



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE  
ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA

FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCE DE LA NATURE ET DE LA VIE

DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

**THESE**

Présentée

Par **ABDENNOUR Mohamed Amine**

En vue de l'Obtention du Diplôme De Doctorat en Sciences Agronomiques

Option : **hydropédologie en régions arides**

**THEME**

**Variabilité spatio-temporelle de la salinisation des sols du périmètre irrigué du Ziban (Biskra) – Apport de la géostatistique et de la télédétection**

**Jury:**

Président :	Mr. MASMUDI A.	Professeur	(Université Med Khider – Biskra)
Directeur de thèse :	Mr. DOUAOUI A	Professeur	(Centre Universitaire – Tipaza)
Examineur :	Mr. BOUMARAAF B.	MCA	(Université Med Khider – Biskra)
	Mr. MESSAMEH A.	MCA	(Université Med Khider – Biskra)
Invité :	Mr BRADAI A.	MCB	(Université Hassiba Benbouali Chlef)

**Année universitaire : 2020/2021**

## ***Remerciements***

Ce travail n'aurait vu le jour sans la collaboration de nombreuses personnes qu'il m'est agréable de remercier. Vous me pardonnerez les multiples répétitions car comment exprimer ma reconnaissance qu'en utilisant le mot merci !

Tout d'abord j'exprime ma profonde gratitude et ma sincère estime à Monsieur Abdelkader DOUAOUI, professeur au centre universitaire de Tipaza, non seulement qu'il est un exemple pour moi, il m'a fait l'honneur de diriger mon travail de près et avec rigueur scientifique exemplaire, aussi pour sa disponibilité constante, ses précieux conseils, son soutien permanent et surtout pour ses qualités humaines.

Je tiens aussi à remercier mes Co-Directeur de thèse, Monsieur Manuel Pulido FERNANDEZ, docteur à l'université d'Extremadura (Espagne) et Monsieur Abdelhamid BRADAI, docteur à l'Université de Chlef, pour toute l'aide qu'ils m'ont donnée pour la réalisation de cette thèse. Je leur remercie beaucoup pour ses encouragements et leur soutien constant durant la réalisation de ce travail. Je leur exprime toute ma gratitude.

Je tiens à remercier Monsieur Ali MASMOUDI, professeur à l'université de Biskra, pour l'honneur qui me fait de présider le jury de ma soutenance, je lui exprime toute ma gratitude.

Je tiens également à remercier les membres du jury : Monsieur Belkacem BOUMAAREF docteur à l'université de Biskra et Monsieur Abdelhamid MESSAMEH, docteur à l'université de BISKRA, pour avoir accepté d'évaluer ce travail et d'enrichir le débat avec leur expérience dans le domaine.

Je voudrais également remercier Madame le Docteur Chiara PICCINI (CREA, Italie), avec qui les discussions ont été très intéressantes et utiles, et qui m'a beaucoup aidé en traitement de données.

Mes sincères remerciements au staff du département d'agronomie de l'université de Biskra qui m'ont permis de concrétiser ce projet de thèse en acceptant mon inscription.

Les personnes qui ont partagé avec moi les moments d'espoir, de joies et surtout les périodes difficiles par leur soutien continu et sans faille : Amel Bennacer, Samir Boudibi, Samir Merdaci, Toufik Aidat, Samira Kendri, Sarah Badache, Alberto Alfonso, Jesus Barena et Ibrahim Yahiaoui, je vous exprime toute ma reconnaissance et mes remerciements les plus affectueux.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué à ma formation depuis mon premier jour à l'école jusqu'au jour de ma soutenance.

**Mohamed Amine Abdennour**

## TABLE DES MATIERES

ملخص

Abstract

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction

### Chapitre 1: Synthèse bibliographique

1.1 L'irrigation par les eaux souterraines et leur conséquence sur le sol.....	4
1.2 Salinisation des sols irrigués .....	5
1.2.1 Problème de salinisation des sols en Algérie.....	5
1.2.2 Définition de la salinité du sol.....	6
1.2.3 Origine des sels.....	7
1.2.4 Mesure de la salinité .....	7
1.2.5 Paramètres de caractérisation des sols salés .....	8
1.2.6 Relations entre solutions du sol et sels précipités.....	10
1.2.7 Classifications des sols salés .....	12
1.2.8 Techniques pour la réhabilitation des sols salés .....	13
1.2.9 Action des sels solubles sur le sol .....	14
1.2.10 Effet des sels sur la plante .....	14
1.3 La qualité des eaux utilisées en irrigation .....	15
1.3.1 Les critères qu'il faut tenir en compte pour choisir une eau d'irrigation .....	15
1.3.2 Les grandeurs d'évaluation pour la qualité d'eau d'irrigation .....	16
1.3.2.1 La salinité.....	16
1.3.2.2 Le sodium.....	16
1.3.2.3 Les carbonates de sodium résiduel .....	17
1.3.3 Classification des eaux d'irrigation .....	17
1.3.3.1 Le Diagramme de Richards.....	18

1.3.3.2 Diagramme de Wilcox .....	20
-----------------------------------	----

## **Chapitre 2: Aperçu sur la zone d'étude**

2.1 Choix de la zone d'étude .....	22
2.2 Limites géographiques de la wilaya de Biskra .....	22
2.3 Situation géographique de la zone d'étude .....	23
2.4 Contexte climatologique .....	25
2.4.1 La température .....	25
2.4.2 Les précipitations .....	26
2.4.3 Vent .....	27
2.4.4 L'humidité .....	27
2.5 Synthèse climatique.....	28
2.5.1 Diagramme Ombrothermique de Gaussen .....	28
2.5.2 Climogramme d'Emberger.....	29
2.5.3 Indice de De Martonne .....	30
2.5.4 Evapotranspiration.....	31
2.6 Contexte Hydrographique .....	33
2.7 Contexte géologique et hydrogéologique.....	36
2.7.1. Géologie.....	36
2.7.2. Hydrogéologie .....	39
2.8 Pédologie.....	40
2.8.1 Sol peu évolués d'apports alluviaux.....	40
2.8.2 Sol bruns gypseux-halomorphe .....	40
2.9 Agriculture et les systèmes de production.....	41
2.9.1 Le système de production phoénicole.....	41
2.9.2 Le système de production maraîcher .....	42
2.9.3 Le système de production mixte .....	42

2.10 Conclusion.....	42
----------------------	----

### **Chapitre 3: Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols**

3.1. Introduction .....	44
3.2. Matériel et méthodes .....	46
3.2.1. Echantillonnage du sol.....	46
3.2.3. Analyse géostatistique .....	48
3.2.4. Krigeage ordinaire .....	48
3.2.5. Krigeage d'indicatrices.....	49
3.2.6. Validation .....	49
3.3 Résultats .....	50
3.3.1 Statistique descriptives sur la salinité du sol .....	50
3.3.2. Distribution des données et classifications des sols salés.....	51
3.3.3. Krigeage ordinaire .....	52
3.3.4. krigeage indicatrice.....	55
3.4. Discussion. ....	62
3.5. Conclusion.....	65

### **Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol**

4.1. Introduction .....	67
4.2. Matériel et méthodes .....	68
4.2.1. Échantillonnage du sol.....	68
4.2.2 Télédétection et SIG .....	69
4.2.3 Réflectance spectrale .....	71
4.2.4 Indices spectraux de la télédétection .....	71
4.2.5 Analyse statistique .....	72
4.2.6 Classification par la méthode de machine à vecteurs de support .....	72
4.2.7 Détection du changement .....	73
4.3. Résultats .....	73
4. 3.1 Évaluation des indices spectraux .....	73

4.3 2. Classification et cartographie de l'occupation du sol.....	73
4.3.3 Détection des changements dans l'occupation du sol .....	77
4.4 Discussion .....	81
4.5 Conclusion.....	84

## **Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols**

5.1 Introduction .....	85
5. 2. Matériel et méthodes .....	86
5.2.1. Échantillonnage du sol et analyse au laboratoire.....	86
5.2.2 Qualité des eaux utilisées en irrigation et fertilisation .....	89
5.2.3 Caractérisation géochimique de la solution du sol .....	89
5.2.4 Analyse des données.....	91
5.3 Résultats .....	91
5.3.1 Caractérisation des sols .....	91
5.3.2 Analyse multivariée des propriétés de la couche de surface (0-15 cm) .....	93
5.3.3 Analyse multivariée des propriétés du sous-sol (15-35 cm).....	95
5.3.4 Les faciès chimiques.....	97
5.3.5 Alcalinité résiduelle et voie de salinisation .....	99
5.3.6 Diagramme de concentration.....	101
5.3.7 Indice de saturation.....	103
5.3.8 Modèles de régression .....	105
5.3.9 Cartographie de la salinité des sols.....	107
5.4. Discussion .....	109
5.5 Conclusion.....	110
<b>Conclusion générale</b> .....	112
<b>Références bibliographiques</b> .....	115

## التباين المكاني والزمني لملوحة التربة في محيط الزيبان المروي (بسكرة) - مساهمة الإحصاء الجغرافي والاستشعار عن بعد

### ملخص

تتناول هذه الدراسة المتعددة التخصصات عدة أهداف و هي: (1) تقييم مستويات ملوحة التربة (الفئات) في المحيط المروي بالغروس (بسكرة ، الجزائر) باستخدام الخرائط الدقيقة ، (2) رصد التباين المكاني والزمني في ملوحة التربة الناتجة عن التغيرات في استخدام الأراضي من خلال صور الأقمار الصناعية، (3) التنبؤ بالأشكال المختلفة للملوحة لفهم التطور الجيوكيميائي للتربة المروية، و (4) تطوير نماذج التنبؤية للحصول على قيم الملوحة (التوصيل الكهربائي) بالاعتماد على التحاليل كيميائياً. أظهرت النتائج أن 88٪ من عينات التربة قيمة مرتفعة للملوحة (CE) و التي فاقت المستوى الأدنى ( $CE > 1dS/m$ ) الذي يسبب عدة صعوبات في تسيير التربة و النباتات المغروسة وظائفها الحيوية. كما أوضحت الخرائط الدقيقة المنجزة لملوحة التربة باستعمال الكريجاج العادي و الكريجاج الدال أن المنطقة بأكملها تتأثر بشكل خطير بعمليات التملح.

لقد أظهر الارتباط الإحصائي ما بين ملوحة التربة المسقية والمؤشرات الطيفية المشتقة من الصورة الصناعي لندسات 8 قيماً منخفضة غير معنوية. لوحظ تغير وديناميكيات مكانية وزمانية كبيرة في منطقة الغروس بين عامي 2009 و 2017 من خلال تطبيق التصنيف الخاضع للإشراف.. يُظهر التوصيف الجيوكيميائي للتربة علامة سلبية على القلوية المتبقية والقلوية المتبقية المععمة ، ومن المحتمل أن تترسب مؤشرات التشبع بالكربونات المعدنية. على العكس من ذلك، فإن المعادن الكبريتية دائماً ما تكون غير مشبع، أي أنها عرضة للذوبان. لذلك، فإن انخفاض القلوية وزيادة الكالسيوم في محلول التربة يفسر الشكل المحايد للملوحة.

**الكلمات المفتاحية:** منطقة الغروس ، التملح ، الإحصاء الجغرافي ، الاستشعار عن بعد ، استخدام الأراضي ، جيوكيمياء التربة ، المناطق الجافة

# **Spatio-temporal variability of soil salinization of the Ziban irrigated perimeter (Biskra) - Contribution of geostatistics and remote sensing**

## **Abstract**

The main goals of this multidisciplinary study are: (i) to assess levels of soil salinity (classes) in the irrigated perimeter of El Ghrous (Biskra, Algeria) by using precision mapping, (ii) to monitor the spatio-temporal variability of the soil salinity as induced of changes in land use through satellite imagery, (iii) to predict the different forms of salinity to understand the geochemical evolution of irrigated soils, and (iv) to develop predictive models to obtain values of electrical conductivity (EC) from standard chemical analysis. The results shows high levels of salinity in the 88% of sampled points ( $EC > 1 \text{ dS m}^{-1}$ ), i.e. values above the threshold of which many plants have problems to fulfill their living functions. From a spatial point of view the whole region is seriously affected by processes of salinization as it was shown by precision maps (ordinary and indicator kriging were the most accurate). The EC was not significantly correlated with any index obtained from Landsat 8 OLI images. Remarkable changes in land use (by using supervised classification methods) were observed between 2009 and 2017. The geochemical characterization of soils shows, in one hand, a negative sign of both the residual alkalinity and the generalized residual alkalinity and, in the other hand, saturation indexes of carbonate minerals susceptible to precipitate. Contrariwise, sulfated minerals are always undersaturated, i.e. they are susceptible to dissolution. Therefore, a decrease in the alkalinity and an increase in calcium in the soil solution explain the neutral type form of salinity.

**Keywords:** salinization, geostatistics, remote sensing, land use, soil geochemistry, arid zone

# Variabilité spatio-temporelle de la salinisation des sols du périmètre irrigué du Ziban (Biskra) – Apport de la géostatistique et de la télédétection

## Résumé

Cette étude, basée sur une approche multidisciplinaire, a pour objectifs: (i) d'évaluer les niveaux de salinité des sols (classes) dans un périmètre irrigué (El Ghrous) dans le Zab Ouest de Biskra en utilisant l'approche géostatistique pour une cartographie de précision, (ii) le suivi de la variabilité spatio-temporelle de la salinité et du changement dans l'occupation du sol par l'utilisation des images satellitaires, (iii) de prédire les voies de salinité pour comprendre l'évolution géochimique des sols irrigués, et d'établir des modèles de prédiction de la conductivité électrique (salinité) en se basant sur les analyses chimiques. L'analyse de la conductivité électrique des sols montre que 88% des points analysés ont une  $EC > 1 \text{dS m}^{-1}$ , qui est le niveau minimum de salinité (extrait dilué 1/5), au-delà duquel elle commence à poser de problèmes pour la gestion des sols et le développement des plantes. Les résultats obtenus par l'application du krigeage ordinaire et le krigeage d'indicateurs ont montré que la région est sévèrement touchée par la salinité. La corrélation entre la CE des sols irrigués et les indices spectraux dérivés de l'image Landsat 8 OLI 2017 a montré de faibles valeurs non significatives. Un changement et une dynamique spatio-temporelle très importante dans la région d'El Ghrous a été observé entre 2009 et 2017 par l'application de la classification supervisée. La caractérisation géochimique des sols montre un signe négatif de l'alcalinité résiduelle et de l'alcalinité résiduelle généralisée, et les indices de saturation de minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter. Par contre, les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre, entraînant une diminution de la composition de la solution des sols en alcalinité et une augmentation en calcium, ce qui explique la voie de salinité de type neutre.

**Mots clés :** salinisation, géostatistique, télédétection, occupation du sol, géochimie des sols, zone aride.

## Liste des figures

Figure 1. Echelle des salinités des sols, des solutions porales, et domaine de viabilité de la végétation (Grünberger, 2015). .....	9
Figure 2. Diagramme de RIVERSIDE selon Richards. ....	19
Figure 3. Le diagramme de Wilcox.....	21
Figure 4. Carte de situation géographique. ....	24
Figure 5. Températures moyennes mensuelles (maximales, moyenne et minimales) enregistrés pour la période 2006-2015. ....	26
Figure 6. Précipitations moyennes mensuelles enregistrés pour la période 2006-2015.....	27
Figure 7. Diagramme ombrothermique pour la période 2006-2015 .....	29
Figure 8. Situation de la région de Biskra dans le climogramme d'Emberger selon les données de la période 2006-2015. ....	30
Figure 9. Présentation graphique du bilan de Thornthwaite pour l'année 2013 (données de la station de l'ONM Biskra). ....	33
Figure 10. Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Biskra (ANAT, 2014). ....	35
Figure 11. Esquisse géologique de la région de Biskra (ANAT, 2003). ....	39
Figure 12. La répartition des échantillons utilisés en géostatistique. ....	47
Figure 13. Le variogramme omnidirectionnel expérimental de la conductivité électrique des sols. ....	52
Figure 14. Prévision de la carte de salinité en appliquant OK. ....	54
Figure 15. Carte de l'erreur standard pour OK .....	55
Figure 16. La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec $CE > 0,6$ . ....	58
Figure 17. La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec $CE > 1$ .....	59
Figure 18. La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec $CE > 2$ . .....	60
Figure 19. La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec $CE > 4$ . .....	61
Figure 20. La répartition des échantillons utilisés en télédétection. ....	69
Figure 21. La composition colorée (bande 5-4-3 pour l'image Landsat 8). ....	70
Figure 22. La composition colorée (bande 4-3-2 pour l'image Landsat 5). ....	71
Figure 23. Carte de l'occupation des sols de 2017 par classification SVM. ....	76
Figure 24. Carte de l'occupation des sols de 2009 par classification SVM. ....	77
Figure 25. Présentation graphique de l'évolution de l'utilisation des terres dans la zone d'étude. ....	79

Figure 26. Conversion majeure de l'utilisation des terres à El Ghrous de 2009 à 2017.....	80
Figure 27. La répartition des échantillons utilisés pour la caractérisation géochimique. ....	88
Figure 28. Diagramme de Piper appliqué aux sols d'El Ghrous.....	98
Figure 30. Evolution de l'alcalinité résiduelle calcite des solutions de sols.....	100
Figure 31. Evolution de l'alcalinité résiduelle généralisée des solutions de sols. ....	101
Figure 32. Diagrammes de concentration des échantillons de sol ; Profondeur 0 -15 (a) ; profondeur 15 - 35 (b).. .....	103
Figure 33. Valeurs de l'indice de saturation des minéraux ; Profondeur 0 -15 (a) ; profondeur 15 - 35 (b).. .....	104
Figure 34. Relation entre le SI (gypse) et le CE ; profondeur 0 -15 (a) ; profondeur 15 - 35 (b). .....	106
Figure 35. Diagrammes de dispersion des données mesurées et estimées (CE) : Profondeur 0 - 15 (a) ; profondeur 15 - 35 (b).....	107
Figure 36. Cartes de la salinité du sol. ....	108

## Liste des tableaux

Tableau 1. Echelle de la salure déterminée à partir de l'extrait de la pâte saturé (Richards, 1954).....	9
Tableau 2. Nature de la salinisation des sols selon le rapport $Cl^- / SO_4^{2-}$ .....	10
Tableau 3. Classification des sols salés.....	13
Tableau 4. Classification des eaux d'irrigation proposée par l'USDA.....	16
Tableau 5. Classement de la qualité de l'eau en fonction du danger d'alcalinisation du sol. ...	17
Tableau 6a. Les classes issues du diagramme de Riverside.....	19
Tableau 6b. Interprétation des classes du diagramme de RIVERSIDE selon Durant, (1983)....	19
Tableau 7. Moyennes mensuelles des températures minimales et maximales de la station météorologique de Biskra (ONM, 2016).....	25
Tableau 8. Moyenne de précipitation entre 2006-2015.....	26
Tableau 9. Moyenne de vitesse du vent entre 2006-2015.....	27
Tableau 10. Moyenne d'humidité de la période 2006-2015.....	28
Tableau 11. Indice de Marthone durant la période 2006-2015.....	31
Tableau 12. Calcul du bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite (2006-2015)...	32
Tableau 13. Caractéristiques des bassins versants dans la région de Biskra.....	35
Tableau 14. Évolution de la production de dattes à El Ghrous entre 2003 et 2012.....	41
Tableau 15. Statistiques descriptives de la salinité du sol mesurée par la conductivité électrique (CE).....	51
Tableau 16. La distribution de fréquence de la conductivité électrique des sols.....	52
Tableau 17. La superficie et le pourcentage de chaque classe obtenus par OK.....	53
Tableau 18. Caractéristique des semivariogrammes pour les seuils IK.....	56
Tableau 19. Plages de probabilité des zones dépassant les seuils communautaires obtenus par IK.....	57
Tableau 20. Validation croisée entre les valeurs mesurées et estimées de la salinité du sol (IK)..	62
Tableau 21. Description des indices de salinité utilisés dans ce travail.....	72
Tableau 22. Description des indices de sol et de végétation utilisés dans ce travail.....	72
Tableau 23. Corrélation entre les indices spectraux et la conductivité électrique du sol (CE)..	73

Tableau 24. Description des classes de la classification. ....	75
Tableau 25. Superficie occupée par chaque classe.....	78
Tableau 26. Changement dans l'occupation de sol dans la période 2009-2017. ....	79
Tableau 27. Statistiques descriptives des principaux paramètres analysés.....	93
Tableau 28. Coefficients de corrélation (r de Pearson) entre les 11 paramètres .....	94
Tableau 29. Corrélation des paramètres pour chaque composante principale. Profondeur : 0-15 cm. ....	95
Tableau 30. Coefficients de corrélation entre les 11 paramètres, Profondeur: 15-35 cm. ....	96
Tableau 31. Corrélation des paramètres pour chaque composante principale. Profondeur: 15-35 cm. ....	97
Tableau 32. Valeurs des paramètres utilisés dans la validation des équations.....	106

# Introduction générale

## *Introduction générale*

### **Introduction générale**

Le début du 21<sup>e</sup> siècle est marqué par la rareté des ressources en eau à l'échelle mondiale, la pollution de l'environnement et la salinisation accrue des sols et des eaux (Shrivastava and Kumar 2015). Les contraintes environnementales, à savoir les vents violents, les températures extrêmes, la salinité du sol, et la sécheresse, ont affecté sévèrement la production agricole. Parmi celles-ci, la salinité est l'une des contraintes à la fois agricoles et environnementales les plus dévastatrices, qui entraîne des réductions importantes de la superficie des terres cultivées, de la productivité et de la qualité des cultures (Yamaguchi and Blumwald 2005).

L'agriculture irriguée a permis la mise en valeur des terres arables des zones arides. Elle constitue une stratégie de lutte pour l'autosuffisance et la sécurité alimentaires de ces régions. Selon l'USSR, (2001), 35 à 40 % de la nourriture produite au monde proviennent des 15 % des terres arables cultivées en irriguée (Majdoub et al. 2012). La croissance projetée de la population mondiale pendant les 30 prochaines années exigera une augmentation d'au moins 20 % de la production agricole dans les pays développés et 60 % dans les pays en voie de développement pour maintenir les niveaux actuels de consommation alimentaire (Shahbaz and Ashraf 2013). Cependant, l'irrigation pose des problèmes de gestion et de conservation des sols et des eaux.

La salinité du sol est un énorme problème pour l'agriculture sous irrigation. Dans les régions chaudes et sèches du monde, les sols sont souvent salins et leur potentiel agricole est faible. A Biskra, la plupart des cultures sont cultivées sous irrigation et, pour aggraver ce problème, une gestion inadéquate de l'irrigation entraîne une salinisation secondaire. Les sels présents dans le sol se présentent sous forme d'ions, ces ions sont libérés par les minéraux d'altération du sol où, ils peuvent être apportés par l'eau d'irrigation ou comme engrais, ou migrent parfois vers le haut du sol à partir des eaux souterraines peu profondes. Lorsque les précipitations sont insuffisantes pour lixivier les ions du profil du sol, les sels s'accumulent dans le sol, ce qui entraîne une salinité du sol (Blaylock 1994).

En Algérie, de nombreuses études ont été réalisées sur les sols salés des régions arides et semi-arides (Bouarfa et al. 2009; Douaoui et al. 2006; Yahiaoui et al. 2015). Toutes les études ont montré que les sols se salinisent de plus en plus avec des conséquences sur leurs qualités physique, chimique et biologique.

## *Introduction générale*

Depuis les années 1990, la région des Ziban connaît une forte mutation agricole passant d'une agriculture oasienne traditionnelle vers une production quasi-exclusive de dattes, puis une production associant maraîchage tout au long de l'année et phoeniciculture (Khiari 2002). Cette dynamique aura sans doute des répercussions négatives sur la qualité des sols.

Biskra est caractérisée par une forte potentialité phoenicicole avec plus de 5 millions palmiers dattiers, et près de 100000 points d'eau. Toutes ces potentialités constituent un certain facteur de progrès et d'amélioration des conditions de vie de la population locale et de satisfaction alimentaire à l'échelle même du pays (Rechachi 2017). Malheureusement cet acquis est menacé par une gestion irrationnelle des facteurs de production et notamment l'eau et le sol, ce qui va entraîner une dégradation du milieu, une baisse de la production, un rendement instable, et dégradation de la qualité des sols et des eaux.

L'irrigation incontrôlée par des eaux qui sont souvent médiocres et par des techniques inadéquates à la région du Ziban, pose des problèmes de gestion et de conservation des sols et des eaux, principalement liés à la dynamique hydrogéochimique. En conséquence, l'irrigation peut soit produire la mobilité des sels initialement présents dans le sol, soit en apporter à ce dernier. Dans les deux cas, une dégradation des sols peut se produire. Les problèmes posés ne dépendent pas uniquement du régime hydrique ou qu'il y est présence ou absence de drainage, mais aussi de la qualité de l'eau apportée et du sol irrigué. De ce point de vue, le périmètre de Ziban présente une certaine diversité de situation induisant une dynamique spatio-temporelle importante de la salinisation des sols qu'il serait difficile de suivre et de caractériser sans l'utilisation d'outils adéquats et performants comme les SIG, la télédétection et la géostatistique.

L'objectif principal de la thèse consiste en une analyse spatio-temporelle de la salinité des sols pour d'une part, mieux comprendre les processus géochimiques de la salinisation des sols et d'autre part, appliquer les SIG, la télédétection et la géostatistique pour la connaissance et le suivi de cette salinisation.

La géostatistique qui est une méthode d'analyse spatiale et d'interpolation nous permettra de décrire les tendances et les corrélations spatiales de la salinité des sols et d'améliorer la qualité d'estimation de la cartographie. La télédétection dont l'information est disponible à l'échelle du pixel sera pour nous une source de données à l'échelle spatiale sur toute la superficie du périmètre et à l'échelle temporelle pour suivre l'évolution de ce phénomène au niveau du périmètre irrigué.

## *Introduction générale*

L'étude des processus géochimiques de la salinisation des sols irrigués, serait une continuité des travaux qui ont été faits ou qui se font sur la problématique de la salinisation et permettrait de mieux comprendre la tendance actuelle et future des voies de la salinisation ainsi que les conséquences sur la qualité des sols et de l'environnement. Les SIG nous permettront d'exploiter les données fournies par les images satellitaires qui seront au nombre de centaines de milliers, de les analyser, de les traiter, de les cartographier et les présenter.

En vue d'atteindre ces objectifs, plusieurs chapitres ont été abordés, qui sont :

La partie bibliographique « A » est réalisée en deux chapitres :

- Chapitre 1 : présente un état d'art sur la salinisation des sols irrigués et la relation avec la qualité des eaux utilisées en irrigation.
- Chapitre 2 : Ce chapitre s'articule essentiellement sur la description de la zone d'étude sur plusieurs axes ; les caractéristiques hydro climatiques, l'hydrologie, la géologie, l'hydrogéologie, pédologie et les systèmes de production agricole.

La partie « B » s'articule sur trois chapitres :

- Chapitre 3 : l'application du krigeage comme une technique de la géostatistique dans le but d'une cartographie de précision de la salinité des sols.
- Chapitre 4 : l'application des techniques directes et indirectes de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et caractériser les zones touchées par ce phénomène.
- Chapitre 5 : Présente l'étude sur l'approche géochimique des solutions des sols, nous tenterons d'expliquer l'évolution de la salinité à partir de certains processus géochimiques particulièrement facies chimique, alcalinité résiduelle et les équilibres solutions minéraux, dans le but de comprendre et d'identifier les facteurs et les processus qui contrôlent la salinité des sols irrigués dans la région de Biskra.

# **Chapitre 1**

## **Synthese bibliographique**

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

### 1.1 L'irrigation par les eaux souterraines et leur conséquence sur le sol

L'utilisation intensive des eaux souterraines pour l'irrigation dans la plupart des régions arides et semi-arides a augmenté de façon spectaculaire au cours des 50 dernières années (Bouarfa and Kuper, 2012). Ce développement, considéré par certains comme «*la révolution silencieuse* » (Shah, 2010), a été initié par des modestes agriculteurs en Californie (États-Unis), l'Asie du Sud et de la Chine et plus récemment en Afrique du Nord (Amichi *et al.*, 2012).

Dans la littérature, l'irrigation par les eaux souterraines est principalement due aux problèmes d'augmentation de la demande en eau, la sécheresse et la dégradation des réseaux collectifs de distribution qui caractérisent ces régions (Bouarfa and Kuper, 2012). Par ailleurs, l'irrigation par les eaux souterraines est souvent considérée comme un moyen efficace pour accroître la production et de la lutte contre la pauvreté (Llamas and Martínez-Santos, 2005; Shah, 2010). À l'échelle mondiale, un tiers des superficies irriguées pour l'agriculture (113 millions d'hectares) est basé sur l'exploitation des ressources souterraines (Margat, 2011). Grâce au développement fulgurant de puits et forages (Lopez-Gunn and Ramón Llamas, 2008), le taux d'extraction des eaux souterraines a été multiplié par 10 en 50 ans (Margat, 2008).

Lors de la conférence mondiale sur la gestion des ressources en eau souterraines organisée par l'AFIID en 2011, des chiffres clés ont été présentés sur l'utilisation des eaux souterraines en irrigation (Margat, 2011) :

- Les prélèvements globaux d'eau souterraine utilisée pour l'irrigation doivent approcher à présent  $900 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  dont la moitié en Asie, surtout en Inde (plus de  $200 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$ , record mondial), puis en Chine et au Bangladesh.
- Ces prélèvements ont été fortement croissants au cours des 50 dernières années. Estimés à  $100$  à  $150 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  en 1950, ils ont depuis augmenté de 3 fois. Tandis qu'aux États Unis, ils ont presque triplé de 1950 à 1975 (passant de  $28$  à  $80 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$ ), puis se sont stabilisés et ont légèrement décru ( $74 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  en 2005), leur croissance s'est accélérée en Asie, surtout en Inde, depuis 1970.
- Ils forment au moins 75 % des quantités d'eau souterraine prélevées dans le monde et près de 25 % des quantités d'eau totales consacrées à l'irrigation.
- Sur un total mondial de 301 millions d'ha irrigués, 113 millions sont irrigués par les eaux souterraines, dont 80 millions en Asie (FAOSTAT, 2010).

L'irrigation, en général, peut engendrer des dégradations importantes de la qualité des sols surtout dans les zones semi-arides, et aride (Abdenmour *et al.*, 2019). Elle est souvent considérée comme

## *Chapitre 1 : Synthèse bibliographique*

la seule raison de l'expansion des terres salées. En effet, les sols irrigués touchés par le phénomène de salinité sont estimés entre 20 à 30 millions d'ha sur les 280 millions irrigués dans le monde (Marlet, 2004).

L'extension de la salinité des sols irrigués est estimée entre 0,25 à 0,5 million ha par an (Marlet *et al.*, 2005). Aussi bien la quantité d'eau disponible que sa qualité affecte fondamentalement le sol et les cultures. La présence des sels solubles dans l'eau d'irrigation, l'évapotranspiration et le mauvais drainage sont les principaux facteurs de salinisation des sols en zones arides (Alam and Bhutta, 2004; Chandio *et al.*, 2013). La qualité des eaux souterraines d'irrigation est souvent évoquée comme un pourvoyeur de la salinité et de dégradation des sols en zones arides (Bradai *et al.*, 2011).

### **1.2 Salinisation des sols irrigués**

#### **1.2.1 Problème de salinisation des sols en Algérie**

La salinisation des terres est un problème majeur à l'échelle mondiale, selon la FAO et les estimations les plus récentes, elle affecte déjà au moins 400 millions d'ha et en menace gravement une surface équivalente. Le monde perd 3 hectares de sol arable chaque minute à cause de ce problème (Carillo *et al.*, 2011). Dans les régions arides et semi arides, notamment au Maghreb dont l'Algérie fait partie, le climat rend souvent l'irrigation nécessaire à toute mise en culture (Youcef and Amor, 1994) les sels dissouts apportés par les eaux d'irrigation peuvent s'accumuler dans le sol et engendrer une dégradation des sols.

D'après l'étude qui été faite par l'Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage (INSID) en 2008, il n'est recensé aucun travail d'une cartographie fiable et précise permettant de délimiter les zones touchées par la salinité des terres et la quantification de la teneur des sels dans le sol. Néanmoins il existe quelques données fragmentaires qui donnent une idée générale sur le phénomène de la salinité et la dégradation des sols. Selon Douaoui et Hartani (2007) environ de 20% des sols irrigués en Algérie sont touchés par la salinité. Ce problème a été observé dans plusieurs régions dans le pays et ne cesse pas d'accroître (Chlef, Relizan, Haut Plateau de Sétif et de Constantine, Oran, Biskra, Ouargla et d'autres).

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

Dans le sud algérien, plusieurs périmètres irrigués sont menacés par le problème de salinité à cause de la qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation, manque des réseaux du drainage et la remonté de la nappe qui se traduisent par une dégradation des sols et une baisse de productivité. Les sols salés à une grande extension dans les régions saharienne, due à l'évaporation, aux précipitations pluviales très limitées, à la présence fréquente de dépôts géologiques et des nappes phréatiques ou artésiennes salées (Aubert, 1976). Au Sahara algérien, il y a 400 000 ha des sols irrigués et seulement 10% des sols sont productifs, ce qui limite les ressources en sol vu que les 90% ne sont pas exploitables en agriculture.

### 1.2.2 Définition de la salinité du sol

La salinisation peut se définir comme le processus qui accroît la quantité des sels solubles dans le sol. Les sels solubles englobent une large gamme d'anions et de cations présents dans le sol, soit sous forme cristallisée, soit sous forme dissoutes dans la solution du sol, ou sous forme adsorbée sur la surface des colloïdes (Douaik, 2005).

Dans les études sur les sols salés, les sels considérés sont généralement limités aux plus solubles, c'est-à-dire les sels de calcium, magnésium, potassium des acides minéraux chlorhydrique, sulfurique, et les sels de sodium de l'acide carbonique (Grünberger, 2015). Une concentration des sels dans la solution du sol conduit à la précipitation successive de minéraux qui va modifier sa composition et détermine différentes voies d'évolution des sols en fonction de l'abondance relative des différents ions majeurs dans la solution initiale (Marlet and Job, 2006).

La salinisation résulte le plus souvent de l'irrigation des sols mal drainés dans des zones tempérées, avec des eaux d'une mauvaise qualité généralement chargées, qui se traduit par une accumulation des sels dans les horizons superficiels (Djihed *et al.*, 2017). Plusieurs processus géochimiques peuvent avoir lieu comme conséquence à l'action des sels solubles dans le sol. Le processus par lequel le sol s'enrichit en sel soluble est la salinisation. L'autre processus qui est l'alcalinisation se produit lorsque le pH du sol augmente à des valeurs supérieures à 8,5. Ce processus souvent s'accompagne par le processus de sodisation lorsque le sodium échangeable devient l'élément majoritaire adsorbé sur le complexe colloïdal.

La classification agronomique internationale retient une valeur de conductivité électrique (CE) de l'extrait de la pâte saturé de sol supérieure à  $4 \text{ dS m}^{-1}$  comme une limite inférieure des sols salins, le seuil au-delà duquel la majorité des cultures voient leurs productivités diminuer (Aubert, 1978).

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

La salinisation conduit à une perte partielle ou totale de la capacité de production d'un sol, en raison de la dégradation de ses propriétés physiques et chimiques. Une fois que le niveau de salinité est très élevé, il serait très compliqué et coûteux à corriger (Yang, 2006).

### 1.2.3 Origine des sels

La salinité du sol est causée par l'altération des roches et des minéraux primaires formés in situ ou transportés par l'eau ou le vent. D'autres causes existent : topographie, irrigation excessive qui aggrave l'élévation de la nappe phréatique et amène les eaux souterraines salines près de la surface des terres (Davis *et al.*, 2019),

Ce phénomène qui est dû aux processus naturels ou induits par l'homme est certainement un problème environnemental grave qui affecte déjà 400 millions d'hectares et menace gravement une surface équivalente (Lhissoui *et al.*, 2014). La salinisation si elle affecte le milieu naturel sans qu'il y ait l'intervention de l'homme est dite salinisation primaire. Elle peut être la résultante des pratiques agricole et d'irrigation on parle de salinisation secondaire (Bradaï *et al.*, 2016). L'océan peut être une source principal de la salinité, notamment dans les zones côtières (Kloppmann *et al.*, 2011) ou le matériau de base est constitué des dépôts marins ancien.

Dans les zones arides et semi-arides, les sels lessivés se concentrent dans les eaux souterraines à écoulement lent et sont amenés à la surface du sol par l'évapotranspiration et leur accumulation peut également être accélérée par les activités anthropiques, principalement par l'irrigation à l'eau salée (Afrasinei *et al.*, 2017).

Il est reconnu que pas moins de 1 million d'hectares de terres à travers le territoire national sont touchés par le phénomène de la salinisation dont près de 50% se trouvent dans les zones sahariennes ou le processus de salinisation est plus marqué du fait des températures élevées durant près que toute l'année (Rata, 2010), l'absence d'un system du drainage et le manque d'exutoire naturel pour certain zone (cas de certain palmeraies dans la wilaya de Biskra).

