



CARTOGRAPHIE DE LA SALINITE DU SOL AU NIVEAU DU PERIMETRE IRRIGUE ZELBA DE LA REGION DE MAHDIA (SAHEL TUNISIEN)

SOIL SALINITY MAPPING IN THE IRRIGATED PERIMETER ZELBA OF THE REGION OF MAHDIA (TUNISIAN SAHEL)

LOUATI D.^{1,2}, MAJDOUB R.³, SELMANI S.⁴,
ACHOUR N.¹, HANNACHI N.¹, ABIDA H.^{1,2}*

¹ Département des Sciences de la Terre, Université de Sfax, Faculté des Sciences de Sfax, Rue de Soukra Km 4, Sfax, Tunisie

² Hydrosiences 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, Sousse, Tunisie

⁴ Ecole Nationale d'Ingénieur de Sfax, Université de Sfax, Rue de Soukra Km 4, Sfax, Tunisie

dhouhaloua@hotmail.fr,

RESUME

Les périmètres de la région de Mahdia du Sahel Tunisien sont irrigués par des eaux salées provenant des nappes phréatiques et des nappes profondes. Les conséquences sont donc la salinisation progressive des sols. Dans ce contexte, ce travail a été conduit au niveau du périmètre Zelba de la région de Mahdia irrigué par les eaux saumâtres afin d'évaluer les effets de ces eaux sur la qualité du sol. Une étude de la variation spatiale de la salinité a été effectuée. Des cartes de la conductivité électriques ont été tracées à l'aide du logiciel ArcView GIS 3.2. La cartographie de la salinité du sol a montré une légère variation spatiale pour les différents horizons du sol. Cette salinité a augmenté légèrement vers la profondeur du sol. Le gradient croissant de la salinité est dû au lessivage

de sels en profondeur suite à l'irrigation. La cartographie a montré également que la partie sud du périmètre est la plus touchée par la salinité du sol. En effet, la partie nord est plus proche du forage d'eau. Elle reçoit donc plus d'eau qui favorise le lessivage des sels en profondeur. La légère variation spatiale de la salinité est expliquée par la topographie plane du périmètre.

Mots clés: Eaux saumâtres; Sol ; Salinité ; Cartographie ; ArcView GIS 3.2; Mahdia.

ABSTRACT

In the region of Mahdia (Eastern Tunisia) perimeters are irrigated using saline waters coming from groundwater and deep aquifers. Consequences are therefore progressive soils salinization. In this context, this work was conducted in the perimeter of Zelba, of Mahdia region, irrigated by brackish water in order to assess the effects of these waters on soil quality. A study of the salinity spatial variation was carried out. Electrical conductivity maps were plotted using the ArcView GIS 3.2 software. Soil salinity mapping showed a slight spatial variation of the soil salinity in the different soil layers. This salinity increased slightly with soil depth. The increasing gradient of the salinity is due to leaching of salts with depth under irrigation. Mapping also showed that the southern part of the perimeter is the most affected by soil salinity. Indeed, the northern part is closer to the water drilling. Thus, it receives more water which favors the salts leaching with depth. The slight spatial variation of salinity is explained by the flat topography of the perimeter.

Keywords: Brackish waters; Soil; Salinity; Mapping; ArcView GIS 3.2; Mahdia.

INTRODUCTION

Le sol est un milieu vivant et aussi un réacteur biologique qui assure de nombreuses fonctions environnementales ainsi qu'il maintient le développement des êtres vivants (Noomene, 2011). Aujourd'hui, la pénurie d'eau et la concentration des sels dans les sols suite à l'irrigation par des eaux de qualité médiocre et où saumâtres sont actuellement considérées comme des menaces pour la vie humaine. Plus de 1/6 des terres dans le monde sont touchées par la dégradation dont presque 6.4% des terres, seraient touchées par des phénomènes

de salinité. Selon FAO (2002) la superficie des terres cultivées ne représente que 10% des surfaces continentales.

