

Diagnostic de l'état actuel du sol au niveau du périmètre public irrigué Zelba 1 de la région de Mahdia (Sahel Tunisien)

D. Louati^(1, 2*), R. Majdoub⁽³⁾, et H. Abida^(1,2)

- 1) Département des Sciences de la Terre, Université de Sfax, Faculté des Sciences de Sfax, Rue de Soukra Km 4, BP 1171, 3000 Sfax, Tunisie
- 2) Hydrosociétés Appliquées, Institut des Sciences et Techniques des Eaux de Gabes, Tunisie
- 3) Département du Génie des Systèmes Horticoles et du milieu naturel, Université de Sousse, Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem, BP 47, 4042 Chott Mariem, Sousse, Tunisie

*: Auteur correspondant: dhouhaloua@hotmail.fr

RÉSUMÉ

L'utilisation des eaux de qualité médiocre pour l'irrigation est une nécessité dans les régions arides où l'évaporation est intense et les précipitations sont rares et irrégulières. Cependant, elle peut entraîner des effets néfastes qui peuvent se manifester, à long terme, sur le système eau-sol. Ce travail a été conduit au niveau du périmètre public irrigué Zelba 1 de la région de Mahdia (Sahel Tunisien) irrigué pendant presque 30 ans par les eaux saumâtres. Le principal objectif de ce travail est d'évaluer les impacts de l'utilisation des eaux saumâtres en irrigation. Dans ce contexte, un diagnostic détaillé de la situation actuelle de ce périmètre a été réalisé à travers une campagne d'échantillonnage et une analyse des échantillons d'eau et de sol.

La caractérisation pédologique et physique du sol a montré que le sol du périmètre est un sol brun isohumique profond évoluant sur un matériau d'épandage de limon à nodules calcaires. Il est perméable à la surface, où les valeurs moyennes de la perméabilité à saturation (Ksat) sont supérieures à 5×10^{-6} m/s. Sa texture est limoneuse à la surface et limono-argileuse en profondeur. Sa texture est moyenne à la surface et lourde en profondeur. La caractérisation chimique a montré que le sol est généralement alcalin avec un pH moyen = 8,66. Ce sol est très riche en carbonates, où les teneurs en calcaire total et en calcaire actif ont augmenté de la surface vers les horizons profonds. Ce sol est pauvre en matière organique puisque la teneur maximale n'a pas dépassé pas 2 %. La capacité d'échange cationique a augmenté de la surface vers les horizons les plus profonds. Cette variation est fortement corrélée avec la variation de la teneur en argile. Par contre, elle n'est pas associée à la variation de la teneur en matière

Comment citer cet article:

Louati D., Majdoub R., et Abida H. - 2017 - Diagnostic de l'état actuel du sol au niveau du périmètre public irrigué Zelba 1 de la région de Mahdia (Sahel Tunisien) *Etude et Gestion des Sols*, 24, 73-82

Comment télécharger cet article:

www.afes.egs/EGS-2017-24-5-Louati-73-82

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS:
www.afes/egs/

organique. Le suivi de la variation de la salinité du sol en fonction de la profondeur a montré que la conductivité électrique moyenne a augmenté avec la profondeur de 5,3 ($\pm 0,35$) à 11,9 ($\pm 0,15$) dS/m et de 6,9 ($\pm 0,49$) à 12,2 ($\pm 0,9$) dS/m pour le sol irrigué et le sol non irrigué respectivement. Ce gradient croissant de la salinité est dû au lessivage de sels en profondeur suite à l'irrigation et l'infiltration des eaux de pluie. Au niveau de la sodicité du sol, les valeurs moyennes du taux du sodium adsorbé (SAR) ont dépassé le seuil acceptable (SAR>10). Sous ces conditions, le sol manifeste une évolution structurale défavorable.

Mots clés

Eaux saumâtres, irrigation, sol, diagnostic, salinité, sodicité, Zelba, Mahdia.

SUMMARY

DIAGNOSIS OF THE SOIL CURRENT STATE IN THE PUBLIC IRRIGATION ZONE 'ZELBA 1' OF THE REGION OF MAHDIA (EASTERN TUNISIA)

The use of poor-quality waters for irrigation is a necessity because of water shortage in arid and semi-arid zones. However, it may result in adverse effects which may appear in long terms on the soil-water system. This study was conducted in the public irrigation zone Zelba 1 of the region of Mahdia (Eastern Tunisia) irrigated for almost 30 years using brackish water. The aim of this work is to evaluate the impacts of the use of brackish waters in irrigation. In this context, a complete and detailed diagnosis of the current situation of this irrigation zone was carried out through a sampling campaign and analysis of soil and water samples.

Pedological and physical soil characterization showed that the soil of the irrigation zone is a deep isohumic brown soil evolving on a silt spreading material with calcareous nodules. It is a permeable soil with mean soil saturated permeability values (Ksat) exceeding 5×10^{-6} m/s and with medium texture at the surface and heavy texture in depth. Soil chemical characterization showed an alkaline soil with mean pH = 8.66. This soil is very rich in carbonates, where total and active calcareous contents increased with depth. Soil organic matter did not exceed 2%. Soil chemical characterization showed also that mean cation exchange capacity values increased with depth. This variation is strongly correlated with the variation in clay content. On the other hand, it is not associated with the variation of the organic matter content. The monitoring of soil salinity variation with depth revealed that the mean electrical conductivity increased with depth from 5.3 (± 0.35) to 11.9 (± 0.15) dS/m and from 6.9 (± 0.49) to 12.2 (± 0.9) dS/m for the irrigated and the non-irrigated soils respectively. This increasing gradient of the salinity is due to the salts leaching after irrigation and rainwater infiltration. Concerning soil sodicity, the sodium adsorption ratio (SAR) mean values were greater than 10. Under these conditions, soil manifests an unfavorable structural evolution.

Key-words

Brackish waters, irrigation, soil, diagnosis, salinity, sodicity, Zelba, Mahdia.

RESUMEN

DIAGNOSTICO DEL ESTADO ACTUAL DEL SUELO AL NIVEL DEL PERÍMETRO PÚBLICO IRRIGADO ZELBA I DE LA REGIÓN DE MAHDIA (SAHEL TUNECINO)

El uso de aguas de mediocre calidad para el riego es una necesidad en las regiones áridas donde la evaporación es intensa y las precipitaciones son raras e irregulares. Sin embargo, puede ocasionar efectos nefastos que pueden manifestarse a largo plazo sobre el sistema agua-suelo. Este trabajo se condujo al nivel del perímetro público irrigado Zelba1 de la región de Mahdia (Sahel Tunecino) irrigado durante casi 30 años por aguas salobres. El principal objetivo de este trabajo es evaluar los impactos del uso de aguas salobres en riego. En este contexto, se realizó un diagnostico detallado de la situación actual de este perímetro a través de una campaña de muestreo y una análisis de las muestras de agua y suelo.

