

Analyse spatiale de la salinité des sols et sa cartographie par l'application de la géostatistique dans la plaine du Bas-Chélif, Algérie

Abdelkader Douaoui

Laboratory Management and Valorization of Agricultural and Aquatic Ecosystems,
University Center of Tipaza, Algeria

ملخص : لقد اتسعت ملوحة التربة في سهل شلف السفلي، التي كانت في الأصل أولية، بسرعة من حيث المكان والزمان على مدى العقود الأربعة أو الخمسة الماضية. ويرجع هذا التملح بشكل أساسي إلى تغير المناخ، الذي أجبر المزارعين إلى اللجوء بشكل متزايد إلى الري المكثف باستخدام المياه الجوفية، والتي غالباً ما تكون ذات نوعية رديئة. لذلك أصبح رسم خرائط ملوحة تربة السهل باستخدام التقنيات المناسبة على هذا النطاق من المساحة الواسعة ضرورة للتسيير الجيدة لهذه الملوحة. تم استخدام تقنية الجيواحصاء، الذي يتميز بدراسة بنية التباين المكاني للملوحة وتقديرها، لرسم خريطة ملوحة الطبقة السطحية على مساحة 40,000 هكتار. وللقيام بذلك وبهدف تحسين التقدير المكاني، تم تطبيق تقنية الكريجاج ذات المتغير العام والكريجاج ذات المتغير المحلي. أظهرت النتائج توسعاً كبيراً في ملوحة التربة، حيث أصبحت نسبة 65% تقريباً من التربة مالحة، مقارنة بأقل من 15% في الخمسينيات الماضية. بالإضافة إلى ذلك، أظهر الكريجاج ذات المتغير المحلي تحسناً في التقدير المكاني للملوحة مقارنةً بالكريجاج ذات المتغير العام.

الكلمات المفتاحية : الملوحة، الإحصاء الجغرافي، كريجينج، رسم الخرائط.

Abstract : Soil salinity in the Bas-Chélif plain, originally primary, has expanded rapidly in space and time over the last four to five decades. This salinisation is essentially due to climate change, which has forced farmers to resort increasingly to intensive irrigation using ground water, which is often of mediocre quality. Mapping the salinity of the plain's soil using an appropriate approach at this scale has therefore become a necessity for good management of this salinity. Geostatistics, which has the advantage of studying the structure of the spatial variability of salinity and its spatial estimation, was used to map the top soil salinity over 40,000 ha. To do this and with the aim of improving spatial estimation, ordinary kriging with global variogram and ordinary kriging with local variogram were applied. The results showed a significant expansion in soil salinity, with almost 65% of soils becoming salty, compared with less than 15% in the 1950. In addition, ordinary kriging with local variogram showed an improvement in the spatial estimation of salinity compared with ordinary kriging with global variogram.

Key words : salinity, geostatistics, kriging, mapping.

Résumé : La salinité des sols dans la plaine du Bas-Chélif, originellement primaire, a connu une rapide expansion à l'échelle spatiale et temporelle au cours des quatre à cinq dernières décennies. Cette salinisation est due essentiellement aux changements climatiques qui ont contraint les agriculteurs à recourir, de plus en plus, à l'irrigation intensive par les eaux souterraines qui sont souvent de qualité médiocre. La cartographie de la salinité des sols de la plaine par une approche adéquate à cette échelle est devenue donc une nécessité pour une bonne gestion de cette salinité. La géostatistique qui a l'avantage d'étudier la structure de la variabilité spatiale de la salinité et de son estimation spatiale a été utilisée pour la cartographie de la salinité des couches de surface sur 40000 ha. Pour ce faire et dans l'objectif d'améliorer l'estimation spatiale le krigeage ordinaire à variogramme global et le krigeage ordinaire à variogramme local ont été appliqués. Les résultats ont montré une expansion importante de la salinité des sols avec près de 65% des sols qui sont devenus salés alors qu'ils ne dépassaient pas les 15% dans les années 1950. Par ailleurs, le krigeage ordinaire à variogramme local a montré une amélioration dans l'estimation spatiale de la salinité.

Mots clés : Salinité, géostatistique, krigeage, cartographie.

1. Introduction

La salinisation des sols est un problème qui se pose avec une sévère acuité par son effet sur la dégradation de la qualité des terres, en particulier dans les milieux arides et semi-arides (Rengasamy et al., 2003 ; Douaoui et al., 2004). En Algérie, la salinisation des sols est préoccupante, en particulier dans la région de la plaine du Bas-Chélif où le recours à l'irrigation par les eaux souterraines dont la qualité est souvent médiocre a contribué fortement à l'augmentation de la salinité des sols localement et spatialement (Qadir et Oster, 2004 ; Douaoui et al., 2006). La connaissance de cette salinité, sur les 40000 ha de la plaine, en termes de niveaux et de superficies devient donc indispensable pour sa bonne gestion et une meilleure prise en charge (Odeh et al., 1994 ; Iqbal, 2011 ; Douaoui et Yahiaoui, 2015).

