

# EVALUATION ET MODELISATION GEOCHIMIQUES DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES UTILISEES POUR L'IRRIGATION DES TERRES AGRICOLES DANS UNE ZONE ARIDE : CAS DE LA REGION DE SIDI OKBA

## GEOCHEMICAL EVALUATION AND MODELLING OF THE QUALITY OF GROUNDWATER USED FOR IRRIGATION IN ARID AREA: SIDI OKBA A CASE STUDY

M.Z. RECHACHI <sup>(1,2)</sup>, M. CHEBBAH <sup>(3)</sup>, Y. ABDELHAFIDH <sup>(1,2)</sup>

<sup>(1)</sup> Université Mohamed Kheider de Biskra, Département d'Agronomie

<sup>(2)</sup> Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides Omar Elbernaoui de Biskra

<sup>(3)</sup> Centre Universitaire A. Boussof de Mila, BP 26 RP, 43000 Mila, Algérie

### RESUME

Ce travail traite de la qualité physico-chimique des eaux souterraines destinées à l'irrigation des terres agricoles dans la plaine de Sidi Okba au SE de Biskra. La qualité de ces eaux est évaluée par l'étude des paramètres physico-chimiques de 30 échantillons d'eau de forages ainsi que par l'évaluation de leur aptitude à l'irrigation des terres agricoles dans la zone d'étude. Les compositions chimiques de ces eaux font apparaître une salinité élevée avec un faible à fort risque de sodicité. Deux grandes familles d'eau se manifestent, la première à faciès chloruré sodique et magnésien en aval de la zone d'étude et la deuxième à faciès sulfaté sodique et calcique en amont, suivant le sens d'écoulement. Le modèle thermodynamique, Phreeqc (version Interactive 3.1.4-8929), indique que la calcite est le premier minéral qui se précipite, en relation avec un taux élevé du calcaire total présent dans le sol (moyenne de 30 %), alors que le gypse se dissout dans la solution du sol. De cette étude, il résulte que la qualité des eaux d'irrigation a un impact non négligeable sur la salinisation des sols irrigués; ceci en fonction de leur contexte naturel et fort probablement du type de cultures utilisées.

**MOTS CLES:** Eau, irrigation, salinité, modèle thermodynamique, zone aride.

### ABSTRACT

This work deals with the physical and chemical quality of groundwater used for irrigation of agricultural land in the plains of Sidi-Okba, SE of Biskra. The quality of this water was assessed by the study of 37 water samples and their evaluation for irrigated land in the study area. The chemical compositions (salinity and sodicity) belong to two families, the first to the sodium chloride and magnesium facies and the second to sulfate sodic and calcic following the direction of flow. The thermodynamic model using the software Phreeqc Interactive 3.1.4-8929 indicates that calcite is the first mineral that can precipitate, this in relation to the high content of total calcium carbonate (limestone) in soil (average of 30%) while gypsum can dissolve in the soil solution. In this study, the quality of irrigation water has a significant impact on the salinization of irrigated soils. This depends on the natural context and the type of crops used.

**KEYWORDS:** Saline, water, irrigation, thermodynamic model, arid area.

## 1 INTRODUCTION

L'eau est un facteur limitant de la production agricole et à terme, près de la moitié des surfaces irriguées dans le monde seraient menacées par la salinisation secondaire (Lahlou et al, 2000). D'autre part, le degré de salinisation d'une surface irriguée dépend de plusieurs facteurs, principalement la qualité de l'eau d'irrigation, la nature du sol irrigué, les conditions climatiques et le niveau de la

nappe en question.

En Algérie, la zone aride représente plus de 85 % du territoire national et plus de 20 % des sols irrigués sont concernés par le problème de salinité (Hartani et al, 2009). De plus, la majorité des eaux d'irrigation titrent plus de 2 g/l, ce qui accroît le risque de salinisation des sols dans ces régions (Askri et Bouhlila., 2010). Toutefois, la réussite des productions végétales dans ces régions dépend des

eaux souterraines utilisées (Snoussi et Halitim, 1998), traduisant une irrigation agricole plus consommatrice d'eau (75%) (Cheverry et Robert, 1998) tel est le cas de la région de Sidi Okba. Cette région agricole pionnière du Zab Chergui au SE de Biskra, se caractérise par un haut potentiel agricole. Elle possède une superficie agricole utilisée (SAU) de 10025 ha dont 7513 ha irriguées avec plus de 700 forages recensés (ANRH, 2008; DSA de Biskra, 2013).

L'objectif de ce travail est l'étude de la qualité physico-chimique des eaux destinées à l'irrigation ainsi que leur aptitude à l'irrigation des terres cultivées, principalement le palmier dattier, ceci, à partir de l'étude d'une trentaine d'échantillons d'eau d'irrigation provenant de forages réalisés dans la nappe du Mio-Pliocène dans la région de Sidi Okba.

