



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa

/ / / / /

كلية علوم الطبيعة و الحياة و علوم الأرض

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre

قسم البيولوجيا

Département de Biologie

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

THÈSE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat 3^{ème} cycle LMD

Domaine: Sciences de la Nature et de la Vie

Filière: Sciences biologiques

Spécialité: Ecologie saharienne

**Qualité des eaux d'irrigation et salinisation des sols dans
une palmeraie dans la région de Ghardaïa – Cas de
Zelfana**

Soutenue publiquement le: 13/10/2021

Par

BENSLAMA Abderraouf

Devant le jury composé de:

BOURAS Nouredine	Professeur	Université de Ghardaïa	Président
KHANCHOUK Kamel	Professeur	Université de Annaba	Directeur de thèse
BENBRAHIM Fouzi	M.C.A	École Normale Supérieure de Ouargla	Co- directeur de thèse
KHENE Bachir	M.C.A	Université de Ghardaïa	Examineur
ALIOUA Youcef	M.C.A	Université de Ghardaïa	Examineur
NAVARRO-PEDREÑO Jose	Professeur	Université Miguel Hernandez Of Elche	Invité

Année universitaire: 2020 /2021

Remerciement

Au terme de ce travail, je voudrais tout d'abord adresser ma profonde gratitude et remerciement à mon cher Encadrant le Professeur *KAMEL Khanchoul*, je suis tellement reconnaissant par votre suivi, votre énorme soutien et confiance dont j'ai bénéficié pour mener ces travaux de recherche.

Je tiens à remercier également mon Co-encadrant le Docteur *FOUZI Benbrahim* pour votre précieuse information que vous m'avez apportée et qu'ils m'ont accordé avec intérêt et compréhension tout au long ces années.

Professeur *JOSE Navarro-Pedreño*, vous m'avez inculqué beaucoup de qualités humaines et un énorme soutien professionnel. Tout ce que vous avez fait signifie beaucoup pour moi. Merci également, pour votre patience, votre disponibilité et surtout vos conseils avisés qui resteront à jamais gravés dans ma mémoire.

Un grand remerciement à Monsieur *NOUREDDINE Bouras*, Professeur à l'université de Ghardaïa. De l'honneur d'accepter de présider le jury de ma soutenance.

J'adresse aussi mes sincères remerciements aux membres du jury : Monsieur *BACHIR Khene* Professeur à l'université de Ghardaïa, Monsieur *YOUCEF Alioua* Maître de conférence « A » à l'université de Ghardaïa. Qui ont accepté d'examiner, d'évaluer et enrichir mes travaux. Soyez assurés de ma plus profonde reconnaissance pour l'attention que vous avez portée à ce manuscrit et pour le temps que vous avez consacré à son évaluation.

Merci à Monsieur le Professeur *IGNACIO Gómez Lucas* directeur de laboratoire du « Department of Agrochemistry and Environment » pour m'avoir permis de réaliser mes travaux dans leur édifice.

Je suis profondément reconnaissant à une personne qui signifie beaucoup pour moi, qui a tant fait pour m'aider / m'encourager, en particulier dans mes moments de faiblesse, Merci *SANA Boubehziz*.

Permettez-moi aussi de remercier mon collègue et mon compagnon de recherche le doctorant *FAREDJ Chikhi* pour l'encouragement et l'appui qu'il m'a apporté.

Mes remerciements vont à tout le personnel que J'ai côtoyé durant mon stage au sein de l'Université de Miguel Hernandez : *MINERVA, SALMA, BELEN, ANA, VICKY et AIDA*, ..., (et j'en oublie forcément), auprès desquelles j'ai trouvé l'accueil chaleureux, l'aide et l'assistance dont j'ai besoin.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers tous mes amis et mes collègues qui de près ou de loin m'ont apporté leur support moral, physique et intellectuel : *SABRINE, IMANEN, AMEL, ABDALLAH, BACHIR, EL-ARBI, AMIR, HAMZA, FOUAD*... tout au long de ma démarche.

Je tiens aussi à remercier en particulier mes frères *ALLA, RACHID* et son épouse *MERIEM*, pour l'appui constant qu'ils m'ont accordé dans toute ma vie.

Et puisqu'il est de tradition de garder la meilleure pour la fin, j'adresse une mention spéciale à ceux qui m'ont fait preuve de patiences et de sacrifices, ceux qui y ont vécu et subits mes moments de doute et mes moments de joies et sans qui, ce travail n'aurait pu aboutir, mes

adorables parents *MOHAMED* et *HABIBA*, Une chose est sure, je n'aurais rien pu faire sans vous, MERCI infiniment et que *Dieu* vous protège.

TABLES DES MATIERES

ملخص

Abstract

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction

Chapitre 1: Synthèse bibliographique

1. La salinité définition	(5)
2. Origine de la salinité	(5)
3. Effet de la salinité sur la plante	(5)
4. La dynamique de la salinité	(6)
5. Causes de la salinité du sol	(7)
6. Dommages causés par la salinité du sol	(7)
7. Classification des sols affectés par le sel	(8)
7.1. Classification Américaine des sols salés (USDA 1954)	(8)
7.2. Classification des sols salés accordés par WRB (2006)	(9)
7.3. FAO-UNESCO Classification (FAO-UNESCO 1974)	(9)
8. Méthodes d'évaluation de la salinité des sols	(9)
8.1. Observation visuelle des cultures	(10)
8.2. Conductivité électrique des extraits de solution du sol	(10)
8.2.1. Extrait de la pâte saturée	(10)
8.2.2. Extrait dilué	(11)
8.3. Induction électromagnétique	(13)
8.4. La télédétection, Système d'Information Géographique, Image satellitaire	(15)
9. Géostatistiques	(17)
9.1. Krigeage ordinaire (KO).....	(18)
9.2. Interpolation inversée pondérée en fonction de la distance (IDW)	(18)
10. La qualité des eaux utilisées en irrigation	(19)
10.1. L'évaluation de la qualité des eaux d'irrigations	(20)
10.1.1. La salinité	(20)
10.1.1.1. Classification des eaux d'irrigation par la méthode de Wilcox	(21)

10.1.1.2. Classification des eaux d'irrigation par la méthode de Diagramme de Piper	(23)
10.1.1.3. Classification des eaux d'irrigation par la méthode de Diagramme de Schoeller Berkalo	(24)

Chapitre 2: Présentation de la région d'étude

Introduction	(25)
1. Choix du site	(25)
2. Situation géographique	(25)
3. La géologie	(27)
4. Hydrogéologie	(28)
4.1. Nappe du continental intercalaire	(28)
4.2. Nappe du complexe terminal	(29)
4.3. Nappe phréatique	(29)
5. Hydrographie	(29)
5.1. Réseau hydrographique	(29)
5.1.1. Le sous bassin versant d'oued M'Zab.....	(30)
5.1.2. Importance des ruissellements.....	(31)
6. La pédologie	(31)
7. Synthèse climatique et bioclimatique	(32)
7.1. Synthèse climatique	(32)
7.1.1. Le climat	(32)
7.1.2. La précipitation	(32)
7.1.3. La température	(32)
7.1.4. L'évaporation	(33)
7.1.5. Le vent	(33)
7.1.6. L'insolation	(33)
7.2. Synthèse climatique	(34)
7.2.1. Le diagramme ombrothermique	(34)
7.2.2. Climagramme D'Emberger	(34)
8. Exploitation des ressources hydriques	(35)
9. Productions agricoles	(36)
9.1. Le système de production phoénici	(36)

9.2. Le système de production d'arboriculture fruitière	(36)
9.3. Le système de production maraîchage	(36)
Conclusion	(37)

Chapitre 3 : Qualité de l'eau d'irrigation et la dynamique verticale et horizontale de la salinité des sols

1. Introduction	(38)
2. Matériel et méthodes	(40)
2.1. Zone d'étude	(40)
2.2. Échantillonnage et analyse du sol	(42)
2.3. Échantillonnage et analyse de l'eau	(43)
2.4. Analyse statistique	(44)
2.5. Cartographie à l'aide du krigeage ordinaire	(44)
3. Résultats et discussion	(46)
3.1. Qualité de l'eau d'irrigation	(46)
3.1.1. Analyse multivariée des propriétés d'eau	(47)
3.2. Texture du sol	(52)
3.3. Salinité du sol	(55)
4. Conclusion	(64)

Chapitre 4 : La répartition spatiale de la salinité/sodicité du sol en comparant deux méthodes géostatistique IDW/KO dans l'oasis de Zelfana

1. Introduction	(66)
2. Matériels et méthodes	(68)
2.1. Échantillonnage et analyse des sols	(68)
2.2. Caractéristiques de l'eau d'irrigation	(70)
2.3. Analyses statistiques	(70)
2.4. Cartographie prédictive	(70)
2.4.1. L'interpolation IDW	(71)
2.4.2. L'interpolation de krigeage ordinaire	(72)
2.5. Comparaison des méthodes	(73)
3. Résultats et discussion	(74)
3.1. Caractéristiques du sol	(74)
3.1.1. Salinité du sol	(74)
3.1.2. Distribution de la salinité du sol à l'aide de l'IDW et de l'interpolation KO.....	(76)

3.1.3. Comparaison IDW et KO	(84)
3.1.4. Classification de la salinité du sol	(87)
4. Conclusions	(89)
Conclusion générale	(91)
Références bibliographiques	(95)
Annexe	(116)

جودة مياه الري وملوحة التربة في واحة نخيل بمنطقة غرداية - حالة زلفانة

ملخص

تعتبر ملوحة التربة أخطر مشكلة اجتماعية - اقتصادية وبيئية في المناطق القاحلة وشبه القاحلة. الغرض من هذه الدراسة التي أجريت في واحة زلفانة هو (1) تقييم نوعية المياه المستخدمة في الري ، (2) تقدير ملوحة / صودية التربة ومراقبة الاختلافات المكانية والزمانية الأفقية منها و العمودية، (3) مقارنة بين طريقتين للاستشعار والإحصاءات الجغرافية (IDW - KO)، (4) تقديم اقتراحات لإدارة أفضل للنظام الزراعي للواحات. ولتحقيق هذه الأهداف ، تم جمع عينات من مياه الري والصرف الداخلة في هذه المنطقة وتحليلها. وكذلك أخذ عينات من التربة في فترتين مختلفتين (مايو، نوفمبر) على عمق (0 - 30 سم) و (30 - 60 سم). ويبين تحليل مياه الري في هذه الواحة (الذي يأتي من المياه الجوفية طبقة الألبان) أنه مقبول فقط لبساتين النخيل وغير جيد للمحاصيل الأخرى التي تعاني من مقاومة منخفضة للإجهاد الملحي. وقد زاد محتوى Na^+ ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} و الناقلية الكهربائية في مياه الصرف بنسبة كبيرة ، هذا يمكن من إثبات أن التربة لديها احتياطي كبير من هذه العناصر ، التي هي مسؤولة عن الملوحة. وتشير نتائج تحليل الخرائط في الاتجاه العامودي لديناميات الملح المتصلة بالتربة إلى وجود تراكم في الطبقة السفلى بسبب عمليات الارتشاح المرتبطة بالطبيعة الرملية للتربة ونظام الري الحوضي. بينما التوزيع المكاني الموسمي أظهر اختلافات قوية في حركة الأملاح ، مرتبطة باتجاه تدفق المياه ، والافتقار إلى صيانة نظام الصرف ، فضلاً عن تأثير التضاريس (وجود مناطق الركود). المتابعة و التقييم المتعلقةين بفعالية أفضل نموذج بين طريقتين للإحصاءات الجغرافية تم عن طريق حساب الخطأ المتوسط (ME) و جذر متوسط مربع الخطأ (RMSE) ، أظهرت هذه النتائج أن محصلة الخطأ المتوسط كانت مرضية بالنسبة لملوحة و صودية التربة، ولكن قيمة (RMSE) كانت أكثر مثالية باستخدام (IDW) مع كل الفترات. ونحن نفترض أن بعد مسافة العينات التي تحتل كامل منطقة التنبؤ يمكن أن تفسر دقة (IDW) في الاستيفاء المكاني لخصائص التربة. في الأخير يمكن تطبيق هذا البحث على دراسات أخرى عن العوامل التي تتحكم في ديناميات الملح في التربة الزراعية ، لا سيما في البيئة التي الصحراوية. وتجدر الإشارة إلى أن دراستنا لم تجر إلا على الأراضي الزراعية في الأراضي الجافة وينبغي توسيع نطاقها لتشمل مناطق أخرى مماثلة وواسعة النطاق.

الكلمات الدالة: الملوحة ، الصودية ، مياه الري ، والإحصاءات الجغرافية ، الناقلية الكهربائية ، نسبة امتصاص الصوديوم، الاختلافات المكانية والزمانية ، زلفانة.

Quality of irrigation water and soil salinization in a palm grove in the Ghardaïa region - Case of Zelfana

Abstract

Soil salinity is considered the most serious socio-economic and environmental problem in arid and semi-arid regions. This study was carried out at an oasis in Zelfana, aims to (1) assess the quality of water used for irrigation, (2) estimate soil salinity/sodicity and follow their spatio-temporal and vertical variations, (3) compare two geostatistical methods of IDW and OK interpolation, (4) provide suggestions for a better management of the oasis agricultural system. To achieve these objectives, samples of the irrigation and drainage water involved in this plot were collected and analyzed. Soil sample points were taken in two different periods (May, November) with two depths (0-30cm) and (30-60cm). The analysis of the irrigation water of the palm grove coming from the Albian water table, shows that it is admissible only for the palm orchards and poor for the other crops which hold a weak resistance to the saline stress. The content of Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} increased in the drainage water in the same proportion as the electrical conductivity, which may prove that the soil has a large reserve of these elements, responsible for salinity. The results of the mapping analysis in the vertical direction of soil-bound salt dynamics indicate a trend of accumulation at depth that can be explained by leaching processes associated with the sandy texture and flood irrigation system. However, the seasonal spatial distribution showed strong differences in salt movement, related to the direction of water flow, lack of maintenance of the drainage system and furthermore the influence of topography (presence of stagnation zones). The efficiency and best model between two geostatistical methods inverse distance weighting (IDW) and Ordinary Kriging (OK) were evaluated by calculating the mean error (ME) and root mean square error (RMSE). These results showing that the ME of both interpolation methods was satisfactory for soil salinity (EC) and sodicity (SAR), but the RMSE value was lower using IDW for both periods. This may explain the accuracy of the IDW interpolation method. This research could be applied to other studies on the factors controlling salt dynamics in agricultural soils, especially in an oasis environment. It should be noted that our study was only conducted on oasis farmland in dry areas and needs to be extended to other similar regions on a large scale.

Keywords: Salinity, Sodicity, Irrigation water, geostatistics, Electrical conductivity, SAR, Variation spatio-temporal, Zelfana.

Qualité des eaux d'irrigation et salinisation des sols dans une palmeraie dans la région de Ghardaïa – Cas de Zelfana

Résumé

La salinité du sol est considérée comme le plus grave problème environnemental et socio-économique dans les régions arides et semi-arides. Cette étude a été réalisée au niveau d'une oasis de Zelfana, a pour but (1) évaluer la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation, (2) estimer la salinité/sodicité du sol et suivre leurs variations spatio-temporelles verticales et horizontales, (3) comparer deux méthodes géostatistique d'interpolation IDW et KO, (4) fournir des suggestions pour une meilleure gestion du système agricole oasien.

Pour atteindre ces objectifs, des échantillons des eaux d'irrigations et de drainages impliqués dans cette parcelle ont été collectés et analysés. Des points d'échantillons de sol ont été prélevés dans deux périodes différentes (Mai, Novembre) à deux profondeurs (0-30cm) et (30-60cm).

L'analyse de l'eau d'irrigation de la palmeraie provenant de la nappe de l'Albien, montre qu'elle est admissible seulement pour les vergers de palmiers et médiocre pour les autres cultures qui tiennent une résistance faible au stress salin. La teneur en Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} a augmenté dans l'eau de drainage dans la même proportion que la conductivité électrique, ce qui peut prouver que le sol possède une grande réserve de ces éléments, responsables de la salinité.

Les résultats de l'analyse cartographique dans la direction verticale de la dynamique des sels liés au sol indiquent une tendance d'accumulation en profondeur qui s'explique par les processus de lixiviation associés à la texture sablonneuse et au système d'irrigation par inondation. Cependant, la distribution spatiale saisonnière a montré de fortes différences dans le mouvement des sels, liées à la direction de l'écoulement de l'eau, au manque d'entretien du réseau de drainage et en outre à l'influence de la topographie (présence de zones de stagnation).

L'efficacité et le meilleur modèle entre les deux méthodes géostatistiques la pondération inverse de la distance (IDW) et le Krigeage ordinaire (KO) ont été évalués en calculant l'erreur moyenne (ME) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE), ces résultats montrent que la ME des deux méthodes d'interpolation était satisfaisante pour la salinité du sol (CE) et pour la sodicité (SAR), mais la valeur RMSE était plus faible en utilisant l'IDW pour les deux périodes. Cela peut expliquer la précision de la méthode d'interpolation IDW. Cette recherche pourrait être appliquée à d'autres études sur les facteurs qui contrôlent la dynamique des sels dans les sols agricoles, en particulier dans un environnement oasien. Il convient de noter que notre étude n'a été menée que sur des terres agricoles oasiennes en zones sèches et qu'elle doit être étendue à d'autres régions similaires et à grande échelle.

Mots clés : Salinité, Sodicité, Eau d'irrigation, géostatistique, Conductivité électrique, SAR, Variations spatio-temporelles, Zelfana.

Liste des figures

Figure 1. Le Geonics EM38 MK2 : (a) mode vertical, (b) mode horizontal.....	(14)
Figure 2. Quatre capteurs à induction électromagnétique utilisés pour les investigations des sols.	(15)
Figure 3. Méthode de krigeage ordinaire (KO).....	(18)
Figure 4. Méthode de pondération inverse de la distance (IDW).	(19)
Figure 5. Diagramme de RIVERSIDE selon Richards.	(21)
Figure 6. Le diagramme vierge de Wilcox.	(22)
Figure 7. Le diagramme de Piper.	(23)
Figure 8. Le diagramme vierge de Schoeller Berkalov.....	(24)
Figure 9. Carte de la situation géographique de la région d'étude.	(26)
Figure 10. Carte géologique de la région de Ghardaïa (source de la carte : Djili B, 2018 ; modifié).....	(28)
Figure 11 : Carte du réseau hydrographique de la région de Ghardaïa (source de la carte : Djili B, 2018 ; modifié).	(30)
Figure 12. Diagramme Ombrothermique de la station de Ghardaïa (1990-2016).	(34)
Figure 13. Climagramme d'Emberger pour la région de Ghardaïa.	(35)
Figure 14. Localisation de la zone d'étude de Zelfana (Algérie) et position des échantillons de sol dans les vergers	(41)
Figure 15. Distribution de l'eau d'irrigation et drainage dans la zone d'étude, Les points d'échantillonnage d'eau irriguée et drainée sont indiqués.....	(43)
Figure 16. Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation/drainages (Diagramme de WILCOX).	(48)
Figure 17. Classification des eaux d'irrigation/drainage sur le diagramme de Riverside	(49)
Figure 18. Diagramme de Piper appliqué aux eaux d'irrigation et de drainage.	(50)
Figure 19. Diagrammes de Schoeller Berkaloff.	(52)
Figure 20. Triangle texturale des deux couches du sol : (A) A1 : 0-30cm ; (B) A2 : 30-60cm.....	(54)
Figure 21. Cartes des différences de salinité du sol (Δ) en utilisant KO : Dans le même profil : Mai (a) $\Delta(M1-M2)$, Novembre (b) $\Delta(N1-N2)$; Dans la même profondeur mais dans les deux périodes Mai-Novembre : (c) $\Delta(M1-N1)$, (d) $\Delta(M2-N2)$	(59)
Figure 22. Carte de la répartition des plantes (Novembre 2018).	(63)

Figure 23. Position des échantillons de sol dans les vergers.....	(69)
Figure 24. Le variogramme exponentiel expérimental de: (a) la conductivité électrique du sol en mai, (b) la conductivité électrique du sol en novembre, (c) le taux d'adsorption du sodium en mai et (d) le taux d'adsorption du sodium en novembre.	(77)
Figure 25. Cartes de distribution de la CE du sol (a, b) et du taux d'adsorption du sodium SAR (c, d) en utilisant la pondération de distance inverse (IDW) en mai (M) et novembre (N) respectivement.	(79)
Figure 26. Cartes de distribution de la salinité du sol (a, b) et SAR (c, d) par krigeage ordinaire (KO) en mai (M) et novembre (N) respectivement	(82)
Figure 27. Classification des sols (points d'échantillonnage) selon (Abegunrin et al, 2013)	(88)

Liste des tableaux

Tableau 1. Classification du sol	(8)
Tableau 2. Facteur de conversion pour la dérivation de l'ECe à partir de la CE d'extraits de différentes suspensions de sol : rapport eau	(11)
Tableau 3. Classification des eaux selon la conductivité électrique à 25°C. (Source Durand, 1982)	(20)
Tableau 4. Données climatiques de la zone d'étude de 1990 à 2016 (O.N.M., 2018)	(32)
Tableau 5. Tableau des indicateurs de dépendance spatiale.	(45)
Tableau 6. Statistiques descriptives de l'analyse de l'eau.	(46)
Tableau 7. Coefficients de corrélation (r de Pearson) entre 11 paramètres. Eau d'irrigation / drainage.	(47)
Tableau 8. Valeurs statistiques des propriétés physiques du sol.	(53)
Tableau 9. Statistiques descriptives de la conductivité électrique (ds/m) du sol.	(55)
Tableau 10. Paramètres du semi-variogramme et erreurs de prévision du Profil $\Delta(M1-M2)$, $\Delta(N1-N2)$; Période $\Delta(M1-N1)$, $\Delta(M2-N2)$. RMSE: Root mean squared error. ME: Mean error.	(57)
Tableau 11. Valeur moyenne des caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'irrigation / drainage.	(70)
Tableau 12. Valeurs moyennes et statistiques des propriétés du sol au cours des deux périodes d'échantillonnage: Mai et Novembre.	(74)
Tableau 13. Classification des sols en fonction de la classification de conductivité électrique (CE) fournie par Duran (1983) et du pourcentage de ceux-ci associé aux classes de salinité (Mai et Novembre).	(75)
Tableau 14. Statistiques descriptives après transformation logarithmique.	(76)
Tableau 15. Paramètres du modèle de variogramme optimisé.	(77)
Tableau 16. ME et RMSE obtenus pour les interpolations IDW et KO.	(84)
Tableau 17. Classification du sol en fonction de la CE, du pH et du SAR (Abegunrin et al, 2013).	(87)

Liste des abréviations

A 1: Horizon 1

A 2: Horizon 2

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

CE_{1:5} : Conductivité électrique de l'extrait aqueux sol/eau : 1/5

CE_{1:1} : Conductivité électrique de l'extrait aqueux sol/eau : 1/1

CE_{1:2.5} : Conductivité électrique de l'extrait aqueux sol/eau : 1/2.5

CEa : Conductivité Electrique apparent

CEe : Conductivité électrique de l'extrait de pate saturée

EDTA : Ethylène Diamine Tétra Acétique (C₁₀H₁₆N₂O₈)

EMI : Electromagnetic Induction

IDW : Inverse Distance Weighted

M 1: Mai Horizon 1

M 2: Mai Horizon 2

ME : Mean Error

N 1: Novembre Horizon 1

N 2: Novembre Horizon 2

KO: Krigeage ordinaire

ONM : Office National de Météorologie

RMSE : Erreur quadratique moyenne

SAR : Sodium Adsorption Radio

USDA : Département de l'agriculture des États-Unis

WRB : Base de référence mondiale pour les ressources en sols

Δ : Delta



INTRODUCTION GENERALE

*« Alors que la plupart des gens rêvent au succès, les gagnants sont bien réveillés
et travaillent dur pour y arriver »*

N.H. Kleinbaum

Introduction générale

Le sol est une ressource non renouvelable ; une fois perdu, il ne peut être récupéré au cours d'une vie humaine. De même, la salinité du sol, deuxième cause de dégradation des terres après l'érosion et qui conduit à la désertification.

D'abord, c'est un problème mondial majeur en raison de ses effets néfastes sur les terres fertiles et productives (Metternicht & Zinck, 2003 ; Jones et al., 2011 ; Butcher et al., 2016), éliminant ainsi la biodiversité végétale et affecte les fonctions écologiques du sol (Daliakopoulos et al., 2016).

De plus, la prévalence de la salinité des sols peut nuire à la productivité agricole locale et menacer davantage l'approvisionnement alimentaire mondial et les bénéfices agricoles (Qadir et al., 2014).

Ainsi, Bridges & Oldeman (1999) estiment qu'à l'échelle mondiale, chaque minute, une superficie de 3 ha de terres arables devient improductive en raison de la salinisation secondaire, ce qui conduit chaque année entre 10 et 20 millions d'hectares de terres irriguées à une productivité nulle.

Par ailleurs, les problèmes de salinité se posent dans toutes les conditions climatiques et peut résulter d'actions tant naturelles qu'induites par l'homme. D'une manière générale, les sols salins se trouvent dans les régions arides et semi-arides où les précipitations sont insuffisantes pour répondre aux besoins des cultures en eau, et lessiver les sels minéraux surtout dans la zone racinaire. Notamment, la salinisation secondaire (c'est-à-dire la salinisation des sols due aux activités humaines telles que l'agriculture irriguée) est principalement localisée dans les régions arides et semi-arides, par exemple la Chine, le Chili, l'Argentine, l'Espagne, l'Égypte, la Tunisie et l'Algérie.

En effet, la dynamique s'étend à l'échelle mondiale dans plus de 100 pays, ces sols salins occupaient plus de 20 % de la surface irriguée mondiale au milieu des années 1990 (Ghassemi et al., 1995). Effectivement, la salinité du sol est dynamique avec une large variation verticale, horizontale et temporelle. Beaucoup considèrent que la salinité du sol est une caractéristique uniforme dans un profil de sol.

D'après Boivin et al. (1989) les variations spatiotemporelles du phénomène de salinisation des sols, sont accélérées sous irrigation en raison de la forte mobilité des sels particulièrement des chlorures, et les systèmes agricoles sont déjà menacés.

Dans ces conditions, une mesure efficace de la salinité permettra d'identifier l'emplacement et l'étendue de la salinité de la zone racinaire et de s'assurer que la salinité de la zone racinaire est maintenue en dessous du niveau seuil pour chaque culture.

En Algérie, les sols salés occupent de grandes étendues (Halitim, 1985). Selon Le Houerou (1993), les sols salés occupent de vastes superficies (3.2 millions d'hectares de la superficie totale). Près de 10-15 % de terres irriguées, sont concernées par ces problèmes.

En effet, les régions sahariennes d'Algérie s'étalent sur près de deux millions de kilomètres carrés. Elles se caractérisent par un climat aride et chaud durant la majeure partie de l'année qui ne permet l'installation d'aucune culture sans le recours à l'irrigation.

Des chercheurs commençaient déjà à s'intéresser au phénomène dans les années 60 (Aubert, 1960), Simonneau & Aubert (1963) avaient décrit la salinité au Sahara d'Algérie et du Sud tunisien et ont observé le développement de cultures irriguées avec des eaux fortement minéralisées.

Etant donné, dans un système endoréique, la non-maîtrise de l'irrigation conjuguée à un environnement peu propice et à l'inexistence d'un drainage naturel de la nappe, provoque une dégradation insidieuse et rapide de l'écosystème oasien.

De sorte que, les oasis désignent à l'échelle mondiale des entités géographiques remarquables caractérisées par des zones fortement végétalisées entourées de vastes surfaces arides ou de déserts. L'existence locale de ressources permanentes en eau et la mise en place de systèmes d'irrigation assurant également l'alimentation hydrique des plantes, car ils sont les conditions essentielles qui assurent leur pérennité (Pan & Chao, 2003).

Le problème en de nombreuses oasis est aujourd'hui celui d'un excès d'eau ou plutôt d'une mauvaise maîtrise d'une eau devenue plus abondante (Côte, 1998).

Un projet « Oasis 2000 » initié en 1986 au Sud d'Algérie (Dubost, 1992) avait de prime abord cartographié la salinité des périmètres destinés à être remis en valeur. Ces études ont toutes montré une extension et une progression de la salinité et de la sodicité et par conséquent une diminution des rendements laissant ainsi ces périmètres à un stade de dégradation avancé.

Puisque dans de nombreux travaux ont été menés pour évaluer leurs sols et caractériser la variabilité spatiale de la salinité au niveau Moyen-Orient (Hussein, 2001; Shahid et al., 2010) et l'Australie (Oldeman et al., 1991), en Chine (Yang et al., 2020) et partout dans le monde, ces programmes de cartographie de la salinité ont aidé les décideurs politiques à prendre des mesures nécessaires et opportunes pour s'attaquer au problème de la salinité accrue des sols. Des programmes similaires souhaitables contribueront à éviter une nouvelle propagation efficace de la salinité des sols à de nouvelles régions au Sud d'Algérie et, ils permettront d'éviter les effets négatifs sur les économies nationales en dégradant les ressources en sols d'un pays.

Dans ces conditions, il est très important de comprendre le risque de salinité, tant dans l'espace que dans le temps, au niveau des exploitations agricoles régionales et nationales. Autant

dire une évaluation précise de la salinité des sols est nécessaire pour créer des stratégies efficaces de gestion agricole et de distribution rationnelle de l'eau d'irrigation.

Par conséquent, la compréhension de la distribution spatiale de la salinité du sol peut contribuer à la fois à la conservation d'une meilleure santé écologique et à l'utilisation des ressources limitées en sol et en eau pour réduire la pression de ces problèmes, offrant à toutes les parties prenantes pour aider à guider les pratiques de drainage et d'irrigation et à maintenir un développement agricole oasien durable.

Le développement scientifique et technique, très significatif lors de récentes décennies, a élargi les moyens techniques et les possibilités de lutte contre la salinisation. En effet, la télédétection, les systèmes d'information géographique, ou encore les méthodes instrumentales modernes, pouvaient fournir un outil puissant pour prédire, évaluer, surveiller, gérer et cartographier les propriétés pédologiques telles que la salinité (Hasab et al., 2020).

Par ailleurs, la géostatistique est considérée comme une méthode efficace pour l'interpolation des données. De ce fait, l'analyse spatiale permet de détecter, surveiller et cartographier leurs variations spatio-temporelles des zones vulnérables ou affectées par le sel (Ben-Dor et al., 2002).

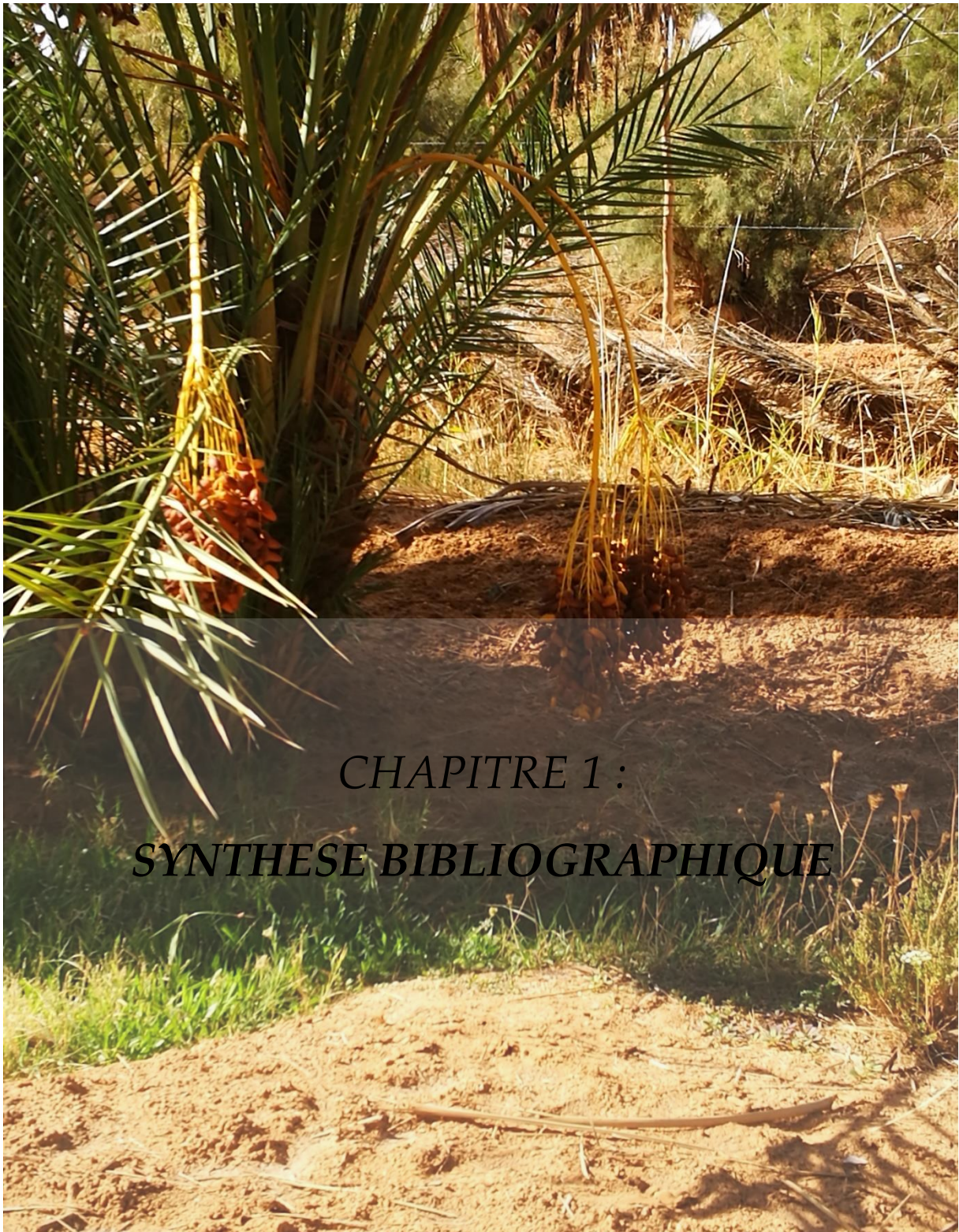
C'est dans cette logique que s'inscrit notre recherche, qui portera d'une part l'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation et de drainage et d'autre part vise à évaluer, cartographier, surveiller et prédire la salinité du sol d'une façon verticale et horizontale au sein d'une oasis, cas de Zelfana W. Ghardaïa.

Pour cela nous avons adopté cette démarche qui consiste à :

- Le premier chapitre : une synthèse bibliographique des notions de la salinité des sols, ses causes et conséquences pour l'agriculture, les différentes manières de suivis et aussi les différents types de classification des eaux d'irrigations.
- Le deuxième chapitre : une description géologique, hydrogéologique, pédologique, climatique et les systèmes de production agricoles de la régions d'étude.
- Le troisième chapitre : une évaluation des propriétés chimiques de l'eau impliquées dans ce système oasien et un suivi de la dynamique verticale et horizontale de la salinité des sols, en identifiant les facteurs responsables qui influent sur cette dynamique.

- Le quatrième chapitre : une quantification de la répartition spatiale et temporelles de la salinité/sodicité du sol en comparant deux méthodes géostatistique d'interpolation La pondération de distance inverse (IDW) et le krigeage ordinaire (KO) dans une parcelle irriguée (l'oasis de Zelfana).

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale qui met en valeur l'essentiel des résultats obtenus et dans laquelle nous proposons des perspectives et recommandations d'entreprendre pour une durabilité des systèmes agricoles aux générations futures.



CHAPITRE 1 :
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

« La nature parle, mais l'homme ne l'écoute pas »

Victor Hugo

1. La salinité définition

La salinité du sol est dû à la concentration totale de sel soluble dans le sol ou précisément dans sa phase liquide (aqueuse) du sol, y compris les espèces chargées (par exemple, Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{-2} et CO_3^{-2}), des solutés non ioniques et des ions qui se combinent pour former des paires d'ions (Corwin, 2003).

La salinisation des sols est un facteur majeur qui contribue à la dégradation et la perte de productivité des sols cultivés. L'estimation de l'évolution de la superficie des sols salés est vraiment difficile, particulièrement dans les sols irrigués. Environ 20 % des terres mondiales (45 millions d'hectares) des terres irriguées sont touchées par le sel (Shrivastava & Kumar, 2015).

2. Origine de la salinité

L'origine des sels dans le sol peut être naturelle ou anthropique :

La première désignant la salinisation primaire ou naturelle due à l'altération géochimique des roches des couches supérieures de la terre, la montée des eaux souterraines dans la topographie basse des aquifères salins, l'intrusion d'eau de mer et d'autres sources naturelles.

La salinisation primaire s'effectue aussi au niveau du périmètre et surtout dans les zones les plus basses grâce à la présence d'une nappe phréatique plus au moins superficielle et salée (entre 1,5 et 2m) et en l'absence d'un réseau de drainage efficace qui, sous l'influence de l'évaporation en période sèche, favorise la remontée des sels et leur accumulation dans la zone racinaire (Energoproject, 1967).

La seconde désignant la salinisation secondaire ou anthropiques ou l'action provoqué par l'homme, comprennent les sels présents dans les eaux d'irrigation, surtout dans les zones qui considère l'eau souterraine comme la principale source d'irrigation, les sels résiduels d'amendements ajoutés au sol et à l'eau, les déchets animaux, les engrais chimiques et les boues d'épuration et les effluents appliqués (Tanji, 2002). Ce phénomène augmente et multiplie lorsque le système de drainage est négligé ou abandonné et la quantité des d'eaux des pluies ne suffit pas pour lessiver les sels (Marlet & Ruelle, 2003).

3. Effet de la salinité sur la plante

1. La salinité est l'un des facteurs environnementaux les plus importants limitant la production agricole dans beaucoup de région du monde (Chinnusamy et al, 2005).

Ce milieu salin est l'un des plus graves facteurs qui provoque de nombreux effets néfastes sur la croissance des plantes, D'après (Netondo et al., 2004) la salinité affecte affliger la plante par une réduction foliaire par conséquent diminue le taux de la photosynthèse C-à-dire diminue la chlorophylle et de la conductance stomatique et de l'efficacité du photosystème II.

2. De nombreuses études ont été effectuées sur les réponses des cultures vis-à-vis de l'environnement salin (Maas & Hoffman, 1977).

3. La salinité de la solution du sol, qu'elle soit due au sel naturellement présent dans le sol ou au sel apporté par l'eau d'irrigation provoque un retard de la croissance par la réduction de la quantité d'eau disponible pour la culture (effet osmose entre la solution du sol et la plante) (Chinnusamy et al, 2005).

Pour atteindre un même potentiel total, la quantité d'eau à apporter est d'autant plus grande que le potentiel osmotique est élevée (Daoud & Halitim, 1994)

Les sels sont des éléments nutritifs pour les plantes, le problème c'est que le niveau élevé de ces sels dans le sol appelé stress salin (Munns, 2005), ce problème affecte un déséquilibre des éléments nutritifs de la plante ou dérégler avec l'absorption de certains éléments nutritifs (Blaylock, 1994). Ce phénomène est lié aux pratiques agricoles telles que l'irrigation (Zhu, 2001).

4. La dynamique de la salinité

La salinité du sol est une propriété dynamique du sol, qui apparaitre surtout sur les sols des zones arides où les températures sont élevées et les précipitations sont rares et insuffisantes pour lessiver les sels et aussi l'absence du système de drainage adéquat et / ou les nappes phréatiques peu profondes existent, ces sels dissous dans le profil du sol sont mobiles en raison de la diffusion et des processus de dispersion par conversion.

Dans ces zones arides où les précipitations sont inférieures à l'évaporation, les sels migrent vers surface du sol surtout en présence d'une nappe phréatique peut profonde entre 1 à 1.5 m et favorisé par la nature sur sol.

Le déplacement des sels en surface du sol est suite à un écoulement ascendant de l'eau en raison de la remontée capillaire favorisée par le processus d'évaporation. Cependant la cause la plus fréquente de l'accumulation de sels est l'évapotranspiration ET par les plantes, qui se reflète par l'augmentation de la concentration de sel en profondeur et exactement entre la zone racinaire et sous la zone racinaire.

Le niveau d'accumulation de sel à l'intérieur et au-dessous de la zone racinaire en raison de l'ET dépend de la fraction d'irrigation et / ou des précipitations qui s'écoule au-delà de la

zone racinaire, appelée fraction de lessivage. Au fur et à mesure que la fraction de lessivage augmente, les sels totaux dans la zone racinaire diminuent en raison de leur élimination de la zone racinaire par lessivage. Un troisième processus est la formation de suintements salins, qui se forment généralement à partir de variations topographiques.

Il est difficile de surveiller, mesurer et cartographier la variation spatiale de la salinité du sol en raison de leur nature temporelle et spatiale complexe. Pour faire un bon suivi de la salinité du sol à l'échelle du champ ou à une échelle régionale, des techniques de mesure fiables sont nécessaires qui se basent sur de nombreuses mesures rapides, précises et géo-référencées.

Les cartes de la distribution de la salinité des sols sont des outils qui aident les producteurs et les décideurs dans la gestion de la salinité et d'évaluer les zones à risque de salinité et leur impact.

5. Causes de la salinité du sol

Les causes de sels dans les sols sont nombreuses et de sources différentes ; ici on va énumérer ces principales sources :

Salinité suite à l'altération des roches et de matériau d'origine.

- Qualité des eaux d'irrigation.
- Drainage restreint et niveau de nappe phréatique élevé (nappe phréatique superficielle).
- Température extrême et évaporation/ transpiration des espèces végétales.
- Les sels transportés par le vent donnant des champs salins.
- La mauvaise utilisation des engrais (fumiers chimique et de ferme).
- Irrigation excessive des champs agricoles.