La géostatistique qui est fondée sur l'application de la théorie des variables régionalisées (Matheron, 1965) est l'outil spatial le plus approprié pour décrire la structure spatiale d'une de la salinité et la cartographier à l'échelle de toute la plaine (Walter, 1990 ; Douaoui, 2005 ; Allbed et al., 2014 ; Jianli et Danlin, 2014).

Les objectifs visés par ce travail consiste à :

- Analyser la variabilité spatiale de la salinité des sols à l'échelle de la plaine du Bas-Chélif.
- Cartographier la salinité des couches de surface par krigeage par deux techniques de krigeage à savoir le krigeage ordinaire à variogramme globale (KOVG) et le krigeage ordinaire à variogramme local (KOVL) (Walter et al., 2001)

- Comparer la qualité de l'estimation spatiale entre ces deux types de krigeage.

2. Matériel et méthodes

2.1 Localisation de la zone d'étude

La plaine du Bas-Chélif se situe à l'ouest de la vallée du Chélif qui est traversée par l'oued Chélif qui est le plus long cours d'eau en Algérie. Elle se trouve à environ 250 km à l'ouest d'Alger et à une cinquantaine de km de la méditerranéenne entre $0^{\circ} 40'$ et $1^{\circ} 6' 8''$ de longitude et $34^{\circ} 3' 12''$ et $36^{\circ} 5' 57''$ de latitude nord (fig. 1).

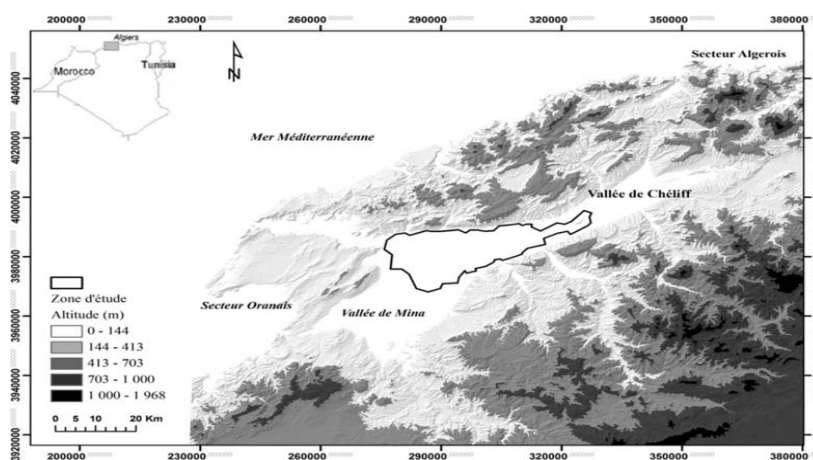


Fig. 1 La zone d'étude.

1.2 Plan d'échantillonnage

Un total égal à 3940 échantillons a été prélevé sur une profondeur de 20 cm selon un échantillonnage systématique aux nœuds d'une grille carrée de 250 m de côté (Douaoui, 2005).

La représentation des points échantillonnés a été faite selon les classes habituellement considérées dans le cas de la salinité de la pâte saturée selon la classification USSLS (1954) (fig. 2).

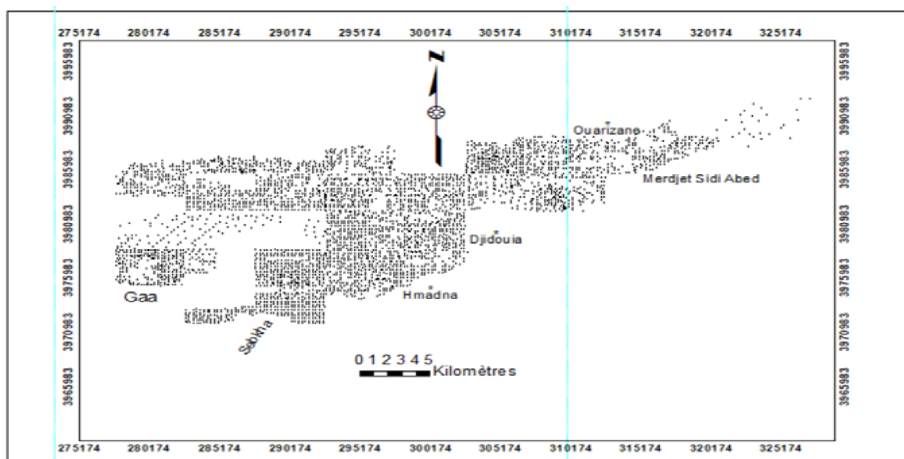


Fig. 2 Plan d'échantillonnage.