## 2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 2.1 Présentation de la zone d'étude

La région des Ziban fait partie du Bas Sahara septentrional. Elle se caractérise par une forte potentialité phoenicicole avec près de 5 millions de palmiers dattiers et plus de 9908 points d'eau (forage, puits et sources) inventoriés ainsi que deux barrages irriguant une surface de 99865.4 ha (DSA, 2013) sous forme d'oasis avec une polyculture étagée

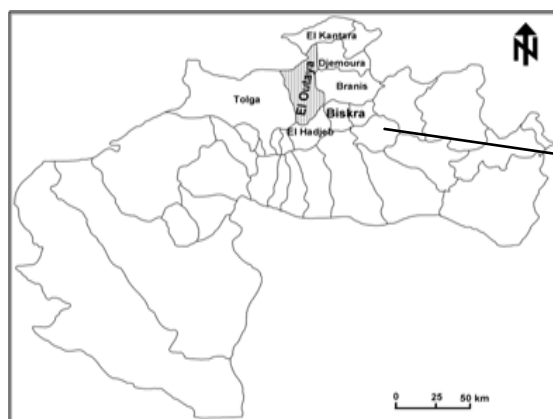


Figure 01: Situation géographique de la zone d'étude

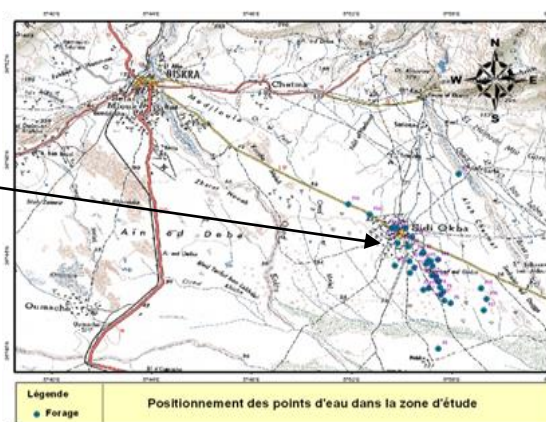
Selon les données climatiques de la station météorologique de Biskra, la région des Zibans est soumise à un climat chaud et sec, les pluies sont faibles et de répartition mensuelle et/ou annuelle irrégulière. La moyenne annuelle est de 157.07 mm (période 1967- 2012). Les fortes variations saisonnières de températures sont enregistrées entre le mois le plus chaud (Juillet avec une moyenne de 33.23°C) et le mois le plus froid (Janvier 10.93°C) où la moyenne annuelle est de 21.88°C. Toutefois, les précipitations sont toujours inférieures à l'évapotranspiration potentielle ou réelle (l'ETP ou l'ETR) ce qui conduit à un déficit couvrant toute l'année. Ce déséquilibre induit la nécessité d'une irrigation importante

(palmier dattier, arboriculture et cultures herbacées ou maraîchères) ou sous forme de périmètres irrigués et d'abrisserres plus spécialisés (palmiers dattiers, céréales ou cultures maraîchères). La région de Sidi Okba possède une superficie agricole utile (SAU) de 10025 ha dont 7513 ha irrigués (DPSB, 2011). La répartition de la surface irriguée dans la zone d'étude est présentée dans le tableau 01.

Tableau 01: La superficie irriguée dans la région de Sidi-Okba

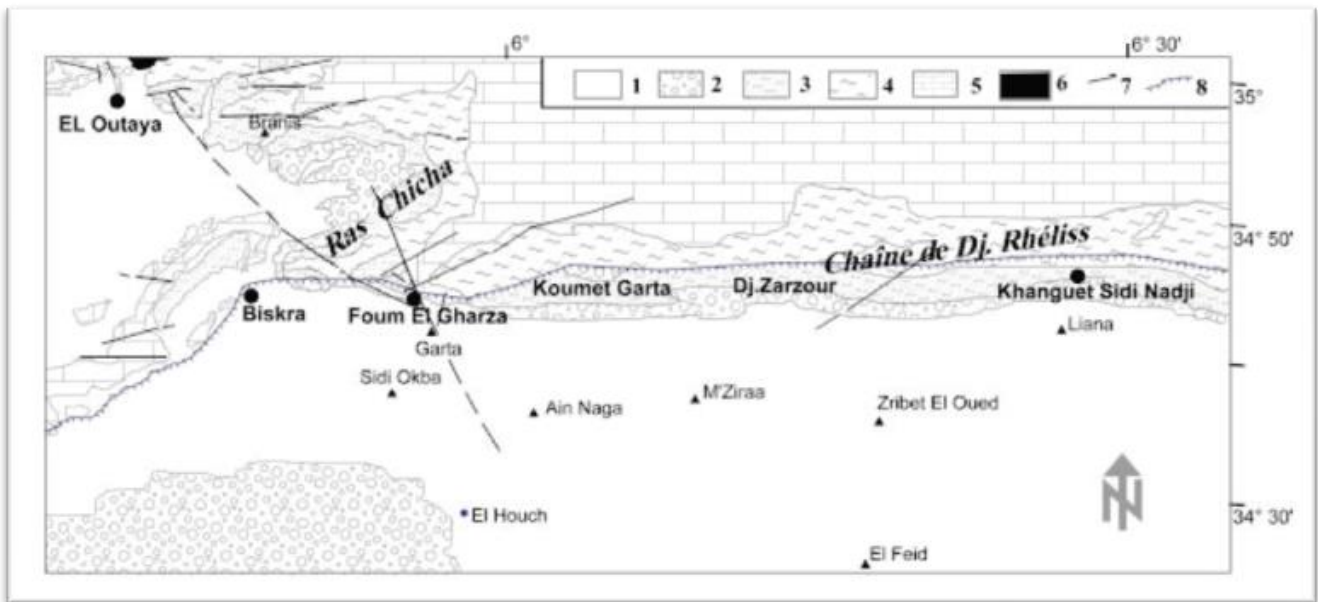
Mode d'irrigation	gravitaire	goutte à goutte	aspersion	total (ha)
Superficie irriguée (ha)	6219	1184	110	7513

