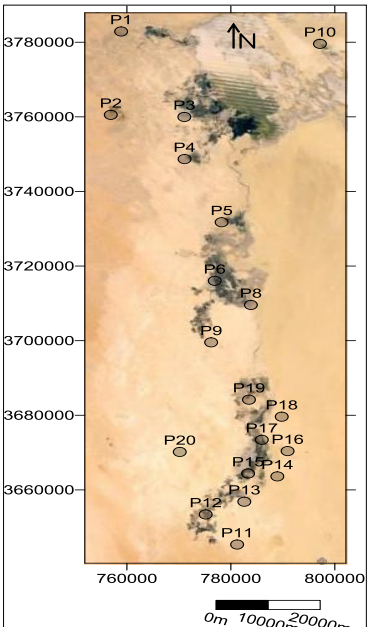

Figure. 4: Carte d'inventaire des puits de Prélèvement

4.2. Présentation de la méthode GOD (Foster 1987) [2] :

La méthode GOD a été développée par Foster en 1987. Elle présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Elle utilise une approche empirique où la vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens de la pénétration du polluant, et de la capacité d'atténuation que la couche sous-jacente présente à la zone saturée. Cette méthode est basée sur l'évaluation de trois paramètres : le premier réside dans l'identification du type d'aquifère en fonction de son degré de confinement (C_G), le deuxième correspond à la profondeur de la nappe (C_D) et le troisième est défini par la lithologie des couches de la zone non saturée de l'aquifère (C_O). Les côtes attribuées aux classes des différents paramètres sont inférieures ou égales à "1". L'Indice GOD (IG), qui permet d'évaluer la vulnérabilité de l'aquifère à la pollution, est obtenu par la multiplication de ces trois paramètres, selon l'équation (1).

$$I=C_G*C_O*C_D \qquad (1).$$

C_G = cote du type d'aquifère.
C_O = cote de la lithologie.
C_D = cote de la profondeur à la nappe.

Le tableau 3 présente les intervalles de valeurs des indices de vulnérabilité et les classes correspondantes (méthode GOD).

©UBMA - 2016

Tableau 3. Intervalles de valeurs des indices de vulnérabilité et classes correspondantes de la méthode GOD. [14]

Indices de vulnérabilité	Classes de vulnérabilité
00-0.1	Très faible
0.1-0.3	Faible
0.3-0.5	Moyenne
0.5-0.7	Forte
0.7-01	Très forte

5. RESULTATS ET DISCUSSION

5.1. Le faciès chimique des eaux de la nappe libre.

D'après la classification de PIPER, les eaux de la nappe phréatique a deux faciès dominants sulfaté sodique et chloruré sodique pour la majorité des puits (Fig.5). Ces faciès indiquent une dissolution évaporitique riche en sels et en gypse [16].

La répartition des faciès chimiques pour les 19 échantillons d'Octobre 2015, se présente comme suit:

- 47.36% des échantillons ont un faciès chimique sulfaté sodique.
- 36.84% des échantillons ont un faciès chimique chloruré sodique.
- 15.78% des échantillons ont un faciès chimique sulfaté magnésien.

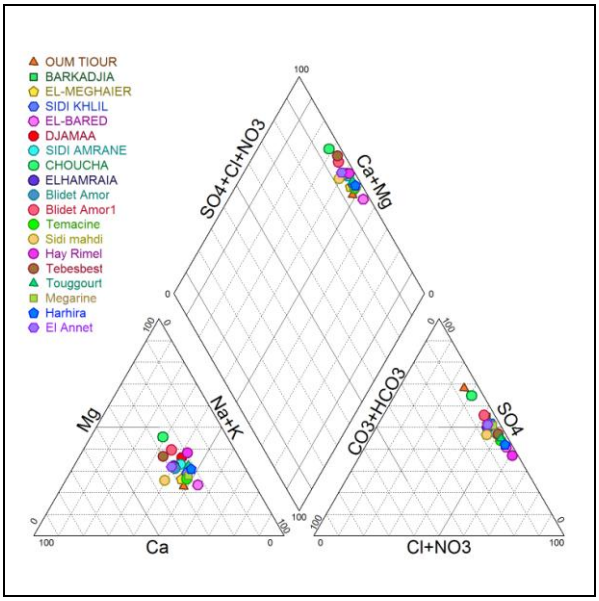

Fig. 5: Diagramme de Piper représentant le chimisme des eaux de la nappes libre (Octobre 2015)

5.2. Normes Algériennes de l'eau potable.

Pour définir la potabilité des eaux souterraines de la nappe libre dans la région d'Oued Righ, nous avons utilisé les normes Algériennes (Tab. 4).

Tableau 4: Normes Algériennes des paramètres physico-chimiques pour l'eau minérale naturelle et l'eau de source. (Arrêté du 26 juillet 2000, JO RADP n° 51/00)

Paramètre	Teneur	Unité
Température	25	°C
pH	6.5-8.5	-
Conductivité électrique	2800	mg/l
Résidu Sec (110 °C)	2000	mg/l
Calcium	75-200	mg/l
Magnésium	150	mg/l
Sodium	200	mg/l
Potassium	20	mg/l
Chlorures	200-500	mg/l
Sulfates	200-400	mg/l
Bicarbonates	-	-

©UBMA - 2016

L'interprétation des résultats des analyses chimiques, représentées dans les figures 6 (cations) et 7 (anions), montre que :

- la teneur en calcium dans les eaux de la nappe libre dépasse la norme algérienne de l'eau potable (200 mg/l) ;
- la concentration du magnésium est élevée et dépasse dans la majorité des points d'eau la norme algérienne de l'eau potable (150 mg/l) ;
- la teneur de sodium est très élevée dépassant la norme algérienne de l'eau potable (200mg/l) dans touts les puits et
- la concentration du potassium montre un dépassement de la norme Algérienne de l'eau potable (20mg/l) dans la majorité des puits (Fig.6) ;
- la concentration des chlorures présente des teneurs variables et très fortes dépassant également la norme Algérienne de l'eau potable (500 mg/l) ;
- les sulfates dépassent aussi la norme Algérienne de l'eau potable (400) mg/l ;
- la concentration des bicarbonates varie entre 160 à 200 mg/l.

Mis à part les bicarbonates, tous les autres éléments chimiques (Cations et Anions) ont des teneurs supérieures aux normes Algériennes maximales admissibles.