1.3 Mesures au laboratoire

L'analyse expérimentale de la salinité a été faite au laboratoire pour les 3980 échantillons sur l'extrait dilué au 1/5ème avec, en plus, 450 échantillons qui ont fait l'objet d'une mesure sur l'extrait de la pâte saturée (Douaoui, 2005).

Le coefficient de détermination entre les deux mesures pour les 450 échantillons est égal à 0,97, ce qui nous a permis d'estimer les valeurs de CE des autres échantillons à la pâte saturée par l'équation suivante :

$$CE_{(p\grave{a}te\ saturated)} = 5,98 CE_{(extrait\ dilu\acute{e}\ 1/5)} + 0,52$$

1.4 Méthodes Géostatistiques

1.4.1 Etude variographique

L'étude variographique en géostatistique s'effectue grâce à l'outil variogramme dont les paramètres de la structure spatiale de la variable étudiée sont déterminés à partir de l'ajustement du variogramme expérimental à un modèle théorique (sphérique, exponentiel...) qui, dans l'hypothèse intrinsèque, a pour équation :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad \text{où}$$

- h est le pas de calcul
- $\gamma(h)$ est la semi-variance pour une distance h
- N(h) est le nombre de couples des points de mesures (x_i, x_i+h) distants de h.

Le variogramme présente généralement trois paramètres : l'effet de pépite, la portée et le palier.

1.4.2 Estimation spatiale par Krigeage ordinaire

L'estimation spatiale de la salinité a été faite par krigeage ordinaire à variogramme global (KOVG) et krigeage ordinaire à variogramme local (KOVL). Dans les deux cas, le krigeage permet l'estimation d'une propriété Z en un point quelconque de l'espace de coordonnées x_0 selon une combinaison linéaire des observations faites en des points voisins x_i .

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \begin{array}{l} \text{où } n \text{ est le nombre de points } x_i \\ \text{et } \lambda_i \text{ est le poids affecté à} \\ \text{chaque voisin} \end{array}$$

La différence entre les deux types de krigeage se situe au niveau du type de variogramme utilisé. Pour le KOVG, le variogramme est calculé sur l'ensemble des points et il est utilisé dans la prédiction de chaque point estimé. Pour le KOVL, le variogramme est calculé localement pour chaque voisinage de krigeage et n'est utilisé que pour ce type de voisinage (Walter et al., 2001).

1.5 La validation

La validation de l'estimation spatiale pour les deux types de krigeage a été faite sur un nombre de 597 points aléatoirement choisis parmi les 3980 points échantillonnés, soit 15 % de la totalité des points échantillonnés et mesurés (fig. 3).

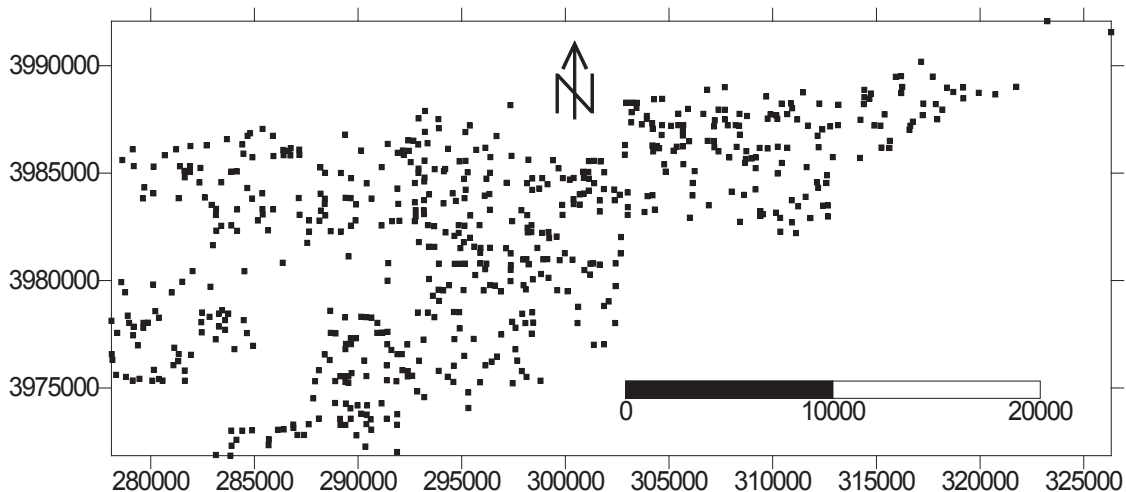


Fig. 3 Localisation des 597 points de validation choisis aléatoirement au sein du jeu de données initial.