6. Dommages causés par la salinité du sol

La salinité du sol pourrait endommager plusieurs aspects écosystémiques tel que :

- Perturbation des écosystèmes et perte de Biodiversité
- Baisse des rendements des cultures
- Abandon ou désertification de terres agricoles auparavant productives
- Un nombre croissant de plantes mortes et mourantes
- Risque accru d'érosion des sols en raison de la perte de végétation
- Contamination de l'eau potable
- Les routes et les fondations des bâtiments sont affaiblies par une accumulation de sels dans la structure naturelle du sol

- Diminution de l'activité biologique du sol en raison de l'élévation de la nappe saline

7. Classification des sols affectés par le sel

Les sols salinisés peuvent contenir un excès de sels solubles dans l'eau (les sols salins), de sodium échangeable (les sols sodiques) ou des deux (les sols salins-sodiques). Leurs caractéristiques physiques et chimiques diffèrent avec le type de sols

Les sols qui contiennent un excès de sels solubles dans l'eau en quantités surtout dans la zone racinaire sont des sols salins, et les sols qui contiennent de sodium échangeable sont des sols sodiques ou les sols qui contiennent les deux des sols salins-sodiques. Cependant, la salinité de sol classé par :

7.1. Classification Américaine des sols salés USDA (1954)

Cette classification considère que la salinité correspond à un caractère subordonné pouvant apparaître dans différents ordres. Il faut donc s'intéresser aux horizons diagnostiques.

Les sols salins sont définis comme les sols dont le pH est généralement inférieur à 8,5, $EC \geq 4 \text{ dS m}^{-1}$ et le pourcentage de sodium échangeable $ESP < 15$.

Les sols salins-sodiques incluent assez de sels solubles $EC \geq 4 \text{ dS m}^{-1}$ avec un pH inférieurs ou supérieurs à 8.5 et un $ESP \geq 15$. Cette classe affecte les propriétés du sol et la croissance des plantes, principalement par la dégradation de la structure du sol.

Les sodiques présentent des sels solubles élevés un $EC < 4 \text{ dS m}^{-1}$ et le pH varient généralement entre 8,5 et 10 et peuvent même être aussi élevés que 11. La faible EC et la forte ESP ont tendance à défloculer les agrégats du sol et par conséquent à réduire leur perméabilité à l'eau. Le tableau résume :

Tableau 1. Classification du sol d'après le USDA (1954)

Classe de sol	EC (dS m^{-1})	ESP	pH
Saline	≥ 4	< 15	$< 8,5$
Saline-sodique	≥ 4	≥ 15	$\geq 8,5$
Sodique	< 4	≥ 15	$> 8,5$

7.2. Classification des sols salés accordés par WRB (2006)

Le terme salsodique, proposé antérieurement par Servant regroupe les sols salés et les sols sodiques. Ce terme a été retenu par le RP (Référentiel pédologique) mais pas par le WRB (Word référence base) qui n'a pas de terminologie génétique et distingue directement Solonchak et Solonetz.

7.3. Classification des sols salés accordés par FAO-UNESCO (1974)

Les sols affectés par le sel (sols halomorphes) sont également indiqués sur la carte des sols du monde (1:5.000.000) par la FAO-UNESCO (1974) sous les noms de solonchaks et solonetz (noms russes).

Les solonchaks sont des sols à forte salinité ($EC_e > 15 \text{ dS m}^{-1}$) situés à moins de 125 cm du sol surface. La FAO-UNESCO (1974) a divisé les solonchaks en quatre unités cartographiques :

- Solonchaks orthiques - les solonchaks les plus courants
 - Solonchaks gleyiques - avec des eaux souterraines en fluence dans les 50 cm supérieurs
 - Takyric solonchaks - solonchaks dans les sols argileux fissurés
 - Mollic solonchaks - solonchaks couche superficielle de couleur foncée, souvent riche en matières organiques
- Les sols dont l' EC_e est comprise entre 4 et 15 dS m^{-1} sont cartographiés comme "phase saline" d'autres unités.

La FAO-UNESCO (1974) a divisé solonetz ($>15 \text{ ESP}$) en trois unités cartographiques unités :

- Solonetz orthique - le solonetz le plus courant
- Solonetz gleyique - eaux souterraines en fluence dans les 50 cm supérieurs
- Mollic solonetz - couche superficielle de couleur sombre, souvent riche en matière organique.

8. Méthodes d'évaluation de la salinité des sols

Plusieurs méthodes ont été développées pour déterminer et évaluer la salinité du sol à l'échelle du champ, par (1) des observations visuelles des cultures, (2) au laboratoire, par des méthodes conventionnelles qui à prélever des échantillons de quelques centaines de grammes à différentes profondeurs (Richards, 1954), (3) par des instruments électromagnétiques (McNeil, 1980) et (4) par le traitement des images satellitaires.

8.1. Observation visuelle des cultures

Une fois que la salinité du sol se développe l'observation visuelle des effets sur les propriétés du sol et la croissance des cultures se fait d'une manière rapide et économique mais elle présente l'inconvénient que la salinité est détecté après que les cultures ont été endommagées, comprennent :

- Une croûte de sel blanc
- La surface du sol présente un aspect pelucheux
- Réduction ou absence de germination des semences
- Etablissement de cultures en parcelles
- Réduction de la vigueur des plantes
- Dommage au feuillage - brûlure des feuilles
- Des changements marqués de la couleur et de la forme des feuilles se produisent
- Les végétaux sont soit morts, soit en train de mourir
- La zone touchée s'aggrave après une chute de pluie

C'est la méthode là moins souhaitable car les rendements des cultures sont réduits pour obtenir des informations sur la salinité des sols.

8.2. Conductivité électrique des extraits de solution du sol

La détermination de la salinité par la mesure de la conductivité électrique est bien établie depuis des décennies (Bohn et al., 1979). C'est la façon de faire passer un courant électrique entre deux électrodes de géométrie dans une solution de sol exprimée en siemens par mètre, S.m-1. Lorsque la conductivité électrique est élevée la solution contient une quantité importante des ions et vice versa lorsque la conductivité électrique est faible ne favorise pas le transport du courant c'est-à-dire que la solution contient une quantité faible des ions.

Pour cela deux méthodes sont utilisées :

8.2.1. Extrait de la pâte saturée

Cette méthode recommandée par (US Salinity Laboratory Staff ; Richards, 1954) dépendant fortement de la texture du sol notamment de sa capacité de rétention.

La difficulté de cette méthode est d'amener l'échantillons à saturation, c'est-à-dire vise à s'approcher de sa limite de liquidité (Servant, 1970 cité par Baize, 1988), Et aussi permet de se rapprocher d'une réalité agronomique, l'humidité étant, à proximité de la capacité de rétention, la plus efficiente pour la plante (Le Brusq et al., 1982).

Cependant, cette méthode peu difficile et très longue à mettre en œuvre, et l'extraction de la solution parfois impossible de le faire surtout dans des sols sableux. Pour cela les chercheurs préfèrent souvent les extraits non saturés.

8.2.2. Extrait dilué

La méthode des extraits de saturation reste une technique la plus courante pour évaluer la salinité des sols, elle consiste à mélanger l'échantillons de sol avec une quantité d'eau suffisante pour faire des extractions aqueuses de rapports sol/eau fixe, par exemple (1/1, 1/2, 1/5 ou 1/10), ces rapports restant constant quel que soit la texture du sol, et ils n'ont pas toujours proportionnelle au volume d'eau mais qui varie pratiquement en fonction de différents facteurs, tel que la texture du sol, la teneur en argile, la capacité d'échange cationique et le niveau de salinité (Pansu & Gautheyrou, 2002).

Contrairement aux extrait de pate saturée, cette méthode facile à réaliser et permet d'extraire un maximum de sels, parallèlement elle permet de faire un grand nombre d'analyses de sol en même temps.

D'autre part, Les valeurs de la CE obtenues pour différents extraits de rapport sol/eau peuvent ensuite être corrélées à la CE de l'extrait de saturation du sol (ECe) (Shahid 2013; Sonmez et al., 2008).

Les valeurs de la CE obtenues pour différents extraits de rapport sol/eau peuvent ensuite être corrélées à la CE de l'extrait de saturation du sol (ECe) pour être utilisée de manière fiable dans le but de suivre la distribution de la salinité du sol et de faire le choix et la sélection des cultures appropriées. Des facteurs de conversion appropriés peuvent être utilisés en fonction du type de sol (Tableau2).

Tableau 2. Facteur de conversion pour la dérivation de l'ECe à partir de la CE d'extraits de différentes suspensions de sol : rapport eau

Relationship	References
ECe versus EC1:1	
$ECe = EC1:1 \times 3.03$	Al-Moustafa & Al-Omran (1990) – Saudi Arabia
$ECe = EC1:1 \times 3.35$	Shahid (2013) – UAE (sandy soil)
$ECe = EC1:1 \times 3.00$	EAD (2009) – Abu Dhabi Emirate (sol sableux)

$ECe = EC1:1 \times 1.80$	EAD (2012) – Northern Emirates (UAE)
$ECe = EC1:1 \times 2.06$	Akramkhanov et al. (2008) – Uzbekistan
$ECe = EC1:1 \times 2.20$	Landon (1984) – Australia
$ECe = EC1:1 \times 1.79$	Zheng et al. (2005) – Oklahoma (USA)
$ECe = EC1:1 \times 1.56$	Hogg & Henry (1984) – Saskatchewan, Canada
$ECe = EC1:1 \times 2.7$	USSL Staff (1954) – USA
$ECe = EC1:1 \times 2.42$	Sonmez et al. (2008) – Turkey (sol sableux)
$ECe = EC1:1 \times 1.96$	Sonmez et al. (2008) – Turkey (sol argileux)
$ECe = EC1:1 \times 2.06$	Sonmez et al. (2008) – Turkey (sol limoneux)

ECe versus EC1:2.5	
$ECe = EC1:2.5 \times 4.77$	Shahid (2013) – UAE (sol sableux)
$ECe = EC1:2.5 \times 4.41$	Sonmez et al. (2008) – Turkey (sol sableux)
$ECe = EC1:2.5 \times 3.96$	Sonmez et al. (2008) – Turkey (sol limoneux)
$ECe = EC1:2.5 \times 3.75$	Sonmez et al. (2008) – Turkey (sol argileux)

ECe versus EC1:5	
$ECe = EC1:5 \times 7.31$	Shahid (2013) – UAE (sol sableux)
$ECe = EC1:5 \times 7.98$	Sonmez et al. (2008) – Turkey (sol sableux)
$ECe = EC1:5 \times 7.62$	Sonmez et al. (2008) – Turkey (sol limoneux)

$ECe = EC_{1:5} \times 7.19$	Sonmez et al. (2008) – Turkey (sol argileux)
$ECe = EC_{1:5} \times 6.92$	Alavipanah & Zehtabian (2002) – Iran (top soil)
$ECe = EC_{1:5} \times 8.79$	Alavipanah & Zehtabian (2002) – Iran (whole profile)
$ECe = EC_{1:5} \times 9.57$	Al-Moustafa & Al-Omran (1990) – Saudi Arabia
$ECe = EC_{1:5} \times 6.40$	Landon (1984) – Australia
$ECe = EC_{1:5} \times 6.30$	Triantafilis et al. (2000) – Australia
$ECe = EC_{1:5} \times 5.6$	Shirokova et al. (2000) – Uzbekistan

8.3. Induction électromagnétique

L'évaluation et la gestion de la salinité au niveau de l'exploitation doivent aider les agriculteurs à améliorer la productivité des cultures. L'échantillonnage classique sur le terrain suivi d'une analyse au laboratoire est un processus fastidieux, coûteux et long. Il existe d'autres méthodes modernes qui peuvent être utilisées rapidement et efficacement pour la cartographie de la salinité sur terrain ou pour suivre leur dynamique spatio-temporelle (Pansu & Gautheyrou, 2002), par exemple, l'induction électromagnétique (EMI) en utilisant l'EM38. L'EM38 est l'instrument le plus souvent utilisé dans les enquêtes agricoles, et donne une évaluation rapide et non destructives avec précision de la conductivité électrique apparente à différentes profondeurs du sol (ECa), exprimée en mS/m (Triantafilis et al., 2001).

Le Geonics EM38 produit un champ magnétique primaire dans une bobine d'émission EM située à une extrémité de l'instrument induit des boucles circulaires de courant de Foucault dans le sol (Figure 1). Les boucles de courant génèrent créent un champ magnétique secondaire. Ce champ magnétique induit est superposé au premier champ magnétique et qui est proportionnel à la valeur du courant circulant dans la boucle (Corwin & Lesch, 2003 ; Nogues et al., 2006).

L'EM38 possède une bobine d'émission et une bobine de réception. La bobine émettrice induit un courant électrique dans le sol et la bobine réceptrice enregistre le signal électromagnétique qui en résulte champ. L'EM38 permet une profondeur maximale de 150 cm

ou 75 cm dans les modes dipôle vertical et horizontal respectivement (Corwin & Lesch, 2005) (Figure 1).



Figure 1. Le Geonics EM38 : (a) mode vertical, (b) mode horizontal.

La cartographie de la Conductivité électrique utilisant l'EMI est l'un des outils de mesure de la salinité le plus simple et les moins coûteux. Cette méthode est également plus sensible aux changements de salinité, et peut être réalisée à tout moment de l'année. L'intégration des informations SIG avec les données de salinité permet d'obtenir des cartes de salinité qui peuvent aider les agriculteurs à interpréter les variations de rendement des cultures, et à fournir une meilleure compréhension de la différence de la salinité entre les champs agricoles. Ces cartes de salinité peuvent permettre aux agriculteurs de développer des zones de gestion plus précises et d'obtenir à terme des rendements plus élevés.

Un nombre croissant de capteurs à induction électromagnétique sont disponibles. Les capteurs à induction électromagnétique couramment utilisés dans l'agriculture et les enquêtes du sol sont le DUALEM-1 et DUALEM-2 (Dualem, Inc., Milton, Ontario), le EM31, le EM38, le EM38-DD, le EM38-MK2 (Geonics Limited, Mississauga, Ontario), et le EMP-400 (Geophysical Survey Systems, Inc., Salem, New Hampshire) (Figure 2) (Doolittle & Brevik, 2014).

Cependant, il existe une différence dans la calibration des capteurs. La sensibilité de la profondeur de détection et du volume du sol mesuré affectera les mesures et entraînera légèrement des valeurs différentes de la ECa (Sudduth et al., 2003).

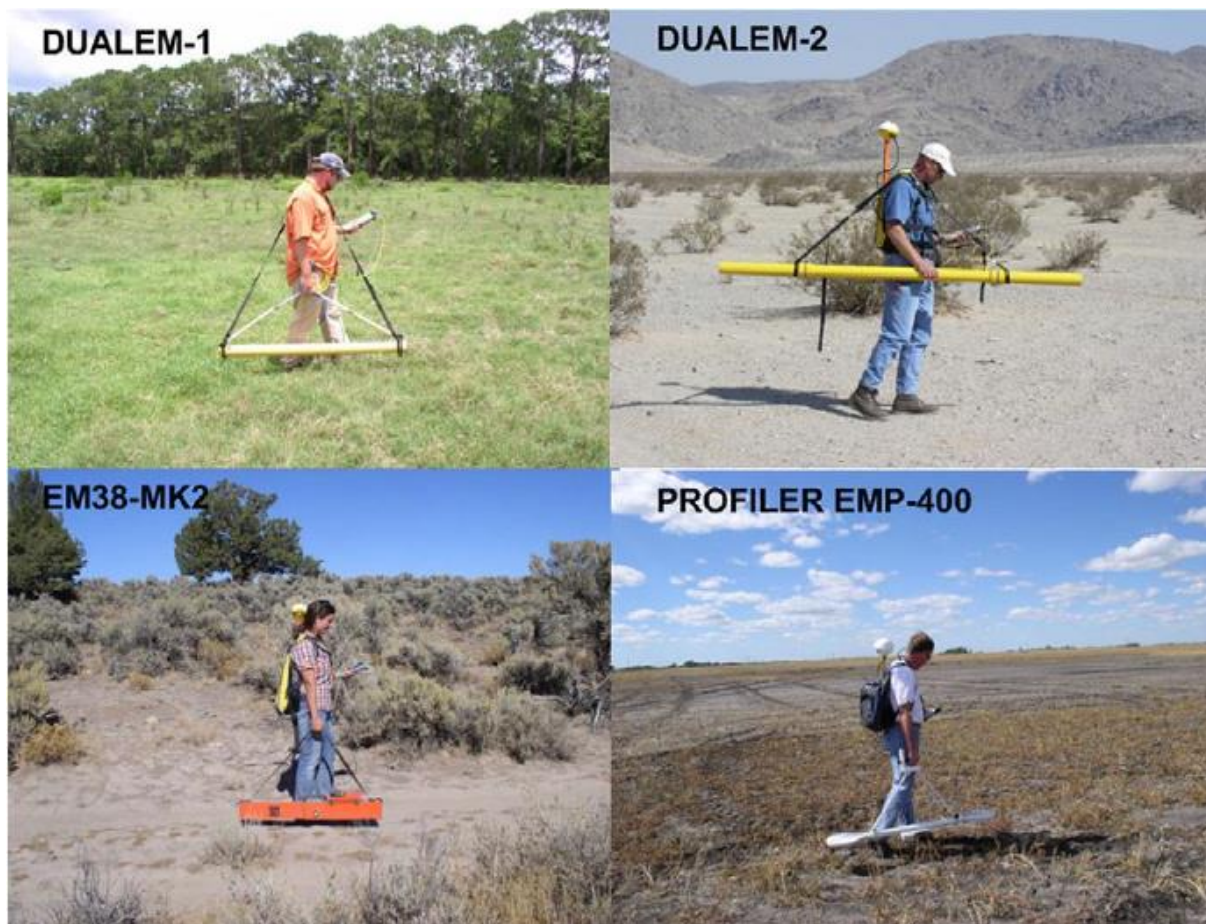


Figure 2. Quatre capteurs à induction électromagnétique utilisés pour les investigations des sols.

8.4. La télédétection, Système d'Information Géographique, Image satellitaire

Les techniques de télédétection et la photographie aérienne, sont utilisées dans les sciences du sol depuis de nombreuses années comme un outil fiable pour aider les géomètres à réduire le temps et les frais d'échantillonnage Xuegong (1985).

L'approche de la télédétection, qui utilise des capteurs satellitaires et aéroportés, fait rapidement son entrée dans le domaine des sciences environnementales en tant qu'outil complémentaire pour l'étude des processus naturels. Cela est principalement dû au fait que cette approche permet d'avoir une vue d'ensemble de grandes zones simultanément, en utilisant de multiples informations spectrales qui sont en corrélation avec la plupart des compositions communes de la couverture terrestre, sur une base temporelle et de manière rentable.

En science du sol, cette technique a montré un bon potentiel pour déterminer les groupes de sols, le processus de genèse du sol et la dégradation du sol, et reflète également certaines interactions de l'environnement du sol. A l'exemple de Shahid (2013) récemment efforcé de

compiler ces travaux afin de fournir des informations utiles aux utilisateurs potentiels de ces outils dans la recherche sur la salinité des sols.

Les récents développements technologiques utilisant la télédétection pour la surveillance de l'environnement ont produit une nouvelle approche capable de fournir des informations quantitatives plutôt que qualitatives sur l'état des sols.

Comme cette technique offre de nouvelles possibilités, elle ouvre également de nouvelles frontières dans les applications au sol. La capacité des informations spectrales du sol à prévoir plusieurs propriétés importantes du sol a déjà été démontrée dans des conditions de laboratoire.

La cartographie de la salinité à la surface du sol peut être réalisée en intégrant des techniques des images satellitaires et de SIG à grande et petite échelle (Spies & Woodgate, 2005). L'objectif principal de ces deux techniques est de permettre la prévision des sites vulnérables à la "menace de la salinité". La cartographie et la surveillance de la salinité à l'aide de RS et de SIG sont courantes dans de nombreux pays et de telles procédures ont récemment été utilisées au Koweït et dans l'Émirat d'Abu Dhabi dans le cadre des inventaires nationaux des sols (KISR, 1999 ; Shahid et al., 2002 ; EAD 2009 ; Abdelfattah et al., 2009 ; Asif & Ahmed, 1999).

Le SIG est une application informatique qui implique le stockage, l'analyse, la récupération et l'affichage de données décrites en fonction de leur emplacement géographique.

Le type de données spatiales le plus connu est la carte - le SIG est en fait un moyen de stocker électroniquement des informations cartographiques. Une carte SIG présente un certain nombre d'avantages par rapport aux anciennes cartes, l'un des principaux étant que les données étant stockées électroniquement, elles peuvent être facilement analysés par ordinateur.

Dans le cas de la salinité du sol, les scientifiques peuvent utiliser des données sur les précipitations, la topographie et le type de sol (en fait, toute les informations disponibles par voie électronique peuvent être utilisées) pour déterminer les facteurs qui rendent les sols très sensibles à la salinisation dans le but de pouvoir prévoir d'autres régions (similaires) qui pourraient être à risque.

Par exemple, une mauvaise couverture végétale peut être une indication de la salinité, en particulier lorsqu'elle est combinée à des informations sur la profondeur du sol jusqu'aux eaux souterraines.

Les images satellites peuvent aider à évaluer l'étendue des zones salines et peut suivre les changements en temps réel. Les champs salins sont souvent identifiés par la présence des taches blanches de sels précipités. De tels précipités se produisent généralement dans des zones

non végétalisées, où l'évaporation a laissé des résidus de sel. Ces croûtes de sel, qui peuvent être détectés sur les images satellites, ne sont toutefois pas des preuves fiables de l'existence d'une salinité dans la zone des racines. Des enquêtes sur le terrain sont menées sur place pour corroborer les informations.

Cependant, l'image satellitaire peut fournir des informations utiles pour de grandes zones avec des eaux différentes et les bilans salins et peut identifier des paramètres tels que l'évapotranspiration, les précipitations la distribution, les pertes par interception, et les types et intensités de cultures qui peuvent être utilisés comme des mesures indirectes de la salinité et de la saturation en eau comme preuve en l'absence de estimations (Ahmad, 2002).

9. Géostatistiques

La géostatistique est utilisée pour cartographier les caractéristiques de la surface terrestre à partir d'échantillons de données limités.

Elle est largement utilisée dans les domaines où les données "spatiales" sont étudiées. L'estimation géostatistique est un processus en deux étapes. La première étape consiste à étudier les données recueillies afin d'établir la prévisibilité des valeurs d'un endroit à l'autre de la zone d'étude. Il en résulte un graphique appelé semivariogramme, qui modélise la différence entre une valeur à un endroit et la valeur à un autre endroit en fonction de la distance et de la direction entre elles. La deuxième étape consiste à estimer les valeurs aux endroits qui n'ont pas été échantillonnés. Ce processus est connu sous le nom de "krigeage". La technique de base, le krigeage ordinaire, utilise une moyenne pondérée d'échantillons voisins pour estimer la valeur "inconnue" à un endroit donné. Les pondérations sont optimisées en utilisant le modèle semivariogramme, les emplacements des échantillons et toutes les relations pertinentes entre les valeurs connues et inconnues. La technique fournit également une "erreur standard" qui peut être utilisée pour calculer les niveaux de confidentialité. Dans le secteur biologique, la géostatistique est largement utilisée dans le domaine de l'évaluation des ressources naturelles et des réserves minérales du sol, par exemple l'estimation des teneurs en sel et d'autres paramètres à partir d'un ensemble relativement restreint des échantillons de sol.

Cependant, les techniques sont également utilisées dans des domaines aussi divers que l'hydrologie, les eaux souterraines, la cartographie de la salinité des sols et les prévisions météorologiques. L'application des techniques géostatistiques, telles que le krigeage ordinaire et le krigeage conjoint, ont été appliquées aux les données des enquêtes sur la salinité afin de représenter plus précisément la distribution spatiale de la salinité du sol (Boivin et al., 1988 ; Vaughan et al., 1995).

9.1. Krigeage ordinaire

Le krigeage ordinaire est la méthode de krigeage la plus utilisée. C'est une procédure géostatistique avancée qui génère une surface estimée à partir d'un ensemble de points dispersés avec des valeurs z (élévation) (Figure 3).

Le krigeage suppose que la distance ou la direction entre les points d'échantillonnage reflète une corrélation spatiale qui peut être utilisée pour expliquer la variation de la surface. L'outil de krigeage s'adapte à une à un nombre déterminé de points, ou à tous les points situés dans un rayon déterminé, en afin de déterminer la valeur de sortie pour chaque lieu. Comme indiqué ci-dessus, le krigeage est un processus en plusieurs étapes ; il comprend une analyse statistique exploratoire des données, un variogramme la modélisation, la création de la surface et (éventuellement) l'exploration d'une surface de variance (Wackernagel., 1995).

Le krigeage est le plus approprié lorsque vous savez qu'il existe une distance corrélée dans l'espace ou un biais directionnel dans les données. Il est souvent utilisé dans les sciences du sol et la géologie.

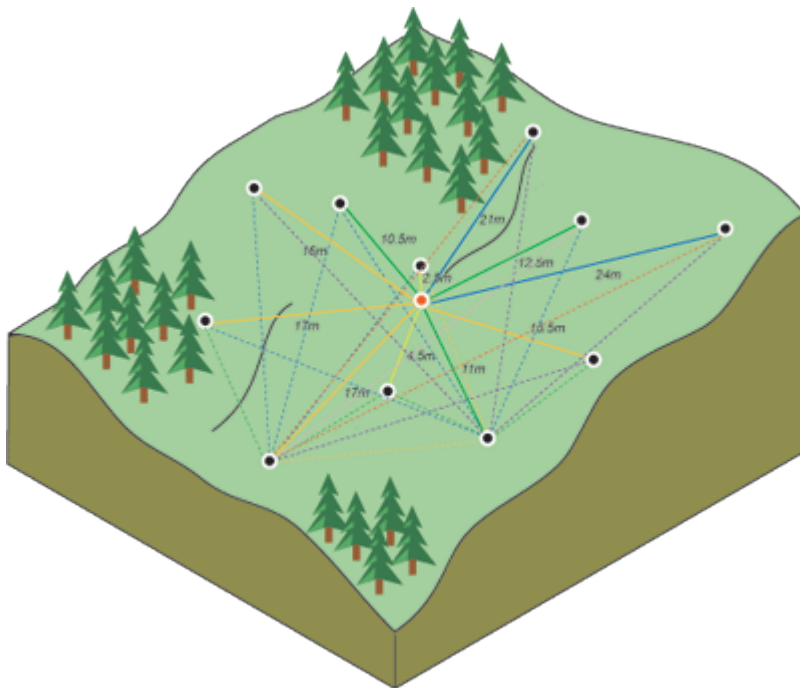


Figure 3. Méthode de krigeage ordinaire (Source de l'image : Posts, V. M. (2018))

9.2. Interpolation inversée pondérée en fonction de la distance (IDW)

L'interpolation inversée pondérée par la distance détermine les valeurs des cellules en utilisant une combinaison linéairement pondérée d'un ensemble de points d'échantillonnage

(Figure 4). Le poids est fonction de la distance inverse. La surface à interpoler doit être celle d'une variable dépendant de l'emplacement. Cette méthode suppose que l'influence de la variable cartographiée diminue avec la distance par rapport à son emplacement échantillonné.

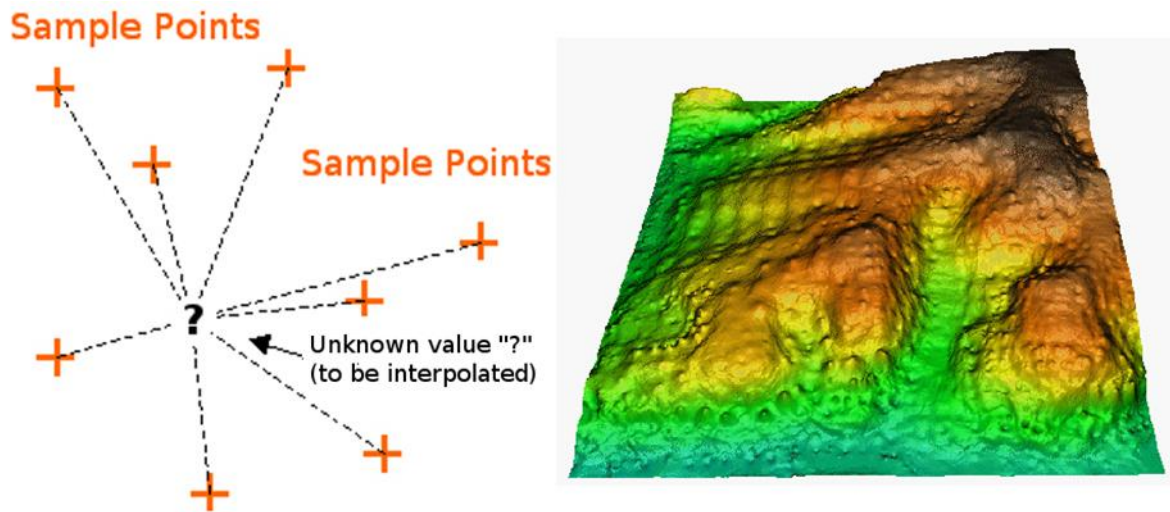


Figure 4. Méthode de pondération inverse de la distance (IDW) (Source de l'image: Mitas, L., Mitsova, H. (1999)).

10. La qualité des eaux utilisées en irrigation

Dans les zones agricoles arides le retour à l'irrigation est primordiale pour assurer la durabilité de leurs rendements, généralement cette source d'eau est d'origine souterraine, pour cela, le choix d'une source d'eau doit dépendre du type et de la concentration des substances qui y sont dissoutes ou en suspension. D'un autre côté, les caractéristiques physico-chimiques du sol interviennent sur la qualité de ces eaux, par exemple lorsque le sol est chargé par un taux élevé de sels qui affecte forcément sur la qualité de ces eaux d'irrigation. De ce fait, la connaissance des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de l'eau utilisée pour l'irrigation est indispensable pour éviter des effets négatifs sur les plantes, en plus, du système d'irrigation utilisé, du sol, et de l'environnement. Pour choisir une source d'eau pour irriguer, il faut penser à trois facteurs très importants : la quantité et la qualité de l'eau, le type de culture et le type de sol.

L'évapotranspiration, un autre processus considéré très important, englobe la perte en eau d'irrigation par l'évaporation du sol et par la transpiration des plantes. De ce fait, la quantité d'eau d'irrigation ajouté doit être additionné d'une manière rationnelle, pour que les substances qu'elle contient ne risquent pas de s'accumuler dans le sol, afin d'éviter des concentrations toxiques. La sensibilité des cultures à l'égard des substances toxiques est très variable. Le taux

de percolation est généralement plus élevé dans les sols sableux que dans les sols argileux. Les concentrations élevées de sodium peuvent agir de manière défavorable sur la structure et la perméabilité des sols argileux. Les facteurs les plus importants pour déterminer la qualité requise de l'eau dans l'agriculture sont la salinité, le sodium, l'alcalinité, le pH de l'eau et en fin la concentration en éléments dont certains peuvent être toxiques pour le végétal (Bradaï et al., 2012).

10.1. L'évaluation de la qualité des eaux d'irrigations

10.1.1. La salinité

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{2+}), de sodium (Na^+), les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les bicarbonates (HCO_3^-). Une valeur élevée de la salinité signifie une grande quantité d'ions en solution, ce qui rend plus difficile l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par la plante. Une salinité trop élevée peut causer des brûlures racinaires (Tableau 3).

Tableau 3. Classification des eaux selon la conductivité électrique à 25°C. (Source Durand, 1982)

Nomination	Classes	Interprétation
Classe 1 (C1)	$\text{CE} < 250 \mu\text{S}/\text{cm}$	Eau non saline, utilisée pour l'irrigation de la plupart des cultures sur différents sols.
Classe 2 (C2)	$250 < \text{CE} < 750 \mu\text{S}/\text{cm}$	Salinité moyenne, utilisée avec un léger lessivage.
Classe 3 (C3)	$750 < \text{CE} < 2250 \mu\text{S}/\text{cm}$	Eau à forte salinité, non utilisable dans les sols à drainage restreint.
Classe 4 (C4)	$2250 < \text{CE} < 5000 \mu\text{S}/\text{cm}$	Eau à très forte salinité inutilisable pour l'irrigation.
Classe 5 (C5)	$5000 < \text{CE} < 20000 \mu\text{S}/\text{cm}$	Eau à salinité excessive.

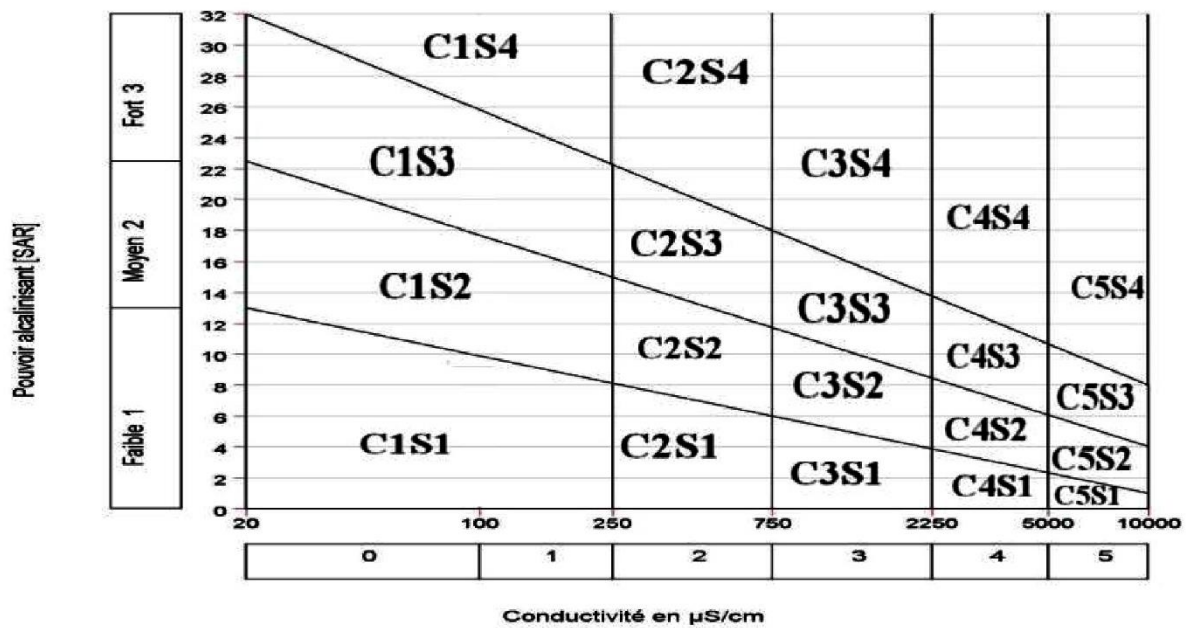


Figure 5. Diagramme de RIVERSIDE selon Richards.

10.1.1.1. Classification des eaux d'irrigation par la méthode de Wilcox

WILCOX (1948) (Figure 6) a proposé une méthode pour évaluer les eaux d'irrigation, basée sur le pourcentage de sodium et la conductivité électrique, Le pourcentage de sodium est calculé selon la formule :

$$Na^+ = \frac{(Na^+ + k^+)}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + k^+)} \times 100$$

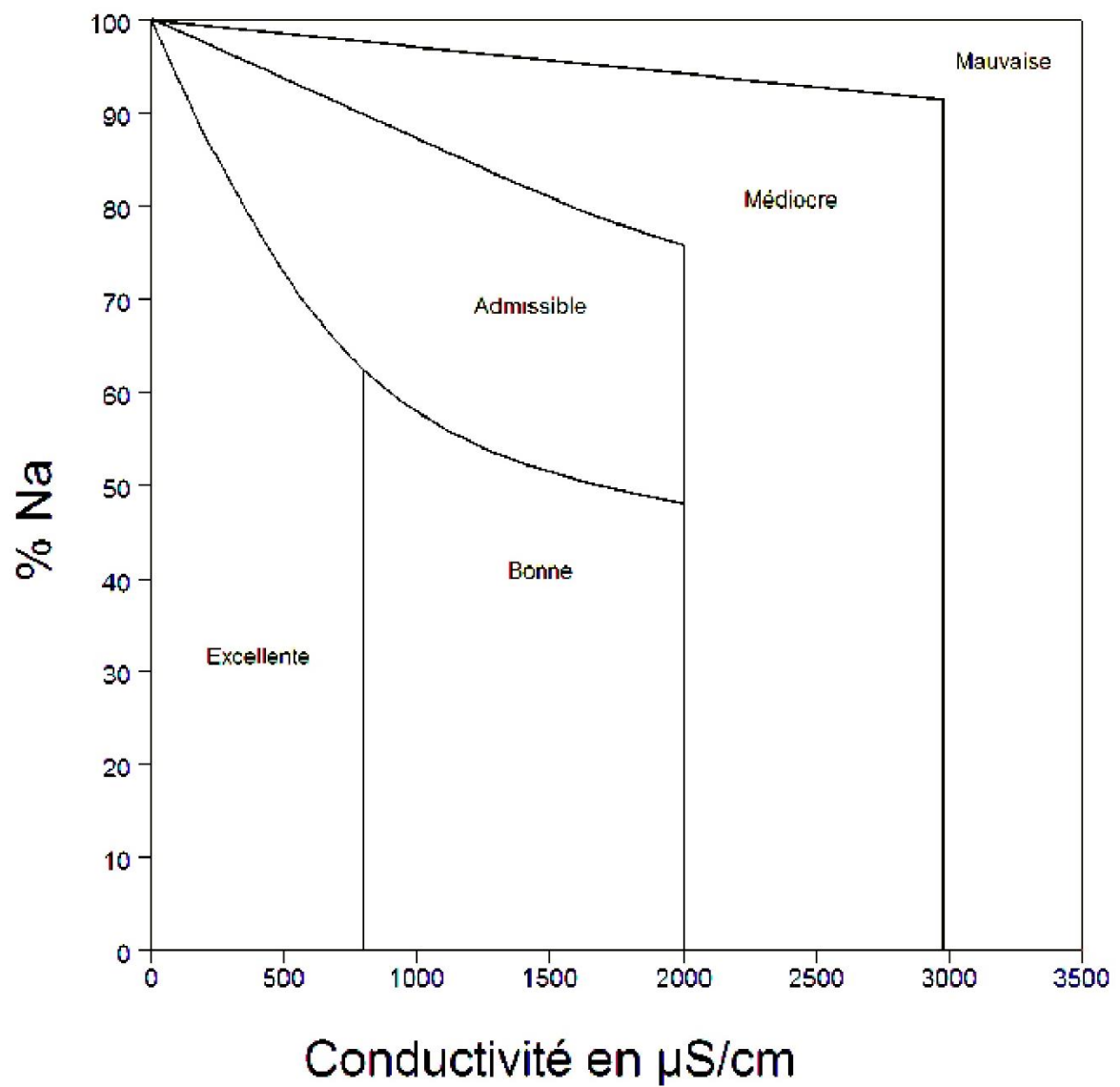


Figure 6. Le diagramme vierge de Wilcox.

10.1.1.2. Classification des eaux d'irrigation par la méthode de Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au totale de ces ions (cations pour le triangle de gauche, anions pour le triangle droite).

Le principe consiste à représenter dans chaque triangle les quantités en réaction pour chaque cation ou anion, après quoi on obtient un point triple soulignant la prédominance d'un cation ou d'un anion. Ces deux points triples donnent un point critique représentant la nature chimique de l'échantillon considéré.

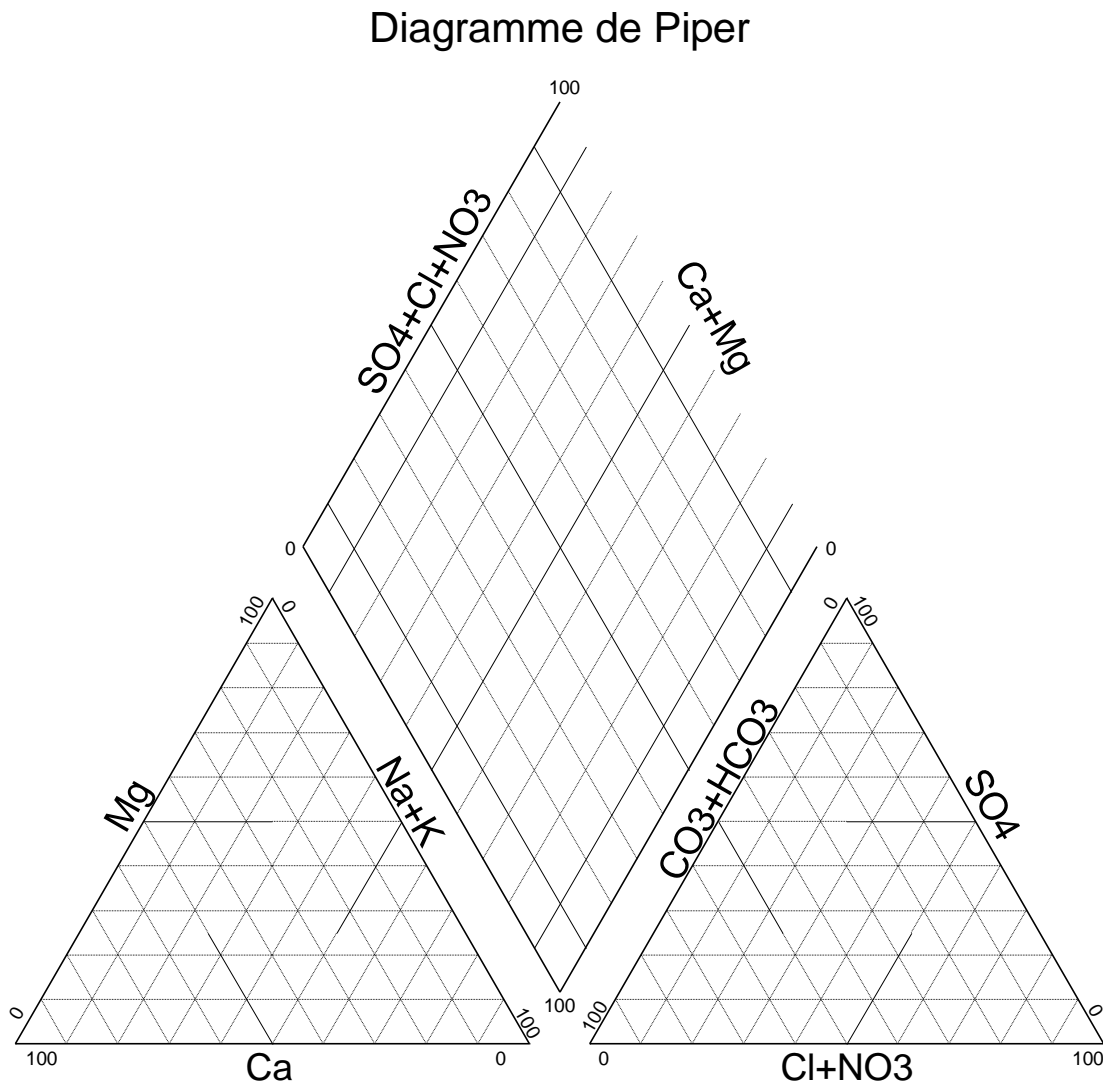


Figure 7. Le diagramme de Piper

10.1.1.3. Classification des eaux d'irrigation par la méthode de Diagramme de Schoeller Berkalov

Le diagramme de Schoeller Berkalov (Figure 8) permet de représenter le faciès chimique d'une ou plusieurs eaux souterraines. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. En utilisant les concentrations des éléments chimiques majeurs et en les reportant par une ligne verticale sur un graphique en colonnes à une échelle logarithmique. Cette ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques. Lorsque ces lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence.