La caracterización pedológica y física del suelo enseñó que el suelo del perímetro es un suelo pardo isohúmico profundo que evoluciona en un material de esparcimiento de limo con nódulos calcáreos. Es permeable en superficie, donde los valores medios de la permeabilidad a saturación (Ksat) son superiores a 5×10^{-6} m/s. Su textura es limosa en superficie y limoso-arcillosa en profundidad. Su textura es media en superficie y pesada en profundidad. La caracterización química mostró que el suelo es generalmente alcalino con un pH medio = 8,66. Este suelo es rico en carbonatos, donde los contenidos en calcáreo total y en calcáreo activo han aumentado de la superficie hacia los horizontes profundos. Este suelo es pobre en materia orgánica puesto que el contenido máximo no supero 2%. La capacidad de intercambio catiónico aumentó de la superficie hacia los horizontes los más profundos. Esta variación es fuertemente correlacionada con la variación de la tasa en arcilla. Sin embargo, no está asociada al

contenido en materia orgánica. El seguimiento de la variación de la salinidad del suelo en función de la profundidad mostró que la conductividad eléctrica media aumentó con la profundidad de 5,3 ($\pm 0,35$) a 11,9 ($\pm 0,15$) dS/m y de 6,9 ($\pm 0,49$) a 12,2 ($\pm 0,9$) dS/m por el suelo irrigado y el suelo no irrigado respectivamente. Este gradiente creciente de la salinidad se debe a la lixiviación de los sales en profundidad debido a la irrigación y a la infiltración de las aguas de lluvia. Al nivel de la sodicidad del suelo, los valores medios de la tasa de sodio adsorbado (SAR) superaron el umbral aceptable (SAR >10). Bajo estas condiciones, el suelo manifiesta una evolución estructural desfavorable.

Palabras clave

Aguas salobres, irrigación, suelo, diagnostico, salinidad, sodicidad, Zelba, Mahdia.

L'irrigation des terres par des eaux de qualité médiocre devient une nécessité (Ould Ahmed *et al.*, 2010). Toutefois, cette pratique n'est pas sans danger. Selon Ziza *et al.* (2012) l'irrigation avec une eau de qualité médiocre engendre une dégradation des terres agricoles, notamment par salinisation voire même la sodisation des sols. Le risque de salinisation est souvent mis en parallèle avec les résultats décevants qu'enregistre l'agriculture irriguée. La conséquence de cette salinisation est la diminution de la fertilité des sols (Ben Ahmed *et al.*, 2012), entraînant à cet effet la réduction de la production agricole et la diminution des rendements des cultures (Saidi *et al.*, 2004). La salinisation est un phénomène assez fréquent en Tunisie (Hamdi *et al.*, 1995). Près de 100000 ha des périmètres irrigués en Tunisie, sont affectés par le problème de salinisation des sols (Al Atiri, 2007). Ce phénomène est dû soit à l'intrusion de l'eau de mer (Kerrou *et al.*, 2010), soit à la remontée d'une nappe proche de la surface (Hatira *et al.*, 2007; Ben Aissa *et al.*, 2006). La salinisation des sols peut être aussi engendrée par un manque d'eau ou une mauvaise qualité de l'eau utilisée en irrigation (Charfi et El Habaieb, 1995; Hachicha *et al.*, 1988; Mhiri *et al.*, 1998). Selon Majdoub *et al.*, (2012) les périmètres irrigués de la région de Mahdia du Sahel Tunisien sont caractérisés par une salinisation progressive des sols suite à l'utilisation des eaux particulièrement salées. En effet, les eaux utilisées en irrigation provenant des nappes phréatiques et des nappes profondes sont assez chargées (5 < résidu sec < 6 g/l). L'utilisation de ces eaux dans un climat aride où l'évaporation de l'eau à partir du sol est très élevée pour les sols lourds, conduit à la salinisation de ces sols (Mezni *et al.*, 2002). Dans ces cas, la principale question posée est celle de l'évolution dans le temps et dans l'espace de la salinité des sols engagée suite à l'irrigation par des eaux chargées en sel. La prévention et la mise en valeur des sols touchés par la salinisation demandent une gestion intégrée, un suivi des ressources en eau et en sols. Cette gestion constitue un défi important pour le développement de l'agriculture et la préservation de l'environnement (Hachicha et Hallaire, 2002). Elle exige, en effet, la prise en compte de la qualité de l'eau d'irrigation et d'autres facteurs tels que, les caractéristiques physico-chimiques des sols, les systèmes des cultures existants et les conditions lo-

cales, incluant le climat, l'environnement économique, social et politique. En effet, la pratique d'une irrigation efficiente combinée à de bonnes pratiques culturales peut prévenir, et dans certains cas, réduire la salinisation. Une autre solution peut consister à mettre en place des programmes de contrôle et de suivi de l'évolution de la salinité des eaux et des sols d'une manière périodique et régulière (Clercq *et al.*, 2009). Un tel suivi est sanctionné par une évaluation de l'impact de l'utilisation des eaux saumâtres sur les sols et une recherche des solutions idoines pour résoudre les problèmes éventuels qui peuvent se poser. Le gouvernement tunisien, a mis en place des programmes de suivi de l'évolution de la salinité des sols, afin de prévoir les solutions adéquates et d'utiliser d'une manière durable les ressources en eau et en sol (Job *et al.*, 1989). Dans ce contexte, le périmètre public irrigué (PPI) Zelba 1 de la région de Mahdia a été choisi pour examiner les impacts de l'utilisation des eaux saumâtres en irrigation. Ce périmètre a fait l'objet de plusieurs études de diagnostic et de suivi de l'évolution de la salinité du sol (1986, 1991, 1993, 2000) Ben Hassin (1986, 1988, 1990) et El Wafi (2000). Dans ce cas, ce travail vise à diagnostiquer l'état actuel du PIZ Zelba 1 par la caractérisation de l'eau et du sol en particulier la salinité du sol à travers l'étude de la variation des profils de la salinité en fonction de la profondeur aussi bien pour le sol irrigué que celui non irrigué. Ce diagnostic a été réalisé afin d'évaluer l'effet de l'utilisation des eaux saumâtres en irrigation sur les propriétés physiques et chimiques du sol et de proposer des solutions adéquates pour améliorer la qualité du sol et de l'eau.