Ces points n'ont pas été introduits dans les calculs de variogrammes et d'estimation par krigeage, mais des valeurs de salinité ont été estimées en leur site à partir des autres points mesurés, ce qui permet de comparer les valeurs de CE mesurée (CE) et CE estimée (CE*)

Les critères retenus pour cette validation sont :

- l'erreur moyenne

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [CE^*(x_i) - CE(x_i)]$$

- l'erreur standardisée moyenne

$$1/n \frac{\sum_{i=1}^n [CE^*(x_i) - CE(x_i)]}{\sigma(x_i)}$$

- la racine carrée de l'erreur standardisée quadratique moyenne.

$$1/n \sqrt{\sum_{i=1}^n [(CE^*(x_i) - CE(x_i))/\sigma(x_i)]^2}$$

2. Résultats et discussion

2.1 Krigeage ordinaire

2.1.1 Analyse statistique descriptive des données

La valeur moyenne égale à 12,96 dS/m montre une salinité élevée qui exprime l'ampleur de la salinisation des sols dans le Bas-Chélif. Avec une valeur minimale égale à 0,39 dS/m marquant la présence de sols non salés, la valeur maximale atteignant jusqu'à 54,31 dS/m montre, par

ailleurs, l'existence de salinité excessivement élevée. La valeur de la médiane est égale à 7,93dS/m, ce qui montre une dissymétrie dans la distribution des valeurs de la CE (tab. 1).

Tab 1. Statistiques descriptives de la salinité mesurée des sols.

Points	Moyenne (dS/m)	Médiane (dS/m)	Variance (dS/m) ²	Min. (dS/m)	Max. (dS/m)
3980	12,96	7,93	136,65	0,39	54,7

2.1.2 La variographie

Le variogramme expérimental moyen de la salinité des sols a été calculé sur une distance de 12 km avec des classes de distance égale à 01 km en moyenne. L'ajustement de ce variogramme expérimental a été ajusté par un modèle sphérique avec un effet de pépité de 49 (dS/m)², un palier de 156 (dS/m)² et une portée de 9.5 km(fig. 4).

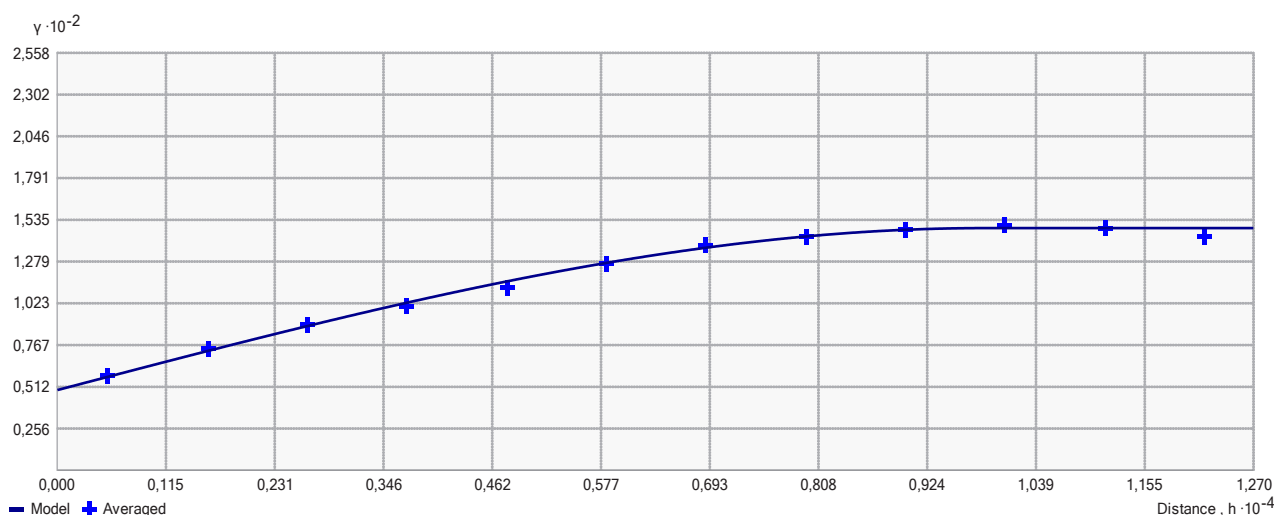


Fig. 4 Ajustement du variogramme moyen de la CE à un modèle exponentiel (pépité = 49 (dS/m)² ; palier = 156 (dS/m)² ; portée = 9500 m)

Le variogramme surfacique de la salinité (fig. 5) montre l'existence d'une anisotropie égale à 2. Cette anisotropie est déterminée par un rayon majeur égal à 12.7 km qui représente la direction de la plus grande continuité selon un angle de 35° et un rayon mineur égal à 6.35 km

selon un angle dans la direction 125° représentant celle de la plus faible continuité. La détermination de l'anisotropie est importante dont il faut tenir compte lors du krigeage pour améliorer la qualité de l'estimation et minimiser l'erreur d'interpolation.