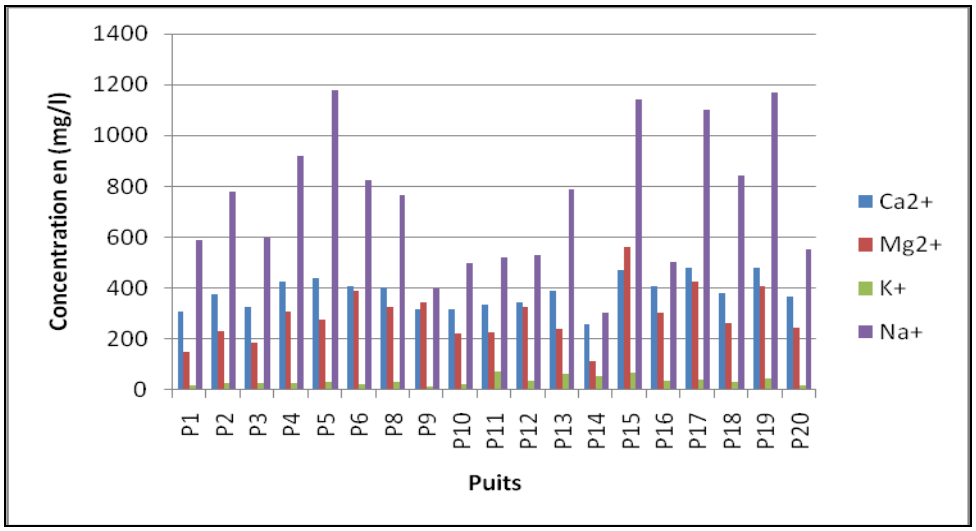

Figure. 6: Histogramme des teneurs des cations des eaux de la nappe libre (Octobre 2015)

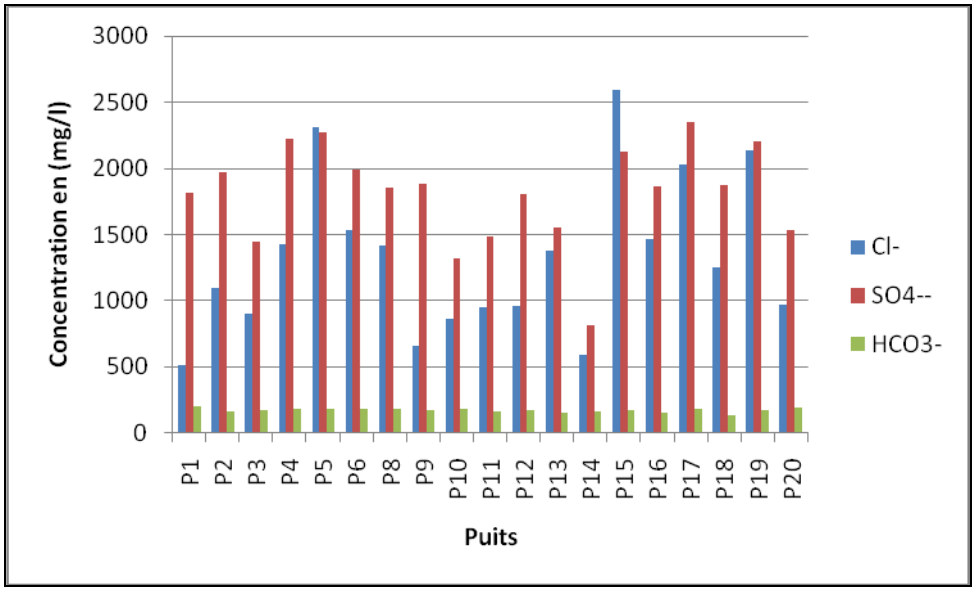

Figure. 7: Histogramme des teneurs des anions des eaux de la nappe libre (Octobre 2015)

©UBMA - 2016

5.3. Aptitude des eaux de la nappe libre à l'irrigation.

L'aptitude des eaux à l'irrigation permet d'évaluer l'effet de la salinité sur les sols et les cultures en fonction de la nature des sels dissous dans les eaux destinées à l'agriculture [1].

Riverside a créé une classification qui considère le rapport du sodium absorbé par le sol (SAR) et la conductivité (Fig. 8).

Ainsi, le SAR, sera calculé par la formule suivante [4] :

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

où les concentrations sont exprimées en méq/l.

D'après le diagramme de Richards, les eaux de la nappe superficielle sont de qualité médiocre à mauvaise pour l'irrigation. Elles s'arrangent selon deux classes :

Eaux médiocres (C_4S_2): les eaux faisant partie de cette classe sont fortement chargées en sels. Elles sont susceptibles de convenir à l'irrigation des plantes tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

Eaux mauvaises (C_5S_3): les eaux qui font partie de cette classe ne conviennent pas à l'irrigation. Leur utilisation pour l'irrigation doit être soumise à certaines conditions: sols très perméables, bon lessivage, plantes très tolérantes au sel.

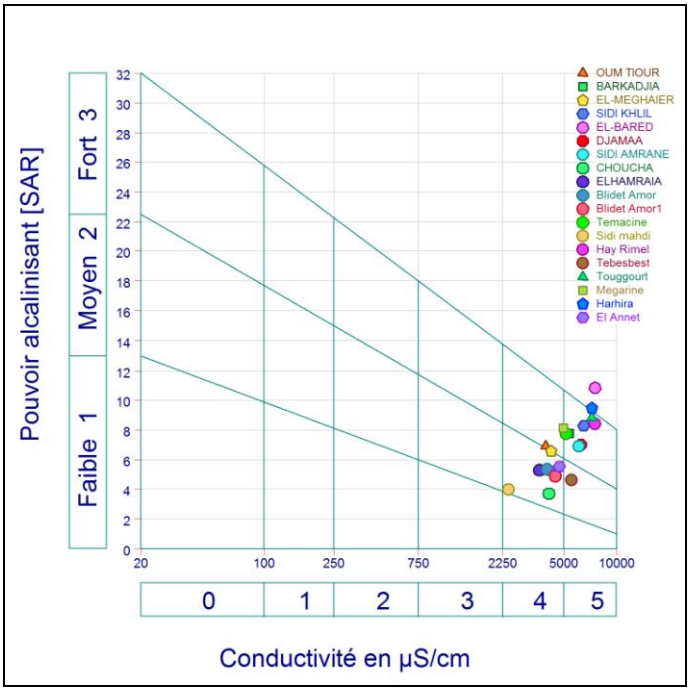

Fig. 8 : Diagramme de Riverside des eaux souterraines de la nappe libre (Octobre 2015)

5.4. Origine de minéralisation de la nappe superficielle

5.4.1. Statistiques élémentaires

L'étude statistique, réalisée sur les données issues des analyses physico-chimiques de 19 échantillons des eaux de la nappe phréatique, montre que cette nappe se caractérise par une conductivité moyenne de 5130,90 µs/cm, qui dépasse les normes Algériennes de la potabilité des eaux. Les concentrations moyennes du sodium (Na^{+}), des sulfates (SO_4^{2-}) et du calcium (Ca^{2+}) sont aussi élevées et dépassent également les normes algériennes. Le tableau 5 rassemble les statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe superficielle de l'Oued Righ (Octobre 2015).