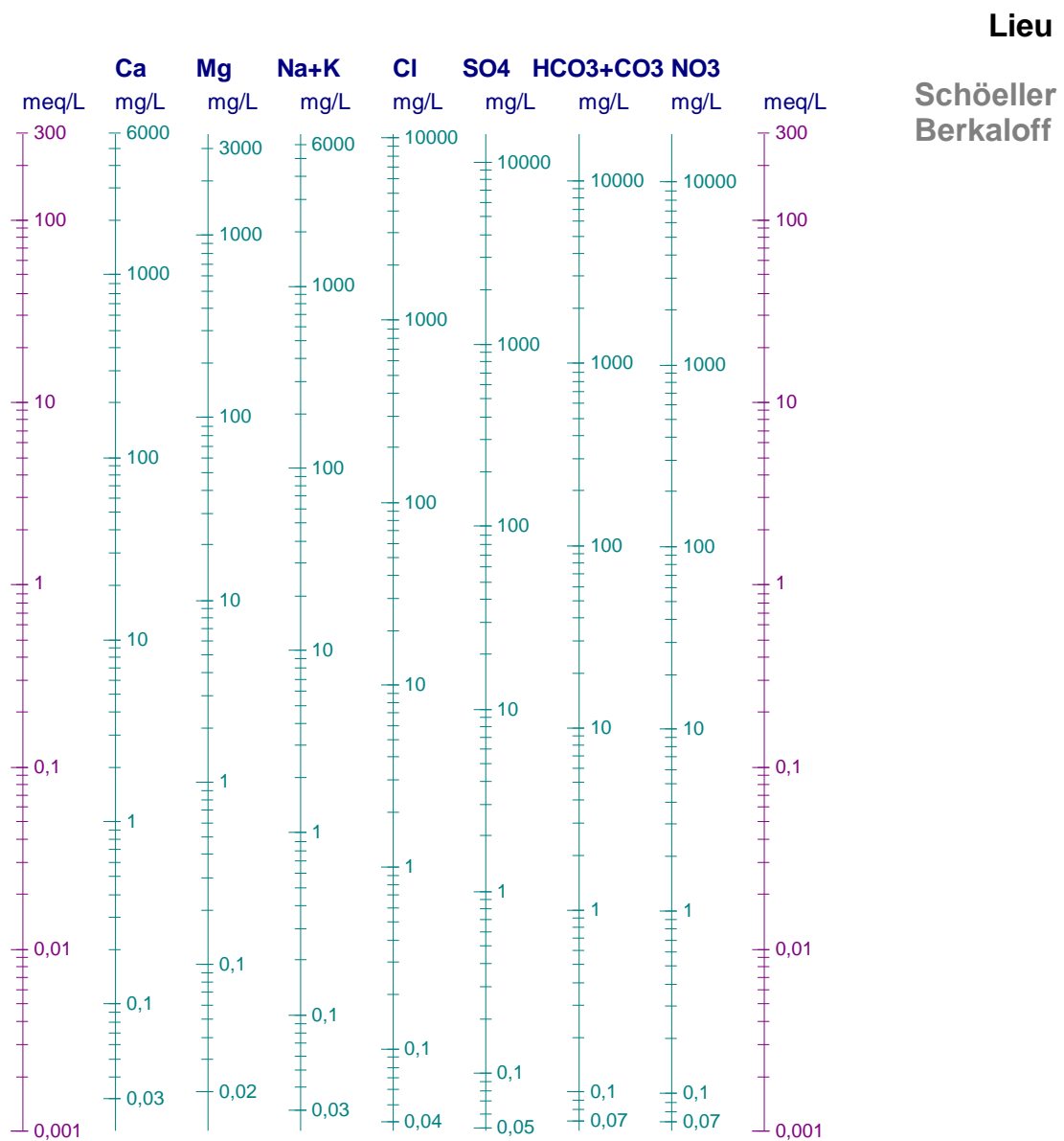


Figure 8. Le diagramme vierge de Schoeller Berkalov.



CHAPITRE 2 :
Présentation de la région d'étude

« Si vous n'essayez jamais, vous ne réussirez jamais, mais si vous essayez, vous risquez de vous étonner vous-même »

Charles-Augustin Sainte-Beuve

Introduction

L'objectif de ce chapitre est de situer la zone d'étude dans son contexte naturel et régional (la wilaya de Ghardaïa), ainsi que les facteurs naturels qui peuvent affecter les sols à savoir la géologie, la géomorphologie, l'hydrogéologie les conditions climatiques, etc...

1. Choix du site

Pour les besoins de notre étude, nous avons choisi la palmeraie de Zelfana (W. Ghardaïa), qui fait partie d'un système oasien du Sahara Centrale d'Algérie. Ce système oasien unique, caractérisé par un système alluvial fragile dont l'anthropisation a altéré son bon fonctionnement.

2. Situation géographique

La commune de Zelfana est située à 67 km au Nord de la wilaya de Ghardaïa et à 658 km² au Sud d'Alger. Elle est à la latitude 32° 23' nord, 4° 13' Est et à une altitude de 355m. Elle couvre une superficie de 2220 km². Elle est limitée au nord par la commune de Guerara, à l'est par la wilaya de Ouargla, à l'ouest par la commune de Atteuf et au sud par la commune de Metlili. (Figure 9) :

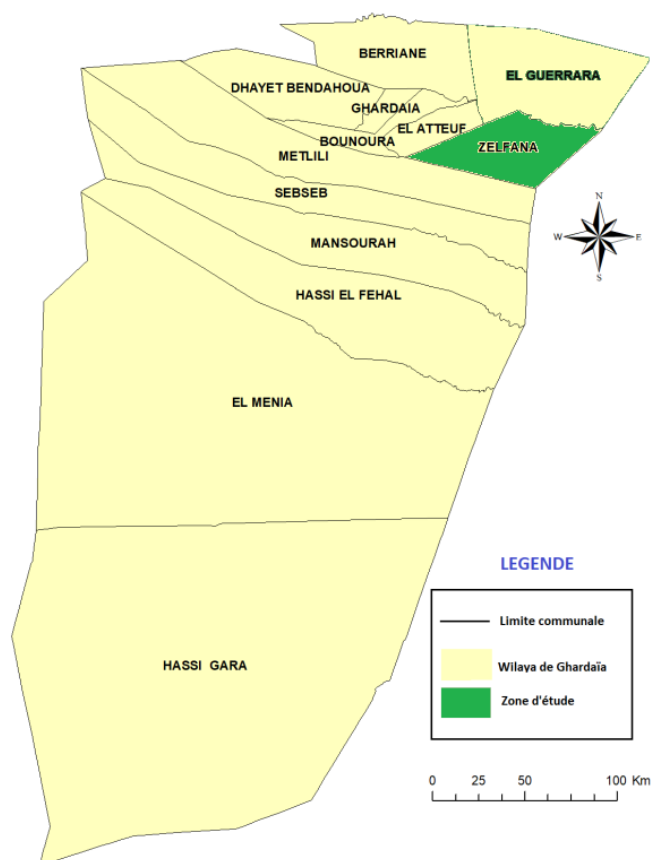
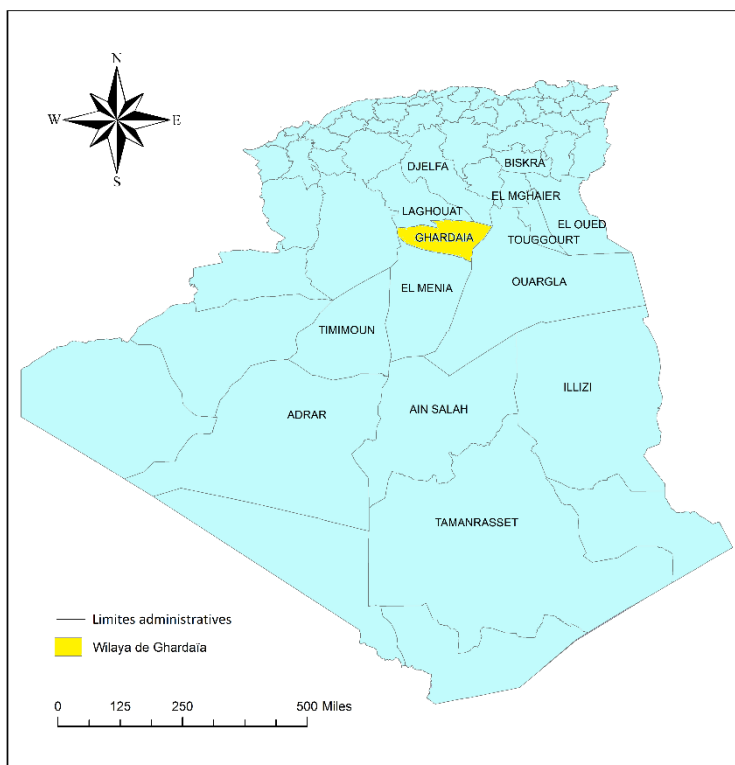


Figure 9. Carte de la situation géographique de la région d'étude (CDARS, 2019 ; modifiées).

3. La géologie

Le Sahara septentrional algérien peut être divisé en deux grandes régions naturelles : Le Sahara occidental, ou Haut-Sahara, et le Sahara oriental, ou Bas-Sahara.

La région de Ghardaïa fait partie du bassin sédimentaire secondaire du Bas-Sahara, ces terrains apparus en grande partie au Crétacé supérieur. Dans l'aspect lithologique ces émergements sont de type (ANRH, 2016) :

- Argiles verdâtres et bariolées à l'Ouest et le Sud-Ouest attribués au Cénomanién,
- Calcaires massifs durs ; blanc grisâtre au centre, attribués au Turonien,
- Calcaires marneux et argiles gypseuses à l'Est, attribués au Sénonien,
- Sables rougeâtre consolidés à Est et au Nord-Est attribués au Miopliocène,
- Alluvions quaternaires tapissant le fond des vallées des oueds.

La vallée de Zelfana est une formation qui appartient au quaternaire continental. Cette structure se présente sous forme de lits d'oueds, de dépressions et de dunes. Le plateau rocheux de la Chebka est la formation la plus ancienne, elle appartient au secondaire, représentée par le Crétacé moyen (le Turonien) et le Crétacé supérieur marin (le Sénonien) (URBATIA, 1996). La hamada de l'Est et la plaine de l'Ouest sont formées de poudingues calcaires lacustres du Pliocène continental (URBATIA, 1996).

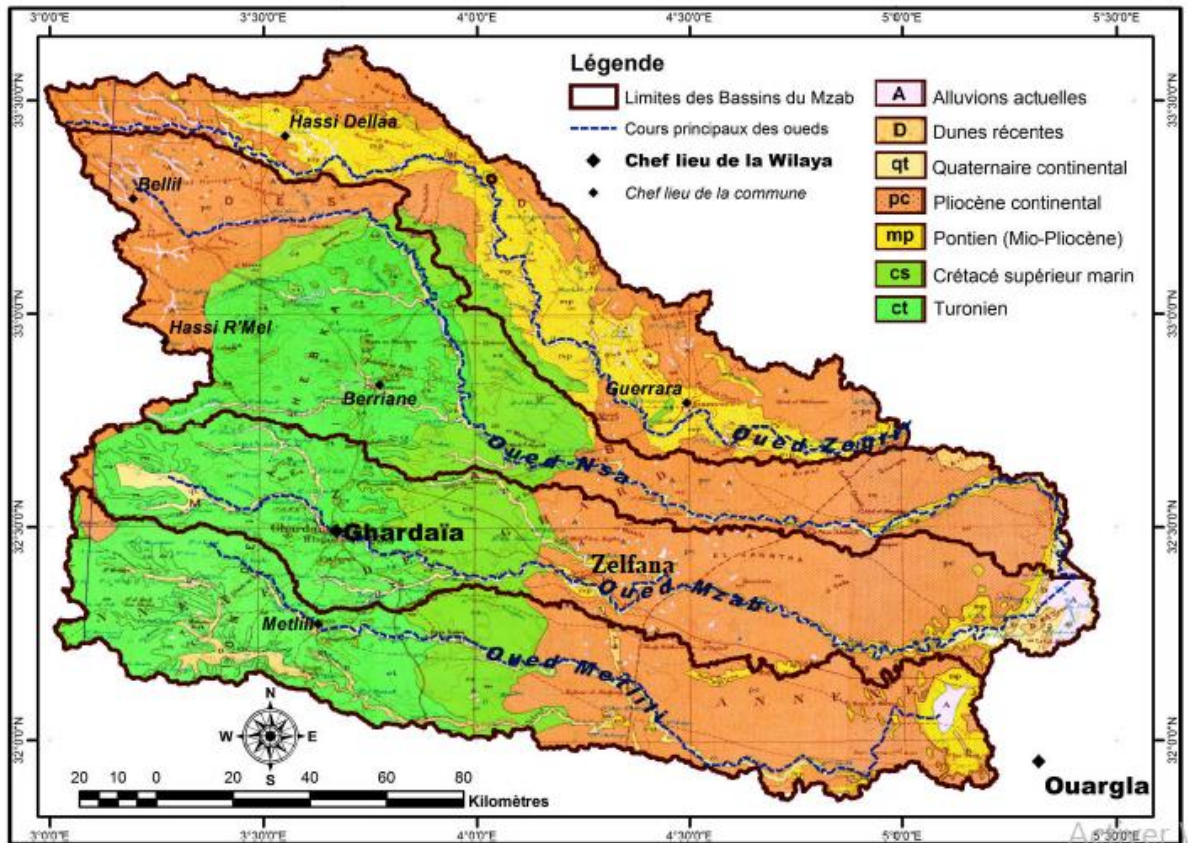


Figure 10. Carte géologique de la région de Ghardaïa (source de la carte : Djili B, 2018 ; modifié).

4. Hydrogéologie

L'existence d'eaux souterraines dans la région du M'Zab, s'explique par la présence d'assises marneuses imperméables, de l'étage cénomanien, sous les calcaires turoniens de la Chebka (Moulias, 1927). La 1ère étude réalisée par les services d'hydrologie de SONATRACH en 1992 a montré que mis à part la nappe phréatique, la région se situe de le triasique où quatre (04) aquifères peuvent être exploités pour les besoins en eau domestiques et agroindustriels : Mio-Pliocène et Eocène, Sénonien carbonaté, Turonien carbonaté, Continental intercalaire (Gautier & Gousskov, 1951 ; Bait et al., 1977)

4.1. Nappe du continental intercalaire

Cette nappe couvre une surface de 600.000 m². Elle occupe la totalité du Sahara septentrional algérien, et se prolonge dans le Sud de la Tunisie et le Nord de la Libye. Elle occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la basse du Trais et le sommet de l'albien.

C'est une nappe fossile, du coup elle a un faible rapport à son volume considérable. Elle s'alimente par la filtration l'infiltration des eaux de ruissellement des oueds qui descendent des massifs montagneux de l'Atlas saharien et qui dépasse 500 m de profondeur (Khadraoui, 2007).

Les ressources en eau de la région de Zelfana sont principalement d'origine souterraine et essentiellement du Continental Intercalaire (Ouali et al., 2007).

La nappe albienne est définie par les formations continentales du Crétacé inférieur comprises entre le Neocomien et le Cenomanien, constituées de sables, de grès avec des intercalations d'argiles (Cornet, 1964).

4.2. Nappe du complexe terminal

Il s'agit du sable du Mio-Pliocène et carbonates de Sénonien. Cette nappe n'a pas d'importance que celle de continental intercalaire car elle est moins présente. La région de Ghardaïa ne bénéficie pas des eaux de cette nappe à cause de son altitude (Dubost, 2002).

4.3. Nappe phréatique

La nappe phréatique est un aquifère superficiel dont les eaux sont généralement exploitées par des puits de faibles profondeurs (2 à 50m). Elle est alimentée par les pluies (Dubost, 2002), et elle est en générale constituée par des formations quaternaires.

5. Hydrographie

Dans les régions arides les précipitations sont extrêmement variables et qui ont généralement des effets dévastateurs et néfastes à travers les crues des cours d'eau. Les oueds sahariens sont des réseaux qui n'ont pas d'écoulement permanents et ils sont l'origine de l'alimentations des aquifères. La fréquence de ces cours d'eau est dépendue du régime pluviométrique du fait que sont très variables durant une année à une autre (Chabour, 2006).

5.1. Réseau hydrographique

Ensemble des canaux de drainages naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, par où s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines.

5.1.1. Le sous bassin versant d'oued M'Zab

La région de Ghardaïa est jalonnée par un grand réseau d'oueds (Figure 11) dont les principaux sont : oued Sebseb, oued Metlili, oued M'Zab, oued N'sa et oued Zegrir (A.N.R.H., 2011).

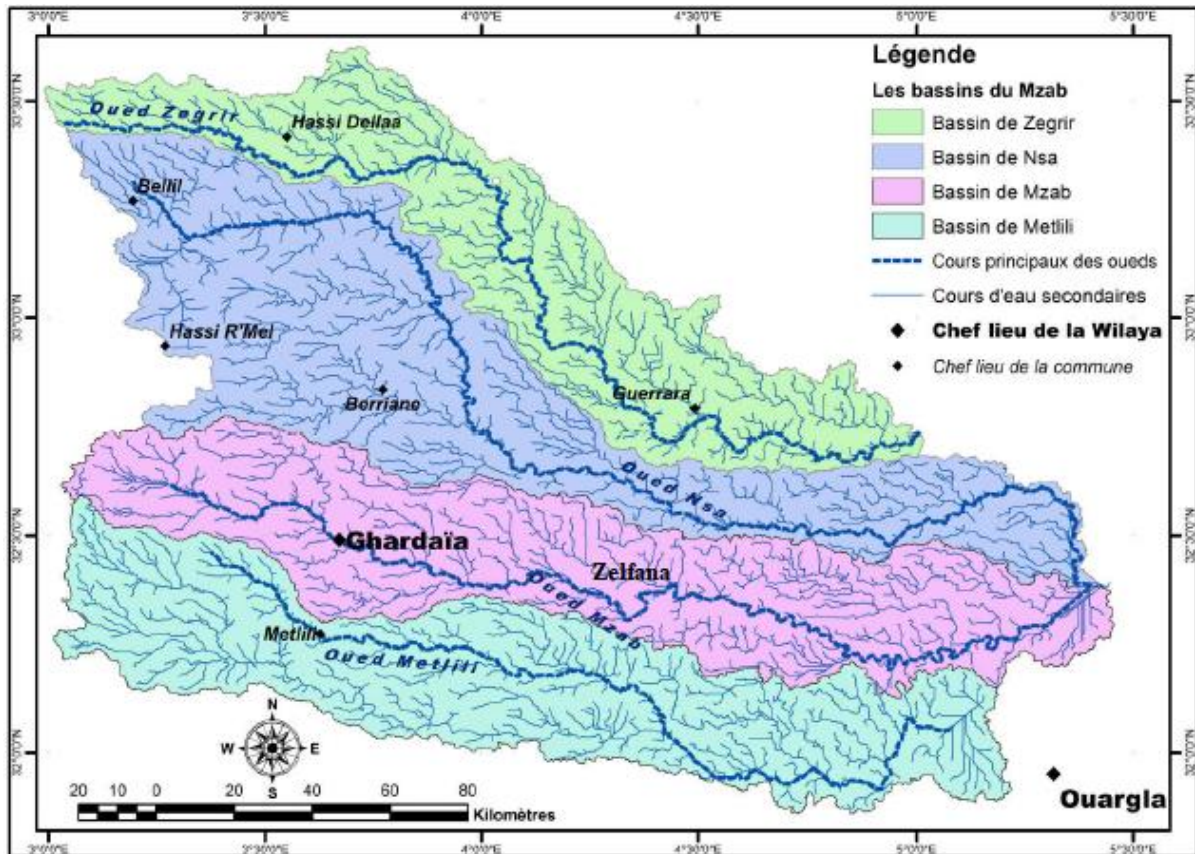


Figure 11 : Carte du réseau hydrographique de la région de Ghardaïa (source de la carte : Djili B, 2018 ; modifié).

La région de Zelfana s'alimente par l'oued M'Zab, ce dernier à une superficie de 5000 km² (Dubrief, 1953), il se limite au nord par le Oued N'sa et au sud par Oued Metlili. Oued M'Zab coule d'Ouest vers Est d'environ 320 km, il est influé en amont de Ghardaïa sur la rive droite par : Oued Touzouz (rejoint le M'Zab en amont de la palmeraie de Ghardaïa) ; à gauche Oued El-Haimeur (Daïa Ben Dahoua) et en aval de Ghardaïa, nous rencontrons à droite de Béni-Isguen, le N'Tissa qui traverse la palmeraie de cette dernière, à gauche et à quelques centaines de mètres en aval du précédent nous trouvons Oued Azouil dans le lit duquel sont situés les jardins de Bounoura. Tout à fait en aval de la pentapole mozabite nous citerons, sur la rive droite : l'Oued Noumerate. Puis l'Oued Nessaimou en amont de Zelfana, Enfin, très en aval de

cette région : l'Oued Hasseï. A partir de ce dernier la vallée du M'Zab est creusée dans le Pliocène continental et ne reçoit plus de ce fait d'affluent important.

5.1.2. Importance des ruissellements

Les crues des oueds jouent un rôle primordial dans le régime des puits. A chaque crue, le niveau de la nappe phréatique s'élève. En cas de sécheresse, l'eau s'abaisse plus ou moins lentement, pour arriver à son minimum; parfois même, l'eau disparaît complètement. Sans ruissellement, les faibles précipitations ne pourraient humecter suffisamment les sols profondément desséchés, pour alimenter la nappe d'eau profonde (Dubief, 1953). Ces ruissellements ont également des effets sur les propriétés du sol, grâce aux l'éléments fins d'épandage.

6. La pédologie

Dans le Sahara septentrional algérien, on trouve des sols dénudés par des mouvements éoliens violent laissant sur place des concentrations de matériaux grossiers d'ablation (reg) ou hamada. Cet important agent morphogénétique qui est le vent, transporte les particules fines issues de l'altération mécanique des roches (fragmentation et ablation) pour former de vastes couvertures sableuses et des champs de dunes (erg).

C'est le même processus qui se passe dans les sols des anciennes palmeraies de Zelfana qui sont des alluvions apportées par les crues de l'Oued M'Zab et mélangées avec les apports éoliens sévères. Ces sols sont peu à modérément calcaires, alcalins à fortement alcalins et présentent une faible teneur en matière organique avec une couleur jaunâtre révèle la dominance d'un faciès gypseux et de plus ils sont le résultat des altérations géologiques du quaternaire et du moi-pliocène.

Le terrain présente une surface globalement plane, sauf dans les zones de ruissellement et auprès des obstacles et lieux favorables à l'accumulation du sable, comme les clôtures, les touffes de végétation spontanée, les pistes et les constructions (Houichiti, 2009).

7. SYNTHÈSE CLIMATIQUE ET BIOCLIMATIQUE

7.1. SYNTHÈSE CLIMATIQUE

7.1.1. Le climat

Le climat de Ghardaïa est un climat particulièrement aride, cette aridité s'exprime non seulement par des températures élevées en été et par la faiblesse des précipitations, mais surtout par l'importance de l'évaporation due à la sécheresse de l'air. Pour présenter le climat de cette région, nous nous sommes basés sur les données climatiques de (ONM, 2020), recueillies à la station météorologique de Ghardaïa.

7.1.2. La précipitation

D'après l'analyse pluviométrique de la région de Ghardaïa, les précipitations sont très rares avec une irrégularité mensuelle et annuelle. En effet, le mois le plus pluvieux est Septembre avec seulement 18,76 mm en moyenne.

7.1.3. La température

Le Tableau indique que la température moyenne annuelle est de 21,75 °C. La température maximale moyenne de 43,99 °C est obtenue au mois de juillet, et aussi le mois le plus chaud avec une moyenne mensuelle de 31,78°C. Par contre, janvier est le mois le plus froid avec une moyenne mensuelle de 11,3°C et un minimum moyen mensuel de 2,49 °C. L'amplitude thermique mensuelle fluctue entre 19,41°C en janvier et 18,42°C en juillet.

Tableau 4.

Tableau 4. Données climatiques de la zone d'étude de 1990 à 2018 (O.N.M., 2020).

Mois	Températures (C)			Précipitation (mm)	Vitesse du vent (m/s)	Evaporation (mm)	Humidité (%)	Insolation (heure)
	Min.moy	Max.moy	Moyenne					
Janvier	2,49	21,90	11,30	109,1	4,50	104,2	53,25	244
Février	3,62	24,53	13,06	38,0	4,18	128,1	45,25	246,1
Mars	6,06	29,59	16,69	96,4	5,13	184,6	38,48	273,4
Avril	10,03	34,75	20,85	85,7	5,66	240,1	35,60	298,4
Mai	14,53	39,10	26,41	37,7	5,50	302,7	27,94	318,3
Juin	20,78	42,86	31,10	33,1	5,45	370,2	25,89	328,2

Juillet	25,57	43,99	31,78	23,5	4,17	416,7	22,17	347,8
Aout	24,98	43,83	29,64	54,6	3,11	362,3	25,50	325,3
Septembre	18,94	40,73	29,15	187,6	3,32	282,9	36,69	268,9
Octobre	13,99	34,83	22,43	75,0	3,94	186,0	43,62	265,4
Novembre	6,5	27,83	16,25	83,8	3,13	128,4	49,86	248,0
Décembre	3,07	21,72	12,32	72,5	3,32	124,7	56,33	238,4
Moyenne annuelle	12,55	33,80	21,75	897,0*	4,28	2830,8*	38,38	283,51*

* : Cumulés annuelle

7.1.4. L'évaporation

L'évaporation est très élevée dans le Sahara et spécialement dans la région de Ghardaïa. En effet, ce Tableau montre les degrés d'évaporation maximale mensuelle est de 416,7. Et qu'elle correspond au mois de Juillet. De l'autre côté, l'évaporation minimale est de l'ordre de 104,2 mm/mois, elle est remarquée au mois de Janvier et avec une accumulation moyenne annuelle de 2830,8 mm/ an.

7.1.5. Le vent

Le vent agit soit directement par une action mécanique sur le sol et les végétaux, soit indirectement en modifiant l'humidité et la température (Ozenda, 1982). D'autre part, le vent a une action indirecte sur les êtres vivants et il joue le rôle de facteur de mortalité vis à vis des oiseaux et des insectes (Dajoz, 1983).

Ces vents sont fréquents durant toute l'année. Avec une direction NNE-SSW, tandis que les plus violents sont de directions N, NE et W et sont à l'origine des tempêtes de sables. La vitesse moyenne annuelle est de 4,28 m/s et une vitesse maximale de 5,66 m/s observé au mois d'Avril.

7.1.6. L'insolation

La durée d'insolation dans la région de Ghardaïa est de 283 heure/mois avec une durée minimale de 238,4 heures (Décembre) et une durée maximale de 347,8 heures (Juillet). Tableau 4.

7.2. Synthèse climatique

A pour but de caractériser le climat de notre région, une synthèse des principaux facteurs climatiques (température et précipitation) a été faite ;

7.2.1. Le diagramme ombrothermique

Le diagramme ombrothermique de la station climatique de Ghardaïa établi pour la période 1990 – 2018 (Figure 12) révèle que la période sèche s'étale sur toute l'année. Cela veut dire qu'il ne peut y avoir d'agriculture sans le recours à l'irrigation.

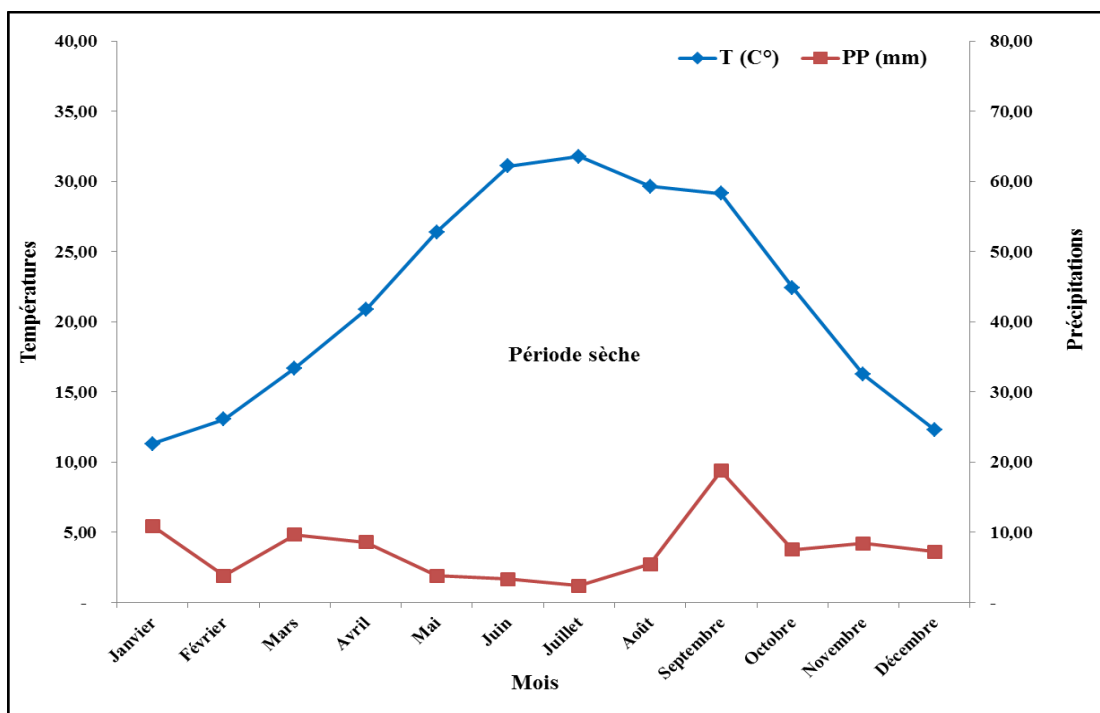


Figure 12. Diagramme Ombrothermique de la station de Ghardaïa (1990-2018).

7.2.2. Climagramme D'Emberger

D'après Dajoz (2003), le système d'Emberger permet la classification des différents climats méditerranéens, à cet égard, Stewart (1969) a établi une formule du quotient pluviothermique (Q3) plus simple que celle proposée par Emberger (1930) :

$$Q = \frac{3,43 \times P}{M - m}$$

P : pluviosité moyenne annuelle en mm ;

M: moyenne des températures maximales quotidiennes du mois le plus chaud en °C;
 m : moyenne des températures minimales quotidiennes du mois le plus froid en °C.

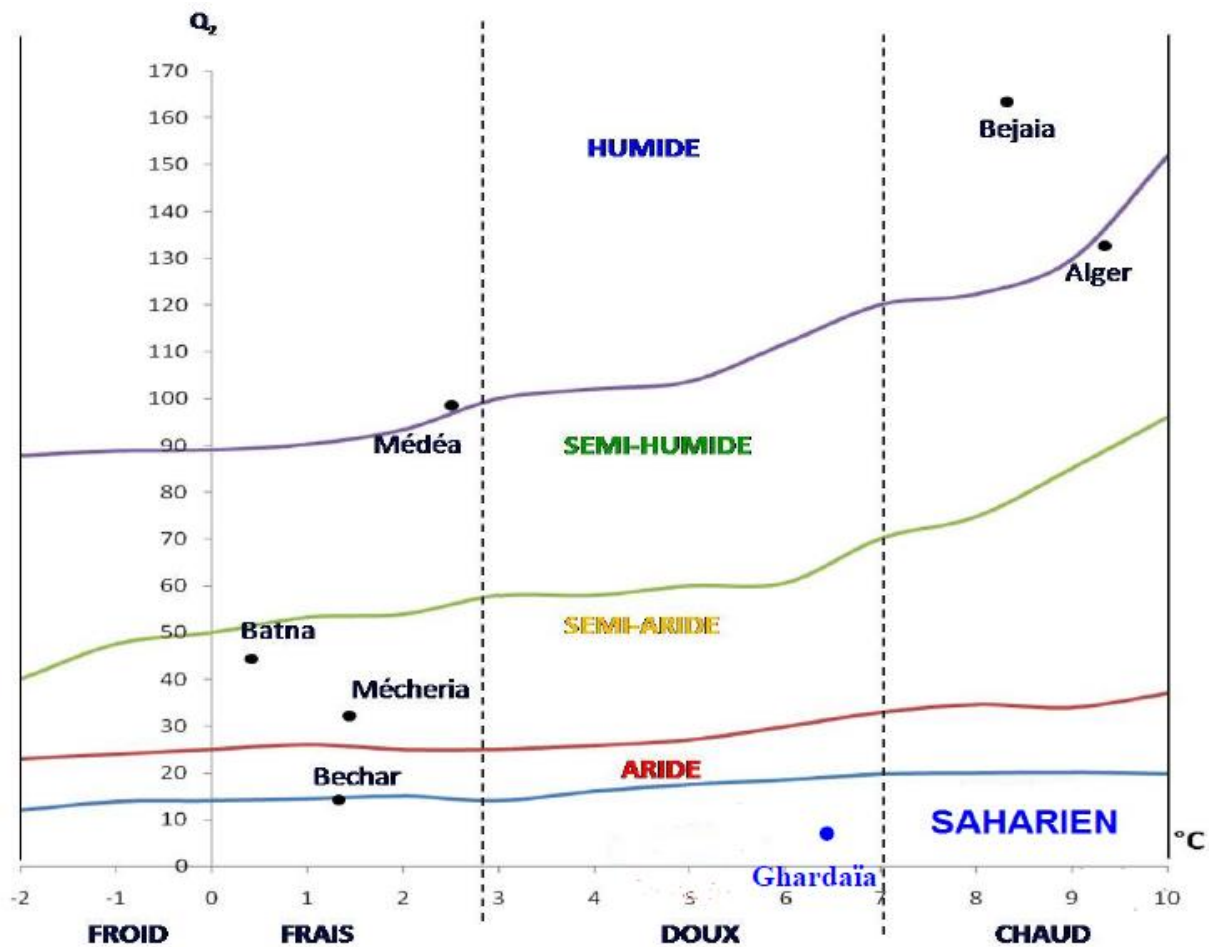


Figure 13. Climagramme d'Emberger pour la région de Ghardaïa.

A partir de ce Climagramme (Figure 13), le Q3 pour la région de Ghardaïa est égale à 6,5. De ce fait, nous constatons que l'étage bioclimatique de la région de Ghardaïa est saharien à hiver doux. Le diagramme pluviothermique et bioclimatique, inspiré de Pouget (1980), la classerait dans le climat saharien à hivers tempérés et Le Houérou (1989) dans l'hyperaride inférieure à hivers tempérés.

8. Exploitation des ressources hydriques

Au Sahara septentrional le recours à l'irrigation est primordiale pour assurer la durabilité des cultures, ces eaux proviennent des eaux souterraines. De ce fait, la qualité de ces eaux (salinité) dans la majorité des régions est moyenne à médiocre. Cette salinité, à une partie est d'origine géologique (primaire) s'accroît continuellement par une mauvaise gestion de la ressource en eau et en sols et aboutie le plus souvent à une salinisation secondaire.

L'irrigation excessive des cultures et la mauvaise gestion des ressources en eau provoquent une accélération du processus de salinisation qui mène à une dégradation des sols .

Les débits pompés sont considérables. Par exemple ils sont de l'ordre de 20 à 40 l/s pour un forage au Complexe Terminal et de 100 à 200 l/s pour un forage au Continental Intercalaire. Dans le bas Sahara, on estime que le volume pompé aujourd'hui est environ 3 fois plus grand que le volume des prélèvements traditionnelles (Côte, 1998).

9. Productions agricoles

Les principales spéculations agricoles rencontrées à Zelfana sont :

9.1. Le système de production phoenicicole

La production et l'exploitation des palmiers dattiers est la principale source de revenu pour les agriculteurs au niveau des régions arides. Pour ce fait, l'importance du dattier dans une exploitation donnée dépend généralement du système de production mis en place.

La phoeniculture dans la région de Zelfana comprend plusieurs cultivars. Selon notre enquête chaque agriculteur possède entre 5 à 10 cultivars, choisis selon ses préférences et ces revenus entre dans le cadre d'autoconsommation. D'autres agriculteurs ont quelques variétés d'importance commerciale comme : Déglet Nour, Ghars, Azerza.

9.2. Le système de production d'arboriculture fruitière

La culture de ces arbres est généralement plantée entre deux pieds de palmier dattier. On trouve principalement des agrumes, le pommier, la vigne et certains oliviers. D'autre part dans les anciennes arboricultures on trouve le grenadier et l'abricotier.

9.3. Le système de production maraîchage

Ce type de culture maraîchère est pratiquée en plein champ, avec deux saisons, hivernale : la carotte, l'oignon, le navet, la fève, le pois, l'épinard et la laitue ; pour l'été : le potiron, la courge, l'aubergine, le melon, le piment et la tomate.

Conclusion

Le climat de Ghardaïa se caractérise par une faible pluviométrie annuelle et une évapotranspiration très élevée qui a accentué la vulnérabilité des sols au risque de la salinisation. Sur le terme du bilan climatique, dont le taux d'évapotranspiration élevée, une obligation pour mettre en œuvre un système d'irrigation efficace et qui couvre le déficit hydrique durant toute l'année au niveau de notre zone d'étude.



CHAPITRE 3 :

Qualité de l'eau d'irrigation et la dynamique verticale et horizontale de la salinité des sols

« Chaque bonne réalisation, grande ou petite, connaît ses périodes de corvées et de triomphes; un début, un combat et une victoire ».

Gandhi

1. Introduction

La salinité des sols devient de plus en plus une menace réelle de dégradation des terres, en particulier dans les zones arides (Scudiero et al., 2016). Elle est considérée comme un problème environnemental mondial qui affecte la durabilité de l'utilisation des terres agricoles et réduit la productivité (Essien & Ubit, 2013), conduisant de plus en plus à la désertification (Yakup et al., 2017 ; Jiang et al., 2017). Environ 20% des terres irriguées dans le monde sont affectées par les sels (Metternicht, 2005), et les zones affectées par les sels augmentent à un rythme de 10% par an (Shrivastava & Kumer 2015). Dans les régions arides où les précipitations sont faibles et où les taux d'évaporation sont extrêmement élevés, en raison d'une mauvaise gestion des ressources en eau, d'une irrigation fréquente et d'un système de drainage interne insuffisant pour évacuer les sels apportés par l'eau d'irrigation, les sels solubles s'accumulent et favorisent les processus de salinisation qui peuvent affecter le rendement agricole. Cela peut conduire à une menace pour la croissance des cultures (Bailey et al., 2019), imposant également une toxicité ionique, une fragilité osmotique et un stress oxydatif (Shrivastava & Kumer, 2015). De plus, une perte irrémédiable des systèmes agricoles oasiens en réduisant la qualité des sols, ce qui limite les économies régionales et leur développement durable (Yao et al., 2015).

La prévention et le traitement des problèmes liés à la salinisation des sols sont devenus l'objet de recherches, notamment dans les zones arides où le système agricole est la principale source d'alimentation (Benslama et al., 2020 ; Abdennour et al., 2019 ; Semar et al., 2019). Pour comprendre leur distribution et explorer ces mécanismes, plusieurs études ont également été menées pour suivre la dynamique de la salinisation des sols, les variations verticales et horizontales (Liu et al., 2020). Ces études aident à planifier une stratégie de réhabilitation appropriée, qui peut être une solution essentielle pour protéger l'environnement et réduire l'impact négatif, assurer la stabilité et garantir les rendements agricoles, en particulier dans les zones arides (Yang et al., 2020) et, en outre, pour protéger l'environnement et réduire les pertes économiques en termes d'agriculture (Allbed & Kumar, 2013).

En Algérie, plusieurs études ont été menées pour suivre et comprendre les processus de salinité des sols. Ainsi, Abdennour et al. (2020) ont proposé un modèle d'estimation de la salinité des sols dans la région d'El Ghous Sud en Algérie, irriguée par des eaux souterraines salines. Boudibi, et al. (2019) ont mis en garde contre le risque élevé de salinisation dans la région de Biskra en raison de la salinité des eaux souterraines détectée par des approches SIG et

géostatistiques. Berkal, et al. (2014) ont testé la capacité des relevés de conductivité EM 38 à décrire les changements spa-tiotemporels de la salinité du sol à différentes profondeurs dans une palmeraie irriguée de la région de Ouargla.