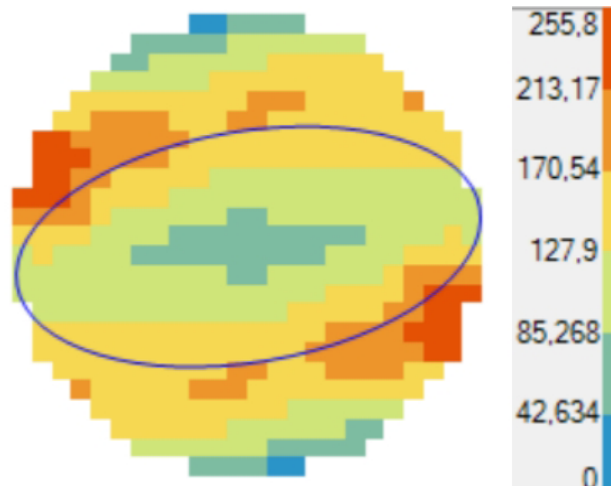


Fig. 5 Variogramme surfacique de la salinité.

2.1.3 La cartographie de la salinité par krigeage ordinaire

La cartographie de la salinité des sols de la plaine du Bas-Chélif a été obtenue par krigeage ordinaire à variogramme global et krigeage ordinaire à variogramme local. L'interpolation spatiale surfacique par bloc a été préférée à celle par points pour éliminer l'hétérogénéité à l'échelle de la parcelle. Le nombre total de blocs estimés est de

157856 à raison de 0,25 ha chacun.

L'ajustement par une droite du nuage de points entre la CE mesurée et les résidus obtenus par KOVG montre que la tendance générale de l'estimation est marquée en moyenne par une forte sous-estimation des valeurs de CE > 10 dS/m et qu'à partir de 40 dS/m, toutes les valeurs sont systématiquement sous-estimées. Par ailleurs, les valeurs de CE inférieures en moyenne à 10 dS/m, la tendance est à la surestimation (fig. 6).

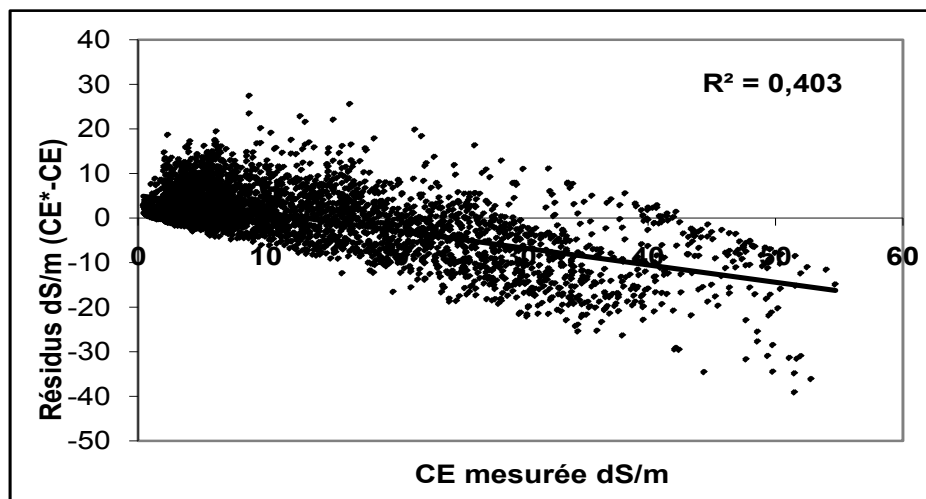


Fig. 6 Relation entre les valeurs de CE mesurée et les résidus du KOVG.

La cartographie de la salinité des sols sur une superficie aussi importante que celle de la plaine du Bas-Chélif est sujette à l'existence de plusieurs structures spatiales de la salinité selon les différentes zones de la plaine, ce qui expliquerait les sous-estimations élevées de valeurs de

salinité prédites.

Contrairement au KOVG, le KOVL dont l'estimation se fait en fonction des variogrammes spécifiques à voisinages limités à des petites zones seraient à même de répondre au mieux à ces insuffisances.

La validation statistique effectuée sur 597 points pris de façon aléatoire confirme ce premier résultat comme le montre la validation statistiques des trois critères retenus pour cette comparaison (tab.2). En effet, ces trois critères (EM, ESM, RESQM) sont favorables au KOVL pour deux critères avec un troisième critère du même niveau d'estimation. (tab.2).

Tab. 2 Validation statistique de la qualité de l'estimation.

	EM	ESM	RESQM
KOVL	0,25	0,07	2,38
KOVL	0,19	0,07	2,28

Erreur moyenne (EM), erreur standardisée moyenne (ESM), racine de l'erreur standardisée quadratique moyenne (RESQM).