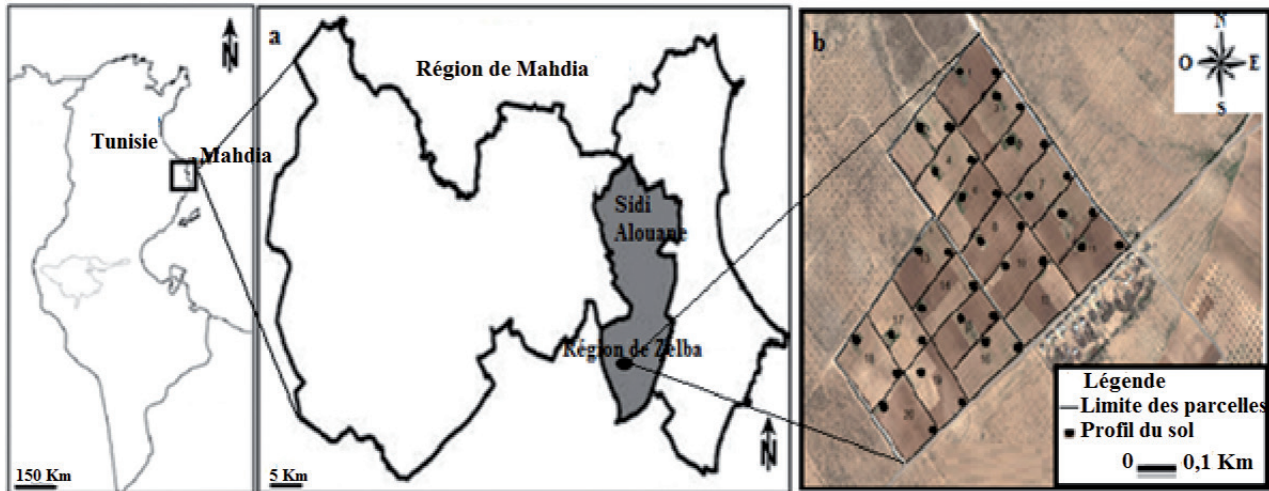
MATERIEL ET METHODES

Site expérimental

Le Périmètre Public Irrigué (PPI) Zelba 1 est situé au centre de la plaine alluviale de la région de Zelba se trouvant au sud de Sidi Alouane, à environ 15 km au sud-est d'El Djem et à 35 km au sud-ouest de la région de Mahdia (figure 1a). La région de Zelba est caractérisée par un climat aride où les précipitations

Figure 1 - (a) Localisation de la région de Zelba ; (b) Périmètre d'étude et localisation des profils: Image extraite de google earth le 12/11/2016 (Image satellite) et modifiée par le logiciel de géo référencement et d'interpolation ArcView GIS 3.2. Les échantillons de sol ont été prélevés pour chaque couche de profils de sols irrigués et non irrigués jusqu'à une profondeur de 150 cm.

Figure 1 - Location of the region of Zelba ; (b) Irrigation system and location of profiles : Image extracted from google earth on 12/11/2016 (Image satellite) and modified by the software geo referencing and interpolation ArcView GIS 3.2. Soil samples were taken for each layer of irrigated and non-irrigated soils to a depth of 150 cm.



sont rares et irrégulières avec une moyenne annuelle de 288 mm. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 19°C (Louati et al., 2014).

Le PPI Zelba 1 a été créé en 1985 et a été mis en eau en 1986. Il couvre 60 ha de superficie découpés en 20 parcelles de 3 ha chacune (figure 1b). Ce périmètre est considéré comme un périmètre représentatif du type de sols isohumiques et de texture dominée par les limons et des occupations culturales de la région de Mahdia. Il répond donc aux critères fixés: superficie suffisante, eau d'irrigation provenant d'une nappe profonde de qualité médiocre, sols marginaux susceptibles d'être utilisés pour ce type d'expérimentation. L'irrigation a été pratiquée par submersion, de façon plus ou moins continue sur les différentes parcelles. Les cultures pratiquées sont diversifiées à savoir: le sorgho, l'orge, l'avoine, les cultures maraîchères et l'arboriculture. Du point de vue assainissement, l'absence d'un réseau de drainage aussi bien à la surface qu'en profondeur est expliquée par son coût élevé et en particulier par la taille réduite des parcelles dans le périmètre.

Echantillonnage

Un échantillon d'eau a été prélevé directement à partir du forage d'eau Zelba 1 (n°BIRTH 17 796/4) débitant 18l/s et captant la nappe profonde du Sahel de Sfax située à l'est d'El Djem. Cet échantillonnage a été effectué conformément à la norme ISO 5667-11. L'échantillon d'eau a été conservé au froid ($T < 4^{\circ}\text{C}$) pour l'analyse des paramètres chimiques au laboratoire des eaux

et des sols du Commissariat Régional au Développement Agricole (CRDA) de Mahdia. Chaque élément minéral a été dosé et mesuré suivant un protocole spécifique.

Les échantillons de sol ont été prélevés durant l'été 2011, dans les 19 parcelles du périmètre, (la parcelle n° 12 est abandonnée). En effet, deux profils de sol par parcelle (irrigué et non irrigué) ont été prélevés d'une manière systématique à la tarière de façon à avoir un échantillon pour chaque 15 cm (10 couches) jusqu'à la profondeur 150 cm. Au total, 380 échantillons ont été prélevés (38 parcelles irriguées et non irriguées \times 10 de profondeur). L'emplacement de ces profils est présenté sur la figure 1b. Ces échantillons ont été par la suite séchés à l'air libre, broyés puis tamisés à 2 mm. La fraction inférieure à 2 mm a été utilisée pour effectuer les analyses physiques et chimiques.