Le climat aride du sud de l'Algérie couplé à la rareté des sources d'eau oblige les agriculteurs de revenir à la technique de pompage des eaux souterraines (Kuper et al., 2016). D'une part, cela permet d'appliquer des quantités excessives d'eau d'irrigation pour répondre aux besoins des cultures, et d'autre part, le sol a une texture sableuse qui fait remonter la nappe phréatique à la surface du sol, affectant la zone racinaire des champs agricoles (Askri et al., 2010). Ces concentrations élevées de sel dans l'eau d'irrigation peuvent entraîner une présence accrue de sel dans la zone racinaire et une accumulation dans le profil du sol, ce qui entraîne une réduction de la croissance et de la production des cultures agricoles (Grattan & Oster, 2003). La conductivité électrique (CE) mesure la présence de sels dans l'eau et est directement proportionnelle à la concentration de sels en solution (Palacios & Aceves, 1970).

La conductivité électrique du sol a été utilisée comme indicateur de la salinité du sol (Mcctcheon et al., 2006), l'excès de salinité réduit l'activité osmotique et interfère avec l'adsorption de l'eau et des nutriments du sol par la plante, donc plus la CE est élevée, moins l'eau est disponible pour les plantes (Nag & Ghosh, 2013). Parmi les différentes méthodes utilisées pour déterminer la CE, le rapport sol/eau (1:5) présente l'avantage de la simplicité, du temps et du coût réduit par rapport aux extraits de pâte à saturation (Franzen, 2007).

Les chercheurs s'intéressent de plus en plus aux techniques géostatistiques et cartographiques qui estiment les valeurs à des endroits non échantillonnés pour traiter et interpoler des cartes de données spatio-temporelles sur la salinisation des sols (Jordan et al., 2004 ; Wang et al., 2018). Le krigeage ordinaire (KO) est l'une des méthodes de krigeage les plus utilisées (Meul & Van Meirvenne, 2003) qui joue un rôle majeur dans la prédiction efficace de la variable de propriété du sol sur la distribution spatiale et l'interpolation des cartes de propriété du sol (Sumfleth & Dutmann, 2008). Ces arguments sont utilisés par la majorité des chercheurs qui ont utilisé KO pour prévenir et étudier la salinité des sols (Juan et al., 2011).

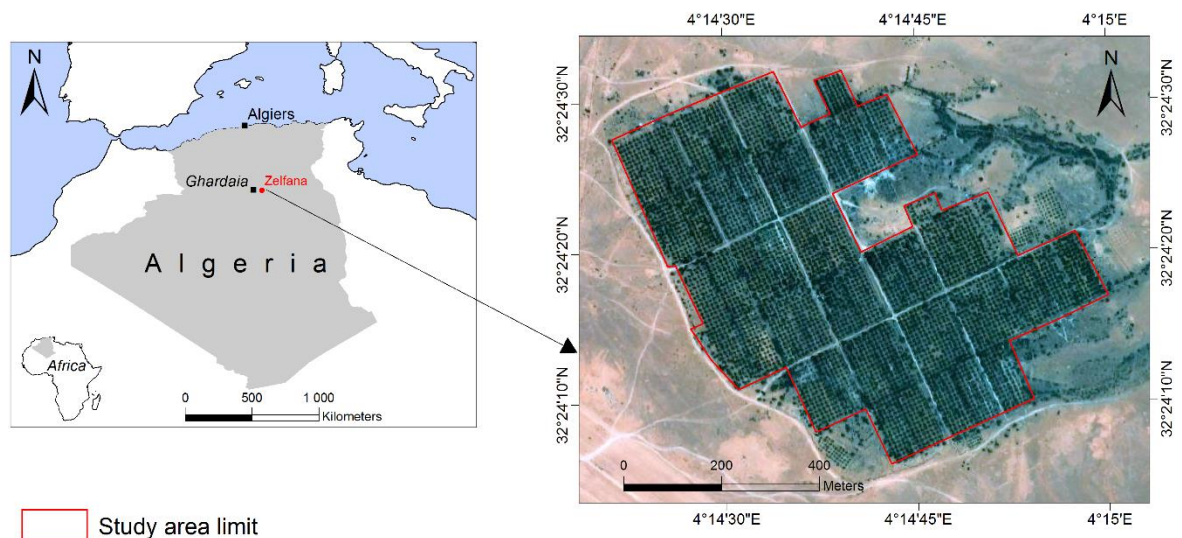
Pour assurer une gestion efficace qui maintient des pratiques agricoles durables, il est essentiel de surveiller régulièrement la salinité du sol par des enquêtes pédologiques saisonnières afin de mieux comprendre le risque qu'elle représente. Ceci peut être réalisé en cartographiant la conductivité électrique (CE) du sol (Richards, 1954). C'est dans ce contexte

que notre objectif de recherche vise à (1) identifier et estimer le mouvement du sel le long du profil du sol et détecter les zones ayant des problèmes de salinité et (2) fournir des suggestions pour une meilleure gestion du système de culture du palmier.

2. Matériel et méthodes

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude est une palmeraie connue sous le nom de « El Hadjra el Bidha » ($32^{\circ} 24'5,80''$ – $32^{\circ} 24'31,79''$ de latitude nord; $4^{\circ} 14'37,40''$ – $4^{\circ} 14'41,70''$ de longitude est) et situé à Zelfana, une commune de la province de Ghardaïa, au centre de l'Algérie. Il est à 67 km à l'est de la wilaya de Ghardaia, (Figure 14). Il a une extension de 42 ha, qui est divisé en parcelles d'une superficie d'environ 1 ha, Ceux-ci ont été plantés de palmiers dattiers (*Phoenix dactylifera L.*) en 1975 (selon les comptes des agriculteurs) avec un espacement de 9 m entre les plants. Ce site était une ancienne oasis, divisée en parcelles individuelles de presque la même taille. La densité de la plante est d'environ 160 palmiers / ha, et la hauteur moyenne se situe entre 8–10 m.



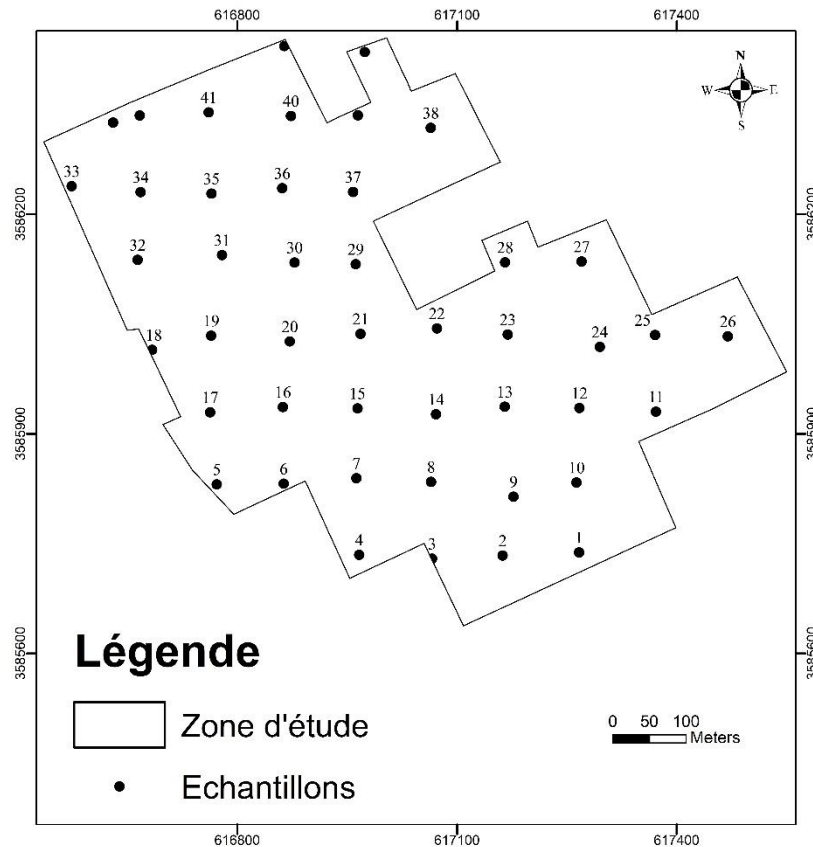


Figure 14. Localisation de la zone d'étude de Zelfana (Algérie) et position des échantillons de sol dans les vergers.

La région fait partie du Grand Désert, qui se caractérise par des hivers courts et rigoureux, tandis que les étés sont longs et chauds. La température moyenne annuelle dépasse 25°C , Juillet est le mois le plus chaud ($41,50^{\circ}\text{C}$), tandis que janvier est le mois le plus froid ($6,20^{\circ}\text{C}$). Les pluies sont rares et irrégulières, avec des précipitations annuelles moyennes allant de 100 à 200 mm / an, avec une évaporation de 2000 mm par an (ONM, 2017).

La zone d'étude est caractérisée par une topographie presque égale, avec une différence d'altitude ne dépassant pas 1,5 m entre le point le plus haut et le point le plus bas de la palmeraie (point le plus élevé au N au point le plus bas au SE); la pente est inférieure à 0,5%. Les sols de la région sont principalement classés comme Psamment dans la taxonomie des sols (Soil Survey Staff, 1999); ce sont des sols à texture sableuse, constitués de dépôts de sable non consolidés ou arénosols, compte tenu de la base de référence mondiale pour les ressources en sol (WRB, 2015). Après une culture intensive pendant de longues périodes, les sols agricoles de ces oasis peuvent être considérés comme des Anthrosols (WRB, 2015).

La pente de la palmeraie va du nord-ouest (NW) au sud-est (SE) de la zone d'étude, déterminant le débit d'eau. Là se trouve un cours d'eau naturel non permanent où l'eau ne coule par intermittence que quelques jours par an, Ce système agit comme un drainage naturel pour la zone et l'oasis.

Le sol est irrigué avec de l'eau de l'intercalaire continental, Chaque parcelle est alimentée par un réseau tertiaire de canaux en béton ouverts (Seguias) qui acheminent l'eau jusqu'aux entrées des parcelles. L'irrigation est organisée en rotation avec un tour d'eau par semaine, et les agriculteurs font déterminer l'eau en fonction du nombre de palmeraies. La norme recommandée pour une palmeraie est supérieure à $70 \text{ L} / \text{s} \cdot \text{ha}$, et le cycle quotidien ne dépasse pas 7 jours (Benzouche & Chehat, 2010). Dans notre cas, la quantité d'irrigation ne dépasse pas $50 \text{ L} / \text{s} \cdot \text{ha}$, et le cycle quotidien est dans certains cas de 8 jours. En été, le montant diminue jusqu'à 50%. Cette quantité ne couvre pas les besoins des plantes. De plus, les fossés et canaux sont en mauvais état pour assurer un bon drainage, Les canaux de drainage ont une profondeur d'environ 1 m, situés autour des vergers, formant le système de drainage. Cependant, l'abandon des fossés conduit à une stagnation des eaux de drainage en raison d'une mauvaise gestion du système.

Afin d'améliorer la fertilité organique du sol, les agriculteurs ajoutent environ 20 à 30 kg de fumier de mouton et le recouvrent de sable au fond de chaque palmier dattier pour préparer la culture.

2.2. Échantillonnage et analyse du sol

Les prélèvements de sol ont été effectués au cours des deux premières semaines de mai (avant la période de sécheresse estivale) et de novembre (après une période extrêmement sèche) en 2018. Un échantillonnage systématique a été appliqué et les données spatiales ont été créées à l'aide d'un système d'information géographique (SIG), pour couvrir toute la zone d'étude ; ce plan d'échantillonnage localise 45 points, un point par parcelle. A chaque point, deux échantillons de sol ont été prélevés à deux profondeurs (A1:0-30cm) et (A2:30-60cm), transférés au laboratoire, séchés à température ambiante et tamisés sur un tamis de 2mm (terre fine). Quinze échantillons de sol seulement ont été choisis au hasard pour déterminer la texture du sol en utilisant la méthode de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962). Comme il est très difficile d'utiliser une pâte saturée pour déterminer la conductivité électrique avec des sols à texture sableuse (He et al., 2015), nous avons adopté la méthode du rapport d'extraction aqueux 1:5

suivant la procédure décrite par le laboratoire de salinité des États-Unis (Richards, 1954) pour tous les échantillons collectés (180 échantillons). Cette méthode permet une extraction maximale des sels quelle que soit la texture du sol, contrairement aux extraits pâteux saturés (Semar et al., 2019).

2.3. Échantillonnage et analyse de l'eau

Les eaux d'irrigation et de drainage ont été analysées. Quatre échantillons ont été prélevés à la source d'eau d'irrigation située au nord-ouest et quatre à la sortie des eaux de drainage située au sud-est (fin du réseau de drainage) (Figure 15). Les échantillons ont été prélevés pendant la saison sèche (période d'irrigation) et stockés directement à une température inférieure à 4°C pour déterminer le pH, la conductivité électrique, la salinité et les principaux cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}). Na^+ et K^+ ont été mesurés à l'aide d'un photomètre à flamme ; Ca^{2+} et Mg^{2+} ont été analysés par la méthode de titrage complexométrique à l'EDTA (Hussain et al., 2010).

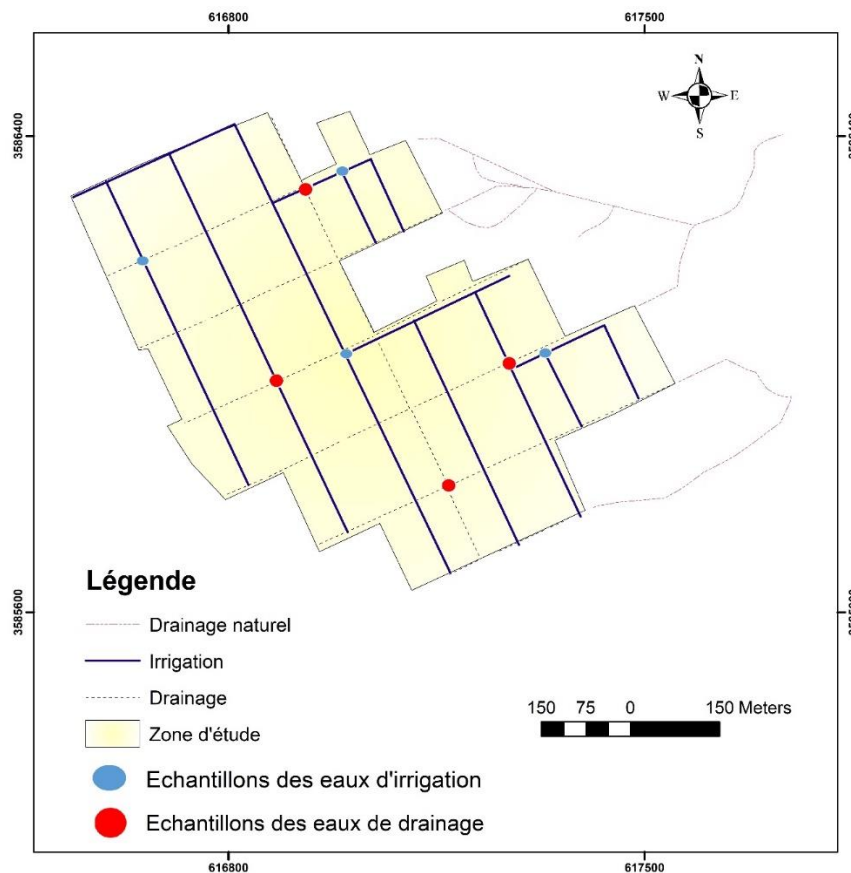


Figure 15. Distribution de l'eau d'irrigation et drainage dans la zone d'étude, Les points d'échantillonnage d'eau irriguée et drainée sont indiqués.

2.4. Analyse statistique

Une analyse statistique standard a été effectuée, incluant la moyenne, les valeurs minimales (min) et maximales (max), la médiane, la variance, l'écart-type (ET), le coefficient de variation (CV%), l'aplatissement et l'asymétrie de chaque paramètre. Pour cette analyse préliminaire, la normalité des données a été évaluée avant d'utiliser la géostatistique pour obtenir les cartes de prédiction. La normalité de chaque ensemble de données a été vérifiée par des tests (QQ plot) pour s'assurer d'une distribution normale.

2.5. Cartographie à l'aide du krigeage ordinaire

Le krigeage ordinaire (KO) est la méthode la plus utilisée (Lefohn et al., 2011) pour estimer les valeurs d'une variable cible dans des emplacements non échantillonnés $Z'(x_0)$, en utilisant les données du voisinage $Z(x_i)$ - $i = 1, 2 \dots n$ - (Wackernagel, 1994), comme suit :

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (1)$$

λ_i renvoie le poids attribué à l'observation i . Selon (Webster & Olivier, 2007), les poids sont attribués à chaque échantillon de manière à ce que la variance de l'estimation soit minimisée et que les estimations soient sans biais. Cette méthode est compatible avec un outil de quantification de la corrélation et de la similarité spatiale des données mesurées, en mesurant la variabilité entre le point $Z(x_i)$ et ses voisins $Z(x_i + h)$ à une distance h donnée.

$$\gamma(h) = 1/2N(h) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

Où $Z(x_i)$ est la valeur mesurée de la propriété du sol au point x_i , $\gamma(h)$ est le semivariogramme pour une distance de décalage h entre les observations $Z(x_i)$ et $Z(x_i+h)$, et $N(h)$ est le nombre de paires de données séparées par une distance de décalage égale à h (Wang & Shao, 2013).

Pour sélectionner le modèle le plus approprié pour prédire la salinité du sol, les procédures géostatistiques ont été évaluées à l'aide d'indicateurs de validation croisée et de paramètres supplémentaires tels que (pépite, seuil et portée). Ces paramètres statistiques indiquent si le modèle était raisonnable pour la production de cartes de salinité des sols.

Dans notre étude, deux indices principaux ont été calculés :

- Erreur moyenne :

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z^*(x_i) - Z(x_i)) \quad (3)$$

- Erreur quadratique moyenne :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z^*(x_i) - Z(x_i))^2}{N}} \quad (4)$$

Où $Z(x_i)$ est la valeur observée au lieu i , $Z^*(x_i)$ est la valeur attendue au lieu i , et n est la taille de l'échantillon. Le carré de la différence en tout point donne une indication de l'ampleur des différences, de sorte qu'une valeur RMSE proche de zéro illustre la précision de la prédiction du modèle. On suppose que si le modèle de variogramme est correct, la RMSE devrait être proche de zéro (Fourati et al., 2017).

Selon Cambardella, et al. (1994), le rapport pépité/palier peut être utilisé comme un indicateur de dépendance spatiale (Tableau 5).

Tableau 5. Tableau des indicateurs de dépendance spatiale.

Rapport pépité/seuil	$\leq 25\%$	25% - 75%	$\geq 75\%$
Dépendance spatiale	Fortement	Modérément	Faible

Les poids des points pour KO sont calculés en ajustant un modèle théorique au variogramme empirique, en considérant le modèle avec la plus petite erreur par le critère des moindres carrés comme étant le meilleur (Boubehziz et al., 2020). Avant d'appliquer le modèle KO, plusieurs modèles ont été testés afin de choisir le meilleur ajustement (exponentiel, linéaire, gaussien, etc.). Le modèle sphérique a donné l'erreur d'estimation la plus faible et a été choisi comme le meilleur.

Les erreurs d'estimation les plus faibles ont été trouvées dans le modèle sphérique qui a donc été choisi :

$$\text{Modèle sphérique} = \text{pépité} + \text{seuil} \left[1.5 \left(\frac{\text{lag}}{\text{portée}} \right) - 0.5 \left(\frac{\text{lag}}{\text{portée}} \right)^3 \right] \quad (5)$$

Le traitement et l'analyse des données ont été effectués à l'aide du logiciel ArcGis 10.2 et le traitement statistique avec Microsoft Excel ©.

3. Résultats et discussion

3.1. Qualité de l'eau d'irrigation

La salinité du sol a tendance à augmenter proportionnellement à la concentration de sels dans l'eau d'irrigation. La concentration de sels dans le sol peut être de deux à six fois la conductivité électrique de l'eau d'irrigation (Pérez-Sirvent et al., 2003). Après la caractérisation physico-chimique de l'eau d'irrigation utilisée dans les oasis de Zelfana (W. Ghardaïa, Algérie) ainsi que de l'eau de drainage sont dans (Tableau 6). Les valeurs de pH sont neutres à légèrement alcalines pour les deux types d'eau. D'autre part, la CE varie considérablement entre l'eau d'irrigation et l'eau de drainage, augmentant la valeur de la CE dans l'eau de drainage de trois fois. Cette augmentation peut être liée à l'enrichissement de cette eau en électrolytes du sol par lixiviation. La différence entre le maximum et le minimum suggère l'existence d'une hétérogénéité dans la salinité du sol, source principale des sels dans l'eau de drainage.

Tableau 6. Statistiques descriptives de l'analyse de l'eau.

Paramètre	IRRIGATION						DRAINAGE					
	Moy	Max	Min	ET	CV%	median	Moy	Max	Min	ET	CV%	median
pH	7,6	7,9	7,3	0,31	4,1	7,6	7,6	7,8	7,5	0,1	1,7	7,6
CE(μS/cm)	1897	2150	1320	389	20,5	2058	5921	6680	5258	588,1	9,9	5872
Salinité (mg/l)	911	1191	980	305	33,4	971	3410	3600	3020	263,8	7,7	3510
Na ⁺ (meq/l)	6,1	6,5	5,67	0,4	6,1	6,2	17,4	18,1	16,3	0,8	4,5	17,6
Ca ²⁺ (meq/l)	9,1	12,5	6,41	2,7	29,4	8,8	34,6	41,0	30,1	4,8	13,8	33,8
Mg ²⁺ (meq/l)	5,6	7,5	4,6	1,3	22,5	5,2	16,6	24,5	10,0	6,6	39,9	15,9
K ⁺ (meq/l)	0,4	0,4	0,4	0,1	6,0	0,4	0,9	1,0	0,7	0,1	9,9	0,8
Cl ⁻ (meq/l)	10,4	12,9	8,6	1,8	17,2	10,1	25,3	31,4	18,6	6,1	24,3	25,7
NO ₃ ⁻ (meq/l)	0,4	0,5	0,2	0,1	30,7	0,4	0,9	1,4	0,3	0,4	49,2	0,9
SO ₄ ²⁻ (meq/l)	2,9	3,0	1,9	0,5	18,6	2,5	3,1	4,1	2,1	0,8	26,2	3,1
SAR	2,25	2,41	2,06	0,25	10,4	2,4	3,43	3,64	3,16	0,34	9,9	3,4

La teneur en Na⁺, Ca²⁺ et Mg²⁺ a augmenté dans l'eau de drainage dans la même proportion que la conductivité électrique, ce qui peut prouver que le sol possède une grande réserve de ces éléments, responsables de la salinité. Cependant, si l'on considère les anions, le chlorure augmente de deux fois et demie. Par contre, les nitrates et les sulfates restent quasiment stables.

L'analyse de l'eau d'irrigation de la palmeraie de Zelfana, provenant de la nappe de l'Albien, cette nappe montre qu'elle est admissible pour les vergers de palmiers (Larnaude, 1949).

3.1.1. Analyse multivariée des propriétés d'eau

Les coefficients de corrélation entre les paramètres dans les échantillons des eaux d'irrigations/drainages sont indiqués dans le tableau. Les corrélations les plus élevées ont été constatées entre : 1) le Sodium avec la CE et la Salinité ($r=0,97$) ; 2) le Calcium avec la CE et la Salinité et le Sodium ($r=0,91 ; 0,91 ; 0,94$) respectivement ; 3) le Magnésium avec le Calcium ($r=0,91$) ; 4) le Potassium avec la CE, Salinité, le Sodium, le Magnésium ($r=0,99 ; 0,97 ; 0,98 ; 0,92$) respectivement ; 5) le Chlorure avec la CE, Salinité, le Sodium et le Potassium ($r=0,98 ; 0,96 ; 0,98 ; 0,92$) respectivement ; 6) le SAR avec la CE et la Salinité ($r=0,90 ; 0,91$) respectivement. Enfin, le bicarbonate présentait de faibles corrélations avec les autres paramètres. La corrélation élevée entre le Sodium et le SAR témoignent d'un risque élevé de sodicité (Tableau 7).

Tableau 7. Coefficients de corrélation (r de Pearson) entre 10 paramètres. Eau d'irrigation/drainage

	pH	CE	Salinité	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SAR	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
CE	0,27									
Salinité	0,16	0,97								
Na ⁺	0,19	0,98	0,99							
Ca ²⁺	0,16	0,91	0,91	0,94						
Mg ²⁺	-0,01	0,71	0,71	0,75	0,91					
SAR	0,19	0,90	0,91	0,89	0,70	0,39				
K ⁺	0,18	0,98	0,96	0,98	0,92	0,71	0,88			
Cl ⁻	0,34	0,93	0,93	0,92	0,75	0,44	0,97	0,91		
NO ₃ ⁻	0,21	0,72	0,58	0,64	0,70	0,62	0,48	0,76	0,55	
SO ₄ ²⁻	0,20	0,57	0,40	0,46	0,52	0,52	0,37	0,57	0,38	0,90

Le faciès chimique des eaux a été déterminé selon le diagramme de Piper. Le diagramme de Riverside (1954) a été utilisé pour évaluer le risque de salinisation et de la sodisation des sols.

WILCOX (1948) a proposé une méthode pour évaluer les eaux d'irrigation, basée sur le pourcentage de sodium et la conductivité électrique et le pourcentage de sodium est calculé selon la formule :

$$Na^+ = \frac{(Na^+ + k^+)}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + k^+)} \times 100$$

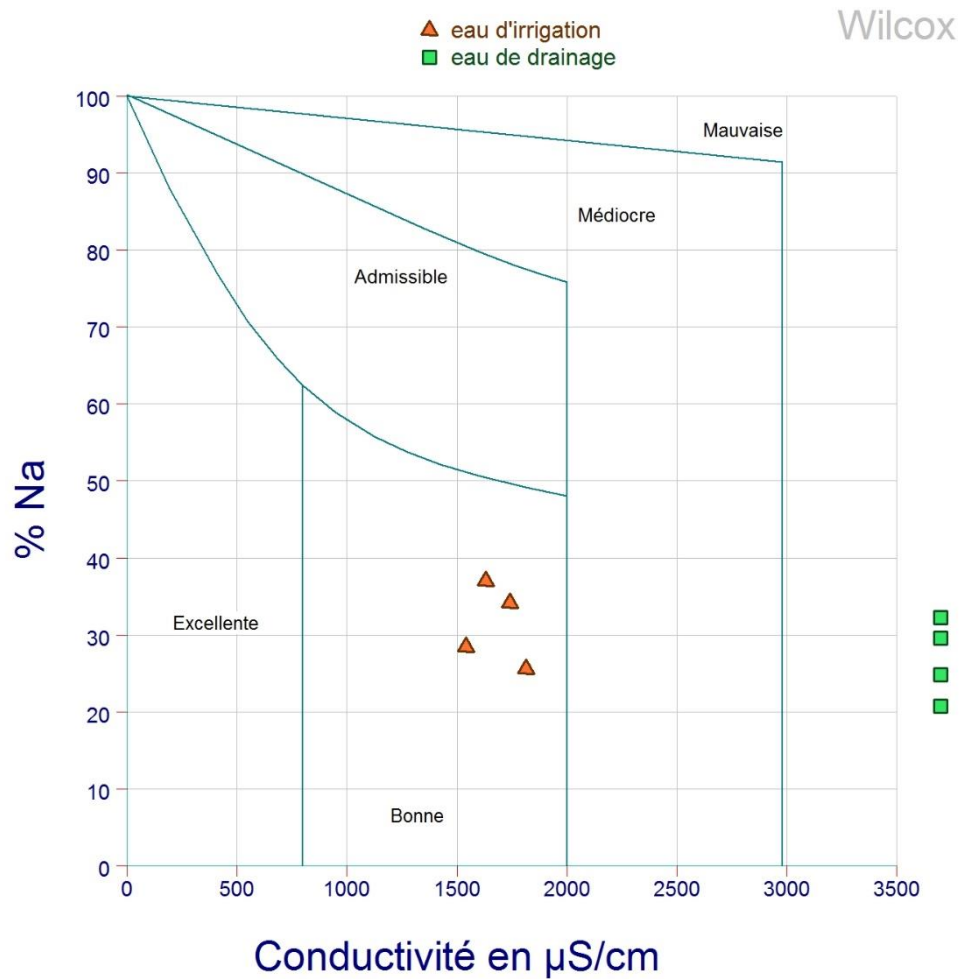


Figure 16. Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation/drainages (Diagramme de WILCOX).

- A partir du diagramme de WILCOX (Figure 16), deux classes d'eau sont distinguées :
- La classe « Bonne » pour les eaux d'irrigation.
 - La classe « mauvaise » pour les eaux de drainage.

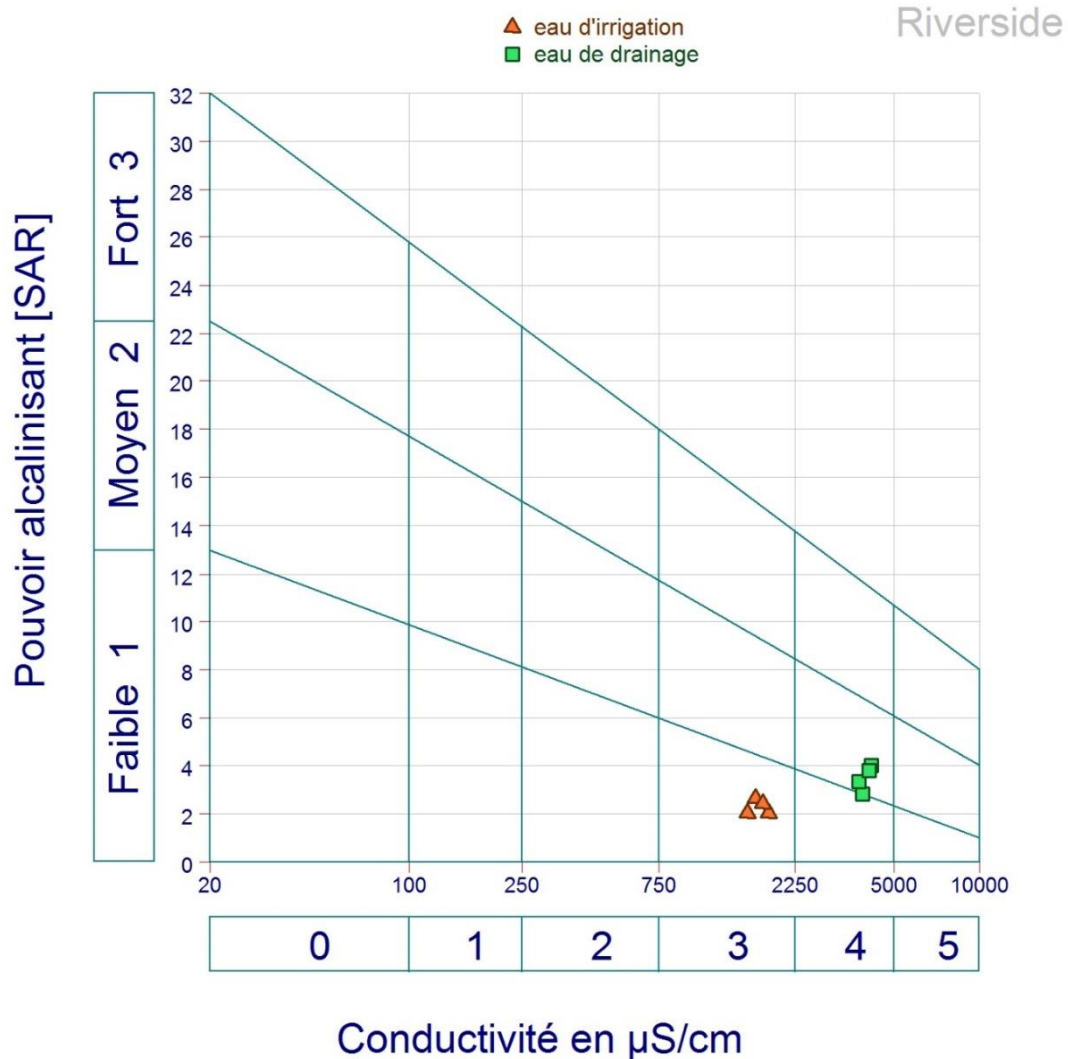


Figure 17. Classification des eaux d'irrigation/drainage sur le diagramme de Riverside.

Après la présentation du diagramme de Riverside (Figure 17), c'est-à-dire l'effet combiné entre la CE et le SAR. Ce diagramme montre que les échantillons de l'eau d'irrigation appartiennent à la classe C3S1 ce qui indique un risque élevé de salinité et un risque faible d'alcalinité. Par ailleurs, les échantillons de l'eau de drainage appartiennent à la classe C4S2 qui indique également d'un risque très élevé de salinité et un risque moyen d'alcalinité. Pour cela, la qualité de ces eaux également d'irrigation peuvent être considérés comme des eaux peu néfastes pour la production de cultures qui ont une tolérance fragile de salinité et même elle perturbe la stabilité structurale du sol à moyen et à long terme.

D'après les résultats de diagramme de PIPER (Figure 18), les échantillons analysés ne présentent pas de cation dominants, remarqué dans le triangle des cations. Ainsi dans le triangle

des anions on remarque une dominance des chlorurées. Le faciès dominant de type presque hyper sulfatée calcique provient principalement de la dissolution des formations carbonatées. L'augmentation de la salinité associée à un faciès chloruré sodique ou sulfaté sodique peut être une conséquence de l'action combinée de différents mécanismes tels que la concentration par évaporation ou le contact avec l'eau salée.

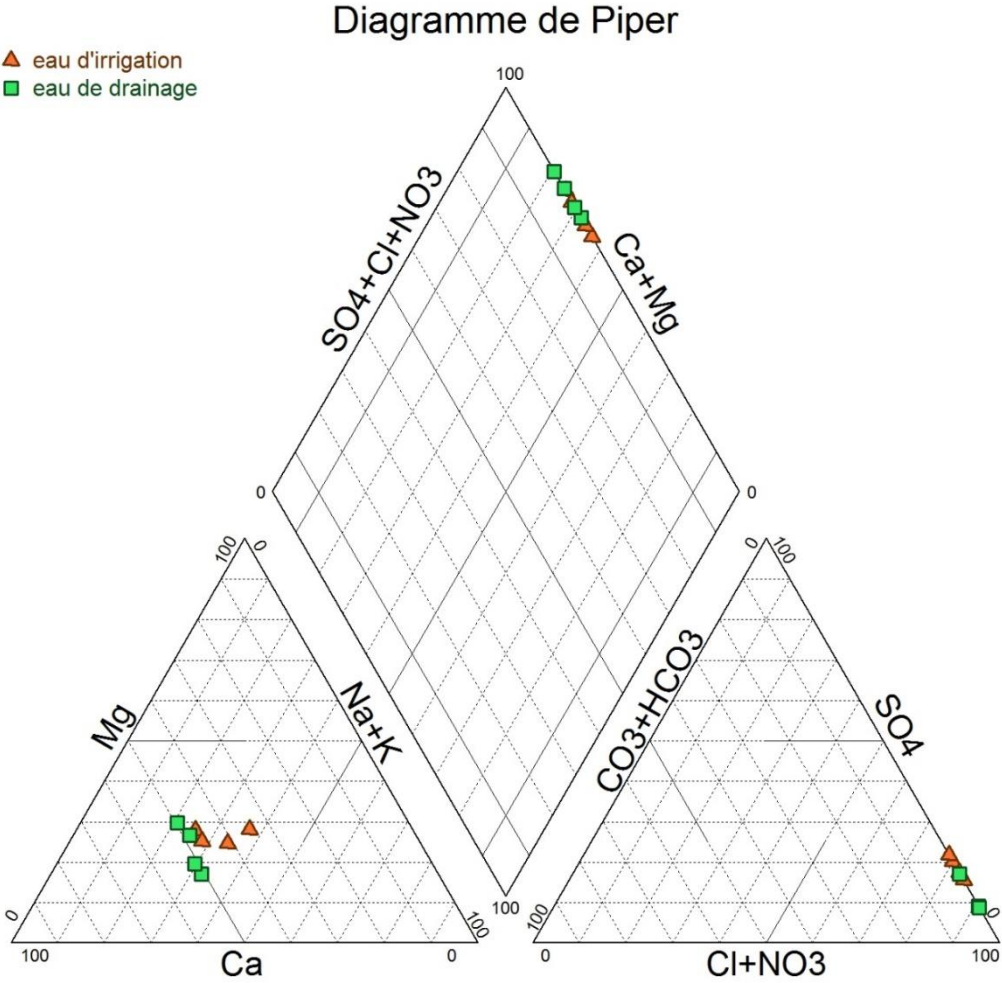
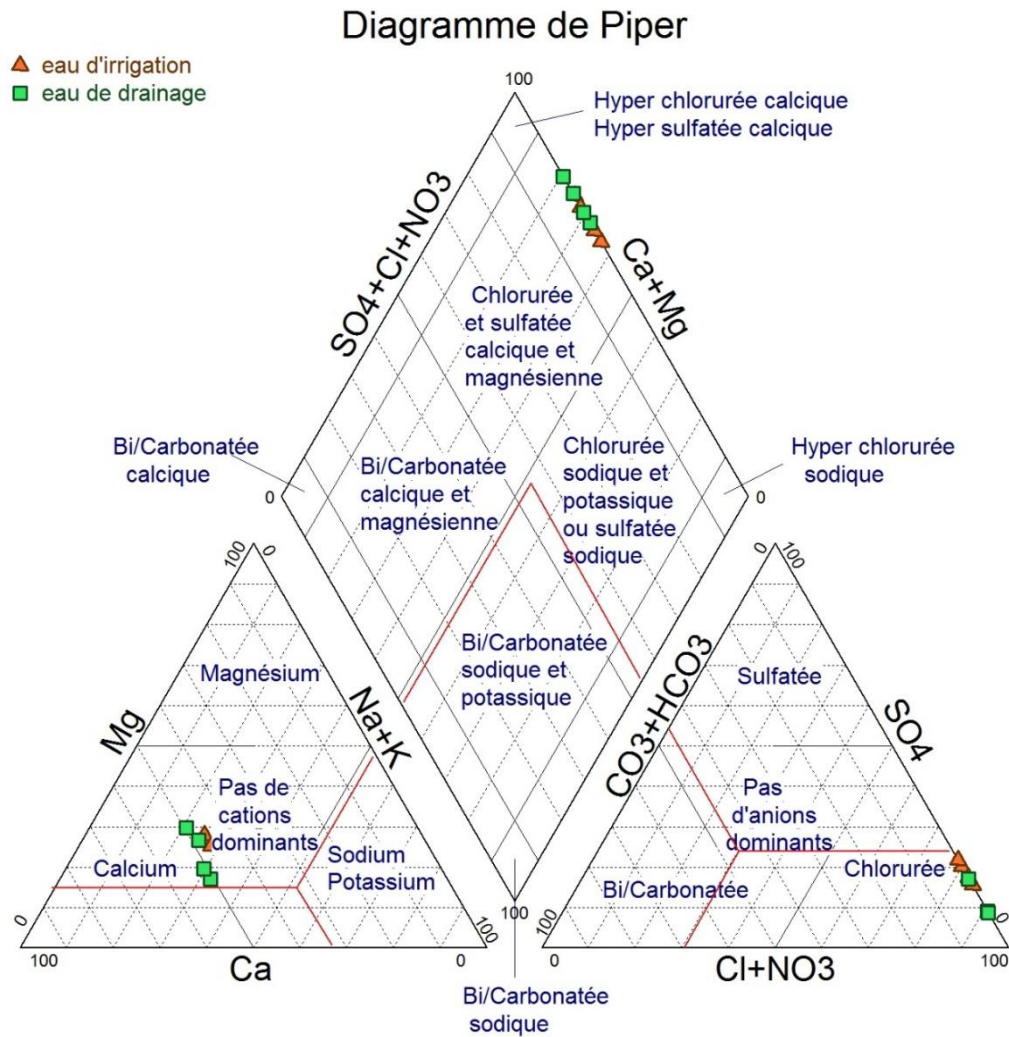


Figure 18. Diagramme de Piper appliqué aux eaux d'irrigation et de drainage.



Suite figure 18.

Selon le diagramme (Figure 19) de Schöeller-Berkaloff les ions dominants des eaux d'irrigations (échantillons 1-4) sont les chlorures et pour les anions et le calcium.