Dans cette étude, une trentaine de forages d'eau destinés à l'irrigation des terres agricoles dans les localités de Tajdid, Swafel Tajdid, Mangae Bougtaf, Feidh el-ghareg et Garta ont été sélectionnés durant la campagne agricole 2014 (Fig.1). Deux modes d'irrigation (goutte à goutte et gravitaire) sont pratiqués dans cette région; les techniques de plantation des palmiers dattiers sont en cuvette ou en fosse, à une profondeur de 1 à 1,5 m selon l'épaisseur de la couche sablo-limoneuse présente.



pour l'agriculture dans ces régions avec l'utilisation des eaux souterraines. Mais pour entraîner les sels en excès, des fractions de lessivage sont nécessaires, à moyen ou à long terme, ce qui entraîne une surconsommation d'eau, avec une augmentation des coûts et une baisse de productivité.

## 2.2 Contexte Géologique et Hydrogéologique



1 : Quaternaire, 2 : Pliocène, 3 : Miocène supérieur, 4 : Miocène inférieur et moyen, 5 : Substratum, 6 : Trias, 7 : Failles, 8 : Accident sud atlasique

Figure 02: Carte géologique simplifiée du bassin des Chotts (Chebbah et al. 2012)

Du point de vue géologique, le domaine saharien est constitué essentiellement par des sédiments marins et lagunaires, depuis le Céno manien jusqu'à l'éocène moyen, avec une grande variété de terrains calcaires, dolomitiques et marneux (Aidaoui, 1994). La série néogène dans la région de Sidi Okba, traversée par plusieurs dizaines de forages, est constituée d'une alternance d'argiles, d'argiles sableuses ou sables argileux et de sables avec des passées graveleuses. Dans cette série deux sous-ensembles se différencient, avec à la base un sous-ensemble argilo-sableux (ou gréseux) et au sommet un sous-ensemble argilo-sableux et graveleux (Chebbah, 2007). Cette plaine est découpée par les lits des oueds issus des Aurès. Les formations superficielles associées sont composées de limons et de sables à débris végétaux. Dans ces dépôts se sont développés des sols riches en débris organiques donnant lieu à des îlots très fertiles. La prospérité de la plaine du Zab Chergui, partie du grand bassin versant saharien du Chott Melghir, est due aux apports limoneux issus des épandages de crues de nombreux oueds des Aurès (oued Biraz, oued Abiod et oued Melah). (Aidaoui, 1994; Bougherara et Lacaze, 2009 ; ANRH, 2011).

La nappe du Mio-pliocène dite nappe des sables constitue la ressource hydrique principale dans la région. Ces eaux sont mobilisées surtout pour l'irrigation agricole. Le système aquifère de cette nappe est hétérogène; il est, le plus souvent, constitué de couches aquifères de diverses

perméabilités et d'épaisseurs. Cette nappe est fortement exploitée dans la partie Est de la wilaya de Biskra, et sa profondeur varie de 100 à 900 m (Messameh et al 2009).

### 2.3 Les méthodes de traitement des données

Les calculs géochimiques ont été réalisés avec le modèle Phreeqc (version interactive 3.1.4-8929, Parkhurst et Appelo, 2013). Le test de corrélation de type Pearson est fait à l'aide de XLSTAT. Le diagramme de Piper a été construit au moyen du logiciel Diagrammes (Simler, 2013).

## 3 RÉSULTATS

### 3.1 Hydrogéochimie

Les analyses physico-chimiques des eaux d'irrigation ont été réalisées au laboratoire central du CRSTRA. Les résultats complets de ces analyses sont présentés dans le tableau en Annexe.

Les données statistiques des analyses physico-chimiques des eaux de forages exploitées dans la présente étude sont présentées dans le tableau 2 et leur matrice de corrélation dans le tableau 3.