©UBMA - 2016

Tableau 5: Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe superficielle – région de l'Oued Righ (Octobre 2015).

Elément (mg/l)	Nb. d'observations	Minimum	Maximum	Moyenne	E'(cart-type
Ca^{2+} (mg/l)	19	258.80	480.00	375.75	59.69
Mg^{2+} (mg/l)	19	115.20	563.20	285.77	100.43
K^{+} (mg/l)	19	13.50	71.30	33.54	17.10
Na^{+} (mg/l)	19	305.00	1177.50	705.34	277.45
Cl^{-} (mg/l)	19	513.00	2588.00	1240.95	589.09
SO_4^{2-} (mg/l)	19	815.00	2350.00	1788.63	357.26
HCO_3^{-} (mg/l)	19	140.30	201.30	174.96	14.98
Ce 25°C (µs/cm)	19	2440.00	7560.00	5130.90	1430.74
Résidu Sec (mg/l)	19	2188.00	8002.00	5166.18	1563.63

-Analyse en composantes principales (ACP)

-Calcul de la matrice de corrélation

La matrice de corrélation a été calculée pour les éléments physico-chimiques de la nappe phréatique dans l'Oued Righ. Cette ACP a été effectué sur l'ensemble des données pour assurer l'obtention des coefficients de corrélation significatifs. Au total, 19 échantillons ont été utilisés. La matrice de corrélation montre que la conductivité (Ce) est corrélée positive avec tous les éléments chimiques sauf pour les bicarbonates (Tab. 6)

Tableau. 6 : Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de la nappe superficielle de la région d'Oued Righ (Octobre 2015).

Variables	Ca2+	Mg2+	K+	Na+	Cl-	SO4--	HCO3-	Ce 25°C	Résidu_Sec
Ca^{2+} (mg/l)	**1**								
Mg^{2+} (mg/l)	0.776	**1**							
K^{+} (mg/l)	0.270	0.243	**1**						
Na^{+} (mg/l)	0.870	0.568	0.316	**1**					
Cl^{-} (mg/l)	0.925	0.736	0.449	0.902	**1**				
SO_4^{2-} (mg/l)	0.837	0.694	-0.067	0.772	0.710	**1**			
HCO_3^{-} (mg/l)	-0.120	0.011	-0.523	-0.142	-0.183	0.030	**1**		
Ce 25°C (µs/cm)	0.971	0.748	0.233	0.916	0.943	0.871	-0.060	**1**	
Résidu_Sec (mg/l)	0.924	0.745	0.108	0.827	0.864	0.883	0.066	0.965	**1**

-Diagonalisation de la matrice de corrélation

La diagonalisation de la matrice de corrélation a permis de calculer les facteurs de charges. Les deux premiers axes, pris en considération pour décrire la corrélation des variables, détiennent à eux seuls 75.65 % de l'information totale avec, respectivement 67.62 % pour l'axe F1 et 85.41 % pour l'axe F2 (Tab. 7 et Fig. 9).

©UBMA - 2016

Tableau 7: Poids factoriel sur les paramètres physico-chimiques à partir des données des puits de la nappe libre de la région d'Oued Righ (Octobre 2015).

	F1	F2	F3
Valeur propre	6.08	1.60	0.56
Variabilité (%)	67.62	17.79	6.31
% cumulé	67.62	85.41	91.72

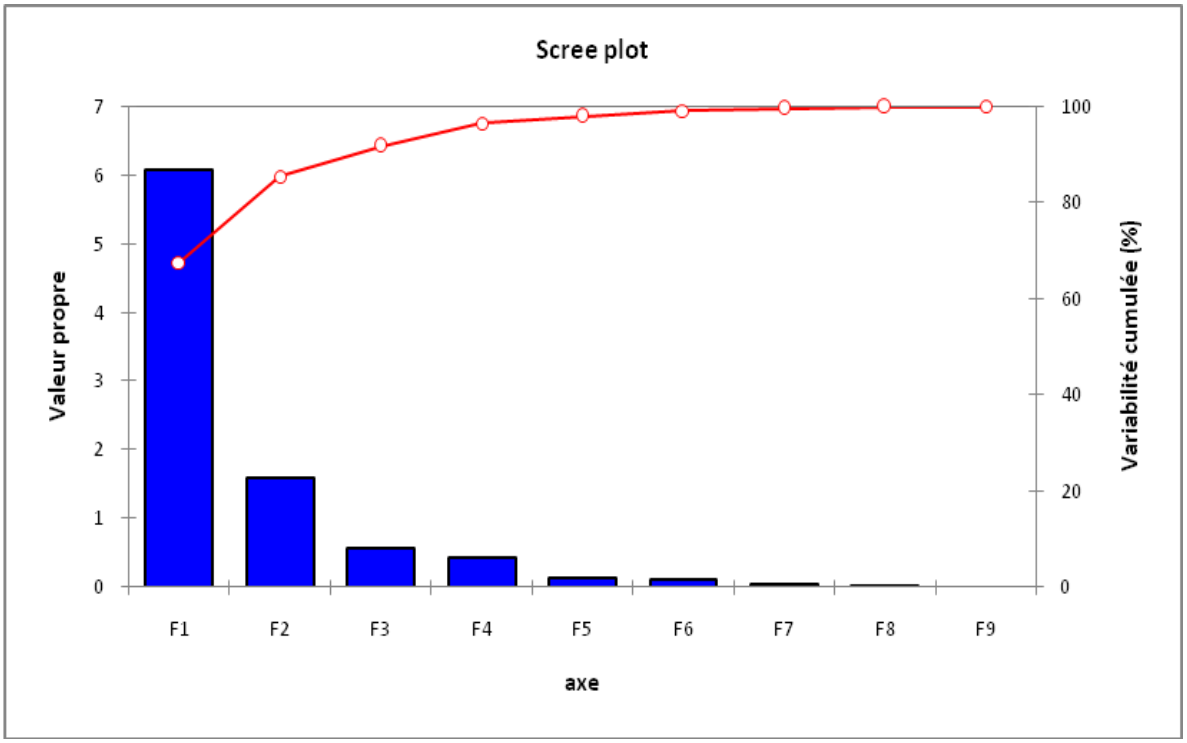

Figure. 9 : Valeurs propres des facteurs de charges

-Cercle des corrélations et projection des individus

Le cercle de corrélation a été tracé sur le plan des facteurs F1-F2 (Fig. 10) et montre l'existence d'une association corrélée positivement avec le facteur F1. Cette association regroupe les paramètres suivants : Ce, chlorures (Cl^-), sulfates (SO_4^{--}), magnésium (Mg^{++}), calcium (Ca^{++}), sodium ($Na^{+)}$ et résidu sec. Ces éléments représentent l'axe de minéralisation. Les données concernent la nappe superficielle. Cette analyse a été faite sur deux facteurs et 85.41% de la variance ont pu être exprimés. La projection des variables sur le plan I-II montre trois pôles :