Les concentrations s'ordonnent comme suit :

- Anion : $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$
- Cation : $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$

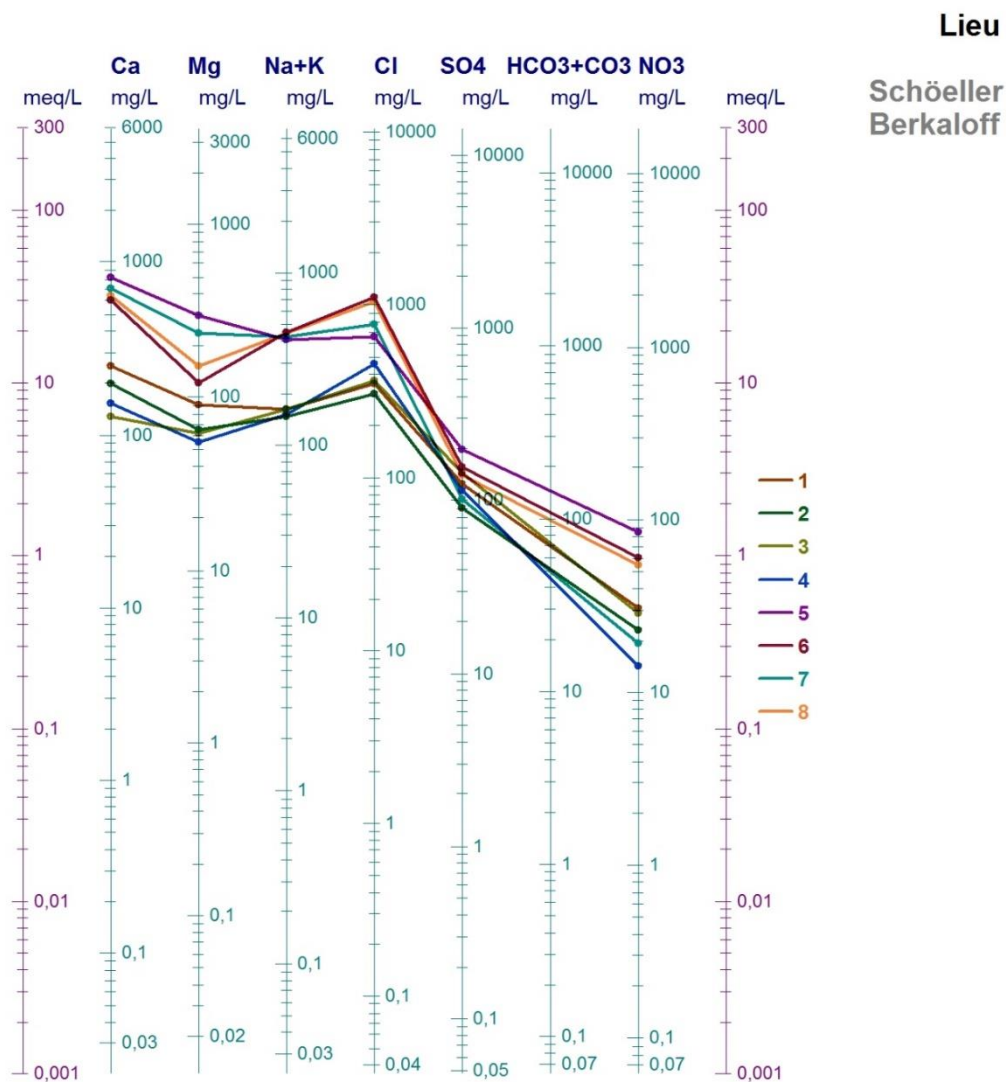


Figure 19. Diagrammes de Schoeller Berkaloff.

Tous ces diagrammes ont été réalisées par le logiciel DIAGRAMMES (Open source).

3.2. Texture du sol

Des échantillons de sol de chaque couche de sol (A1 et A2) ont été analysés pour déterminer la texture et les résultats sont présentés dans le tableau 3 (pourcentages d'argile, de limon et de sable).

Le sol étudié présente une teneur en sable $66 \pm 5,2$ %, limons $23,6 \pm 5,7$ % et un taux d'argile $10,3 \pm 4,9$ % dans la première couche A1. Tandis que la teneur en sable $54,2 \pm 11,8$ %, limons $19,3 \pm 4,4$ % et un taux d'argile $26,5 \pm 10,6$ % dans la deuxième couche A2 (Tableau 8).

Selon la base de référence mondiale pour la ressource en sol (WRB, 2015), la plupart des sols de la zone d'étude ont une texture sableux argileux, limon argileux sableux ou dominant les particules fines et très fines, provenant de dépôts de sable non consolidés. En général, la couche arable a une proportion de sable plus importante que le sous-sol.

Tableau 8. Valeurs statistiques des propriétés physiques du sol.

	A1: 0-30 cm			A2: 30-60 cm		
	Argile %	Limon %	Sable %	Argile %	Limon %	Sable %
Mean	10,3	23,6	66,0	26,5	19,3	54,2
Max	18,6	33,7	71,5	58,5	27,6	71,5
Min	4,6	13,7	51,6	10,6	10,7	47,7
ET	4,9	5,7	5,2	10,6	4,4	11,8
CV%	47,6	24,1	7,9	40,1	22,7	9,7
Asymétrie	0,2	0,1	-1,6	1,9	-0,1	-2,1
Aplatissement	-1,2	-0,5	3,1	6,0	0,5	6,9
Médiane	10,5	23,8	67,5	24,7	19,5	55,6

Cette texture (Figure 20) favorise la dissolution et le lessivage des éléments chimiques en présence de teneurs faibles en argiles et en matière organique et influe sur les propriétés physico-chimiques du sol.

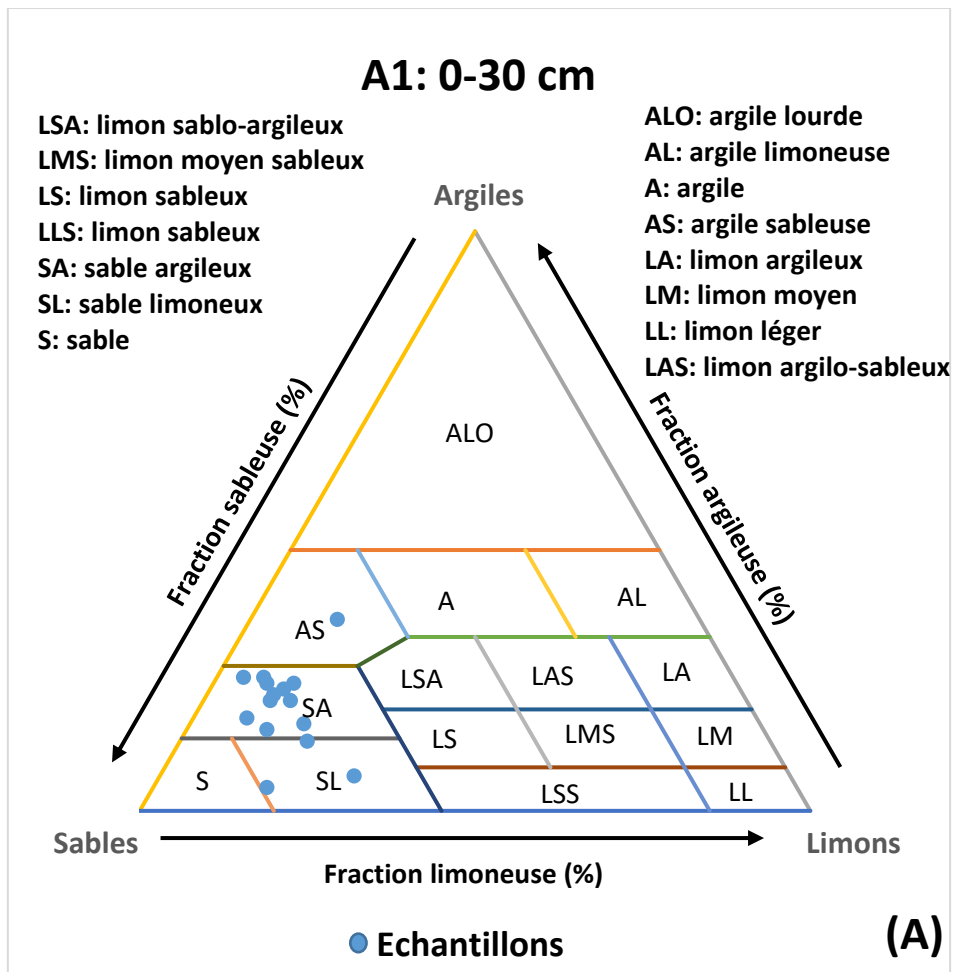
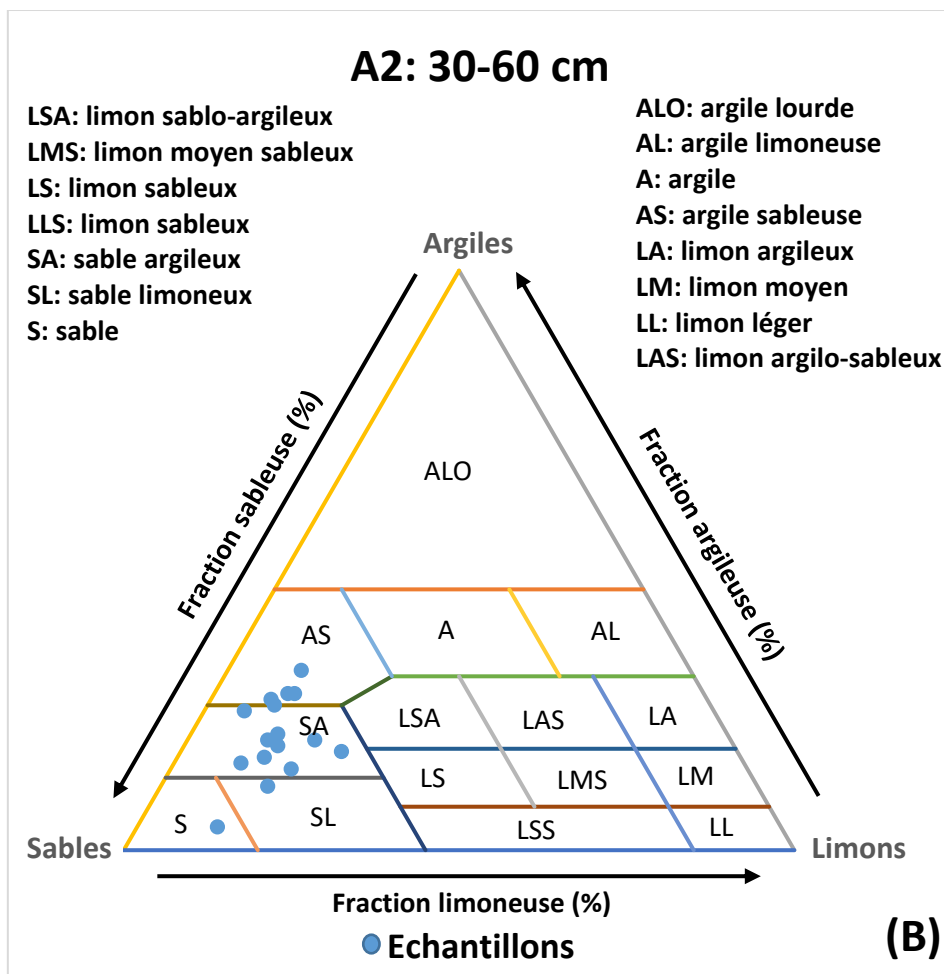


Figure 20. Triangle texturale des deux couches du sol : **(A)** A1 : 0-30cm ; **(B)** A2 : 30-60cm.



Suite figure 20.

3.3. Salinité du sol

Les résultats de la CE du sol sont présentés dans le tableau 9. La CE a varié de 0,1-7,3 dS/m avec un coefficient de variation de 1,3 (A1) et de 0,3-5,2 ds/m (A2) dans la première période. Dans la seconde, ces valeurs varient de 0,2 à 9,9 et 0,2-6,3 ds/m pour les deux profondeurs (Tableau 9).

Tableau 9. Statistiques descriptives de la conductivité électrique (ds/m) du sol.

	MAI		NOVEMBRE	
	A1	A2	A1	A2
Moy	1,9	1,5	2,4	1,6
Max	7,3	5,2	9,9	6,3
Min	0,1	0,3	0,2	0,2
ET	2,0	1,2	3,0	1,6
CV (%)	1,3	0,7	1,3	1,0
Asymétrie	1,2	0,9	1,4	1,3
Aplatissement	0,5	0,4	0,8	0,9

Médiane	0,8	1,2	0,6	0,6
----------------	-----	-----	-----	-----

La dynamique de la salinité du sol, le mouvement du sel entre les profils et au cours du temps, a présenté des différences en considérant deux facteurs : la profondeur et la période.

En prenant en considération uniquement la profondeur, les valeurs négatives révèlent une accumulation de sel en profondeur et les valeurs positives une accumulation à la surface (terre végétale). D'autre part, en fonction de la période, les valeurs négatives et positives indiquent les différences de l'accumulation de sel dans la même couche de sol.

Le test QQ plot a montré que les valeurs de la salinité du sol se conforment à une distribution normale pendant les deux périodes et aussi pour les deux profondeurs, indiquant que les données sont appropriées pour l'analyse géostatistique proposée.

Le tableau 10 montre le meilleur modèle théorique (sphérique) ajusté pour les deux saisons et les deux profondeurs de sol. Les cartes de la distribution spatiale de la dynamique de la salinité ont été obtenues en interpolant les valeurs de la différence entre les couches de conductivité électrique selon le Krigeage Ordinaire. Ces données de conductivité électrique ont été ajustées en utilisant le modèle sphérique et les paramètres d'ajustement.

La salinité du sol a montré une forte variabilité spatiale aux deux profondeurs pendant chaque période d'échantillonnage. Le modèle sphérique et les éléments d'ajustement ont fourni la meilleure erreur quadratique moyenne (RMSE), proche de 1 et l'erreur moyenne (ME), proche de 0.

Durant la dynamique du sel dépendant du profil, les valeurs ME étaient de 0,02 et 0,02, les valeurs RMSE étaient de 1,43 et 2,36 pour les cartes représentant respectivement $\Delta(M1-M2)$ et $\Delta(N1-N2)$. Au cours de cette période, les valeurs ME étaient de 0,065 et 0,005, les valeurs RMSE étaient de 3,65 et 1,764 pour les cartes représentant respectivement $\Delta(M1-N1)$ et $\Delta(M2-N2)$ comme le montre le Tableau 5. Cela montre que le modèle sphérique décrit correctement le schéma spatial des mouvements du sel et que les cartes thématiques estimées par interpolation du Krigeage ordinaire de la salinité du sol étaient fiables et acceptables pour leur suivi horizontal et vertical. La dépendance spatiale "le rapport pépite/palier" pour la salinité du sol était dans la classe (<25%), ce qui correspond à une forte dépendance spatiale comme le montre le tableau 10. En outre, la portée du modèle sélectionné est de 33,230 m. L'analyse

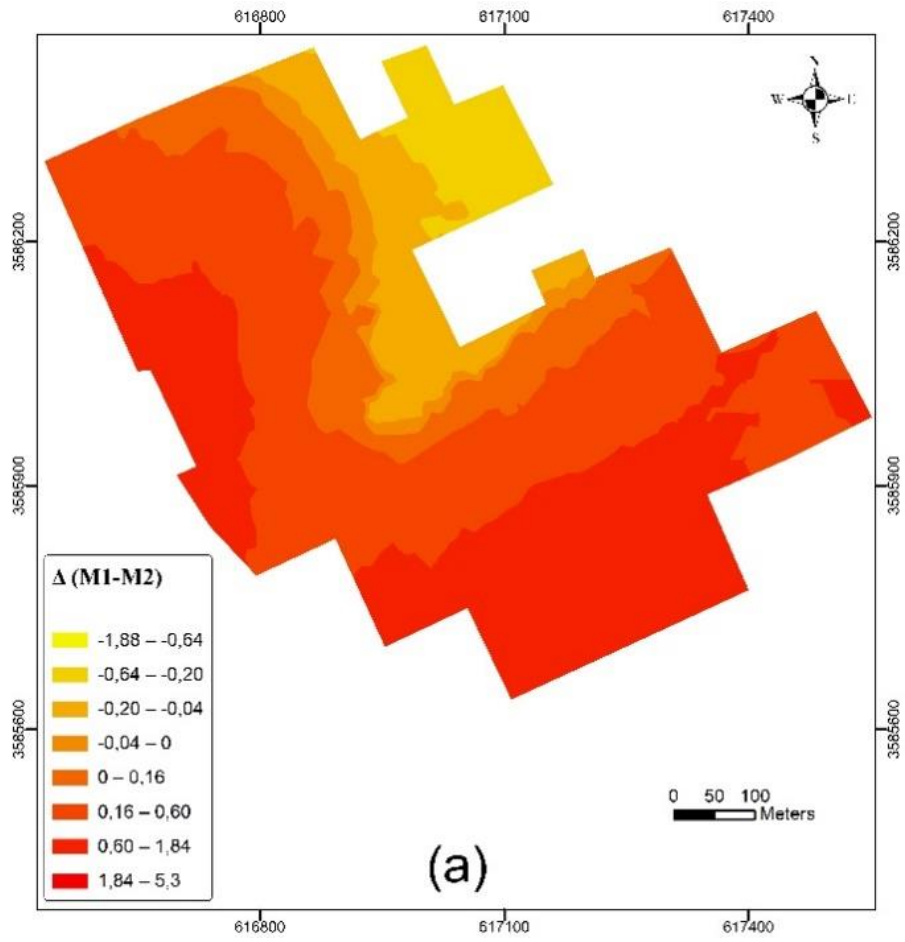
complète a montré que l'utilisation de cette méthode d'interpolation spatiale pour la prédiction de la distribution verticale et horizontale de la salinité du sol est cohérente.

Tableau 10. Paramètres du semi-variogramme et erreurs de prévision du Profil $\Delta(M1-M2)$, $\Delta(N1-N2)$; Période $\Delta(M1-N1)$, $\Delta(M2-N2)$. RMSE: Erreur quadratique moyenne. ME: Erreur moyenne.

	Profile		Période	
	$\Delta(M1-M2)$	$\Delta(N1-N2)$	$\Delta(M1-N1)$	$\Delta(M2-N2)$
Modèle le mieux adapté	Sphérique	Sphérique	Sphérique	Sphérique
Pépite (C0)	0,04	1,01	0,62	0,68
Seuil (C0+C)	2,43	4,88	9,69	2,82
Portée (m)	287,51	120,01	85,01	155,03
Ratio %	1,73	20,69	6,39	24,11
ME	0,02	0,02	0,065	0,005
RMSE	1,43	2,36	3,65	1,764

Afin de mieux gérer la salinité du sol sur une base saisonnière, il est essentiel de comprendre les processus de migration de la salinité du sol, dans les directions horizontale et verticale. Les valeurs de conductivité électrique obtenues ont ensuite été utilisées pour caractériser et quantifier la distribution verticale de la salinité du sol. Figure 21 montrant la distribution du sel dans le profil du sol.

Les différences de salinité du sol pendant les deux saisons ont permis d'établir une série de cartes thématiques entre les couches de surface (A1:0-30 cm) et les couches du sous-sol (A2:30-60 cm) ainsi que son déplacement dans le même profil de sol pendant les deux périodes (Figure 21). La différence entre les couches ("a" et "b", Figure 21) nous donne des informations importantes sur le mouvement des sels. Les valeurs positives indiquent l'accumulation de sels à la surface, tandis que les valeurs négatives donnent des informations sur la migration des sels vers la sub-surface. Le mouvement des sels le long du profil du sol, pendant la première période (mai), révèle une accumulation de surface prédominante observée dans le Sud et l'Ouest de la zone d'étude, tandis que dans les couches de sub-surface, une tendance d'accumulation a été enregistrée dans le Nort-Est. D'autre part, pendant la deuxième période (novembre), la majorité des sels se sont déplacés vers la surface, après la période d'irrigation (Figure 21).



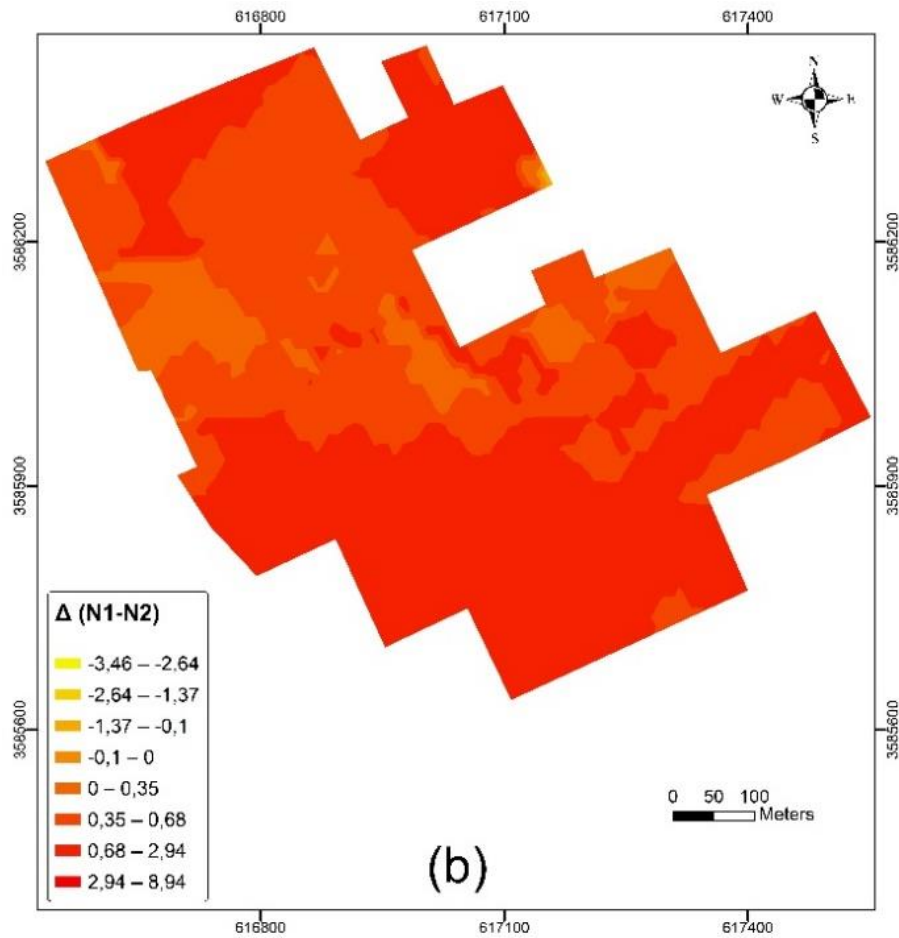
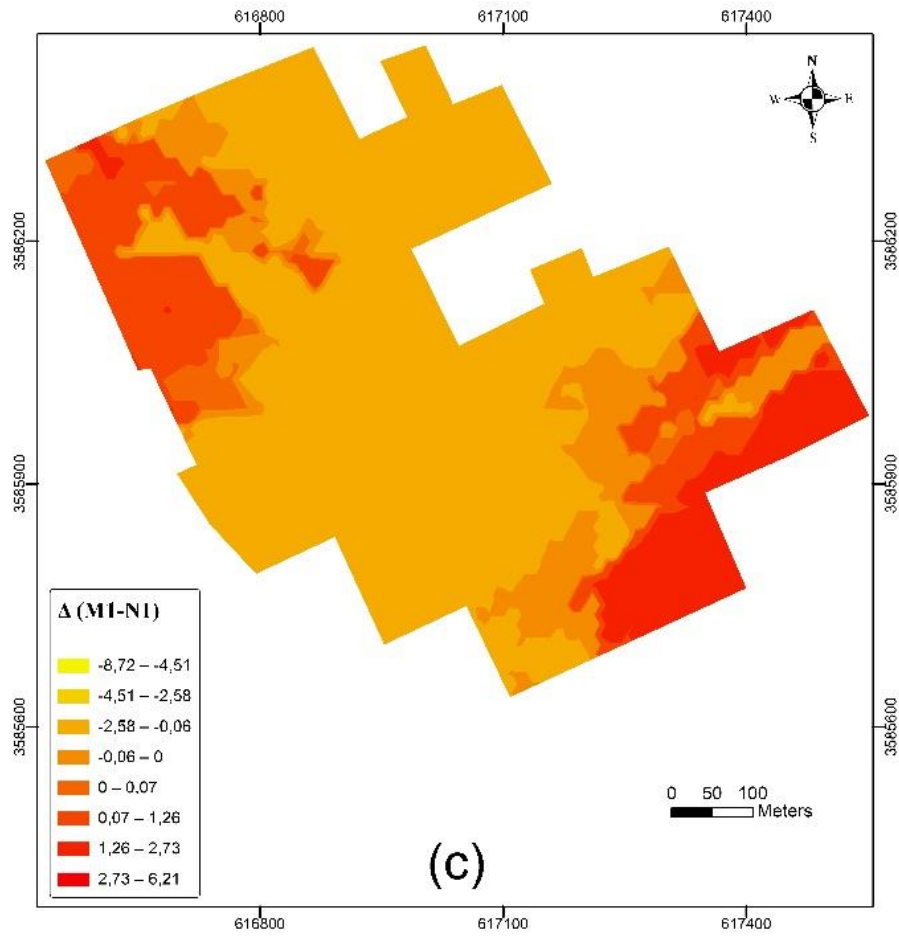
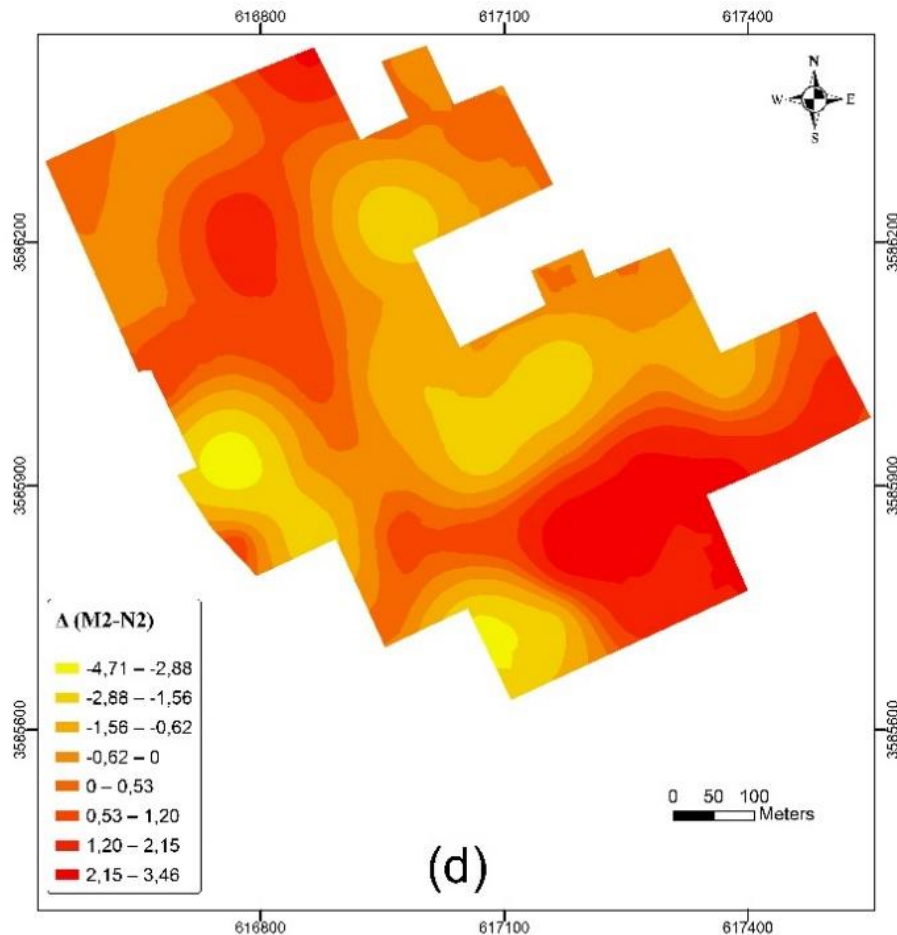


Figure 21. Cartes des différences de salinité du sol (Δ) en utilisant KO : Dans le même profil : Mai (a) $\Delta(M1-M2)$, Novembre (b) $\Delta(N1-N2)$; Dans la même profondeur mais dans les deux périodes Mai-Novembre : (c) $\Delta(M1-N1)$, (d) $\Delta(M2-N2)$.





Suite figure 21.

Selon les cartes de la dynamique de la salinité entre les périodes en considérant la même couche de sol ("c" et "d", Figure 21), une accumulation de sels en surface a été obtenue au Sud-Est et au Nord-Ouest de la zone d'étude, tandis qu'au centre une forte tendance à l'accumulation est notée en profondeur (A2).

Cette situation, en général, reflète une gestion agricole inadéquate de l'oasis et une accumulation de sel plus élevée dans la couche arable par rapport au sub-surface. Cependant, après la saison de récolte, le mouvement vertical prédominant des sels était vers le bas du profil du sol, avec une plus grande accumulation de sel dans le sub-surface. Cette tendance à l'accumulation de sel a été observée au Sud et au Nord-Ouest qui ont mis en relation avec la direction des eaux d'irrigation et la présence d'un cours naturel de drainage combiné avec une pente légère du terrain.

La distribution de la salinité du sol dans le profil est caractérisée par une accumulation globale dans la couche inférieure du sol après la saison de récolte et ces sels migrent de la surface du sol vers la profondeur.

La couverture végétale peut agir par évapotranspiration et contrôler partiellement le mouvement des sels vers la surface, créant ainsi de petites différences dans le déplacement des sels. Un proxy de la couverture végétale est donné dans la (Figure 22) en utilisant le verdâtre sur une image visible, montrant la situation de la couverture végétale de la palmeraie en novembre 2018.

Une densité de plantation plus élevée a été observée au milieu de la palmeraie et dans certaines autres zones qui peuvent expliquer, en partie, l'accumulation différentielle de sel à la surface en raison de la réduction de l'évaporation du sol sous la couverture végétale.

Dans le désert chaud naturel, l'absence de couverture végétale favorise l'accumulation de sel dans la couche de surface et diminue progressivement avec la profondeur en raison de la capillarité des remontées d'eau. Dans certaines régions, la croissance des plantes est inhibée par une salinité de surface excessive et la formation d'une croûte de sel. Dans les régions arides, les précipitations sont rares et l'exploitation des terres agricoles dépend principalement de l'eau d'irrigation, qui est souvent chargée en sel. Plusieurs facteurs environnementaux et anthropiques sont impliqués dans le mouvement du sel dans le sol et sont donc responsables de la salinisation des sols. Dans ces zones irriguées, les variations saisonnières de la salinité du sol, ainsi que ses variations horizontales et verticales, sont des processus complexes dus aux modes d'application de l'eau et à la forte évaporation, ainsi qu'aux activités humaines (Liu et al., 2020).

Le climat de Ghardaïa (Sahara algérien) est caractérisé par une très faible pluviométrie, notamment en automne et en hiver, liée à une évapotranspiration extrême avec des sécheresses fréquentes. Les terres agricoles dépendent principalement des eaux souterraines pour l'irrigation. Cette eau est utilisée sans les mesures de désalinisation nécessaires d'une part et par des techniques d'irrigation inadaptées comme l'irrigation par submersion (ce type d'irrigation est utilisé dans notre zone d'étude) d'autre part. Toutes ces pratiques entraînent une salinisation secondaire.

D'après (Figure 22), une forte couverture végétale a été observée au milieu de la zone d'étude, cette densité de végétation limite le taux d'évaporation et favorise le processus de

lessivage du sel, ce qui explique l'accumulation de sel en profondeur (Figure 21), alors qu'en bordure de l'oasis et surtout au sud de la zone d'étude la végétation est moins dense, donc l'évaporation est intense, ce qui explique la tendance à l'accumulation de sel en surface (Figure 21). Cette zone est caractérisée par la prédominance des sols sableux, ce qui facilite le déplacement du sel le long du profil, lors des processus d'infiltration et d'évaporation et multiplie le risque de salinité, notamment dans les zones racinaires, et affecte les rendements agricoles (Li et al., 2014). D'autres études confirment que dans les zones agricoles irriguées, le processus hydrologique et les conditions climatiques sont les principaux facteurs influençant la distribution et le mouvement (horizontal et vertical) des sels dans la solution du sol (Wu et al., 2019 ; Jiang et al., 2019).

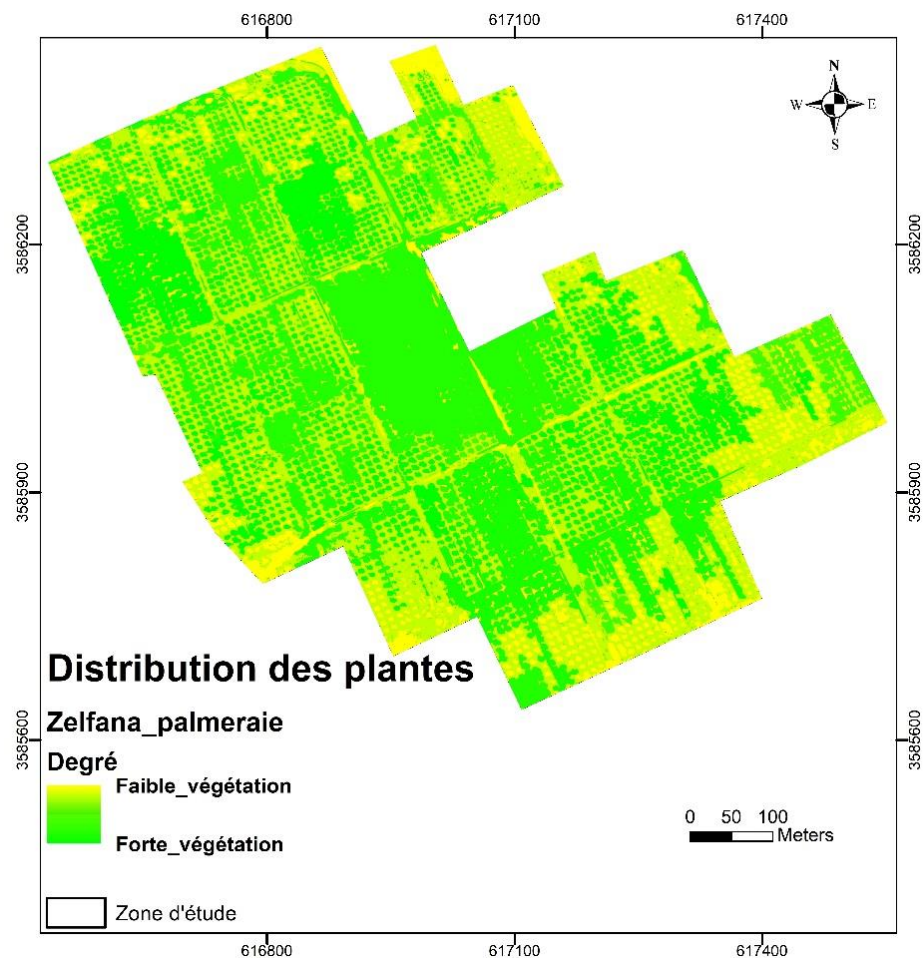


Figure 22. Carte de la répartition des plantes (Novembre 2018).

Dans la palmeraie de Zelfana (Ghardaïa), une irrigation typique des terres agricoles oasiennes est pratiquée avec ses avantages et ses inconvénients mais, pour améliorer les rendements des cultures et assurer une bonne gestion des ressources en eau, des systèmes de

suivi sont nécessaires pour assurer leur développement durable. Il est essentiel de définir les besoins des cultures, et d'assurer le bon fonctionnement du système de drainage pour éliminer l'excès de sel de la palmeraie. L'utilisation de systèmes de drainage adéquats peut empêcher la montée de la capillarité et la salinisation (Navarro-Pedreño et al., 1993). D'autres travaux liés au sol, comme l'application de fumier et la pratique d'une fertilisation raisonnée (Casado-Vela et al., 2006 ; Juan et al., 2011), peuvent être un moyen efficace de réduire le degré de salinisation des sols.

4. Conclusion

Notre recherche vise à suivre le déplacement saisonnier des sels dans le sol dans l'oasis de Zelfana en utilisant la géostatistique, afin de déterminer les principaux facteurs influençant la migration des sels dans les vergers agricoles irrigués dans un climat hyper sec.

La distribution verticale des sels est attribuée à une remontée capillaire de la solution du sol et ensuite à l'évaporation de l'eau causée par la température élevée, surtout notoire près des bords où la végétation est moins dense. D'autre part, la tendance à l'accumulation en profondeur expliquée par le processus de lixiviation et le mouvement des sels dans le profil est associée à la texture sableuse et au système d'irrigation par inondation.

La distribution spatiale saisonnière de la salinité du sol a montré des différences claires dans le mouvement des sels, ce qui explique l'existence de plusieurs facteurs qui affectent cette distribution : la topographie et la mauvaise gestion des réseaux d'irrigation et de drainage, en particulier les pratiques d'irrigation non contrôlées telles que l'irrigation par inondation, la direction de l'écoulement de l'eau et le manque d'entretien du réseau de drainage (observation sur le terrain), entre autres. L'influence de la topographie sur la distribution de la salinité se manifeste par l'accumulation des sels dans les zones basses (pour les deux périodes, mai et novembre), les zones de stagnation des eaux d'irrigation et les zones mal drainées, la percolation et l'écoulement insuffisants. Les résultats obtenus et les valeurs pratiques de la cartographie peuvent constituer un outil pour aider les décideurs ou les gestionnaires des terres à comprendre le problème de la salinité des sols et à mettre en œuvre un plan de développement et de gestion durable pour assurer la pérennité des systèmes agricoles dans cette zone ou dans des zones similaires.

Cette recherche pourrait inspirer d'autres études sur les facteurs qui contrôlent la dynamique des sels dans un sol agricole dans un environnement d'oasis où les systèmes de drainage devraient être bien entretenus. Cela fournit un socle qui peut être utilisé pour suivre et évaluer l'efficacité de la gestion de l'oasis pour contrôler la salinité du sol. Il convient de noter que notre étude n'a été menée que sur des terres agricoles oasiennes en zone sèche et qu'elle doit être étendue à d'autres régions similaires et à grande échelle.

CHAPITRE 4 :

La répartition spatiale de la salinité/sodicité du sol en comparant deux méthodes géostatistique IDW/KO dans l'oasis de Zelfana



« Chaque situation nouvelle, chaque problème à résoudre amène avec lui l'opportunité rare d'apprendre quelque chose de nouveau ».

Olivier Lockert

1. Introduction

La salinisation du sol est le processus par lequel un niveau de sel s'accumule à la fois à la surface et au sous-sol des sols (Lhissoui et al., 2014). C'est une préoccupation environnementale mondiale, bien qu'elle affecte principalement les zones arides et semi-arides, Elle provoque également la dégradation des sols par stérilisation (Jordan et al., 2004) et menace le développement durable des écosystèmes oasiens et le développement futur de l'agriculture avec une faible disponibilité des ressources (eau et sol), Cela peut se produire naturellement ou en raison de mauvaises pratiques de gestion causées par l'homme (Wu et al., 2008).

La variabilité spatiale de la salinité des sols repose sur plusieurs facteurs: sol (caractéristiques, perméabilité, profondeur), qualité de l'eau (disponibilité, salinité, eaux souterraines), topographie locale, facteurs climatiques (faibles précipitations, hautes températures et évaporation) et principalement mauvaise gestion (irrigation et système de drainage) (Daoud & Halitim, 1994 ; Hachicha et al., 2000 ; Djili et al., 2003 ; Idder, 2007 ; Abdel-Razek et al., 2010 ; Douaik et al., 2009 ; Huang et al., 2015 ; Yang et al., 2019), en particulier dans les régions arides (Chaieb et al., 2018 ; Wang et al., 2019).

Outre l'influence des activités humaines telles que l'exploitation intensive des terres, la salinisation des sols de surface a entraîné une grave dégradation de l'environnement au cours des dernières décennies, avec des répercussions sociales et économiques importantes (Herrero & Castañeda, 2015). Plusieurs études ont noté que l'influence de la micro-topographie sur la distribution spatiale de la salinité du sol diffère des périodes sèches aux périodes humides (Wang et al., 2019 ; Yang et al., 2016 ; Wang et al., 2018).

En outre, on estime que plus de 50% des terres arables du monde pourraient être salinisées d'ici 2050, la plupart dans les régions arides (Wang et al., 2008). Les sels se déplacent le long du profil du sol, et à la fin de la saison de culture et d'irrigation, ils peuvent être accumulés dans la couche arable par remontée capillaire favorisée par l'évaporation. Cette accumulation peut affecter négativement la prochaine période de culture.

Selon la FAO (2002), la salinité réduit la superficie des terres agricoles chaque année de 1% à 2%, Cela entraîne des effets néfastes sur les rendements des cultures, conduisant à l'abandon des terres agricoles, ce qui rend le développement durable très limité et provoque un

déséquilibre économique. Dans le monde, les zones arides couvrent environ 5 milliards d'hectares, dont les oasis occupent une petite partie (environ 5%) (Pan & Chao, 2003) (Dupuy et al., 2002). En Algérie, près de 80% des zones sont hyperarides et 15% sont arides (Halitim, 1985).

Avec plus de 17 millions de palmiers dattiers entretenus par des techniques d'irrigation traditionnelles, l'écosystème oasien est un élément essentiel des régions arides d'Algérie et d'autres régions d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient, Ils sont l'épine dorsale du développement durable de l'environnement au Sahara (Berkal et al., 2014), mais selon CISEAU (2006), 10 à 15% des surfaces irriguées souffrent de salinisation, et 0,5 à 1% des surfaces irriguées disparaissent chaque année. De plus, près de la moitié de toutes les superficies irriguées seront exposées à des risques importants à l'avenir, Malgré l'existence de nombreuses études sur la salinité des sols, seules quelques-unes ont été consacrées aux oasis et aux zones irriguées des régions arides (Akramkhanov & Vlek, 2012).

L'oasis de Zelfana, qui fait partie du Sahara algérien, est l'une des régions productrices de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L) - l'un des fruits les plus importants et stratégiques du pays, Selon les rapports de la FAO (2012), la superficie de palmiers dattiers récoltée annuellement en Algérie est d'environ 163 985 ha avec une production d'environ 789 357 t.

Bien que le palmier dattier ait une bonne tolérance à la salinité du sol, l'accumulation de sels solubles sur de longues périodes dégrade le sol, ce qui limitera la productivité agricole et réduira la superficie totale cultivée (Al-Abdoulhadi et al., 2011). Cela devient un problème majeur pour le développement durable de la région.

Traditionnellement, le processus de surveillance implique la collecte de sol et la détermination analytique de caractéristiques telles que la salinité (conductivité électrique, CE), les effets du sodium sur les propriétés du sol et la toxicité d'ions spécifiques.

Classiquement, le processus de surveillance implique la collecte du sol et la détermination analytique de caractéristiques telles que la salinité (conductivité électrique CE), les effets du sodium sur les propriétés du sol et la toxicité d'ions spécifiques (Ayers & Westcot, 1985). Celles-ci ont été accompagnées d'indices tels que le taux d'adsorption du sodium (SAR) (Richards, 1954). Cependant, la connaissance des propriétés du sol est essentielle pour une gestion efficace et durable des sols et de l'eau des terres agricoles, en particulier dans les oasis

du désert (Yang et al., 2018), et leur cartographie peut fournir une vue d'ensemble des problèmes et de la manière dont les agriculteurs peuvent agir pour les résoudre.