Tableau 02: Les paramètres statistiques des eaux analysées

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
conductivité ms/cm	3,720	13,650	5,994	1,996
Ca	5,810	29,650	15,397	6,871
Mg	1,600	93,960	21,976	17,389
Na	7,630	68,100	27,532	10,632
K	0,120	0,790	0,318	0,129
Cl	14,000	85,000	36,161	14,795
SO4	2,300	50,000	21,312	12,432
HCO3	0,420	9,440	4,426	2,188
NO3	0,010	0,670	0,182	0,180
pH	6,600	7,880	7,318	0,289

Tableau 03: Matrice de Corrélation (Pearson) des différents paramètres de la qualité chimique des eaux d'irrigation utilisées dans la région de Sidi-Okba

	conductivité ms/cm	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	pH
conductivité ms/cm	1,000	<b>0,803</b>	<b>0,833</b>	<b>0,715</b>	0,034	<b>0,645</b>	<b>0,677</b>	0,051	<b>0,436</b>	-0,354
Ca		1,000	<b>0,644</b>	0,250	0,010	<b>0,553</b>	<b>0,706</b>	-0,169	<b>0,787</b>	<b>-0,559</b>
Mg			1,000	<b>0,579</b>	0,285	<b>0,860</b>	<b>0,450</b>	-0,115	0,319	-0,086
Na				1,000	0,061	<b>0,402</b>	0,258	<b>0,478</b>	-0,181	0,068
K					1,000	0,357	-0,024	-0,286	-0,233	<b>0,378</b>
Cl						1,000	0,198	-0,228	0,293	-0,103
SO4							1,000	-0,221	<b>0,450</b>	-0,339
HCO3								1,000	-0,308	-0,110
NO3									1,000	<b>-0,685</b>
pH										1,000

Les valeurs en gras montrent un niveau de signification de 0.05 (5%).

Les résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe du Mio pliocène montrent des valeurs élevées de la conductivité électrique (3.72– 13,65 mS/cm). Elle a une corrélation significative liée, principalement, à la forte présence de calcium  $Ca^{++}$ , magnésium  $Mg^{++}$ , Sodium  $Na^+$ , chlorures  $Cl^-$ , sulfates  $SO_4^-$  et nitrates  $NO_3^-$ . Quoique que les eaux soient fortement salées, la faible liaison entre les éléments évaporitiques est principalement due à la nature des matériaux provoquant la salinisation de ces eaux.

Le pH de ces eaux est presque neutre, il varie entre 6,6 et 7,88 avec une moyenne de 7,318; ces valeurs sont admises pour l'irrigation des terres agricoles car la faible liaison pH-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> les justifie, sachant qu'un pH compris entre 8 et 9 est généralement retenu comme limite de dégradation de la structure (Aubert, 1983).

Selon la carte de salinité établie, la CE augmente progressivement de l'amont vers l'aval de la zone d'étude, ceci dans le sens de l'écoulement souterrain.

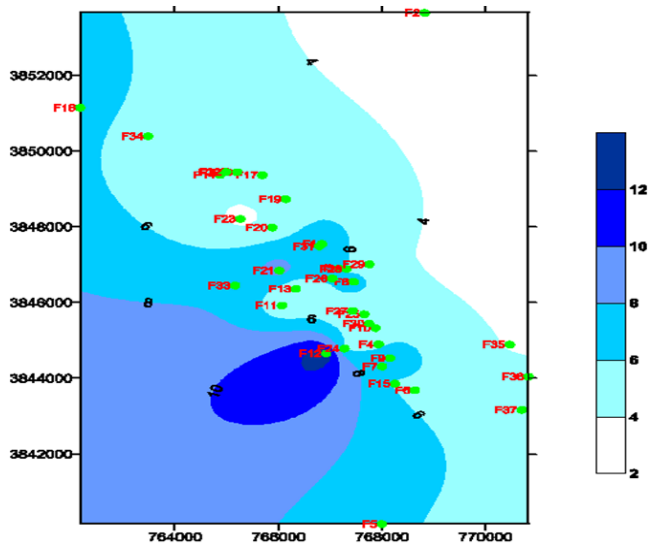


Figure 02: Carte de la salinité (CE mS/cm) des eaux des forages de la zone d'étude



Figure 04: Diagramme de Piper des eaux d'irrigation

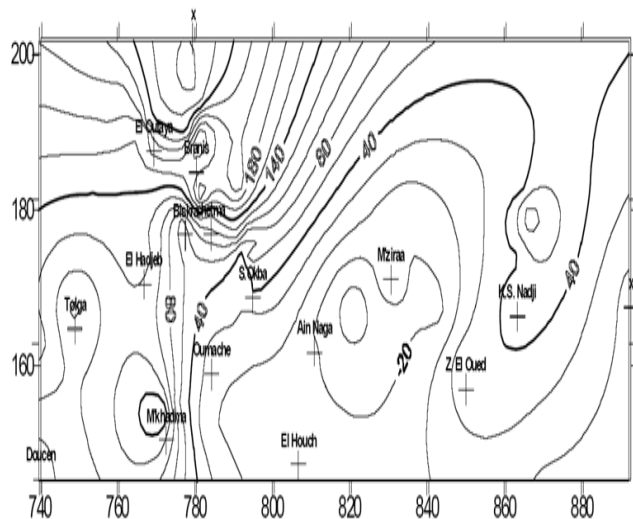


Figure 03: Carte piézométrique de la nappe du Mio-pliocène de Biskra (Messameh et al, 2009)

### 3.2 Faciès chimiques des eaux d'irrigation

La position des points dans le diagramme de Piper montre que ces eaux appartiennent à deux principales familles d'eau : i) le faciès chloruré sodique et magnésien : 23 échantillons (forages F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10; F11, F12, F20, F21, F22, F23, F25, F26, F27, F28, F29 et F30) pour la plupart situés en aval de la zone d'étude ; ii) le faciès sulfaté sodique et calcique : 7 échantillons (forages F13, F14, F15, F16, F17, F18 et F19), tous situés en amont de la zone d'étude.