Le facteur –I- représente 67.62 % de la variance. Il est déterminé par deux ; le premier est formé par (Ca^{2+}, Na^+, SO_4^{2-}, Cl^-, Mg^{+2}, RS et CE) liés aux évaporites (NaCl, $CaCl_2$, KCl, $CaSO_42H_2O$, $MgSO_4$ et Na_2SO_4) et le second est formé par le K^+, liés à l'apport des amendements utilisés en agriculture.

Le facteur- II- représente 17.79 % de la variance et il est lié aux mélange avec les eaux des nappes profondes (CT et CI où les réservoirs renferment de calcaire et de dolomie) ou au phénomène d'échange de base.

©UBMA - 2016

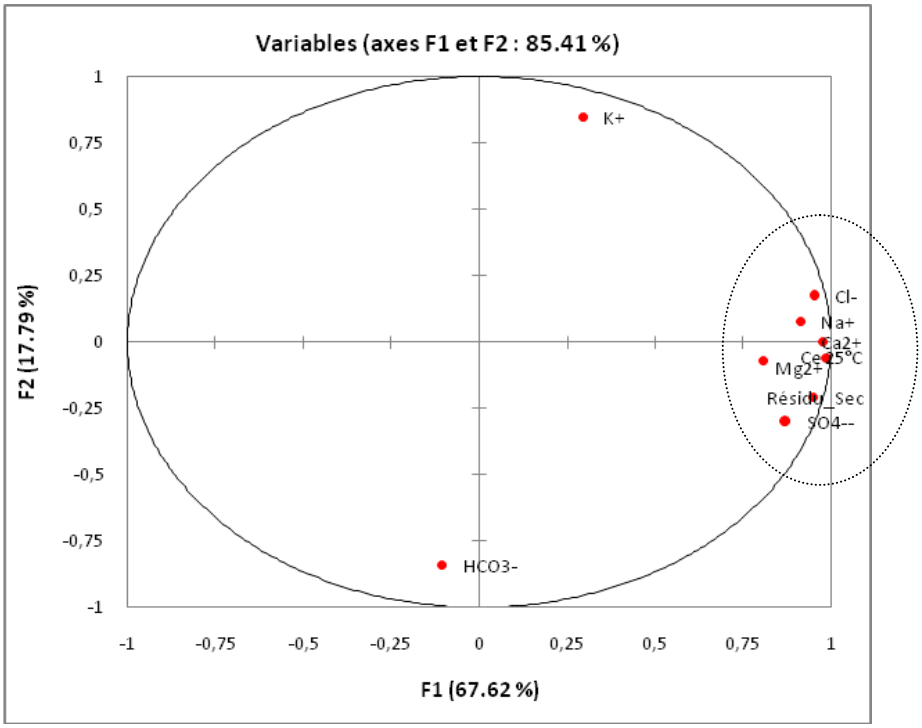

Fig. 10 : Cercles de corrélation sur le plan des facteurs F1-F2 des eaux de la nappe superficielle dans la région d'Oued Righ.

5.4.2. Etude des rapports caractéristiques.

L'étude des rapports caractéristiques a permis de déterminer l'origine géologique des éléments chimiques à partir de la bonne corrélation qui existe entre eux.

- Le couple Na^+/ Cl^-.

Ces deux éléments chimiques sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl). L'évolution du sodium est étudiée en fonction des teneurs en chlorure. La figure 11 montre un alignement des points sur la droite de dissolution de l'halite, ce qui est caractéristique de la dissolution de l'halite dans les eaux de la nappe et confirme l'existence du faciès chloruré sodique. Cependant quelques points présentent un excès en sodium alors que d'autres montrent un excès en chlorures.

- Le Couple Na^+/ $SO4^{-2}$.

L'interprétation de la figure 12 montre une évolution proportionnelle des sulfates et du sodium. Cette relation confirme également l'existence du faciès sulfaté sodique de 36,84% des eaux de la nappe libre.

- Le Couple Mg^{2+} / $SO4^{2-}$.

L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle des sulfates et du magnésium (Fig. 13). Cette relation confirme l'existence du faciès sulfaté magnésien. Le magnésium est le résultat du mélange des eaux de l'aquifère libre avec les aquifères profonds (Complexe Terminal et Continental Intercalaire).

- Le rapport Ca^{2+} / Mg^{2+}

Les figures 13 et 14 montrent dans un premier cas la prédominance du calcium avec un rapport inférieur à 1. Ceci est dû à la dissolution des formations gypseuses [16] et à un deuxième cas où le magnésium prédomine avec un rapport supérieur à 1. Ce faciès magnésien indique la présence d'argiles riches en magnésium [17].