### 1.2.4 Mesure de la salinité

Le choix d'une méthode d'évaluation de la salinité dépend de plusieurs facteurs tels que le but de mesure, le nombre d'échantillons, le temps et les possibilités dont nous disposons pour effectuer le travail. Il existe différentes méthodes pour la mesure de la salinité: en laboratoire ou in situ.

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

En laboratoire, la salinité d'un sol se mesure par la conductivité électrique (CE) d'un extrait de la pâte saturé. Le « US Salinity Laboratory Staff » en 1954 a proposé le seuil de  $4 \text{ dS m}^{-1}$  pour définir un sol salin (Essington, 2015). Elle doit être déterminée dans des conditions standards, à 25 degré et a un teneur d'eau donné. Comme elle peut se mesurer par des extraits aqueux (rapport sol/eau : 1/2, 1/5 et 1/10). La méthode appelée TDS (total des solides dissous) est également utilisée.

La mesure de la salinité du sol in situ est largement répandue lorsqu'on souhaite suivre des évolutions temporelles. Cette méthode non destructive présente l'avantage d'être proche des conditions réelles du milieu.

Il s'agit de : a) la résistivité dans le terrain où deux paires d'électrodes sont utilisées. Une paire sert à envoyer un courant à travers le sol, l'autre paire est utilisée pour mesurer la différence de potentiel induite ; b) la méthode électromagnétique où le sol est soumis à un champ magnétique à haute fréquence généré par une bobine primaire. Plus la conductivité du sol est élevée, plus on a une grande salinité, les plus importants sont les courants induits dans les différents horizons. Ces courants, à son tour met en place un champ secondaire qui est mesuré par une bobine secondaire. La profondeur de sondage dépend de l'écart entre les bobines et leurs orientations, il ne sera pas plus de 2 m d'épaisseur de profile. La procédure est non destructive et permet de cartographier facilement la salinité (Corwin *et al.*, 2006).

### 1.2.5 Paramètres de caractérisation des sols salés

Tout sol qui renferme des sels solubles en quantité anormalement élevée est qualifié de «salé». La mesure effectuée est celle de la salinité. Tout sol qui renferme du sodium échangeable en quantité anormalement élevée est qualifié de «sodique». La mesure effectuée est celle de la sodicité. Ces déterminations font appel à des méthodes spécifiques.

La conductivité électrique d'une solution est la conductance de cette solution mesurée entre des électrodes de  $1 \text{ cm}^2$  de surface. Elle permet de déterminer la salinité globale de l'extrait de pâte saturée. Dans le cas des sols salés, elle est exprimée en  $\text{mmho cm}^{-1}$  ou  $\text{dS m}^{-1}$  (Baize, 1988). De plus la connaissance de la conductivité est nécessaire pour l'étude du complexe adsorbant des sols salés (Aubert, 1978).

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

L'échelle agronomique mise au point par l'United States Salinity Laboratory (USSL) est graduée selon les valeurs de 0 à 16 mmho cm<sup>-1</sup>. Un sol est considéré salé, lorsque la CE est supérieure à 4 dS/m. (Tableau 1).

Tableau 1. Echelle de la salure déterminée à partir de l'extrait de la pâte saturé (Richards, 1954).

Echelle américaine	Non salé	Peu salé	Salé	Très salé	Extrêmement salé
CE à 25°C (dS/m)	<2	2-4	4-8	8-16	>16
Réaction des cultures	Effets négligeables	Les récoltes des cultures très sensibles sont réduites	Les récoltes de nombreuses cultures sont réduites	Seules des cultures très tolérantes donnent des résultats	Seul un petit nombre de cultures donnent des récoltes

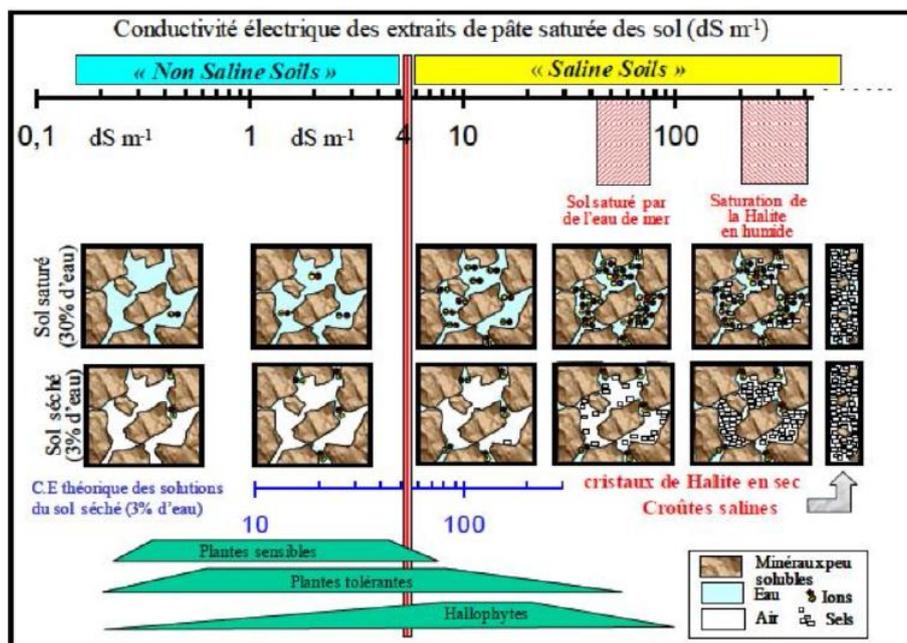


Figure 1. Echelle des salinités des sols, des solutions poreuses, et domaine de viabilité de la végétation (Grünberger, 2015).

Le *pH* d'une solution de sol est la quantité d'ions H<sup>+</sup> libres qu'elle contient. Il se mesure sur une suspension de terre fine. Le *pH* des sols salés dont la salinité est de type neutre, c'est à dire quand elle est due à des sels de bases et d'acides forts (chlorures, sulfates, de sodium, de calcium, de magnésium), reste inférieur à 8,5 et le sol est basique. Si la salinité est en revanche due à des sels de bases fortes et d'acides faibles, ce qui est le cas des bicarbonates ou des carbonates de sodium, le *pH* est au-dessus de 8,5 et peut atteindre 10, et le sol est alcalin. Le *pH* peut dépasser 10 après une précipitation du carbonate de calcium, les ségrégations salines sont fortement sodiques et renferment des sols alcalins (NaHCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Un *pH* compris entre 8 et 9 est retenu, généralement, comme limite de la dégradation de la structure.

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

Afin de connaître la concentration en anions solubles ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ) et en cations solubles ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ), une analyse chimique est effectuée sur extrait de pâte saturée ou sur extrait aqueux dilué. Elle sert à classer le type de salinisation selon le diagramme de Piper. C'est ainsi qu'on peut utiliser le rapport  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  pour classer les solutions du sol (Tableau 2).

Tableau 2. Nature de la salinisation des sols selon le rapport  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ .

$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$	Classe
<0,2	Salinisation sulfatée
0,2 – 1,0	Salinisation sulfato-chlorurée
1,0 – 5,0	Salinisation chlorurée-sulfatée
>5,0	Salinisation chlorurée

Elle sert aussi à calculer le SAR (Sodium Adsorption Ratio) qui exprime le pouvoir de sodisation de la solution du sol (Mathieu and Pieltain, 2003).

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \dots\dots\dots(01)$$

*Na, Ca, Mg.....mmolc/l*

Le SAR donne des indications sur le risque d'alcalisation du milieu dont les risques sont faibles si  $SAR < 10$ , moyen si SAR est compris entre 10 et 18, élevés si  $SAR > 18$  et très élevés si  $SAR > 26$ .

Le *taux de sodium* échangeable (ESP) est le taux de saturation du complexe adsorbant en sodium échangeable par rapport à tous autres cations échangeables. En effet, il exprime la sodicité. Or, le sodium échangeable peut détruire la structure à partir d'un seuil qui est souvent fixé à 15 % de la CEC, ou 10 % (Feller, 2013), ou 5% selon l'École Australienne. De nombreuses recherches ont essayé d'établir une relation entre le SAR et ESP, celle de l'USSS (1954) s'écrit de la façon suivante:

$$ESP = (100*(-0.0126 + 0.0147 * SAR)) / 1 + (-0.0126+ 0.0147*SAR) \dots\dots\dots(2)$$

### 1.2.6 Relations entre solutions du sol et sels précipités

La précipitation de sels intervient dans le cadre d'une réaction d'équilibre thermodynamique entre les ions en solution [les réactifs] et la phase solide précipitant [le produit= le sel]. La constante d'équilibre de la réaction est connue comme le produit de solubilité du minéral fréquemment noté  $K_s$ . Lorsque le produit des activités thermodynamiques des ions d'un sel en solution dépasse la

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

constante d'équilibre, le sel précipite dans les pores sous forme solide. La précipitation modifie les proportions ioniques de la solution, car les autres teneurs ioniques continuent d'augmenter. Selon Sonnenfeld et Perthuisot (1984), des travaux des années 70 définissaient les quatre principaux types de saumures naturelles auxquelles sont reliés les présences de certains minéraux (Droubi *et al.*, 1976). Les voies géochimiques résument l'évolution des sels précipités dans les sols en fonction des dominances ioniques des solutions de départ (Grünberger, 2015).

Lorsqu'une solution se concentre par évaporation, calcite et dolomite précipitent fréquemment en premier du fait de leurs faibles solubilités. Les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  sont précipités dans les premiers stades de concentration. La conservation d'un stock suffisant d'ions carbonates et bicarbonates en solution à la fin des stades de précipitation de la calcite et de la dolomite, distingue les voies alcalines (où les pH sont supérieurs à 8,5), des voies neutres. Dans ces dernières, l'épuisement du stock de carbonates par précipitation dans les premiers stades d'évaporation ne permet pas la précipitation de carbonates et/ou bicarbonates de sodium en fin de séquence évaporatoire (Grünberger, 2015):

- Voie chlorurée-sulfatée neutre est la plus fréquente: après les précipitations de calcite, dolomite et de gypse, il ne reste que les sels chlorurés (halite,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,). Il s'agit de la voie imposée par une origine marine directe des solutions ou la dissolution d'évaporites marines.

- Voie sulfatée-chlorurée neutre, après les précipitations de calcite, dolomite et gypse, ne permet que la précipitation de la thénardite (sulfate de sodium anhydre) et de la mirabilite (sulfate de sodium hydraté) ainsi que la halite et le  $\text{MgCl}_2$ . Assez rare, cette voie se singularise par un contexte qui permet un apport de sulfates dissocié de l'ion calcium par exemple du fait de l'oxydation de soufre volcanique ou biologique ( $\text{H}_2 \text{S}$ ).

Les voies alcalines surviennent dans des contextes géologiques volcaniques ou granitiques dans lesquels les sources de carbonates sont l'activité biologique et/ou les gaz volcaniques. Ces sources dissocient la présence de carbonates dissous de celles de l'ion calcium. On distingue:

- Voie alcaline sodique, ou après les précipitations de calcite, dolomite, thénardite et mirabilite, des solutions avec des  $\text{pH} > 10$  permettent les précipitations de trona et de nahcolithe (mélanges de carbonates et bicarbonates de sodium hydraté).

## *Chapitre 1 : Synthèse bibliographique*

- Voie alcaline sulfatée; qui montre des pH >8,5 où après les précipitations de calcite, dolomite, thénardite et mirabilite, le natron (carbonate de sodium hydraté) précipite.

Les transitions de la phase des solutés vers les sels solides soit par la précipitation/dissolution sont extrêmement rapides et réversibles, au contraire de la lente et irréversible libération des éléments par hydrolyse des minéraux magmatiques silicatés peu solubles, conditionnée par les apports de CO<sub>2</sub> biogénique et accompagnée de néoformations successives.

Les sels précipités peuvent cependant jouer un rôle considérable dans la mesure où ils modifient la granulométrie des solides du sol, occupent partiellement la porosité du sol, et dans le cas d'une accumulation de sel importante en surface, modifient considérablement les propriétés de surface (Grünberger, 2015).

### **1.2.7 Classifications des sols salés**

Les sols salés sont des sols dont leur évolution est due à la présence excessive de sels solubles, c'est à dire ceux qui sont plus solubles que le gypse et/ou un fort taux de sodium échangeable. Ce qui leur confère des propriétés physiques, chimiques et biologiques défavorables (USSLS, 1954). Les sols sont classés comme sols salés dès que leur teneur en sels solubles atteint 2 % en sol sableux à 4 % en sol argileux ou dès que la conductivité de l'extrait de la pâte saturée dépasse 4 dS/m.

La classification de l'US Salinity Laboratory Staff (1954) distingue deux grands groupes de sols salés : les sols salins et les sols alcalins ou sodiques (Tableau 3). Les sols salins sont des sols ayant une CE >4 dS m<sup>-1</sup>, un ESP < 15 ou un SAR < 13 et un pH < 8,5. Ils contiennent assez de sels solubles pour inhiber la croissance de la plupart des plantes cultivées (Munns and Tester, 2008). Quant aux sols alcalins, associés le plus souvent aux sols sodiques, ce sont des sols ayant une CE < 4 dS m<sup>-1</sup>, un ESP > 15 (ou un SAR > 13) et un pH > 8,5. Ces sols sont supposés contenir assez de sodium pour provoquer la détérioration de la structure du sol et limiter la croissance de la plupart des plantes cultivées. Les sols ayant à la fois une CE > 4 dS m<sup>-1</sup>, un ESP > 15 et un pH > 8,5 sont appelés les sols salsodiques.

Toutefois, le seuil de l'ESP > 15 pour classer les sols alcalins selon USSLS (1954) ne fait pas toujours l'unanimité entre les auteurs. En effet, McIntyre (1979) rapporte que ce seuil est trop élevé pour les sols australiens où il a constaté une dégradation très importante des propriétés physiques notamment une baisse de la conductivité hydraulique sur 71 échantillons de sols à

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

partir d'une valeur d'ESP à 5. Plusieurs autres auteurs ont également indiqué la limite de cette classification (Balpande *et al.*, 1996; Pal *et al.*, 2003), après avoir constaté une conductivité hydraulique à saturation très faible ( $<1 \text{ mm h}^{-1}$ ) et une baisse de rendement de 50% des cultures de coton à partir également d'une valeur d'ESP de 5 dans les Vertisols en Inde.

Tableau 3. Classification des sols salés.

Type de sol	CE (dS/m)	ESP	SAR	pH
Salin	>4	<15	<13	<8.5
Sodique	<4	>15	>13	<8.5
Alcalin	<4	>15	>13	>8.5
Salsodique	>4	>15	>13	>8.5

### 1.2.8 Techniques pour la réhabilitation des sols salés

Plusieurs techniques sont utilisées pour récupérer et gérer les sols affectés par les sels dont :

- a. les approches physiques et hydrauliques basées essentiellement sur l'apport d'eau, associé ou non dans le travail du sol, pour le lavage des sels de surface ou la lixiviation des sels. La lixiviation ou le drainage sont parmi les techniques communément utilisées pour contrôler la concentration des sels dans le sol (Qadir *et al.*, 2000; Dai *et al.*, 2015).
- b. l'apport d'amendements chimiques tels le gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) ou l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). le gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) est utilisé comme source de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) pour améliorer les propriétés physiques et chimiques notamment la macroporosité, la perméabilité et réduire ainsi la salinité et/ou l'alcalinité des sols (Aydemir and Najjar, 2005). D'autres produits chimiques tels que le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) sont aussi appliqués pour traiter les sols salés notamment les sols sodiques riches en calcaire (Qadir *et al.*, 2007).
- c. les approches biologiques dont l'amendement organique et la phytoremédiation basée sur l'utilisation des plantes tolérantes en sel ou les halophytes pour réduire la salinité dans la zone racinaire et pour améliorer la production agricole. L'amendement organique est aussi appliqué sur les sols salés afin d'améliorer la structure du sol, d'augmenter la conductivité hydraulique et de favoriser la lixiviation des sels (Asrar *et al.*, 2012). En effet, la matière organique stimule l'activité biologique (faune du sol et développement racinaire) qui favorise l'agrégation du sol et l'infiltration de l'eau. En outre, l'apport de matière organique augmente

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

la fertilité chimique qui favorise par la suite la croissance, le développement des cultures et améliore leur résistance au stress salin (Tejada and Gonzalez, 2008).

### 1.2.9 Action des sels solubles sur le sol

Sur la structure du sol, c'est par les cations que les sels agissent sur les propriétés physiques du sol. En particulier par l'action dispersante du sodium échangeable qui provoque la dispersion des colloïdes, cette action néfaste se manifeste lorsque le remplacement du calcium par le sodium dans le complexe adsorbant dépasse 15 % de la capacité d'échange cationique (Derdour, 1981).

La stabilité structurale décroît dès que le taux de sodium échangeable représente 12 à 15 % de la CEC. Le rapport  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  influe sur la dispersion des colloïdes, cette dispersion apparaît dès que la quantité de sodium échangeable dépasse celle du calcium échangeable, c'est-à-dire lorsque le rapport  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  dépasse la valeur 1.

La perméabilité dépend essentiellement de la texture, la structure, le type de cations adsorbés et le taux de matière organique dans le sol. La diminution de la perméabilité des sols salés à alcalis est une conséquence directe de la dispersion des colloïdes par l'ion  $\text{Na}^+$ . La perméabilité commence à augmenter avec la salinité du fait de la formation des agrégats par l'action floculante des sels, puis elle se maintient constante.

La faible fertilité des sols salés est généralement liée à la présence de sels solubles, en particulier les sels de sodium (Szabolcs and Varallyay, 1979). L'étude de l'interaction entre la salinité du sol et la fertilité sur la croissance, la composition minérale et le métabolisme de l'azote des plantes, a montré que la salinité diminue la fertilité du sol (Abdelly *et al.*, 1995). Ils ont aussi noté qu'avec l'augmentation de la salinité, il y a souvent une augmentation de la concentration de  $\text{Na}^+$  échangeable et une baisse des concentrations de NPK.

### 1.2.10 Effet des sels sur la plante

La salinité est un facteur environnemental très important qui limite la croissance et la productivité des plantes (Parida and Das, 2005). Les différents travaux menés sur la salinité ont montré que les sels peuvent réduire voire freiner la croissance des jeunes plantes, des fois à un effet très toxique, car des concentrations modérées de chlorure de calcium sont fortement toxiques pour les arbres à noyaux surtout dans un milieu sableux (Richards, 1954), comme l'accumulation d'éléments de transition comme le bore (B), et l'arsenic (As) ou métaux lourds tels que Cadmium (Cd), Mercure

## *Chapitre 1 : Synthèse bibliographique*

(Hg), peut parfois accompagner les ions majeurs lors de l'accumulation saline: le cas de bore est généralement évoqué puisque dans le sol, la marge entre les concentrations qui provoquent les phénomènes de carence chez la plante et celle qui entraînent une toxicité est étroite pour la majorité de cultures (Bradai, 2017).

Les plantes répondent au stress salin en deux phases : la première, le potentiel hydrique externe diminue suite à la présence de sel au niveau des racines, la seconde phase inclut la sénescence de la feuille conséquence de l'accumulation des ions à ce niveau-là (Munns, 2002). Le rendement peut baisser jusqu'à plus de 80% (Mathieu and Pieltain, 2003).

Le NaCl affecte la croissance des plantes par l'accumulation des ions à des niveaux toxiques ce qui conduit à la diminution de la disponibilité en eau et en nutriments (Ashraf and McNeilly, 2004).

### **1.3 La qualité des eaux utilisées en irrigation**

#### **1.3.1 Les critères qu'il faut tenir en compte pour choisir une eau d'irrigation**

Le choix d'une source d'eau pour assurer les besoins en eau des cultures doit dépendre du type et de la concentration des substances qui y sont dissoutes ou en suspension. Il dépend aussi des caractéristiques physiques et chimiques du sol (Durand, 1983). Bien que certaines sources d'eau soient de bonnes qualités, d'autres contiennent des taux élevés de sels, de microorganismes et d'autres résidus. 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 d'eau, le type de culture et le type de sol.

L'évapotranspiration qui détermine le débit d'irrigation requis, en général, plus la quantité d'eau d'irrigation utilisée annuellement est importante, plus les substances qu'elle contient risquent de s'accumuler dans le sol jusqu'à atteindre 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

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

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).

### 1.3.2 Les grandeurs d'évaluation pour la qualité d'eau d'irrigation

#### 1.3.2.1 La salinité

La salinité est un critère important, car un excès de sel augmente la pression osmotique de l'eau du sol et provoque des conditions qui empêchent les racines d'absorber l'eau. Ces conditions provoquent une sécheresse physiologique. Même si le sol semble avoir beaucoup d'humidité, les plants flétrissent parce que les racines n'absorbent pas suffisamment d'eau pour remplacer celle perdue par évapotranspiration (Durand, 1983).

Les principaux sels solubles responsables de la salinité de l'eau sont les sels de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), de Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), de sodium ( $\text{Na}^+$ ), de potassium ( $\text{K}^+$ ), les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ). 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 (Harivandi, 1999).

Le tableau ci-dessous, donne une classification des eaux d'irrigation proposée par l'United States Département de Agriculture (USDA).

Tableau 4. Classification des eaux d'irrigation proposée par l'USDA.

Nomination	Classe	Interprétations
Classe 1 (C1)	$< 250 \mu\text{S cm}^{-1}$	basse salinité
Classe 2 (C2)	$250 \mu\text{S cm}^{-1}$ à $750 \mu\text{S cm}^{-1}$	salinité modérée
Classe 3 (C3)	$750 \mu\text{S cm}^{-1}$ à $2250 \mu\text{S cm}^{-1}$	haute salinité
Classe 4 (C4)	$> 2250$ à $5000 \mu\text{S cm}^{-1}$	très haute salinité
Classe 5 (C5)	$>5000 \mu\text{S cm}^{-1}$	Non utilisable en irrigation

#### 1.3.2.2 Le sodium

Parmi les sels dissous dans l'eau, le sodium requiert plus d'attention. De fortes concentrations en sodium peuvent être dommageables pour la plante en place en modifiant les conditions physiques

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

du sol. Par ailleurs, dans la littérature on ne parle pas de concentration en sodium, mais plutôt d'une valeur qui tient compte des effets mutuels du sodium, du calcium et du magnésium.

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \dots\dots\dots(3)$$

*Na, Ca, Mg.....mmolc/l*

Le sodium agit au niveau de la défloculation du sol argileux ce qui entraîne une diminution de la macroporosité et du taux d'infiltration de l'eau. À l'aide du SAR, on divise les eaux d'irrigation en quatre classes. La classification est basée principalement sur l'effet du sodium sur les conditions physiques du sol (Delgado *et al.*, 2010).

Tableau 5. Classement de la qualité de l'eau en fonction du danger d'alcalinisation du sol.

Nom de la classe	Classe	Interprétation
<b>Classe S1</b>	0 < SAR ≤ 10 <b>bas taux de sodium</b>	Eaux utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols. Danger d'alcalinisation réduit, bien que certaines cultures sensibles au sodium puissent être gênées.
<b>Classe S2</b>	10 < SAR ≤ 18 <b>taux moyen de sodium</b>	Le danger d'alcalinisation des sols est appréciable dans les sols à textures fine et à forte capacité d'échange, surtout dans la condition de faible lessivage.  Eau utilisable sur les sols de texture grossière, ou sur les sols organiques ayant une bonne perméabilité.
<b>Classe S3</b>	18 < SAR ≤ 26 <b>haut taux de sodium</b>	Eaux pouvant provoquer l'apparition d'une alcalinité dangereuse dans la plupart des sols, à l'exception des sols pauvres en argile. Emploi exigeant la mise en œuvre d'un aménagement spécial assurant un bon drainage et fort lessivage. L'addition de matière organique, d'amendements chimiques est souvent nécessaire.
<b>Classe S4</b>	SAR > 26 <b>très haut taux de sodium</b>	Eaux souvent inutilisables pour l'irrigation, présentant un fort danger d'alcalinisation. Ces eaux sont utilisées pour l'irrigation, seulement si leur salinité permet l'addition de calcium ou si le sol en contient suffisamment.

### I.3.2.3 Les carbonates de sodium résiduel

Pour prédire l'évolution chimique d'une solution, le concept d'alcalinité résiduelle est souvent utilisé. Ce concept a été généralisé à la précipitation successive de plusieurs minéraux (Barbiero

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

et al., 2004). L'alcalinité résiduelle est calculée en soustrayant à l'alcalinité les équivalents de cations et en additionnant les équivalents d'anions qui sont impliqués dans les précipitations. Elle est le plus souvent considérée par rapport à la précipitation de calcite et de sépiolite, et correspond alors à la définition du concept de *Résiduel Sodium Carbonates (RSC)* (Marlet and Job, 2006).

Si le RSC est positif, c'est la voie alcaline relative à la précipitation de calcite/sépiolite, dans le cas contraire ( $RSC < 0$ ), c'est la voie saline neutre. Dans ce cas, deux cas peuvent se présenter en fonction du signe de l'alcalinité résiduelle appliquée à la précipitation de calcite de sépiolite et de gypse :

- L'alcalinité résiduelle devient positive suite à l'addition des sulfates relatifs à la précipitation du gypse, c'est la voie saline neutre à dominances sulfatées.

$$RSC1 = Alcalinité carbonate - (Ca + Mg) + SO_4 > 0 \dots\dots\dots(4)$$

- L'alcalinité résiduelle devient négative même par addition des sulfates, on parle alors de la voie saline neutre à dominance chlorurée.

$$RSC2 = Alcalinité carbonate - (Ca + Mg) + SO_4 < 0 \dots\dots\dots(5)$$

### 1.3.3 Classification des eaux d'irrigation

#### 1.3.3.1 Le Diagramme de Richards

Les classes des eaux (C1S1,...C5S4) correspondent dans le diagramme de Richards (Figure 2) au SAR (en ordonnées pour la lettre S) et à la conductivité (en abscisses pour la lettre C). Ainsi la classe C1S1 (coin bas à gauche) est considérée comme excellente car elle correspond à des valeurs minimales du SAR et de la conductivité ; en revanche, la classe C5S4 (coin haut à droite) est la plus mauvaise, car les valeurs du SAR et de la conductivité sont à leur maximum.

La Figure 2 et le tableau 6 donnent, respectivement, le diagramme de RIVERSIDE, les classes issues du diagramme de RIVERSIDE et l'interprétation de chaque classe.

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

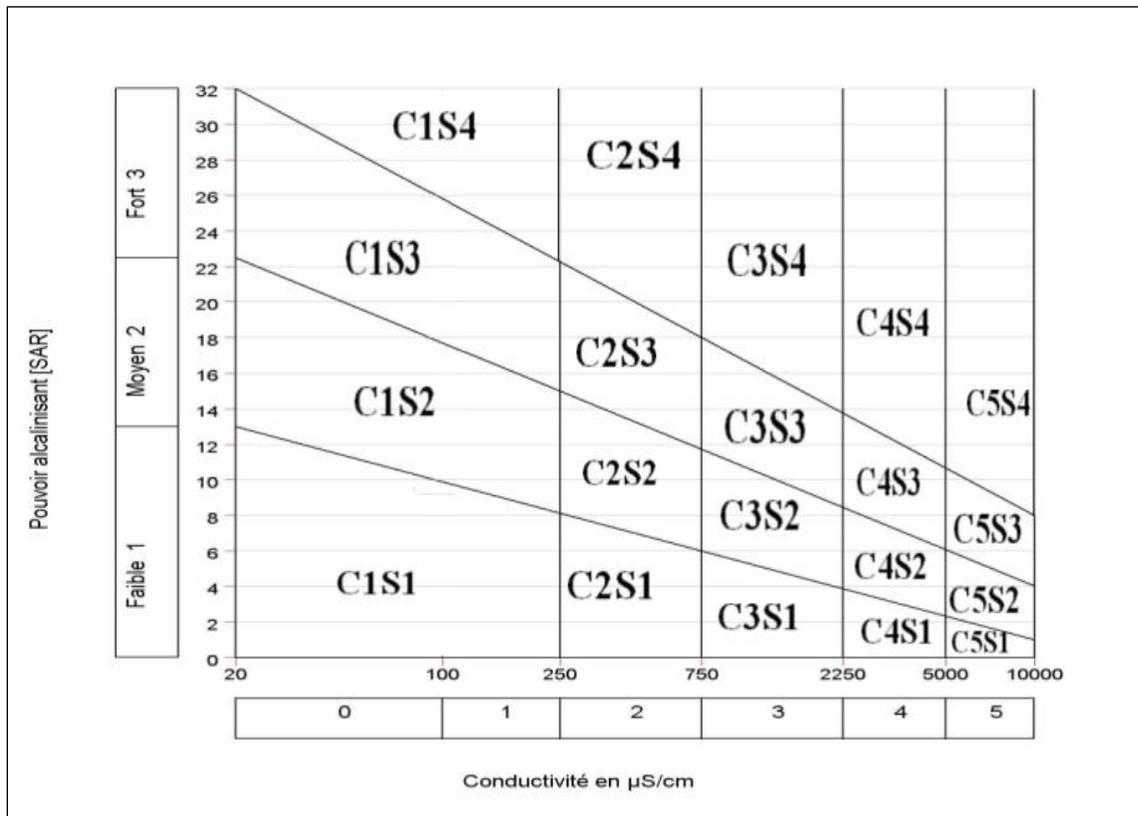


Figure 2. Diagramme de RIVERSIDE selon Richards.

Tableau 6a. Les classes issues du diagramme de Riverside.

CE \ SAR	Classe CE ( $\mu\text{S/cm}$ )				
	C1 0 – 250	C2 250 – 750	C3 750–2250	C4 2250 – 5000	C5 5000 – 10000
S1 0 – 10	C1S1	C2S1	C3S1	C4S1	C5S1
S2 10 – 18	C1S2	C2S2	C3S2	C4S2	C5S2
S3 18 – 26	C1S3	C2S3	C3S3	C4S3	C5S3
S4 > 26	C1S4	C2S4	C3S4	C4S4	C5S4

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

Tableau 6b. Interprétation des classes du diagramme de RIVERSIDE selon Durant, (1983).

<b>Interprétation</b>	
	Eau présentant une bonne qualité pour l'irrigation, utilisable avec précautions pour les plantes sensibles.
	Eau de qualité bonne à moyenne a utilisé avec précaution pour les sols mal drainés et pour les plantes sensibles
	Qualité moyenne à médiocre a utilisé avec précaution ; nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.
	Eau de qualité médiocre à mauvaise, utilisée avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles, l'emploi pour les sols légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse.
	Eau de qualité très mauvaise utilisée que pour les sols légers et bien drainés et pour les plantes résistantes avec nécessité de doses de lessivages et/ou apport de gypse.
	Qualité très mauvaise a n'utilisé que pour les circonstances exceptionnelles.
	Eau déconseillée pour l'irrigation.

*Source : (Bradai et al., 2008)*

### 1.3.3.2 Diagramme de Wilcox

Les concentrations élevées de sodium dans une eau d'irrigation limitent souvent son utilisation en irrigation. Il est adsorbé dans des sites d'échange de cations dans le sol et cause la dispersion des agrégats. Ainsi, les pores se trouvent scellés et, en conséquence, la perméabilité du sol est réduite, en particulier pour les sols argileux (Marlet and Job, 2006). Les sols argileux affectés deviennent soit anaérobiques, sodiques ou compactés.

La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau qui est exprimée en pourcentage, est définie par la relation suivante, ce qui a donné 5 classes de d'eau d'irrigation (Figure 3):

$$Na(\%) = \frac{(Na+K)}{(Ca+Mg+Na+K)} * 100 \dots\dots\dots(6)$$

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

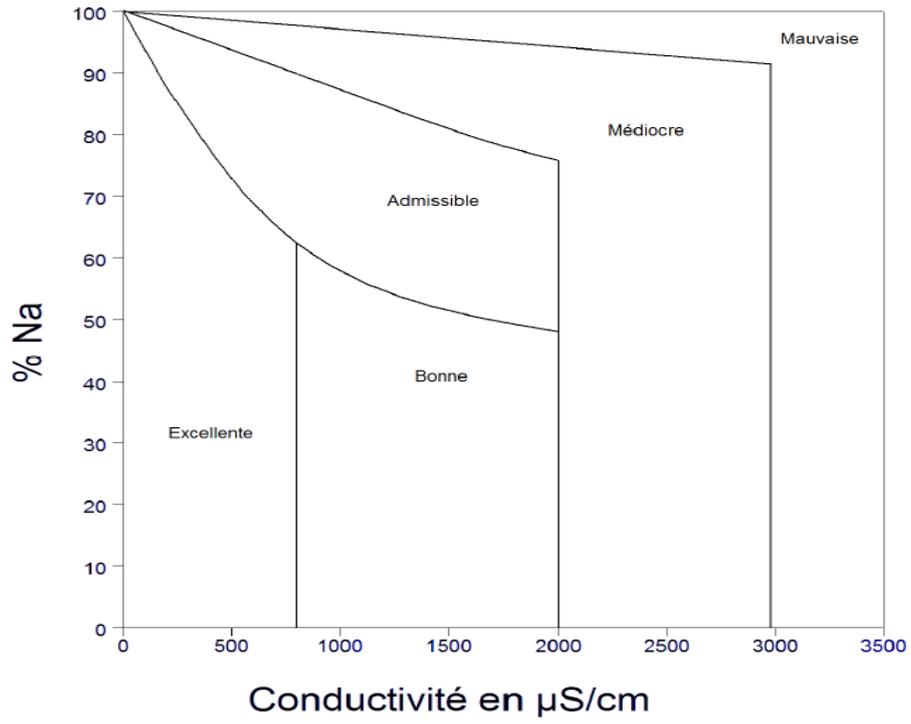


Figure 3. Le diagramme de Wilcox.

# Chapirte 2

## Aperçu sur la zone d'étude

## *Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude*

*Ce chapitre s'articule essentiellement sur la description de la zone d'étude sur plusieurs axes : les caractéristiques hydro climatiques, l'hydrologie, la géologie, l'hydrogéologie, pédologie et les systèmes de production agricole. La région d'El Ghrous est choisie comme une zone représentative du Ziban et son dynamisme agricole.*

### **2.1 Choix de la zone d'étude**

Dans le but d'étudier la salinité des sols irrigués dans une région aride, notre choix a porté sur la région d'El Ghrous comme une zone représentative du Ziban et son dynamisme. Cette zone connaît une dynamique agricole très remarquable et une mutation très importante. Ce choix est motivé par des raisons agricoles, environnementales et socio-économiques.

En parallèle à l'agriculture traditionnelle pratiquée dans les régions sahariennes, la néo-agriculture dans la commune d'El Ghrous a connu un développement très motivant, qui a permis à cette zone de prendre la tête des cultures protégées avec une superficie de plus de 1000 ha, ce qui représente 24,4 % de la superficie des cultures sous serre dans la wilaya de Biskra (DSA, 2013). La superficie agricole utile représente 3.8 % de la superficie total de la wilaya soit de 7000 ha dont 50% est irrigué (Daoudi et Lejars, 2016).

Suite à l'augmentation de la superficie agricole, la zone souffert par le phénomène de salinisations des sols à cause de l'aridité du climat, de la qualité médiocre des eaux souterraines utilisées en irrigation, ce qui a engendré une dégradation des sols et une chute de rendements. Une étude approfondie s'avère être nécessaire pour mieux comprendre les processus géochimiques au niveau du sol.

El Ghrous est une zone prometteuse pour les investisseurs et les ouvriers agricoles. Avec les projets des mises en valeur des terres agricoles et le marché de gros des légumes et fruits (une fluidité de la distribution), la commune a connu un apport migratoire très remarquable.

### **2.2 Limites géographiques de la wilaya de Biskra**

La wilaya de Biskra est située à l'est du pays, et plus exactement au sud des Aurès qui constituent sa limite naturelle au nord. Elle se localise à 420 km environ de la capitale Alger et occupe une superficie de 21509.8 km<sup>2</sup> soit 1 % de la superficie globale du pays. Elle s'étend au sud jusqu'à la

## *Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude*

zone des Chotts (chotts Melghir) et au sud-ouest jusqu'au commencement du grand erg oriental. La wilaya de Biskra est limitée par la wilaya de Batna au nord, la wilaya de Msila au nord-ouest, la wilaya de Djelfa au sud-ouest, la wilaya d'El Oued au sud-est, la wilaya de Khenchla à l'est et au sud par la wilaya de Ouargla. La Wilaya de Biskra constitue une zone charnière entre le nord et le sud algérien. Elle forme une zone de transition du point de vue morphologique et bioclimatique. Ce passage se fait subitement au pied de l'Atlas Saharien, où on passe d'un relief assez élevé et accidenté au nord à une topographie de plateau légèrement inclinée vers le sud (Bougherara et Lacaze, 2009).

D'une manière générale la région de Biskra est composée de quatre éléments géomorphologiques divers : les montagnes, les plaines, les plateaux et les dépressions (ANAT, 2006).