En Tunisie, les sols salés enrichis en sels couvrent environ 1,5 million d'ha, à peu près 10% de la surface du pays. Ces sols sont répartis sur tout le territoire mais plus fréquemment dans le centre, le centre-est, le sud-est et le sud (Louati et al., 2014). Les surfaces irriguées comptent plus de 400 000 ha en 2006 réparties en périmètres publics irrigués (PPI) sur une superficie de près de 226 000 ha (56%) et en périmètres privés couvrant 175 000 ha dont 25% sont touchées par le processus de salinisation (Laajimi, 2007). Charfi et Habaieb (1995) ont révélé que l'irrigation par des eaux saumâtres dont le résidu sec est supérieur à 4 g/l a provoqué la salinisation des périmètres irrigués de la région de Sfax (périmètre de Hazeg, périmètre d'El houdh, périmètre de Bir Lahmar, périmètre d'El Fidh). Ben Hassine (2005) a trouvé que la salinisation des sols au niveau de cinq périmètres irrigués répartis sur le nord, le centre et le sud-ouest de la Tunisie a une double origine: l'eau d'irrigation et les remontées des nappes d'eau souterraines. Les périmètres irrigués de la région de Mahdia sont caractérisés par la salinisation progressive des sols suite à l'utilisation des eaux particulièrement salées provenant des nappes phréatiques et des nappes profondes riches en sels (Majdoub et al., 2012). Dans ce cadre d'idée, le périmètre irrigué Zelba de la région de Mahdia a été choisi afin d'évaluer les effets de l'irrigation par les eaux saumâtres sur la qualité du sol à travers une étude de la variation spatiale de la salinité. Cette étude a été réalisée en adoptant l'outil Spatial Analyst qui est un module complémentaire du logiciel ArcView GIS 3.2 pour tracer les cartes thématiques de la conductivité électrique du sol.

Cet article est organisé comme suit: La section 'matériel et méthodes' qui décrit le site d'étude, le prélèvement et l'analyse des échantillons du sol. Cette section présente également la méthode de cartographie utilisée pour l'étude de la variation spatiale de la salinité. La deuxième section discute les principaux résultats obtenus à partir de l'analyse des échantillons et le traitement numérique des données. Enfin, certaines conclusions ont été tirées et plusieurs questions pour les travaux futurs ont été proposées.

MATERIEL ET METHODES

Site d'étude

Le Périmètre Irrigué Zelba, crée en 1986, est situé au centre de la plaine alluviale de la région de Zelba. Cette région est située au sud de la région 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 1). Le climat de la région de Zelba est aride dont les précipitations sont rares et irrégulières avec une moyenne annuelle de 288 mm (Louati et al., 2014). La température moyenne annuelle est de l'ordre de 19°C.

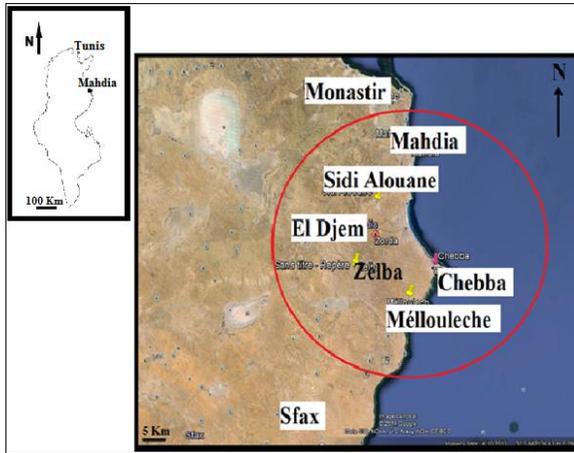


Figure 1 : Localisation du périmètre irrigué Zelba

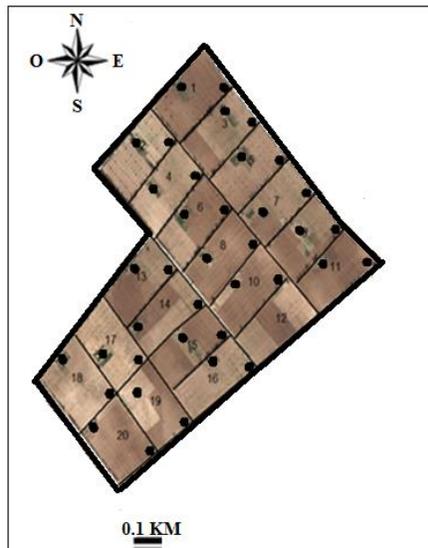


Figure 2 : Présentation des 20 lots du périmètre Zelba et les lieux de prélèvements des échantillons (Profils de sols irrigués et non irrigués) :
Image extraite de Google Earth et modifiée

Le périmètre irrigué Zelba couvre une superficie de 60 ha, découpés en 20 lots de 3 ha chacune (figure 2). Il est considéré comme un périmètre représentatif du type de sols isohumiques et de texture dominée par les sables et les limons.