Analyse de l'eau et du sol

Les paramètres chimiques de l'eau d'irrigation sont le pH, la conductivité électrique (CE_w), le résidu sec (RS), les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+) et les anions (SO_4^{2-} , Cl^- et HCO_3^-). Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre en plongeant directement l'électrode de 6 à 8 cm dans l'eau d'irrigation (Koller, 2004). La mesure de la CE_w a été évaluée à l'aide d'un conductimètre équipé d'un dispositif de correction de température qui permet une lecture directe à la température de référence de 25°C (Rodier et al., 2005). Le RS a été mesuré par séchage total d'un volume de 50 ml de l'extrait aqueux à l'étuve à 110°C pendant 24 heures (Durand, 1958). L'analyse de la composition ionique de l'eau a été faite par le dosage volumétrique en se basant sur le principe de MOHR pour les chlorures (Cl^-), les carbonates (CO_3^{2-}), les bicar-

bonates (HCO_3^-), le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}) et par spectrophotométrie à flamme pour le sodium (Na^+), le potassium (K^+) et les sulfates (SO_4^{2-}).

Les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ ont permis d'obtenir le taux de sodium adsorbé (SAR) selon l'équation (1).

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

Avec: Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} sont exprimés en mg/l

Les analyses physico-chimiques du sol effectuées sont: l'analyse granulométrique, la conductivité hydraulique (k), le calcaire total (CT), le calcaire actif (CA), la matière organique (MO), le pH, la capacité d'échange cationique (CEC), la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée (CEe) et le bilan ionique de la solution du sol. L'analyse granulométrique a été réalisée au "laboratoire de l'Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem". Elle a été effectuée sur un échantillon représentatif pour chaque horizon du périmètre, par la méthode de la pipette Robinson (Yoka *et al.*, 2010). Le coefficient de perméabilité (K) a été déterminé par la méthode du double cylindre (méthode de Muntz) qui est fondée sur le principe d'infiltration de l'eau verticalement (Mathieu et Pieltain, 1998). Le dosage du CT (CaCO_3) a été fait par la méthode volumétrique à l'aide du calcimètre de Bernard (Mallouli, 2009). Le CA a été déterminé par la méthode de Drouineau-Galet (Callot et Dupuis, 1980). La méthode de Walkey-Black, basée sur le principe d'oxydation du carbone du sol par le dichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) et l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4) a été utilisée pour calculer la MO (Walkey et Black, 1934). Le pH du sol a été mesuré dans une suspension sol/solution (eau distillée) avec un rapport de 1/2,5 par la méthode électrométrique à l'aide d'un pH-mètre muni d'une élec-

trode en verre (Boudoudou *et al.*, 2009). La mesure de la CEC a été effectuée sur un échantillon représentatif pour chaque horizon du périmètre (de 0-15 cm jusqu'à 135-150 cm) par la méthode de Riehm-Ulrich (Anderson et Ingram, 1993). La CEe a été déterminée selon la méthode préconisée par le laboratoire de Riverside (US Salinity Laboratory Staff), USSL, 1954. Elle a été mesurée sur l'extrait de la pâte saturée et corrigée à une température de 25 °C (Gallali, 1980). Le dosage des éléments majeurs de la solution du sol a été fait par les mêmes techniques de dosage que ceux de l'eau d'irrigation.

RESULTATS ET DISCUSSION

Caractérisation chimique de l'eau d'irrigation

L'étude de la qualité de l'eau dans le PPI Zelba 1 est réalisée depuis son fonctionnement en se basant sur les données antérieures disponibles et celles mesurées en 2011. Le *tableau 1* montre que cette eau se caractérise par l'abondance des sulfates, des chlorures et du sodium. Elle a, par ailleurs des concentrations faibles en bicarbonates. Les cations et les anions se distribuent selon l'ordre suivant: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ et $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$. L'eau présente donc un faciès géochimique chloruré et sulfaté sodique.

Le SAR a varié de 15,10 en 1986 à 15,60 en 2011 avec une moyenne de 14,77. Ces données classent l'eau d'irrigation dans la classe C5S4 selon le diagramme de classification des eaux de Riverside défini par USSL (1954). Il s'agit donc d'une eau à très fort risque de salinisation et d'alcalisation (*figure 2*). Cette eau, assez chargée en sels solubles, ne pourrait être utilisée que

Tableau 1 - Etude de la qualité de l'eau du forage Zelba 1 (1986-2011).

Table 1 - Study of the drilling water quality of Zelba 1 (1986-2011).

Paramètre	Ben Hassine (1986)	Ben Hassine (1988)	Ben Hassine (1990)	El Wafi (2000)	2011	Moyenne	Ecart type
pH	7,7	7,9	7,3	8	7,9	7,76	0,3
CEw (dS/m)	6,9	7	6,9	7,2	7,2	7,04	0,2
RS (g/l)	4,83	4,9	4,8	4,9	5	4,88	0,07
Cations (mg/l)	Ca^{2+}	220	300	260	380	288	59
	Mg^{2+}	132	206	156	84	120	139,6
	Na^+	1150	1288	1196	1219	1242	1219
	K^+	24,96	27	25	22	24	24,6
Anions (mg/l)	SO_4^{2-}	1056	1061	1104	912	1344	1095
	Cl^-	1722	1530	1775	1917	1775	1744
	HCO_3^-	177	204	305	305	244	247
SAR	15,1	14	14,44	14,72	15,6	14,77	0,6

pour les sols à texture lourde et les plantes tolérantes. Selon la classification FAO, elle présenterait de sévères problèmes sur le sol et les cultures (Ayers et Westcot, 1988). Elle pourrait engendrer la salinisation, voire la dégradation de la structure du sol par sodisation si les précautions nécessaires ne sont pas prises en considération (Layachi et al., 2012).

Figure 2 - Classification de l'eau du forage échantillonnée (1986-2011) selon le diagramme de Riverside (USSSL, 1954) modifié par Durand (1973).

Figure 2 - Classification of sampled drilling water (1986-2011) according to Riverside diagram (USSSL, 1954) modified by Durand (1973).

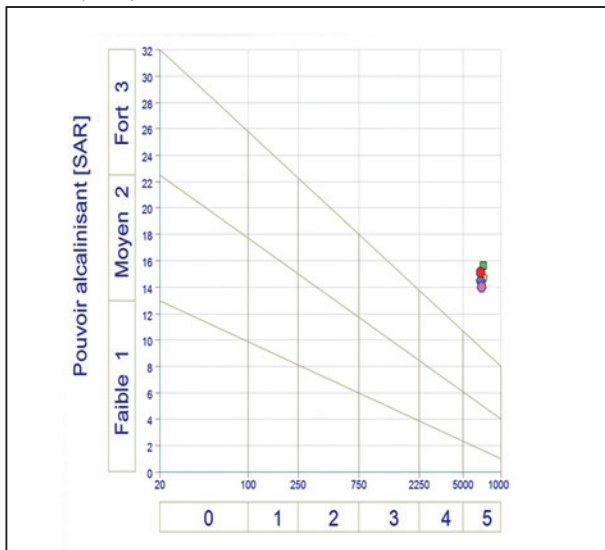


Tableau2 - Caractéristiques physiques et chimiques du sol irrigué.