### **2.3 Situation géographique de la zone d'étude**

La commune d'El Ghrous est issue du dernier découpage administratif de l'année 1984, elle se situe dans les coordonnées géographiques  $34^{\circ} 42' 19''$  N,  $5^{\circ} 17' 07''$  E dans la wilaya de Biskra, Sud-Est de l'Algérie. La commune d'El Ghrous appartient à la zone de Zab Elgharbi qui se trouve à 47 km du chef-lieu de la wilaya, elle est limitée au Nord par la commune de Tolga, à l'Ouest par la commune d'Ech-Chaiba à l'Est par les communes de Foghala et Boedj Benazouz et au sud par les communes de Doucen et Lioua.

La superficie qui fait l'objet de notre étude couvre près de 9400 ha, et s'étend du nord vers le sud, comportant plusieurs sous périmètres où l'irrigation est fréquente, dont les plus importants sont : El-Marhoum, El-Amri et le sous périmètre de Draa-El Amri.

## Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude

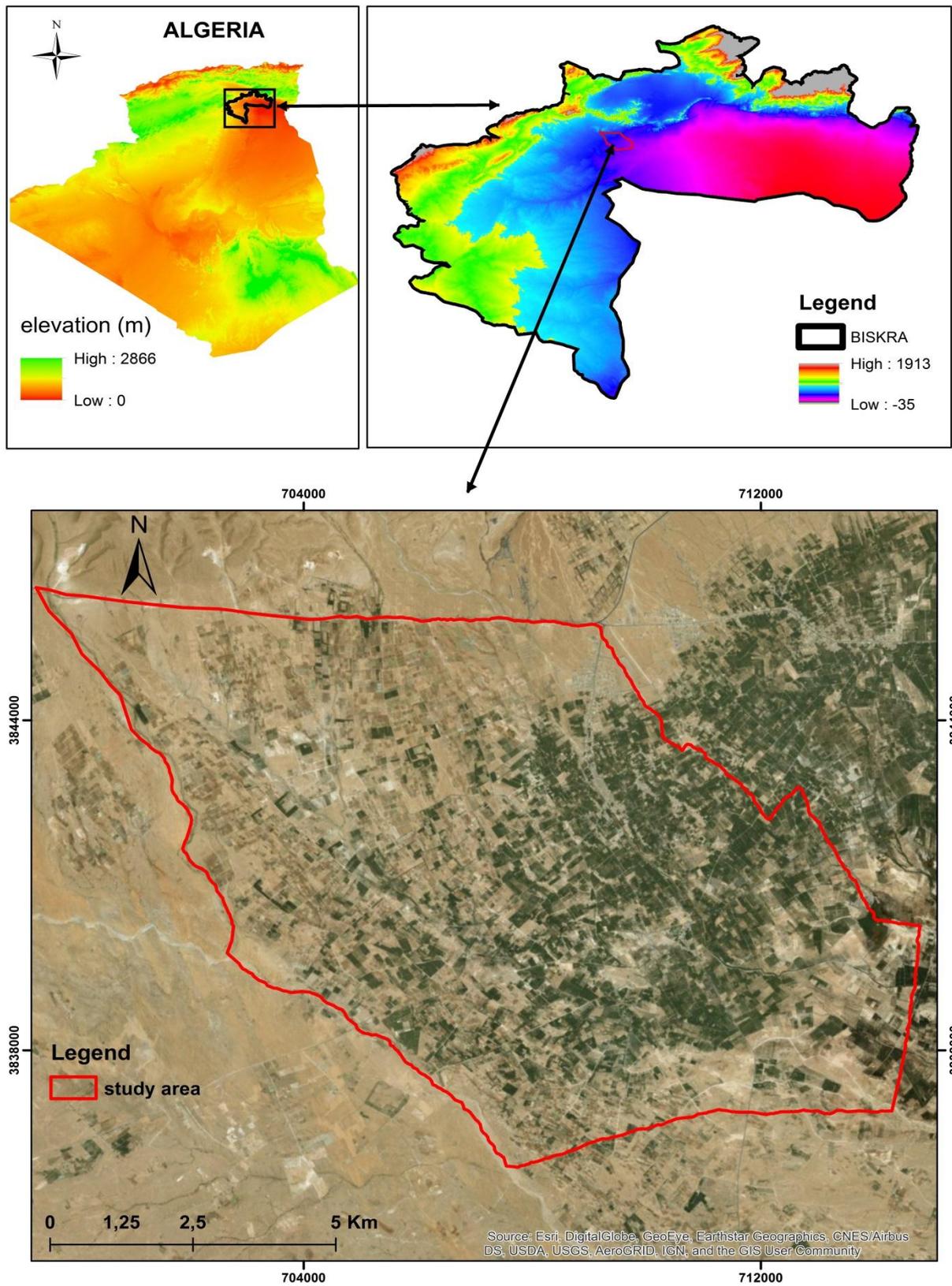


Figure 4. Carte de situation géographique.

### 2.4 Contexte climatologique

Le facteur climatique est l'un des facteurs les plus importants pour étudier la salinisation des sols, car une évolution du climat a une influence très déterminante sur la variation de l'ensemble des réserves et les fluctuations des nappes d'eau souterraines qui s'alimentent par infiltration directe et se déchargent par évaporation au cours de la saison dans les zones arides et semi-arides (Aouidane, 2017). L'étude climatique est indispensable pour mieux comprendre l'effet de ce facteur sur l'évolution de la salinité. Afin de caractériser le climat de la région de notre étude, les données de la station météorologique de Biskra sont exploitées dans cette étude sur la période allant de 2006 à 2015.

#### 2.4.1 La température

Le régime thermique de la région de Biskra est caractérisé par des températures élevées en été et relativement basses en hiver. Les températures les plus élevées sont enregistrées durant le mois de juillet, où elles atteignent un maximum de 41°C, ce qui correspond à une forte évaporation. Les basses températures se manifestent au mois de janvier avec une température moyenne de 12 °C et une minimale moyenne de 6.68 °C (tableau 7).

La lecture de tableau 7 et figure 5 montre que la saison chaude s'étend de mai à octobre. Au cours de cette période, les températures moyennes mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle. La saison froide s'étend de novembre à avril. L'année est donc divisée en deux périodes ; une période froide et une période chaude, et met en évidence la succession des deux périodes.

Tableau 7. Moyennes mensuelles des températures minimales et maximales de la station météorologique de Biskra (ONM, 2016).

Mois	T <sup>a</sup> min (°C)	T <sup>a</sup> max (°C)	T <sup>a</sup> moy. (°C)
Janvier	6.68	17.72	12.00
Février	7.79	18.90	13.80
Mars	11.14	23.02	17.13
Avril	15.26	27.99	21.84
Mai	19.75	32.75	26.54
Juin	24.46	37.78	31.51
Juillet	27.71	41.00	34.71
Août	27.95	40.55	34.36
Septembre	23.38	35.00	29.25
Octobre	18.26	29.66	23.87
Novembre	11.98	22.87	17.07
Décembre	7.70	18.26	12.61

## Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude

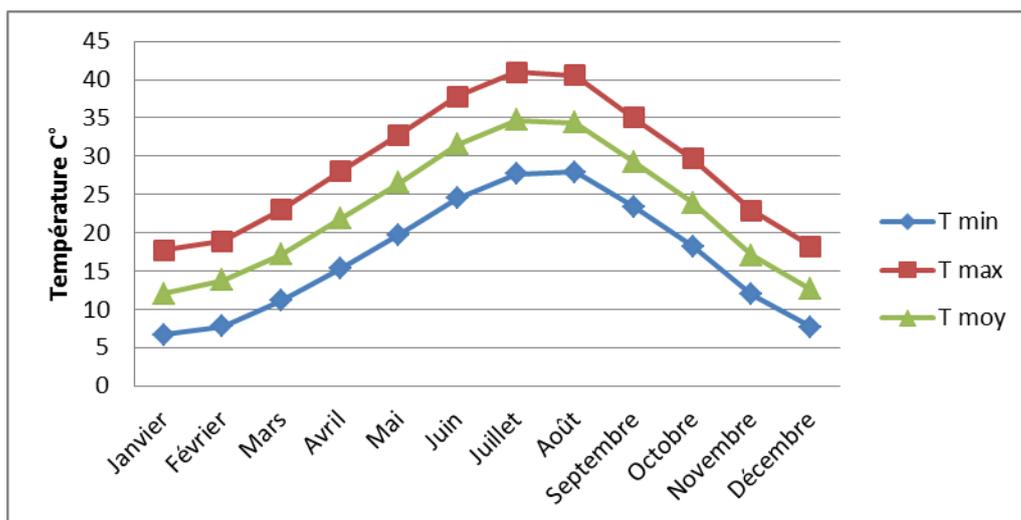


Figure 5. Températures moyennes mensuelles (maximales, moyenne et minimales) enregistrés pour la période 2006-2015.

### 2.4.2 Les précipitations

L'analyse pluviométrique sur la région d'El Ghrous calculée sur une période s'étalant de 2006 à 2015, montre que le mois d'octobre est le mois le plus pluvieux (27.9 mm). La période estivale s'étalant entre juin et août est la moins pluvieuse de l'année. La faible pluviosité est enregistrée durant le mois de juillet avec une pluviométrie égale à 0.8 mm. La moyenne mensuelle n'a pas dépassé 11,7 mm, alors que la moyenne annuelle était seulement de 140,5 mm. Pour les années d'étude, les précipitations sont également irrégulières et faibles. La moyenne annuelle était de 63,7 mm en 2014 et de 252,7 mm en 2011. Durant cette dernière année, il est enregistré un maximum de 79,0 mm durant le mois d'octobre.

Tableau 8. Moyenne de précipitation entre 2006-2015

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Moy
P (mm)	15.4	8.0	15.5	13.4	9.5	6.1	0.8	1.8	19.8	27.9	14.3	7.5	140.5

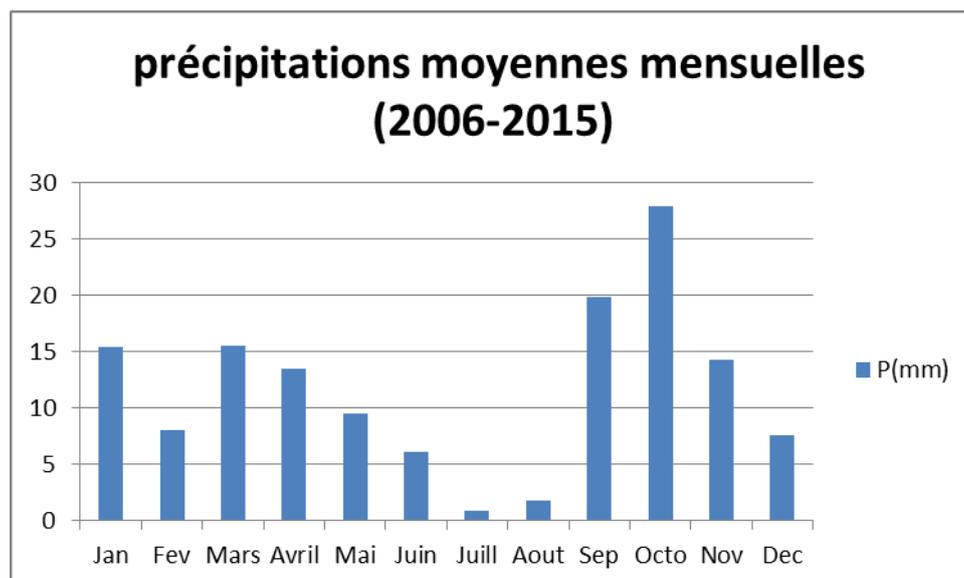


Figure 6. Précipitations moyennes mensuelles enregistrés pour la période 2006-2015.

### 2.4.3 Vent

Les vents ont une conséquence importante sur les phénomènes d'évaporation, de précipitation et à un degré moindre sur les températures (Bouchemal, 2017). Les vents sont relativement fréquents au printemps et en été, et, durant la période des températures maximales, arrivent des Siroccos Sud-est.

En période hivernale, ce sont les vents froids et humides venant des hauts plateaux et du Nord-ouest, qui prédominent. En été, Biskra est souvent soumise à l'action des vents chauds et secs. La vitesse moyenne annuelle est de 12,5 km h<sup>-1</sup> (Tableau 3). Le mois de mai est le plus venté (17,09 km h<sup>-1</sup>), tandis que, la vitesse la plus faible est enregistrée en décembre (9,62 km h<sup>-1</sup>).

Tableau 9. Moyenne de vitesse du vent entre 2006-2015.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Moy
V (km h <sup>-1</sup> )	10	13.3	16.9	16.7	17	15.1	10.2	10.7	11.1	9.8	9.9	9.6	12.5

### 2.4.4 L'humidité

La wilaya de Biskra est caractérisée par un climat sec. Les données enregistrées durant la période allant de 2006 à 2015 montrent une variation du taux d'humidité en fonction des mois. La

## Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude

moyenne annuelle est de 41,48 %. Le mois le plus humide est celui de décembre (57,85 %), alors que juillet est le mois le plus sec (25,73 %).

Tableau 10. Moyenne d'humidité de la période 2006-2015.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	moy
H (%)	55.7	49.6	43.3	38.8	32.6	27.3	25.7	29	39.8	45.2	52.6	57.8	41.48

### 2.5 Synthèse climatique

#### 2.5.1 Diagramme Ombrothermique de Gaussen

Une combinaison entre la température et les précipitations est très intéressante dans la mesure où elle permet de déterminer les mois véritablement sec (déficit agricole).

Cette combinaison permet d'établir un graph dit Ombrothermique sur lequel les températures sont portées à l'échelle double des précipitations. Lorsque la courbe représentant les précipitations passe au-dessus de la courbe de la température, il s'agit d'une période excédentaire (humide). Alors que si la courbe des précipitations passent au-dessous de celle de la température ; il s'agit d'une période déficitaire (sèche). A Biskra, les données de la période allant de 2006 à 2015, ont mis en évidence que la période sèche s'étale sur la totalité de l'année, avec une forte chaleur en juin, juillet et août.

## Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude

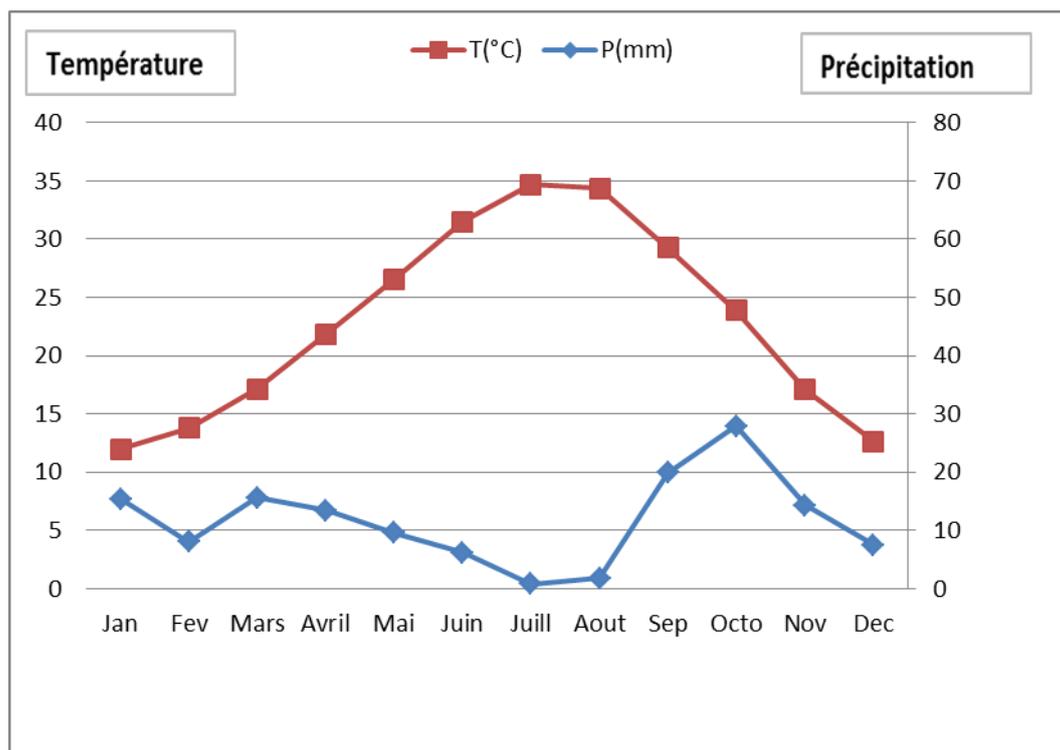


Figure 7. Diagramme ombrothermique pour la période 2006-2015.

### 2.5.2 Climogramme d'Emberger

L'indice d'Emberger permet de caractériser les climats et leur classification dans des étages bioclimatiques différents. L'indice d'Emberger ou le coefficient pluviométrique est calculé selon la formule suivante :

$$Q = 3,43 \frac{P}{T_M - T_m}$$

Q : Quotient pluviométrique.

P : Pluviométrie annuelle (mm).

T<sub>M</sub> : Température moyenne des maxima du mois le plus chaud (°C).

T<sub>m</sub> : Température moyenne des minima du mois le plus froid (°C).

D'après les données climatiques de la région de Biskra pour la période de 2006 à 2015 avec P = 140,5 mm, T<sub>max</sub> = 40,99 °C, T<sub>m</sub> = 6,68 °C, la valeur de Q = 14,08 estimée a permis de situer la région de Biskra dans l'étage bioclimatique saharien à hiver chaud (Figure 8).

## Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude

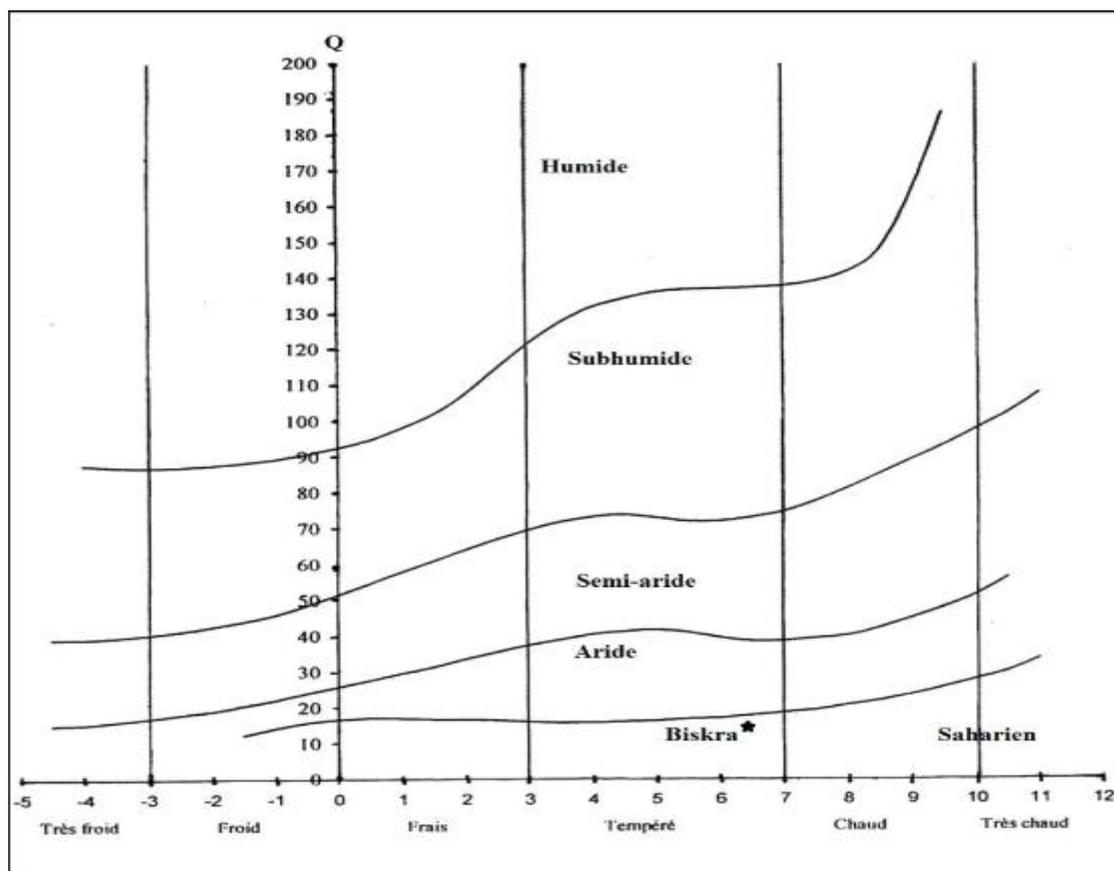


Figure 8. Situation de la région de Biskra dans le climogramme d'Emberger selon les données de la période 2006-2015.

### 2.5.3 Indice de De Martonne

L'indice d'aridité proposé par De Martonne (1926) permet de déterminer le type de climat. Cet indice est en fonction de la précipitation moyenne annuelle P en (mm) et de la température moyenne annuelle T (degré).

$$I = \frac{P}{T + 10} \dots \dots \dots (7)$$

Ou ;

P : les précipitations moyennes annuelles ;

T : les températures moyennes annuelles

Les valeurs de l'indice permettent de classer le climat comme suit ;

## Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude

$I < 5$  : le climat est hyper aride

$5 < I < 7.5$  : le climat est désertique

$7.5 < I < 10$  : le climat est steppique

$10 < I < 20$  : le climat est semi-aride

$20 < I < 30$  : le climat est tempéré

$I > 30$  : le climat est humide

Tableau 11. Indice de Marthone durant la période 2006-2015.

Station	P	T	I	Régime
Biskra	140	22.8	4.26	hyper aride

D'après l'indice de De Martonne  $I = 4.26$ , la région est caractérisée par un climat de type hyper aride.

### 2.5.4 Evapotranspiration

L'évapotranspiration est définie comme étant la valeur maximale possible de l'évaporation dans des conditions climatiques données. Elle résulte deux phénomènes l'un physique : l'évaporation et l'autre biologique : transpiration. Pour l'estimation de ce paramètre nous avons utilisé la formule de Thornthwaite, Cette méthode permet de calculer l'évapotranspiration potentielle à partir des données de (précipitation (P) en mm, température (T) en °C, le coefficient thermique mensuel (K) et l'indice thermique mensuel (i) selon la relation suivante :

$$ETP(mm) = 16 K \times \left(\frac{10T}{I}\right)^\alpha \dots\dots\dots (1)$$

Avec :  $I = \sum i = \sum \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \dots\dots\dots (2)$  et

$$\alpha = 0,016I + 0,5 \dots\dots\dots (3)$$

## Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude

Le principe de calcul de bilan hydrologique de Thornthwaite est le suivant :

-si pour un mois  $P > ETP$ , on pose que  $ETP = ETR$ , la quantité d'eau qui reste ( $P-ETR$ ) va alimenter RFU jusqu'à son maximum (100mm) et si elle dépasse cette valeur, il y aura un excès d'eau (WR) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissèlement.

-si  $P \leq ETP$ , la valeur de  $ETR=P+RFU$ , jusqu'à égalisation de ETP. Si la RFU est nulle, Il va se produire un déficit agricole ( $DA=ETP-ETR$ ), ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation.

La lame d'eau ruisselée est calculée par la méthode de Tixeront-Berkaloff

$$R = \frac{p^3}{3(ETP)^2} \quad \text{Si } p \leq 600\text{mm}$$

Le calcul de l'évapotranspiration pour la période 2006-2015 est présenté dans le tableau 12.

Tableau 12 : Calcul du bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite (2006-2015)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Annuel
T (°C)	12,00	13,80	17,13	21,84	26,54	31,51	34,71	34,36	29,25	23,87	17,07	12,61	
I	3,76	4,65	6,45	9,32	12,52	16,23	18,79	18,51	14,50	10,66	6,42	4,06	125,88
K	0,70	0,80	1,00	1,20	1,30	1,30	1,30	1,20	1,10	0,90	0,80	0,70	
P (mm/mois)	15,40	8,00	15,50	13,40	9,50	6,10	0,80	1,80	19,80	27,90	14,30	7,50	140,50
ETP (mm)	9,93	16,13	34,71	76,72	135,6 7	208,88	266,39	239,71	146,59	71,95	27,53	11,25	1245,46
ETR (mm)	9,93	8,00	15,50	13,40	9,50	6,10	0,80	1,80	19,80	27,90	14,30	7,50	134,53
RFU (mm)	5,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Da (mm)	0,00	8,13	19,21	63,32	126,1 7	202,7 8	265,59	237,91	126,79	44,05	13,23	3,75	1110,93

## Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude

Le tableau 12 montre que l'évapotranspiration maximum a été observée pendant les mois de juin, juillet et août pour des valeurs respectives de 208 mm, 266mm et 192 mm, ce qui produit un déficit agricole très important, et nécessite une irrigation. Nous remarquons que les précipitations sont inférieures à l'ETP à l'exception du mois de janvier, ce qui conduit à un stress hydrique durant toute l'année. Ce déséquilibre entre les précipitations et l'évapotranspiration montre l'importance et la nécessité de l'irrigation dans la zone d'El Ghrous (figure 9).

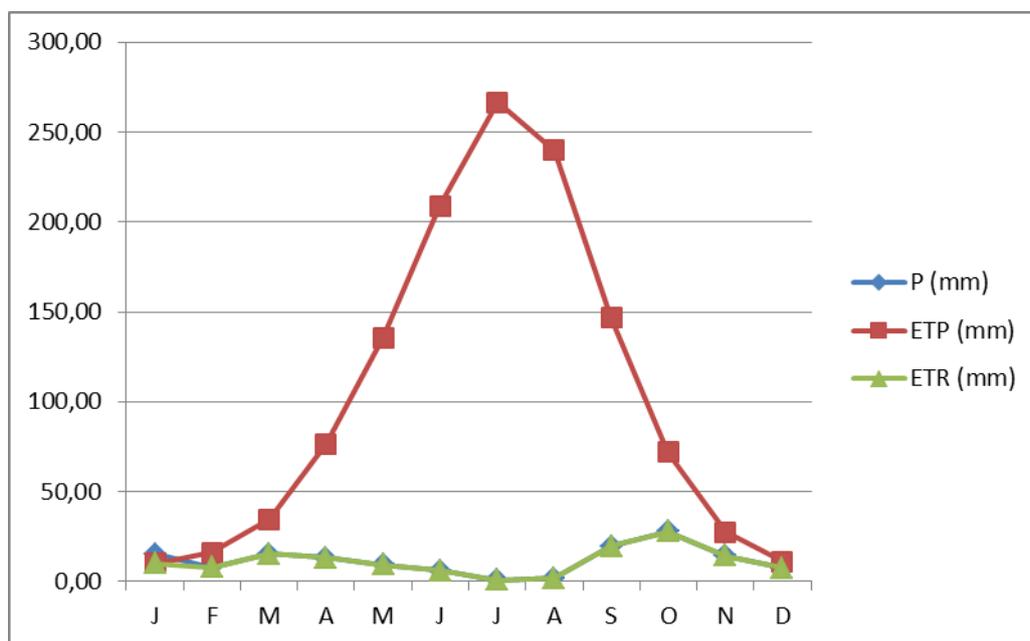


Figure 9. Présentation graphique du bilan de Thornthwaite pour l'année 2013 (données de la station de l'ONM Biskra).

Le ruissellement est calculé par la formule empirique de Tixeront-Berkaloff.

La valeur obtenue est de 0.6 mm/an, ce qui représente 0.42% environ de la précipitation. Le reste de la hauteur des pluies, va partir sous forme d'infiltration dans le sol et l'alimentation de la nappe.

### 2.6 Contexte Hydrographique

Le bassin hydrographique, ou bassin versant est l'unité ou le cadre de toute étude hydrologique. Les limites d'un bassin sont formées par les lignes de partage des eaux; qui le séparent des bassins

## *Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude*

adjacents. Elles sont facilement réparables dans les régions où le relief est bien marqué, il n'en est pas de même dans les régions très plates, où les eaux divaguent dans celles où les écoulements temporaires se perdent dans les sables ou dans les cuvettes désertiques (Meguenni, 2014).

La wilaya de Biskra est traversée par plusieurs oueds qui constituent un réseau hydrographique simple qui ne fonctionne qu'en hivers ou pendant les pluies exceptionnelles. Ces Oueds prennent naissance dans le massif des Aurès. Leur importance dépend des bassins versants qu'ils drainent. Divers oueds et cours d'eau temporaires à écoulement principal sillonnent la région et se déversent dans la dépression du Chott Melghir. Les plus importants sont Oued Djedi, Oued Biskra, Oued El-Arab et Oued El-Abiod (Bouammar, 2010). L'ensemble des Oueds (figure 10) parcourant la région fait partie du grand bassin versant saharien du Chott Melghir :

- L'Oued Djeddi (l'oued le plus important du bassin), présente l'axe de drainage d'un bassin versant de 9130 Km<sup>2</sup>; il constitue un collecteur des eaux de ruissellement d'une superficie importante du flanc Sud de l'Atlas Saharien
- L'Oued Biskra, son réseau hydrographique est constitué par un grand nombre d'affluents qui collectent les eaux de ruissellement du Sud-Ouest de l'Aurès. Cet Oued a formé une vallée alluviale qui recèle une importante nappe d'inféro-flux actuellement exploitée.
- L'Oued El Arab prend sa source des monts qui constituent la partie Orientale des Aurès et se jette dans la zone dépressionnaire du chott Melghir (ANRH, 2008).

## Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude

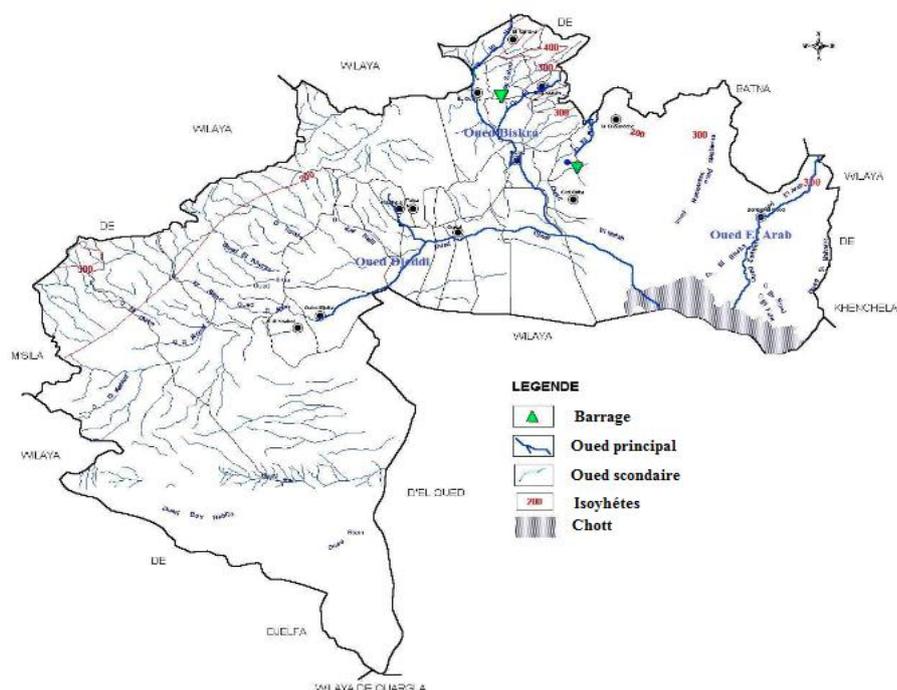


Figure 10. Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Biskra (ANAT, 2014).

Les caractéristiques de ces Oueds sont présentées dans le tableau suivant:

Tableau 13. Caractéristiques des bassins versants dans la région de Biskra

Désignation du bassin	Superficie (ha)	Nom de l'oued	Principaux affluents principal
Bassin versant de l'Oued El Arab	208500	Oued El Arab	Oued Mestaoua
Bassin versant de l'Oued Labiod	24500	Oued Labiod	Oued (Latrous et Elkatâr)
Bassin versant de l'Oued Djeddi	216000	Oued Djeddi	Oued (Trifia, Boumlili, Tamda, Ouzen, Elhali, Branis).

Dans la région de Biskra, Les ressources en eau superficielles sont relativement peu importantes et peu exploitées. Elles sont irrégulières et par conséquent, leur utilisation se limite à la pratique de l'agriculture de crue qui reste marginale.

### **2.7 Contexte géologique et hydrogéologique**

#### **2.7.1. Géologie**

La région de Biskra (Ziban) est prise au sens large du terme, et ses limites sont approximatives. Elle forme une zone de transition progressive entre le domaine atlasique et le domaine saharien septentrional car la continuité géologique de part et d'autre de l'accident sud atlasique est vérifiée entre Branis et Chetma (Chebbah, 2007).

Du point de vue géologique, la région de Biskra représente un pays de transition structurale et sédimentaires. Au Nord c'est un pays montagneux, tandis qu'au Sud, c'est un pays effondré qui fait partie du Sahara Septentrional. Le passage entre ces domaines distincts se fait par l'intermédiaire d'un ensemble de flexures, de plis-failles et de failles d'orientation Est Ouest appelé "accident sud atlasique".

La région de Biskra se caractérise essentiellement par des terrains sédimentaires, allant du Barrémien à la base jusqu'au Quaternaire (A.N.A.T, 2003). La stratigraphie se présente comme suit (figure11) :

**2.7.1.1 Le Quaternaire:** s'étend largement dans la région couvrant les dépressions et les vallées présentant les formations suivantes:

- **Récant:** cailloutés et éboulés au pied des montagnes, dunes de sables, alluvions sableuses et caillouteuses des lits actuels des Oueds;
- **Moyen:** 'Deb-deb', calcaro-gypseux; alluvions sableuses et argileuses;
- **Ancien:** poudingues près des montagnes, dépôts sableux et argileux.

**2.7.1.2 Le Tertiaire:** dans lequel on distingue de haut en bas:

- **Le Pliocène:** affleurant au Sud-Ouest de la région, entre Doucen, Ouled Djellal et Rass Zebidja, ainsi qu'au Nord de Lioua, formé de poudingues, bancs de grés et d'argiles sableuses à proximité des massifs passant à des couches rouges sableuses et gypseuses dans la plaine.

## *Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude*

- **Miocène** (Pontien): affleure à proximité de la ville de Biskra et au Djebel Bourhezel comportant des argiles, marnes multicolores, sables, graviers et avec la présence des gypses à tous les niveaux.
- **Eocène**: il affleure de l'Est vers l'Ouest entre le Sud de Bordj Chaïba et le Nord de Lichana. On y distingue plusieurs stratigraphies:
  - **Eocène moyen (Lutézien)**: il apparaît largement au sud-ouest de la région de Biskra. Dans certains points son épaisseur est de 200 à 250 m. Il est formé d'une alternance d'argiles grises, gypses anhydrites et de calcaires dolomitiques.
  - **Eocène inférieur (Carbonaté)**: sous forme d'une succession de bancs de calcaires cristallin dur, gris ou blanc, de calcaire crayeuse, de dolomie argileuse et de marnes blanches, avec quelques niveaux à silex noirs à la base et des niveaux à nummulites (yprésien). Son épaisseur varie entre 200 à 300 m (ANAT, 2003).

### **2.7.1.3 Le Secondaire (Crétacé):**

#### **2.7.1.3.1 Sénonien:** il de haut en bas

- **Maestrichtien**: affleure au nord de la région (340 m d'épaisseur) formé d'une alternance de calcaire dolomitique gris, marnes, argiles gypseuses et quelques passées d'anhydrite.
- **Campanien**: affleurant au nord de la région d'une puissance de 200 m, comportant des marnes, marno-calcaire, calcaire gris, calcaire colitique et glauconieux bioclastique.
- **Santonien –Coniacien**: affleurant sur les monts des Ziban formés de calcaire, calcaire marneux et marnes blanchâtres, l'épaisseur est estimée de 200 à 400 m.

**2.7.1.3.2 Turonien** : il apparaît à Djebel Bourhezel et Djebel Om Djenib, d'une puissance variant entre 200 et 400 m, comportant des calcaires dolomitiques et une alternance de calcaires gris et d'argiles grises ou vert foncé; calcaire marneux gris clair; quelques passées d'anhydrite massive.

**2.7.1.3.3 Le Cénomaniens**: affleurant à Dj. Bourhezel et au nord de Bordj Chaïba l'épaisseur varie entre 200 et 500 m et présentant des évaporites; Argiles gypseuses avec de rares passées de

## *Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude*

calcaire dans d'autre endroit il présente des argiles dolomitiques grises à vert foncé avec des passées d'anhydrite massive.

### **2.7.1.4 Albien**

Se présente dans de rares affleurements à Dj. Bourhezel et au nord de Bordj Chaïba. Sur une puissance estimée de 250 m, il comporte des grès rouges avec des intercalations d'argiles rouges. Au sommet il est carbonaté.

### **2.7.1.5 Aptien**

Un seul affleurement réduit au Nord de Dj. Bordj Chaïba, son épaisseur va de 50 à 60 m comportant des argiles, marnes multicolores, anhydrite, calcaire dolomitique et dolomies.