La géostatistique est considérée comme un outil efficace pour la détection, la surveillance et la cartographie des zones affectées par le sel et de leurs variations spatio-temporelles (Ben-Dor et al., 2002 ; Aldabaa et al., 2015 ; Hasab et al., 2020). Dans de nombreux cas, la méthode du krigeage s'est avérée être le meilleur estimateur, c'est-à-dire le krigeage ordinaire (KO), tandis que la pondération à distance inverse (IDW) ou les splines ont été considérées comme des méthodes appropriées dans d'autres cas (Matheron, 1967 ; Rouhani, 1986 ; Laslett & Mc Bratney, 1990 ; Phillips et al., 1997 ; Abed et al., 2014). L'interpolation basée sur le poids à distance inverse (IDW) est une méthode précise pour cartographier les sols salins (Farajnia & Yarahmadi, 2017). De plus, de nombreuses études utilisant l'analyse sol-paysage ont montré qu'elle peut être un très bon indicateur de la distribution des propriétés du sol dans l'espace (Akramkhanov, 2005).

Peu d'études se sont concentrées sur l'interaction entre les principaux facteurs qui causent la distribution spatiale de la salinité du sol, et il y a un manque de connaissances sur la façon dont ces facteurs interagissent les uns avec les autres (Xu et al., 2019). Il est donc nécessaire de détecter, surveiller et cartographier la salinité des sols dans l'espace et dans le temps afin d'éviter une nouvelle dégradation des sols et d'assurer le développement durable de l'agriculture (Li et al., 2012 ; Wang & Jia, 2012).

Cependant, peu de travaux ont été réalisés sur la variabilité spatiale des propriétés des sols dans la province de Ghardaïa (sud de l'Algérie); par conséquent, nous avons réalisé cette étude pour (1) évaluer la qualité des propriétés du sol et suivre la dynamique de la salinité/sodicité du sol, (2) comparer deux techniques d'interpolation spatiale (IDW, KO) afin de mettre en évidence la distribution spatiale de la salinité du sol, et (3) détecter les principaux problèmes de salinité afin de favoriser le maintien et la durabilité de l'agrosystème oasien.

2. Matériels et méthodes

2.1. Échantillonnage et analyse des sols

Pour explorer la distribution spatiale de la salinité du sol, des échantillons de sol ont été prélevés selon une planification systématique couvrant l'ensemble de la zone d'étude et garantissant au moins un échantillon par parcelle (Figure 23). Des échantillons ont été prélevés

à côté du palmier, à environ 1,5 m du pied, 45 points d'échantillonnage du sol ont été prélevés en 2018 en deux périodes: Mai et Novembre. Ces deux mois coïncident avec une période de gros travaux agricoles (début de la saison de fructification et fin de la maturation des fruits) (Toutain, 1967). À chaque point, nous avons prélevé des échantillons de 0 à 30 cm de profondeur (couche arable).

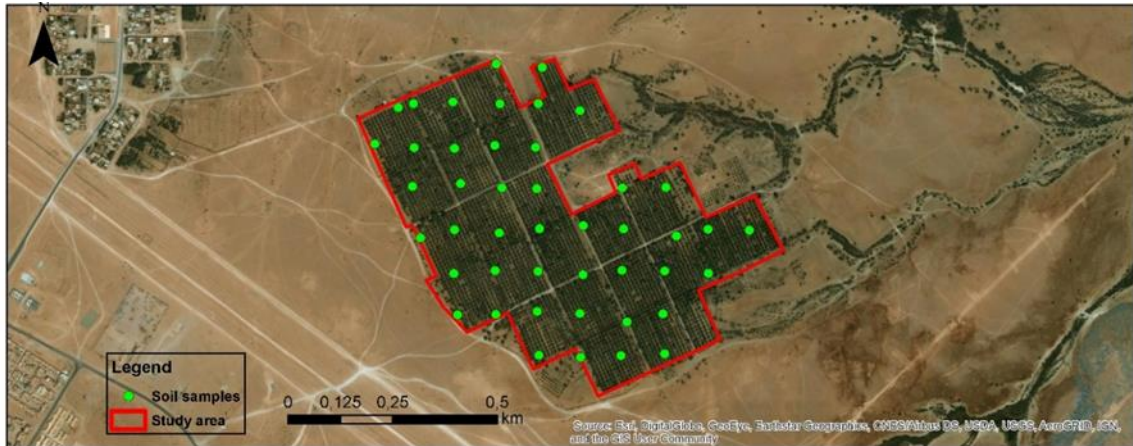


Figure 23. Position des échantillons de sol dans les vergers.

Les échantillons obtenus ont été transférés au laboratoire et séchés à l'air, broyés et tamisés à 2 mm, Dans la terre fine, la conductivité électrique a été déterminée dans l'extraction de l'eau (CE; rapport 1: 2,5 w / v) selon la procédure décrite par le laboratoire américain de salinité (USDA) (Richards, 1954). Cette méthode consiste à mélanger l'échantillon avec beaucoup d'eau pour obtenir une solution très fortement diluée. Il permet une extraction maximale des sels par opposition aux extraits pâteux saturés, le rapport sol / eau restant constant quelle que soit la texture de l'échantillon Diba (1995). Les cations solubles (Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}) ont été analysés en utilisant les procédures standard USDA (1993).

Le SAR a été calculé en calculant les concentrations de Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} (en meq / L) à partir de l'extrait de saturation (équation (1)).

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

2.2. Caractéristiques de l'eau d'irrigation

La durabilité du rendement agricole dans les oasis dépend de la qualité et de la quantité d'eau d'irrigation. Dans notre zone d'étude, les sols sont irrigués avec de l'eau de l'intercalaire continental. Le tableau 11 montre les caractéristiques physico-chimiques moyennes de l'eau utilisée pour les eaux d'irrigation et de drainage, prélevées en juin. Sachant que tous les sols ont été irrigués avec la même eau, la salinité peut être influencée par d'autres facteurs comme la gestion agricole et les conditions environnementales.

Tableau 11. Valeur moyenne des caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'irrigation / drainage.

	pH	EC (dS/m)	Salinité (mg/l)	Na ⁺ (meq/l)	Ca ²⁺ (meq/l)	Mg ²⁺ (meq/l)	K ⁺ (meq/l)	Cl ⁻ (meq/l)	NO ₃ ⁻ (meq/l)	SO ₄ ²⁻ (meq/l)
IRRIGATION	7,5	1,9	911	6,12	9,11	5,63	0,39	10,45	0,39	2,48
DRAINAGE	7,6	5,9	3410	17,4	34,65	16,57	0,87	25,35	0,88	3,10

2.3. Analyses statistiques

Les données ont été soumises à une analyse standard pour obtenir des statistiques descriptives, en particulier la moyenne, le minimum et le maximum, la médiane, la variance, l'écart type (ET), le coefficient de variation (CV), l'aplatissement et l'asymétrie de chaque paramètre. Pour identifier la distribution normale des données, l'asymétrie est le paramètre statistique le plus couramment utilisé avec des valeurs allant de -1 à +1. Pour cette analyse préliminaire, la normalité des données a été évaluée avant d'utiliser la géostatistique pour obtenir des cartes de prédiction. La normalité de chaque ensemble de données a été en outre vérifiée par le test (QQ plot) pour garantir une distribution normale.

2.4. Cartographie prédictive

Les techniques géostatistiques IDW et KO ont été utilisées pour déterminer la variabilité spatiale de la salinité du sol dans les deux périodes (printemps et automne). De plus, après cela, nous comparons les deux méthodes en utilisant ME et RMSE.

2.4.1. L'interpolation IDW

L'interpolation de pondération de distance inverse (IDW) est une technique de prédiction spatiale couramment utilisée en géosciences (Shepard, 1968). Cet outil attribue à chaque point d'entrée une influence locale qui diminue avec la distance et calcule les valeurs de prédiction pour un point interpolé inconnu en pondérant le milieu des valeurs de points de données connues. Cette méthode peut être utilisée si suffisamment de points d'échantillonnage ont une distribution qui occupe la zone à l'échelle locale. Il pondère les points les plus proches du point de prédiction par rapport à ceux plus éloignés, IDW est une méthode d'interpolation exacte et convexe qui s'adapte uniquement au modèle continu de variation spatiale.

Une forme générale de prédiction d'une valeur interpolée Z à un point donné x basé sur des échantillons $Z_i = Z(x_i)$ pour $i = 1, 2, \dots, N$ en utilisant IDW est une fonction d'interpolation:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i(x) z_i}{\sum_{j=1}^n \omega_j(x)} \quad \omega_i(x) = \frac{1}{d(x, x_i)^\alpha} \quad (2)$$

Telle que définie par Shepard (1968), l'équation présentée ci-dessus désigne une simple fonction de pondération IDW, où x représente l'emplacement prédéfini d'un point interpolé inconnu, x_i est le point de données connu, d est la distance de x_i à x , n fait référence au nombre de points utilisés dans l'interpolation, et p ressemble à un nombre réel positif arbitraire connu sous le nom de distance-décroissance ou de paramètre de puissance (normalement $\alpha = 2$ dans l>IDW standard). Notez que dans l>IDW standard, le paramètre α est une valeur constante spécifiée définie par l'utilisateur pour tous les points interpolés inconnus (Mei et al., 2015). La technique d'interpolation choisie est couramment utilisée pour ce type d'étude et est la méthode d'interpolation par point de dispersion la plus courante. Il est basé sur l'hypothèse fondamentale que la surface d'interpolation devrait être influencée le plus par les points proches et le moins par les points éloignés. La surface d'interpolation est une moyenne pondérée des points de diffusion, et le poids attribué à chaque point de diffusion diminue à mesure que la distance entre le point d'interpolation et le point de diffusion augmente. En fait, les valeurs aux points inconnus sont calculées comme une moyenne pondérée des valeurs disponibles aux points connus (Yaserbi et al., 2009 ; Zimmerman et al., 1999).

2.4.2. L'interpolation de krigeage ordinaire

Le krigeage est un groupe de méthodes géostatistiques permettant d'interpoler les valeurs de différentes variables régionales à un emplacement non observé à partir d'observations de sa valeur à des emplacements proches, consistant en un krigeage ordinaire, un krigeage universel, un indicateur de krigeage, un co-krigeage, etc, (Bayraktar & Turalioglu 2005 ; Emery, 2005 ; Hormozi et al., 2012).

Le krigeage ordinaire (KO) est une méthode couramment utilisée (Lefohn et al., 2011), et elle a été appliquée dans cette étude. La méthode KO joue un rôle particulier car elle est compatible avec un modèle stationnaire, n'implique que le variogramme, et c'est en fait la forme de krigeage qui est la plus souvent utilisée (Chiles & Delfiner, 1999 ; Afzal et al., 2011).

Cette méthode estime les valeurs d'une variable cible dans des emplacements non mesurés, où $Z^*(x_0)$ est à un emplacement non échantillonné, en utilisant les valeurs mesurées $Z(x_i)$ ($i = 1, 2, \dots, N$), (Kavianpoor et al., 2012 ; Wackernagel, 1994) comme suit:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (3)$$

λ_i renvoie le poids attribué à l'observation i . Selon (Webster, 2007), des poids sont attribués à chaque échantillon de sorte que la variance de l'estimation est minimisée et que les estimations sont sans biais.

Les semi-variogrammes sont considérés comme un outil de base pour évaluer la distribution spatiale des propriétés du sol. Sur la base de la théorie des variables régionalisées et des hypothèses intrinsèques (Nielsen & Wendroth, 2003), un semi-variogramme s'exprime comme suit:

$$\gamma(h) = 1/2N(h) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

Où $\gamma(h)$ est la semi-variance, h est la distance de décalage, Z est le paramètre de la propriété du sol, $N(h)$ est le nombre de paires d'emplacements séparés par une distance de décalage h , $Z(x_j)$, et $Z(x_j + h)$ sont des valeurs de Z aux positions x_j et $x_j + h$ (Wang & Shao 2013).

2.5. Comparaison des méthodes

Pour une meilleure sélection de la méthode utilisée pour déterminer la variabilité spatiale de la salinité du sol, les deux méthodes d'interpolation ont été évaluées pour vérifier la compatibilité des performances relatives de IDW et KO (Mueller et al., 2004).

Afin d'évaluer la précision du modèle déterminé, deux indices statistiques, tels que l'erreur moyenne (ME) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE), ont été calculés à l'aide des équations suivantes:

- Erreur moyenne:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z^*(x_i) - Z(x_i)) \quad (5)$$

- Erreur quadratique moyenne:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z^*(x_i) - Z(x_i))^2}{N}} \quad (6)$$

Où $Z(x_i)$ est la valeur observée à l'emplacement i , $Z^*(x_i)$ est la valeur prédite à l'emplacement i et n est la taille de l'échantillon, La quadrature de la différence en tout point donne une indication de l'ampleur des différences, de telle sorte qu'une valeur de RMSE proche de zéro illustre la précision de la prédiction du modèle. On suppose que si le modèle du variogramme est correct, ME devrait être presque nul (Wackernagel, 1995 ; Fourati et al., 2017 ; Arslan, 2012).

Selon Arslan (Arslan 2012 ; Cambardella et al., 1994 ; Bradai et al., 2016), l'indicateur de dépendance spatiale peut être classé selon le rapport pépite / portée. La variable considère une forte dépendance spatiale, une dépendance spatiale modérée et une faible dépendance spatiale si le rapport est $\leq 25\%$, $25-75\%$ et $\geq 75\%$, respectivement.

Le choix d'une méthode appropriée dépend des particularités des données et du type de modèle spatial souhaité. La précision de la prédiction du krigeage ordinaire (KO) et de la pondération de la distance inverse (IDW) a été évaluée en utilisant la conductivité électrique et les données SAR.

Tous les traitements et analyses des données ont été réalisés à l'aide du logiciel ArcGis 10,2 © et des traitements statistiques avec Microsoft Excel ©.

3. Résultats et discussion

3.1. Caractéristiques du sol

3.1.1. Salinité du sol

En règle générale, des concentrations élevées de sels dans l'eau d'irrigation et la nature du climat hyperaride, combinées à de nombreux autres facteurs, influencent considérablement la qualité du sol, entraînant une présence accrue de sels dans la zone racinaire et entraînant une réduction de la croissance des cultures et le rendements agricoles (Ghassemi et al., 1997 ; Essien & Ubit, 2013). Cependant, la qualité de l'eau d'irrigation de notre agrosystème est admissible, et la salinité peut être associée aux sels restant dans le sol après une longue période de culture. Cela peut être une conséquence des conditions climatiques et de l'accumulation de sels dans la couche arable par capillarité pendant les périodes sans irrigation (fin d'automne et d'hiver),

L'analyse statistique des résultats (Tableau 12) révèle que dans la première saison, la valeur CE varie entre 0,15 dS / m et 7,27 dS / m avec un coefficient de variation de 104,84 et la valeur SAR varie entre 1,33 et 16,98 avec un coefficient de variation de 77,03. Au cours de la deuxième saison, la valeur CE varie de 0,21 dS / m à 9,39 dS / m avec un coefficient de variation de 129,94 et la valeur SAR varie de 0,3 à 30,93 avec un coefficient de variation de 131,53. Le coefficient de variation (CV) peut refléter le degré de dispersion des variables aléatoires: un CV <10% dénote généralement une faible variabilité, tandis que 10% <CV <100% dénote une variabilité modérée et un CV > 100% dénote une forte variabilité (Nielsen et al., 1983), démontrant que les deux conditions présentent de fortes variations. Dans notre cas, cela indique que les deux périodes présentent une forte variabilité, sauf pour le SAR de la première période, qui présente une variation modérée. L'écart type et le CV étaient plus élevés au cours de la deuxième période, indiquant davantage de différences associées à l'emplacement des points d'échantillonnage, ce qui montre la plus grande variabilité de la salinité du sol.

Tableau 12. Valeurs moyennes et statistiques des propriétés du sol au cours des deux périodes d'échantillonnage: Mai et Novembre.

	MAI					NOVEMBRE				
	pH	CE (dS/m)	Na ⁺ (meq/l)	Ca ²⁺ +Mg ²⁺ (meq/l)	SAR	pH	CE (dS/m)	Na ⁺ (meq/l)	Ca ²⁺ +Mg ²⁺ (meq/l)	SAR

Moy	8,5	1,87	65,21	248,07	5,65	8,34	2,32	58,18	233,8	5,05
Max	9,7	7,27	219,57	348,52	16,98	9,2	9,93	432,61	399,97	30,93
Min	7,6	0,15	15,22	85,7	1,33	7,3	0,21	8,7	148,56	0,3
ET	0,28	1,96	55,81	57,25	4,35	0,51	3,01	83,37	57,5	6,64
CV(%)	3,29	104,84	85,58	23,08	77,03	6,08	129,94	143,3	24,59	131,53
Asymétrie	0,25	1,24	1,45	-0,15	1,34	-0,06	1,46	2,66	1,19	2,07
Aplatissement	-0,6	0,54	1,17	0,02	0,83	-1,09	0,89	8,53	1,11	4,37
Variance	0,28	3,84	3114,68	3277,65	18,91	0,26	9,07	6950,44	3306,64	44,07
Médiane	8,5	0,8	42,39	244,27	3,76	8,3	0,56	17,4	209,27	1,76

Sur la base des classes déterminées par Durand (1983), qui considère cinq classes de salinité (Tableau 13), plus d'un tiers des échantillons de sol seraient considérés comme des sols non salins.

Tableau 13. Classification des sols en fonction de la classification de conductivité électrique (CE) fournie par Durand (1983) et du pourcentage de ceux-ci associé aux classes de salinité (Mai et Novembre).

CE dS/m	Classes de salinité	% Sols (Mai)	% Sols (Nov)
≤ 0.6	Sol non salin	41,13	54,34
$0.6 < EC \leq 1$	Sol légèrement salin	13,04	4,34
$1 < EC \leq 2$	Sol modérément salin	4,34	6,52
$2 < EC \leq 4$	Sol très salin	23,91	8,7
> 4	Sol extrêmement salin	17,58	26,1

L'analyse de ce tableau (Tableau 13) nous permet d'observer que les pourcentages de sols salins en première et seconde périodes étaient respectivement de 41,49% et 34,8% (le rendement peut être affecté), alors que les sols non salins représentent 54,17% et 58,68% (sol productif), et 4,34% et 6,52% représentaient des sols moyennement salins (sol qui peut être utilisé pour des cultures tolérantes). De plus, ces résultats montrent que, même en utilisant la même eau d'irrigation et les mêmes points d'échantillonnage de sol, des différences de salinité se sont produites. Plus encore, des changements importants ont été constatés dans les classes à forte salinité, peut-être en raison du mouvement des sels. Cependant, nous pouvons remarquer qu'environ 55 à 60% des sols sont restés dans les classes de salinité des sols non salins et des sols légèrement salins pendant les deux périodes.

Il est important de comprendre la distribution spatiale de la salinité/sodicité afin de vérifier où les sels se sont accumulés et, en ce sens, prendre de meilleures décisions pour gérer le système de gestion.

3.1.2. Distribution de la salinité du sol à l'aide de l'IDW et de l'interpolation KO

Dans cette étude, l'interpolation IDW (pondération de distance inverse) et KO (krigeage ordinaire) ont été utilisées pour estimer la distribution spatiale de la salinité/sodicité du sol.

L'IDW est l'une des techniques les plus courantes d'interpolation des points de diffusion et repose sur l'hypothèse fondamentale que la zone d'interpolation devrait être influencée le plus par les points proches et le moins par les points éloignés. La zone d'interpolation est une moyenne pondérée des points de diffusion, et le poids attribué à chaque point de diffusion diminue à mesure que la distance entre le point d'interpolation et le point de diffusion augmente. Les valeurs aux points inconnus sont estimées comme une moyenne pondérée des valeurs disponibles aux points connus (Yaserbi et al., 2009 ; Zimmerman et al., 1999). Les statistiques récapitulatives de l'interpolation IDW sont présentées dans (Tableau 12). Pour l'interpolation KO, les données ont été vérifiées par un test de normalité (QQ Plot) pour évaluer la distribution des données, ce qui confirme que la valeur d'asymétrie est supérieure à 1 (les résultats ne suivent pas une distribution normale). Ces données ont été normalisées en utilisant la méthode décimale logarithmique (Tableau 14).

Tableau 14. Statistiques descriptives après transformation logarithmique.

	Mai		Novembre	
	CE(dS/m)	SAR	CE(dS/m)	SAR
Min	-1,88	0,28	-1,58	-1,19
Max	1,98	2,83	2,29	3,43
Moy	0,07	1,49	0,02	0,99
Médiane	-0,21	1,33	-0,56	0,57
ET	1,12	0,7	1,31	1,09
Asymétrie	0,16	0,3	0,49	0,62
Aplatissement	1,61	2,15	1,68	2,41

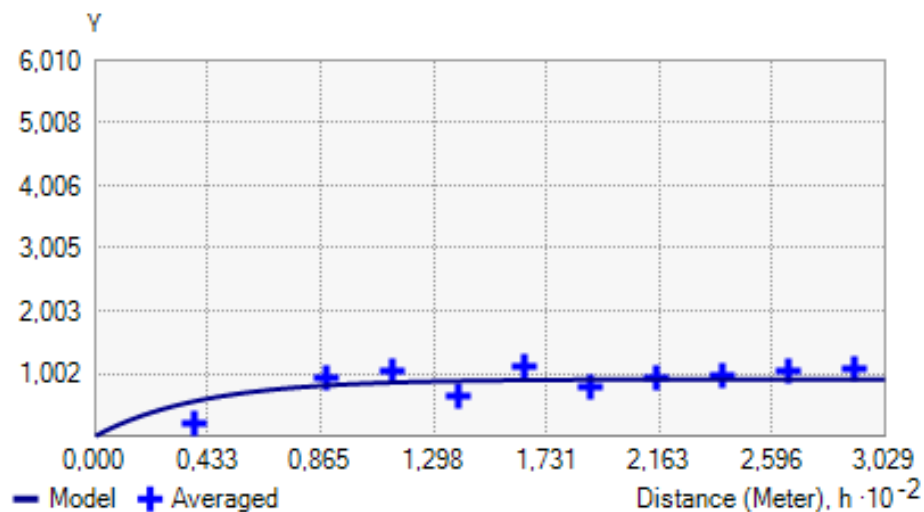
Par la suite, des variogrammes de la méthode de krigeage ont été calculés à partir des données normalisées. Le meilleur modèle optimal théorique utilisé ici pour la CE et SAR dans

les deux périodes était le modèle exponentiel pour estimer et suivre la distribution de la salinité/sodicité du sol (Tableau 15).

Tableau 15. Paramètres du modèle de variogramme optimisé.

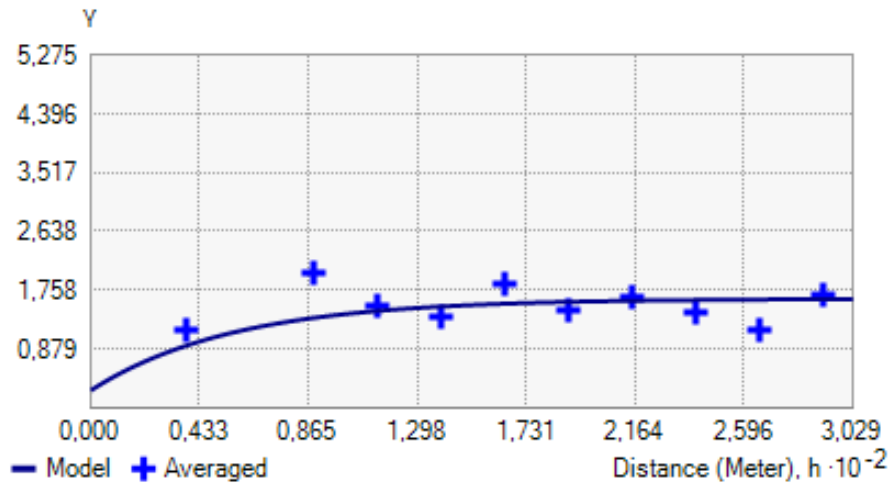
	MAI					NOVEMBRE				
	Modèle le mieux adapté	Pépite (C0)	Seuil (C0+C)	Portée (m)	Rapport %	Modèle le mieux adapté	Pépite (C0)	Seuil (C0+C)	Portée (m)	Rapport %
CE	Exponentiel	0,001	0,909	120,4617	0,11	Exponentiel	0,265	1,368	170,001	19,37
SAR	Exponentiel	0,013	0,418	54,0344	3,11	Exponentiel	0,0105	1,053	190,004	0,99

La dépendance spatiale «pépite / portée» pour la salinité et la sodicité du sol se situait dans la classe (<25%), ce qui correspond à une forte dépendance spatiale (Tableau 15). De plus, la portée du modèle choisi est de 25,243 m (Figure 24).

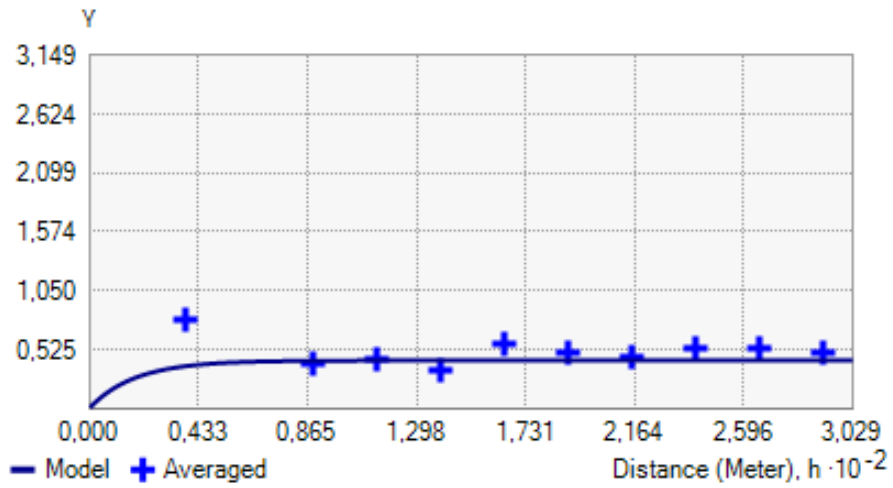


(a)

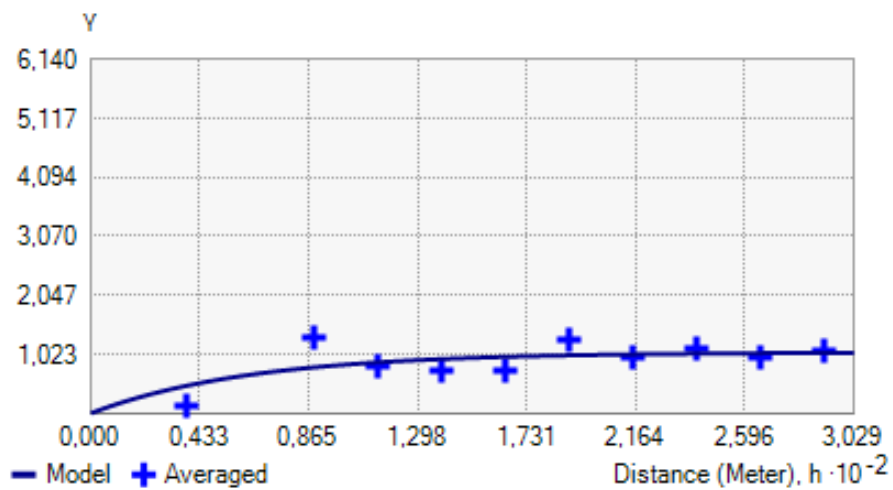
Figure 24. Le variogramme exponentiel expérimental de: **(a)** la conductivité électrique du sol en mai, **(b)** la conductivité électrique du sol en novembre, **(c)** le taux d'adsorption du sodium en mai et **(d)** le taux d'adsorption du sodium en novembre.



(b)



(c)

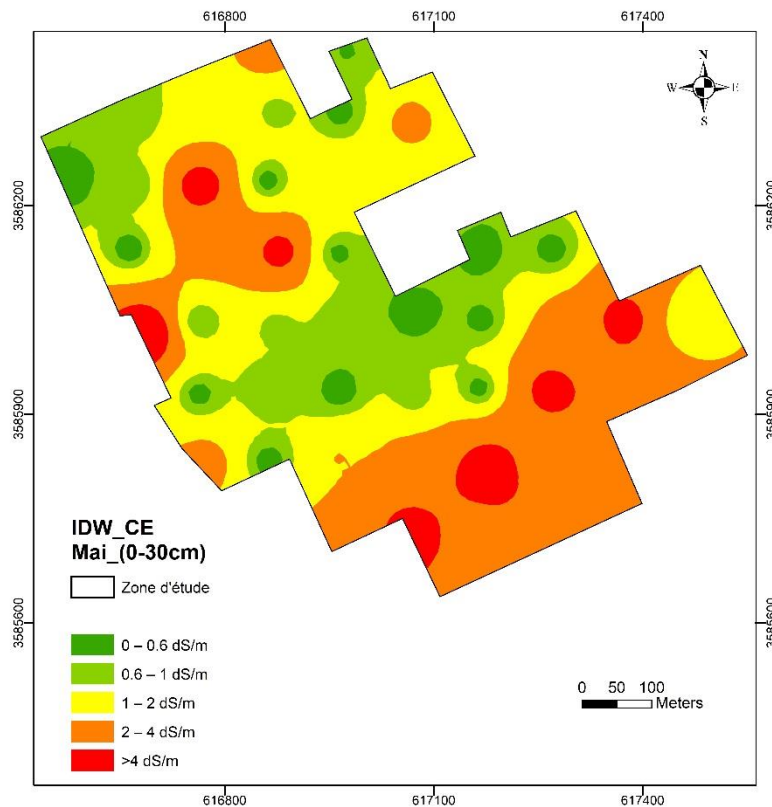


(d)

Suite figure 24.

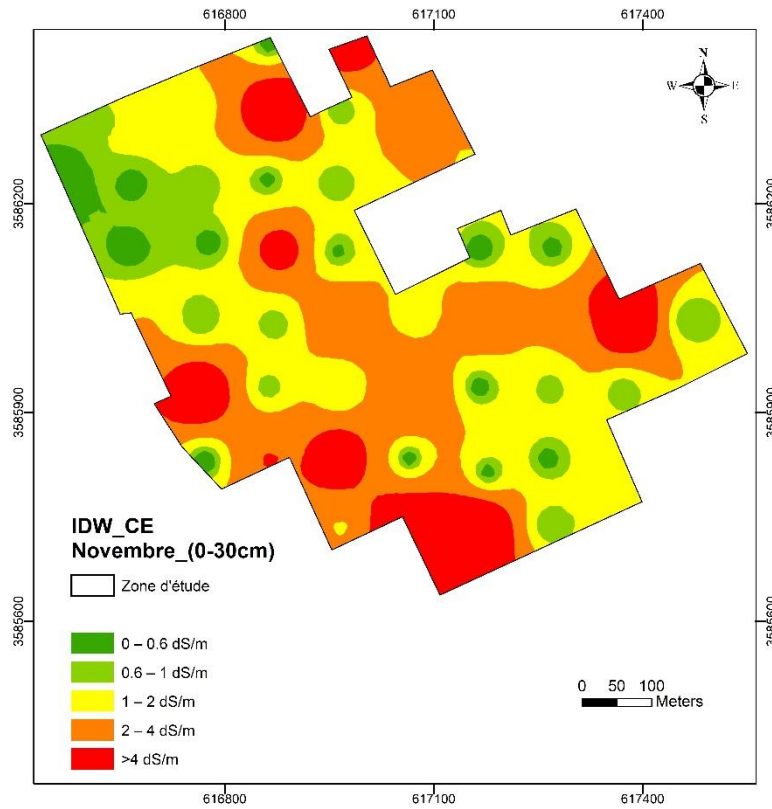
Ces informations, issues des semi-variogrammes, ont mis en évidence la réalité de différentes dépendances spatiales pour les propriétés du sol collectées sur le terrain (Tableau 15). La proportion de pépites par rapport au seuil imite l'autocorrélation spatiale.

La méthode d'interpolation IDW (Figure 25) et l'interpolation KO (Figure 26) ont été utilisées pour effectuer une meilleure méthode d'interpolation spatiale pour les points non échantillonnés, afin d'obtenir le modèle de distribution de la salinité du sol dans l'oasis.

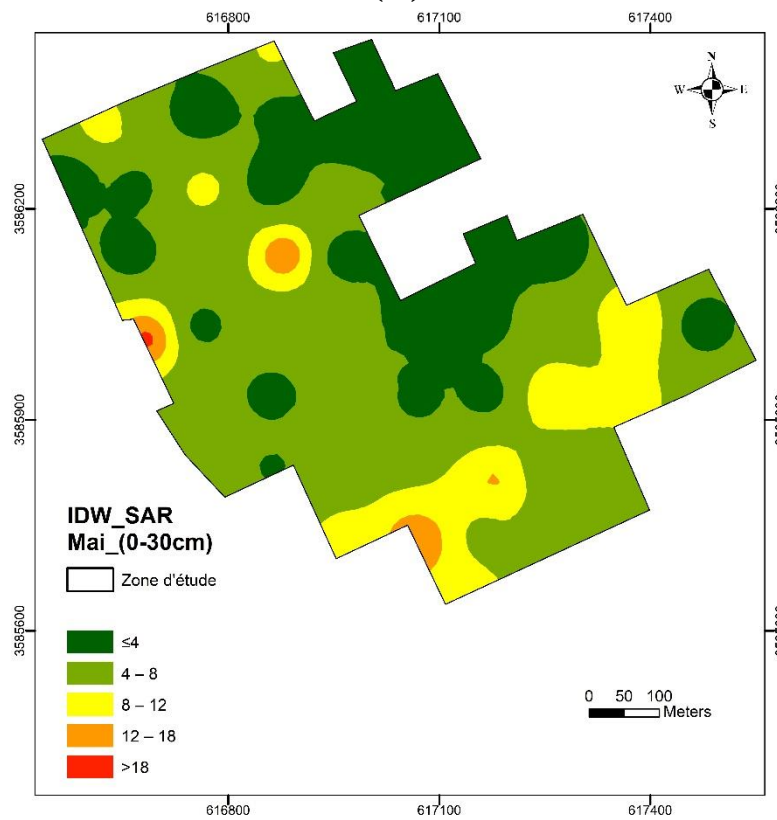


(a)

Figure 25. Cartes de distribution de la CE du sol (a, b) et du taux d'adsorption du sodium SAR (c, d) en utilisant la pondération de distance inverse (IDW) en mai (M) et novembre (N) respectivement.

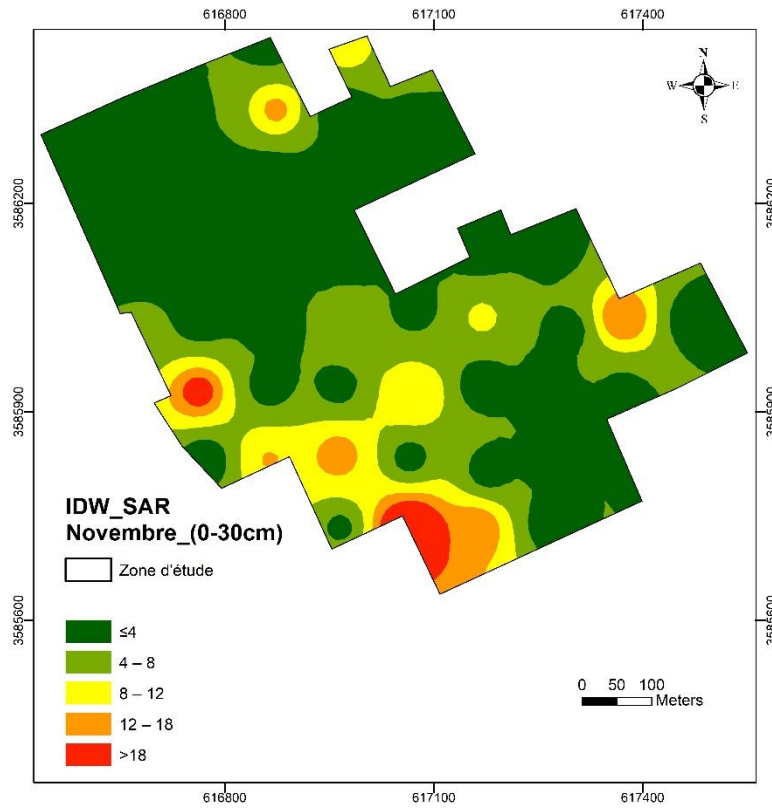


(b)



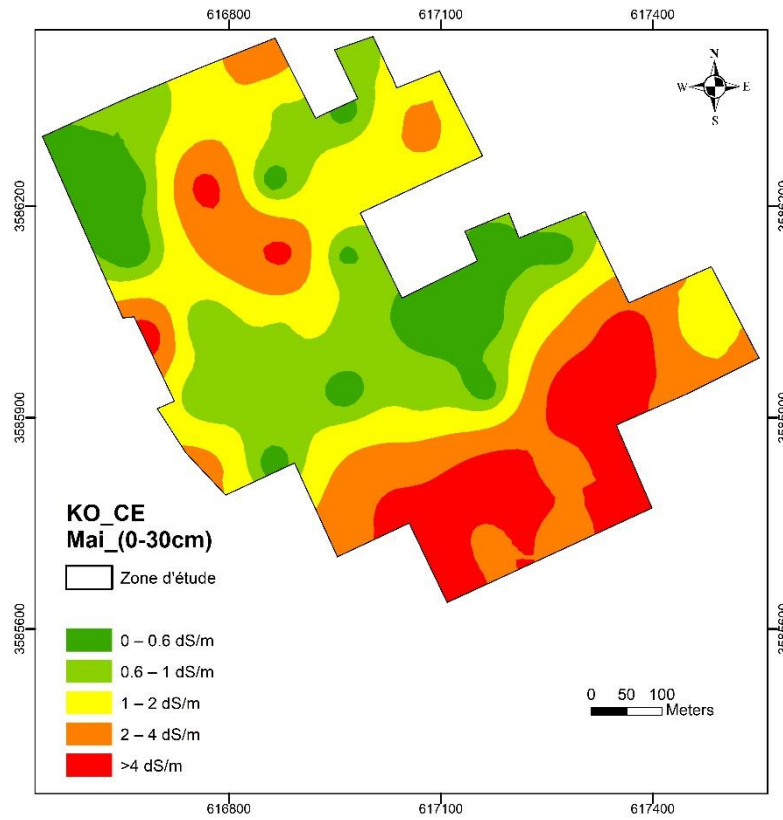
(c)

Suite figure 25.

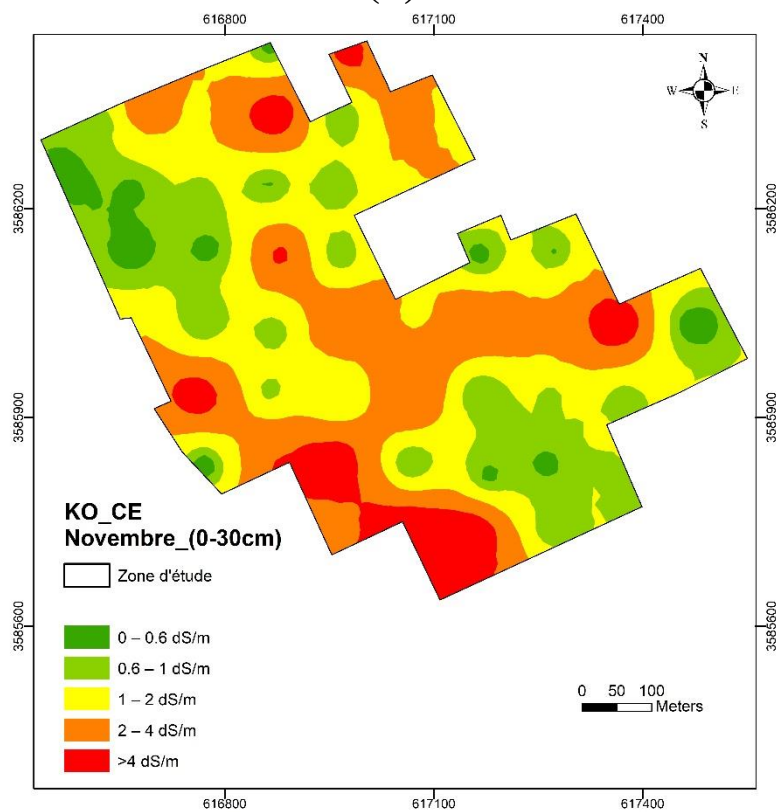


(d)

Suite figure 25.