©UBMA - 2016

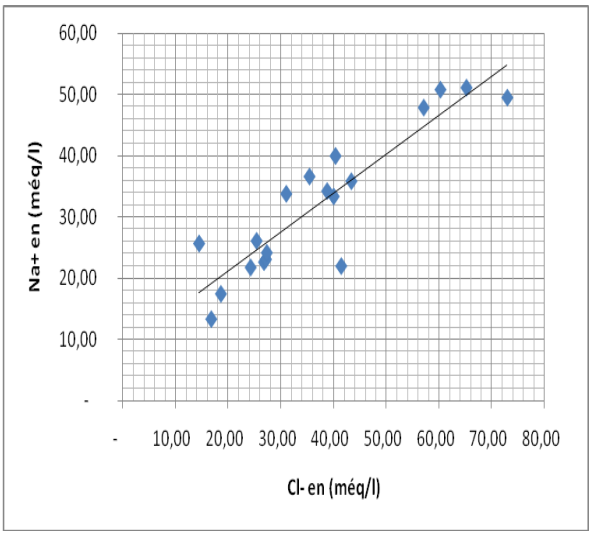

Figure 11: Relation Na^{+}/Cl^{-}

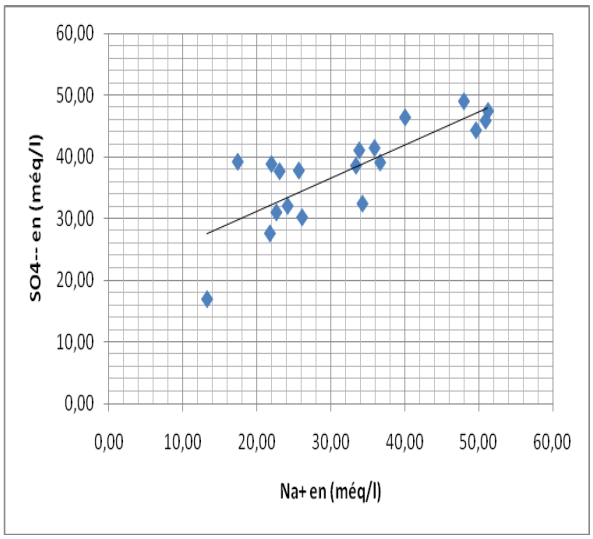

Figure 12: Relation Na^{+}/SO_4^{-2}

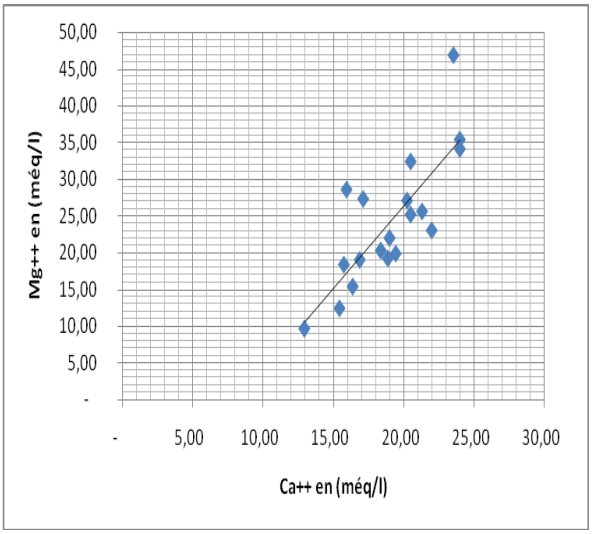

Figure 13: Relation Mg^{+2}/Ca^{+2}

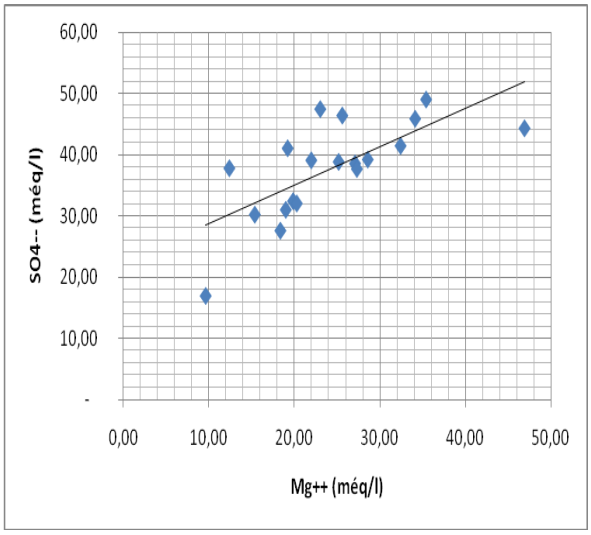

Figure 14: Relation Mg^{+2}/SO_4^{2}

5.4.3. Indice d'échange de base (i.e.b.)[4]

L'indice d'échange de base est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants. L'eau au cours de son séjour souterrain entre en relation avec différentes substances ayant la propriété d'échanger les ions contre ceux contenues dans les eaux. Parmi ces substances nous avons les minéraux, l'hydroxyde ferrique, les substances organiques.

D'après Schoeller (1943), l'indice d'échange de base est exprimé par la formule suivante :

$$\textbf{i.e.b.}=\frac{rCl^{-}-r(Na^{+}+K^{+})}{rCl^{-}}$$

Si i e b >0 => les eaux échangent des ions de $Na^{+}+K^{+}$ contre les ions de Ca^{++} et Mg^{++} du terrain encaissant.

i e b = 0 donc il y a un équilibre entre les compositions chimique de l'eau et l'encaissant.

i e b <0 => l'encaissant libère les ions de $Na^{+}+K^{+}$ et fixe les ions de Ca^{++} et Mg^{++} de l'eau.

Pour la région de l'Oued Righ les eaux ont un indice d'échange de base positif dans la majorité des puits, indiquant un échange de $Na^{+}+K^{+}$, de l'eau contre Ca^{++} et Mg^{++} de l'encaissant (Tab. 8). En revanche, au niveau des puits P1, P2, P3, P4 et P8, l'indice de base négatif constaté indique

©UBMA - 2016

que l'encaissant libère Na^{+}+K^{+} et fixe les ions de Ca^{++} et Mg^{++} de l'eau.

Tableau 8: indice d'échange de base dans la nappe libre (Octobre 2015)

Puits	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P8	P9	P10
i e b	- 0,81	- 0,11	- 0,06	- 0,01	0,20	0,16	0,14	0,05	0,08
P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
0,09	0,12	0,07	0,13	0,30	0,45	0,14	-0,06	0,14	0,10

5.5. Vulnérabilité de la nappe superficielle à la pollution.5.5.1. Les paramètres de vulnérabilité GOD

Les éléments nécessaires pour la classification de la vulnérabilité des aquifères sont le type de sol, les formations géologiques, la lithologie des couches de la zone non saturée, la profondeur à la nappe. La méthodologie empirique proposée en 1987 par Foster, implique un certain nombre d'étapes pour la réalisation de la carte de la vulnérabilité à la pollution (Fig. 15) :

(1) l'identification du type d'aquifère, avec une échelle de 0 à 1.
(2) caractéristiques lithologiques et hydrogéologiques de l'aquifère.
(3) la profondeur du niveau piézométrique dans la nappe aquifère.
Les figures 16, 17 et 18 montrent que la nappe superficielle de l'Oued Righ est libre. Elle est constituée de sables et de sables argileux. La profondeur de la surface piézométrique varie entre 0 m et 30 m au niveau de la majorité des puits de la région de l'Oued Righ.