### **2.7.1.6 Barrémien**

Il apparaît seulement à Bordj Chaïba d'une puissance de 540 m au maximum, formé d'une alternance de sables, grès fins, argiles sableuses et plus de dolomie cristalline. La couleur dominante est le rouge brun.

### **2.7.1.7 Néocomien**

Il n'affleure pas, seulement le forage de Sidi Khaled en de traversé de 300 m avec à la base des calcaires, des marnes argileuses, succédées d'une alternance d'argiles sableuses et de dolomie gréseuse (ANAT, 2003).

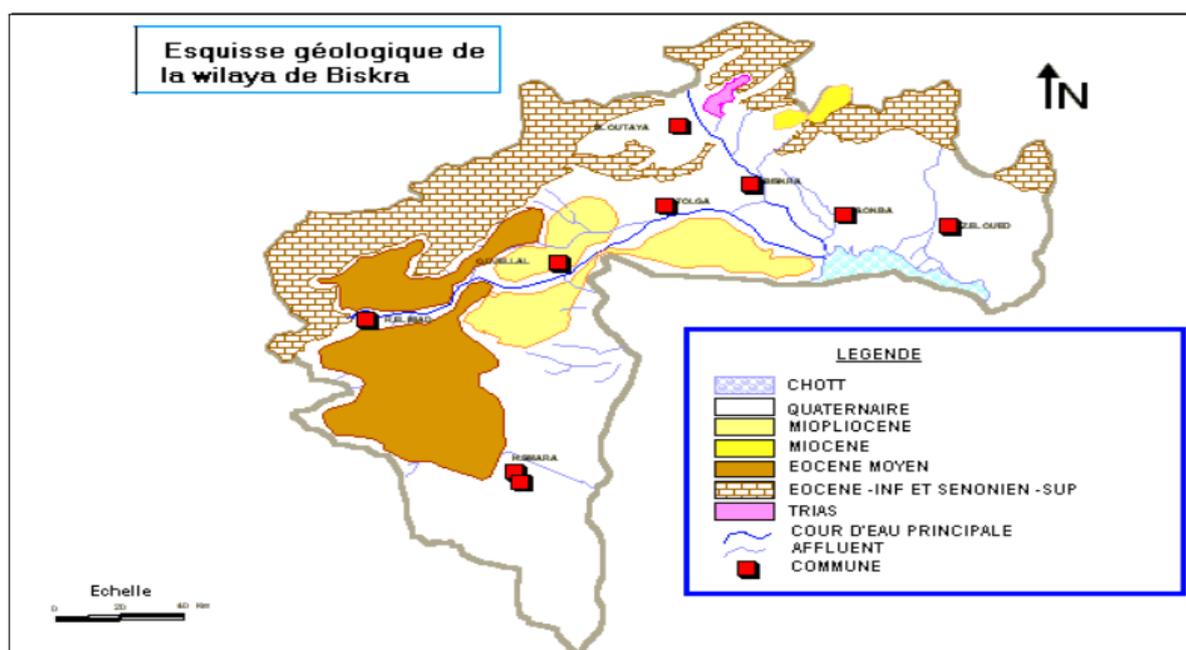


Figure 11. Esquisse géologique de la région de Biskra (ANAT, 2003).

### 2.7.2. Hydrogéologie

La wilaya de Biskra fait partie du grand bassin hydrogéologique du Sahara septentrional. Elle présente plusieurs réservoirs aquifères d'importance bien distincte de par leur constitution lithologique, leur structure géologique et leurs facilités d'exploitation. Les travaux géophysiques, la réalisation de forages, la disposition des colonnes stratigraphiques, permettent d'identifier les différentes nappes aquifères exploitées dans la région de Biskra.

Selon Drouiche et al (2013): les principaux aquifères exploités dans la région d'El Ghrous appartiennent aux étages suivants:

- La nappe phréatique** : moins importante comparativement aux autres nappes. Elle se localise dans les accumulations alluvionnaires des oueds tels qu'Oued Belebsibis. Cette nappe est alimentée par les précipitations et l'infiltration des eaux d'irrigation.
- La nappe des sables du Mio-Pliocène**: L'importance de cette nappe se voit en allant vers le sud de la région où elle est particulièrement exploitée et son épaisseur devient plus importante. Elle est constituée essentiellement d'une alternance de couches d'argiles imperméables et de sable et cailloutis.

## *Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude*

- c. La Nappe de l'Eocène Inférieur:** affleure au nord de la région et devient de plus en plus profonde en allant vers le sud (profil A-B). Son réservoir est constitué surtout de calcaire ou calcaire marneux. Les différents sondages réalisés montrent que les calcaires Eocène présentent un réseau de diaclases dense d'origine tectonique et karstique. C'est la nappe la plus exploitée, notamment en s'étendant au nord et au centre de la région.

### **2.8 Pédologie**

La région de Biskra est caractérisée par des pluies très faibles et irrégulières et une évaporation importante. Dans des conditions aussi sévères, les sols ont une évolution faible, leur structure est généralement faible, les éléments minéraux assez altérés, les éléments solubles sont concentrés en surface et accumulés à un niveau ou un autre du profil, ce qui conduit à la naissance d'une croûte calcaire gypseuse dite deb deb (Aidaoui, 1994). Selon l'étude qui a été faite par l'ANAT en 2003, deux classes du sol sont déterminés à El Ghrous:

#### **2.8.1 Sol peu évolués d'apports alluviaux**

Les sols peu évolués ont un profil de type AC avec absence d'horizons A2 et B. Ces sols sont constitués de sable mobile, constamment repris par l'érosion éolienne. Le sable est généralement grossier, très faiblement calcaire avec plus de traces de la matière organique dans les vingt premiers centimètres. Une partie de cette matière organique peut être bien humifiée, le matériel est fragmenté même s'il est originalement massif et dur. La matière minérale n'a pas subi d'altération sensible, par contre elle a pu être désagrégée et fragmentée. Les sels minéraux y compris les carbonates et les sulfates, ainsi que les cations peuvent avoir subi des redistributions migratoires.

#### **2.8.2 Sol bruns gypseux-halomorphe**

Ces sols dans lesquels l'horizon supérieur contient des sulfates de chaux, la couleur est généralement grise claire et parfois beige. La structure est souvent finement grumeleuse, ils se caractérisent aussi par un encroustement gypseux à amas ou nodules calcaires.

## Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude

### 2.9 Agriculture et les systèmes de production

L'agriculture est la principale source de revenu pour les habitants d'El Ghrous. Cette agriculture est concentrée dans la partie sud par rapport à la route nationale N°46. Le nord de la commune est constitué de montagnes et de terres non exploitées (Ouendeno, 2014).

Trois principaux systèmes de production façonnent le paysage agraire de la commune (Abdenmour et al., 2019) :

#### 2.9.1 Le système de production phoénicicole

C'est un système anciennement pratiqué dans la région. Les premiers palmiers ont été plantés dans la zone d'El Amri (au centre de la commune) autour d'une source de l'eau, utilisée pour l'irrigation. La première exploitation phoénicicole moderne a été créée par un colon durant les années 1940. La phoeniciculture est concentrée beaucoup plus dans le sud-est de la commune. C'est sur les terres privées mises en valeur avant les années 40 et les terres domaniales mises en valeur durant la période de 1940 et 1985 que la phoeniciculture s'est développée.

La production de dattes est passée de 76033 à 135240 quintaux entre 2003 et 2012. En termes de superficie totale, elle est passée de 1285 ha en 2003 à 1955.6 ha en 2012 (DSA, 2013). La culture de palmier dattier a parallèlement pris une ampleur significative suite à l'introduction de la plasticulture dans la région (Bouammar, 2010; Kebibèche et Daoudi, 2013), et surtout suite aux aides accordées par l'Etat dans le cadre du Plan National de Développement Agricole PNDA, mis en œuvre entre 2000 et 2007.

Tableau 14. Évolution de la production de dattes à El Ghrous entre 2003 et 2012

	Total de palmiers			Dont Deglet Nour		
	total	En production	Production (quintaux)	total	En production	Production (quintaux)
En 2003	161633	98128	76033	128778	78300	70640
En 2012	169650	152600	135240	146150	130000	117000
Ecart	817	54472	59207	17372	51700	46360

Source DSA, 2013

### **2.9.2 Le système de production maraîcher**

La région a connu le développement de deux systèmes de cultures maraîchères, le maraîchage de plein champ et le maraîchage sous serre. Le premier, pratiqué vers les années soixante-dix dans la zone de Khaidha, était principalement destiné à l'autoconsommation. Les cultures pratiquées étaient le melon, le piment et le potiron. Actuellement le maraîchage de plein champ est principalement destiné au marché et tend à se spécialiser en deux principales cultures : le chou-fleur d'hiver et carotte. La superficie occupée par le maraîchage de plein champ est de 48 ha, avec une production de 5050 Quintaux/an (DSA, 2013). Le maraîchage sous serre a été introduit dans la région dans les années 80. Il a battu son plein depuis cette dernière décennie, grâce au soutiens attribués aux plasticulteurs par le PNDA et à l'afflux des migrants investisseurs dans la région au milieu des années 2000. Les principales cultures pratiquées sont les suivantes : tomate, melon, piment, poivron, aubergine et courgette. Le nombre de serres dans la commune est passé de 5480 en 1999 (pour une superficie de 540 ha), à 13000 en 2002 (superficie 559 ha) et à plus de 24000 en 2011 (superficie 1049 ha) (DSA, 2013).

### **2.9.3 Le système de production mixte**

Dans ce système de production mixte, la phoeniculture et la plasticulture sont associées dans une même exploitation dans des proportions équivalentes. Dans certaines zones (Amri, Ferdja, Belbessibis), c'est la plasticulture qui a contribué au développement de la phoeniculture.

### **2.10 Conclusion**

Le climat de Biskra avec une faible pluviométrie annuelle et une évapotranspiration très élevée a accentué la vulnérabilité des sols au risque de la salinisation. Cette quantité d'évapotranspiration nécessite une irrigation durant toute l'année pour combler le déficit hydrique au niveau du sol.

L'évapotranspiration potentielle est de 1246 mm en moyenne par an et consomme la totalité de la précipitation donnant un déficit qui dépasse 1111 mm. Le recours vers les 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.

## *Chapitre 2 : Aperçu sur la zone d'étude*

La commune d'El Ghrous est célèbre par ses dates et par les cultures maraichères sous serres. Trois systèmes de production sont dominants dans cette zone: un système de production phoénicicole, un système maraîcher et un système mixte phoénicicole maraîcher.

Selon Daoudi et Lejars (2016); Depuis le début des années 1990, cette commune a connu une dynamique socioéconomique remarquable. Sa population est passée de 6854 habitants en 1987 à 16 408 en 2008, soit une augmentation de 4,2% par an sur les 21 années considérées, alors que la croissance, selon les services de l'APC d'El Ghrous, n'était que de l'ordre de 2,5% durant la même période. Ce chiffre montre l'apport migratoire assez conséquent, constitué généralement d'investisseurs et d'ouvriers agricoles venus d'autres wilayas du pays. Cette attractivité s'explique en partie par le dynamisme de la filière plasticulture dont la superficie a connu une croissance de 79% entre 2001 et 2012, pour atteindre près de 1049 hectares de serres (Daoudi et Lejars, 2016), soit un quart des serres de la wilaya de Biskra.

# **Chapitre 3**

## **Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols**

## *Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols*

### **3.1. Introduction**

La salinisation des sols est l'une des formes de dégradation des terres qui entrave la croissance de la végétation en influant sur la qualité des sols, ce qui affecte la durabilité de l'agriculture et réduit la disponibilité en eau pour la plante et par conséquent la production agricole. Cette dégradation pourrait aller jusqu'à rendre les terres stériles si les sels facilement dissous s'accumulent en quantité excessives dans les horizons de surface des sols des régions arides et semi-arides (Fan *et al.*, 2011; Bui, 2013; Aragüés *et al.*, 2015; Cassel *et al.*, 2015; Gorji *et al.*, 2015).

Selon Gorji *et al.* (2015), la pratique de techniques d'irrigation anciennes ainsi que l'irrigation inconsciente, le défrichement et l'utilisation d'engrais riches en sels d'azote et de potassium sont parmi les facteurs qui causent la salinité du sol en s'ajoutant à d'autres facteurs naturels tels que la matière mère dans la structure du sol, le niveau des eaux souterraines près de la surface, la dégradation de la roche mère saline et l'eau de mer. L'accumulation de sels hydrosolubles augmente la concentration d'électrolytes dans la solution du sol et, pour la plupart des plantes, réduit leur capacité d'absorption d'eau et de croissance (Alexandre *et al.*, 2018).

Selon les rapports de la FAO et de l'UNESCO, plus de la moitié des systèmes d'irrigation du monde sont sous l'influence de la salinisation secondaire, en raison de l'exploitation intensive des ressources en eau (Rock *et al.*, 1986). (Howari and Goodell, 2008) et (Masoud and Koike, 2006) ont estimé que des millions d'hectares de terres agricoles ont été abandonnés en raison de l'accumulation de la salinité. Cela met en danger l'économie nationale de certains pays, tels que l'Argentine, l'Égypte, l'Inde, l'Irak, le Pakistan, la Syrie et l'Iran (Rhoades, 1990).

La géostatistique est un outil fiable et efficace pour l'étude et pour la prévision de la structure spatiale, qui est souvent utilisée pour cartographier la salinisation des sols et des eaux (Douaoui *et al.*, 2006; Bradaï *et al.*, 2016; Niñerola *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018).

Les propriétés du sol varient continuellement dans l'espace et le temps, et il est impossible de les échantillonner et/ou de les mesurer en tout point de l'espace. Pour représenter leurs variations spatiales, les valeurs des variables individuelles ou des types de classe aux endroits non échantillonnés devraient être estimées à partir des données mesurées aux sites d'échantillonnage (Juan *et al.*, 2011). Le krigeage est la base de la cartographie numérique adoptée et, est une technique d'interpolation pouvant s'effectuer avec avec différents de

### *Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols*

krigeage selon la structure spatiale de la variable à cartographier : krigeage simple, krigeage d'indicateurs, krigeage ordinaire, co-krigeage (Bradai *et al.*, 2016; Abdennour *et al.*, 2018).

Plusieurs chercheurs ont étudié la salinité des sols par l'application de différentes techniques de krigeage, dont le krigeage ordinaire est le plus utilisé. Parmi ces auteurs, Douaoui *et al.* (2006) ont utilisé le krigeage ordinaire (OK) pour cartographier la salinité des sols dans le Bas Chélif ; Wang *et al.* (2018) ont utilisé le même type pour identifier le changement dans l'accumulation spatiale de la salinité du sol dans un grand bassin versant en Chine ; Niñerola *et al.* (2017) ont démontré l'avantage d'utiliser le krigeage ordinaire pour cartographier les propriétés des sols. Le krigeage indicateurs est une autre technique d'interpolation importante en géostatistique ; c'est une approche non paramétrique basée sur une transformation préliminaire de la variable étudiée en un indicateur prenant les valeurs binaires 0 et 1 selon des seuils choisis de la variable (Walter *et al.*, 2001; Douaoui, 2005). De nombreux auteurs ont adopté cette approche géostatistique non paramétrique pour évaluer le risque de pollution des sols et des eaux souterraines (Eldeiry and Garcia, 2011; Arslan, 2012; Richa *et al.*, 2015; Bradai *et al.*, 2016). Eldeiry et García (2011) ont utilisé cette technique de krigeage d'indicateurs pour la gestion de la salinité. Bradai *et al.* (2016) ont adopté ce type de krigeage pour améliorer la précision des prévisions de salinité des eaux souterraines dans le Bas-Chélif (ouest de l'Algérie).

A Biskra, dans le Sud-Est de l'Algérie, de vastes zones sont touchées par des problèmes d'irrigation liés aux eaux souterraines qui provoquent la salinisation des sols. La commune d'El Ghrous, qui couvre 3,2 % de la superficie irriguée de la wilaya et représente 3,8 % de la superficie agricole utile (DSA, 2013), est l'une des zones qui sont touchées par la salinisation. Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux types de krigeage : linéaire et non linéaire, pour une meilleure prédiction de la salinité dans le périmètre irrigué d'El Ghrous par une combinaison entre l'utilisation de la géostatistique et des systèmes d'information géographique. L'objectif principal est de faire une évaluation de la salinisation des sols dans le périmètre étudié et d'estimer son risque probable en utilisant l'approche géostatistique.

## *Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols*

### **3.2. Matériel et méthodes**

#### **3.2.1. Echantillonnage du sol**

Cette étude a été menée dans la région d'El Ghrous (fig. 12). Le périmètre irrigué a une superficie de 9324 ha et une altitude allant de 130 m à 200 m. La salinisation des sols dans cette zone s'est accélérée ces dernières années en raison de l'utilisation accrue des eaux souterraines pour répondre aux besoins en eau d'irrigation (Abdenmour *et al.*, 2019).

L'échantillonnage a été effectué dans la période d'octobre à novembre 2017 avec 190 points pour mesurer la conductivité électrique du sol. La position exacte des points des sols en latitude et en longitude a été déterminée par le système de positionnement global (GPS). Nous avons adopté un échantillonnage semi-aléatoire dans la zone d'étude (Figure 12). Les échantillons de sol ont été prélevés à une profondeur de 0 à 15 cm, là où l'accumulation de sel est la plus importante. Chaque échantillon a été séché à l'air, broyé, tamisé avec un tamis de 2 mm et conservé dans un sac en plastique jusqu'à l'analyse. Ensuite, nous avons mesuré la CE du sol au laboratoire en utilisant la méthode de l'extrait dilué au 1/5 (USSLS, 1954).

### Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols

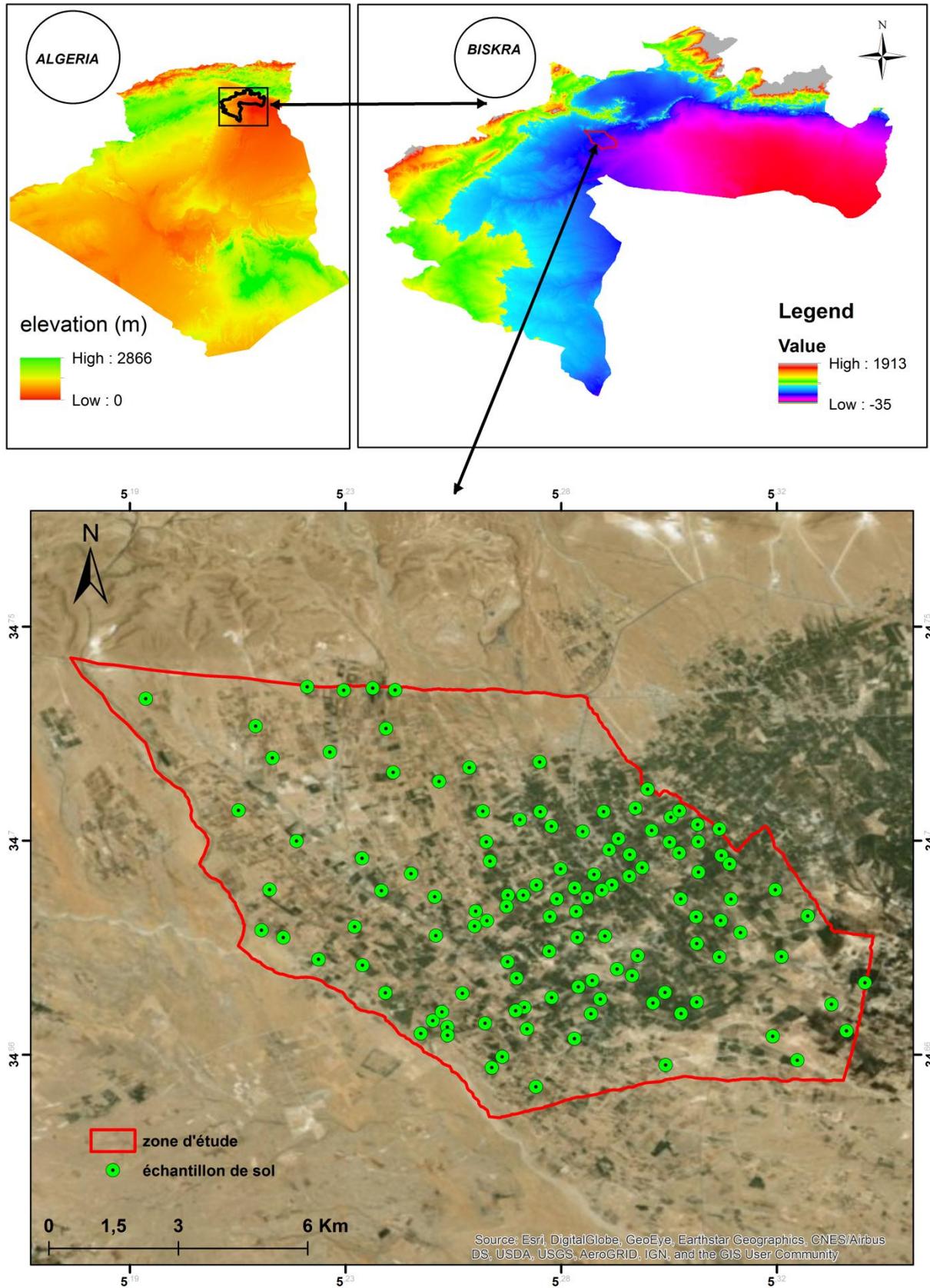


Figure 12. La répartition des échantillons utilisés en géostatistique.

## Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols

### 3.2.3. Analyse géostatistique

Le krigeage permet la prédiction en utilisant les caractéristiques statistiques des données réelles (Safarbeiranvand *et al.*, 2018). L'une des contributions de la géostatistique est la possibilité de créer des cartes d'erreurs pour tous les types de krigeage et des cartes de probabilité pour certains d'autres (Castrignano *et al.*, 2002). La variographie et le krigeage sont les deux éléments clés de l'analyse géostatistique.

Selon Arslan (2012) et Bradai *et al.* (2016), le variogramme  $\lambda(h)$  représente la semi-variance de la différence entre les valeurs des attributs pour tous les points séparés par une distance. Il suit habituellement l'équation 1 :

$$\lambda(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \dots \dots \dots (1)$$

Où  $\lambda(h)$  = valeur de la semivariance estimée ou expérimentale pour tous les paires à une distance de décalage  $h$  ;  $Z(x_i)$  = valeur CE des sols par point  $h$  ;  $Z(x_i + h)$  = valeur CE (dS m<sup>-1</sup>) des sols pour les autres points séparés par une distance discrète  $h$  ;  $x_i$  = positions géoréférencées où les valeurs  $Z(x_i)$  ont été mesurées ; et  $N(h)$  représente le nombre de paires d'observations par distance  $h$  pour les points séparés (Delhomme, 1978).

Dans ce chapitre, nous avons appliqué les deux types de krigeage, le premier est une méthode paramétrique - krigeage ordinaire (KO) : ce type a été utilisé pour faire des cartes prédictives de la salinité en des points non échantillonnés à partir des autres points déjà échantillonnés, le second est non paramétrique ; krigeage d'indicateurs (KI) dans le but de cartographier les cartes de probabilité de salinité du sol dans le périmètre d'El Ghrous.

### 3.2.4. Krigeage ordinaire

Cette méthode est l'une des techniques géostatistiques les plus courantes et les plus utilisées pour interpoler la salinité des sols (Fourati *et al.*, 2017). Le krigeage ordinaire est une méthode d'interpolation spatiale linéaire couramment utilisée qui fournit des estimations de variables à des endroits non échantillonnés en utilisant l'information de points voisins, et en attribuant des poids à ces points en fonction de leur distance par rapport à la structure de variabilité spatiale estimée du point (Bilgili, 2013).

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \dots \dots \dots (2)$$

### *Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols*

Où  $Z^*(x_0)$  est la valeur estimée à l'emplacement  $x_0$ ,  $\lambda_i$  renvoie le poids attribué à l'observation  $i$ ,  $Z(x_i)$  renvoie la valeur connue au point d'échantillonnage  $x$ , et  $n$  est le nombre de sites dans le voisinage recherché pour l'estimation et il est basé sur la taille de la fenêtre mobile qui est définie par l'utilisateur. Les poids sont attribués à chaque échantillon de sorte que la variance d'estimation soit minimisée et que les estimations ne soient pas biaisées (Webster and Oliver, 2007).

#### **3.2.5. Krigeage d'indicatrices**

Le krigeage d'indicatrices est une méthode géostatistique non paramétrique pour estimer la capacité de probabilité que la valeur de l'attribut ne soit pas supérieure à un seuil spécifique,  $Z_c$ , à un emplacement donné  $U$  (Goovaerts, 1997).

En KI, la variable spatiale  $Z(u)$  est transformée en une variable indicatrice avec une réponse binaire qui s'écrit comme suit :

$$I(x_i; Z_c) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z(x_i) \geq Z_c \\ 0 & \text{if } Z(x_i) < Z_c \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

Où  $I(x_i; Z_c)$  = valeur indicatrice à un emplacement  $x_i$  ;  $Z(x_i)$  = valeur mesurée à un emplacement  $x_i$  ; et  $Z_c$  = seuil. La valeur attendue de  $I(x_i; Z_c)$ , conditionnée par  $n$  données environnantes, peut être exprimée comme suit :

$$E [I(x_i; Z_c)] = \text{Prob} [Z(x) \leq Z_c] = F(x_i; Z_c) \dots\dots\dots (4)$$

Où  $F(x_i; Z_c)$  = fonction de distribution cumulative conditionnelle (CCDF). La fonction  $F$  représente la probabilité pour une valeur inconnue de ne pas dépasser un seuil  $Z_c$ . Les fonctions CCDF sont modélisées en utilisant une approche non paramétrique (KI) (Eldeiry and Garcia, 2011).

#### **3.2.6. Validation**

Pour le krigeage ordinaire, l'étape de validation a été effectuée à l'aide de 22 échantillons (ce qui représente 12 % de la fréquence d'échantillonnage). Parmi les 190 points échantillonnés, nous avons choisi au hasard 22 points qui ne seront pas inclus dans le calcul des variogrammes et des estimations de krigeage, mais ils seront estimés à leur emplacement à partir d'autres points mesurés, ce qui permet de comparer les valeurs des variables mesurées avec celles estimées. Pour une meilleure prédiction, l'erreur moyenne normalisée (ME) doit

### Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols

être proche de 0 et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) doit être aussi faible que possible (Arslan, 2012; Fourati *et al.*, 2017).

L'erreur moyenne et l'erreur quadratique moyenne ont été estimées à l'aide des formules suivantes :

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z^*(xi) - Z(xi) \dots \dots \dots (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} [Z^*(xi) - Z(xi)]^2} \dots \dots \dots (6)$$

Où  $Z^*(xi)$  = valeur prédite ;  $Z(xi)$  = valeur mesurée ; et  $n$  = nombre de points de validation.

Pour le krigeage d'indicateurs, la performance de la prédiction a été évaluée par validation croisée. Plus que l'erreur moyenne et l'erreur quadratique moyenne, trois autres critères ont été retenus pour cette étape de validation, à savoir la moyenne quadratique normalisée qui doit être proche de 1, la moyenne normalisée qui doit être proche de 0 et le standard moyen doit être aussi basse que possible (Arslan, 2012).

### 3.3 Résultats

#### 3.3.1 Statistique descriptives sur la salinité du sol

La CE du sol varie de 0,36 à 8,54 dS m<sup>-1</sup>, avec une moyenne de 1,89 dS m<sup>-1</sup>. La variance est de 1,24 (dS m<sup>-1</sup>) et l'écart type est de 1,1 dS m<sup>-1</sup>, ce qui explique une hétérogénéité spatiale des données utilisées assez élevée comme le montre aussi le coefficient de variation dont la valeur est proche de 60 %. Le tableau 15 présente les statistiques descriptives de la salinité des sols.

### Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols

Tableau 15. Statistiques descriptives de la salinité du sol mesurée par la conductivité électrique (CE).

Paramètre statistique	CE (1/5 dS m <sup>-1</sup> )
Nombre	190
Moyen	1,89
Min	0,36
Max	8,54
SD	1,1
Coefficient de la variation	58.83%
Variance	1,24
Skewness	2,38
Kurtosis	11,60
Transformation	Iognormal

Les valeurs de salinité ont été interpolées en utilisant le KO et KI afin de dresser des cartes de la variabilité spatiale et de la probabilité de la distribution de la salinité du sol. Les estimations faites par le KO et le KI ont été obtenues à l'aide du logiciel ARCGIS version 10.5 avec le module spatial Geostatistical Analyst.

#### 3.3.2. Distribution des données et classifications des sols salés

Le test de normalité (Kolmogorov-Smirnov) a été effectué pour vérifier la distribution des données de la CE du sol. Les valeurs d'asymétrie et d'aplatissement (kurtosis) étaient de 2,38 et 11,6 respectivement, ce qui confirme la distribution non normale des données utilisées. À cette fin, les valeurs ont été transformées en logarithme avant de calculer la semi-variance.

Nous avons considéré cinq classes de salinité du sol (Durand, 1983b) : (C1) Non salin : CE = 0-0,6 dS m<sup>-1</sup> ; (C2) Légèrement salin : CE = 0,6-1 dS m<sup>-1</sup> ; (C3) Modérément saline : CE = 1-2 dS m<sup>-1</sup> ; (C4) Très salé : CE = 2-4 dS m<sup>-1</sup> ; (C5) Sols extrêmement salins : CE > 4 dS m<sup>-1</sup>

La distribution de fréquence de la CE du sol (Tab.16) montre que la classe C3 (modérément saline) est dominante avec 112 échantillons (58,94 %). La classe C4 (sol très salin) représente 24,73 % des échantillons.

La classe C5 extrêmement saline représente 4,23 %, les classes C1 et C2 (classe non saline et classe légèrement saline) représentent un faible pourcentage dans la zone d'étude. En outre, plus de 88% des points analysés ont une EC > 1dS m<sup>-1</sup>, qui est le niveau minimum de salinité où elle pourrait poser de réels problèmes pour la gestion des sols.

### Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols

Tableau 16. La distribution de fréquence de la conductivité électrique des sols.

Classes	C1	C2	C3	C4	C5
Pourcentage (%)	3.15	8.94	58.94	24.73	4.23
Nombre	6	17	112	47	8

#### 3.3.3. Krigeage ordinaire

Dans cette étape de travail, différents modèles ont été testés et évalués. L'ajustement du variogramme expérimental omnidirectionnel de la CE des sols (Fig.13) indique que le modèle exponentiel était le plus adapté à la CE des sols. L'effet de pépite ( $C_0$ ) est de  $0,023(\text{dS m}^{-1})^2$ , le palier ( $C_0 + C$ ) est de  $0,298 (\text{dS m}^{-1})^2$ , et la portée est égale à 560 m.

Selon Bradai et al. (2016): la dépendance spatiale (l'autocorrélation) peut être classée selon le % du rapport effet pépite / palier: un rapport  $<25$  indique une forte dépendance spatiale, un rapport de 25-75% signifie une dépendance spatiale modérée, et un rapport  $> 75\%$  témoigne d'une dépendance spatiale faible.

La qualité de la structure spatiale influence la précision des estimations (Leenaers *et al.*, 1990). Dans notre cas, la valeur du ratio est de 7,7%, ce qui indique que la salinité du sol dans la région d'El Ghrous est bien structurée et présente une forte dépendance spatiale.

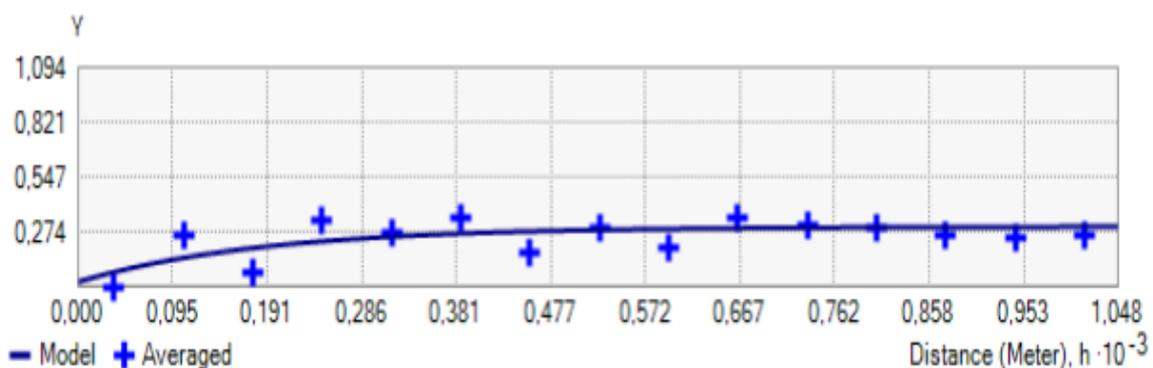


Figure.13 Le variogramme omnidirectionnel expérimental de la conductivité électrique des sols.

La carte obtenue par le krigeage ordinaire montre que la conductivité électrique entre 1 et 2 dS m<sup>-1</sup> (classe 3) est dominante ; elle occupe pratiquement plus de la moitié du périmètre (53%) qui représente 5 025 ha, surtout dans le centre et le sud de la zone d'étude.

### Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols

Par contre, le nord-ouest de la zone a une CE supérieure à 2 dS m<sup>-1</sup> et inférieure à 4 dS m<sup>-1</sup> qui représente la classe 4, cette dernière est également présente au centre et au sud de la zone.

Les sols non salés (CE <0,6 dS m<sup>-1</sup>) représentent un très faible pourcentage (1,5%) situés dans le nord-est (figure 14). C'est le cas aussi pour les sols extrêmement salins dont la CE > 4 dS m<sup>-1</sup> ne représente que 1,3% (tab. 17). Cette classe, située au sud-ouest et un peu au sud, apparaît sous forme de taches dispersées. La distribution spatiale de la salinité du sol est illustrée dans la figure 14.

Tableau 17. La superficie et le pourcentage de chaque classe obtenus par KO.

Classes	Superficies (ha)	Pourcentage %
C 1	139,2275	1.49
C 2	383,0224	4.10
C 3	5025,504	53.89
C 4	3659,274	39.24
C 5	117,6873	1.26
Somme	9324,7152	100.00

La validation a été faite en utilisant 22 échantillons. Nous avons constaté que l'erreur moyenne (ME) de salinité du sol était proche de 0 (0,04) et que le RMSE égale à 1,24, ce qui indique une bonne précision des prédictions (Sun *et al.*, 2009).

### Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols

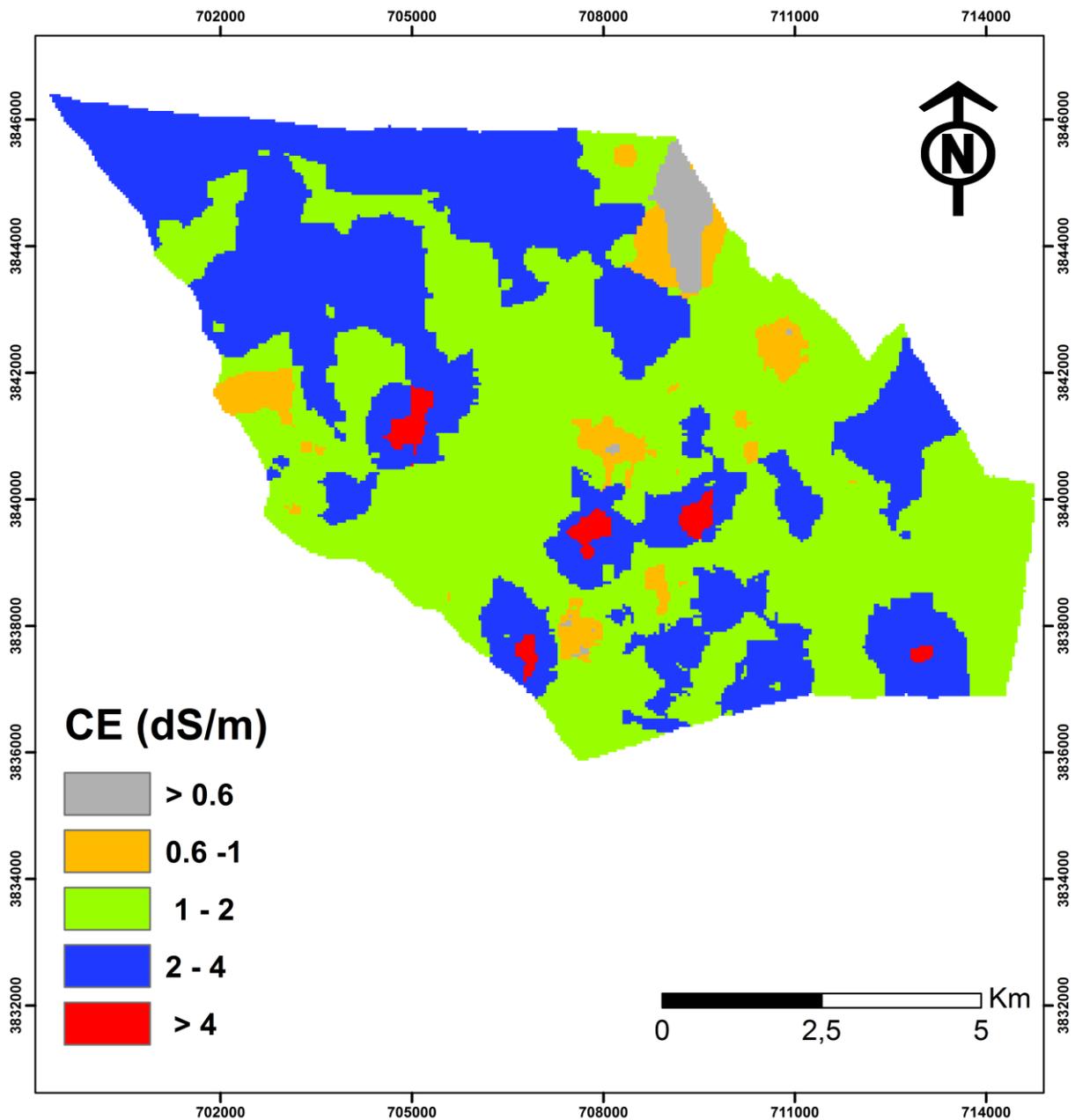


Figure 14. Prévision de la carte de salinité en appliquant KO.