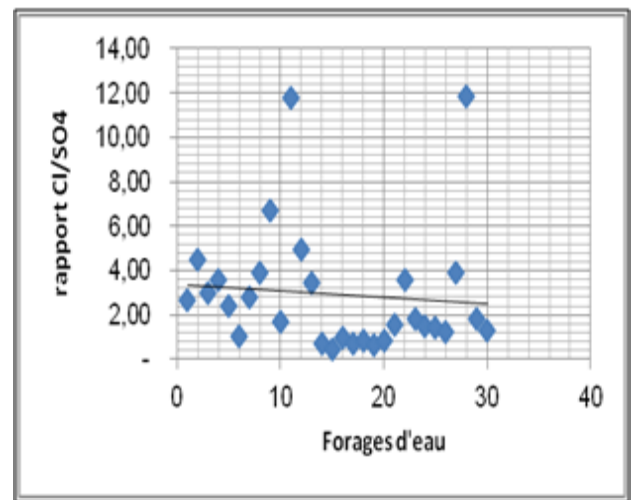


Figure 05: Représentation graphique du rapport Cl-/SO4-

Afin de classer les eaux et les solutions du sol, le rapport  $Cl^-/SO_4^{2-}$  est utilisé; d'une façon général, ce rapport est supérieur à 1 reflétant une salinisation chlorurée. Selon Servant et Servat (1966), ce rapport peut être détaillé comme suit :

- il est inférieur à 1 pour 7 échantillons d'eau (F13, F14, F15, F17, F18 et F19) situés en amont de la zone d'étude, traduisant une salinisation sulfatée-chlorurée ;
- il est compris entre 1 et 5 pour 20 échantillons (F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F9, F11, F12, F20, F21, F22, F23, F25, F26, F27, F29 et F30), traduisant un type de salinisation chlorurée-sulfatée ;
- il est supérieur à 5, pour 3 échantillons (F8, F10 et F28), traduisant une salinisation chlorurée.

Le premier groupe est situé en amont de la région de Sidi-Okba, les deux autres en aval. On a donc une évolution du

faciès chimique des eaux dans le sens de l'écoulement, du faciès sulfaté vers le faciès chloruré.

### 3.3 L'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux

Le calcul des indices de saturation (Tableau 5) montre que les eaux étudiées sont saturées par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sont sous-saturées pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

**Tableau 05: Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des eaux de forages de Sidi Okba**

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne
IS Halite	-5,29	-4,21	-4,82
IS gypse	-1,60	-0,14	-0,67
IS Dolomite	-1,48	1,92	0,57
IS Calcite	-0,80	0,85	0,22
IS Aragonite	-0,95	0,70	0,08
IS Anhydrite	-1,88	-0,46	-1,02

## 4 DISCUSSION, APTITUDE DES EAUX À L'IRRIGATION

Dans la région de Sidi-Okba, l'irrigation est assurée par le pompage des eaux des forages de la nappe du Mio-pliocène. La qualité de l'eau d'irrigation est appréciée en utilisant le diagramme de classification des eaux de l'U.S.S.L (1954) modifié (Durand, 1983). Le report des échantillons dans ce diagramme de Riverside (fig.6) indique que la salinité, représentée par la conductivité électrique CE, est forte à très forte (C4 et C5) et la sodicité, illustrée par le SAR (Sodium Adsorption Ratio), selon Servant et Servat, (1966), et selon le degré d'alcalinisation appartient à la classe 1 où ce risque est nul (S1 : entre 0 et 4) pour 1/6 des échantillons (soit 16.66 %) et à la classe faible S2 (entre 4 et 8) à moyenne S3 (entre 8 et 12) pour la plupart des échantillons prélevés; ceci indique un apport très important de Na<sup>+</sup> à la solution du sol traduisant un risque de sodicité pour ces eaux d'irrigation. Tous les points d'eau ont une classification comprise entre C4S1 et C5S3 (Fig.6) traduisant une mauvaise qualité chimique de ces eaux. Par conséquent, les eaux principalement de la classe C5 ne peuvent être utilisées en irrigation que dans le cas des sols très drainants (sables et graviers) riches en calcium soluble (Dubost, 1994). Pour remédier à ce problème, en absence d'une autre ressource en eau, le remplacement du sodium par le calcium

sous forme d'un amendement gypseux est conseillé avec drainage (Qadir et al, 2006). Une autre solution, complémentaire de l'amendement chimique, consiste en l'utilisation des plantes afin de diminuer la quantité du sodium par phytoremédiation ; du fait de l'augmentation de la dissolution du carbonate de calcium du sol, ceci peut fournir du calcium, qui peut être échangé avec le sodium (Qadir et al, 2007 in Rimmer et al, 2013).