Table 2 - Irrigated soil physico-chemical characteristics.

Profondeur (cm)	Granulométrie (%)					CT (%)	CA (%)	MO (%)	PH	CEC meq 100 g ⁻¹
	A	LF	LG	SF	SG					
0-15	13	18	24	37	8	14	12,5	1,36	8,66	6,7
15-30	14	19	23	36	8	15	12,5	1,36	8,64	7,2
30-45	14	22	23	34	7	15	10	1,35	8,62	11,8
45-60	16	19	23	34	8	16	9	0,80	8,60	14,8
60-75	18	22	19	33	8	24	12,5	0,75	8,55	16,2
75-90	19	23	19	32	7	35	20	0,55	8,50	18
90-105	23	23	18	28	8	37	20	0,45	8,45	19,1
105-120	22	24	19	29	6	38	17	0,43	8,45	20
120-135	24	23	19	28	6	35	19,2	0,40	8,40	21
135-150	30	21	23	20	6	34	22,8	0,30	8,40	26

Avec: A= Argile ; LF=Limon fin ; LG=Limon grossier ; SF=Sable fin ; SG=Sable grossier.

Caractérisation physico-chimique du sol

La description morphologique effectuée au niveau d'un profil représentatif du sol creusé au centre du périmètre a montré que ce sol est un sol brun isohumique profond (Mtimet, 1999) **évoluant** sur un matériau d'épandage de limon à nodules calcaires. Ce sol est homogène en raison de la géomorphologie du terrain caractérisée par une surface pratiquement plane, dont la pente est inférieure à 3%. Il présente une texture limoneuse en surface (0-30cm) et une texture limoneuse à limono-argileuse pour une profondeur allant de 30 à 135 cm. Au-delà, la texture devient limono-argileuse (USDA, 1960). Le pourcentage de la fraction argileuse a augmenté de 13 à 30% selon la profondeur du sol (tableau 2). Cette fraction a une grande influence sur les propriétés physiques du sol telle que la capacité de rétention de l'eau et chimiques telle que la capacité d'échange cationique. La texture aérée à la surface du sol confère à ce sol un pouvoir filtrant très important. Dans les horizons profonds où elle devient plus fine l'eau diffuse lentement dans ces sols et est retenue à un potentiel capillaire assez élevé. Ceci augmente les risques d'accumulation des sels. Ce sol ne peut pas être irrigué avec les eaux saumâtres. Dans ce cas, il sera salinisé et alcalisé à cause de l'abondance des charges sur le complexe notamment dans les horizons les plus profonds.

Les valeurs de coefficient de perméabilité à saturation (K_{sat}) mesurées à la surface du sol dans quelques parcelles du périmètre ont varié de 8×10^{-6} m/s à 10^{-5} m/s indiquant un sol perméable à la surface, où les valeurs moyennes de K_{sat} sont supérieures à 5×10^{-6} m/s (Daoud et al., 1993). La perméabilité rapide observée au niveau de ce périmètre pourrait être expliquée par la présence d'une texture limoneuse à la surface du sol (0-30cm), favorisée par la présence d'un écoulement préférentiel. A cela s'ajoute l'apport de la matière organique dans les horizons su-

Figure 3 - (a) Corrélation entre le pH et le taux du calcaire total (CT) dans le sol irrigué.

Figure 3 - (a) Correlation between pH and the total calcareous content in irrigated soil.

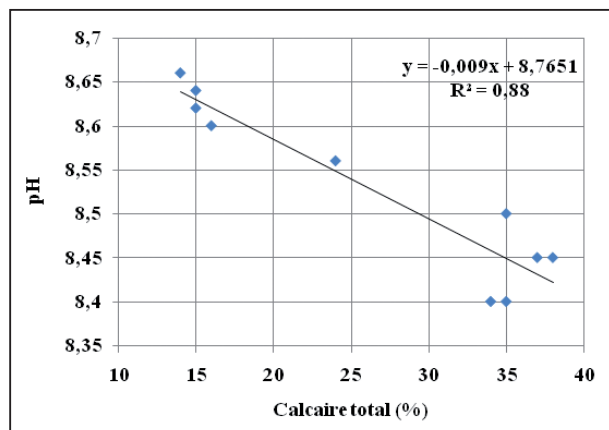
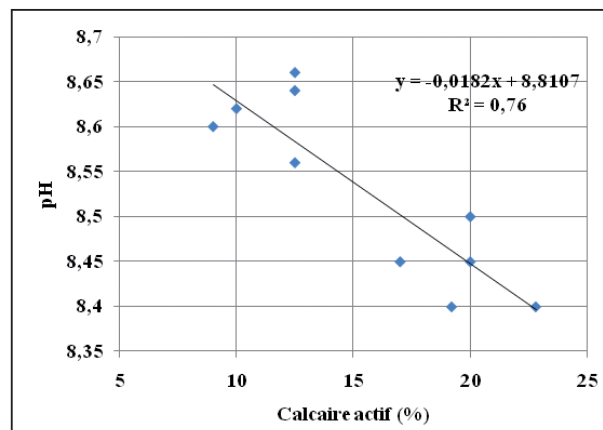


Figure 3 - (b) Corrélation entre le pH et le taux du calcaire actif (CA) dans le sol irrigué.

Figure 3 - (b) Correlation between pH and the active calcareous content in irrigated soil.



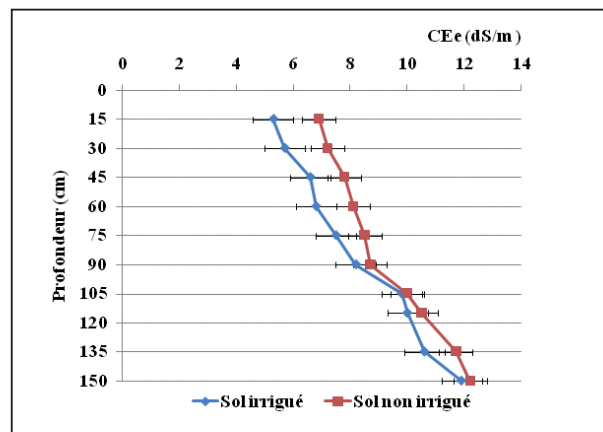
perficiels du sol qui a permis d'améliorer la vitesse d'infiltration de l'eau. Les résultats de la caractérisation chimique du sol ont montré que le sol du périmètre est riche en calcaire notamment en profondeur (NF ISO 10693: 1995) où les teneurs en CT et en CA ont augmenté de la surface vers la profondeur de 14 à 34 % et de 12,5 et 22,8 % respectivement. Cela est confirmé par un passage progressif du pseudo mycélium aux taches calcaires et plus profondément aux nodules calcaires.