La carte de l'erreur-type de l'estimation de la salinité obtenue par KO montre une distribution spatiale plus h etog ene et une plus grande sensibilité à la densité d'échantillonnage (Fig.15). Dans la partie nord de la zone où l'échantillonnage a une très faible densité, la qualité d'estimation est la plus faible, alors que les endroits de plus forte densité d'échantillonnage montrent une meilleure qualité de l'estimation.

## Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols

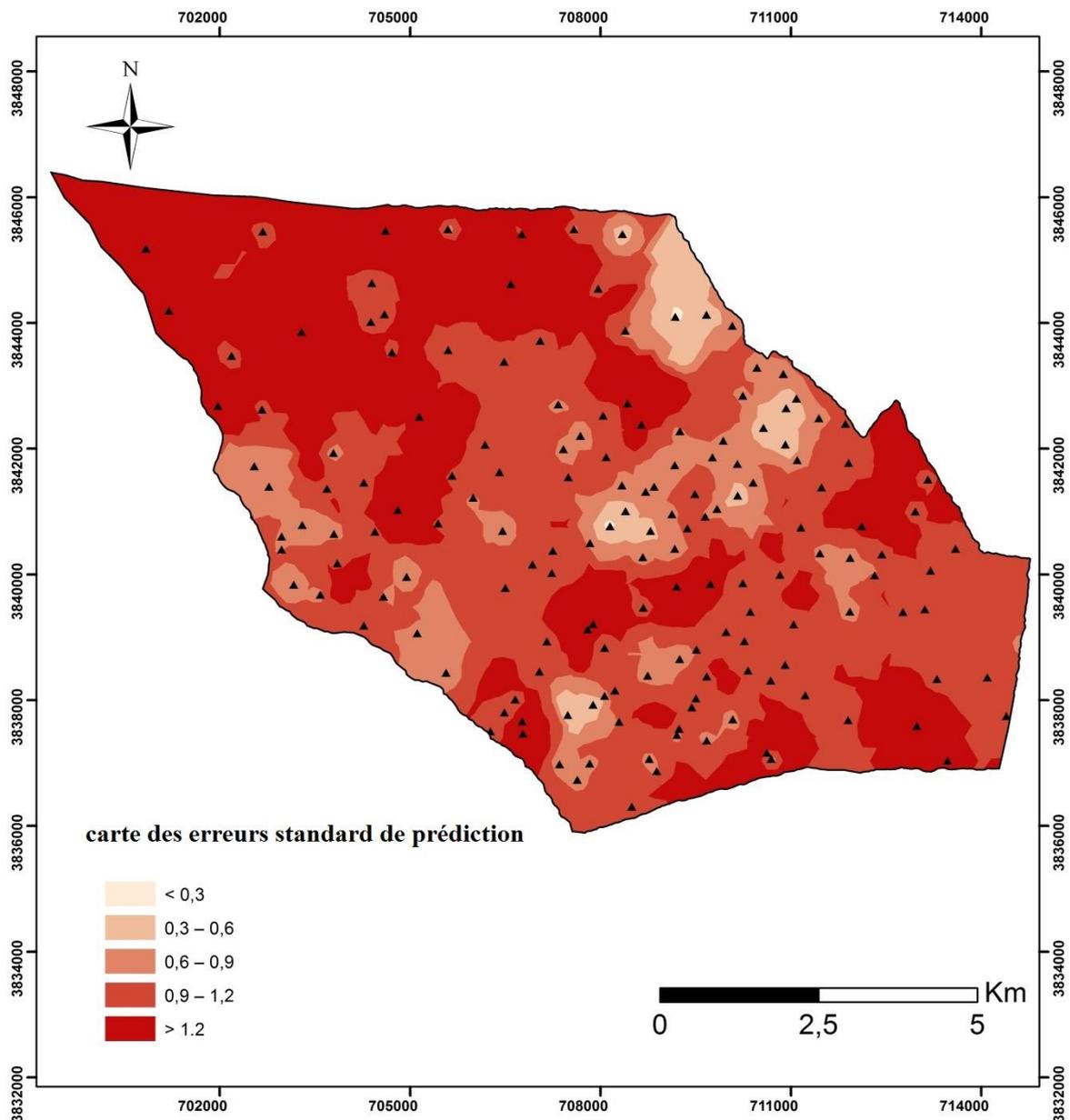


Figure 15. Carte de l'erreur standard pour KO.

### 3.3.4. krigeage indicatrice

Les quatre seuils de salinité qui ont été sélectionnés sont les limites supérieures de la classification de (Durand, 1983a) pour les mesures de la CE à l'extrait aqueux 1/5. Les seuils retenus, 0,6, 1, 2 et 4  $\text{dS m}^{-1}$ , ont été appliqués pour établir des cartes de probabilité de salinité pour les sols d'El Ghrous. Les valeurs des mesures de la CE sont converties en variables indicatrices discrètes avec une valeur de "1" ou "0", l'indice "1" indique une valeur supérieure au seuil choisi et inversement pour l'indice "0" (Arslan 2012).

### *Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols*

Pour les  $CE > 0,6$  et  $CE > 4$  dS m<sup>-1</sup>, le modèle sphérique a été ajusté comme étant le modèle le plus approprié pour ces deux seuils par rapport aux autres types d'ajustement, tandis que pour les  $CE > 1$  et  $CE > 2$  dS m<sup>-1</sup>, le modèle exponentiel s'est mieux ajusté.

Les rapports ( $C0 / C0 + C$ ) sont illustrés dans le tableau 4 ci-dessous : le modèle sphérique pour les deux seuils de 0,6 et 4,0 a une forte dépendance spatiale avec respectivement 21,72% et 23,1%. Les autres modèles exponentiels correspondant aux seuils de 1 dS m<sup>-1</sup> et 2 dS m<sup>-1</sup> ont une dépendance spatiale moyenne avec respectivement 40.6 % et 42.22 %.

Table 18. Caractéristique des semivariogrammes pour les seuils KI.

Seuils	Model	portée(m)	palier	Effect pépite	Ratio (%)
0.6	Spherique	415.93	0.0313	0.0068	21.72
1	Exponentiel	782.46	0.138	0.056	40.57
2	Exponentiel	1000	0.225	0.095	42.22
4	Spherique	550	0.039	0.009	23.07

Selon l'étude menée par Bradai et al. (2016), nous avons choisi la probabilité de 50 % comme degré de signification du débordement : plus de 99 % de la zone étudiée a dépassé le seuil de 0,6 dS m<sup>-1</sup>, 84 % de la zone avait la plus forte probabilité (0,75-1,0) de dépasser 1 dS m<sup>-1</sup> (la valeur seuil minimale pour la salinité) et plus de 10 % de la zone avait une forte probabilité (0,5-0,75) pour la même valeur de seuil. Près d'un quart de la zone de ce périmètre dépasse la valeur seuil de  $CE > 2$  dS m<sup>-1</sup>, principalement située dans la partie nord de la zone d'étude. En revanche, un faible pourcentage de la zone (3 %) dépassant le seuil correspondant à la valeur CE de 4 dS m<sup>-1</sup>; elle est située autour des endroits où des valeurs extrêmement élevées ont été mesurées. Le tableau 19 indique les zones de chaque intervalle de probabilité de chaque seuil.

### *Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols*

Tableau 19. Plages de probabilité des zones dépassant les seuils obtenus par KI.

Probabilité	CE > 0.6 dS m <sup>-1</sup>		CE > 1 dS m <sup>-1</sup>		CE > 2 dS m <sup>-1</sup>		CE > 4 dS m <sup>-1</sup>	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
0.00-0.25	1.17	0.01	51.69	0.55	4070.69	43.65	8616.04	92.40
0.25-0.50	39.75	0.42	453.90	4.86	2939.05	31.51	447.64	4.80
0.50-0.75	279.23	2.99	980.85	10.51	1910.41	20.48	242.62	2.60
0.75-1.00	9004.55	96.56	7838.51	84.05	404.56	04.33	18.40	0.19

Les cartes de probabilité pour les quatre seuils sont présentées dans les figures 16, 17, 18 et 19 ci-dessous.

*Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols*

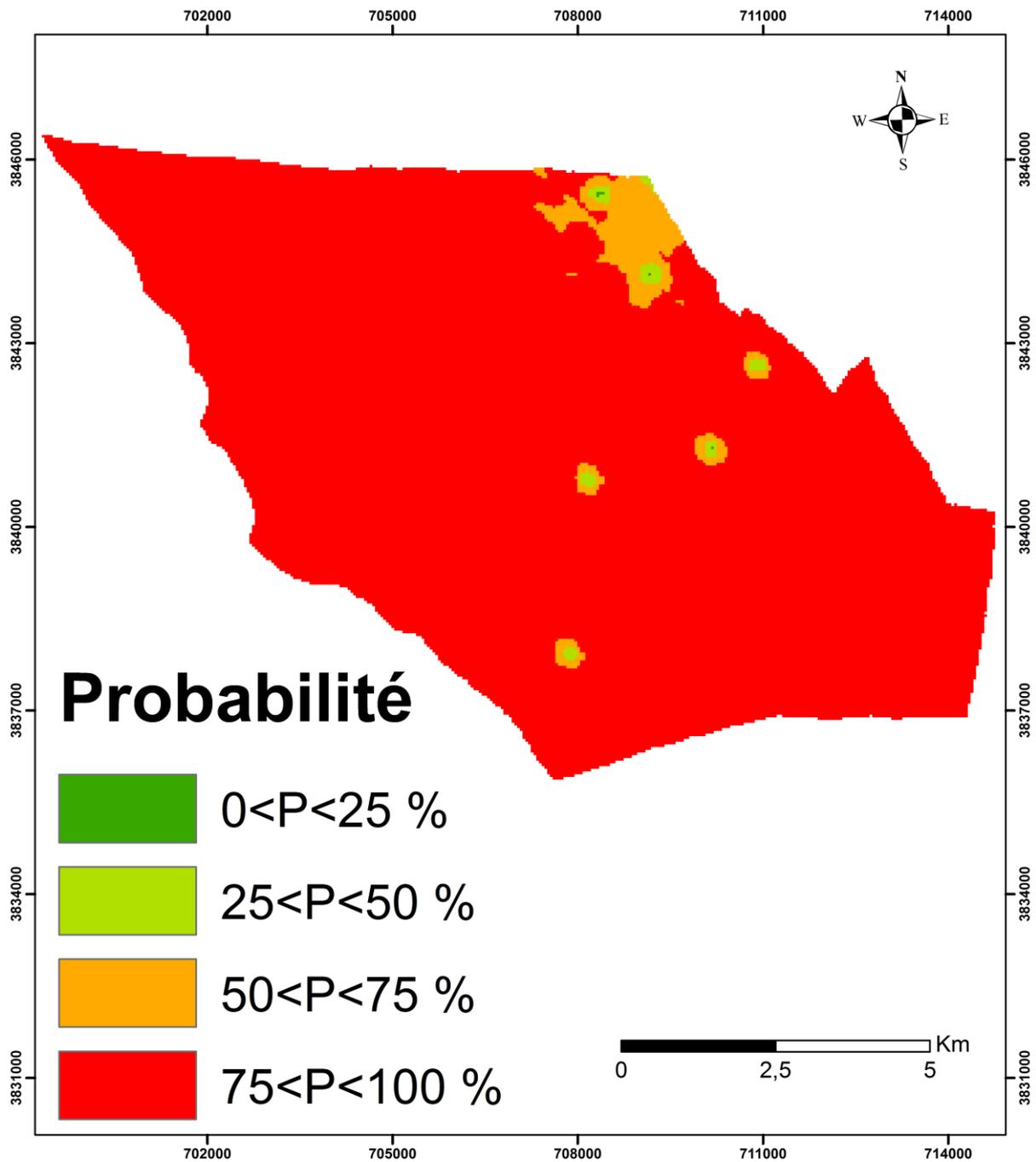


Figure 16. La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec  $CE > 0,6 \text{ dS m}^{-1}$ .

*Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols*

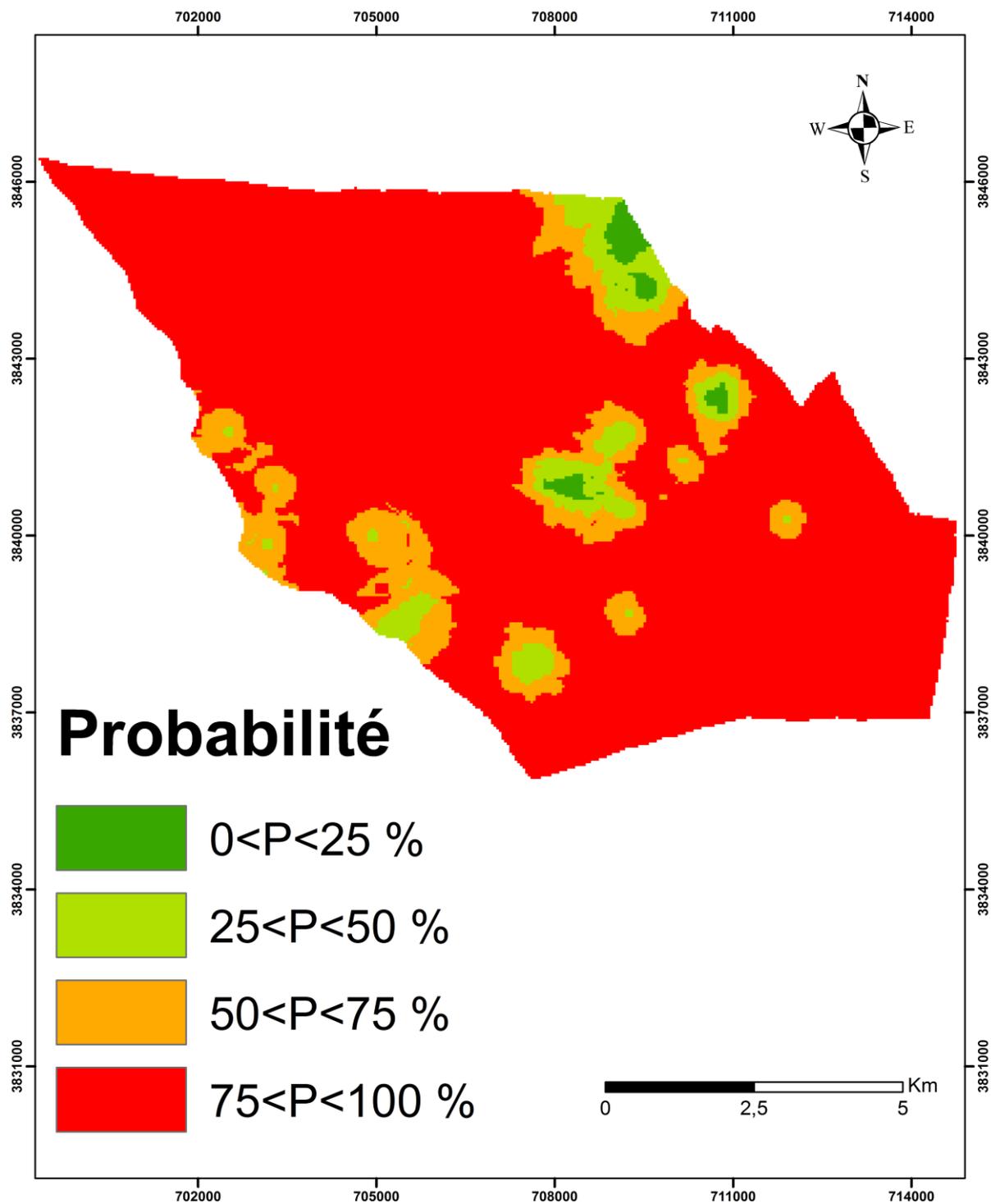


Figure 17. La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec  $CE > 1 \text{ dS m}^{-1}$ .

*Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols*

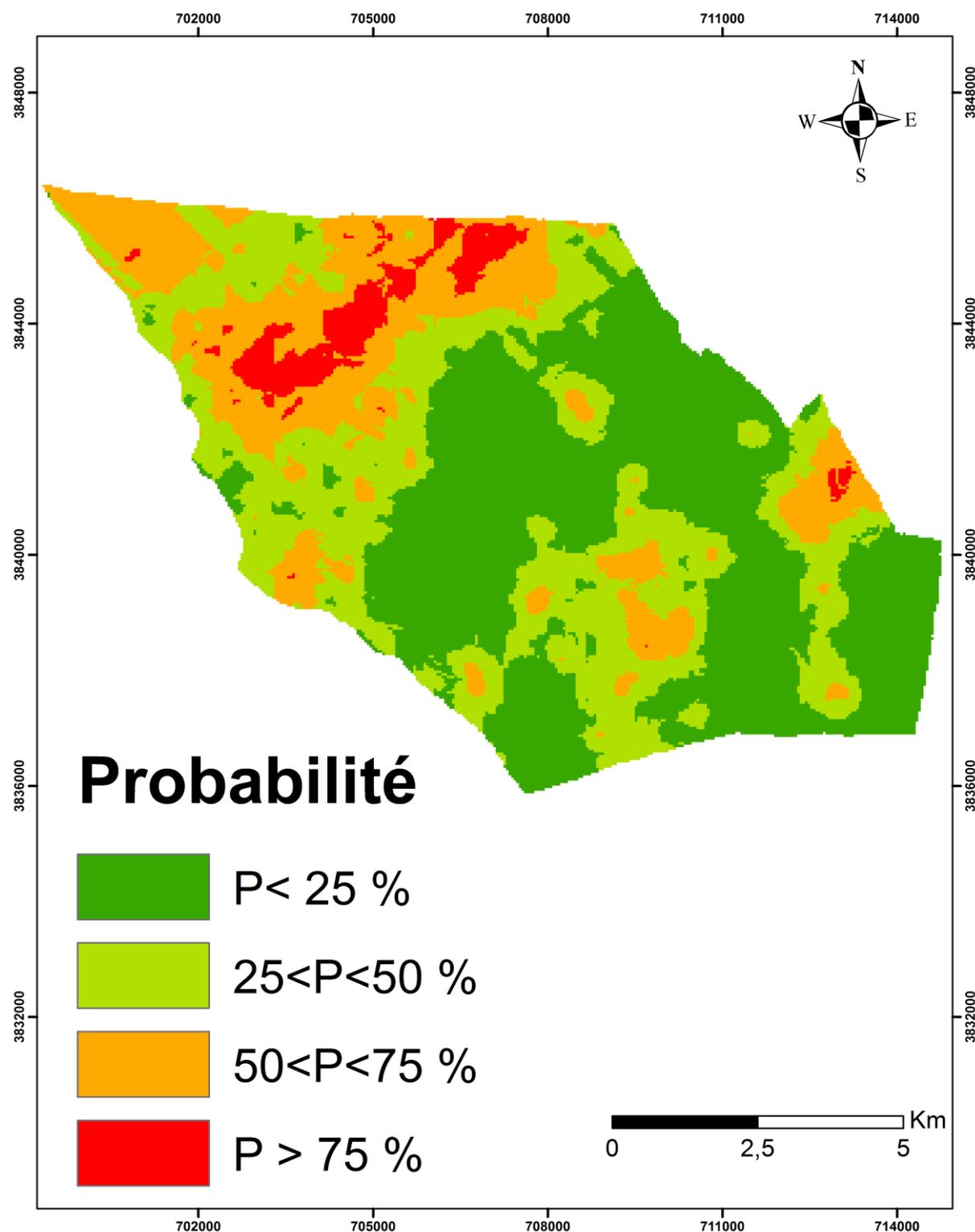


Figure 18. La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec  $CE > 2 \text{ dS m}^{-1}$ .

### Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols

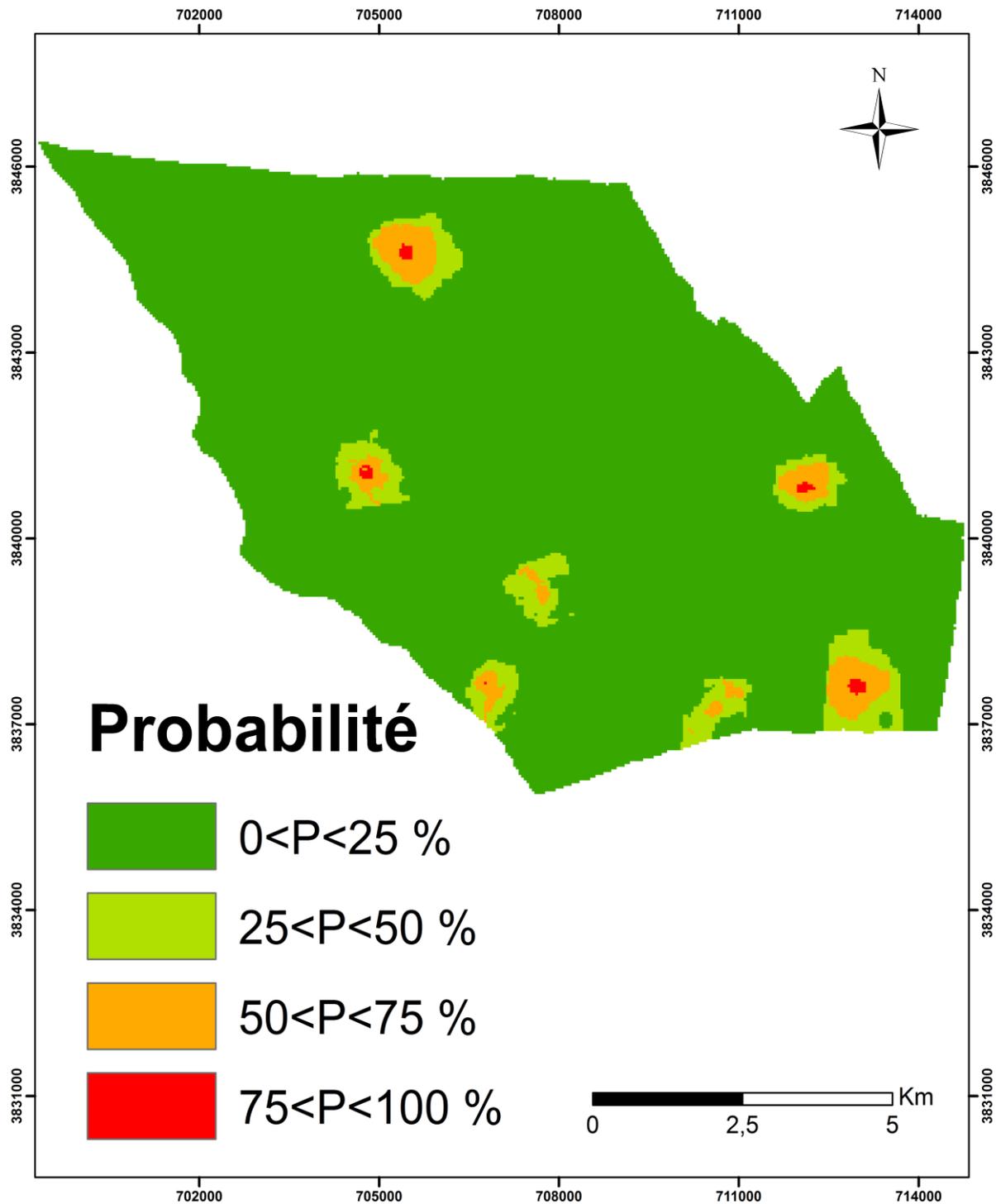


Figure 19. La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec  $CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$ .

La validation croisée (tableau 20) a révélé que l'erreur moyenne de salinité du sol (ME) était proche de 0, RMSE est de 0,86 à 1,3181, elle était meilleure pour les seuils de 0,6 et  $2 \text{ dS m}^{-1}$ , car elle est proche de 1, ce qui signifie une bonne estimation. La RMSE pour le seuil  $CE > 1$  est de 0,86, qui est inférieure à 1 et indique une surestimation, mais pour le seuil  $> 4$ , elle est

### *Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols*

supérieure à 1, ce qui signifie qu'il y a une sous-estimation dans ce cas (ESRI, 2011), les valeurs moyennes normalisées de l'erreur étaient proches de zéro, ce qui signifie une précision des prévisions (Sun et al. 2009; Arslan 2012).

Tableau 20. Validation croisée entre les valeurs mesurées et estimées de la salinité du sol (KI).

Seuils	Prédiction d'erreurs				
	Moyenne	Moyenne quadratique	Standard moyen	Moyenne normalisée	Standardisation de la moyenne quadratique
0.6	0.0014	0.1881	0.1841	0.0085	1.0202
1	0.0001	0.3240	0.3840	0.0024	0.8657
2	0.0097	0.4764	0.4733	0.0172	1.0148
4	0.0054	0.2506	0.2254	0.0190	1.3181

#### **3.4. Discussion**

Depuis les années 1990, la région d'El Ghrous a connu un changement agricole majeur, passant d'une agriculture traditionnelle à une production quasi exclusive de dattes, suivie par une production maraîchère tout au long de l'année (Khiari, 2002; Bouammar and Brahim, 2010). L'irrigation par les eaux souterraines souvent utilisée peut soit produire la mobilité des sels initialement présents dans le sol, soit l'apporter au sol, ce qui poserait des problèmes de gestion et de conservation des sols. Cette dynamique agricole dans le périmètre d'El Ghrous aura sans doute des répercussions négatives sur le sol par salinisation et sodification, avec une dégradation de la structure du sol.

Les résultats obtenus par l'application du KO illustrés dans la figure 14 ont montré que la région est sévèrement touchée par ce phénomène. Si on prend la valeur  $1dS\ m^{-1}$  comme seuil de présence de salinité, il apparaît que plus de 88% de la surface est affectée par la salinité. La tolérance des cultures aux sels varie d'une culture à l'autre. La sensibilité des cultures au stress salin se traduit par une réduction du rendement. La tolérance à la salinité est spécifique à chaque culture, et le périmètre d'El Ghrous est connu pour sa culture du palmier dans les anciens périmètres et les cultures maraîchères sous serre, surtout dans le nord de la zone

### *Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols*

d'étude, qui sont très affectées par la salinité du sol (Daoudi and Lejars, 2016). Les cultures légumineuses donnent un meilleur rendement dans les zones où les valeurs CE (en extrait aqueux 1/5) sont inférieures à  $1 \text{ dS m}^{-1}$  (Bulletin n° 29 de la FAO). Au-delà de ce seuil, le rendement diminue régulièrement avec l'augmentation de la salinité et peut entraîner des réductions de rendement d'environ 50% pour plusieurs cultivars tels que le poivron, la salade, la pomme de terre pour un seuil CE de  $5 \text{ dS m}^{-1}$  (Kotuby *et al.*, 1997). Afin d'obtenir un meilleur rendement avec une meilleure qualité, il est nécessaire de prendre en compte la nature du sol et son niveau de salinité ainsi que la tolérance de la culture à la salinité.

Le périmètre d'El Ghrous comporte de grandes surfaces de culture de palmiers. Cette plante a une tolérance à la salinité de l'eau et du sol, mais pour des taux élevés, la production de dattes risque d'être faible et de moindre qualité. Cette salinité affecte principalement la vitesse de croissance et le poids des fruits (Girard 1961). En général, la qualité des fruits est influencée par le type de cultivars et aussi par les conditions environnementales (Amorós *et al.*, 2014). Le palmier-dattier peut tolérer des sols salins à un niveau de 6% de sels solubles (Arar, 1975). Cette culture peut s'adapter à une sécheresse extrême, à la chaleur et à des niveaux de salinité du sol relativement élevés. Selon (Ramoliya *et al.*, 2003), certaines variétés pourraient supporter une salinité relativement élevée de  $12,8 \text{ dS m}^{-1}$  sans effet visible sur l'espèce. Une autre étude menée par (Alrasbi *et al.*, 2010) a montré que d'autres variétés de palmiers dattiers pouvaient tolérer jusqu'à  $9 \text{ dS m}^{-1}$ .

Pour une meilleure production, les systèmes de culture doivent utiliser une stratégie adéquate et efficace pour une gestion raisonnable de la salinité du sol. La carte obtenue par l'application du KO peut être utilisée comme un outil efficace pour les gestionnaires afin d'établir un plan de gestion pour minimiser la salinisation de sols, et pour une stratégie de gestion de la salinité et de protection des cultures et d'environnement. Une carte de la salinité des sols est nécessaire pour évaluer et surveiller l'accumulation et l'extension de la salinité (Triki Fourati *et al.* 2017). Cette carte nous a également montré la variabilité spatiale de la salinité dans la zone d'étude, et les causes de cette variabilité sont: l'utilisation accrue de l'irrigation des eaux souterraines provenant de deux couches différentes ; la fréquence et la technique d'irrigation qui varient entre les deux systèmes de cultures (palmier dattier et cultures maraîchères) ; et aussi le manque de réseaux de drainage pour drainer les eaux chargées.

Les variogrammes des fonctions indicatrices ont montré un faible effet de pépite au seuil  $> 0,6 \text{ dS m}^{-1}$  et ont progressivement augmenté vers le seuil  $> 2 \text{ dS m}^{-1}$ . Les sols de moindre

### *Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols*

salinité présentent donc moins de variabilité que les sols de forte salinité, à l'exception du seuil  $4 \text{ ds m}^{-1}$ , qui présente l'effet pépète le plus faible, car le nombre d'échantillons de cette classe ne représente que 4% des sols analysés (tabl. 19), ce qui explique cette faible valeur de variance.

Les cartes de probabilité élaborées par l'application du krigeage d'indicatrices (KI) seront utiles aux autorités locales dans la poursuite de la stratégie de gestion des terres agricoles dans les prochains projets PNDA (Plan National de Développement Agricole), pour créer de nouveaux sous périmètres et pour le plan de gestion des terres agricoles en identifiant les zones à risque dans cette zone.

Les cartes peuvent être utiles aussi pour les agriculteurs, dont le choix des cultures à planter dans leurs parcelles, car ces cartes de probabilité montrent les zones de plus grands risques de salinité en fonction des seuils utilisés, en tenant compte également de la résistance de la culture sélectionnée, pour améliorer la productivité agricole et surtout pour la gestion des sols et leur durabilité.

Nos résultats sur la salinité des sols, sont cohérents avec ceux obtenus par (Afrasinei *et al.*, 2017) par l'application des techniques de la télédétection pour l'évaluation et le suivi de la salinité et de la dégradation des sols dans la wilaya de Biskra où se trouve le périmètre d'El Ghrous. Leurs cartes d'occupation des sols, issues d'une classification supervisée, ont illustré et montré visiblement des parcelles et des zones du périmètre irrigué d'El Ghrous classées comme très salines, ce qui confirme nos résultats.

La salinisation des sols dans cette zone, en plus de la nature du sol, est principalement due à aux facteurs anthropiques tels que l'irrigation avec des eaux souterraines salines, l'irrigation inadaptée et l'intensification des pratiques agricoles, et à des facteurs climatiques qui ont un effet important sur la salinisation des sols lorsque l'évapotranspiration dépasse 1200 mm par an avec une température qui, en été peut atteindre des valeurs maximales de  $45^{\circ}\text{C}$ . La salinisation du périmètre irrigué d'El Ghrous a directement affecté le rendement agricole et la qualité des sols et des eaux souterraines. Cela nécessite une intervention rapide des autorités locales pour la réhabilitation des sols abandonnés qui ne sont plus rentables, pour la réalisation de réseaux de drainage collectifs et pour sensibiliser les acteurs du secteur agricole au niveau local et accompagner les agriculteurs en les formants pour une meilleure gestion des ressources naturelles.

### *Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols*

Selon Bas Nirola et al. (2017), l'une des meilleures stratégies de remédiation des sols salins est la sélection des cultures, non seulement à des fins économiques, mais aussi pour contrôler la pollution des sols et des eaux salines. Les cultures pourraient extraire des sels et agir comme phytoremédiateurs en raison de leur capacité à s'adapter aux environnements salins locaux.

Pour les gestionnaires du périmètre, ces techniques nous ont permis d'avoir une vue claire sur l'état actuel de la salinisation des sols dans cette zone. Malgré les projets de développement et les efforts qui ont été faits dans le cadre de la concession de terres agricoles de l'État, cette zone nécessite les perspectives suivantes que nous avons jugées utiles : application de taux de lixiviation pour éliminer et réduire l'accumulation des sels au niveau de la zone racinaire, l'installation de réseaux de drainage pour maintenir le niveau de la nappe phréatique en dessous du niveau critique de salinisation, la surveillance et la maintenance des drains, la sélection des cultures en fonction de tolérance à la salinité, et amélioration de la gestion de l'irrigation en tenant compte des techniques utilisées et des fréquences adéquates à donner. L'utilisation des eaux souterraines doit être surveillée par l'application stricte de la réglementation notamment celle relative à la gestion des puits et forages existant dans la région.

#### **3.5. Conclusion**

Le choix d'une méthode d'interpolation est très important pour une analyse spatiale de la qualité du sol. L'objectif principal de ce chapitre est de prédire la salinité du sol dans le périmètre irrigué d'El Ghrous. Pour ce faire, deux types de krigeage ont été appliqués : le krigeage ordinaire pour cartographier la variabilité spatiale et le krigeage d'indicatrices pour cartographier la probabilité de dépassement des seuils critiques de la salinité du sol.

En premier lieu, le krigeage ordinaire nous a permis de distinguer les différentes classes de salinité. La carte résultant de krigeage ordinaire a donné des prévisions avec une RMSE faible ( $1,24 \text{ dS m}^{-1}$ ) et une ME proche de zéro ( $0,04 \text{ dS m}^{-1}$ ), et elle a illustré l'état avancé de la salinisation dans la zone d'étude où la classe modérément saline occupe plus de la moitié de la surface. Cela montre que les sols du périmètre sont très menacés par la salinité, ce qui conduira certainement à la dégradation progressive des sols et à long terme à la stérilité de certains d'entre eux.

### *Chapitre 3 : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols*

Deuxièmement, l'application du krigeage d'indicateurs a montré que 88 % de la zone d'étude dépasse la valeur de  $1 \text{ dS m}^{-1}$ , ce qui représente le seuil minimum de salinité des sols. Cette valeur de salinité indique une salinisation marquée des sols, ce qui nous amène à tirer la sonnette d'alarme pour la nécessité d'un suivi régulier et la mise en œuvre d'un plan de réaction rapide pour faire face à cette situation.

Les résultats de la cartographie de la salinité par krigeage a montré la gravité de l'état dans lequel se trouvent les sols irrigués dans la région d'El Ghrous et leurs problèmes de salinité ; suite auxquels des recommandations et des solutions ont été proposées.

## **Chapitre 4**

**Application de la télédétection pour  
le suivi de l'évolution spatio-temporelle  
de la salinité et le changement dans l'occupation du sol**

## *Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol*

### **4.1. Introduction**

La salinisation des sols est l'un des problèmes environnementaux les plus critiques dans les régions arides et semi-arides, et l'une des formes de dégradation des sols qui causent des difficultés pour la productivité agricole et le développement durable (Fan *et al.*, 2011; Gorji *et al.*, 2015).

Près de 3 % des ressources mondiales en sols sont affectées par le sel (Bot *et al.*, 2000), et dans les zones semi-arides et arides, 21 % des terres irriguées souffrent de la salinité et/ou de la sodicité qui réduisent leur rendement, 77 millions d'hectares sont des sols salins induits par l'activité humaine, dont 58% se trouvent dans des zones irriguées (Lhissoui *et al.*, 2014). La surveillance et la prévision de la salinité des sols sont essentielles pour prendre des mesures de protection contre la dégradation des terres (Gorji *et al.*, 2015).

Douaoui et Lepinard (2010), ont mis en évidence l'utilité de cartographier la salinité bien que pour le faire sur une large zone, il est nécessaire de collecter sur le terrain et d'analyser au laboratoire un grand nombre d'échantillons pour arriver à une bonne estimation spatiale.

L'imagerie satellitaire est un outil puissant pour le suivi et le contrôle de la salinité des sols, par sa couverture synoptique et la sensibilité du signal électromagnétique aux paramètres du sol dans la couche de surface (Metternicht and Zinck, 2003; Farifteh *et al.*, 2006). Cette technologie moderne nécessite un personnel qualifié en techniques d'observation de la terre et en systèmes d'information géographique (Mashimbye, 2013).