Tenant compte de la spécificité de la région de Sidi-Okba comme étant une oasis ; le palmier dattier est la culture pilote pratiquée avec un rendement moyen de 80 kg/pieds âgés de plus de 40 ans et de 120 à 140 kg/pieds âgés de moins de 40 ans selon notre estimation. La tolérance des plantes cultivées vis-à-vis de la salinité varie largement en fonction de l'espèce, de la variété, du stade végétatif et des facteurs liés au milieu (Daoud et Halitim, 1994). Néanmoins l'historique de la région et le choix stratégique du pays doivent nous orienter vers des cultures du type céréalières, maraichères et fourragères. En fonction de la salinité des eaux d'irrigation utilisées, les fellahs peuvent pratiquer quelques cultures tolérantes aux sels comme : orge, avoine, oignons, betteraves, navets, carthames, coriandre, laitue, tomate, abricotier, olivier et figuier (ANAT, 2003), afin de diversifier et d'améliorer leurs revenus. Aussi, le drainage des terres irriguées est-il très important pour contrôler et réduire la salinisation des sols car l'irrigation avec des eaux salées nécessite l'apport d'une fraction d'eau supplémentaire pour lessiver les sels (Vallès et al, 1983) afin de maintenir la composition saline de la solution de sol proche de celle de l'eau d'irrigation (Dubost, 2002). L'irrigation gravitaire utilise beaucoup d'eau, ce qui influence les propriétés du sol ainsi que le végétal avec un risque d'accumulation importante de sels dans la zone racinaire, alors qu'en irrigation localisée, le taux d'humidité dans la zone racinaire reste élevé, ce qui limite les risques d'accroissement de la concentration en sels et de la pression osmotique. (Soutter et al, 2007). Donc, la réduction du risque de salinisation et d'alcalinisation secondaire dans la région d'étude peut se faire en conjuguant des périodes d'irrigation localisée (goutte à goutte), avec des périodes d'irrigation gravitaire permettant le lessivage des sels ou encore le changement des sources d'irrigation ou en mélangeant l'eau utilisée avec une eau à faible teneur en sodium (Lenntech, 2008).

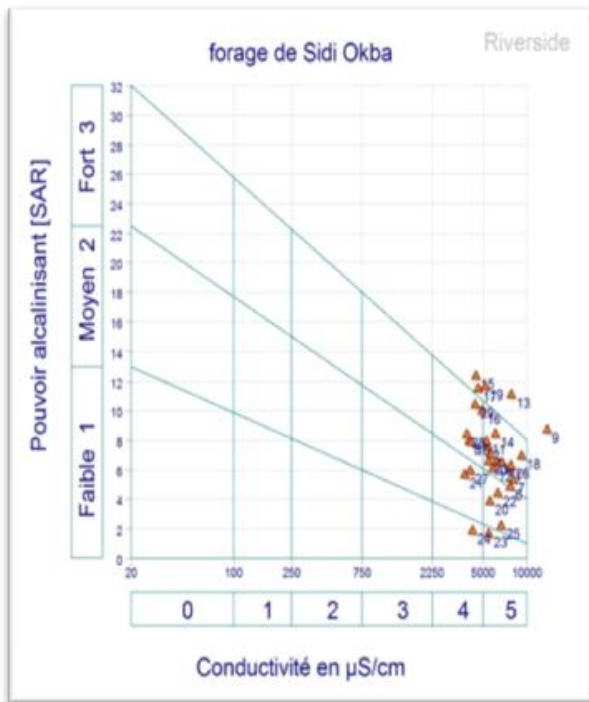


Figure 06: Diagramme de Riverside des eaux d'irrigation de Sidi Okba selon Manuel pour Diagrammes (Smiler, 2013)