La MO a diminué avec une profondeur de 1,36 à 0,30 %. Cela reflète sa minéralisation par l'action des micro-organismes. La détermination du pH du sol à chaque horizon a montré que le sol du périmètre est généralement alcalin, où les valeurs moyennes de pH sont supérieures à 8,5. De plus, ces valeurs ont diminué avec la profondeur de 8,66 ($\pm 0,19$) à 8,4 ($\pm 0,2$). Cette diminution n'est pas clairement associée à la variation du CT et du CA responsable de l'alcalinité du sol mais elle pourrait s'expliquer par l'oxydation du sol MO (tableau 2). La corrélation établie entre la variation des teneurs en CT et en CA et celle du pH avec la profondeur du sol a montré des coefficients de coefficients négatifs où $r = -0,93$ pour le CT (figure 3a) et $r = -0,87$ pour le CA (figure 3b). Certains auteurs expliquent la diminution des valeurs du pH avec la profondeur du sol par l'oxydation de la matière organique et par la nitrification de l'ammonium du sol (Abbas *et al.*, 2007).

Les valeurs moyennes de CEC ont varié avec une profondeur de 6,7 à 26 meq 100 g⁻¹ en moyenne pour l'ensemble des profils du sol (tableau 2). Cette variation n'est pas associée à la variation de la teneur en MO. Celle-ci a diminué de 1,36 à 0,30 % pour le sol irrigué, alors que la CEC est plus élevée en profondeur qu'à la surface. Ceci pourrait être dû à la variation de la texture du sol et plus particulièrement à sa teneur en argile qui a atteint 30 % à la profondeur 150 cm.

Figure 4 - Variation de la conductivité électrique (CEe) du sol en fonction de la profondeur du sol.

Figure 4 - Variation of soil electrical conductivity (ECe) with depth.



Salinité et sodicité du sol

Le fait que la salinité constitue la principale propriété indicatrice de la qualité du sol, sa variation verticale a été étudiée aussi bien pour le sol irrigué que celui non irrigué du périmètre. La figure 4 montre que les valeurs moyennes de la CEe ont varié de 5,3 ($\pm 0,35$) à 11,9 ($\pm 0,15$) dS/m et de 6,9 ($\pm 0,49$) à 12,2 ($\pm 0,9$) dS/m pour le sol irrigué et le sol non irrigué, respectivement. Selon la classification de l'USSS (1954), la CEe moyenne observée le long des profils du sol est supérieure à 4 dS/m. Il s'agit donc d'un sol modérément salé à salé avec un gradient de salinité croissant de la surface vers les horizons les plus profonds et où les valeurs de la CEe sont multipliées par deux et la texture du sol

Tableau 3 - Bilan ionique de la solution du sol irrigué.**Table 3** - Ionic balance of the irrigated soil solution.

Profondeur (cm)	Cations (mg/l)				Anions (mg/l)			SAR
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	
0-15	200	99	1495	24	2112	2130	220	21,85
15-30	154	84	1012	25,57	2520	2201	244	16,28
30-45	100	76	782	20	1920	2130	140	14,34
45-60	87	48	690	34	2064	1953	159	14,74
60-75	80	36	736	15,73	2112	1988	122	17,15
75-90	66,6	24,7	1035	11,80	2304	3124	183	27,49
90-105	40	19	989	11,80	2400	3195	183	32,23
105-120	40	19	828	8	1440	3160	122	26,96
120-135	16	12,88	713	8	1296	3124	134	32,15
135-150	40	10,94	690	4	1344	3231	122	24,91

Avec: SAR= Taux de Sodium Adsorbé.

devient de plus en plus fine. En outre, la comparaison des profils salins moyens du sol a révélé que la salinité observée le long du profil du sol non irrigué est légèrement plus élevée que celle observée au niveau de celui irrigué à l'eau saumâtre. La salinité du sol au niveau du périmètre irrigué Zelba 1 est la résultante des effets cumulés d'un climat aride, où les précipitations sont rares et irrégulières et l'eau utilisée en irrigation est très chargée en sels solubles. Cette eau saumâtre a un effet significatif sur la variation de la salinité au niveau du sol irrigué par rapport à celui non irrigué. Elle a entraîné une légère diminution de la salinité du sol, expliquée par l'action de lessivage de l'eau d'irrigation. Le mouvement descendant des sels est important, ce qui donne un profil de salinité croissant de la surface vers les horizons les plus profonds. Ceci pourrait être dû au lessivage des sels suite à l'irrigation et aux pluies enregistrées pendant les mois de Mai et de Juin (2011) avec une précipitation totale de 85,5 mm (CRDA, 2013). De plus, le fait d'avoir une salinité du sol plus élevée en profondeur qu'en surface montre que le lessivage des sels est réel et que ceux-ci sont retenus en partie dans les horizons inférieurs.

Au niveau de la sodicité du sol, le taux du sodium adsorbé de la solution du sol (SAR) a été déterminé. Le *tableau 3* montre que le sodium est l'élément soluble le plus présent dans le sol irrigué par les eaux saumâtres. Cet élément est largement supérieur aux alcalino-terreux (calcium et magnésium) et au potassium. Il a varié de 1495 à 690 mg/l, en allant de la surface vers la profondeur. Le potassium est présent en très faible quantité par rapport aux autres cations. Il a varié de 24 à 4 mg/l avec quelques valeurs excessives en allant de la surface jusqu'à la profondeur du sol. Les cations majeurs sont donc présents dans le sol par ordre décroissant Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺. De plus, une diminution de tous ces éléments est observée le long du profil du sol. Concernant