Les deux cartes obtenues par le KOVG et le KOVL montrent globalement la même répartition zonale des niveaux de salinité. Les superficies à salinité élevée > 16 dS/m se localisent essentiellement dans la partie ouest de la plaine et particulièrement dans le périmètre de Hmadna et la zone de la Gaa (fig 7 et 8). Les superficies ayant une salinité inférieure à 4 dS/m apparaissent en dominance au niveau du plateau de Benziane et de la colline de partage qui sont des zones à culture pluviale. Les sols qui se trouvent dans les périmètres irrigués comme ceux de l'oued Chlef et de Djédiouia sont dominés par des niveaux de salinité moyenne comprise entre 4 et 8 dS/m, suivie par la classe 8-16 dS/m (fig. 7 et 8)).

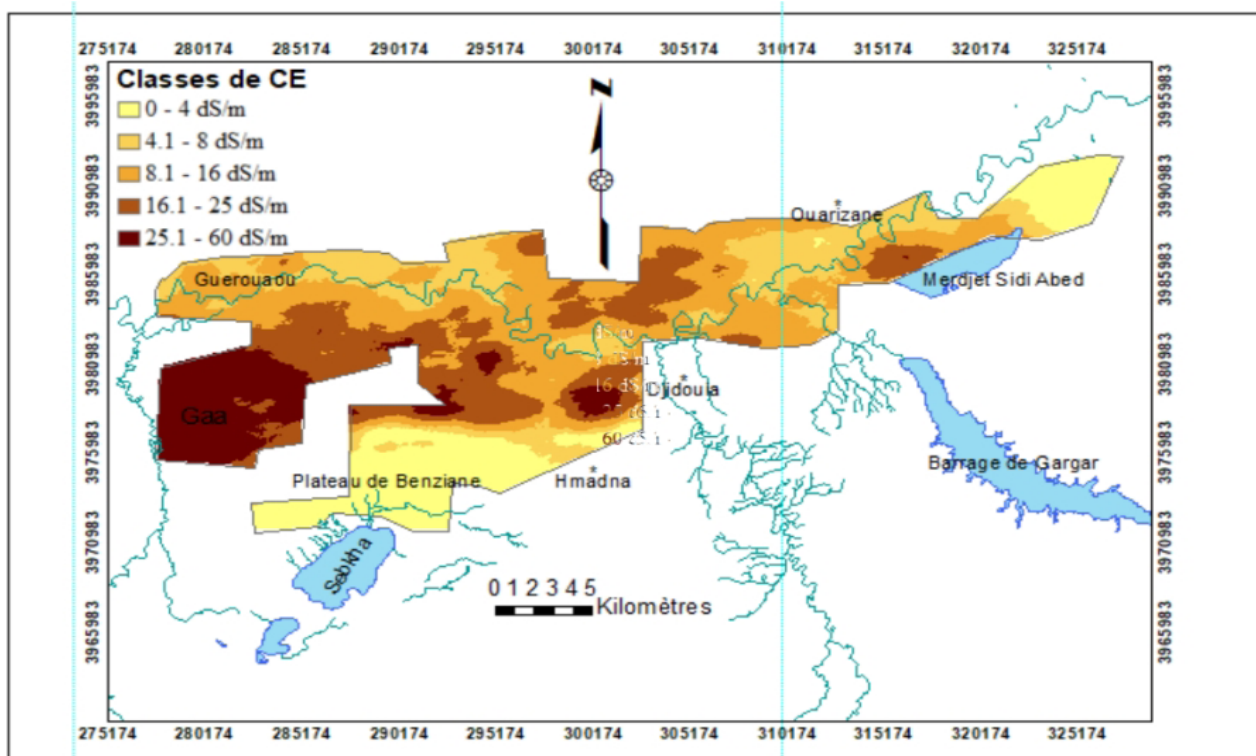


Fig. 7 Carte de la salinité estimée par KOVG.