L'utilisation des indices numériques extraits d'une image satellitaire pour évaluer la salinité des sols joue un rôle majeur dans l'étude de la modélisation et de la surveillance des phénomènes environnementaux à des échelles spatiales et temporelles (Barbachea *et al.*, 2018). Les recherches récentes visent à évaluer les corrélations entre les données réelles (collectées sur le terrain et mesurées en laboratoire de CE) et les valeurs des indices obtenues à partir d'images satellitaires (Douaoui and Lepinard, 2010; Elhag, 2016). La détection de la salinité à partir des données de télédétection se fait généralement par deux méthodes(1) : directement par l'analyse de la réflectance spectrale sur des sols nus ou à densité végétale faible, avec ou sans efflorescence et croûte saline (Al-Khaier, 2003), ou (2) : indirectement par des indicateurs tels que la présence de plantes halophytes (Aldakheel, 2011), et le rendement des cultures tolérantes au sel (Matinfar *et al.*, 2013). Le traitement des données de

## *Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol*

télédétection pour créer des cartes thématiques significatives est effectué par la technique de classification, dont l'objectif est de classer automatiquement tous les pixels en classes ou thèmes d'occupation/utilisation du sol (Afrasinei *et al.*, 2017).

La classification des sols par les techniques de la télédétection est considérée comme un outil important et indispensable pour évaluer le changement à différentes échelles spatiales et temporelles. La détection des changements d'occupation des terres est le processus qui consiste à identifier les variations entre deux ou plusieurs dates qui ne sont pas caractéristiques d'une variation normale (Taher and Yossif, 2017). Une analyse des caractéristiques de changement de la surface de la terre est essentielle pour mieux comprendre les interactions et les relations entre les activités humaines et les phénomènes naturels tels que la salinité. Dans cette étude, nous avons utilisé une classification non paramétrique supervisée (machine à vecteurs de support), qui offre plus de précision que les autres classificateurs paramétriques, en raison de leur capacité à gérer les distributions non normales à l'intérieur d'une même classe (Afrasinei *et al.*, 2017).

Dans ce chapitre nous avons évalué la capacité des données Landsat 8 OLI et Landsat5 TM à surveiller la salinité des sols dans les palmeraies d'El Ghrous, et à détecter les changements de la couverture des sols. Deux méthodes ont été utilisées dans le cadre de cette évaluation :

- 1- l'utilisation des indices spectraux, qui sont dérivés de l'image satellitaire Landsat 8 OLI 2017 et ;
- 2- l'application d'une classification supervisée pour la détection des changements entre 2009 et 2017.

Par ailleurs, nous visons à établir des cartes de l'état des terres dont les sols affectés par le sel font partie, et de leurs changements entre 2009 et 2017, selon les données provenant de l'imagerie satellitaire, par l'utilisation des SIG et l'analyse statistique.

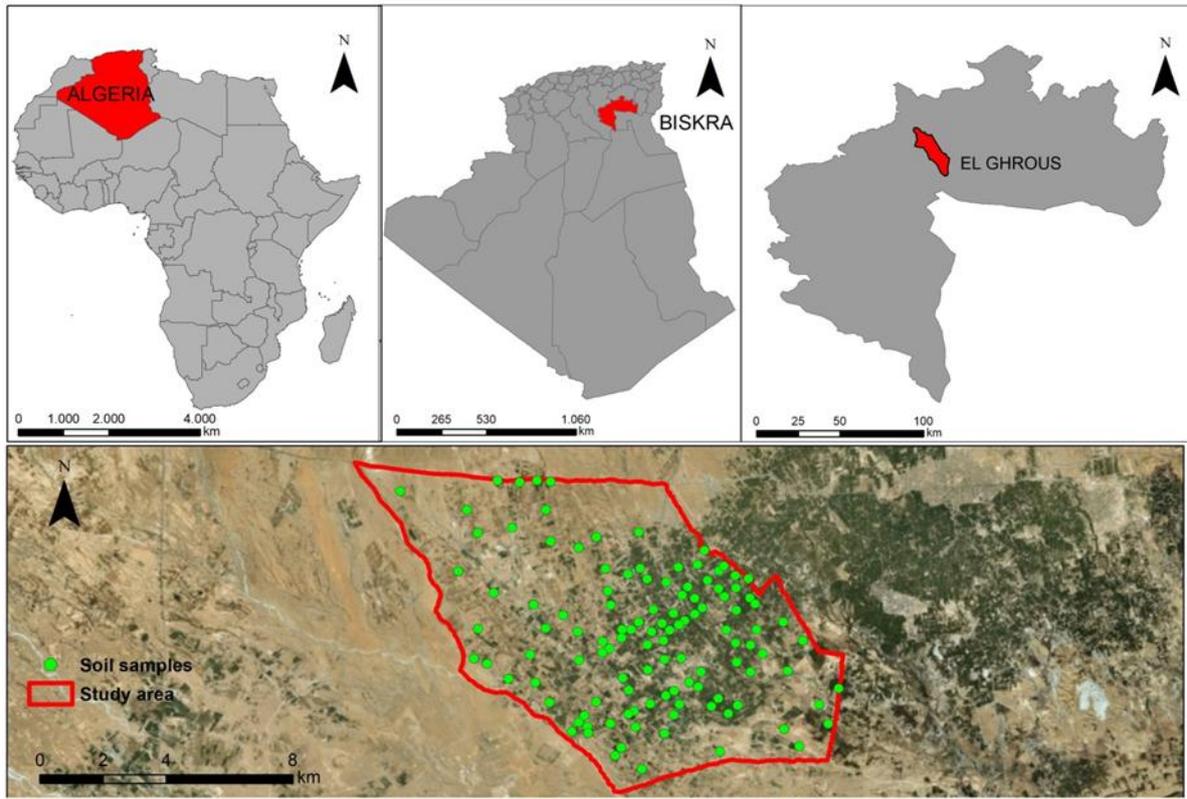
### **4.2. Matériel et méthodes**

#### **4.2.1. Échantillonnage du sol**

Parmi les 190 points de sols utilisés dans le chapitre précédent, nous avons éliminé 69 échantillons qui se trouvent à l'intérieur des serres agricoles dans la partie nord de la zone et qui ne sont donc pas exposés directement au signal émis par les satellites. Dans le présent

## *Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol*

chapitre, le reste des points (Fig. 20) ont été utilisés pour évaluer la capacité des données satellitaires à détecter la salinité des sols dans ce périmètre.



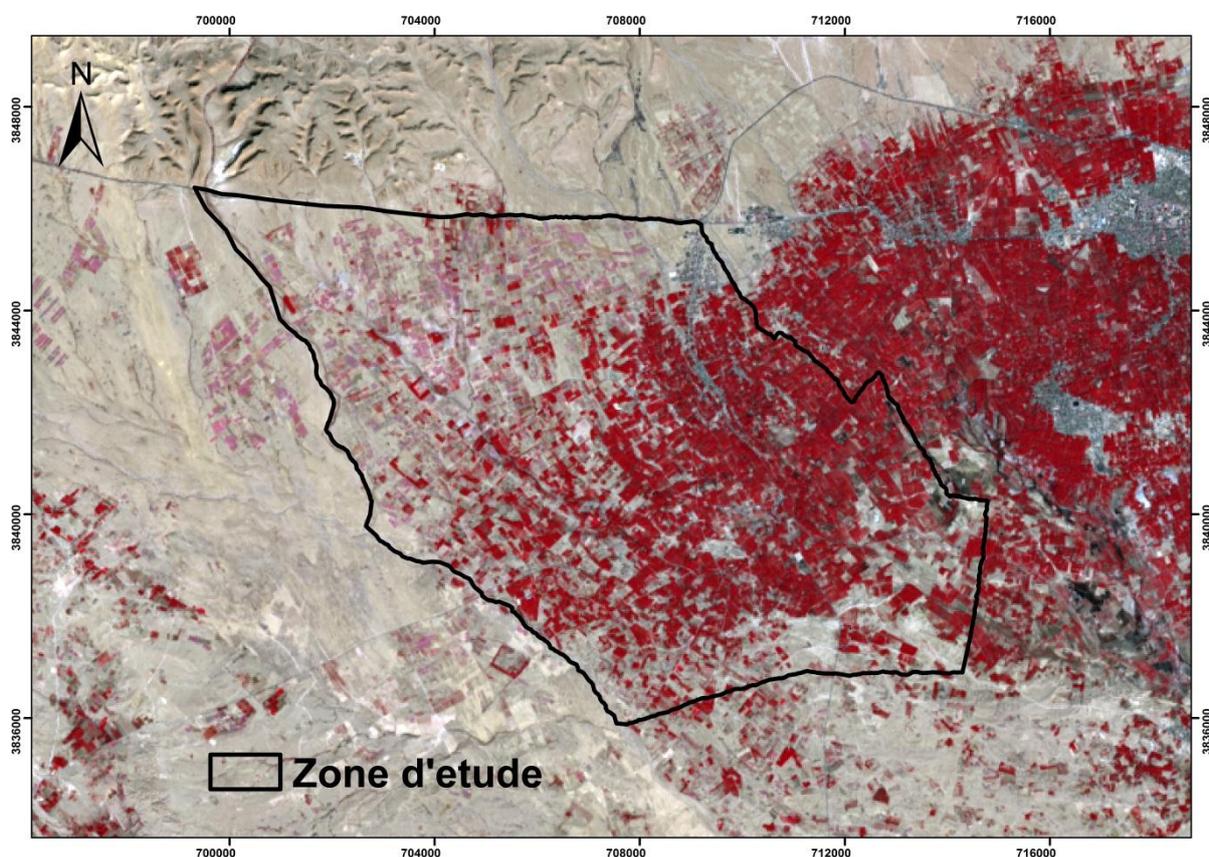
**Figure 20.** La répartition des échantillons utilisés en télédétection

### **4.2.2 Télédétection et SIG**

Pour prédire la salinité des sols et évaluer la distribution spatiale de la couverture terrestre et leurs changements dans le périmètre irrigué d'El Ghrous sur la période 2009-2017, nous avons utilisé les données du satellite Landsat 5 TM 2009 et l'image Landsat 8 OLI 2017. Cette dernière est composée de 11 bandes spectrales : 9 dans le domaine visible (8 multispectrales de résolution 30 m, 1 panchromatique à 15 m) et 2 thermiques (100 m). L'image Landsat 8 OLI a été acquise le 31 octobre 2017 (Fig. 21). L'image Landsat 5 TM est composée de 7 bandes spectrales avec une résolution spatiale de 30 m pour les bandes 1 à 5 et 7 ; la résolution spatiale pour la bande 6 est de 120 m. L'image Landsat 5 TM a été acquise le 9 octobre 2009 (Fig. 22). Les images satellitaires ont été téléchargées sur le site web de l'USGS à l'adresse <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Les indices spectraux d'image 2017 ont été calculés et testés à l'aide de logiciels : ARCGIS (10.5) et ENVI (5.3).

#### *Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol*

Tous les indices créés ont été sauvegardés et chargés comme données d'entrée dans le logiciel ArcGIS 10.5 en tant que couche d'information.



**Figure 21.** La composition colorée (bande 5-4-3 pour l'image Landsat 8)

## Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol

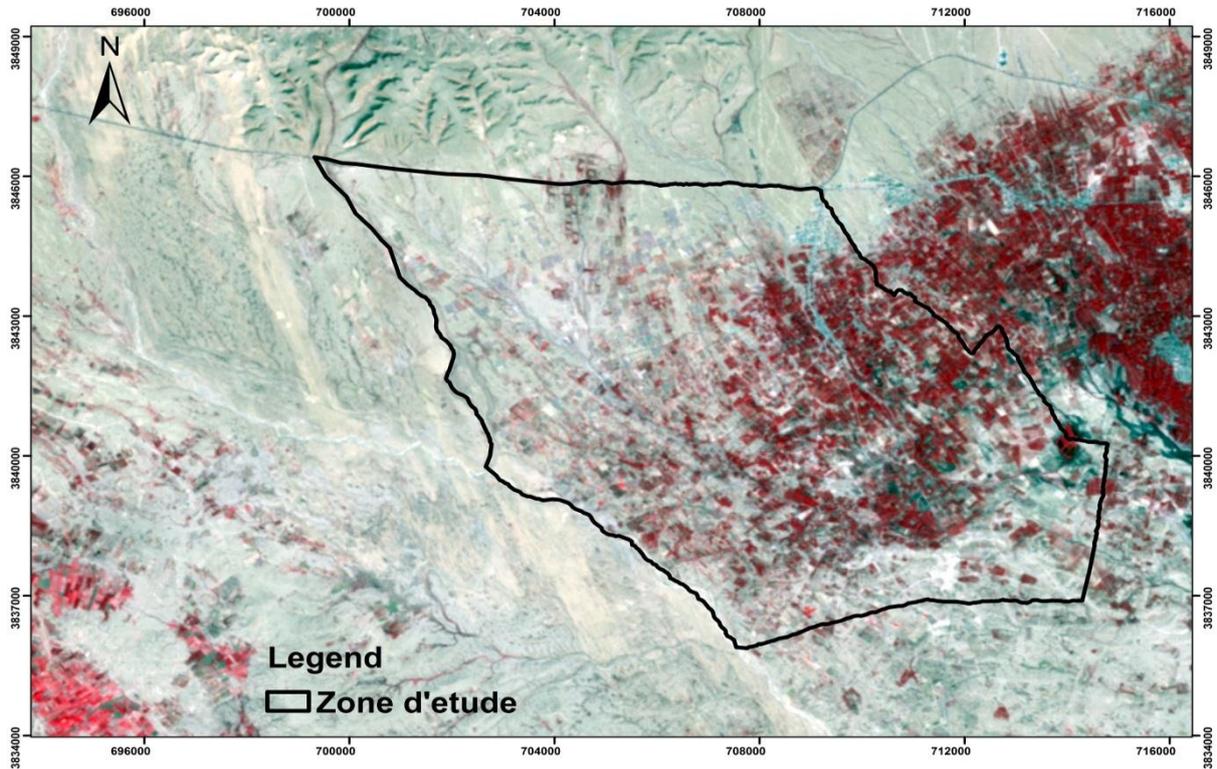


Figure.22 La composition colorée (bande 4-3-2 pour l'image Landsat 5)

### 4.2.3 Réflectance spectrale

La réflectance de la surface a été calculée à partir des données de radiance, qui doivent être corrigées pour tout effet radiométrique et atmosphérique. Les corrections radiométriques et atmosphériques pour les erreurs de capteur ont été effectuées selon le modèle FLAASH sur ENVI 5.3. Ce modèle FLAASH utilise des tables de consultation en cinq dimensions (Staez *et al.*, 2002), à savoir la longueur d'onde, la position des pixels, la vapeur d'eau dans l'atmosphère, l'élévation du sol et la profondeur optique de l'atmosphère.

### 4.2.4 Indices spectraux de la télédétection

Dix indices spectraux ont été générés à partir d'image LANDSAT 8 OLI. Quatre indices de végétation et six indices de salinité des sols, ont été dérivés et examinés sur la base de leur potentiel prédictive de la salinité. En utilisant l'outil d'analyse spatiale, nous avons extrait les valeurs des indices pour chaque point d'échantillonnage. Enfin, toutes les données dérivées ont été comparées aux mesures de la CE du sol sur le terrain pour tenter d'extraire un modèle d'estimation de la CE.

## *Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol*

Les tableaux 21 et 22-dessous décrivent les indices de salinité et les indices végétatifs utilisés dans ce travail :

Tableau 21. Description des indices de salinité utilisés dans ce travail

Indices de salinité	Equation	Référence
IS1	$(G \cdot R)^{1/2}$	(Khan <i>et al.</i> , 2001)
IS2	$2 \cdot G - (R + NIR)$	Douaoui and Lepirnard 2010
IS3	$(R^2 + G^2)^{1/2}$	(Douaoui <i>et al.</i> , 2006)
IS4	$(R - NIR) / (R + NIR)$	(Dehni and Lounis, 2012)
IS5	$R / (100 \cdot B^2)$	(Yahiaoui <i>et al.</i> , 2015)
IS6	$(B1 + B2 + B3) / B7$	(Afrasinei <i>et al.</i> , 2017)

G = bande verte, B = bande bleu, R = bande rouge et NIR = bande proche infrarouge.

Tableau 22. Description des indices de sol et de végétation utilisés dans ce travail

Index	Equation	Référence
NDVI	$(NIR - R) / (NIR + R)$	(Rouse Jr <i>et al.</i> , 1977)
RVI	$NIR / R$	(Pearson and Miller, 1972)
IB	$(G^2 + NIR^2)^{1/2}$	(Yahiaoui <i>et al.</i> , 2015)
IC	$(R - V) / (R + V)$	(Huete <i>et al.</i> , 1994)

NDVI= Indice de végétation par différence normalisée, RVI= Rapport Indice de végétation, IB= indice de brillance et IC= indice de couleur.

### **4.2.5 Analyse statistique**

Une analyse de régression a été utilisée pour établir la relation entre les valeurs mesurées et les indices dérivés des images satellites.

### **4.2.6 Classification par la méthode de machine à vecteurs de support**

Nous avons utilisé une classification supervisée non paramétrique (Machine à vecteurs de support), qui donne des précisions plus élevées que les classificateurs paramétriques en raison de leur capacité à traiter des distributions non normales et des variations intra-classe trouvées dans une variété de données spectrales (Otukei and Blaschke, 2010). La classification SVM a été appliquée dans cette étude pour les deux images (LANDSAT 5 TM et LANDSAT 8 OLI). C'est une méthode récente qui consiste à résoudre le problème de la classification binaire, en plaçant un hyperplan dans l'espace de données comme limite de décision afin que (Vapnik, 1998):

- Cet hyperplan maximise le taux de bonne classification des échantillons d'apprentissage ;

## Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol

- La distance entre le plan et le pixel le plus proche est maximisée.

Les résultats de cette technique de classification sont satisfaisants comme le montre certains auteurs sur leurs applications en télédétection (Roli and Fumera, 2001; Zhang *et al.*, 2001; Huang *et al.*, 2002; Melgani and Bruzzone, 2004; Wang *et al.*, 2017; Qiao and Wan, 2019).

### 4.2.7 Détection du changement

Une détection des changements de l'occupation du sol est l'identification spatiale du changement et de son type dans une période de temps (Yeh and Li, 1997). Les matrices de transition sont des tableaux symétriques composés de classes de la classification initiale de l'année dans un axe et les mêmes classes de l'année à comparer dans l'autre axe (Mendoza *et al.*, 2011). Chaque cellule de la diagonale principale de la matrice contient la surface restée inchangée de chaque classe pendant la période analysée, tandis que les cellules restantes représentent le gain ou la perte de superficie de classe par rapport aux autres classes (Luenberger, 1979).

Dans ce chapitre, la détection des changements est appliquée aux images acquises en 2009 et 2017 dont la matrice croisée bidirectionnelle a été obtenue en appliquant cette technique, et a été utilisée aussi pour décrire les principaux types de changements dans la zone d'étude.

## 4.3. Résultats

### 4.3.1 Évaluation des indices spectraux

Le tableau 23 montre qu'il y a une faible relation entre la CE du sol mesurée et les indices de sol et de végétation, qui indique la faible réponse des indices à la salinité du sol (Fernandez-Buces *et al.*, 2006).

Tableau 23. Corrélation entre les indices spectraux et la conductivité électrique du sol (CE).

Indices	IS1	IS2	IS3	IS4	IS5	IS6	NDVI	RVI	IB	IC
	0.02	0.03	0.03	0.05	0.05	0.11	0.05	0.05	0.04	0.1

### 4.3.2. Classification et cartographie de l'occupation du sol

La disponibilité des informations sur la zone d'étude, la carte d'occupation du sol de Biskra, les images à haute résolution (Google Earth), les sorties sur terrain, les données d'imagerie satellitaire ainsi que la carte de la classification de Afrasineai et ses collaborateurs

#### *Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol*

en (2016) sur la région de Biskra nous ont permis d'établir une classification supervisée. La méthode des " Machine à vecteurs de support " a été utilisée pour effectuer cette classification.

Le SVM est une méthode de classification supervisée dérivée de la théorie de l'apprentissage statistique (Ouerdachi *et al.*, 2012), cette méthode nécessite beaucoup de soin dans le choix des zones d'entraînement (rois), pour qu'elle puisse donner de meilleurs résultats.

L'étape d'évaluation de la pertinence a été faite pour valider la classification. Nous avons comparé les résultats de la classification avec des régions sélectionnées visuellement à partir des images qui étaient différentes de l'ensemble des régions de formation utilisées lors de l'étape de classification. Cette méthode de validation a été utilisée dans diverses études pour évaluer la pertinence de la classification ou de la détection de changements (Lillesand *et al.*, 2000; Azzouzi *et al.*, 2017). Pour l'étape de validation, 1135 pixels aléatoires ont été classés visuellement, couvrant 102,15 ha de données de vérité de terrain (1,08% de la surface totale). L'utilisation des données, mentionnées ci-dessus, que nous avons jugées suffisantes, nous a conduits à déterminer les différentes classes. Chaque classe a été définie par plusieurs zones d'entraînement. L'ensemble de la zone d'étude a été classé en 7 classes par une classification non paramétrique supervisée à l'aide d'un logiciel de traitement d'images ENVI5.3. Les classes sont : végétation dense (palmiers dattiers), végétation moins dense, sol nu, sol salé, nebka (les dunes), cultures maraîchères sous abri et urbaine. La description des classes est indiquée dans le tableau 24.

Les matrices de confusion ont été produites pour les deux images ; LANDSAT 5 TM 2009 et LANDSAT 8 OLI 2017, avec une précision globale respectivement de 97,18 ; 95,87 % et des valeurs Kappa respectivement de 0,95 et 0,92 ; respectivement.

les rapports d'évaluation de la précision exigent une précision de classification globale supérieure à 90 % et des statistiques kappa supérieures à 0,9, ce qui a été obtenu avec succès dans cette étude (Lea and Curtis, 2010).

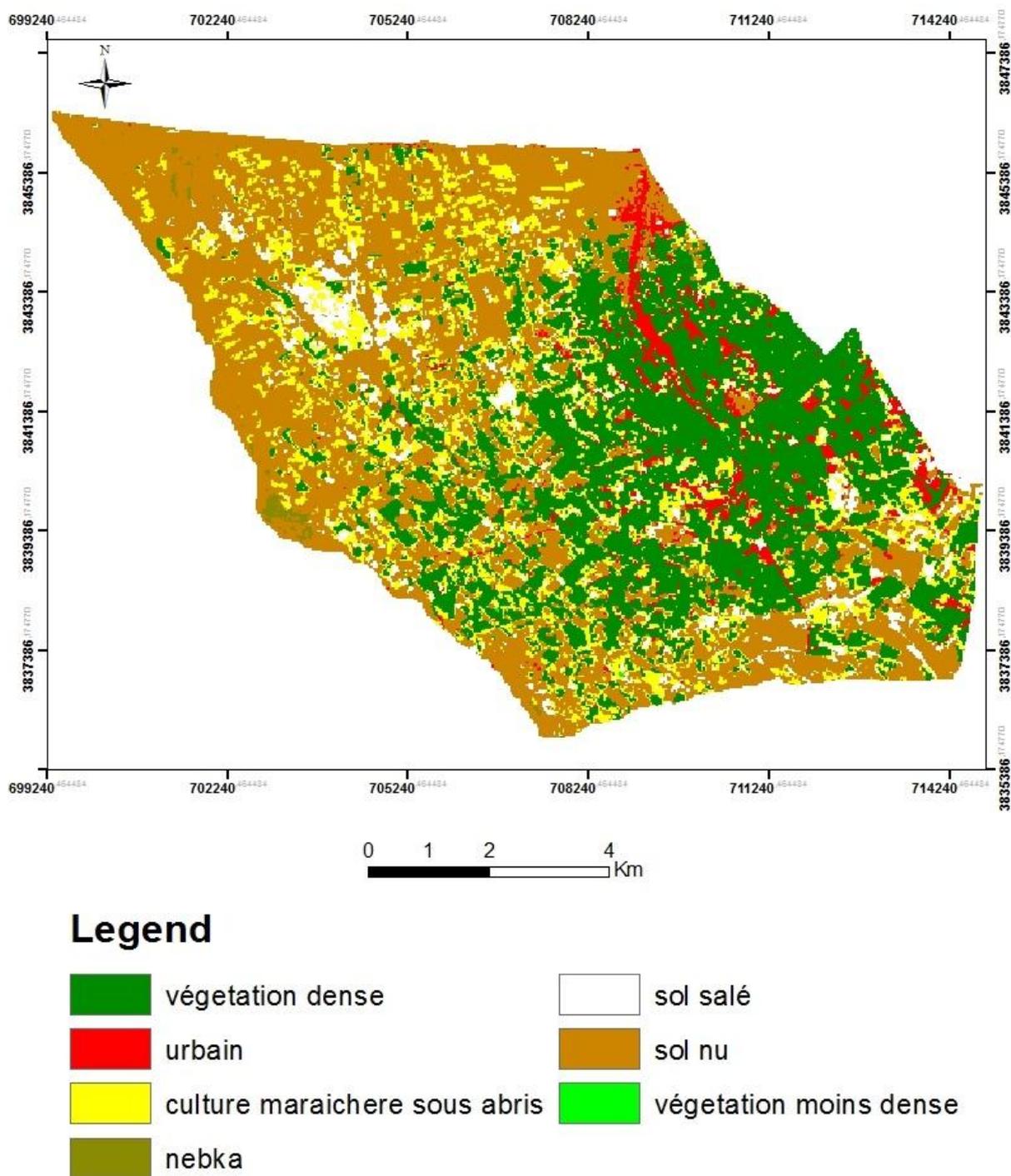
Les deux cartes classées (Figure 23 et 24) ont été obtenues par l'utilisation combinée des deux logiciels ENVI et Arcgis 10.5.

## *Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol*

Tableau 24. Description des classes de la classification.

Classe d'occupation des terres	Description
végétation dense	Vieilles oasis à forte activité chlorophyllienne, rouge foncé dans l'image en fausses couleurs
Végétation modérément dense	Petits palmiers, petits arbres, végétation saisonnière, couleur rouge en fausse couleur
Urbain	Village, routes
Les serres (plasticulture)	Les cultures des légumes sous abri
Sole salé	Blanche dans l'image colorée
Nebka	les dunes

*Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol*



**Figure.23** Carte de l'occupation des sols de 2017 par classification SVM.

## Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol

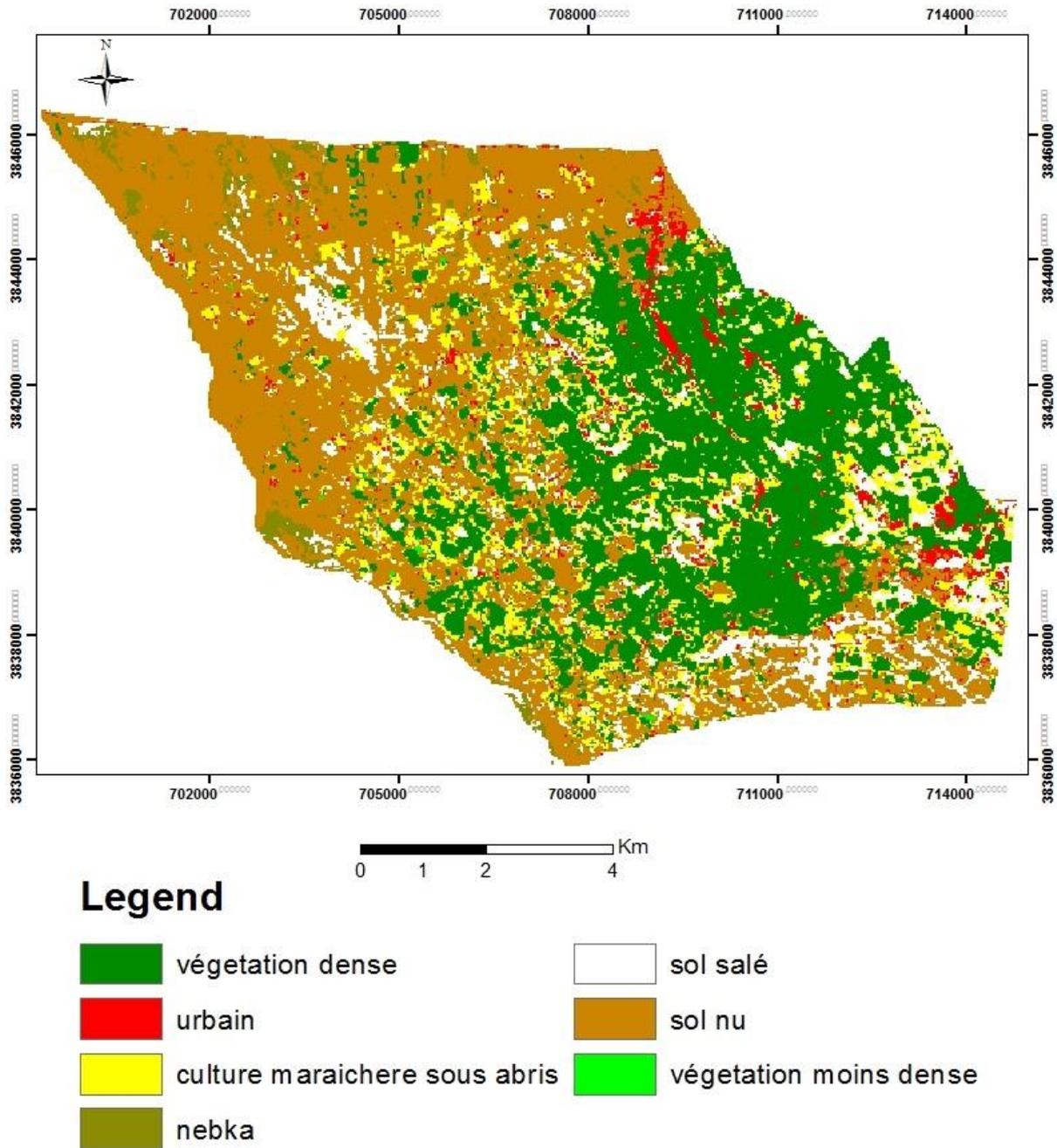


Figure.24 Carte de l'occupation des sols de 2009 par classification SVM.

### 4.3.3 Détection des changements dans l'occupation du sol

La détection des changements est un problème analytique, qui est le plus souvent basé sur une comparaison d'image à image ou par une analyse diachronique (Kharytonov *et al.*, 2018).

Le tableau 25 et la figure 25 extrapolent les résultats de la classification entre 2009 et 2017. Les résultats indiquent une diminution significative de la superficie qui a été observée dans

#### *Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol*

les classes des sols salés et nebka, alors que dans le cas des cultures maraîchères sous abri, végétation dense et de la classe urbaine a montré une augmentation de la superficie.

Les sols salins montrent une réduction de la superficie totale allant de 9,43 % à 5,71 %, tandis que la catégorie nebka (dunes de sable), qui était pratiquement la moins étendue en 2009, a perdu encore plus d'espace et sa couverture est passée de 2,18 % à 0,38 %.

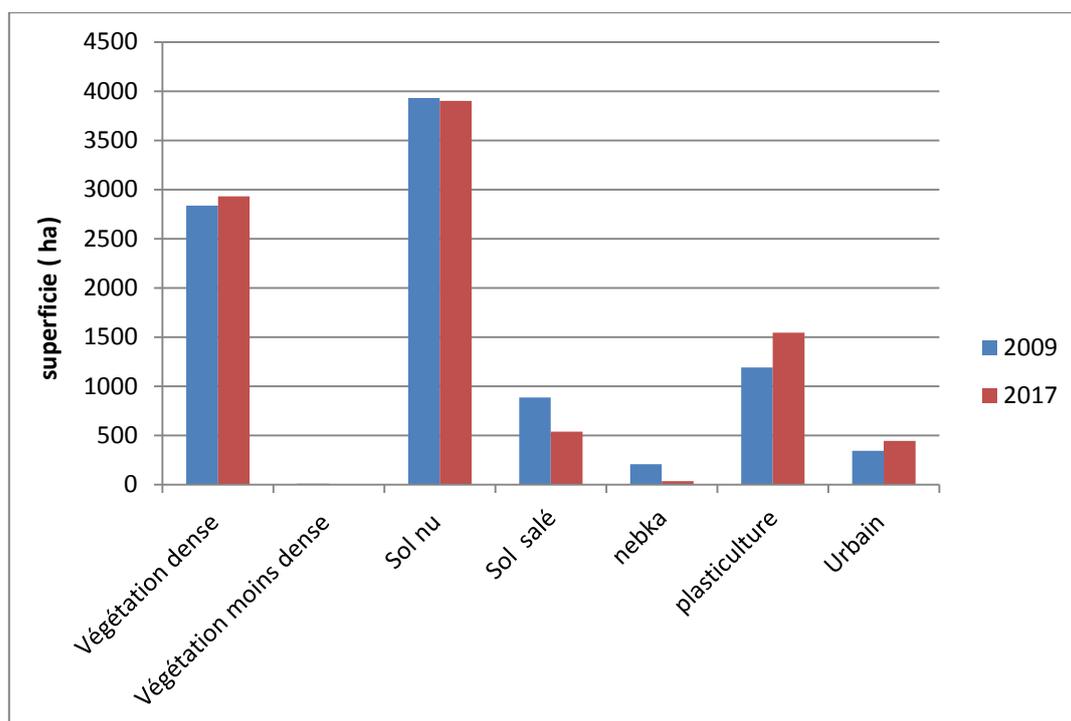
La classe urbaine représentait 3,63 % de la superficie totale et est passée à 4,72% ou 102 ha de plus qu'en 2009. La classe des cultures maraîchères sous abri (plasticulture) est passée de 15,65 % à 16,42 %, soit une augmentation de 354 ha.

La part totale de la végétation dense a augmenté de 30 % en passant à 31,18 %. La superficie occupée par les deux classes, sol nu et culture moins dense, n'a pas connu de changement remarquable ; elle est pratiquement la même sur les images de 2009 et 2017.

Tableau 25. Superficie occupée par chaque classe

Classe	superficie (ha)		% de superficie		Variation	
	2009	2017	2009	2017	ha	%
Végétation Dense	2837.16	2931.21	30.18	31.18	+94.05	+01.00
Végétation moins dense	08.91	06.75	00.09	00.07	-02.16	-00.02
Sol nu	3931.02	3900.51	41.81	41.49	-30.51	-00.32
Sol salé	886.59	537.39	09.43	05.71	-349.20	-03.72
Nebka	205.56	36.23	02.18	00.38	-169.33	-01.80
Plasticulture	1189.26	1544.13	15.65	16.42	+354.87	+00.77
Urbain	341.73	443.97	03.63	04.72	+102.24	+01.09

## *Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol*



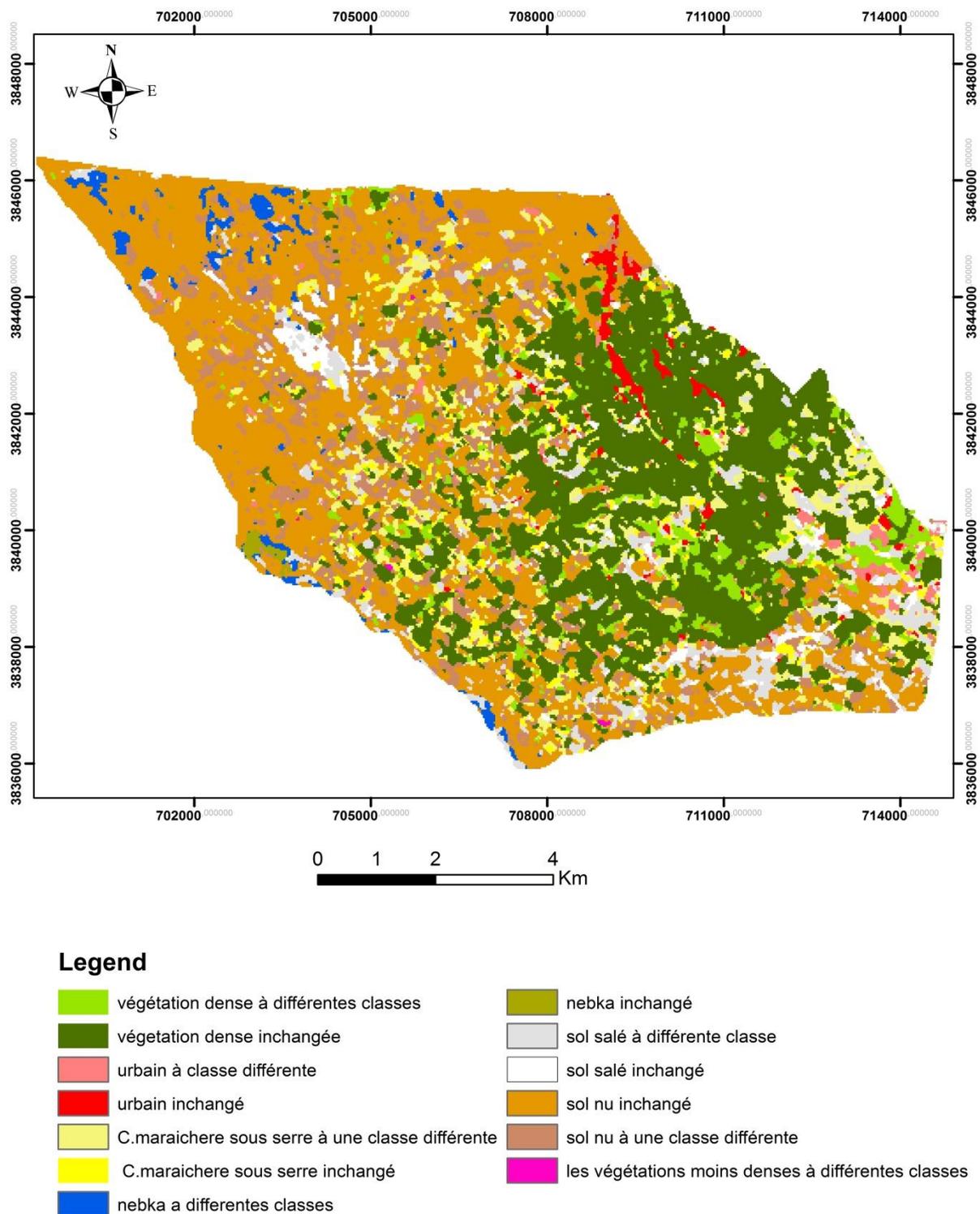
**Figure.25** Présentation graphique de l'évolution de l'utilisation des terres dans la zone d'étude.