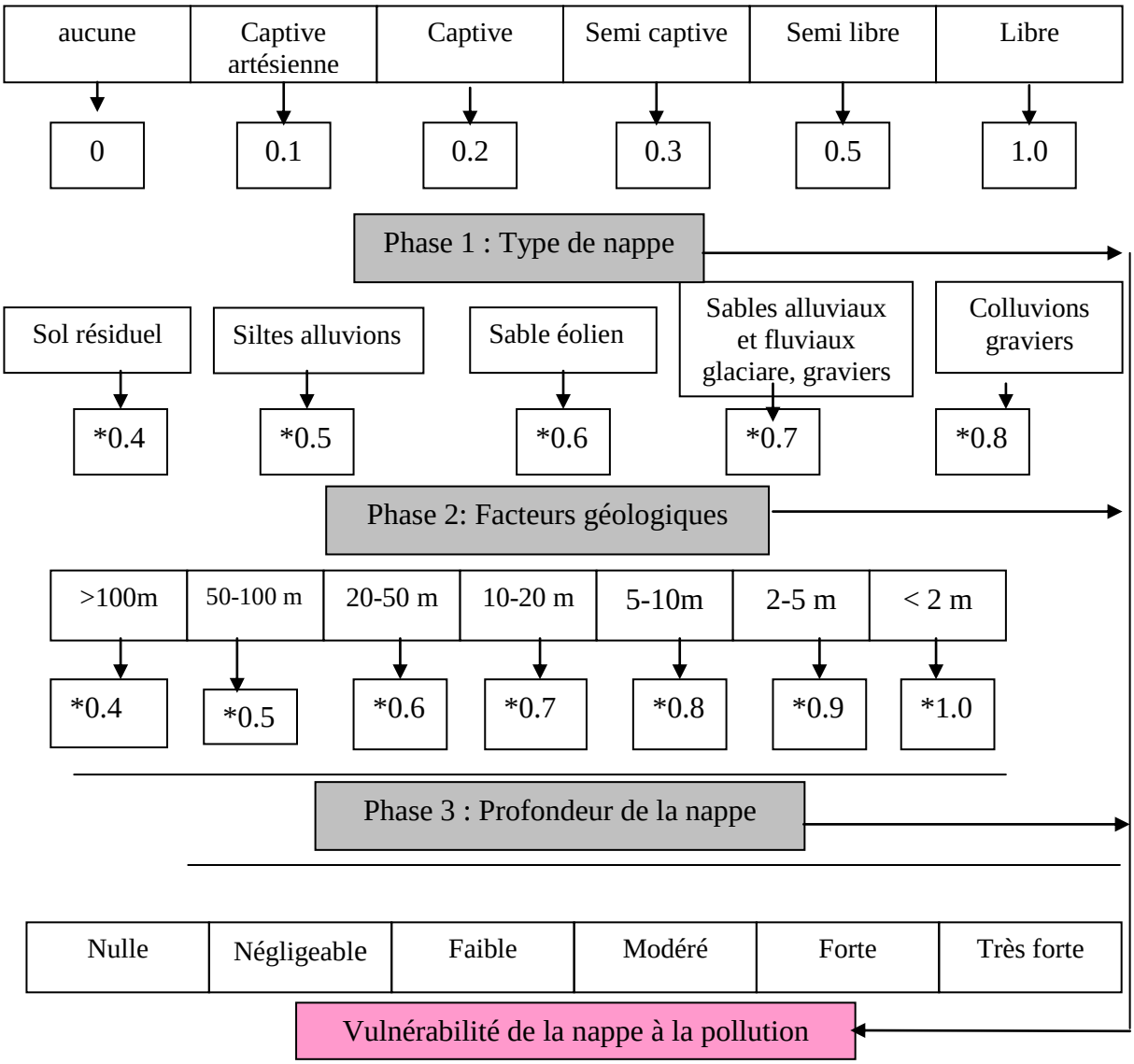

Fig. 15 : Organigramme du système empirique GOD pour une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère (d'après Foster, 1987). [18]

©UBMA - 2016

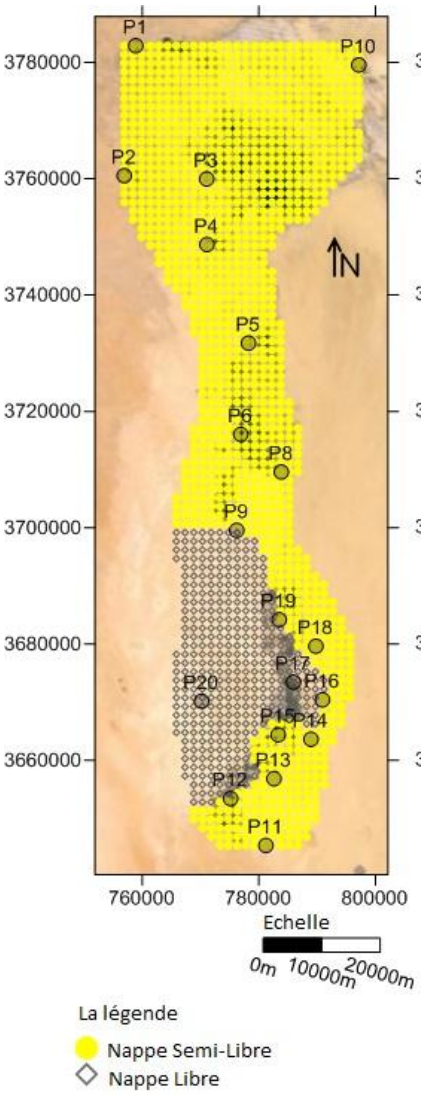

Figure. 16 : carte représentant le type de nappe aquifère.

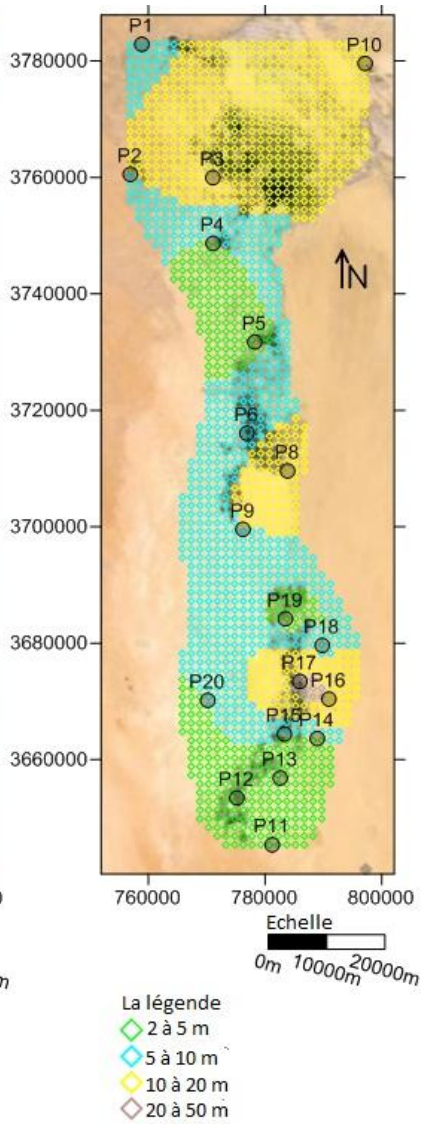

Figure. 17 : carte de la profondeur du niveau piézométrique de la nappe.