Echantillonnage et analyse

L'échantillon d'eau a été prélevé à partir du forage d'eau Zelba captant une nappe profonde du Sahel de Sfax, située à l'est d'El Djem L'échantillonnage a été effectué conformément à la norme ISO 5667-11. Par la suite, les principaux paramètres chimiques ont été mesurés au laboratoire des eaux et des sols du CRDA de Mahdia. Ces paramètres sont le pH, la conductivité électrique (CE_w), le résidu sec (RS), le bilan ionique de l'eau comportant les cations : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ et les anions : SO_4^{2-} , Cl^- et HCO_3^- . En effet, le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre (Koller, 2004). La conductivité électrique de l'eau (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 résidu sec de l'eau (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). Concernant le bilan ionique de l'eau, l'analyse chimique des cations et des anions a été fait par dosage volumétrique en se basant sur le principe de MOHR pour les chlorures (Cl^-), les carbonates (CO_3^{2-}), les bicarbonates (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-}). De plus, le dosage des cations Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ a permis d'obtenir le taux du sodium adsorbé (SAR) selon l'équation numéro 1 et d'après la relation de Richards ou USSL définie en 1954 (USSL, 1954). En général, la détermination du SAR permet d'apprécier la dégradation éventuelle de la structure du sol (Gapon, 1933; Bresler et al., 1982) .

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{2+}+Mg^{2+})/2}} \quad (1)$$

Où les cations Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} sont exprimés en milliéquivalent/litre méq/l

Les échantillons de sol ont été prélevés en été 2011, dans les différents lots du périmètre. Deux profils de sol par parcelle (irrigué et non irrigué) ont été prélevés à l'aide d'une tarière de façon à avoir un échantillon chaque 1.5 m jusqu'à la profondeur 1.5 m du sol (figure 2). Une description morphologique a été également effectuée au niveau d'un profil représentatif du sol creusé au centre du périmètre d'étude afin d'identifier les différents horizons constitutifs du sol. Les échantillons prélevés 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 faire les analyses au laboratoire. Les principaux paramètres analysés sont physiques tels que l'analyse granulométrique et la conductivité hydraulique et chimique dont la conductivité électrique. L'analyse granulométrique a été réalisée sur un échantillon représentatif pour chaque horizon du périmètre, par la méthode de la pipette Robinson (Yoka et al., 2010). Cette dernière permet de séparer la partie minérale de la terre en fractions classées selon les dimensions des particules inférieures à 2 mm. La conductivité hydraulique (K) a été déterminée par la méthode du double cylindre appelée aussi méthode de Muntz. Cette méthode est fondée sur le principe d'infiltration de l'eau verticalement (Mathieu et Pieltain, 1998). La conductivité électrique du sol (CE) a été déterminée par la méthode électrométrique. En effet, cette conductivité a été mesurée dans une suspension sol/eau distillée de 1/5 ($CE_{1/5}$), en utilisant un conductimètre de type Jenway et en se basant sur la méthode de Richards (USSL, 1954).

Traitement numérique des données

Les données de la salinité mesurées par la méthode électrométrique ont été traitées numériquement par la méthode d'interpolation en utilisant le module 'Spatial Analyst'. En effet, une image satellitaire à très haute résolution a été extraite à partir de google earth, puis elle a été géoréférencée en utilisant l'extension « outil de Géoréférencement et de transformation ». Sur cette image, les points de prélèvement des échantillons du sol ont été localisés et les résultats de la $CE_{1/5}$ obtenus ont été introduits. Les cartes thématiques de la $CE_{1/5}$ ont été tracées à l'aide de l'outil Spatial Analyst qui est un module complémentaire du logiciel ArcView GIS 3.2.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Analyse chimique de l'eau d'irrigation