La matrice de tableau croisé montre la nature du changement dans les différentes classes de couverture terrestre, afin de produire la carte du changement dans l'occupation de sol dans la période 2009-2017 (Fig.26). Les données statistiques sur la distribution spatiale des différents changements de couverture terrestre sont présentées dans le tableau 26.

Tableau 26. Changement dans l'occupation de sol dans la période 2009-2017 (superficie en ha).

2017 \ 2009	Sol nu	Urbain	V.dense	plasticulture	Sol salé	Nabka	V.moins dense	Total
Sol nu	2854.17	135.18	183.33	290.61	281.25	150.21	05.76	3900.51
Urbain	38.88	114.12	160.20	95.31	35.10	00.36	00.00	443.97
V.dense	145.44	08.73	2251.26	395.28	129.51	00.27	00.72	2931.21
plasticulture	667.26	50.40	220.23	364.41	212.49	27.27	02.07	1544.13
Sol salé	207.27	33.21	20.61	42.75	227.25	06.12	00.18	537.39
V.moins dense	03.78	00.90	01.53	00.90	00.27	00.00	00.18	06.75
Nabka	14.22	00.00	00.00	00.00	00.72	21.33	00.00	36.27
Classe total	3931.02	341.73	2837.16	1189.26	886.59	205.56	08.91	
Change classe	1076.85	227.61	585.90	824.85	659.34	184.23	08.73	
Difference	-30.51	102.24	94.05	354.87	-349.20	-169.29	-02.16	

## Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol



**Figure.26** Conversion majeure de l'utilisation des terres à El Ghrous de 2009 à 2017.

## *Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol*

### **4.4 Discussion**

D'après les résultats présentés dans le Tableau 21, nous constatons que la conductivité électrique mesurée des sols a montré de faibles corrélations avec les indices de sol et de végétation, avec des coefficients de corrélation allant de 0,02 à 0,11, tous ces indices n'étaient pas significatifs et IS1 était le moins prédictif de la salinité du sol à cet endroit.

Nos résultats sont en accord avec ceux obtenus dans l'enquête de Bouaziz et ses collaborateurs dans le Nord-Est du Brésil (Bouaziz *et al.*, 2011), ainsi qu'avec ceux obtenus par Douaoui et Lépinard en (2010) lors de l'enquête dans le Bas-Chéllif, qui ont adopté la même méthode que la nôtre. Notons qu'ils ont aussi obtenu une faible corrélation, qui les a obligés de corréliser les classes issues d'une classification supervisée de la télédétection avec les valeurs moyennes de salinité, ce qui a permis d'améliorer les résultats.

Douaoui et Yahiaoui (2015) ont évalué les indices de salinité dans les sols nus de la plaine d'El Hmadna et ils ont noté une corrélation intéressante qui est égale à 0,86, car la période coïncide avec une couverture végétale très faible (ou inexistante) et l'accumulation de sels est également plus importante et donc plus facilement détectable, ce qui expliquerait les faibles corrélations dans les oasis bien irriguées d'El Ghrous où la salinité a montré une diminution sous l'effet de lessivage dans la couche supérieure par les irrigations, en plus du fait que nos mesures sur le terrain ont été effectuées sur des terres cultivées et irriguées, ce qui rend la salinité difficilement détectable.

La combinaison des données de salinité ponctuelle avec celles de la télédétection n'a pas donné une bonne corrélation. Dans notre cas et dans des conditions similaires, l'estimation de la salinité à partir des données de télédétection est meilleure avec des valeurs de salinité très élevées et supérieures à 10 ds/m et dans les sols nus et non irrigués (Gherina *et al.*, 2008).

Nos résultats ont révélé que les indices de salinité n'étaient pas fiables pour prédire la salinité des sols dans les palmeraies bien irriguées. La corrélation entre les indices et les mesures de salinité dans laboratoire était très faible.

Il n'y a pas d'indice de végétation spécifique ou d'indice de salinité valable pour toutes les régions, les indices changent en fonction de diverses conditions naturelles telles que les types de sol, la couverture végétale et la densité (Gorji *et al.*, 2015).

Les résultats obtenus dans cette première partie de ce chapitre ont été jugés peu concluants pour estimer directement les valeurs de salinité dans les endroits non échantillonnés, ce qui

#### *Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol*

nous a incités à chercher une autre méthode pour détecter les zones affectées par la salinité, en utilisant toujours les données de la télédétection. La classification supervisée a été recommandée pour détecter la salinité, pour le suivi des changements dans l'utilisation des terres et pour surveiller celles qui sont affectées par la salinité entre 2009 et 2017.

La comparaison de superficie pour chaque classe entre 2009 et 2017 a montré qu'il y a eu un changement et une dynamique dans la couverture du sol. Au cours de cette période, la superficie couverte par la classe de plasticulture (protégé sous abri) a augmenté de 30 %. Ce système de culture a connu une dynamique importante depuis son apparition dans la commune d'El Ghrous, depuis l'application de la loi 83-18 "APFA" et le programme de concessions agricoles de développement des terres, la zone a bénéficié de deux grands projets de développement dans le cadre de la concession de l'Etat et de quatre périmètres d'APFA.

Dans les nouveaux périmètres, le système de production exclusivement plasticulture est dominant. Le système maraicher sous serres a connu un déploiement très rapide ces dernières années. Les surfaces de plasticulture sont passées de 1189,26 hectares en 2009 à 1544,13 hectares en 2017, soit une augmentation de 30% en 8 ans, avec 44 hectares de plus par an en moyenne au cours des 8 dernières années. L'extension de la plasticulture dans les différents territoires de la commune s'est faite selon une chronologie déterminée principalement par la création de nouveaux sous périmètres agricoles par les pouvoirs publics. La deuxième classe qui a connu une augmentation de la superficie est celle de la végétation dense mais avec un léger changement (+ 1%), sa superficie est passée de 2837,16 ha en 2009 à 2931,21 ha en 2017, soit une augmentation de 94 ha par rapport à 2009. Selon Kebibech et Daoudi (2013), l'extension du palmier-dattier se fait dans toutes les nouvelles zones de développement, mais à des degrés différents. On assiste donc à une plantation préalable et partielle du palmier-dattier suivie par l'installation de serres et de quelques surfaces consacrées à la plasticulture qui ont été converties à la culture du palmier-dattier grâce à sa résistance à la salinité du sol.

Les résultats de l'analyse de l'occupation des sols ont confirmé l'augmentation de la superficie de la classe urbaine de 341,73 ha à 443,97 en 2017, en raison de la migration vers cette zone qui a connu un développement économique à travers son marché de gros de légumes et de fruits et son agriculture, cette zone attire des agriculteurs de toute l'Algérie.

#### *Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol*

En 2009, la superficie occupée par les terres salées représentait environ (9,43 %) de la superficie totale, alors qu'en 2017, nous avons constaté qu'environ 5,71 % de la superficie totale est maintenant salée, soit une diminution de 349 hectares par rapport à 2009. Nous avons également enregistré une très légère diminution de la superficie de sol nu ; ce changement dans les deux classes s'explique par les nombreux aménagements hydro-agricoles qui ont été réalisés et le développement des terres agricoles au niveau de la zone d'El Ghrous. Sur une superficie de 2837,16 ha de végétation dense en 2009, seulement 2251,26 ha restent inchangés en 2017, mais 183,33 ha ont été convertis en sol nu en raison du faible rendement dans les nouveaux périmètres qui n'ont pas un micro climat comme celui des anciennes oasis et aussi par une régénération du palmier-dattier. Le reste est reconverti en serre et en zone urbaine.

En même temps, l'augmentation de la superficie de la plasticulture de 2009 à 2017 a été de 355 ha (1544 ha en 2017). Cette surface supplémentaire provient principalement de la superficie perdue par les classes des sols salés, végétation dense et de nebka. Toutefois, cette classe n'a conservé que 30% de sa propre superficie de 2009, ce qui s'explique par la dynamique très remarquable de cette classe dans l'espace au fil du temps. Cette dynamique est due à la baisse de la fertilité des sols, voire la dégradation causée par l'utilisation accrue d'eau d'irrigation saline et les fertilisants, qui pousse les agriculteurs à se déplacer vers d'autres endroits pour une meilleure production.

Le sol salin sur 886,59 ha en 2009 a perdu une partie de sa surface principalement pour les classes des sols nus, plasticulture et la végétation dense (implantation de palmiers), et a conservé 227,25 ha de sa propre surface ; sa superficie en 2017 est 573 ha. Cette diminution est très remarquable grâce aux développements hydro-agricoles et au programme de réhabilitation des terres tels que mentionnés ci-dessus. Cinq pour cent (5 %) de la classe des sols nus en 2009 ont été convertis en sols salins en 2017, indiquant une dégradation de 207,27 ha. Cette dernière étant due aux conditions climatiques et à la mauvaise gestion des sols.

Cette technique montre l'importance d'intégrer la télédétection et le SIG pour la détection des changements de la couverture terrestre qui expliquent les informations essentielles sur la nature et la distribution spatiale des changements.

## *Chapitre 4: Application de la télédétection pour le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol*

### **4.5 Conclusion**

Notre travail dans ce chapitre a consisté à évaluer la corrélation entre les différents indices spectraux et les données de terrain de la conductivité électrique afin de prédire la salinité du sol, et pour détecter les changements dans l'occupation du sol dans la région d'El Ghrous.

Les résultats obtenus montrent que les indices de salinité extraits de l'image LANDSAT 8 OLI dans les oasis d'El Ghrous n'étaient pas prometteurs pour la prédiction de la salinité du sol et les corrélations entre des indices de salinité et les données de terrain étaient très faibles. Ces indices pourraient être utiles dans d'autres régions et dans les cas de salinité plus élevée et pendant la période estivale.

Les résultats obtenus par la classification, la détection et la cartographie de l'état des types de couverture des sols dont font partie les sols salés, et de leurs changements dans le périmètre irrigué d'El Ghrous entre 2009 et 2017, ont montré que la zone d'étude comprend différentes unités de couverture des sols, à savoir les sols salés, les oasis de palmiers dattiers, les sols nus, les zones urbaines, les dunes de sable et les cultures maraîchères sous abri.

La détection de changements dans notre zone d'étude explique l'augmentation rapide et l'extension très remarquable de la plasticulture due à l'aménagement des terres agricoles et des ressources en eau actuellement facilement mobilisables, qui facilite la production de cultures maraîchères. Ainsi, la commune d'El Ghrous est devenue un pôle agricole et économique grâce à son marché de gros de légumes et de fruits, qui attire des agriculteurs venant de toutes les régions du pays.

La superficie occupée par les sols salés a diminué en raison de l'aménagement hydro-agricole. Grâce aux technologies modernes telles que la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG), la surveillance des sols et les changements dans l'utilisation des terres ainsi que leur dynamique sont tout à fait contrôlables et gérables pour une meilleure gestion des ressources naturelles.

# Chapitre 5

## Caractérisation géochimique des sols

## Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols

### 5.1 Introduction

Dans les zones arides, les eaux soumises à une forte évaporation ont tendance à se concentrer, et les sols à se saliniser (Nezli *et al.*, 2007). Une salinisation très importante, accompagnée parfois d'une alcalinisation des sols, nuit à la mise en valeur agricole des zones cultivables. En Algérie, le développement récent de l'agriculture au Sahara est totalement dépendant des ressources en eau souterraine pompées (Kuper *et al.*, 2016). La communauté scientifique devrait leur fournir des informations cohérentes pour comprendre les systèmes des eaux des nappes, afin de mieux quantifier ces problèmes. En effet, sans un certain niveau approprié de connaissances, le problème lié à la qualité des eaux sera inquiétant du point de vue agronomique (Bradai, 2017).

Les effets des eaux d'irrigation sur les propriétés des sols ont été largement discutés dans la littérature (Douaoui *et al.*, 2006; Boufekane and Saighi, 2016; Bradai, 2017; Semar *et al.*, 2019). Semar et ses collaborateurs dans leur travail publié en 2019 sur l'effet des irrigations sur la qualité de sol ont montré qu'il y a un échange très important entre les deux horizons de sol, impliquant principalement le sodium, les chlorures et les sulfates. Par ailleurs, dans une autre étude menée par Boufekane et Saighi (2016) sur la qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation dans la wilaya de Jijel, la cartographie des zones à risque, par l'application de la géostatistique, a montré l'existence de zones de moindre qualité et une dégradation par pollution. Une autre étude faite à Biskra a montré que la CE et le taux d'adsorption du sodium (SAR) ont un risque élevé à très élevé de salinité et un risque moyen à élevé d'alcalinité pour les sols irrigués (Boudibi *et al.*, 2019).

La composition chimique d'une solution du sol dépend de trois principaux facteurs: la dissolution des minéraux primaires, l'évolution ou la dilution de la solution et la néoformation de minéraux secondaires par précipitation lors d'une évaporation (Zouggari, 1996). De ce fait, si une eau est mise en contact avec des minéraux du sol, nombreuses réactions chimiques se produisent tant à l'intérieur de la phase aqueuse qu'entre la solution du sol et les minéraux (Bradai and Douaoui, 2013; Bradai, 2017). Les processus de précipitation-dissolution des minéraux auront lieu lorsque la solution se concentre par évaporation. Au cours de cette concentration, des minéraux peuvent précipiter ou se dissoudre provoquant ainsi une modification de la composition chimique de la solution. Dans la plupart des cas, les minéraux les plus susceptibles de se former sont la calcite, les minéraux magnésiens et le gypse,

## *Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols*

contribuant au contrôle de l'alcalinité, des sulfates, du calcium, et du magnésium (Al-Droubi, 1976). L'évolution de ces éléments conditionne la nature de la voie géochimique, la voie saline neutre ou la voie alcaline de la salinisation (Cheverry, 1974).

Les critères de la qualité d'une solution sont en général la conductivité électrique (CE) et le pourcentage de sodium adsorbé (SAR). Mais ces deux paramètres sont de moins en moins utilisés car les spécialistes préfèrent actuellement le concept d'alcalinité résiduelle qui permet de prévoir l'évolution géochimique des solutions durant leur concentration par évaporation et estimer le sens de l'évolution, soit vers une voie saline neutre ou vers une voie alcaline (Debieche, 2002; Djamaï, 2007). Cependant, la prédiction de l'aspect géochimique de la salinité de sols est une démarche nécessaire, qui pourrait s'avérer fructueuse pour une meilleure connaissance des conséquences de cette salinité sur la qualité des sols et sur l'environnement.

A Biskra, en plus de la pluviométrie qui est rare durant toute l'année, les agriculteurs utilisent les eaux souterraines qui sont généralement riches en sel, pour assurer les besoin en eau d'irrigation pour les cultures. La qualité de ces eaux n'est pas toujours bonne comme une qualité recommandée, ce qui peut poser des problèmes pour la gestion de la qualité des eaux et des sols. Dans ce chapitre nous avons appliqué trois aspects ; les aspects statistiques, géochimiques et une modélisation de la salinité en fonction des éléments chimiques dominants, et responsables de l'augmentation de la charge saline dans la solution des sols, afin de comprendre et expliquer l'évolution géochimique des sols irrigués d'El Ghrous.

### **5. 2. Matériel et méthodes**

#### **5.2.1. Échantillonnage du sol et analyse au laboratoire**

Nous avons choisi 41 échantillons parmi les 190 points de sols utilisés dans le chapitre 3. Ce choix a été fait de manière semi-aléatoire, en choisissant des points qui représentent les différentes classes de salinité pour avoir des échantillons représentatifs de toute la zone d'étude (Fig. 27). Les échantillons de sol ont été prélevés à deux profondeurs de 0 à 15 cm et de 15 à 35 cm, là où l'accumulation de sel est la plus importante. Ensuite, les 82 échantillons ont été amenés au laboratoire dans des sacs en plastique où ils ont été séchés à l'air libre et tamisés à 2 mm. Les analyses ont été effectuées au laboratoire de science du sol du Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA) de Biskra selon des procédures standard (Rodier *et al.*, 2009).

## *Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols*

Le pH du sol a été mesuré dans un sol en solution : eau : sol 1:2,5. Les cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ) et les anions ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) ont été extraits d'une solution 1:5 (sol : eau) afin de comprendre l'équilibre ionique. Différentes méthodes de titrage ont été utilisées pour déterminer les concentrations de  $\text{Ca}^{2+}$  et de  $\text{Mg}^{2+}$  (titrimétrique par EDTA), de  $\text{Cl}^-$  (Mohr) et de  $\text{HCO}_3^-$  (complexométrique). Le photomètre à flamme (modèle Jenway) a été utilisé pour la quantification du  $\text{Na}^+$  et du  $\text{K}^+$ . La caractéristique physique du sol (texture sableuse dominante) ne nous a pas permis de déterminer facilement le p<sub>h</sub> saturée des échantillons de sol, en raison des difficultés rencontrées pour identifier les critères de saturation de la p<sub>h</sub> pour une texture sableuse (He *et al.*, 2015; Semar *et al.*, 2019). De plus, le rapport 1:5 a l'avantage de la simplicité, réduisant le temps et le coût par rapport aux extraits de p<sub>h</sub> de saturation (Franzen, 2007).

## Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols

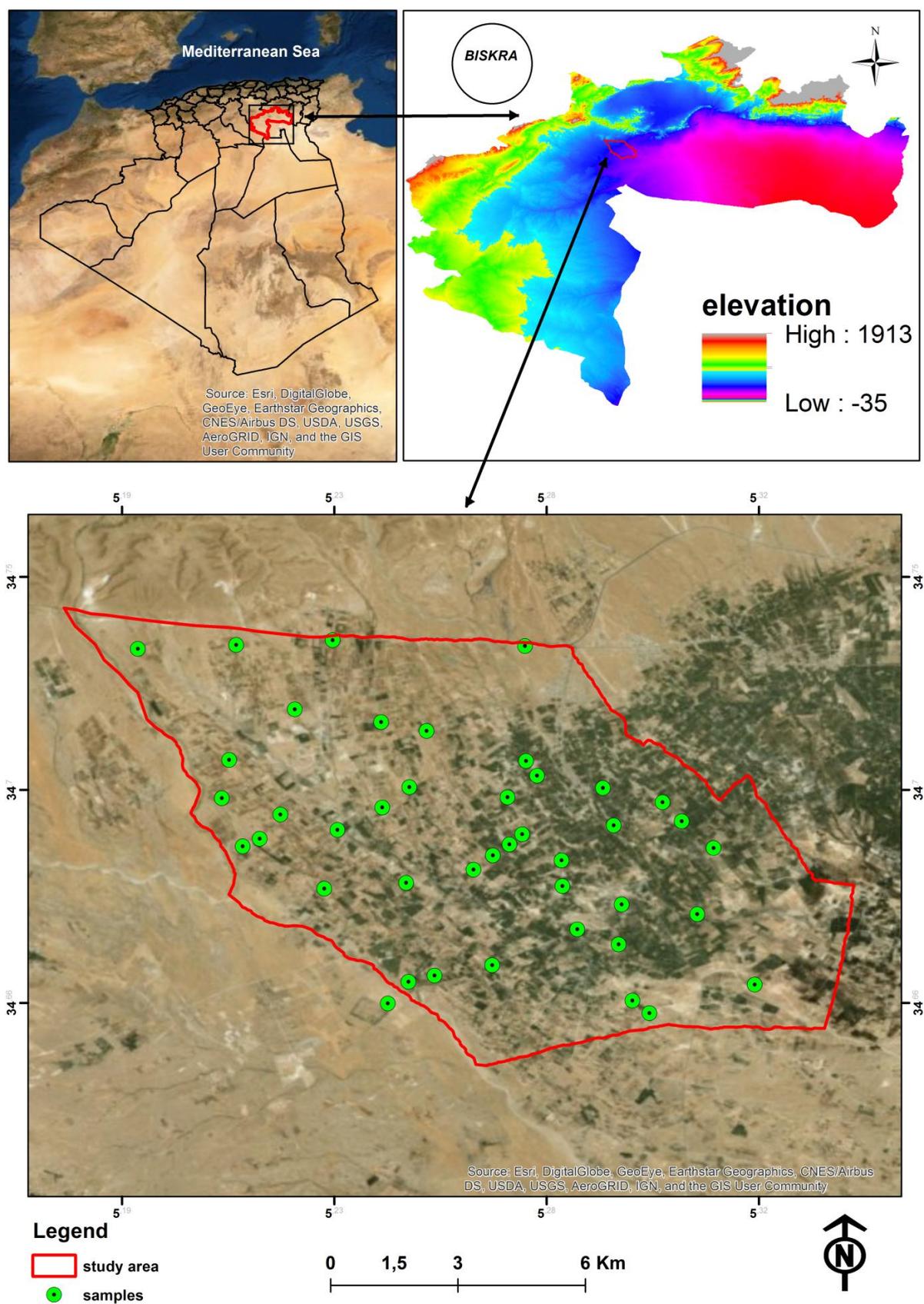


Figure 27. Répartition des échantillons utilisés pour la caractérisation géochimique.

## Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols

### 5.2.2 Qualité des eaux utilisées en irrigation et fertilisation

L'irrigation des terres agricoles dans la zone d'étude est assurée par les eaux souterraines. L'eau d'irrigation salée joue un rôle néfaste dans les milieux arides, où l'évaporation est importante, en accumulant des sels solubles dans le sol. Les eaux souterraines de la région d'El Ghrous ont une très forte salinité qui est même inutilisable pour l'irrigation puisque la plupart des forages dépassent la norme prescrite par la FAO (3 dS/m), et le Total des Solides Dissous (TDS) varie de 820 à 5000 mg/l. Les faciès de l'eau dans la région varient d'un niveau d'aquifère à l'autre. Il s'agit du sulfate de calcium pour la nappe phréatique du Mio-pliocène. Les deux faciès dominants sont le faciès sulfate de calcium et le faciès sulfate de sodium pour l'Éocène inférieur (Drouiche *et al.*, 2013). Dans la région d'El Ghrous, deux techniques d'irrigation principales sont utilisées : L'irrigation par submersion pour la culture des palmiers dattiers dans les oasis et l'irrigation localisée ou au goutte-à-goutte pour les cultures maraîchères sous serres dans le nord de la région.

L'intensification de l'agriculture s'est accompagnée d'une importante application d'intrants agrochimiques qui constitue une source potentielle de contamination des sols et des eaux souterraines. Selon l'étude réalisée par Drouiche *et al.* (2013) sur la région d'El Ghrous, les fortes doses appliquées lors de la fertilisation dépassent largement ce qui est recommandé et que seulement environ 50% des engrais appliqués sont absorbés par les cultures.

### 5.2.3 Caractérisation géochimique de la solution du sol

La modélisation géochimique des solutions des sols a été réalisée en utilisant logiciel PHREEQC version 2.8. L'indice minéral de saturation (anhydrite, aragonite, calcite, dolomite, gypse et halite) a été examiné en calculant l'indice de saturation (IS), qui s'exprime comme suit (Parkhurst and Appelo, 2005) :

$$IS = \log (IAP/K_s) \dots \dots \dots (1)$$

Où IAP est le produit de l'activité ionique, et  $K_s$  est la constante de solubilité du minéral. Si l'eau souterraine est saturée par une espèce minérale particulière, alors  $IS = 0$  (état d'équilibre) ; tandis que  $IS > 0$  indique une sursaturation par rapport à l'espèce minérale (état de précipitation), et  $IS < 0$  indique une sous-saturation ; état de dissolution (Parkhurst and Appelo, 2005).

## Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols

L'identification des processus géochimique passe par la détermination d'un indicateur de facteur de concentration (traceur), et de voir si l'augmentation par concentration est seule responsable des variations chimiques observées (Valles, 1987; Bradai and Douaoui, 2013). Comme les chlorures ne sont pas dégradés dans l'environnement, et ont tendance à rester en solution une fois dissous, le facteur de concentration est un bon indicateur des échanges entre les horizons du sous-sol (Semar *et al.*, 2019).

Un facteur de concentration de la solution du sol (FC) est définie par :

$$FC (meq/l) = \frac{\text{Concentration actuelle des chlorures}}{\text{La concentration minimale de chlorures dans tous les échantillons}} \dots\dots\dots (2)$$

L'alcalinité a été déterminée à partir de trois paramètres : l'alcalinité résiduelle de la calcite (ARc), l'alcalinité résiduelle généralisée (ARg) (Marlet et Job 2006) et, le taux d'adsorption du sodium (SAR) (Richards 1954).

L'alcalinité résiduelle calcite (ARc) d'une solution est définie comme étant la différence entre l'alcalinité carbonatée et la quantité de calcium (Djamai, 2007) ;

$$\text{Alcalinité résiduelle calcite} = \text{alcalinité carbonatée} - \text{Ca}^{2+} \dots\dots\dots(3)$$

En effet lorsqu'une solution se concentre et atteint le point de saturation avec la calcite, il y a deux évolutions possibles :

- Si quantité de  $\text{Ca}^{2+} >$  alcalinité carbonatée ;  $\text{ARc} < 0$  ; c'est la voie saline neutre.
- Si quantité de  $\text{Ca}^{2+} <$  alcalinité carbonatée ;  $\text{ARc} > 0$  ; c'est la voie alcaline.

Le concept de ARc a été étendu par la suite à la précipitation successive de plusieurs minéraux à la fois, ce qu'on appelle alcalinité résiduelle généralisée (ARg) ; évolution de l'alcalinité résiduelle (calcite + dolomite + gypse).

En fin, pour mieux identifier les facies chimiques et avoir une indication sur l'aspect qualitatif des sols irrigués, la représentation graphique des résultats d'analyse s'avère être un outil précieux. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours au diagramme de Piper et celui de Riverside. Le diagramme de Piper a la particularité de représenter plusieurs échantillons sur le même plan. Il est composé de deux triangles, permettant de déterminer les facies

## Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols

cationiques et anioniques. Le faciès global est obtenu par l'intersection sur un losange synthétisant le faciès chimique d'échantillonnage considéré.

### 5.2.4 Analyse des données

L'analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée afin de réduire le nombre de variables dans certaines composantes explicatives (Philippeau and Philippeau, 1986). L'état de saturation des échantillons de sol a été analysé en utilisant le modèle d'équilibre hydrogéochimique PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 2005).

La corrélation et différents types de régression ont été utilisés afin d'obtenir des équations fiables pour déterminer les valeurs de la conductivité électrique (CE). La performance de prédiction de ces équations a été validée par une validation croisée comparant les valeurs mesurées et les valeurs estimées par les modèles. Le coefficient de corrélation (proche de 1), l'erreur moyenne (proche de 0) et RMSE (aussi faible que possible) ont été utilisés comme indicateurs de validation (Fourati *et al.*, 2017). Ces valeurs validées de la CE ont été cartographiées par des méthodes d'interpolation intégrées dans ArcGIS, telles que la pondération inverse des distances (IDW), car elle suppose que les points proches ont des valeurs plus similaires que les autres (ESRI, 2011).

L'analyse statistique a été effectuée à l'aide de logiciel SPSS v.18.0 (ACP), Diagrams v.6.51 pour les diagrammes Piper et Riverside), PHREEQC v.2.8 pour les indices de saturation) et ArcGIS 10.5 avec Geostatistical Analyst Extension pour l'interpolation.

## 5.3 Résultats

### 5.3.1 Caractérisation des sols

Le tableau 27 indique les valeurs de certaines propriétés du sol pour chaque profondeur. Les sols sont légèrement alcalins ( $\text{pH} > 7,7$ ) avec une valeur moyenne de pH de 8,1 dans les deux profondeurs, allant de 7,7 à 8,9 et de 7,7 à 8,7 pour 0-15 cm et 15-35 cm, respectivement. En ce qui concerne la conductivité électrique (CE), différentes valeurs ont été observées à chaque horizon. Dans la couche arable (0-15 cm), la CE variait de 0,5 à 6,5  $\text{dS m}^{-1}$  (valeur moyenne : 1,9  $\text{dS m}^{-1}$ , CV : 47,4%). Dans la profondeur (15 à 35 cm), CE variait de 0,1 à 3,7  $\text{dS m}^{-1}$  (valeur moyenne : 1,2  $\text{dS m}^{-1}$ , CV : 38,6%).

Les valeurs moyennes de concentration des principaux cations et anions ont suivi ces séquences (de la plus élevée à la plus faible) :  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  (cations) et  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$

## *Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols*

$\text{HCO}_3^-$  (anions). Le  $\text{Ca}^{2+}$  était le cation dominant variant de 8,0 à 76,0 meq  $\text{l}^{-1}$  (valeur moyenne : 32,2 meq  $\text{l}^{-1}$ ) pour 0-15 cm et de 3,2 à 55,0 meq  $\text{l}^{-1}$  (valeur moyenne : 26,8 meq  $\text{l}^{-1}$ ) pour 15-35 cm. Le  $\text{Na}^+$  varie de 1,1 à 36,0 meq  $\text{l}^{-1}$  avec une valeur moyenne de 10,8 meq  $\text{l}^{-1}$  dans la couche arable (0-15 cm) et de 0,2 à 26,0 meq  $\text{l}^{-1}$  (valeur moyenne : 5,0 meq  $\text{l}^{-1}$ ) pour 15 à 35 cm de profondeur.

$\text{SO}_4^{2-}$  varie de 2,8 à 50,0 meq  $\text{l}^{-1}$  dans la couche arable (moyenne : 14,0 meq  $\text{l}^{-1}$ ) et de 1,8 meq  $\text{l}^{-1}$  à 30,0 meq  $\text{l}^{-1}$  dans le sous-sol (moyenne : 12,0 meq  $\text{l}^{-1}$ ).  $\text{Cl}^-$  varie entre 1,2 et 19,0 meq  $\text{l}^{-1}$  (valeur moyenne : 6,5 meq  $\text{l}^{-1}$ ) et entre 1,2 et 13,0 meq  $\text{l}^{-1}$  (4,5 meq  $\text{l}^{-1}$ ) dans les deux couches, respectivement. Les concentrations de  $\text{HCO}_3^-$  étaient relativement faibles, allant de 0 à 12,0 meq  $\text{l}^{-1}$ , avec des valeurs moyennes de 2,5 meq  $\text{l}^{-1}$  et 1,7 meq  $\text{l}^{-1}$  dans les deux horizons, respectivement.

Les valeurs ont également montré une grande variabilité (exprimée par leurs coefficients de variation élevés) dans la teneur en anions ainsi qu'en cations (tab. 27).

## *Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols*

Tableau 27. Statistiques descriptives des principaux paramètres analysés.

Paramètre	Profondeur (cm)	Min	Max	Moy	E.type	CV
Ca <sup>2+</sup> (meq l <sup>-1</sup> )	0–15	8.0	76.9	32.2	14.4	41.6
	15–35	3.2	55.3	26.8	8.3	31.1
Mg <sup>2+</sup> (meq l <sup>-1</sup> )	0–15	0.7	25.4	9.1	5.1	56.3
	15–35	0.4	19.4	5.3	3.4	64.4
Na <sup>+</sup> (meq l <sup>-1</sup> )	0–15	1.1	36.3	10.8	6.5	60.5
	15–35	0.2	26.4	5.2	3.8	73.0
K <sup>+</sup> (meq l <sup>-1</sup> )	0–15	0.0	2.7	0.5	0.5	87.0
	15–35	0.0	11.7	0.6	0.7	95.0
Cl <sup>-</sup> (meq l <sup>-1</sup> )	0–15	1.2	19.3	6.5	3.0	45.6
	15–35	1.2	13.0	4.5	2.6	49.5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (meq l <sup>-1</sup> )	0–15	2.8	50.5	14.0	6.7	47.5
	15–35	1.8	30.0	12.4	6.8	55.0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq l <sup>-1</sup> )	0–15	0.8	11.5	2.5	1.3	50.0
	15–35	0.0	9.0	1.7	0.9	53.2
pH	0–15	7.7	8.9	8.1	0.2	2.7
	15–35	7.7	8.7	8.1	0.2	2.5
EC (dS m <sup>-1</sup> )	0–15	0.5	6.5	1.9	0.9	47.4
	15–35	0.1	3.7	1.1	0.4	38.6
SAR	0–15	0.2	6.0	4.0	0.8	50.0
	15–35	0.3	8.0	3.6	0.8	75.0

### **5.3.2 Analyse multivariée des propriétés de la couche de surface (0-15 cm)**

Le tableau 28 montre le coefficient de corrélation de Pearson entre les 11 paramètres déterminés dans cette étude. La conductivité électrique, c'est-à-dire la salinité, était significativement bien corrélée ( $p < 0,05$ ) avec la teneur en calcium ( $r=0,69$ ) et en sulfate ( $r=0,74$ ).

## *Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols*

D'autres paramètres présentant des coefficients de corrélation élevés entre eux étaient le sodium, à la fois avec le magnésium ( $r=0,50$ ) et le calcium ( $r=0,63$ ). En revanche, d'autres paramètres tels que le bicarbonate et le potassium présentaient de faibles valeurs de corrélation avec presque toutes les variables.

Tableau 28. Coefficients de corrélation (r de Pearson) entre les 11 paramètres.

	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>EC</b>	<b>SAR</b>
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0.40									
<b>Na<sup>+</sup></b>	0.63	0.50								
<b>K<sup>+</sup></b>	0.23	0.25	0.16							
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	0.34	0.10	0.14	0.05						
<b>Cl<sup>-</sup></b>	0.51	0.29	0.30	0.07	0.17					
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0.42	0.40	0.45	0.15	0.07	0.13				
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0.30	0.07	0.03	0.22	0.47	0.20	0.07			
<b>EC</b>	0.69	0.34	0.47	0.11	0.74	0.44	0.36	0.49		
<b>SAR</b>	0.31	0.31	0.91	0.04	0.02	0.10	0.33	-0.07	0.24	
<b>pH</b>	0.22	0.35	0.35	0.16	0.27	0.02	0.09	-0.06	0.29	0.31

Le tableau 29 indique le degré de contribution de chacun des paramètres par rapport aux 4 composantes sélectionnées (critère de sélection : valeur propre >1,0). Elles expliquent 72,9% de la variance totale. La première composante (PC1) explique 36,2 % de la variance totale et des corrélations négatives avec toutes les variables. Les valeurs les plus élevées ont été trouvées pour la CE, le Ca<sup>2+</sup>, le Na<sup>+</sup> et le Cl<sup>-</sup>. On peut donc considérer que cette composante explique les processus de salinisation avec un faible risque de sodisation comme le montre la corrélation faible avec le SAR. Le PC2 décrit 17,0% de la variabilité des données. Le nitrate et le sulfate ont montré les corrélations les plus élevées et sont de même signe. Par conséquent, il pourrait être cohérent de mentionner que cette composante expliquerait la pollution nitratée accompagnée d'une présence sulfatée pouvant être d'ordre minérale ou anthropique. La troisième composante suggère une explication de l'alcalinisation comme le montrent sa corrélation élevée avec le pH). La quatrième composante qui bien corrélée uniquement au potassium est expliquée par les activités anthropiques qui sont liées à la fertilisation des sols.

## *Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols*

Tableau 29. Corrélation des paramètres pour chaque composante principale. Profondeur : 0-15 cm.