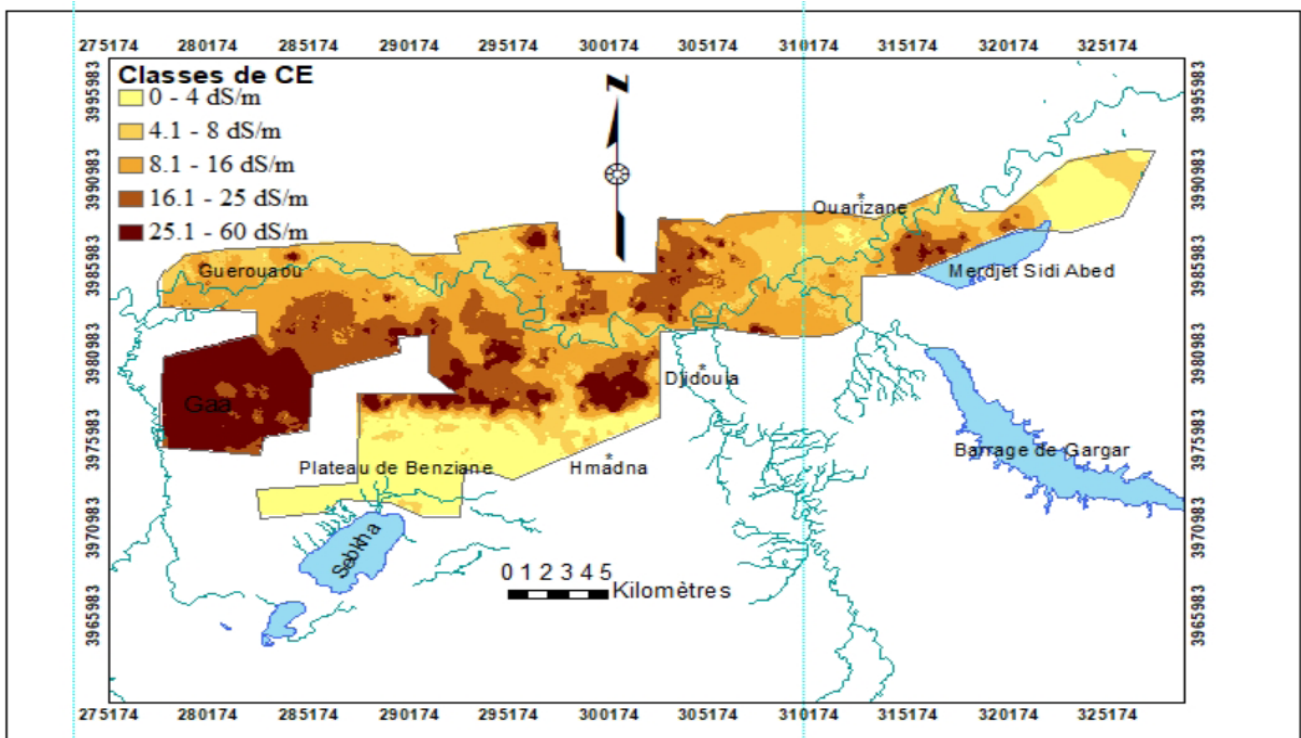


Fig. 8 Carte de la salinité estimée par KOVL.

La carte établie par KOVL montre une plus faible sensibilité de la salinité aux variabilités spatiales locales (fig. 7) par rapport au KOVG (fig. 8), ce qui se traduit par un lissage plus important dans le cas du KOVL. En effet, certaines régions de la plaine qui sont connues par leurs sols très salés mais de faible extension, tels que les sols se trouvant au nord de Merdjet Sidi Abed, ne sont pas mis en évidence par le KOVG contrairement au KOVL où des zones très salées se répartissent sur presque la totalité de la plaine. D'autre part, la multitude de taches parfois très petites de la classe de CE inférieure à 4 dS/m qui apparaît sur la carte établie par le KOVL, exprime bien cette variabilité locale et donc moins de lissage.

Il apparaît aussi que l'irrigation est le principal facteur responsable de la variabilité locale de la salinité dans la mesure où les superficies

irriguées, tels que les périmètres de Ouarizane, de Djédouia et les superficies avoisinant l'oued Chlef montrent des hétérogénéités spatiales élevées contrairement aux zones qui ne le sont pas comme le plateau de Benziane et la colline de partage.

Les superficies des classes de CE obtenues par KOVG et KOVL sont globalement équivalentes (tab.3). En tenant compte des deux types de krigeage, les superficies affectées par classe de salinité montrent que 16 % sont non salées (CE < 4 dS/m), 20 à 22 % moyennement salés (CE comprise entre 4-8 dS/m), 30 à 31 % sont dans la classe des sols salés (CE comprise entre 8-16 dS/m), 18 à 20 % sont très salés (CE comprise entre 16-25 dS/m) et 13 à 14 % sont excessivement salés (CE > 25 dS/m).

Tabl 3. Superficies des classes de CE estimées par KOVG et KOVL et pourcentages respectifs.

	0-4	4-8	classes de CE (dS/m)			Total
			8-16	16-25	>25	
ha	6326,25	7876	CE estimée par KOVG			39464
			12370,75	7870,75	5020,25	
%	16	20	31	20	13	100
ha	6455,25	8827,25	CE estimée par KOVL			39464
			11499,25	7214,75	5467,5	
%	16	22	30	18	14	100

Si les superficies par classes de CE sont équivalentes entre le KOVG et le KOVL, il n'en est pas de même pour l'incertitude dans l'estimation de ces superficies. Pour connaître les limites de superficie entre lesquelles se trouvent probablement les valeurs vraies des classes de salinité, les intervalles de confiances des classes de CE ont été calculés. Dans le cas d'un intervalle de confiance bilatéral au risque d'erreur de 5 % correspondant à un niveau de confiance de 95 %, les limites de la fourchette d'estimation sont déterminées pour chaque bloc x_0 par $[CE^*(x_0) - 2 \sigma(x_0), CE^*(x_0) + 2 \sigma(x_0)]$. Comme nous nous intéressons surtout au risque d'avoir des sols à CE élevée, le calcul a été fait seulement sur la limite supérieure de l'intervalle de confiance (Douaoui, 2005).