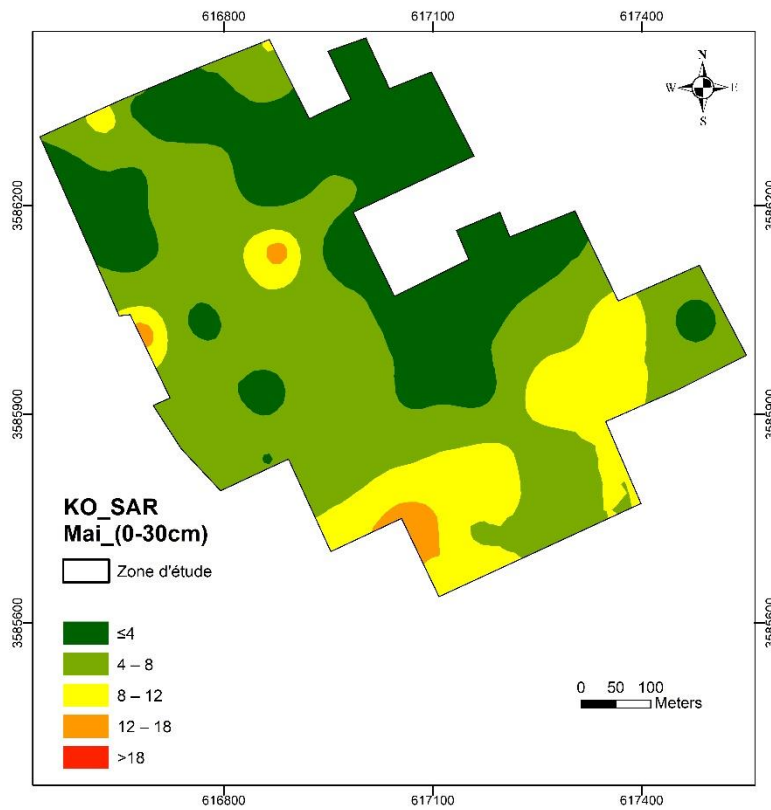


(a)

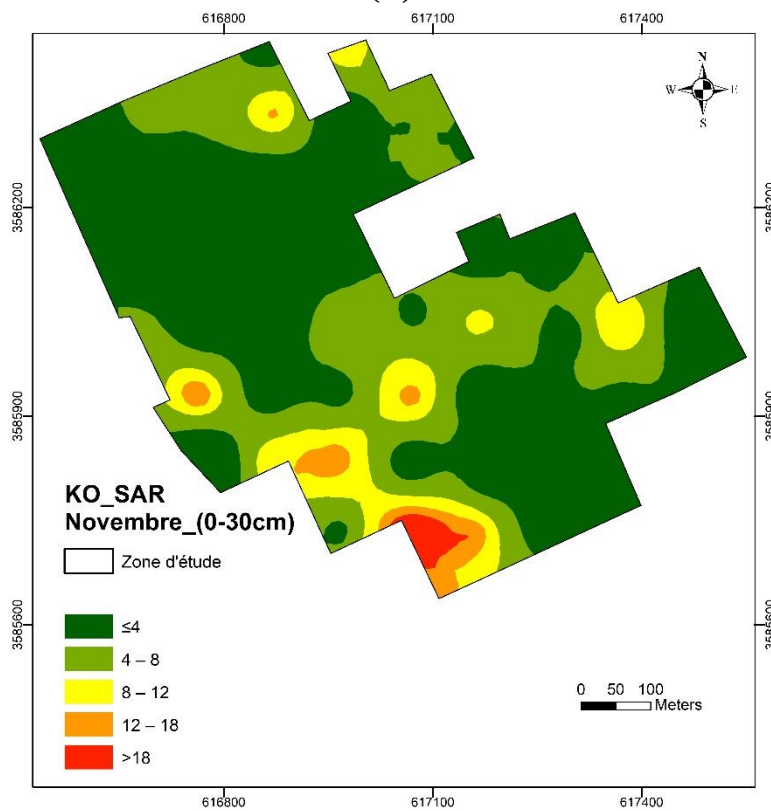


(b)

Figure 26. Cartes de distribution de la salinité du sol (a, b) et SAR (c, d) par krigeage ordinaire (KO) en mai (M) et novembre (N) respectivement.



(c)



(d)

Suite figure 26.

Selon les cartes de la distribution spatiale de la CE et du SAR à l'aide de l'IDW (Figure 25) et de l'interpolation KO (Figure 26), la salinité du sol (CE) la plus élevée a été principalement observée dans les parties sud de la zone d'étude au cours de la première période, ce qui est liée à la direction du débit d'eau d'irrigation observée lors de l'enquête. Cela pourrait être le résultat de la stagnation de l'eau de drainage due à la présence d'une dépression à proximité qui peut naturellement drainer l'eau d'irrigation. De grandes quantités d'eau soumises à l'évaporation conduiront à terme à une augmentation de la salinité, alors que dans la seconde période, les sels ont migré vers les parties externes de la zone d'étude, ce qui est lié à une forte évaporation due à une température trop élevée et à une fréquence d'irrigation réduite.

Une carte de la salinité du sol est nécessaire pour évaluer et surveiller l'accumulation de sel. Ces informations peuvent être utilisées comme un outil efficace pour aider les agriculteurs à gérer les problèmes de salinité des sols affectant l'agroécosystème. De plus, la simplicité de cette approche, avec sa précision satisfaisante, peut grandement contribuer à la prévision et à la cartographie de la salinité des sols (Fourati et al., 2017 ; Mulla & Mc Bratney 2000). En ce sens, les agriculteurs disposeront d'informations pour détecter les sols salins et améliorer leur gestion lors de la prochaine période de culture.

3.1.3. Comparaison IDW et KO

La comparaison IDW et KO a été réalisée à l'aide des valeurs ME et RMSE pour définir la meilleure méthode d'interpolation spatiale adaptée à la région. Les mesures d'évaluation des performances du modèle sont résumées dans (Tableau 16).

Tableau 16. ME et RMSE obtenus pour les interpolations IDW et KO.

	CE				SAR			
	MAI		NOVEMBRE		MAI		NOVEMBRE	
	ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE
IDW	-0,003	1,942	0,044	3,407	0,08	4,69	-0,03	7,16
KO	-0,016	1,950	-0,132	3,465	-0,104	4,501	-0,495	7,45

Sur la base d'une comparaison entre les résultats, le ME des deux méthodes d'interpolation était satisfaisant (les valeurs étaient proches de zéro) Arslan (2012) (Sun et al, 2009), mais la valeur RMSE était plus faible lors de l'utilisation de l'IDW. Selon ces résultats géostatistiques, il y avait une légère différence dans les performances de l'IDW lors de la

prédiction de la salinité/sodicité, par rapport à KO. Cela peut expliquer la bonne précision de la méthode IDW.

La carte KO représentait la variabilité spatiale avec moins de détails, démontrant l'importance de cette interpolation pour la variabilité sur des échelles à longue distance, tandis que la carte IDW représentait la variabilité spatiale avec plus de détails sur des échelles à courte distance, soutenant un échantillonnage assez dense.

D'autres études qui ont été menées en utilisant cette approche, par exemple (Corwin et al., 2006 ; Robinson & Matternicht, 2006 ; Wang et al., 2016), confirment que l'interpolation IDW est plus efficace que KO pour prédire la distribution, en particulier des propriétés physico-chimiques du sol, et cela est probablement dû à la méthode d'échantillonnage et les distances similaires de tous les échantillons. En revanche, d'autres études, par exemple (Keshavarzi & Sarmadian, 2012 ; Reza et al., 2010 ; Tripathi et al., 2015), ont considéré que les performances du krigeage ordinaire étaient les meilleures par rapport à d'autres données prédites et par rapport à des données réelles, concluant qu'il était également très fiable et plus précis.

Nous supposons que l'intervalle d'échantillonnage qui occupe toute l'échelle de prédiction peut expliquer la performance de l'IDW dans l'interpolation de la propriété du sol (Mueller et al, 2004). D'autres études (Hosseini et al., 1994 ; Shi & Rui, 2005) fournissent des cartes de la distribution de la salinité en utilisant des méthodes géostatistiques et considèrent la méthode de co-krigeage comme la méthode la plus précise pour prédire les niveaux de la CE et de SAR. En fait, la méthode d'échantillonnage peut déterminer la meilleure méthode géostatistique.

Comprendre et contrôler la distribution spatiale de la salinité des sols peut fournir une base de données pour la mise en œuvre d'une politique de gestion agricole capable de contrôler et de prévenir la salinisation des sols (Wang et al., 2019). Pour explorer la variabilité spatiale de la salinité des sols, nous avons appliqué une méthode géostatistique dans une zone agricole au climat aride afin d'identifier les facteurs d'influence. L'analyse des cartes obtenues est cohérente avec la situation réelle du terrain, qui se caractérise par une forte salinité dans les zones d'eaux de drainage stagnantes.

Cette répartition de la salinité/sodicité des sols s'explique par le mode d'irrigation par submersion et le sens des écoulements utilisés dans ce périmètre agricole, couplés à des

conditions climatiques sévères, notamment en période estivale où la température et l'évaporation sont excessivement élevées. À cela s'ajoute la mauvaise gestion des ressources naturelles et la modification de la structure du sol causée par l'homme.

Notre contribution s'est concentrée, en particulier, sur les terres agricoles oasiennes dans une région aride. Les résultats et la méthodologie pourraient être étendus à d'autres régions qui connaissent des problèmes similaires dans les zones arides et semi-arides. L'agriculture est essentielle pour de nombreuses communautés, et en comprenant et en cartographiant les problèmes, il est possible d'atteindre la durabilité et de créer des opportunités pour ces communautés associées aux systèmes oasiens. Par conséquent, notre étude pourra ouvrir une voie de réflexion et de recherche, permettant la mise en œuvre de projets traitant de la salinité des sols à grande échelle, ainsi qu'une enquête détaillée sur les facteurs influençant la durabilité de la production agricole dans les zones arides.

Il est clair que la durabilité n'est pas facultative et nous devons savoir comment le système fonctionne pour l'améliorer (Talaat & Safaa, 2007). Ces résultats permettent aux planificateurs, décideurs et ingénieurs d'entreprendre et d'orienter les travaux de développement agricole, qui consistent à mettre en place un réseau de drainage adéquat capable d'éliminer l'excès d'eau salée de la zone agricole et de fournir une irrigation supplémentaire (dose de lessivage) pour maintenir les canaux de drainages.

Ces régions arides sont connues pour la rareté de l'eau et sa forte minéralisation. Afin d'éviter d'aggraver la crise de l'eau et d'éviter des pénuries alimentaires considérables, la productivité de l'utilisation de l'eau doit être augmentée. De plus, le traitement et l'utilisation des eaux de drainage agricoles (IDW) deviennent une obligation pour les besoins de développement dans les zones arides et semi-arides (Talaat & Safaa, 2007). À l'avenir, une option à envisager dans ces régions est la réutilisation des eaux de drainage agricoles, qui pourraient être traitées à l'aide de techniques de recyclage (Tanji & Kielen, 2002), par exemple par la mise en place d'usines de traitement et / ou le dessalement de l'eau par osmose inverse systèmes avec alimentation en énergie solaire. En ce sens, il est nécessaire de maintenir les systèmes de drainage dans de bonnes conditions.

3.1.4. Classification de la salinité du sol

Après avoir détecté et cartographié la salinité, il est important de déterminer l'emplacement des sols affectés par le sel et le degré de cette affection. Les sols (points d'échantillonnage) ont été classés en comparant les valeurs de la CE, SAR et pH aux valeurs seuils fixées par (Abegunrin et al., 2013), considérant les risques de salinité et de sodium ou d'alcalinité, car les valeurs de la CE, du SAR et du pH étaient inférieures à 4 dS / m, 13 et 8,5 respectivement (Tableau 17). À l'exception de quelques échantillons, la plupart des sols pourraient être considérés comme des sols non salins et non sodiques (Figure 27).

Tableau 17. Classification du sol en fonction de la CE, du pH et du SAR par (Abegunrin et al., 2013).

Classification du sol	CE	pH	SAR
Normal	<4	< 8.5	< 13
Saline	>4	< 8.5	< 13
Sodique	<4	> 8.5	> 13
Saline et Sodique	>4	> 8.5	> 13

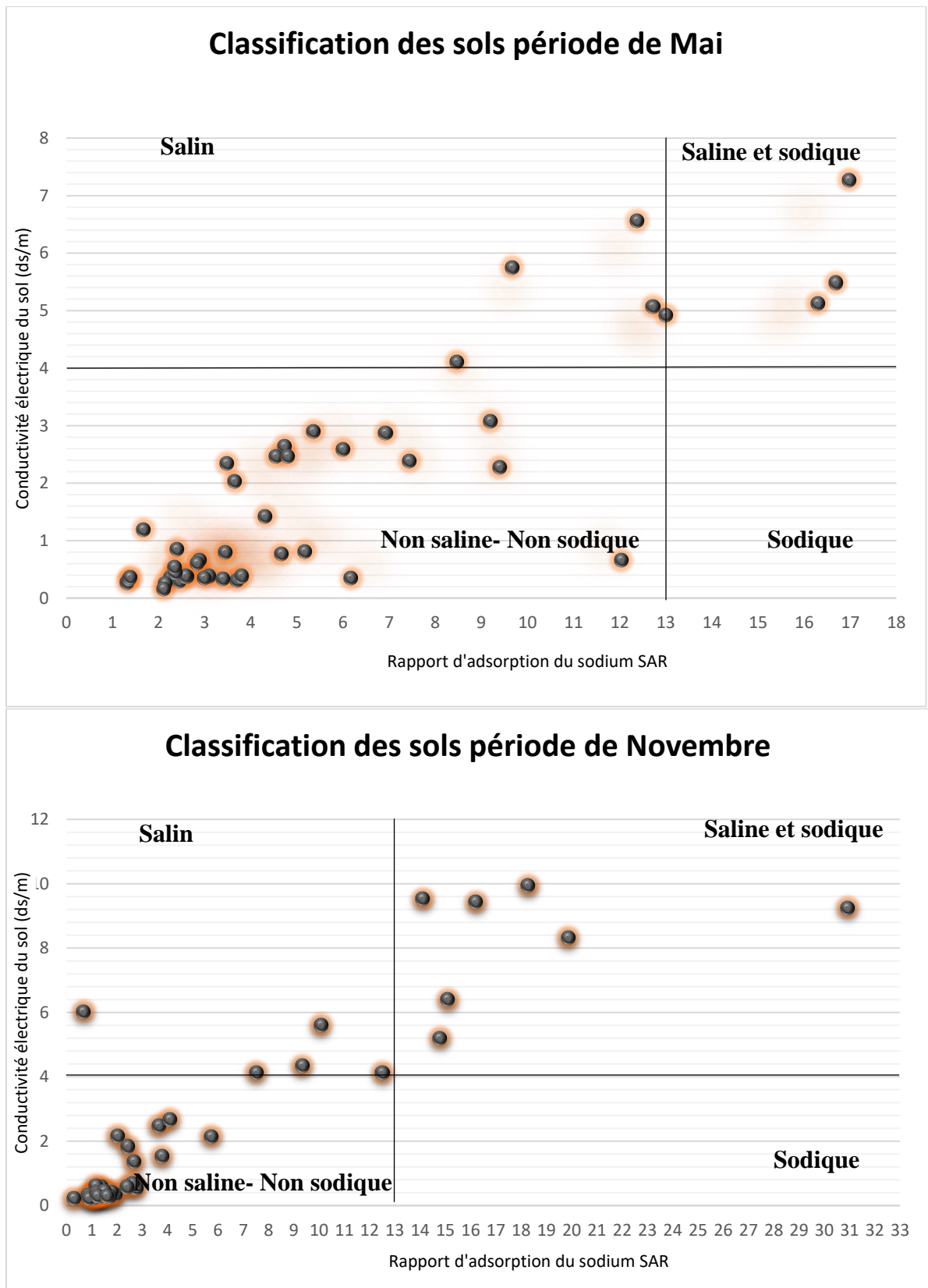


Figure 27. Classification des sols (points d'échantillonnage) selon (Abegunrin et al., 2013).

La région de Zelfana a subi un changement majeur dans l'agriculture par rapport à l'agriculture oasienne, lié à la production quasi exclusive de dattes, suivie par la production de cultures maraîchères tout au long de l'année. L'irrigation avec les eaux souterraines peut enrichir les sols en sels ou entraîner leur mobilité dans le profil du sol, ce qui est associé à des problèmes de gestion et de conservation des sols. Cela aura sans aucun doute des répercussions négatives sur le sol (salinisation et sodification conduisant à une dégradation de la structure du sol) et sur la dynamique agricole à Zelfana. La sensibilité des cultures au stress salin entraîne une croissance des plantes réduite (longueur des feuilles réduite des frondes) et une productivité réduite. Chaque culture a une tolérance spécifique au stress salin, ce qui peut réduire le rendement d'environ 50% pour plusieurs cultivars comme les espèces sensibles (Kotuby-Amacher et al., 2000).

Le palmier dattier a une tolérance élevée à la salinité du sol (Al-Abdoulhadi et al., 2011 ; Bouhoun, 2010 ; Alhammadi & Glenn, 2008 ; Hussain et al., 2006), mais plusieurs publications considèrent qu'une augmentation de la salinité correspond à une diminution du rendement <25% (Allbed & Kumar 2013 ; Abrol et al., 1988). Selon Ramoliya et al. (2003), cette culture peut supporter une salinité relativement élevée de 12,8 ds / m sans effet visible sur le fruit, et d'autres variétés de palmiers dattiers pourraient tolérer jusqu'à 9 ds / m de salinité du sol (Alrasbi et al., 2010). Les cultures pourraient extraire des sels et agir comme phytoremédiatrices en raison de leur capacité à s'adapter aux environnements salins locaux. Au vu des résultats obtenus, il semble que l'acquisition des données nous ait donné une vision claire de l'état actuel de la salinisation des sols dans cette zone, ce qui est utile pour les gestionnaires et les agriculteurs.

Ces dernières années, la télédétection, le SIG et la modélisation sont devenus des outils technologiques préférés et peu coûteux pour cartographier la salinité des sols en raison des vastes zones couvertes, ce qui est de la plus haute importance du point de vue agricole et environnemental. Cela ouvre de grandes perspectives pour l'utilisation de cette technique dans la gestion durable des sols.

4. Conclusions

L'objectif principal de cette étude était d'estimer la salinité du sol dans une oasis en comparant deux techniques d'interpolation spatiale basées sur le SIG, afin de mettre en évidence une meilleure stratégie de gestion durable. Il est crucial de sélectionner une méthode appropriée

pour estimer la distribution spatiale de la salinité du sol avec un minimum d'erreur, pour de bonnes pratiques de gestion. Dans cette étude, IDW et KO étaient les deux méthodes évaluées pour étudier la salinité du sol dans l'oasis de Zelfana, Ghardaïa. Par conséquent, la méthode IDW était plus précise que les résultats obtenus par la technique KO pour l'estimation des zones affectées par le sel. Dans notre cas, la relation entre le système de drainage et la salinité du sol semble être un facteur clé dans la gestion de l'agrosystème, soulignant l'importance d'une gestion durable de l'eau dans les systèmes oasiens.

Les résultats obtenus ont montré que la majorité des sols appartiennent à une classe de salinité qui peut être adéquate pour la tolérance du palmier dattier mais n'est pas recommandée pour d'autres cultures, en particulier dans la partie sud de la zone d'étude. Sur la base des cartes CE, SAR et de distribution de la salinité des sols, il semble que dans cette zone, les sols à forte salinité ne supportent pas la culture maraîchère à faible tolérance.

Ainsi, ce modèle (IDW) de suivi de la distribution spatiale de la salinité des sols est un bon indicateur et peut être utilisé par les phéniculteurs de l'oasis de Zelfana et généralisé par les décideurs dans des zones similaires, afin de mettre en œuvre des programmes de gestion efficaces et l'utilisation durable des systèmes agricoles.

Pour surmonter les contraintes de la collecte de données sur le terrain, une collecte de données extensive, considérée comme longue et coûteuse, cartographie et identifie les sites où la salinité est détectée, contribuant à réduire le nombre de points d'échantillonnage et à déterminer les actions nécessaires pour maintenir le système et aider à la durabilité sur le long terme. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour étudier la capacité d'utiliser des techniques de télédétection si elles peuvent augmenter la précision de la modélisation et de la cartographie de la salinité des sols pour les zones dominées principalement par le palmier dattier et le maraîchage dans les environnements arides.



CONCLUSION GENERALE

« Je ne perds jamais. Soit je gagne, soit j'apprends ».

Nelson Mandela

Conclusion générale

Cette étude a été réalisée dans le but de recenser la qualité des eaux et la dynamique de la salinité des sols au niveau d'une palmeraie de la région de Zelfana W. Ghardaïa. De ce fait, nous avons pu mettre en évidence une stratégie d'enquête qui est basé sur l'évaluation des échantillons de l'eau d'irrigation/ drainage et des échantillons de sol en deux profondeurs A1(0-30cm), A2(30-60cm) et en deux périodes (Mai, Novembre).

Les résultats de la qualité de l'eau révèlent un pH neutre à légèrement alcalin pour les deux types d'eau, la Conductivité électrique augmente énormément (trois fois plus) dans l'eau de drainage. Cela signifie un enrichissement de cette eau en électrolytes provenant du sol.

Le dysfonctionnement des canaux de drainage remarqué dans notre investigation favorise la stagnation de ces eaux et qui affecte négativement la qualité de sol, qui manifeste un début de dégradation de ces propriétés physico-chimiques.

Les coefficients de corrélation entre les paramètres chimiques des eaux d'irrigation/ drainage indiquent une forte corrélation entre : le Sodium et la Conductivité électrique, aussi entre le Potassium et la Conductivité électrique ($r=0,99$).

La conductivité la plus élevée avoisine $2150\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui traduit une salinité moyenne à forte, due à la lithologie bien sûr, mais aussi à des conditions climatiques très arides. Ces dernières induisent une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol.

Dans le même temps, la concentration moyenne du sodium adsorbable déterminée à partir du SAR est égale à $2,25\text{ méq}/\text{l}$, ce qui correspond à un risque faible d'alcalinisation. Résultats confirmé par le diagramme de Riverside. Ce qui considère les eaux d'irrigation de cette zone comme des eaux peu nuisibles (médiocres) pour la production de cultures sensibles qui ont une tolérance fragile de salinité et même elle perturbe la stabilité structurale du sol à moyen et à long terme.

Le diagramme de PIPER montre que le faciès dominant est de type presque hyper sulfatée calcique provenant principalement de la dissolution des formations carbonatées. L'augmentation de la salinité associée à un faciès chloruré sodique ou sulfaté sodique peut être une conséquence de l'action combinée de différents mécanismes tels que la concentration par évaporation ou le contact avec l'eau salée.

De ce fait, le recours vers eaux souterraines qui présente souvent une qualité médiocre voir inutilisable dans certains cas, est indispensable pour l'irrigation, ce qui conduit à une salinisation ou modification des sols.

L'analyse granulométrique des sols provenant de la parcelle montre que la plupart des sols ont une texture sablo-argileuse, limon- argilo- sableuse ou les particules fines et très fines dominant, provenant de dépôt de sable et aussi par la perturbation de l'homme par ajout de sable de sorte à minimiser le degré de sel. Cette texture facilite le mouvement et le lessivage des éléments chimiques.

Dans ce contexte, la distribution spatiale et les mouvements verticale et horizontale des sels à l'échelle de la parcelle ont été géostatistiquement présentés en basant sur le krigeage ordinaire appuyer avec un meilleur réajustement (Variogramme). La dynamique de la salinité a été obtenue en interpolant les valeurs de la différence entre les couches de la conductivité électrique de la solution du sol. Ces résultats ont été ajustées en utilisant le modèle sphérique.

Ce modèle montre les meilleurs valeurs d'Erreur quadratique moyenne (RMSE) de (1,43 ;2,36) et une Erreur moyenne (ME) de (0,02 ;0,02) pour les cartes représentant $\Delta(M1-M2)$ et $\Delta(N1-N2)$ respectivement. Pour les cartes représentant $\Delta(M1-N1)$ et $\Delta(M2-N2)$ c'est-à-dire la dynamique en fonction des périodes les valeurs (RMSE) de (3,65 ;1,76) et (ME) de (0,065 ; 0,005). Cela montre que le modèle sphérique décrit correctement le schéma spatial des mouvements du sel et que les cartes thématiques estimées par interpolation du Krigeage ordinaire de la salinité du sol étaient fiables et acceptables pour leur suivi horizontal et vertical.

La différence entre les couches qui nous donne des informations importantes sur le mouvement des sels. Les valeurs positives indiquent l'accumulation de sels à la surface, tandis que les valeurs négatives donnent des informations sur la migration des sels vers la sub-surface. L'analyse de ces cartes reflète une gestion inadéquate de l'oasis et une tendance d'accumulation de sel dans la couche arable par rapport au sub-surface. Cette dynamique mis en relation avec la fréquence et la direction des eaux d'irrigation d'un côté. D'un autre côté, la présence d'un cours naturel de drainage au Sud de la parcelle combinée avec une pente légère du terrain favorise cette accumulation.

La couverture végétale peut agir aussi dans cette dynamique par le processus d'évaporation créant ainsi de petites différences dans le déplacement des sels remarqué entre

dans les deux périodes par rapport à la situation de la couverture végétale de la palmeraie. Par conséquent, l'absence de couverture végétale favorise l'accumulation de sels dans la couche de surface et diminue progressivement avec la profondeur en raison de la capillarité des remontées d'eau.

Pour ce qui est dans ces zones irriguées, les variations saisonnières de la salinité du sol, ainsi que ses variations horizontales et verticales, sont des processus complexes dus aux modes d'application de l'eau et à la forte évaporation, ainsi qu'aux activités humaines.

De plus, Il est important de comprendre la distribution spatiale de la salinité/sodicité afin de vérifier où les sels se sont accumulés et, en ce sens, prendre de meilleures décisions pour gérer le système de gestion. Du coup, le meilleur modèle optimal théorique utilisé ici pour la Conductivité électrique et le SAR dans les deux périodes était le modèle exponentiel pour estimer et suivre la distribution de la salinité/sodicité du sol. Ça dépendance spatiale « pépite / porté » se situait dans la classe (<25%), ce qui correspond à une forte dépendance spatiale.

Les deux méthodes d'interpolation IDW et KO ont été utilisées pour effectuer une meilleure méthode d'interpolation spatiale pour les points non échantillonnés, afin d'obtenir le modèle de distribution de la salinité/sodicité du sol dans l'oasis. Pour cette logique, une comparaison a été réalisée à l'aide des valeurs ME et RMSE pour définir la meilleure méthode d'interpolation spatiale adaptée à la région. Sur la base de cette comparaison les deux méthodes d'interpolation étaient satisfaisantes, mais avec une légère différence dans les performances de l'IDW. La carte KO représentait la variabilité spatiale avec moins de détails, démontrant l'importance de cette interpolation pour la variabilité sur des échelles à longue distance, tandis que la carte IDW représentait la variabilité spatiale avec plus de détails sur des échelles à courte distance, soutenant un échantillonnage assez dense comme le cas de notre étude.

Ces résultats correspondent avec d'autres études qui ont été menées en utilisant l'approche de IDW, le cas de (Corwin et al, 2006; Robinson et Matternicht 2006 ; Wang et al, 2016) qui confirme que l'interpolation IDW est plus efficace que KO pour prédire la distribution, en particulier des propriétés physico-chimiques du sol, et cela est probablement dû à la méthode d'échantillonnage et les distances similaires de tous les échantillons. Nous supposons que l'intervalle spatiale d'échantillonnage qui occupe toute l'échelle de prévision peut expliquer la performance de l'IDW dans l'interpolation des propriétés du sol.

Certes que le palmier dattier a une tolérance élevée à la salinité du sol, mais plusieurs études considèrent qu'une augmentation de la salinité diminue le rendement jusqu'au <25%.

Toutefois, le milieu oasien de Zelfana (Benslama et al., 2020) est confronté actuellement à une forte dégradation de son environnement due simultanément à une salinisation primaire liée à la fluctuation d'une nappe phréatique peu profonde et à une salinisation secondaire de ses sols par l'irrigation avec des eaux salées.

Afin d'obtenir un meilleur rendement quantitatif et qualitatif, il est nécessaire de prendre en compte la nature du sol et sa salinité ainsi que la tolérance de la culture à ce fléau, d'innover une stratégie adéquate pour assurer une gestion bonne, efficace et durable capable de maintenir le rendement maximal des cultures pour les générations futures. L'une des meilleures stratégies pour la réhabilitation des sols salins est la sélection appropriée des cultures, non seulement à des fins économiques, mais aussi pour lutter contre la pollution des sols et des eaux salines (Niñerola et al, 2017). Le bon choix des cultures maraîchères en fonction de la nature du sol nécessite une sélection adéquate des cultures en fonction de leur résistance au stress salin, suivie d'une bonne utilisation des ressources en eau à travers la mise en place de réseaux d'irrigation et de drainage qui maintiendront le niveau aquifère et assurer le rejet des eaux contaminées au-dessus du niveau critique de salinisation afin de garantir la durabilité des systèmes agricoles.

Ces dernières années, la télédétection, le SIG et la modélisation sont devenus des outils technologiques préférés et peu coûteux pour cartographier la salinité des sols en raison des vastes zones couvertes, ce qui est de la plus haute importance du point de vue agricole et environnemental. Cela ouvre de grandes perspectives pour l'utilisation future de cette technique à grand échelle pour une gestion durable des sols.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

« La réussite appartient à tout le monde. C'est au travail d'équipe qu'en revient le mérite ».

Franck Piccard

Références bibliographiques

Abdelfattah, M. A., Shahid, S. A., & Othman, Y. R. (2009). Soil salinity mapping model developed using RS and GIS—a case study from Abu Dhabi, United Arab Emirates. *European Journal of Scientific Research*, 26(3), 342-351.

Abdel-Razek, M., Gaiser, T., Diekkrüger, B., Goldbach, H. (2010). Salinity Development during Three Decades in the Oasis of Ktoua, South East Morocco. In 'Tropentag 2010: International Research on Food Security. Natural Resource Management and Rural Development; ETH: Zurich, Switzerland, 14–16.

Abdenmour, M. A., Douaoui, A., Barrena, J., Pulido, M., Bradai, A., Bennacer, A., ... & Alfonso-Torreno, A. (2021). Geochemical characterization of the salinity of irrigated soils in arid regions (Biskra, SE Algeria). *Acta Geochimica*, 40(2), 234-250.

Abdenmour, M. A., Douaoui, A., Bradai, A., Bennacer, A., & Fernández, M. P. (2019). Application of kriging techniques for assessing the salinity of irrigated soils: the case of El Ghrous perimeter, Biskra, Algeria. *Spanish Journal of Soil Science*, 9(2).

Abed, A. M., Saffarini, G. A., & Sadaqah, R. M. (2014). Spatial distribution of uranium and vanadium in the upper phosphorite member in Eshidiyya basin, southern Jordan. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(1), 253-271.

Abegunrin, T. P., Awe, G. O., Idowu, D. O., Onigbogi, O. O., & Onofua, O. E. (2013). Effect of kitchen wastewater irrigation on soil properties and growth of cucumber (*Cucumis sativus*). *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 4(7), 139-145.

Abrol, I. P., Yadav, J. S. P., & Massoud, F. I. (1988). Salt-affected soils and their management (No. 39). Food & Agriculture Org.

Afzal, P., Alghalandis, Y. F., Khakzad, A., Moarefvand, P., & Omran, N. R. (2011). Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration–volume modeling. *Journal of Geochemical Exploration*, 108(3), 220-232.

Ahmad, M. U. D. (2002). Estimation of net groundwater use in irrigated river basins using geo-information techniques: A case study in Rechna Doab, Pakistan.

Akramkhanov, A., Sommer, R., Martius, C., Hendrickx, J. M. H., & Vlek, P. L. G. (2008). Comparison and sensitivity of measurement techniques for spatial distribution of soil salinity. *Irrigation and Drainage Systems*, 22(1), 115-126.

Akramkhanov, A. (2005). *The spatial distribution of soil salinity: Detection and prediction* (Vol. 32). Cuvillier Verlag.

Akramkhanov, A., & Vlek, P. L. (2012). The assessment of spatial distribution of soil salinity risk using neural network. *Environmental monitoring and assessment*, 184(4), 2475-2485.

Al-Abdoulhadi, I. A., Dinar, H. A., Ebert, G., & Büttner, C. (2011). Effect of salinity on leaf growth, leaf injury and biomass production in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cultivars. *Indian J Sci Technol*, 4(11), 1542-1546.

Alavi-Panah, S. K., & Zehtabian, G. R. (2002, April). A database approach for soil salinity mapping and generalization from remotely sensed data and geographic information system. In *FIG XXII International Congress*, 19–26 April 2002, Washington DC, USA, 1–8.

Aldabaa, A. A. A., Weindorf, D. C., Chakraborty, S., Sharma, A., & Li, B. (2015). Combination of proximal and remote sensing methods for rapid soil salinity quantification. *Geoderma*, 239, 34-46.

Alhammadi, M. S., & Glenn, E. P. (2008). Detecting date palm trees health and vegetation greenness change on the eastern coast of the United Arab Emirates using SAVI. *International Journal of Remote Sensing*, 29(6), 1745-1765.

Allbed, A., & Kumar, L. (2013). Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: a review. *Advances in Remote Sensing*, 2013.

Al-Moustafa, W. A., Al-Omran, A.M. (1990). Reliability of 1:1, 1:2, and 1:5 weight extracts for expressing salinity in light-textured soils of Saudi Arabia. *Journal of King Saud University Agricultural Sciences*, 2(2), 321–329.

Alrasbi, S. A. R., Hussain, N., & Schmeisky, H. (2010, March). Evaluation of the growth of date palm seedlings irrigated with saline water in the Sultanate of Oman. In *IV International Date Palm Conference*, 882, 233-246.

A.N.R.H. (2011). Inventaire des forages d'eau et enquête sur les débits extraits de la wilaya de Ghardaïa ; Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, 15.

Arslan, H. (2012). Spatial and temporal mapping of groundwater salinity using ordinary kriging and indicator kriging: The case of Bafra Plain, Turkey. *Agricultural water management*, 113, 57-63.

Asif, S., Ahmed, M. D. (1999). Using state-of-the-art RS and GIS for monitoring waterlogging and salinity. International Water Management Institute, Lahore, Pakistan, 16.

Askri, B., & Al-Shanfari, R.A. (2017). Assessment of Hydro-chemical Processes Inducing the Groundwater Salinisation in Coastal Regions: Case Study of the Salalah Plain, Sultanate of Oman, in: *Water Resources in Arid Areas: The Way Forward*. Springer, 351–368.

Aubert, G. (1960). Les sols de la zone aride, étude de leur formation, de leur conservation actes coll. unesco de paris sur le problème de la zone aride. Paris

Ayers, R.S.; Westcot, D.W. (1985). *Water Quality for Agriculture; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy*, 29, 174.

Bailey, R. T., Tavakoli-Kivi, S., & Wei, X. (2019). A salinity module for SWAT to simulate salt ion fate and transport at the watershed scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(7), 3155-3174.

Bait, A., Chettouch, C., Guemia, S. (1977). Possibilités de développement de la palmeraie de Guerrara. Mémoire d'ingénieur d'Etat, I.T.A., Mostaganem, 82.

Baize, D. (1988). *Guide des analyses courantes en pédologie*. INRA Edition, 170.

Bayraktar, H., & Turalioglu, F. S. (2005). A Kriging-based approach for locating a sampling site—in the assessment of air quality. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(4), 301-305.

Ben-Dor, E., Patkin, K., Banin, A., & Karnieli, A. (2002). Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data—a case study over clayey soils in Israel. *International Journal of Remote Sensing*, 23(6), 1043-1062.

- Benslama, A., Khanchoul, K., Benbrahim, F., Boubehziz, S., Chikhi, F., & Navarro-Pedreño, J. (2020). Monitoring the Variations of Soil Salinity in a Palm Grove in Southern Algeria. *Sustainability*, 12(15), 6117.
- Berkal, I., Walter, C., Michot, D., & Djili, K. (2014). Seasonal monitoring of soil salinity by electromagnetic conductivity in irrigated sandy soils from a Saharan oasis. *Soil Research*, 52(8), 769-780.
- Blaylock, A. D. (1994). Soil salinity, salt tolerance, and growth potential of horticultural and landscape plants. University of Wyoming, Cooperative Extension Service, Department of Plant, Soil, and Insect Sciences, College of Agriculture.
- Bohn, H.L., McNeal, B.L., O'Connor, G.A. (1979). *Soil Chemistry*; John Wiley & Sons, Inc.: New York.
- Boivin, P., Hachicha, M., Job, J. O., & Loyer, J. Y. (1989). Une méthode de cartographie de la salinité des sols: conductivité électromagnétique et interpolation par krigeage. *Science du sol* (1984), 27(1), 69-72.
- Boubehziz, S., Khanchoul, K., Benslama, M., Benslama, A., Marchetti, A., Francaviglia, R., & Piccini, C. (2020). Predictive mapping of soil organic carbon in Northeast Algeria. *Catena*, 190, 104539.
- Boudibi, S., Sakaa, B., & Zapata-Sierra, A. (2019). Groundwater quality assessment using GIS, ordinary kriging and WQI in an arid area. *PONTE International Scientific Researchs Journal*.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*, 54(5), 464-465.
- Bradaï, A., Douaoui, A., Bettahar, N., & Yahiaoui, I. (2016). Improving the prediction accuracy of groundwater salinity mapping using indicator kriging method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(7), 04016023.
- Bridges, E.M.; Oldeman, L.R. (1999). Global Assessment of Human-Induced Soil Degradation. *Arid Soil Res. Rehabil.* 13, 319–325.

- Butcher K, Wick AF, De Sutter T, Chatterjee A, Harmon J. (2016). Soil salinity: a threat to global food security. *Agron J* 108(6):2189–2200
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil science society of America journal*, 58(5), 1501-1511.
- Casado-Vela, J., Sellés-Marchart, S., Navarro-Pedreño, J., Bustamante, M., Mataix, J., Guerrero, C. and Gómez Lucas, I. (2006). Evaluation of composted sewage sludge as nutritional source for horticultural soils. *Waste Management*. 26(9), 946-952.
- CDARS. (2019). Commissariat au Développement Agricole des Régions Sahariennes de Ouargla. Effectif du cheptel camelin en Algérie.
- Chabour, N. (2006). Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas saharien et la plateforme saharienne à l'Est de l'Algérie. Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire.
- Chaieb, G., Abdelly, C., & Michalet, R. (2019). Interactive effects of climate and topography on soil salinity and vegetation zonation in North-African continental saline depressions. *Journal of Vegetation Science*, 30(2), 312-321.
- Cherier, M. K., Benouaz, T., Bekkouche, S. M. A., & Hamdani, M. (2018). Some solar passive concepts in habitat through natural ventilation case study: Dry climate in Algeria Ghardaia. *Case studies in thermal engineering*, 12, 1-7.
- Chiles, J. P., & Delfiner, P. (2009). *Geostatistics: modeling spatial uncertainty* (Vol. 497). John Wiley & Sons.
- Chinnusamy, V., Jagendorf, A., & Zhu, J. K. (2005). Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop science*, 45(2), 437-448.
- CISEAU (Centre d'Information Sur l'Eau Agricole et ses Usages). (2006). Extent of Salinization and Strategies for Salt-Affected Land Prevention and Rehabilitation: Background Paper. In *Electronic Conference on Salinization Organised and Coordinated; IPTRID: Rome, Italy*.

- Cornet, A. (1964). ' Introduction a l'hydrogéologie du Sahara, Algérie', Revue de géographie physique et de géologie dynamique Dynam. Volume 6.
- Corwin, D.L., Lesch, S. M. (2003). Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture Theory, Principles, and Guidelines. *Agronomy Journal*. 95, 455-471.
- Corwin, D. L., Lesch, S. M., Oster, J. D., & Kaffka, S. R. (2006). Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma*, 131(3-4), 369-387.
- Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: I. Survey protocols. *Computers and electronics in agriculture*, 46(1-3), 103-133.
- Côte, M. (1998). Des oasis malades de trop d'eau?. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 9(2), 123-130.
- Couture, I., & Montérégie-Est, M. A. P. A. Q. (2004). Analyse d'eau pour fin d'irrigation. *AGRI. VISION*. 8p.
- Dajoz, R. (1983). *Précis d'écologie*. Edition Dunod, Paris, 503.
- Dajoz, R. (2003). *Précis d'écologie*. Edition Dunod, Paris, 615.
- Daliakopoulos, I. N., Tsanis, I. K., Koutroulis, A., Kourgialas, N. N., Varouchakis, A. E., Karatzas, G. P., & Ritsema, C. J. (2016). The threat of soil salinity: A European scale review. *Science of the Total Environment*, 573, 727-739.
- Daoud, Y., & Halitim, A. (1994). Irrigation et salinisation au Sahara algérien. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 5(3), 151-160.
- Diba, M. (1995). Analyse comparée de deux méthodes d'évaluation de la répartition spatiale de la salinité des sols: la pâte saturée (méthode de référence), la conductivimétrie électromagnétique. Ph.D. Thesis, Mémoire d'Ingénieur, Dakar, Senegal.

Djili, K., Daoud, Y., Gaouar, A., & Beldjoudi, Z. (2003). La salinisation secondaire des sols au Sahara. Conséquences sur la durabilité de l'agriculture dans les nouveaux périmètres de mise en valeur. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 14(4), 241-246.

Djili, B., Hamdi-Aissa, B. (2018). Contribution à l'étude des sols alluviaux des bassins du M'zab : Approche morpho- analytique, organisation spatiale et intérêt environnemental. Thèse de doctorat Université Kasdi Merbah- Ourgla.

Doolittle, J. A., & Brevik, E. C. (2014). The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*, 223, 33-45.

Douaik, A., Van Meirvenne, M., Tóth, T. (2009). Stochastic Approaches for Space-Time Modeling and Interpolation of Soil Salinity. In *Remote Sensing of Soil Salinization: Impact on Land Management*, CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 273–290.

Dubief, J. (1953). Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara (No. 553.70966). Gouvernement général de l'Algérie, Direction du service de la colonisation et de l'hydraulique, Service des études scientifiques.

Dubost, D. (1992). Aridité, agriculture et développement : le cas des oasis Algériennes. *Sécheresse* ; 3 : 85-96.

Dubost, D. (2002). Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes.

Durand, J.H. (1983). *Les Sols Irrigables; Etude Pedologique*; Presses Universitaires de France: Paris, France.

EAD. (2009). Soil survey of Abu Dhabi Emirate. Environment Agency Abu Dhabi. 5 Volumes

EAD. (2012). Soil survey of Northern Emirates. Environment Agency Abu Dhabi. 2 Volumes

Ed. CRSTRA, Biskra. 423p.

Eddine, B. S., & Foued, C. (2010). La conduite du palmier dattier dans les palmeraies des Zibans (Algérie) Quelques éléments d'analyse. *European Journal of Scientific Research*, 42(4), 644-660.