les anions solubles à l'eau, on constate un enrichissement du sol irrigué par les eaux saumâtres essentiellement en chlorures mais également en sulfates par rapport aux bicarbonates. En effet, les teneurs moyennes en Cl⁻ et en SO₄²⁻ ont varié de 1953 à 3231 mg/l et de 1296 à 2520 mg/l, respectivement en allant de la surface vers la profondeur. Les anions majeurs sont donc présents dans le sol par ordre décroissant Cl⁻ > SO₄²⁻ > HCO₃⁻. Le *tableau 3* montre également que les valeurs de SAR observées le long du profil du sol étaient largement supérieures au seuil 10 et ont atteint une valeur maximale de l'ordre de 32 aux profondeurs (90-105 cm et 120-135 cm). L'utilisation des eaux à très fort risque de salinisation et d'alcalinisation en irrigation a un effet significatif sur la variation des éléments solubles majeurs dans la solution du sol, notamment le sodium, qui est l'élément responsable de la sodisation du sol. L'utilisation de ces eaux a augmenté ainsi le risque de sodisation du sol par l'accumulation du sodium soluble dans le sol entraînant ainsi un accroissement de son SAR. La diminution des cations majeurs avec la profondeur, notamment le sodium, pourrait être expliquée par l'interaction entre la composition chimique de la solution du sol et le complexe argilo-humique.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le Périmètre Public Irrigué Zelba 1 a subi l'irrigation par les eaux saumâtres pendant presque 30 ans et n'a jamais été réhabilité. La caractérisation pédologique et physique du sol étudié a montré que le sol du périmètre est un sol brun isohumique profond évoluant sur un matériau d'épandage de limon à nodules calcaires, perméable en surface et de texture limoneuse à la surface et limono-argileuse en profondeur. La caractérisation chimique a révélé que le sol du périmètre est généralement

alcalin. Ce sol est très riche en carbonates notamment dans les horizons les plus profonds. Il est pauvre en matière organique avec une teneur maximale ne dépassant pas 2 %. La capacité d'échange cationique a augmenté de la surface vers les horizons les plus profonds. Cette variation est fortement corrélée avec la variation de la teneur en argile. Par contre, elle n'est pas associée à la variation de la teneur en matière organique. L'étude de la salinité du sol au niveau du périmètre irrigué a montré un gradient croissant des sels vers les horizons profonds où les valeurs moyennes de la conductivité électrique observées le long des profils du sol sont supérieures à 4 dS/m indiquant un sol salin. En outre, l'augmentation de la salinité en fonction de la profondeur du sol est due au lessivage de sels suite à l'irrigation et l'infiltration des eaux de pluie. L'étude de la sodicité du sol a montré que les valeurs du taux de sodium adsorbé observées le long du profil du sol ont atteint un niveau élevé dépassant un certain seuil ($SAR > 10$) indiquant une accumulation significative du sodium dans le complexe d'échange. Par conséquent, l'utilisation de l'eau présentant un très fort risque de salinisation et d'alcalisation en irrigation a un effet significatif sur la variation de la salinité et de la sodicité du sol au niveau du périmètre irrigué. D'une manière générale, l'utilisation d'une mauvaise qualité d'eau en irrigation n'a pas été sans conséquence. Elle a augmenté le risque de salinisation et de sodisation dans le sol du périmètre par l'accumulation des éléments solubles dans ce sol notamment l'ion sodium. Cette accumulation peut provoquer des effets indésirables à long terme notamment la dégradation des propriétés physiques et chimiques du sol.

Il serait donc nécessaire de pousser les travaux de contrôle et de suivi de la salinité et de la sodicité du sol dans ce périmètre et dans les zones irriguées, afin de pallier la salinisation notamment lors des années peu pluvieuses et de prédire une dégradation éventuelle de la structure du sol. Il serait également intéressant d'introduire la modélisation comme outil de gestion des sols afin de prédire l'évolution de la qualité des sols au niveau de ce périmètre à long terme. Il est important d'étudier la variation spatiale et temporelle de la stabilité structurale du sol au niveau de ce périmètre afin de mieux prédire la dégradation de cette structure sous l'effet de l'irrigation à l'eau saumâtre et donc la sodicité du sol.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par l'Unité de Recherche "Hydro sciences Appliquées de l'Institut Supérieur des Sciences et Techniques des Eaux de Gabes" (Tunisie). Nous remercions vivement toute l'équipe de l'Institut Supérieur Agronomique (Chott Meriem, Sousse, Tunisie) qui a permis l'analyse, les mesures et le suivi des échantillons du sol et de l'eau au laboratoire et sur terrain.