Le tableau 4 montre que l'incertitude pour la CE supérieure à 8 dS/m dans le cas de l'estimation avec le KOVG est telle que 94 % de la superficie totale de la vallée sont susceptibles d'avoir une $CE > 8$ dS/m. Pour le KOVL, seuls 85 % de la vallée sont susceptibles de dépasser ce seuil.

Tabl 4. Limites supérieures de l'intervalle de confiance à 95%.

	classes de CE (dS/m)			Total
	0-4	4-8	> 8	
Intervalle de confiance à 95% (KOVG)				39465
Ha	0	2285,75	37178,25	
%	0	6	94	100
Intervalle de confiance à 95% (KOVL)				39465
Ha	2683,75	3010,75	33769,65	
%	7	8	85	100

3. Conclusion

La cartographie de la salinité de la plaine du Bas-Chélif par les KOVG et KOVL a montré l'ampleur de la salinisation des sols qui touche plus de 33500 ha (85 %) sur une superficie totale de 40000 ha dont 15700 ha font partie des sols très salés. Ces résultats montrent à quel point la salinisation secondaire, principalement due au recours de l'irrigation intensive par les eaux souterraines, a contribué à l'expansion des superficies salées qui ne couvraient que 14000 ha (34 %) dans les années 50.

La carte établie par le krigeage ordinaire à variogramme global (KOVG), avec un lissage relativement élevé, montre moins bien la variabilité spatiale de la salinité aux faibles distances que la carte obtenue par le krigeage ordinaire à variogramme local (KOVL) qui a montré une meilleure qualité d'estimation.

Références bibliographiques

- Allbed, A.; Kumar, L.; Sinha, P. 2014. Mapping and Modelling Spatial Variation in Soil Salinity in the Al Hassa Oasis Based on Remote Sensing Indicators and Regression Techniques. *Remote Sensing*, 6, 1137–1157.
- Douaoui A., 2005. Variabilité Spatiale de la salinité et sa relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chélif - Apport de la géostatistique et de la télédétection. Thèse Doct. D'Etat, ENSA 'ex. INA), p253.

- Douaoui A., Yahiaoui B. 2015. Combination of remote sensing and kriging to improve soil salinity mapping in the Hmadna plain (Algeria). *Toprak SU Dergis, Soil Water Journal. Special Issue*, 1-5.
- Douaoui A., Hartani T., Lakehal M. 2006). La salinisation dans la plaine du Bas-Cheliff : acquis et perspectives. *Economies d'eau en Systèmes IRigués au Maghreb. Deuxième atelier régional du projet Sirma, Marrakech, Maroc. ffcirad-00271021f*.
- Douaoui A, Gascuel-Oudou Ch., Walter Ch. 2004. Infiltrabilité et érodibilité de sols salinisés de la plaine du Bas Chélif (Algérie). Mesures au laboratoire sous simulation de pluie. *EGS 11 (4)*, 379-392.
- Iqbal F. 2011. Detection of Salt Affected Soil in Rice-Wheat Area Using Satellite Image," *African Journal of Agricultural Research*, Vol. 6, No. 21, pp. 4973-4982.
- Jianli, D. & Danlin, Y. (2014). Monitoring and evaluating spatial variability of soil salinity in dry and wetseasons in the Werigan–Kuqa Oasis, China, using remote sensing and electromagnetic induction instruments. 10.1016/j.geoderma.2014.07.028 *Geoderma* 235–236 : Matheron G., 1965. Les valeurs régionalisées et leurs estimation. Masson, Paris 305 p.
- Odeh I.O.A., Mc Bratney A.B., Chittle borough D.J., 1994. Spatial prediction of soil properties from land format tributes derived from a digital elevation model. *Geo derma* 63, 197-214.
- Qadir M., Oster J.D. 2004. Review Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmental-lysustainable agriculture. *Science of the Total Environment* 323, 1-19.
- Rengasamy P, Chittle borough D, Helyar K. (2003). Root zone constraints and plant-based solutions for dryland salinity. *Plant and Soil* 257: 249–260.
- Walter Ch., 1990. Estimation des propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle, *Cartographie pédologique et géostatistique dans le Sud de l'Ille et Vilaine (France)*. Thèse de doct. De l'université de Paris 6, 172 p.
- Walter Ch., Mc Bratney A. B., Douaoui A., Minasny B., 2001. Spatial prediction of topsoil salinity in the Cheliff valley, Algeria, using local ordinary kriging with local variograms versus whole-area variogram. *Aust. J. SoilRes.*, 39, 259-272.