- Emery, X. (2005). Simple and ordinary multigaussian kriging for estimating recoverable reserves. *Mathematical Geology*, 37(3), 295-319.
- Energoproject Beograd. (1967). Etude de l'irrigation des grands périmètres Algériens, Périmètre de Bas-Cheliff. Rapport.
- Essien, O. E., & Ubit, F. (2013). Investigation of Ikpa river water quality with consideration for domestic and agricultural uses. *Wudpecker Journal of Agricultural Research*, 2(11), 315-323.
- Farajnia, A., & Yarahmadi, J. (2017). Soil Salinity and Alkalinity Map Preparation Based on Spatial Analysis of GIS (Case Study: Tabriz Plain). *Open Journal of Geology*, 7(06), 778-778.
- Food and Agriculture Organization. (2012). *FAO Statistical Year Book, Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy*, 352.
- Food and Agricultrual Organization. (2002). *The Salt of the Earth: Hazardous for Food Production. Word Food Summit. Five Years Later. 10–13 June 2012.*
- Fourati, H. T., Bouaziz, M., Benzina, M., & Bouaziz, S. (2017). Detection of terrain indices related to soil salinity and mapping salt-affected soils using remote sensing and geostatistical techniques. *Environmental monitoring and assessment*, 189(4), 177.
- Franzen, D. (2007). *Managing saline and sodic soils in North Dakota.*
- Gautier, M., & Gouskov, M. N. (1951). *Le forage de Guerrara. Deuxième sondage d'étude et premier grand sondage d'exploitation de la nappe Albienne jaillissant dans le Bas-Sahara. Terre et Eaux. Alger*, 38-42.
- Ghassemi, F., Jakeman, A. J., & Nix, H. A. (1995). *Salinisation of land and water resources: human causes, extent, management and case studies. CAB international.*
- Grattan, S. R., & Oster, J. D. (2003). Use and reuse of saline-sodic waters for irrigation of crops. *Journal of crop production*, 7(1-2), 131-162.
- Hachicha, M., Cheverry, C., & Mhiri, A. (2000). The impact of long-term irrigation on changes of ground water level and soil salinity in northern Tunisia. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 14(2), 175-182.

Halitim, A. (1985). Contribution a l'etude des sols des zones arides (hautes plaines steppiques de l'Algerie): morphologie, distribution et role des sels dans la genese et le comportement des sols (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure Agronomique).

Hasab, H. A., Dibs, H., Dawood, A. S., Hadi, W. H., Hussain, H. M., & Al-Ansari, N. (2020). Monitoring and assessment of salinity and chemicals in agricultural lands by a remote sensing technique and soil moisture with chemical index models. *Geosciences*, 10(6), 207.

He, Y., DeSutter, T. M., Hopkins, D. G., Wysocki, D. A., & Clay, D. E. (2015). Relationship between 1: 5 soil/water and saturated paste extract sodium adsorption ratios by three extraction methods. *Soil Science Society of America Journal*, 79(2), 681-687.

Herrero, J., & Castañeda, C. (2015). Temporal changes in soil salinity at four saline wetlands in NE Spain. *Catena*, 133, 145-156.

Hogg, T. J., & Henry, J. L. (1984). Comparison of 1: 1 and 1: 2 suspensions and extracts with the saturation extract in estimating salinity in Saskatchewan soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 64(4), 699-704.

Hormozi, H., Hormozi, E., & Nohooji, H. R. (2012). The classification of the applicable machine learning methods in robot manipulators. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 2(5), 560.

Hosseini, E., Gallichand, J., & Marcotte, D. (1994). Theoretical and experimental performance of spatial interpolation methods for soil salinity analysis. *Transactions of the ASAE*, 37(6), 1799-1807.

Houichiti, R., & Bissati, S. (2009). Caractérisation d'un agrosystème saharien dans une perspective de développement durable: Cas de l'Oasis de SEBSEB (Wilaya de GHARDAIA) (Doctoral dissertation).

Huang, Y., Wang, Y., Zhao, Y., Xu, X., Zhang, J., & Li, C. (2015). Spatiotemporal distribution of soil moisture and salinity in the Taklimakan Desert highway shelterbelt. *Water*, 7(8), 4343-4361.

Hussain, N., Al-Rawahy, S., Rabee, J., Al-Amri, M., & Causes, O. (2006). Genesis and Extent of Soil Salinity in the Sultanate of Oman Pak. *Journal Agriculture Science*, 43, 1-2.

Hussain, Z., Nazir, A., Shafique, U., & Salman, M. (2010). Comparative study for the determination of metals in milk samples using flame-AAS and EDTA complexometric titration. *Journal of scientific research*, 40(1), 1-6.

Hussein H (2001) Development of environmental GIS database and its application to desertification study in Middle East – a remote sensing and GIS application. PhD thesis Graduate School of Science and Technology, Chiba University Japan, 155 pp

Idder, T. (2007). Le problème des excédents hydriques à Ouargla: situation actuelle et perspectives d'amélioration. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 18(3), 161-167.

Jiang, H., Rusuli, Y., Kadeer, R., & Wufu, A. (2017). Evaluation and analysis of soil salinization in the arid zones based on neural network model. *Journal Geo-Information Science*, 19, 983-993.

Jiang, Q., Peng, J., Biswas, A., Hu, J., Zhao, R., He, K., & Shi, Z. (2019). Characterising dryland salinity in three dimensions. *Science of The Total Environment*, 682, 190-199.

Jordán, M. M., Navarro-Pedreno, J., García-Sánchez, E., Mateu, J., & Juan, P. (2004). Spatial dynamics of soil salinity under arid and semi-arid conditions: geological and environmental implications. *Environmental geology*, 45(4), 448-456.

Jones A, Panagos P, Barcelo S, Bouraoui F, Bosco C, Dewitte O, Gardi C, Erhard M, Hervás

J, Hiederer R, Jeffery S, Lükewille A, Marmo L, Montanarella L, Olazábal C, Petersen J-E,

Penizek V, Strassburger T, Tóth G, Van Den Eeckhaut M, Van Liedekerke M, Verheijen F,

Viestova E, Yigini Y. (2011). The state of soil in Europe. Publications Office of the European

Union, Luxembourg, 71 pp

Juan, P., Mateu, J., Jordan, M. M., Mataix-Solera, J., Meléndez-Pastor, I., & Navarro-Pedreño, J. (2011). Geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil salinity. *Journal of Geochemical Exploration*, 108(1), 62-72.

- Kavianpoor, H., Ouri, A. E., Jeloudar, Z. J., & Kavian, A. (2012). Spatial variability of some chemical and physical soil properties in Nesho Mountainous Rangelands. *American Journal of Environmental Engineering*, 2(1), 34-44.
- Keshavarzi, A., Sarmadian, F. (2012). Mapping of spatial distribution of soil salinity and alkalinity in a Semi-Arid region. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation*, 44, 3–14.
- Khadraoui, A. (2007). *Sols et hydraulique agricole dans les Oasis Algériennes*. 305P.
- Kisr. (1999a). Soil survey for the state of Kuwait – Volume II: Reconnaissance survey. AACM International, Adelaide.
- Kisr. (1999b). Soil survey for the state of Kuwait – Volume IV: Semi-detailed survey. AACM International, Adelaide.
- Kotuby-Amacher, J., Koenig, R., Kitchen, B. (2000). *Salinity and Plant Tolerance*; Electronic Publication AG-SO-03; Utah State University Extension: Logan, UT, USA.
- Kuper, M., Faysse, N., Hammani, A., Hartani, T., Marlet, S., Hamamouche, M.F. & Ameer, F. (2016). Liberation or anarchy? The Janus nature of groundwater use on North Africa's new irrigation frontiers, in: *Integrated Groundwater Management*. Springer, Cham, 583–615.
- Landon, J. R., (1984). *Booker tropical soil manual*, paperback edn. Routledge Taylor & Francis Group, New York/London, 474.
- Larnaude, M. (1949). Eaux artésiennes et pluviosité dans le Sahara algérien. In: *Annales de géographie*. Persée-Portail des revues scientifiques en SHS, 311, 282-283.
- Laslett, G. M., & McBratney, A. B. (1990). Further comparison of spatial methods for predicting soil pH. *Soil Science Society of America Journal*, 54(6), 1553-1558.
- Le Brusq, J. Y., & Loyer, J. Y. (1981). Relations entre les mesures de conductivités sur des extraits de sols de rapports sol-solution variables dans la vallée du fleuve Sénégal. *Cah. ORSTOM., sér. Pédol., Vol. XIX, 3*. 293-301.

Le Houérou, H. N. (1989). Classification écoclimatique des zones arides (sl) de l'Afrique du Nord. *Ecologia mediterranea*, 15(3), 95-144.

Lefohn, A. S., Knudsen, H. P., & Shadwick, D. S. (2011). Using ordinary kriging to estimate the April–September 24-hour W126 and N100 ozone exposure metrics for 2010 for the United States.

Lhissoui, R., El Harti, A., & Chokmani, K. (2014). Mapping soil salinity in irrigated land using optical remote sensing data. *Eurasian Journal of Soil Science*, 3(2), 82-88.

Li, X., Chang, S. X., & Salifu, K. F. (2014). Soil texture and layering effects on water and salt dynamics in the presence of a water table: a review. *Environmental reviews*, 22(1), 41-50.

Li, Y., Zhao, K., Ding, Y., Ren, J. (2013, August). An Empirical Method for Soil Salinity and Moisture Inversion in West of Jilin. In *Proceedings of the International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2013)*, Nanjing, China, 26–28 July 2013; Atlantis Press: Paris, France, 19–21.

Liu, Q., Hanati, G., Danierhan, S., Liu, G., Zhang, Y., & Zhang, Z. (2020). Identifying Seasonal Accumulation of Soil Salinity with Three-Dimensional Mapping—A Case Study in Cold and Semiarid Irrigated Fields. *Sustainability*, 12(16), 6645.

Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). Crop salt tolerance—current assessment. *Journal of the irrigation and drainage division*, 103(2), 115-134.

Marlet, S., & Ruelle, P. (2003). Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation: actes de l'atelier du PCSI, 28-29 mai 2002, Montpellier, France. CIRAD.

Matheron, G. (1967). Kriging or polynomial interpolation procedures. *CIMM Transactions*, 70, 240-244.

Mei, G., Xu, L., & Xu, N. (2017). Accelerating adaptive inverse distance weighting interpolation algorithm on a graphics processing unit. *Royal Society open science*, 4(9), 170436.

Metternicht, G. I., & Zinck, J. A. (2003). Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote sensing of Environment*, 85(1), 1-20.

Meul, M., & Van Meirvenne, M. (2003). Kriging soil texture under different types of nonstationarity. *Geoderma*, 112(3-4), 217-233.

Monographies régionales, série 1, Algérie n °14, 81p

Mitas, L., & Mitasova, H. (1999). Spatial interpolation. *Geographical information systems: principles, techniques, management and applications*, 1(2).

Moulias, D. (1927) L'eau dans les oasis sahariennes : (Organisation hydraulique, régime juridique). Thèse de doctorat, université d'Alger, 305.

Mueller, T. G., Pusuluri, N. B., Mathias, K. K., Cornelius, P. L., Barnhisel, R. I., & Shearer, S. A. (2004). Map quality for ordinary kriging and inverse distance weighted interpolation. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 2042-2047.

Mulla, D., McBratney, A. (2000). Soil Spatial Variability. In *Handbook of Soil Science*, A-321–A-352.

Munns, R. (2005). Genes and salt tolerance: bringing them together. *New phytologist*, 167(3), 645-663.

Nag, S. K., & Ghosh, P. (2013). Variation in groundwater levels and water quality in Chhatna Block, Bankura district, West Bengal—a GIS approach. *Journal of the Geological Society of India*, 81(2), 261-280.

Navarro-Pedreño, J., Gómez, I., Mataix, J. (1993). Growth, yield and quality of tomato cv. Muchamiel under saline irrigation. *Acta Horticulturae*. 335,131-135.

Netondo, G. W., Onyango, J. C., & Beck, E. (2004). Sorghum and salinity: II. Gas exchange and chlorophyll fluorescence of sorghum under salt stress. *Crop science*, 44(3), 806-811.

Nielsen, D. R., Wierenga, P. J., & Biggar, J. W. (1983). Spatial soil variability and mass transfers from agricultural soils. *Chemical mobility and reactivity in soil systems*, 11, 65-78.

Nielsen, D. R., & Wendroth, O. (2003). *Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation*. Catena Verlag.

Niñerola, V. B., Navarro-Pedreño, J., Lucas, I. G., Pastor, I. M., & Vidal, M. M. J. (2017). Geostatistical assessment of soil salinity and cropping systems used as soil phytoremediation strategy. *Journal of Geochemical Exploration*, 174, 53-58.

Nogués, J., Robinson, D. A., & Herrero, J. (2006). Incorporating electromagnetic induction methods into regional soil salinity survey of irrigation districts. *Soil Science Society of America Journal*, 70(6), 2075-2085.

Oldeman LR, Hakkeling RTA, Sombroek WG (1991) World map of the status of human-induced soil degradation. An explanatory note. Second revised edition. International Soil Reference and Information Center (ISRIC), Wageningen, 35 pp

O.N.M. Ghardaïa, 2020 - Office Nationale Météorologie. Les données climatiques de la région de Ghardaïa (1990-2018), 1p.

O.N.M. (National Office Meteorology). 2017. Données climatiques de la région de Ghardaïa Algérie; ONM: Alger, Algeria, 2017.

Ouali, S., Mehmah, B., & Malek, A. (2007) Etude de faisabilité d'utilisation des eaux thermales de Zelfana Dans la Production d'Hydrogène. *Revue des Energies Renouvelables*.

Ozenda P. (1982). Flore du Sahara. Edition du centre nationale des recherches scientifiques, Paris, 39p.

Palacios, O. and Aceves, E. (1970). Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola. Chapingo, MX: Colegio de Postgraduados.

Pan, X.; Chao, J. (2003). Theory of stability, and regulation and control of ecological system in oasis. *Global and Planet Change*, 37(3-4), 287–295.

Pansu M., Gautheyrou J. (2002). L'analyse du sol minéralogique, organique et minéral.

Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M.J., Vidal, J. and Sánchez, A. (2003). The role of low-quality irrigation water in the desertification of semi-arid zones in Murcia, SE Spain. *Geoderma*. 113(1-2): 109–125.

Phillips, D.L.; Lee, E.H.; Herstrom, A.A.; Hogsett, W.E.; Tingey, D.T. (1997). Use of auxiliary data for spatial interpolation of ozone exposure in southeastern forests. *Environmetrics: The Official Journal of the International Environmetrics Society*, 8(1), 43–61.

Posts, V. M. (2018). Difference between IDW and Kriging – Variogram graph. Trang Vo. <https://trangthuyvo.wordpress.com/2018/09/05/difference-between-idw-and-kriging-variogram-graph/>

Pouget, M. (1980). Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. ORSTOM, Paris.

Qadir, M., Quillérou, E., Nangia, V., Murtaza, G., Singh, M., Thomas, R. J., ... & Noble, A. D. (2014, November). Economics of salt-induced land degradation and restoration. In *Natural resources forum*, 38 (4), 282-295.

Ramoliya, P. J., & Pandey, A. N. (2003). Soil salinity and water status affect growth of Phoenix dactylifera seedlings. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 31(4), 345-353.

Reza, S.; Sarkar, D.; Baruah, U.; Das, T. (2010). Evaluation and comparison of ordinary kriging and inverse distance weighting methods for prediction of spatial variability of some chemical parameters of Dhalai district, Tripura. *Agropedology*, 20, 38–48.

Richards, L. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. Handbook No. 60; US Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 1954.

Robinson, T. P., & Metternicht, G. (2006). Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and electronics in agriculture*, 50(2), 97-108.

Rouhani, S. (1986). Comparative study of ground-water mapping techniques. *Groundwater*, 24(2), 207-216.

S.C.G., 1952. Carte géologique d'Algérie. Feuille d'Alger Sud. (1/500.000). S.C.G., Alger.

Scudiero, E., Skaggs, T. H., & Corwin, D. L. (2016). Comparative regional-scale soil salinity assessment with near-ground apparent electrical conductivity and remote sensing canopy reflectance. *Ecological indicators*, 70, 276-284.

Sebseb. Rapport d'orientation, Phase finale. Bureau d'Etudes pour l'urbanisme et le bâtiment URBATIA, agence de Ghardaïa. 75p.

Simonneau, P., & Aubert, G. (1963). L'utilisation des eaux salées au Sahara. *Ann. Agron., ORSTOM*, 14(5), 859-872.

Semar, A., Hartani, T., & Bachir, H. (2019). Soil and water salinity evaluation in new agriculture land under arid climate, the case of the Hassi Miloud area, Algeria. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 4(1), 1-14.

Shahid SA, Abdelfattah MA, Omar SAS, Harahsheh H, Othman Y, Mahmoudi H (2010) Mapping and monitoring of soil salinization – remote sensing, GIS, modeling, electromagnetic induction and conventional methods – case studies. In: Ahmad M, Al-Rawahy SA (eds) *Proceedings of the international conference on soil salinization and groundwater salinization in arid regions*, vol 1. Sultan Qaboos University, Muscat, pp 59–97

Shahid, S. A. (2013). Developments in soil salinity assessment, modeling, mapping, and monitoring from regional to submicroscopic scales. *Developments in soil salinity assessment and reclamation*, 3-43.

Shahid, S. A., Abdelfattah, M. A., & Mahmoudi, H. (2013). Innovations in soil chemical analyses: New ECs and total salts relationship for Abu Dhabi Emirate soils. In *Developments in soil classification, land use planning and policy implications* (pp. 799-812). Springer, Dordrecht.

Shahid, S. A., Abo-Rezq, H., & Omar, S. A. S. (2002). Mapping soil salinity through a reconnaissance soil survey of Kuwait and geographic information system. Annual research report, Kuwait Institute for Scientific Research, Kuwait, KISR, 6682, 56-59.

Shepard, D. (1968, January). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference* (pp. 517-524).

Shi, P., & Rui, X. F. (2005). Comparison and improvement of spatial rainfall interpolation methods. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 33(4), 361-365.

Shirokova, Y., Forkutsa, I., & Sharafutdinova, N. (2000). Use of electrical conductivity instead of soluble salts for soil salinity monitoring in Central Asia. *Irrigation and Drainage Systems*, 14(3), 199-206.

Shrivastava, P. and Kumar, R. (2015). Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 22(2): 123–131.

Soil Survey Division Staff. *Soil Survey Manual*. USDA Handbook No. 18; U.S. Government Printing Office: Washington, DC, USA, 1993.

Soil Survey Staff. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, 2nd ed.; Natural Resources Conservation Service U.S. Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 1999.

Sonmez S, Bukuktas D, Okturen F, Citak S., (2008) Assessment of different soil water ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in soil salinity studies. *Geoderma* 144(1–2):361–369.

Spies B, Woodgate P., (2005) Salinity mapping methods in the Australian context. Technical Report, Department of the Environment and Heritage; and Agriculture, Fisheries and Forestry, Land and Water Australia, Canberra, Australia, 234 pp

Stewart, P., (1969). Quotient pluviométrique et dégradation biosphérique. *Bulletin de la société d'histoire naturelle de l'Afrique du Nord*, 59, 23-36.

Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Bollero, G. A., Bullock, D. G., & Wiebold, W. J. (2003). Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agronomy Journal*, 95(3), 472-482.

Sumfleth, K., & Duttmann, R. (2008). Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators. *Ecological indicators*, 8(5), 485-501.

Sun, Y., Kang, S., Li, F., & Zhang, L. (2009). Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China. *Environmental Modelling & Software*, 24(10), 1163-1170.

Talaat, H. A., & Ahmed, S. R. (2007). Treatment of aricultural drainage water: technological schemes and financial indicators. *Desalination*, 204(1-3), 102-112.

Tanji, K. K. (2002). Salinity in the soil environment. In *Salinity: Environment-plants-molecules* (pp. 21-51). Springer, Dordrecht.

The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2002) *La Lutte contre la Désertification. Ressources en eau Douce et Réhabilitation Des Terres Dégradées Dans Les Zones Arides*. In *Séminaire International sur la Lutte Contre la Désertification; MAB-UNESCO: N'djamena, Tchad*, p. 135.

Toutain, G. (1967). Le palmier dattier: Culture et production. *Al Awamia*, 25, 83–151.

Triantafilis, J., Laslett, G. M., & McBratney, A. B. (2000). Calibrating an electromagnetic induction instrument to measure salinity in soil under irrigated cotton. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 1009-1017.

Triantafilis, J., Ward, W. T., & McBratney, A. B. (2001). Land suitability assessment in the Namoi Valley of Australia, using a continuous model. *Soil Research*, 39(2), 273-289.

Tripathi, R., Nayak, A. K., Shahid, M., Raja, R., Panda, B. B., Mohanty, S., ... & Sahoo, R. N. (2015). Characterizing spatial variability of soil properties in salt affected coastal India using geostatistics and kriging. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(12), 10693-10703.

U.S. Salinity Laboratory Staff. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*, USDA Handbook 60; U.S. Government Printing Office: Washington, DC, 1954; 1–160.

Urbatia, 1996– Plan Directeur de l'Aménagement Urbain (PDAU) de la commune de

USSL Staff (1954) *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. USDA Handbook No 60 Washington DC, USA, 160 pp

Vaughan, P. J., Lesch, S. M., Corwin, D. L., & Cone, D. G. (1995). Water content effect on soil salinity prediction: a geostatistical study using cokriging. *Soil Science Society of America Journal*, 59(4), 1146-1156.

Wackernagel, H. (1995). Mapping with Kriging. In *Multivariate Geostatistics* (pp. 89-93). Springer, Berlin, Heidelberg.

Wackernagel, H. (1994). Cokriging versus kriging in regionalized multivariate data analysis. *Geoderma*, 62(1-3), 83-92.

Wang, H., & Jia, G. (2012). Satellite-based monitoring of decadal soil salinization and climate effects in a semi-arid region of China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29(5), 1089-1099.

Wang, H., Ren, S., Hao, Z., Meng, L., Wei, W., & Jing, C. (2016). Quantitative evaluation and uncertainty assessment on geostatistical simulation of soil salinity using electromagnetic induction technique. *Journal of Environmental Protection*, 7(6), 844-854.

Wang, J., Ding, J., Yu, D., Ma, X., Zhang, Z., Ge, X., ... & Guo, Y. (2019). Capability of Sentinel-2 MSI data for monitoring and mapping of soil salinity in dry and wet seasons in the Ebinur Lake region, Xinjiang, China. *Geoderma*, 353, 172-187.

Wang, J., Liu, Y., Wang, S., Liu, H., Fu, G., & Xiong, Y. (2020). Spatial distribution of soil salinity and potential implications for soil management in the Manas River watershed, China. *Soil Use and Management*, 36(1), 93-103.

Wang, Y., Zhao, J., Fu, J., & Wei, W. (2018). Quantitative assessment of water conservation function and spatial pattern in shiyang river basin. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 4637-4648.

Wang, Y. Q., & Shao, M. A. (2013). Spatial variability of soil physical properties in a region of the Loess Plateau of PR China subject to wind and water erosion. *Land Degradation & Development*, 24(3), 296-304.

Wang, Y., Xiao, D., Li, Y., & Li, X. (2008). Soil salinity evolution and its relationship with dynamics of groundwater in the oasis of inland river basins: case study from the Fubei region of Xinjiang Province, China. *Environmental monitoring and assessment*, 140(1), 291-302.

Wang, Y. Q., & Shao, M. A. (2013). Spatial variability of soil physical properties in a region of the Loess Plateau of PR China subject to wind and water erosion. *Land Degradation & Development*, 24(3), 296-304.

Wang, Z., Zhou, B., Pei, L., Zhang, J., He, X., & Lin, H. (2018). Controlling threshold in soil salinity when planting spring wheat and sequential cropping silage corn in Northern Xinjiang using drip irrigation. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(2), 108-114.

Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley & Sons.

Wenquan, L., Fang, L., Xingyong, X., Guangquan, C., Tengfei, F., & Qiao, S. (2020). Spatial and temporal variation of soil salinity during dry and wet seasons in the southern coastal area of Laizhou Bay, China. *Indian Journal of Geo-Marine Science*. 49: 260–270.

Wrb I. (2015). *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

Wilcox, L. V. (1948). *The Quality of water for irrigation use*. United States department of agriculture, Washington. Technical bulletin n° 962, 40.

Wu, C., Liu, Q., Ma, G., Liu, G., Yu, F., Huang, C., ... & Liang, L. (2019). A study of the spatial difference of the soil quality of the Mun River basin during the rainy season. *Sustainability*, 11(12), 3423.

Wu, J., Vincent, B., Yang, J., Bouarfa, S., & Vidal, A. (2008). Remote sensing monitoring of changes in soil salinity: a case study in Inner Mongolia, China. *Sensors*, 8(11), 7035-7049.

Xu, L., Du, H., & Zhang, X. (2019). Spatial Distribution Characteristics of Soil Salinity and Moisture and Its Influence on Agricultural Irrigation in the Ili River Valley, China. *Sustainability*, 11(24), 7142.

Xuegong, Z. (1985). La télédétection aérienne, un moyen efficace d'estimer les dommages des tremblements de terre en Chine. *Impact science et société*, 35(4), 315-322.

Yakup, Z., Tiyip, T., & Nurmemet, I. (2017). Monitoring of Soil Salinization in Yutian Oasis Based on Target Polarimetric Decomposition Method and PALSAR Radar Data. *Laser & Optoelectronics Progress*, 54(6), 062803.

- Yang, F., An, F., Ma, H., Wang, Z., Zhou, X., & Liu, Z. (2016). Variations on soil salinity and sodicity and its driving factors analysis under microtopography in different hydrological conditions. *Water*, 8(6), 227.
- Yang, J., Zhao, J., Zhu, G., Wang, Y., Ma, X., Wang, J., ... & Zhang, Y. (2020). Soil salinization in the oasis areas of downstream inland rivers—Case Study: Minqin oasis. *Quaternary International*, 537, 69-78.
- Yang, X. D., Ali, A., Xu, Y. L., Jiang, L. M., & Lv, G. H. (2019). Soil moisture and salinity as main drivers of soil respiration across natural xeromorphic vegetation and agricultural lands in an arid desert region. *Catena*, 177, 126-133.
- Yang, Y., Tilman, D., Lehman, C., & Trost, J. J. (2018). Sustainable intensification of high-diversity biomass production for optimal biofuel benefits. *Nature sustainability*, 1(11), 686-692.
- Yao, Z., Liu, J., Zhao, X., Long, D., & Wang, L. (2015). Spatial dynamics of aboveground carbon stock in urban green space: a case study of Xi'an, China. *Journal of Arid Land*, 7(3), 350-360.
- Yasrebi, J., Saffari, M., Fathi, H., Karimian, N., Moazallahi, M., & Gazni, R. (2009). Evaluation and comparison of ordinary kriging and inverse distance weighting methods for prediction of spatial variability of some soil chemical parameters. *Research Journal of Biological Sciences*, 4(1), 93-102.
- Zhang, H., Schroder, J. L., Pittman, J. J., Wang, J. J., & Payton, M. E. (2005). Soil salinity using saturated paste and 1:1 soil to water extracts. *Soil Science Society of America Journal*, 69(4), 1146-1151.
- Zhu, J. K. (2001). Plant salt tolerance. *Trends in plant science*, 6(2), 66-71.
- Zimmerman, D., Pavlik, C., Ruggles, A., & Armstrong, M. P. (1999). An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. *Mathematical Geology*, 31(4), 375-390.

ANNEXE

Annexe 1 : Les valeurs de l'CEe à partir de la CE d'extraits de suspensions de sol : rapport 1/5 (eau/sol) ; Mai /Novembre

Mai	A1				A2			
	CE(1:5)		CE (estimation)	Risque de salinisation	CE (1:5)		CE (estimation)	Risque de salinisation
	Moy	ET			Moy	ET		
1	2.90	0.47	23.52	Très élevé	2.38	0.35	19.19	Très élevé
2	2.87	0.39	23.25	Très élevé	1.99	0.35	15.99	Très élevé
3	5.48	0.90	44.72	Très élevé	2.78	0.50	22.50	Très élevé
4	2.27	0.34	18.36	Très élevé	2.62	0.50	21.18	Très élevé
5	2.64	0.41	21.33	Très élevé	1.42	1.37	11.35	Elevé
6	0.31	0.02	2.24	Faible	0.33	0.07	2.37	Faible
7	2.02	0.08	16.31	Très élevé	1.40	0.15	11.14	Elevé
8	2.38	0.49	19.22	Très élevé	1.65	0.26	13.26	Elevé
9	6.56	1.47	53.55	Très élevé	3.80	0.60	30.91	Très élevé
10	2.46	0.27	19.85	Très élevé	2.58	0.27	20.89	Très élevé
11	4.10	0.83	33.39	Très élevé	2.90	0.47	23.53	Très élevé
12	5.07	0.68	41.32	Très élevé	3.58	0.62	29.10	Très élevé
13	0.36	0.01	2.59	Faible	0.39	0.15	2.87	Faible
14	0.66	0.03	5.11	Modéré	0.79	0.41	6.18	Modéré
15	0.34	0.04	2.43	Faible	0.36	0.05	2.65	Faible
16	0.60	0.05	4.56	Modéré	0.53	0.08	4.06	Modéré
17	0.38	0.11	2.77	Faible	0.35	0.26	2.53	Faible
18	7.27	1.38	59.41	Très élevé	1.97	0.28	15.84	Elevé
19	0.37	0.05	2.73	Faible	0.42	0.06	3.12	Faible
20	0.81	0.14	6.31	Modéré	2.09	0.37	16.84	Très élevé
21	0.76	0.02	5.95	Modéré	0.54	0.09	4.13	Modéré
22	0.29	0.03	2.04	Faible	0.59	0.01	4.54	Modéré
23	0.38	0.02	2.82	Faible	0.56	0.06	4.27	Modéré
24	2.59	0.34	20.96	Très élevé	2.65	0.42	21.42	Très élevé
25	4.92	0.87	40.13	Très élevé	2.90	0.49	23.47	Très élevé
26	0.85	0.09	6.68	Modéré	1.35	0.11	10.76	Elevé
27	0.38	0.03	2.81	Faible	0.34	0.02	2.46	Faible
28	0.27	0.06	1.89	Non salinisé	0.31	0.03	2.24	Faible
29	0.44	0.07	3.25	Faible	0.90	0.19	7.09	Modéré
30	5.12	0.86	41.73	Très élevé	5.18	0.82	42.22	Très élevé
31	2.46	0.27	19.85	Très élevé	1.89	0.14	15.21	Elevé
32	0.25	0.07	1.74	Non-salinisé	0.28	0.05	1.99	Non-salinisé
33	0.15	0.07	0.92	Non-salinisé	0.58	0.46	4.47	Modéré
34	0.35	0.04	2.53	Faible	0.42	0.04	3.12	Faible
35	5.75	1.03	46.92	Très élevé	2.54	0.44	20.52	Très élevé
36	0.33	0.02	2.36	Faible	0.49	0.03	3.69	Faible

37	1.42	0.10	11.32	Elevé	1.16	0.20	9.21	Elevé
38	2.34	0.40	18.93	Très élevé	2.97	0.37	24.11	Très élevé
39	0.36	0.24	2.61	Faible	0.63	0.22	4.82	Modéré
40	0.79	0.09	6.17	Modéré	0.93	0.14	7.34	Modéré
41	1.19	0.20	9.45	Elevé	1.09	0.34	8.60	Elevé
42	0.33	0.06	2.41	Faible	1.08	0.13	8.57	Elevé
43	0.65	0.07	5.03	Modéré	0.64	0.12	4.96	Modéré
44	3.07	0.34	24.87	Très élevé	2.85	0.48	23.10	Très élevé
45	0.54	0.06	4.09	Modéré	2.42	0.44	19.58	Très élevé

Novembre	A1				A2			
	CE (1:5)		CE (estimation)	Risque de salinisation	CE (1:5)		CE (estimation)	Risque de salinisation
	Moy	ET			Moy	ET		
1	0.43	0.08	3.20	Faible	0.46	0.04	3.45	Faible
2	9.42	0.04	77.10	Très élevé	4.09	0.08	33.25	Très élevé
3	9.24	0.18	75.62	Très élevé	6.29	0.04	51.33	Très élevé
4	1.83	0.05	14.67	Elevé	2.22	0.04	17.88	Très élevé
5	0.21	0.01	1.40	Non-saline	0.36	0.05	2.59	Faible
6	4.12	0.02	33.50	Très élevé	3.10	0.16	25.11	Très élevé
7	6.39	0.01	52.15	Très élevé	0.60	0.05	4.56	Modéré
8	0.27	0.03	1.89	Non-salinisé	0.63	0.12	4.81	Modéré
9	0.34	0.00	2.43	Faible	0.33	0.08	2.41	Faible
10	0.37	0.00	2.69	Faible	0.34	0.02	2.42	Faible
11	0.54	0.01	4.13	Modéré	0.58	0.05	4.40	Modéré
12	0.69	0.03	5.34	Modéré	1.25	0.08	9.95	Elevé
13	0.32	0.01	2.28	Faible	0.53	0.13	3.99	Faible
14	5.20	0.04	42.41	Très élevé	3.12	0.04	25.28	Très élevé
15	0.35	0.01	2.55	Faible	0.61	0.09	4.64	Modéré
16	0.57	0.02	4.38	Modéré	0.68	0.04	5.26	Modéré
17	8.32	0.04	68.02	Très élevé	5.07	0.29	41.30	Très élevé
18	2.14	0.01	17.25	Très élevé	1.08	0.18	8.55	Elevé
19	0.33	0.01	2.39	Faible	0.44	0.11	3.25	Faible
20	0.48	0.01	3.62	Faible	1.14	0.23	9.00	Elevé
21	4.13	0.00	33.59	Très élevé	2.27	0.06	18.33	Très élevé
22	1.35	0.03	10.73	Elevé	1.32	0.08	10.52	Elevé
23	4.33	0.03	35.26	Très élevé	3.44	0.11	27.91	Très élevé
24	2.16	0.04	17.38	Très élevé	2.59	0.11	20.96	Très élevé
25	9.93	0.06	81.29	Très élevé	4.64	0.33	37.77	Très élevé
26	0.21	0.11	1.36	Non-salinisé	0.26	0.04	1.81	Non-salinisé
27	0.42	0.01	3.10	Faible	0.41	0.06	3.00	Faible
28	0.28	0.02	1.96	Non-salinisé	0.25	0.08	1.73	Non-salinisé
29	0.43	0.03	3.24	Faible	1.57	0.06	12.58	Elevé

30	6.02	0.11	49.15	Très élevé	4.82	0.27	39.29	Très élevé
31	0.32	0.08	2.33	Faible	0.52	0.30	3.94	Faible
32	0.25	0.01	1.75	Non-salinisé	0.54	0.25	4.07	Modéré
33	0.23	0.05	1.59	Non-salinisé	0.29	0.18	2.01	Faible
34	0.39	0.04	2.87	Faible	0.55	0.33	4.19	Modéré
35	0.61	0.01	4.64	Modéré	0.64	0.11	4.89	Modéré
36	0.38	0.01	2.78	Faible	0.35	0.16	2.51	Faible
37	0.43	0.01	3.18	Faible	3.90	0.19	31.69	Très élevé
38	2.47	0.05	19.94	Très élevé	2.65	0.20	21.45	Très élevé
39	0.30	0.07	2.09	Faible	0.34	0.11	2.42	Faible
40	9.52	0.02	77.88	Très élevé	0.58	0.21	4.40	Modéré
41	1.52	0.04	12.12	Elevé	1.13	0.26	8.92	Modéré
42	2.67	0.06	21.58	Très élevé	1.77	0.20	14.22	Elevé
43	0.57	0.05	4.34	Modéré	0.64	0.25	4.89	Modéré
44	0.29	0.02	2.07	Faible	0.34	0.06	2.42	Faible
45	5.60	0.32	45.66	Très élevé	2.74	0.29	22.15	Très élevé

Publications



EM INTERNATIONAL

C-101, Prakriti, Balewadi, Baner,
Pune 411 045, Maharashtra, India
☎ 91-20-46745119, 9326712297

Email: rktrivedy@gmail.com; r_trivedy@bharatmail.co.in

Website: www.envirobiotechjournals.com

INTERNATIONAL JOURNALS

POLLUTION RESEARCH

Quarterly

ISSN 0257 - 8050

Bookmark not defined.

ASIAN JOURNAL OF MICROBIOLOGY

(Quarterly)

ISSN # 0972 - 3005

BIOTECHNOLOGY &
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ECOLOGY, ENVIRONMENT

AND CONSERVATION
not defined.

Quarterly ISSN

0971 - 765 X

Abderraouf Benslama^{1,5*}, Kamel Khanchoul²,
Fouzi Benbrahim³, Sana Boubbehziz²,
Faredj Chikhi¹, Mohamed Amine Abdennour⁴,
Mahmoud Tourki² and Jose Navarro-Pedreño⁵

Date: 21.4.2021

Ref.No. EEC-F-3222

¹Laboratoire de mathématiques et sciences appliquées,
Université de Ghardaïa, BP 455 Ghardaïa 47000, Algeria

²Laboratory of Soils and Sustainable Development,
Badji Mokhtar University-Annaba, P.O.Box 12 Annaba, Algeria



³Ecole normale supérieure de Ouargla, BP 398, Hai Ennasr, Ouargla 30000, Algeria

⁴Laboratory of Ecosystem Diversity and Agricultural
Production System Dynamics in Arid Zones (DEDSPAZA),
Mohamed Khider University, 07000 Biskra, Algeria

⁵Department of Agrochemistry and Environment,
University Miguel Hernández of Elche, 03202-Elche, Alicante, Spain

Article

Monitoring the Variations of Soil Salinity in a Palm Grove in Southern Algeria

Abderraouf Benslama ^{1,*}, Kamel Khanchoul ², Fouzi Benbrahim ³ , Sana Boubehziz ²,
Faredj Chikhi ¹ and Jose Navarro-Pedreño ^{4,*} 

¹ Laboratoire de Mathématiques et Sciences Appliquée, Université de Ghardaïa, BP 455, Ghardaïa 47000, Algeria; faredjeco@gmail.com

² Laboratory of Soils and Sustainable Development, Badji Mokhtar University-Annaba, P.O.Box 12, Annaba 23000, Algeria; kamel.khanchoul@univ-annaba.dz (K.K.); sanaboubehziz@gmail.com (S.B.)

³ École Normale Supérieure de Ouargla, BP 398, HaïEnnasr, Ouargla 30000, Algeria; fouzibenbrahim@yahoo.fr

⁴ Department of Agrochemistry and Environment, University Miguel Hernández of Elche, 03202 Elche, Alicante, Spain

* Correspondence: bensrofa@yahoo.fr (A.B.); jonavar@umh.es (J.N.-P.)

Received: 7 July 2020; Accepted: 23 July 2020; Published: 29 July 2020



Abstract: Soil salinity is considered the most serious socio-economic and environmental problem in arid and semi-arid regions. This study was done to estimate the soil salinity and monitor the changes in an irrigated palm grove (42 ha) that produces dates of a high quality. Topsoil samples (45 points), were taken during two different periods (May and November), the electrical conductivity (EC) and Sodium Adsorption Ratio (SAR) were determined to assess the salinity of the soil. The results of the soil analysis were interpolated using two geostatistical methods: inverse distance weighting (IDW) and ordinary Kriging (OK). The efficiency and best model of these two methods was evaluated by calculating the mean error (ME) and root mean square error (RMSE), showing that the ME of both interpolation methods was satisfactory for EC (−0.003, 0.145) and for SAR (−0.03, −0.18), but the



Predictive mapping of soil organic carbon in Northeast Algeria

Sana Boubehziz^{a,*}, Kamel Khanchoul^b, Mohamed Benslama^a, Abdelraouf Benslama^c,
Alessandro Marchetti^d, Rosa Francaviglia^d, Chiara Piccini^d

^a *Laboratory of Soil and Sustainable Development, Department of Biology, Badji Mokhtar University-Annaba, P.O. Box 12, 23000 Annaba, Algeria*

^b *Laboratory of Soil and Sustainable Development, Department of Geology, Badji Mokhtar University-Annaba, P.O. Box 12, 23000 Annaba, Algeria*

^c *Laboratory of Mathematics and Applied Sciences, University of Ghardaia, P.O. Box 455, 47000 Ghardaia, Algeria*

^d *Council for Agricultural Research and Economics, Research Centre for Agriculture and Environment, via della Navicella 2-4, 00184 Rome, Italy*

ARTICLE INFO

Keywords:

Ordinary kriging
Regression kriging
Semiarid soils
Spatial variability
Land use

ABSTRACT

Soils of semi-arid climates undergo organic carbon loss, which in turn affects their agricultural potential. Geostatistics is often used as an interpolation tool to thoroughly describe SOC spatial distribution. To focus on soil organic carbon (SOC) depletion, the Tiffech watershed (Northeast of Algeria), an economically important agricultural area, was chosen due to intensive agricultural practices, decline of forests and occurrence of erosion.

The present study aimed to predict the spatial variation of SOC in Tiffech watershed using geostatistics and a Geographical Information System (GIS) software, comparing the performance of two geostatistical methods—Ordinary Kriging (OK) and Regression Kriging (RK)—also assessing the role of auxiliary variables in improving the prediction accuracy and highlighting the role of land cover in SOC storage.

The SOC content in Tiffech soils was determined on 42 soil samples from the surface layer (0–10 cm) collected all over the study area and the results were used to estimate SOC density in non-sampled locations.

The prediction efficiency of the two methods was evaluated by calculating the Mean Error (ME), the Root Mean Square Error (RMSE) and the Root Mean Square Standardized Error (RMSSE).

The interpolation results showed that SOC distribution in the study area was correlated to the topography, the clay index, and general landscape features. SOC content increased northwards in the area, ranging from 0.53 to 6.9 kg m⁻² in relation to land use. As expected, maps figured a good conservation status of SOC stocks in areas with dense vegetation; conversely poor SOC contents were estimated where land degradation factors take place.