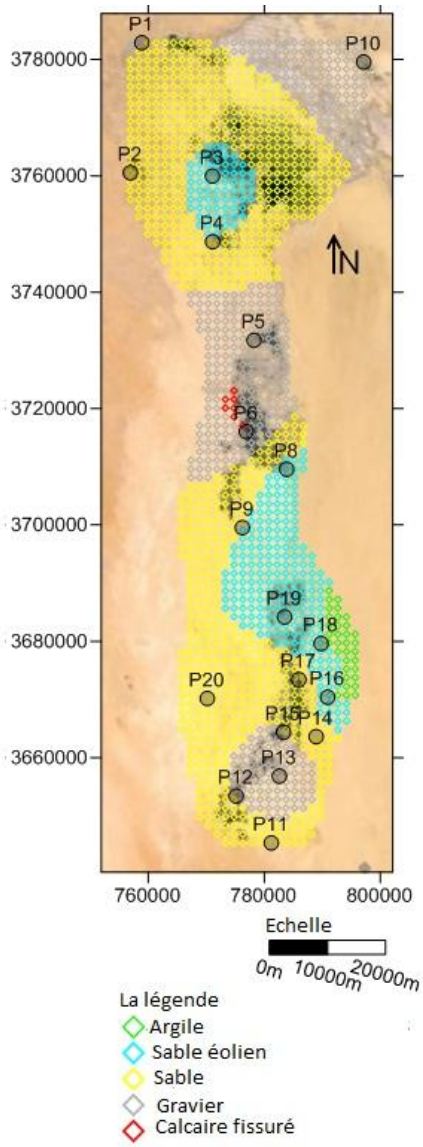

Figure. 18 : carte de la lithologie de l'aquifère.

5.5.2. Carte de vulnérabilité GOD

Les nappes libres sont les plus vulnérables, les polluants d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et dans la zone non saturée.

L'examen de la carte de vulnérabilité (Fig. 19) montre que la nappe libre d'Oued Righ à une vulnérabilité forte à moyenne. Elle reste très vulnérable à la pollution par la migration ou l'infiltration des polluants dans les eaux du canal traversant la région. Les parties du canal affectées par un bouchon présentent une vulnérabilité forte à cause de la faible profondeur de la zone non saturée. Les zones urbaines, les chotts et les zones agricoles peuvent présenter des sources de pollution et rendre la nappe vulnérable.

Nous constatons qu'une grande partie de la nappe, soit 84 % est caractérisée par une vulnérabilité moyenne. 13 % de la superficie peut être fortement menacée par une pollution, alors qu'une très faible partie, et qui ne représente que 3%, a une vulnérabilité faible (Fig. 20).

©UBMA - 2016

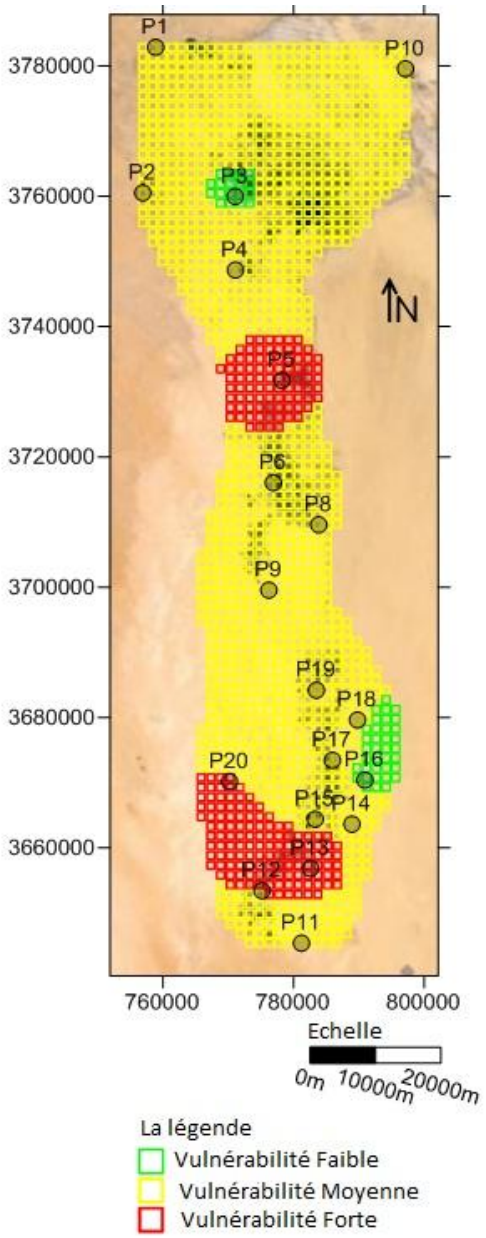

Figure 19: carte de la vulnérabilité de la nappe libre d'Oued Righ selon la méthode GOD.

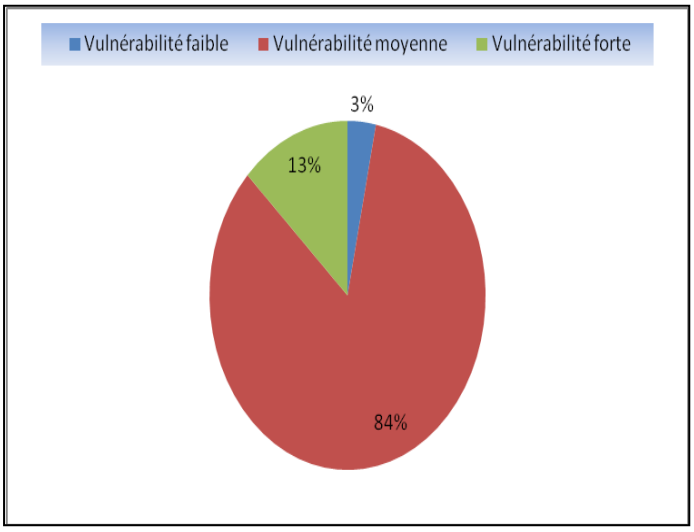

Figure 20 : Répartition spatiale du degré de vulnérabilité en (%).