BIBLIOGRAPHIE

- Abbas S.T., Sarfraz M., Mehdi S.M., Hassan G. and Obaid U.R., 2007 - Trace elements accumulation in soil and rice plants irrigated with the contaminated water. *J. Soil. Till. Res*, 94, pp. 503-509.
- Al Atiri R., 2007- Evolution institutionnelle et réglementaire de la gestion de l'eau en Tunisie. L'avenir de l'agriculture irriguée en Méditerranée. Nouveaux arrangements institutionnels pour une gestion de la demande en eau. Séminaire Wademed, Cahors, Montpellier, France, 13 à 15 Mai 2007.
- Ayers R.S. et Westcot D.W., 1988 - La qualité de l'eau en agriculture. *FAO Bulletin d'irrigation et de drainage*, 29, 1, pp. 180-187.
- Ben Ahmed C., Magdich S., Rouina B., Boukhris M. and Ben Abdullah F., 2012 - Saline water irrigation effects on soil salinity distribution and some physiological responses of field grown Chemlali olive. *J. Environ. Manage*, 113, pp. 538-44.
- Ben Aissa I., Bouarfa S., Bouksila F., Bahri A., Vincent, B. et Chaumont C., 2006 - Fonctionnement du drainage au sein d'une oasis modernisée du sud tunisien: Cas de l'oasis de Fatnassa nord à Kébili, Tunisie. Deuxième atelier régional du projet Sirma, Marrakech, Maroc, 13 à 17 August 2006.
- Ben Hassine H., 1990 - Comportement du sol de la parcelle de simulation à Zelba après deux années d'irrigation par des eaux saumâtres, CRDA Mahdia, Tunisie. 1990. 17 p.
- Ben Hassine H., 1988 - Suivi de l'évolution de la salinité des sols par mesure de la conductivité électromagnétique. Rapport de stage, CRDA, Mahdia, Tunisie. 1988. 10 p.
- Boudoudou H., Hassikou R., Ouazzani Touhami A., Badoc A. et Douira A., 2009 - Paramètres physico-chimiques et flore fongique des sols de rizière Marocaine, Bulletin, Soc. Pharm. Bordeaux, 148, pp. 17-44.
- Callot G. et Dpuis, M., 1980 - Le calcaire actif des sols et sa signification. *Bulletin AFES*, 45, pp. 17-26.
- Charfi F. et El Habaieib A., 1995 - L'aménagement de l'espace industriel à Sfax: une opportunité économique mais des contraintes écologiques. In: *L'Aménagement Face au Défi de l'Environnement, Collection Adicueer*, Paris, pp. 105-117.
- Clercq W.P. Van Meirvenne M. and Fey M.V., 2009 - Prediction of the soil-depth salinity-trend in a vineyard after sustained irrigation with saline water. *J. Agric. Water Manage*, 96, pp. 395-404.
- Commissariat Régional au développement Agricole (CRDA), 2013 - Annuaire d'exploitation des nappes phréatiques du Gouvernorat de Mahdia.
- Daoud Y., 1993 - Contribution à l'étude des sols des plaines du Chélif. Le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux. Thèse de Doctorat Etat, Algérie. 232 p.
- Durand J.H., 1973 - Utilisation des eaux salines pour l'irrigation. *Bulletin Techn. Inform*, 276, pp. 39-58.
- Durand J.H., 1958 - Les sols irrigables. Etude pédologique. ED. Imbert, Algérie. 1958. 190 p.
- El Wafi M.M., 2000 - Etude diagnostic en matière d'utilisation des eaux salées en irrigation dans quelques délégations intérieures de Mahdia. Projet de Fin d'Etudes, Mahdia, Tunisie. 2000. 104 p.
- Gallali T., 1980 - Transfert sels-matière organique en zone aride méditerranéenne. Thèse de doctorat ès Sciences, INPL, Nancy- Université. 1980. 202 p.
- Hachicha M. et Hallaire V., 2002 - Evolution structurale de la surface d'un sol tunisien sous différents modes d'irrigation. *Etude et Gestion des Sols*, 9, 4, pp. 239-249.
- Hachicha M., Ben Hassine H., Job J.O. et Loyer J.Y., 1988 - La conductivité électromagnétique: Application au suivi de la salinité des sols des périmètres irrigués de la Tunisie. Pub.DS/ORSTOM. 1988. 23 p.
- Hamdi A., Lasram M. et Lacirignola C., 1995 - Les problèmes de salinité dans la zone méditerranéenne. *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 81, 2, pp. 47-60.

- Hatira A., Baccar L., Grira M. et Gallali T., 2007 - Analyse de sensibilité du système oasien et mesures de sauvegarde de l'oasis de Métouia (Tunisie). *Revue des sciences de l'eau*, 20, 1, pp. 59-69.
- Job J.O., Mohdi M. et Hachicha M., 1989 - Suivi de l'évolution de la salinité des terres dans le périmètre irrigué de Sidi Saad (Kairouannais). Premiers résultats de mesure de conductivité électromagnétique. ORSTOM. 1989. 9 p.
- Kerrou J., Renard Ph., Lecca G. and Tarhouni J., 2010 - Grid-enabled Monte Carlo analysis of the impacts of uncertain discharge rates on sea-water intrusion in the Korba aquifer (Tunisia). *J. Sci. Hydrology*, 55, 8, pp. 1325-1336.
- Koller E., 2004 - Traitement des pollutions industrielles: Eau, Air, Sols, Boues. Ed, Dunod. 2004. 424 p.
- Layachi G., Omar G., Abderrahmane B., Mohamed L. et Claude M., 2012 - Evaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols: exemple de la plaine de Meskiana (nord-est Algérien). *J. Physio-Géo*, 6, pp. 141-160.
- Louati D., Majdoub R. and Abida H., 2014 - 30 years saline water irrigation effects on soil characteristics. *Intern. J. Engin. Tech. Res*, 2, 5, pp. 5-13, 2014.
- Majdoub R., Hachicha M., El Amri A. et Melki M., 2012 - Etude de la dynamique de l'eau et du transfert des sels dans un sol sablo-limoneux du Sahel Tunisien. *Eur. J. Sci. Res*, 80, pp. 499-507.
- Mallouli N., 2009 - Méthodes et interprétations d'analyses des sols. Ed EDILIVRE APARIS. Collection universitaire 75008, Paris.
- Mathieu C. et Pieltain F., 1998 - Analyse physique des sols. Méthodes choisies. *Techniques et documentation*, Paris, pp. 21-49.
- Mezni M., Bizid E. et Hamza H., 2002 - Effet de la salinité des eaux d'irrigation sur la nutrition minérale chez trois variétés de luzerne pérenne. *J. Agro*, 22, pp. 283-291.
- Mhiri A., Tarhouni J., Hachicha M. et Lebdi F., 1998. Approche systémique des risques de salinisation par endoréisation anthropique. *J. Etude et Gestion des Sols*, 5, pp. 257-268.
- Mtimet A., 1999 - Atlas Tunisian soils: Agricultural ministry. Tunisia.
- Ould Ahmed B.A., Inoue M. and Moritani S., 2010 - Effect of saline water irrigation and manure application on the available water content, soil salinity, and growth of wheat. *J. Agric. Water. Manage*, 97, pp. 165-170.
- Rodier J., Bazin C., Bourtin J.P., Chambon P. et Rodi L., 2005- L'analyse de l'eau: Eau naturelle, eau résiduaire, eau de mer. Ed, Dunod, Paris. 8^e Ed. 2005. 138 p.
- Saidi D., Le Bissonnais Y., Duval O., Daoud Y. et Halitim A., 2004 - Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés physiques des sols de la plaine du Chelif (Algérie). *Etude et Gestion des Sols*, 11, 2, pp. 81-92.
- USSL (United States Salinity Laboratory de Riverside), 1954 - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Department of Agriculture, Handbook n°60, U.S. Gov. Print. Office, Washington D.C. 1954. 160 p.
- Walkey A. and Black, I.A., 1934 - An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposal modification of the chromic acid titration method. *J. Soil. Sci*, 37, 1, pp. 29-38.
- Yoka J., Loumeto J.J., Voudibio J., Amiaud B. et Epron D., 2010 - Influence du sol sur la répartition et la production de phytomasse de savanes de la cuvette congolaise (République du Congo). *Geo. Eco. Trop*, 34, pp. 63-74.
- Ziza F.Z., Daoud Y., Laboudi A., Bradai R. et Zouahra A., 2012 - Evolution de la salinité dans les périmètres de mise en valeur et conséquences sur la diminution des rendements du blé dans une région saharienne: Cas de la région d'Adrar. *J. Arid. Environ*, 2, pp. 4-15.