L'étude de la qualité de l'eau utilisée en irrigation au niveau du périmètre irrigué Zelba a montré que le pH moyen mesuré est de l'ordre de 7,9. Cette eau est saline dont le résidu sec est égal à 5 g/l et la conductivité électrique moyenne est supérieure au seuil fixé par USSL (1954) et est de 7,2 dS/m. Cette analyse a révélé également que l'eau d'irrigation est riche en sulfates (SO_4^{2-}), chlorures (Cl^-) et en sodium (Na^+) par rapport à d'autres éléments. Dans ce cas, cette eau présente un faciès chloruré et sulfaté sodique. La valeur moyenne du SAR est de

l'ordre de 15,6. Cette valeur classe l'eau dans la classe C5S4 selon le diagramme de classification des eaux de Riverside (USSSL, 1954). Il s'agit donc d'une eau à très fort risque de salinisation et d'alcalisation. Elle pourrait engendrer la salinisation et la dégradation de la structure du sol à long terme (Layachi et al., 2012).

Tableau 1 : Analyse chimique de la qualité de l'eau

Paramètre	Moyenne
Ph	7,9
CE _w (dS/m)	7,2
RS (g/l)	5
Ca ²⁺	280
Mg ²⁺	120
Na ⁺	1242
K ⁺	24
SO ₄ ²⁻	1344
Cl ⁻	1775
HCO ₃ ⁻	244
SAR	15,6

Analyse physique du sol

La description morphologique a montré que le sol du périmètre est un sol brun isohumique profond (Mtmet, 1999) évoluant sur un matériau d'épandage de limon à nodules calcaires. Il est homogène à cause de la topographie plane du terrain et où la pente est inférieure à 3%. L'analyse physique a montré que le sol du périmètre présente une texture sablo-limoneuse en surface (0 -30 cm) et une texture limono-sableuse pour une profondeur allant de 30 à 135 cm. Pour une profondeur allant de 135 cm à 150 cm, la texture devient limono-argileuse (tableau 2). Les résultats de mesures du coefficient de perméabilité à saturation (K_{sat}) effectuées à la surface du sol dans quelques parcelles du périmètre ont montré un sol perméable avec un coefficient K_{sat} supérieur au seuil $5 \cdot 10^{-6}$ m/s. En effet, les valeurs moyennes de K_{sat} ont varié entre $8 \cdot 10^{-6}$ m/s et 10^{-5} m/s avec une valeur moyenne de l'ordre $9,5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Ceci est expliqué en grande partie par la texture légère observée à la surface du sol et par l'apport de la matière organique dans les horizons superficiels du sol (Coquet et al., 2005).

Tableau 2 : Résultats de la caractérisation physique du sol

Profondeur (cm)	Granulométrie (%)					Texture
	A	LF	LG	SF	SG	
15	13	18	24	37	8	Sablo-limoneuse
30	14	19	23	36	8	
45	14	22	23	34	7	Limono-sableuse
60	16	19	23	34	8	
75	18	22	19	33	8	
90	19	23	19	32	7	
105	23	23	18	28	8	
120	22	24	19	29	6	
135	24	23	19	28	6	
150	30	21	23	20	6	Limono-argileuse

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

Variation spatiale de la salinité du sol

Les cartes thématiques de la $CE_{1/5}$ ont été tracées en utilisant l’outil Spatial Analyst qui est un module complémentaire du logiciel ArcView GIS 3.2.

La représentation cartographique de la salinité au niveau du sol irrigué a montré une légère variation spatiale de la salinité pour les différentes profondeurs du sol (figure 3). Cette représentation a montré également, que la salinité du sol pour l’horizon (0-30 cm) est moyenne, avec des valeurs de la $CE_{1/5}$ qui varient entre 0,7 et 1,3 dS/m. Cette salinité a augmenté légèrement de la surface vers la profondeur du sol. La partie sud-ouest est la partie la plus touchée par la salinité, notamment celle observée dans les horizons les plus profonds (90-120 cm et 120-150 cm). Les valeurs de la $CE_{1/5}$ ont varié entre 1,6 et 1,8 dS/m. Ceci indique un sol salé selon la classification de l’USSS (1954). Au niveau du sol non irrigué, la salinité a augmenté légèrement par rapport à celui irrigué avec les eaux saumâtres. La représentation cartographique de la salinité du sol a révélé une légère variation spatiale de la salinité pour les différents horizons du sol. Elle a montré que la partie sud et la partie sud-ouest sont les plus touchées par la salinité (figures 4). Cette représentation a montré également, que la salinité du sol a augmenté légèrement d’un horizon à l’autre. Les valeurs de la $CE_{1/5}$ ont varié entre 1,4 et 2,9 dS/m indiquant un sol salé.