CONCLUSION

Les eaux de la nappe libre superficielle de la région de l'Oued Righ sont caractérisées par des valeurs élevées de la conductivité électrique, indiquant qu'elles sont chargées et sont vivement déconseillées pour l'AEP. Cependant pour les besoins en irrigation, elles peuvent être utilisées pour certaines cultures.

L'interprétation des résultats d'analyses a permis de constater, d'une manière générale, une augmentation de la salinité dans le temps. Dans cette région, il n'y a pas un problème de quantité mais plutôt de qualité. Le traitement (dessalement) des eaux pourrait améliorer la qualité chimique des eaux de la nappe libre superficielle pour une plus large utilisation.

La cartographie de la vulnérabilité et des risques de pollution des eaux souterraines est une méthodologie qui permet de mieux assurer la gestion qualitative des ressources en eau en relation avec les diverses activités humaines [15]. Selon la méthode de GOD la vulnérabilité

©UBMA - 2016

dépend du type de nappe, libre ou captive et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère.

Les résultats de cette méthode ont permis de montrer que la nappe superficielle de l'Oued Righ est libre et est vulnérable à la pollution, soit par l'infiltration des polluants des eaux du canal au niveau des bouchons, soit par les déversements accidentels sur le sol.

Aussi la remontée provoque la dégradation de la qualité des eaux par la forte minéralisation de la nappe superficielle, conséquence de l'évaporation intense à partir des plans d'eau libre et la dissolution des évaporites.

Cette forte minéralisation montre globalement une origine évaporitique dont les minéraux dominants sont le gypse et l'halite.

REFERENCES

[1] Khechana. S., Derradji R., 2014,: Qualité des eaux destinées à la consommation humaine et à l'utilisation agricole (Cas des eaux souterraines d'Oued-Souf, SE algérien), *Rev. Sci. Technol., Synthèse* 28 : pp. 58-68.

[2] Bouselsal, B., Kherici, N. 2014. Effets de la remontée des eaux de la nappe phréatique sur l'homme et l'environnement : cas de la région d'El-Oued (Sud-Est Algérie). *Afrique Science*, Vol.10, N°3, 1 septembre 2014.

[3] Guendouz A ., Moulla A.S., Remini., B., Michelot J.L. 2006. Hydrochemical and isotopic behaviour of a Saharan phreatic aquifer suffering severe natural and anthropic constraints (case of Oued- Souf region, Algeria). *Hydrogeol J* , 14, pp. 955–968.

[4] Belksier M.S., Chaab S., Abour F., Zeddouri A., Bouselsal B., Kechiched R., 2014, : l'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux de la nappe libre dans la région de Touggourt, *International Journal for Environment & Global Climate Change*, Volume 2, Issue 3 (2014), pp. 32-39 ISSN 2310-6743 http://ijegcc.ewdr.org/component/k2/item/download/319_a28aab41e355d3f2dbf39f297ecd5b6e.html.

[5] Djidel M. 2008 : Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette d'Ouargla (Sahara septentrional, Algérie) Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba- pages 51 et 53.

[6] Nezli I.E., Achour S., Belhadj H.A. , 2009, Hydrogeochemical approach to study the water fluoridation of the Terminal Complex aquifer in the low algerianValley of M'ya (Ouargla), *Courrier du Savoir* – N°09, Mars 2009, pp. 57-62.

[7] Rouabhia A.E.K., Djabri L., 2010, L'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux souterraines de l'aquifère miocène de la plaine d'el ma el abiod *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 08, Juin 2010, pp. 55-67.

[8] Brinis, N., 2011. Caractérisation de la salinité d'un complexe aquifère en pays aride : cas de l'aquifère D'El-Outaya, région Nord-Ouest de Biskra (Algérie), Thèse de doctorat.

[9] Belksier M. S., 2010 : Hydrogéologie et hydrochimie de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et l'évolution de sa vulnérabilité Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar-Annaba- pages 87 et 90.

[10] Derradji F., Kherici N., Romeo M., Caruba R., 2004. Aptitude des eaux de la vallée de la Seybouse à l'irrigation (Nord-Est algérien), *Sécheresse* , 15 (4), pp. 353-60.

[11] Gabriel Etienne A., Kouassi D., Boyossoro H. K., Brou D., Saley M.B., Biemi J., 2009 : Contribution des Méthodes de Vulnérabilité Intrinsèque DRASTIC et GOD à L'Etude de la Pollution par les Nitrates dans la Région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), *European Journal of Scientific Research* ISSN 1450-216X, Vol. 31, No.1, pp. 157-171

[12] Gouaidia. L., Boudoukha. A. , Djabri. L., Guefaifia A.. 2010, Evaluation de la vulnérabilité d'une nappe en milieu semi-aride et comparaison des méthodes appliquées : cas de la nappe de Meskiana (Est algérien). *Sécheresse* 22 : doi:10.1684/sec.2011.0296., pp. 35-42

[13] Sinan M., 2007, Ecole Hassania des Travaux Publics (Casablanca), Mlle. Najoua Bouibrine: Direction Générale de l'Hydraulique (Rabat). Atelier international sur l'utilisation des techniques spatiales pour le développement durable. (Rabat, 25-27 avril 2007).

[14] Amharref M.., Bernoussi A.S., 2007 : Vulnérabilité et risque depollution des eaux souterraines. Actes des JSIRAUF, Hanoi, 6-9 novembre 2007.

[15] Maoui A.. 2007. Evolution et origine du chimisme des eaux de l'aquifère superficiel de Zaâfrane : région de la steppe Sud Algéroise .Etude de la variation spatiale de la salinité et ses risques sur les sols et la végétation. Th. Doctorat, Univ. d'Annaba, 298 p.

[16] Lucia F., Mohamed K., Kamel Z., Ahmed M. & Gian M.,2001. Origine de la minéralisation et comportement hydrogéochimique d'une nappe phréatique soumise à des contraintes naturelles et anthropiques sévères : exemple de la nappe de Djebeniana (Tunisie), *Comptes Rendus Académie des Sciences Paris*, Sciences de la Terre et des planètes, 332, pp. 665–671.

[17] Youssef H., Jacques M., Jacky M., Lhoussaine B., Pierre C.,1999. Use of the Bd/Cl ratio to determine the origin of the salinity of groundwater an example from the Souss plain (Morocco), Académie des sciences / Elsevier.

[18] Foster S., 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden, W. & Van Waegeningh , H.(eds) Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, pp. 69–86.

©UBMA - 2016