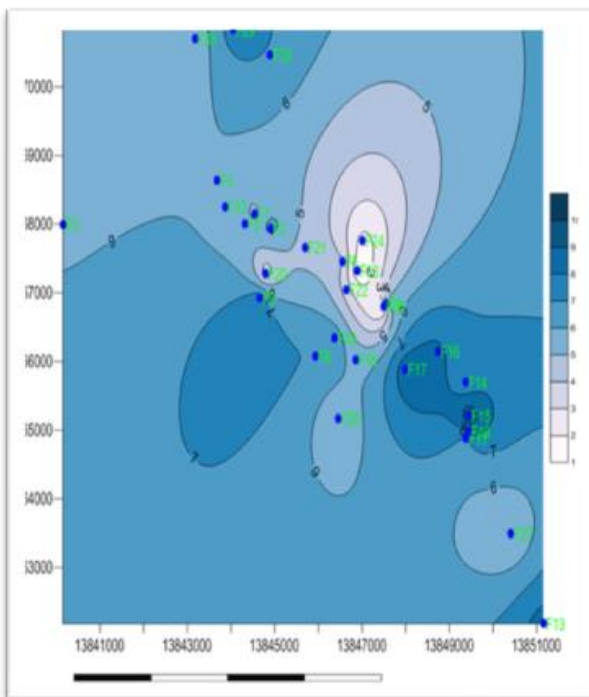


Figure 07: Carte du SAR des eaux d'irrigation

## 5 CONCLUSIONS

Dans la région de Sidi-Okba, la nappe du Mio-pliocène est très sollicitée. La composition chimique de ses eaux destinées à l'irrigation des sols agricoles traduit une salinité très forte à excessive avec un SAR de faible à fort risque de sodicité (de S1 à S3). Deux grandes familles d'eaux se manifestent, l'une à faciès chloruré sodique et magnésien en aval et l'autre à faciès sulfaté sodique et calcique en amont de la zone d'étude. La sous-saturation en gypse, anhydrite et halite traduit la possibilité de dissolution de ces minéraux dans l'eau d'irrigation, tandis que les minéraux carbonatés se trouvent parfois proches de l'équilibre, souvent en sursaturation et tendent vers la précipitation sous forme de calcite et dolomite. Il en résulte que l'irrigation avec ces eaux reste utilisable mais avec des précautions à prendre telles que : la maîtrise des techniques liés à l'irrigation surtout le lessivage et le drainage, des techniques liées à la culture : le choix de cultures tolérantes aux sels, phytoremédiation, l'assolement, la rotation, l'amélioration des sols par l'apport de la matière organique.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions le CRSTRA pour leurs précieuses aides afin d'élaborer ce travail. Nous remercions infiniment M. Guilhem Bourrié, de l'INRA-Avignon, pour l'aide donnée dans les calculs d'équilibre avec le logiciel Phreeqc et pour des discussions utiles.

## REFERENCES

- [1] ANAT-2003 - Etude Schéma directeur des ressources en eau W. de Biskra dossier Agro-pédologique.53p
- [2] ANRH, 2008- inventaire des points d'eau et enquête sur les débits extraits de la wilaya de Biskra. Rapport réalisé en Septembre 2008.23p
- [3] ANRH, 2011-Etude sur modèle mathématique du système aquifère de la région du Biskra.
- [4] Aidaoui S-1994-Ressource en eau et aménagement hydro-Agricole dans la région de Biskra 'Ziban'(Algérie); thèse Doctorat. University de Nancy II. 327p
- [5] Askri B et Bouhlila R., 2010-Evolution de la salinité dans une oasis moderne de la Tunisie. Etude et Gestion des sols, Vol 17, 3-4, 2010-pages 197 à 212.
- [6] Aubert G, 1983 - Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodiques. - Cah. ORSTOM, série pédol., vol. XX, n°1, pp. 73-78.
- [7] Bougherara A et Lacaze B, 2009- Etude préliminaire des images Landsat et Alsat pour le suivi des mutations agraires des Ziban (extrême nord-est du Sahara algérien) du 1973 à 2007.journée d'animation scientifique (JAS 09) de l'AUF Alger Novembre 2009.
- [8] Chebbah M., 2007- Lithostratigraphie, Sédimentologie et modèles les de Bassins des dépôts néogènes de la région de Biskra, de part et d'autre de l'accident Sud Atlasique (Ziban, Algérie).thèse doctorat d'état.417 p.

- [9] Chebbah M. et Lamouroux C. (2012) -La Fosse Sud Aurésienne au Néogène (Domaine pré-saharien, Algérie) : séquences de dépôt, propositions de corrélations et évolution sédimentaires. Bull. Serv. Géol. Nat, Alger. Volume 23 n°3. pp 1-21.
- [10] Chevery CL et Robert M-1998 - la dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau : une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la Méditerranée? Etude et Gestion des sols, 5, 4,1998-pages 217-226.
- [11] Daoud Y et Halitim A (1994)- Irrigation et salinisation au Sahara algérien. Sécheresse n°3, vol. 5, pp 151 – 160.
- [12] DPSB (direction de programmation et suivi du budget de la wilaya de Biskra) ,2011- Monographie de la W. de Biskra-2011.Ed DPSB. P 205.
- [13] DSA-2013- Statistique de la direction des services agricoles de la wilaya de Biskra.
- [14] Dubost D-1994 -Pratique de l'irrigation au Sahara : diagnostic rapide en milieu oasien et stratégie de développement. Ciheam-Iam Montpellier. Commissariat régional de développement Agricole TOZEUR, Novembre 1994,pp54-60.
- [15] Dubost D., 2002-.Ecologie, Aménagement et Développement Agricole des Oasis Algérienne. Ed C.R.S.T.R.A. 423 p.
- [16] Durand J.H., 1983- Les sols irrigables. Etude pédologique. Ed Presses Universitaire de France. 339 p.
- [17] Hartani T., Douaoui A et Kuper M- 2009- Economie d'eau en système irrigués au Maghreb. Actes du Quatrième atelier régional du projet Sirma, Mostaganem, Algérie, 2628 Mai 2008. Cirad, Montpellier, France, Colloque-cédérom.
- [18] Lahlou M., Badraoui M et Soudi B-2000- Modélisation de l'évolution de la salinité et de l'alcalinité dans les sols irrigués. Séminaire « Intensification agricole et qualité des sols et des eaux », Rabat, 2-3 Novembre 2000 ; p : 135-151.
- [19] LENNTECH (2008) - Le SAR et l'irrigation. <http://www.lennotech.com/fran%E7ais/irrigation/SAR-risque-pour-eau-irrigation.htm>.
- [20] Messameh A H, Laborde J.P et Benmebarek S-2009 - Modélisation géostatistique de la salinité des eaux souterraine : Cas de la nappe des Sables de Biskra. éd Courrier de savoir N°09, mars 2009, pp 49-56.
- [21] Parkhurst D L et Appelo C A J, 2013-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, book 6, chap. A43, 497 p.
- [22] Qadir M., NOBLE A. D., SCHUBERT S., THOMAS R. J. and ARSLAN A -2006-. Sodicy-induced land degradation and its sustainable management: problems and prospects .Ed Land Degrad. Develop. 17: 661–676.
- [23] Rimmer D.L., Kirk G.J.D et Bourrié G-2013-land mark Papers: N°2. Quirk J.P et Schofield R.K.1955- the effect of electrolyte concentration of soil permeability. Ed-journal of Soil Science, Vol; 6, N°2.pp163-178. Commentary on the impact of Quirk et Schofield (1955).
- [24] Servant J. et Servat M., 1966-Introduction à l'étude des sols salés littoraux du Languedoc-Roussillon. Ann. Argon. N° 17(1) pp. 53-73.
- [25] Simler R, 2013- Manuel pour DIAGRAMMES- Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. 40p.
- [26] Snoussi S. A et Halitim. A., 1998 - Valorisation des eaux salines pour la nutrition minérale des plantes cultivées. Etude et gestion des sols5, 4, p: 289-298.
- [27] Soutter M, Mermoud A Et Musy A., 2007- Ingénierie des eaux et du sol, processus et aménagement. 1ère édit, science et technologie de l'environnement. 294p.
- [28] Valles V, valles A M et Dosso M., 1983 -Irrigation des sols salés et dose de lessivage. Cah O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., vol. XX, n°2. Pp119-127.
- [29] U.S. Salinity Laboratory Staff-1954- Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A. L. A. Richards, Editor Handbook n°60, 160p.