La salinité observée au niveau de l’horizon (0-30 cm) est inférieure à celle observée au niveau des horizons plus profonds, notamment pour le sol irrigué

où elle est relativement faible. Ceci est expliqué par le lessivage des sels en profondeur. En outre, la faible salinité observée au nord du périmètre irrigué pourrait être expliquée par le fait que cette partie est plus proche du forage d'eau. Cette partie reçoit donc plus d'eau, expliquée par le débordement des bassins situés au nord par rapport à ceux situés loin du forage. D'où le lessivage plus efficace des sels solubles qui a entraîné ces sels vers les horizons les plus profonds. Une autre hypothèse pourrait être attribuée : dans la partie sud-ouest du périmètre, la présence des banquettes a été observée favorisant l'accumulation des sels dans cette partie. De plus, la salinité observée dans tout le profil du sol non irrigué est légèrement supérieure à celle observée au niveau du sol irrigué. Par conséquent, l'irrigation a amélioré légèrement la salinité du sol au niveau de ce périmètre.

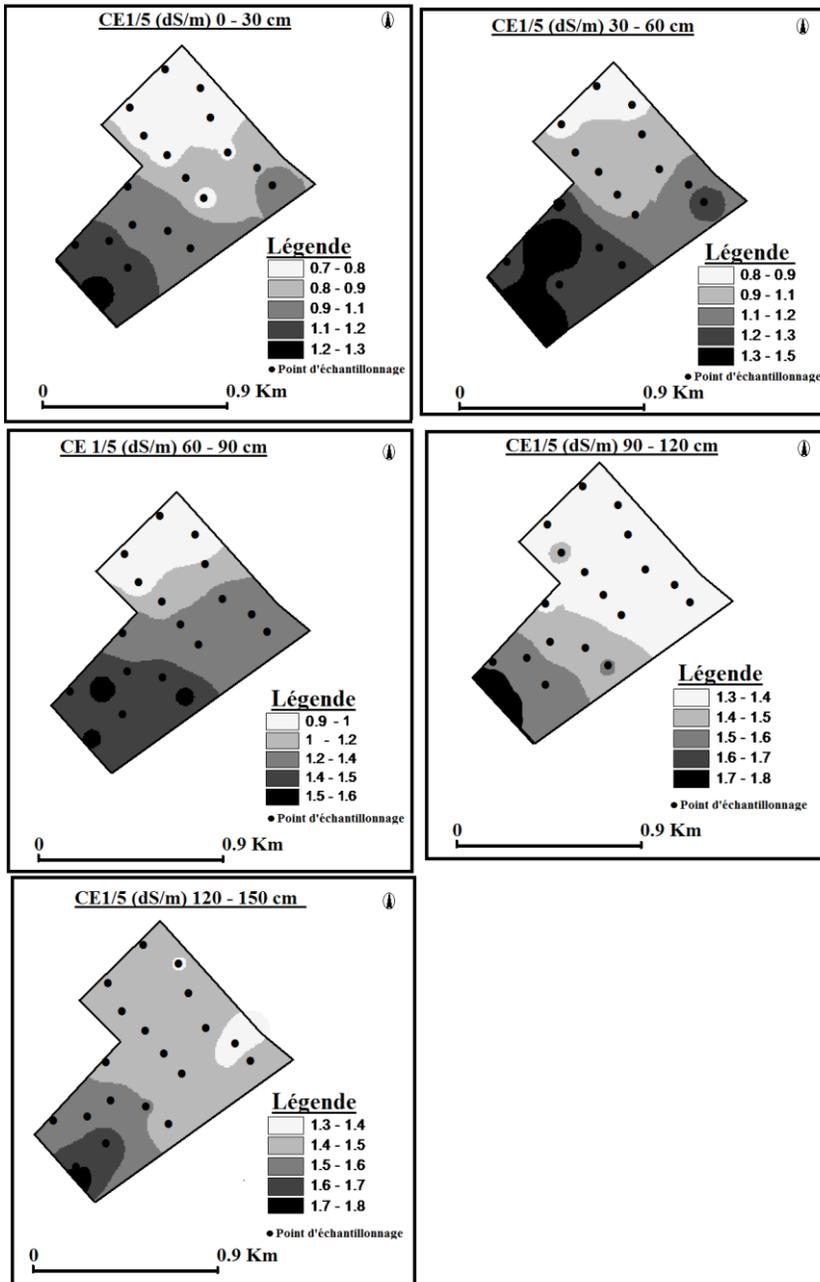


Figure 3 : Variation spatiale de la salinité au niveau du sol irrigué

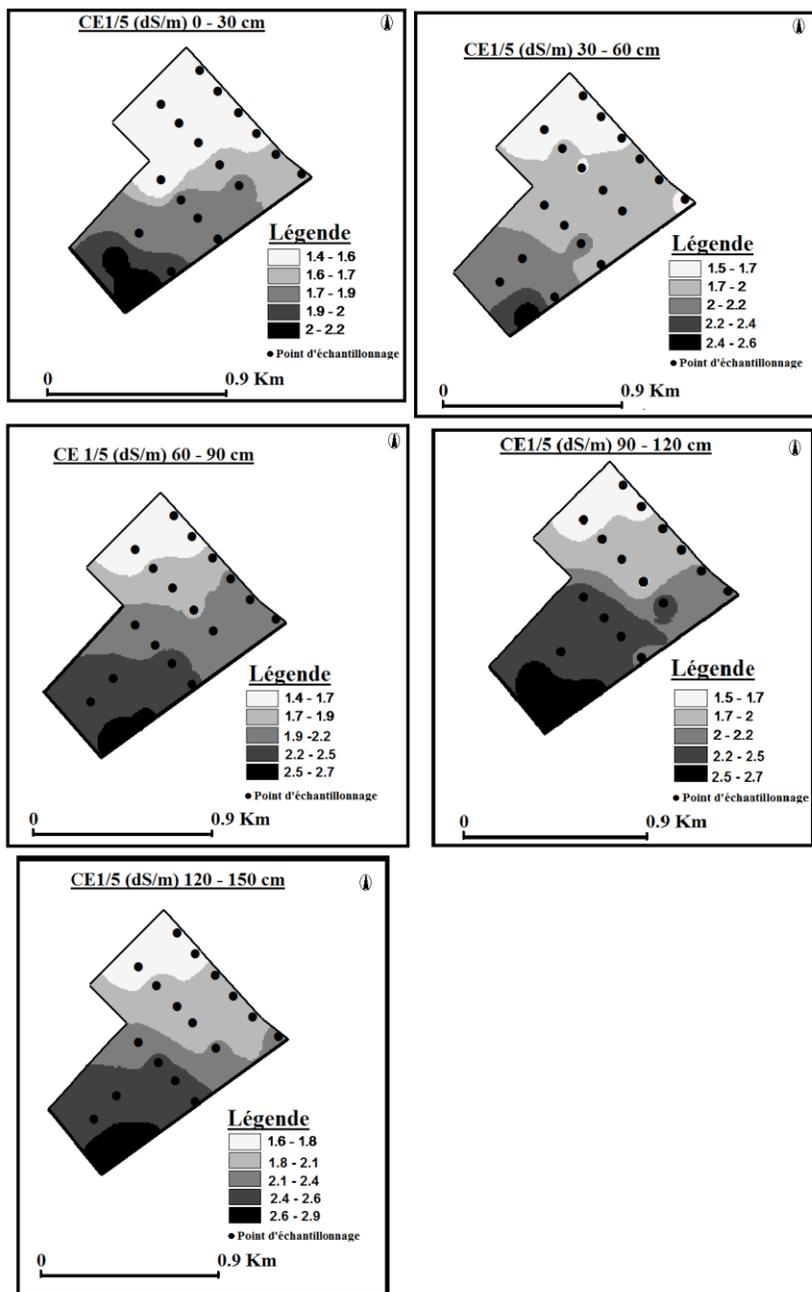


Figure 4 : Variation spatiale de la salinité au niveau du sol non irrigué

CONCLUSION

La salinité des sols irrigués et des sols non irrigués observée dans les différents lots du périmètre irrigué Zelba en particulier dans les horizons les plus profonds dépend largement de la qualité de l'eau d'irrigation utilisée depuis presque 30 ans. Cette eau est également responsable à la lixiviation des sels et leur accumulation dans les horizons profonds.