**ANNEXE: Résultats complets des analyses physico-chimiques des eaux d'irrigation de la région de Sidi-Okba**

Forage	CE 25°C	pH	Ca <sup>++</sup> meq./L	Mg <sup>++</sup> meq./L	Na <sup>+</sup> meq./L	K <sup>+</sup> meq./L	Cl <sup>-</sup> meq./L	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> meq./L	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> meq./L	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> meq./L
F1	7,61	6,98	21,64	38,47	33,21	0,23	56	20,8	5,92	0,39
F2	5,41	7,6	10,82	21,06	29,93	0,35	50	11,07	5,08	0,04
F3	6,21	7,6	12,62	30,17	30,31	0,39	42	14,11	4,6	0,14
F 4	5,6	7,71	13,83	24,5	30,68	0,34	38	10,71	4,72	0,04
F 5	6,79	7,33	16,83	29,56	31,06	0,37	42	17,5	4,88	0,19
F6	7,66	7,13	26,85	39,69	28,06	0,24	38	36,96	4,84	0,67
F 7	8,02	6,6	18,04	45,52	29,93	0,12	58	20,89	5	0,35
F 8	4,02	7,61	7,22	18,63	28,44	0,32	30	4,46	5	0,01
F 9	13,65	7,55	29,65	93,96	68,1	0,57	85	50	4,6	0,11
F 10	4,15	7,88	8,82	17,41	28,44	0,35	40	3,39	4,44	0
F 11	5,28	7,47	12,02	18,63	30,88	0,37	44	8,93	4,52	0,06
F 12	5,85	7,42	12,02	30,37	28,06	0,24	41	11,96	4,34	0,14
F 13	7,77	7,29	16,43	8,71	39,28	0,2	22,5	30,29	5,24	0,12
F 14	6,1	7,31	13,43	16,4	32,57	0,24	20	46,52	5,44	0,05
F 15	4,46	7,46	5,81	4,25	27,65	0,21	15	15,07	5,12	0,04
F16	4,93	7,37	7,71	9,18	28,99	0,24	14	20,29	5,04	0,04
F 17	4,6	7,4	7,81	3,04	26,75	0,25	16	19,13	4,98	0,04
F 18	9,11	6,95	27,85	25,51	35,7	0,13	24	35,51	6,6	0,42
F 19	5,13	7,36	11,22	1,62	29,44	0,21	18	21,88	5,04	0,15
F 20	5,56	7,36	14,83	26,53	17,41	0,79	48	24,34	0,64	0,22
F 21	3,72	7,49	8,016	9,52	16,63	0,38	36	10,16	0,8	0,05
F 22	6,3	7,13	20,84	18,22	19,37	0,31	47	25,57	0,72	0,44
F 23	5,47	7,11	22,04	20,25	7,63	0,27	39	26,27	0,6	0,41
F 24	4,21	7,74	13,22	19,84	7,63	0,34	30	39,84	0,56	0,07
F 25	6,66	6,95	26,05	27,13	11,35	0,24	42	29,91	0,42	0,61
F 26	7,72	6,84	27,9	25,58	32,34	0,42	48,2	38,62	3,5	0,32
F 27	4,07	7,56	13,48	16,42	22,8	0,47	30	7,72	6,5	0,05
F28	3,87	7,21	7,7	9,17	24,33	0,35	27,3	2,3	6,7	0,03
F 29	4,4	7,17	11,2	1,6	26,2	0,31	28,1	15,45	7,5	0,13
F 30	5,49	6,95	16	8,33	22,8	0,29	25,74	19,7	9,44	0,11