L'accumulation des sels en profondeur peut causer des effets nocifs à long terme, notamment la dégradation des propriétés physico-chimique du sol voire les nappes phréatiques et profondes.

En ce qui concerne l'étude de la variation spatiale de la salinité du sol, la cartographie a révélé une légère variation spatiale pour les différents horizons du sol. Elle a montré également que la partie sud et la partie sud-ouest sont les plus touchées par la salinité du sol. La partie nord est plus proche du forage d'eau. Elle reçoit donc plus d'eau qui favorise le lessivage des sels en profondeur. La légère variation spatiale de la salinité est expliquée essentiellement par la topographie pratiquement plane du périmètre d'étude.

En perspective, il serait nécessaire de pousser les stades d'observation et les travaux de contrôle de la salinité voire la sodicité du sol dans ce périmètre afin de pallier à la salinisation notamment en cas des années peu pluvieuses et de prédire une dégradation éventuelle de la structure du sol. Il est important d'étudier la variation spatiale et temporelle d'autres paramètres essentiellement la stabilité structurale du sol au niveau de ce périmètre pour prédire la dégradation de cette structure sous l'effet de l'irrigation à l'eau saumâtre.

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 '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.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEN HASSINE, H., 2005. Effets de la nappe phréatique sur la salinisation des sols de cinq périmètres irrigués en Tunisie. *J. Etude et gestion des sols*. 12, pp. 281-300.
- BRESLER, E., MCNEAL, B.L., Carter, D.L., 1982. *Saline and sodic soil*: Springer-verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 236 pages.
- CHARFI, F., 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.
- COQUET, Y., VACHIER, P., LABAT, C., 2005. Vertical variation of near saturated hydraulic conductivity in three soil profiles. *J. Geoderma*. 126 (3-4), pp. 181-191.
- DURAND, J.H., 1958. *Les sols irrigables. Etude pédologique*. ED. Imbert, Algerie, 190 pages.
- FAO, 2002. *Wetland development and management in SADC countries. Proceedings of a sub-regional workshop, 19-23 November 2001, Harare, Zimbabwe*. Editors: Karen Frenken and Isiah Mharapara. FAO-SAFR, Harare, 190 pages.
- GAPON, E.N., 1933. Theory of exchange adsorption in soils. *J. Gen. Chem. USSR*. 3.2, pp. 144-152.
- KOLLER, E., 2004. *Traitement des pollutions industrielles : Eau, Air, Sols, Boues*. Ed. Dunod, 424 pages.
- LAAJIMI, A., 2007. Les périmètres irrigués en Tunisie. Un enjeu pour le développement de la production agricole. *Les notes d'alerte du CIHEAM* 30, 3 pages.
- LAYACHI, G., OMAR, G., ABDERRAHMANE, B., MOHAMED, L., 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., ABIDA, H., 2014. 30 years saline water irrigation effects on soil characteristics, *International Journal of Engineering and Technical Research*. 2 (5), pp. 5-13.
- MAJDOUB, R., HACHICHA, M., EL AMRI, A., 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, 499-507.
- MATHIEU, C., PIELTAIN, F., 1998. *Analyse physique des sols. Méthodes choisies. Techniques et documentation*, Paris, pp. 21-49.
- MTIMET, A., 1999. *Atlas Tunisian soils*. Agricultural ministry. Tunisia.
- NOOMENE, H., 2011. Etude de la salinité des sols par la méthode de détection électromagnétique dans le périmètre irrigué de Kalaat Landelous en Tunisie : Cas d'une parcelle de courge. *Mastère de recherche en environnement*. Faculté des lettres, des arts et des humanités Manouba, Tunisi, 120 pages.

- RODIER, J., BAZIN, C., BOURTIN, J.P., CHAMBON, P., RODI, L., 2005. L'analyse de l'eau : Eau naturelle, eau résiduaire, eau de mer. Ed, Dunod, Paris. 8ème Ed. 1383, pages.
- USSL, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Department of Agriculture, Handbook n°60, U.S. Gov. Print. Office, Washington D.C, 160 pages.
- YOKA, J., LOUMETO, J.J., VOUIDIBIO, J., AMIAUD, B., 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.