	PC1	PC2	PC3	PC4
Ca <sup>2+</sup>	-0.82	-0.11	-0.21	0.10
Mg <sup>2+</sup>	-0.63	0.25	-0.14	-0.28
Na <sup>+</sup>	-0.82	0.47	0.04	0.15
K <sup>+</sup>	-0.30	-0.05	-0.28	-0.82
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.50	-0.63	0.46	0.05
Cl <sup>-</sup>	-0.51	-0.21	-0.43	0.29
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.56	0.24	-0.31	0.00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.36	-0.69	-0.09	-0.11
EC	-0.82	-0.43	0.14	0.14
SAR	-0.59	0.61	0.19	0.20
pH	-0.44	0.21	0.64	-0.34
Valeur propre	3.98	1.87	1.10	1.03
Variance (%)	36.20	16.97	10.03	9.69
Cumulative (%)	36.20	53.17	63.20	72.89

### **5.3.3 Analyse multivariée des propriétés du sous-sol (15-35 cm)**

Les coefficients de corrélation entre les paramètres dans les échantillons de sous-sol (15-35 cm) sont indiqués dans le tableau 30. Les corrélations les plus élevées ont été constatées entre le sodium et le SAR ( $r=0,92$ ) et entre la CE et le sulfate ( $r=0,75$ ). D'autres valeurs intéressantes ont été trouvées entre le potassium et le nitrate ( $r=0,57$ ) et entre la CE et le chlorure ( $r=0,53$ ). Enfin, le bicarbonate présentait de faibles corrélations avec les autres paramètres. La corrélation élevée entre le Na et le SAR témoignent d'un risque élevé de sodicité à cette profondeur.

## *Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols*

Tableau 30. Coefficients de corrélation (r de Pearson) entre les 11 paramètres. Profondeur: 15-35 cm.

	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>EC</b>	<b>SAR</b>
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0.14									
<b>Na<sup>+</sup></b>	0.08	0.13								
<b>K<sup>+</sup></b>	0.19	0.27	0.43							
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	0.22	-0.01	-0.36	-0.14						
<b>Cl<sup>-</sup></b>	0.36	0.01	-0.17	-0.01	0.36					
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0.10	-0.03	0.12	-0.09	-0.13	-0.17				
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0.25	0.06	0.27	0.57	0.09	0.14	0.18			
<b>EC</b>	0.30	0.03	-0.36	-0.06	0.75	0.53	-0.21	0.06		
<b>SAR</b>	0.20	0.03	0.92	0.27	-0.37	-0.22	0.08	0.11	-0.39	
<b>pH</b>	0.19	0.06	0.18	0.21	0.22	0.00	-0.13	0.19	0.05	0.04

Un pourcentage total de 67,9 % de la variance s'explique également par 4 composantes (tab. 31). La première composante explique 27,5% de la variabilité totale des données avec des corrélations élevées pour le SAR (-0,80), le sodium (-0,79) et la CE (0,78). Ainsi, cet axe est un indicateur de la présence d'une sodicité élevées dans certaines zones qui ont des teneurs faibles en CE. Le PC2 explique 20,5% de la variance avec des corrélations négatives en nitrate (-0,71) et en potassium (-0,69). Cet axe est donc lié à la pollution des sols probablement liée aux engrais azotés et potassiques utilisés. Le PC3 explique l'alcalinisation comme le montre la corrélation négative très élevée (-0,83) avec les bicarbonates.

## *Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols*

Table 31. Corrélation des paramètres pour chaque composante principale. Profondeur: 15-35 cm.

	PC1	PC2	PC3	PC4
Ca <sup>2+</sup>	0.27	-0.60	-0.35	-0.06
Mg <sup>2+</sup>	-0.09	-0.33	0.13	-0.82
Na <sup>+</sup>	-0.79	-0.43	0.11	0.24
K <sup>+</sup>	-0.37	-0.69	0.08	-0.24
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.74	-0.30	0.09	0.22
Cl <sup>-</sup>	0.55	-0.39	-0.02	0.14
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.24	0.04	-0.86	0.07
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.15	-0.71	-0.33	0.08
EC	0.78	-0.34	0.09	0.11
SAR	-0.80	-0.19	0.20	0.32
pH	0.00	-0.47	0.35	0.21
Valeur propre	3.02	2.26	1.17	1.02
Variance (%)	27.50	20.50	10.68	9.25
Cumulative (%)	27.50	48.00	58.68	67.93

### **5.3.4 Les faciès chimiques**

La figure 28 montre la répartition des échantillons de sol sur le diagramme de Piper. Dans le triangle des anions, on peut voir clairement une dominance du sulfate, à l'exception de quelques échantillons dans lesquels les chlorures sont dominants. Le triangle des cations montre une forte dominance du calcium. Des faciès différents ont été observés dans les deux profondeurs. La couche arable présente un faciès de type chlorure et sulfate de calcium et de magnésie. Le sous-sol montre un faciès dominant de type hyper sulfate-calcique proviennent principalement de la dissolution des formations carbonatées. La distribution des ions majeurs (Ca et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) est fortement influencée principalement par la géologie de la région, et les sources anthropiques telles que la qualité de l'eau utilisée en irrigation et la fertilisation incontrôlée. Les roches les plus solubles telles que l'anhydrite, le gypse et l'halite sont la principale source de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et Cl<sup>-</sup> dans le sol. La répartition des éléments majeurs, quelle qu'elle soit, dépend de la topographie, de la géologie, de la direction

## Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols

d'écoulement des eaux souterraines et des autres sources de contamination (Pazand *et al.*, 2018). 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.

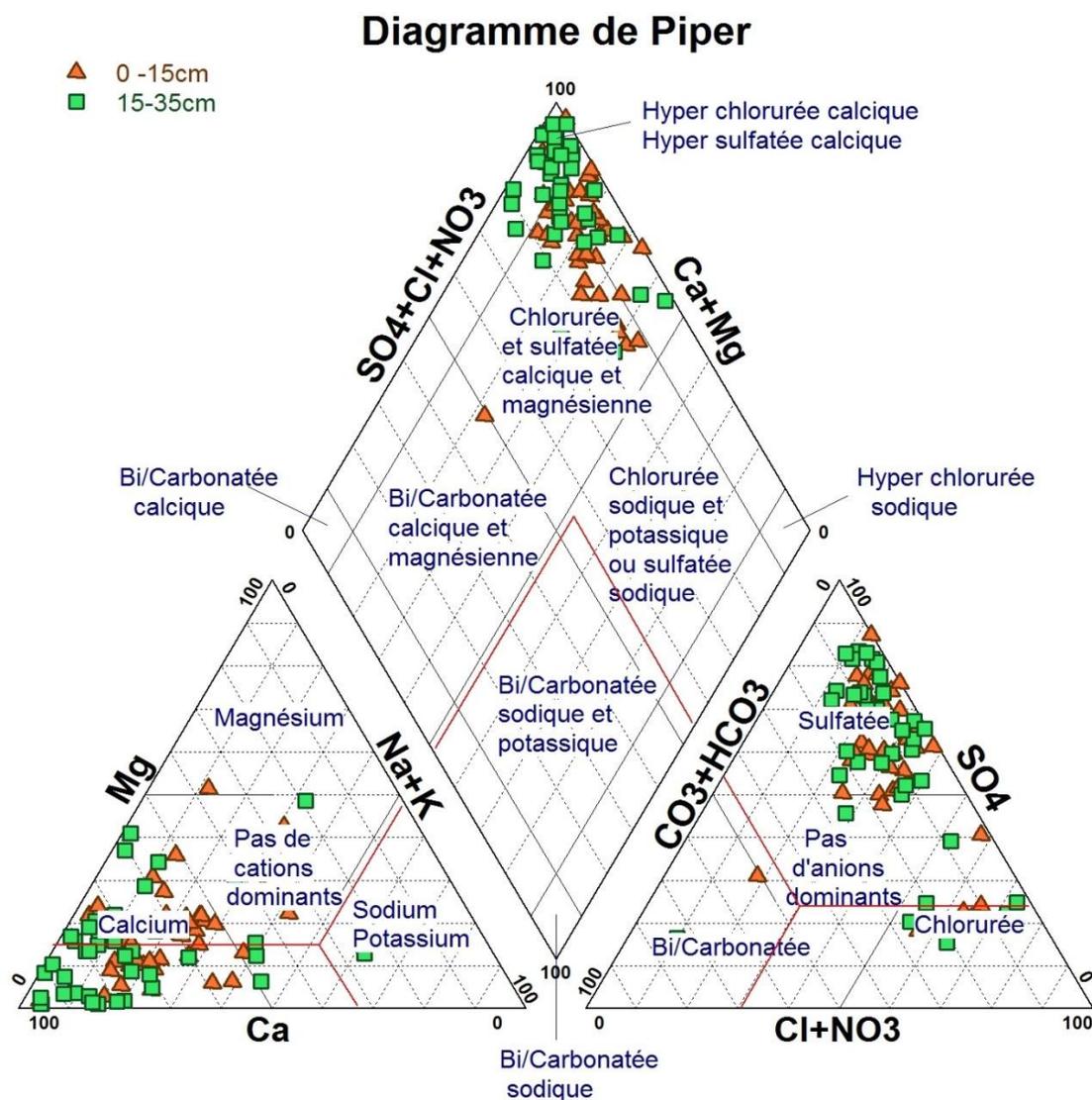


Figure 28. Diagramme de Piper appliqué aux sols d'El Ghrous.

## *Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols*

### **5.3.5 Alcalinité résiduelle et voie de salinisation**

En pédologie, L'alcalinisation des sols est considérée comme un processus d'expression rapide, elle peut se manifester dans une zone irriguée en quelques années, affectant considérablement les propriétés physiques et hydriques des sols (Cheverry and Bourrié, 2003).

Le concept d'alcalinité résiduelle (AR) se réfère au rapport de salinité pour la précipitation des minéraux. Comme la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) est le premier minéral à cristalliser lorsque la concentration augmente, nous avons déterminé l'alcalinité résiduelle de la calcite (ARc). Elle peut être utilisée pour prédire si la solution évolue vers un état salin neutre ou carbonaté.

La figure 30 montre que la solution contient plus de calcium que d'alcalinité. C'est-à-dire que pendant le processus de concentration (mesurée par le facteur de concentration, FC) et de cristallisation de la calcite, la solution diminue en alcalinité et augmente en calcium. Il n'y a donc pas de risque de sodification car le calcium est le principal cation dominant. Cette condition est appelée la voie neutre à dominance soit chlorurée ou sulfatée. Cette dernière peut provoquer une dégradation structurale du sol. En outre, les solutions les plus diluées ont montré des valeurs légèrement négatives d'ARc alors que les solutions les plus concentrées ont montré des valeurs fortement négatives.

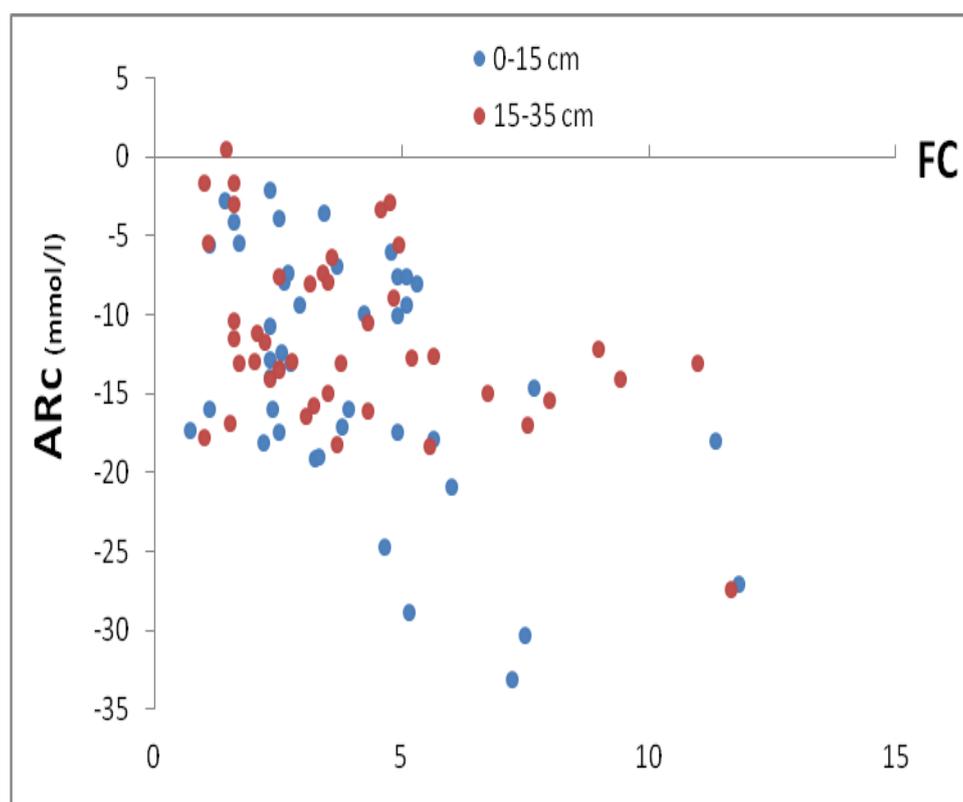


Figure 30. Evolution de l'alcalinité résiduelle calcite des solutions de sols.

La figure 31 montre les valeurs de l'alcalinité résiduelle généralisée (ARg) par rapport au facteur de concentration des solutions. La tendance est assez similaire à celle de l'alcalinité résiduelle de calcite (ARc). Il indique aussi que le principal paramètre responsable de cette voie est le calcium. Ces résultats montrent que lors de la précipitation du gypse, les équivalents de calcium et de magnésium sont supérieurs aux carbonates ; lorsque la solution se concentre, les équivalents d'alcalinité et de sulfates diminuent et les équivalents de calcium et de magnésium continuent d'augmenter avec le facteur de concentration. En résumé, il s'avère que l'alcalinité résiduelle présente le même signe négatif lors des différents stades de saturation vis-à-vis des minéraux étudiés. Ce signe conditionne le sens d'évolution des solutions du sol vers la voie saline neutre.

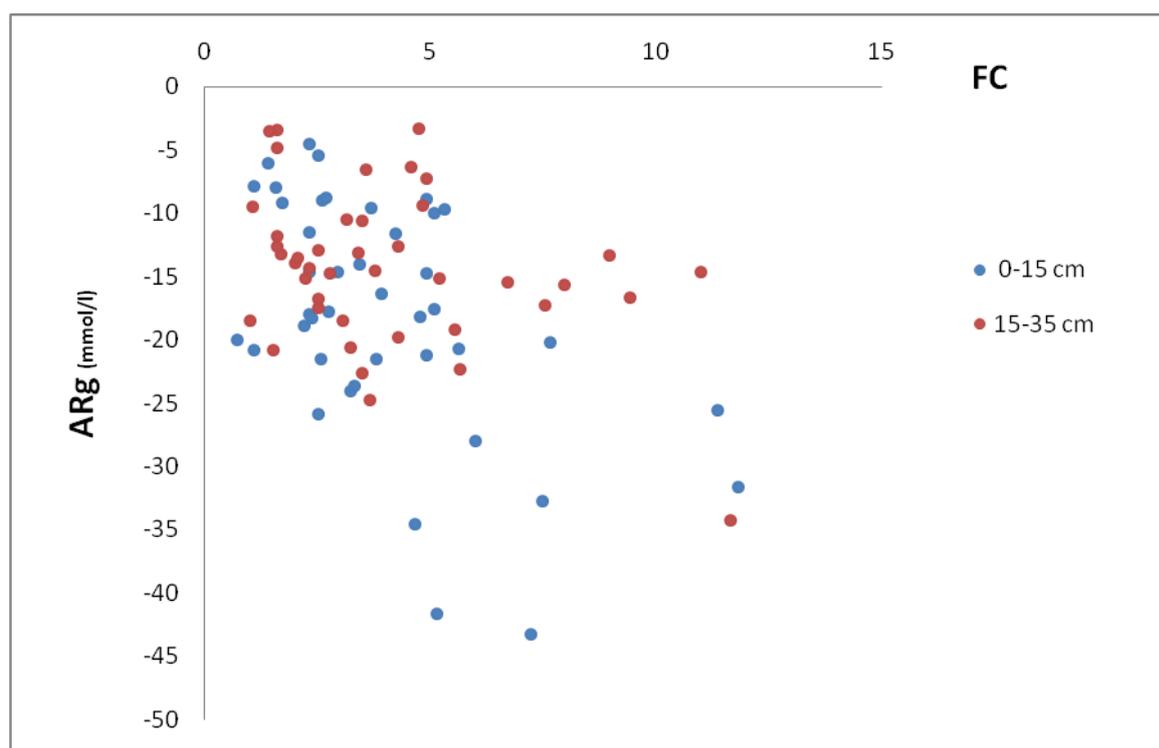


Figure 31. Evolution de l'alcalinité résiduelle généralisée des solutions de sols.

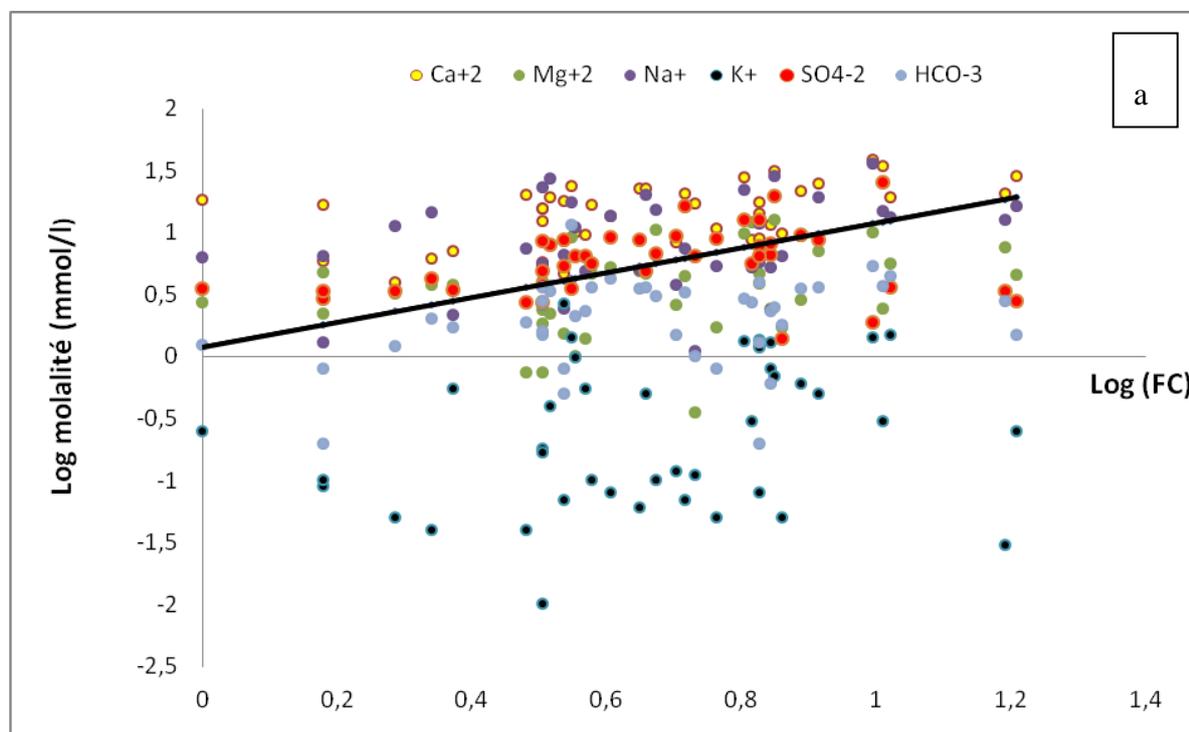
### 5.3.6 Diagramme de concentration

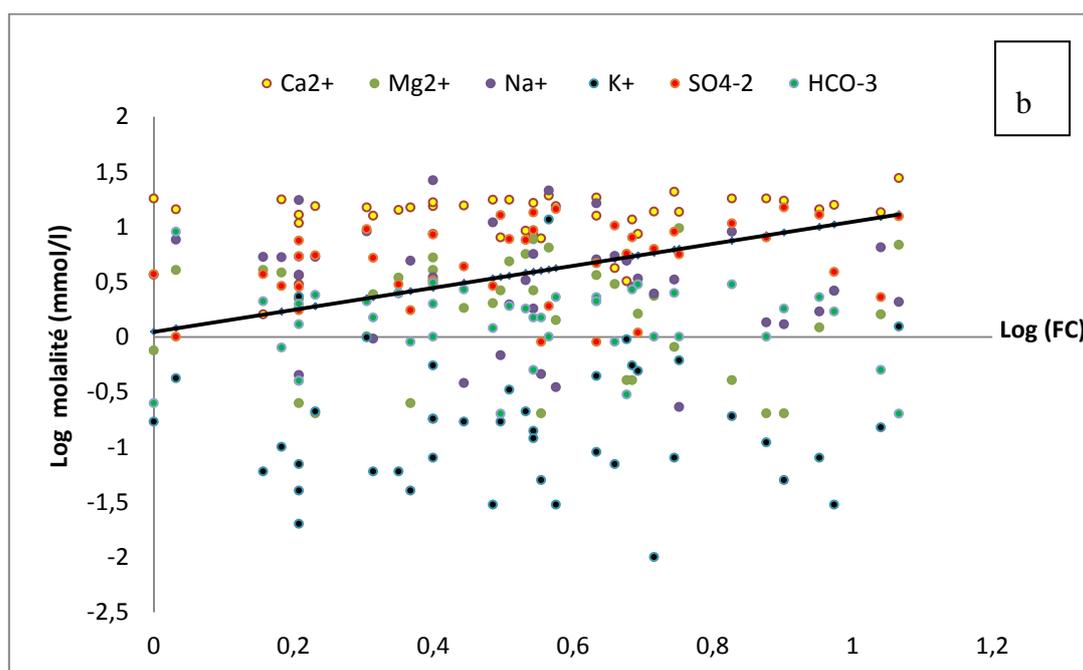
Dans un milieu évaporitique comme celui de Biskra, le chlorure est un élément abondant et soluble ; nous pouvons donc l'utiliser comme un traceur hydro chimique. Dans les diagrammes de concentration ci-dessous (Fig. 32), nous avons représenté nos analyses avec le logarithme des molalités en ordonné et le logarithme du facteur de concentration en abscisse. Les molalités des chlorures paraissent alignées suivant une droite de pente 1/1.

Les  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  dans les diagrammes de concentration augmentent plus fortement que  $\text{Cl}^-$  dans la couche de surface, mais ils se stabilisent dans la deuxième profondeur. Ceci est dû certainement à la dissolution de gypse. L'alcalinité est pratiquement stable et elle a une tendance à diminuer, et comme sa concentration est plus faible que celle du  $\text{Ca}^{2+}$ , elle confirme l'hypothèse de précipitation de la calcite avec une alcalinité résiduelle négative (Djamaï *et al.*, 2011). Le  $\text{K}^+$  est très stable car il est très contrôlé par les minéraux argileux (Wang *et al.*, 2004). Le  $\text{Na}^+$  a une tendance qui indique une précipitation sous forme d'halite en fonction de la concentration de la solution du sol. Le magnésium précipite dans certains échantillons ou sa molalité est inférieure à celle des bicarbonates dans la deuxième

## Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols

profondeur, mais il a évolué suivant le facteur de concentration pour la première profondeur. Ceci peut être expliqué par l'enlèvement de  $Mg^{2+}$  de la solution pour se précipiter sous forme de sépiote ou de dolomite ( sel a base magnésium) (Bradaï and Douaoui, 2013).





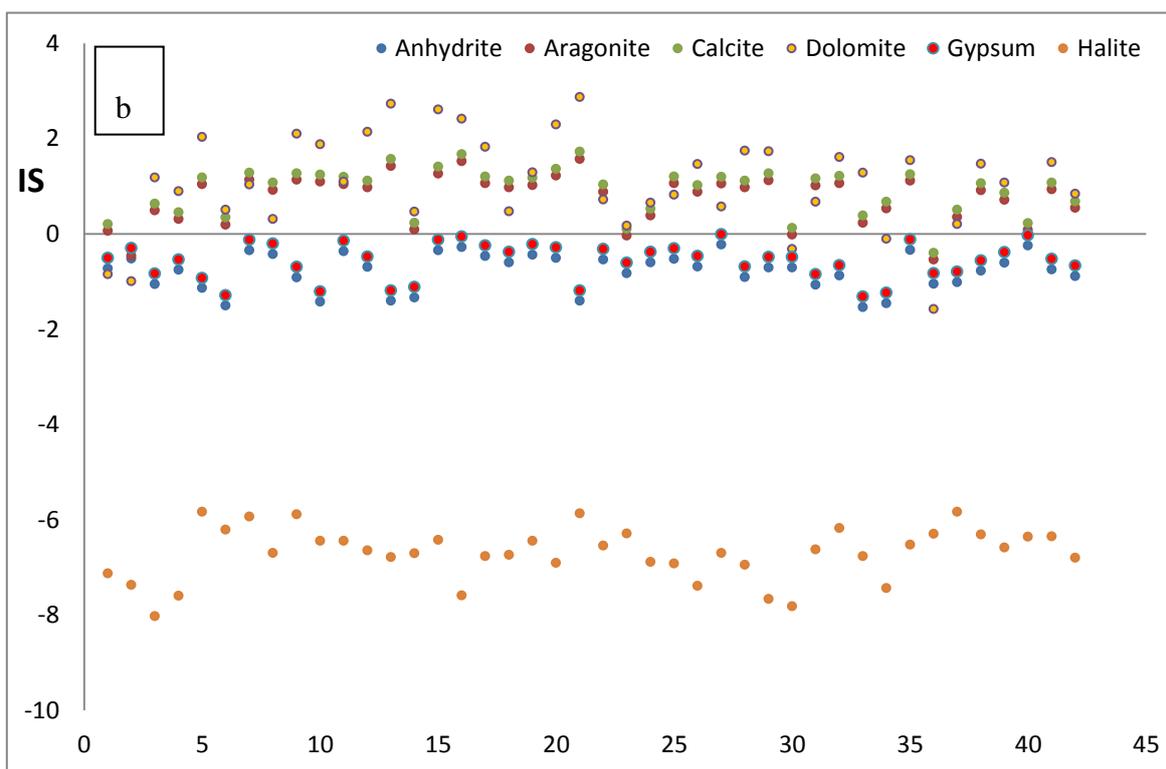
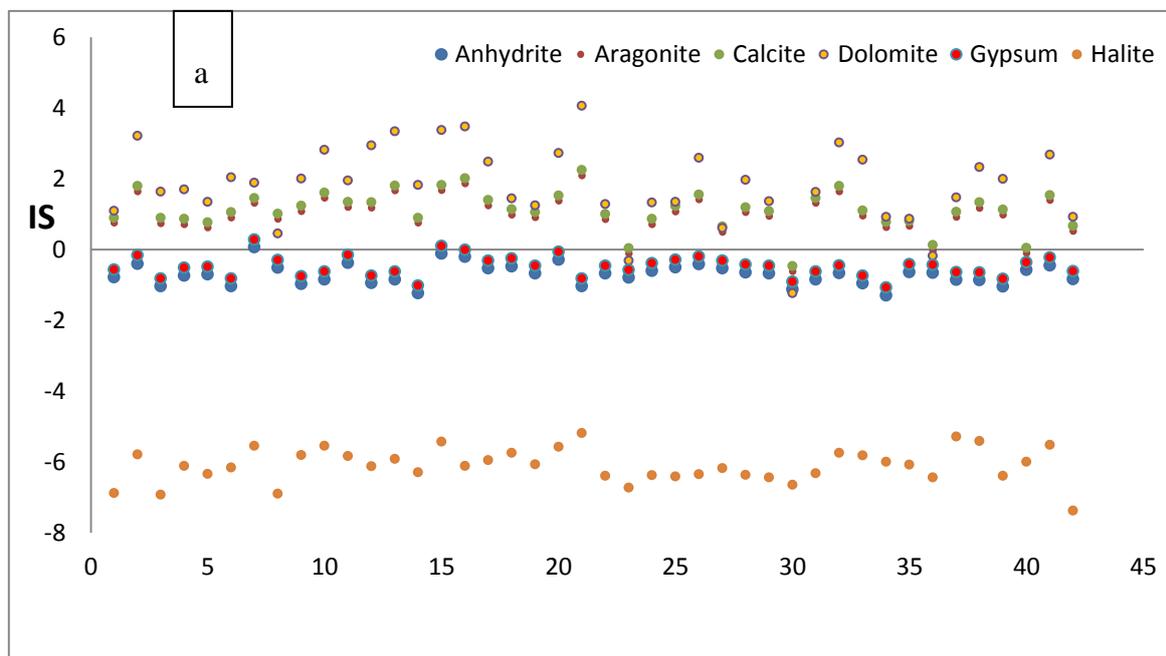
**Figure 32.** Diagrammes de concentration des échantillons de sol ; Profondeur 0 -15 (a) ; profondeur 15 - 35 (b).

### 5.3.7 Indice de saturation

L'état de saturation des échantillons des sols a été analysé en utilisant le modèle d'équilibre hydrogéochimique du PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 2005). La figure 33 montre les valeurs de l'indice de saturation des échantillons de sol pour les deux profondeurs qui sont pratiquement identiques dans leur évolution, tels que la calcite, la dolomite, l'aragonite, l'anhydrite, l'halite et le gypse. La plupart des échantillons étaient sursaturés en minéraux carbonatés (aragonite, calcite et dolomite) et sous-saturés en minéraux évaporitiques (anhydrite, gypse et halite). Ainsi, les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter et les minéraux sulfatés de se dissoudre. La dissolution du gypse pourrait expliquer l'enrichissement de sol en sulfate et en calcium. Cela déjà été confirmé par le faciès chimique dominant ( $\text{CaSO}_4$ ). Comme l'halite est largement sous-saturée dans chaque échantillon  $\text{IS} < -7.59$ , ce que lui permet de se dissoudre et par conséquent contribuer à une augmentation de la minéralisation ( $\text{NaCl}$ ).

Différentes sources expliquent la prédominance du gypse dans les sols qui se produit soit par l'altération in situ du matériau parental du gypse présent dans les régions arides, soit par l'évaporation des eaux souterraines minéralisées qui présentent un faciès sulfaté, et par la dissolution des minéraux carbonatés pendant la concentration de la solution du sol.

## Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols

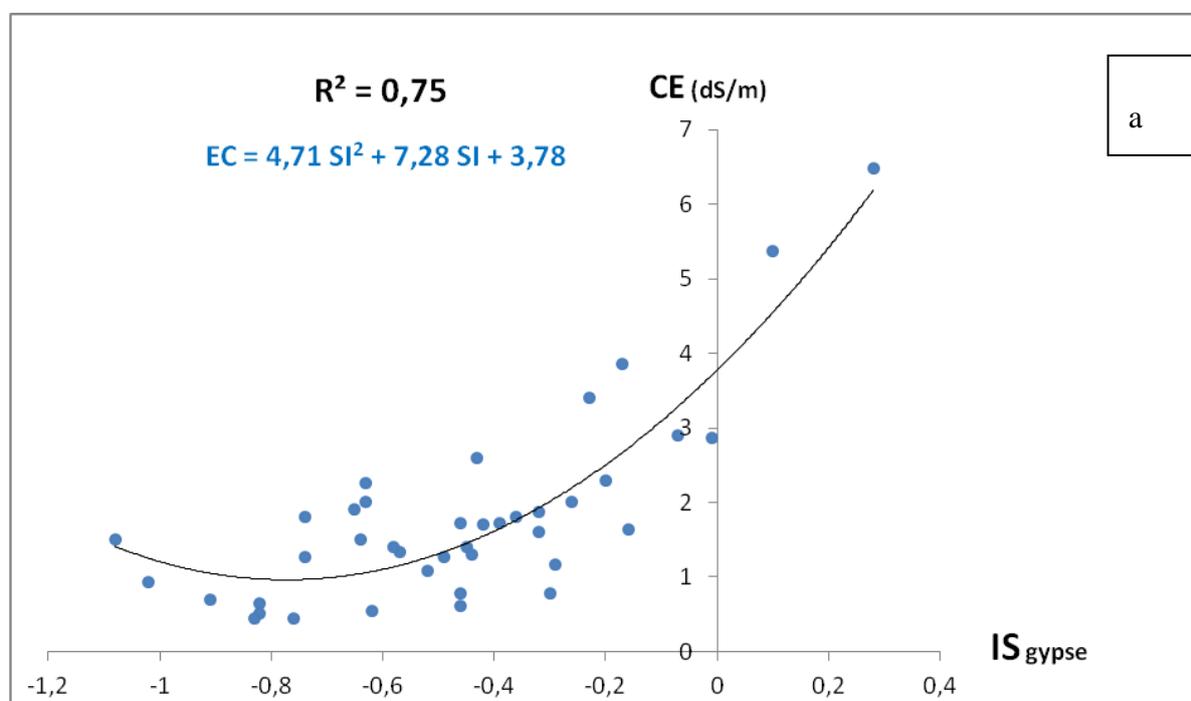


**Figure 33.** Valeurs de l'indice de saturation des minéraux ; Profondeur 0 -15 (a) ; profondeur 15 - 35 (b).

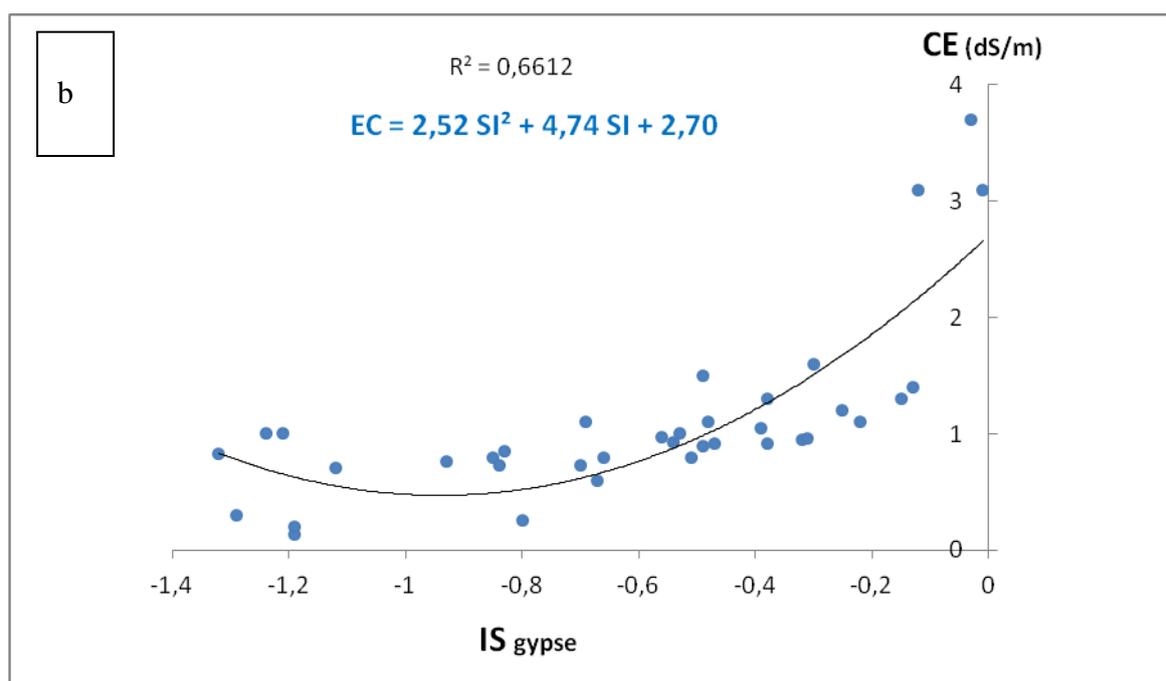
### 5.3.8 Modèles de régression

Nous avons proposé trois équations de régression obtenues à partir de l'analyse de notre ensemble de données visant l'estimation de la salinité par les valeurs de la conductivité électrique (CE, variable dépendante) : (a) équation parabolique dans laquelle l'indice de saturation du gypse est la variable indépendante, (b) régression linéaire multiple obtenue en utilisant certains cations comme variables indépendantes, et (c) régression linéaire multiple en utilisant certains anions comme variables indépendantes. Les cations et les anions utilisés dans ces équations sont le fruit de l'analyse multivariée (ACP).

La plupart des échantillons étaient sous-saturés en minéraux soufrés (gypse). Cela suggère que la dissolution du gypse peut être la source de calcium et de sulfate dans ces sols. Cette affirmation concorde avec la prédominance du faciès sulfaté-calcique dans le diagramme de Piper. Par conséquent, la figure 34 montre un nuage de points des valeurs de l'indice de saturation du gypse par rapport à la conductivité électrique. Il montre également une équation de régression parabolique avec une valeur élevée de  $R^2$  : 0,75 dans la couche arable et 0,67 dans le sous-sol.



## Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols



**Figure 34.** Relation entre le SI (gypse) et le CE ; profondeur 0 -15 (a) ; profondeur 15 - 35 (b).

En utilisant des cations, nous avons proposé les équations suivantes pour estimer la salinité dans la couche arable (équation 1) et les anions dans le sous-sol (équation 2). Le tableau 32 montre les valeurs statistiques des paramètres utilisés pour la validation de ces équations:

$$CE = 0.03 Ca^{2+} + 0.07 SO_4^{2-} + 0.02 Na^+ - 0.44 \quad (\text{Eq. 1}).$$

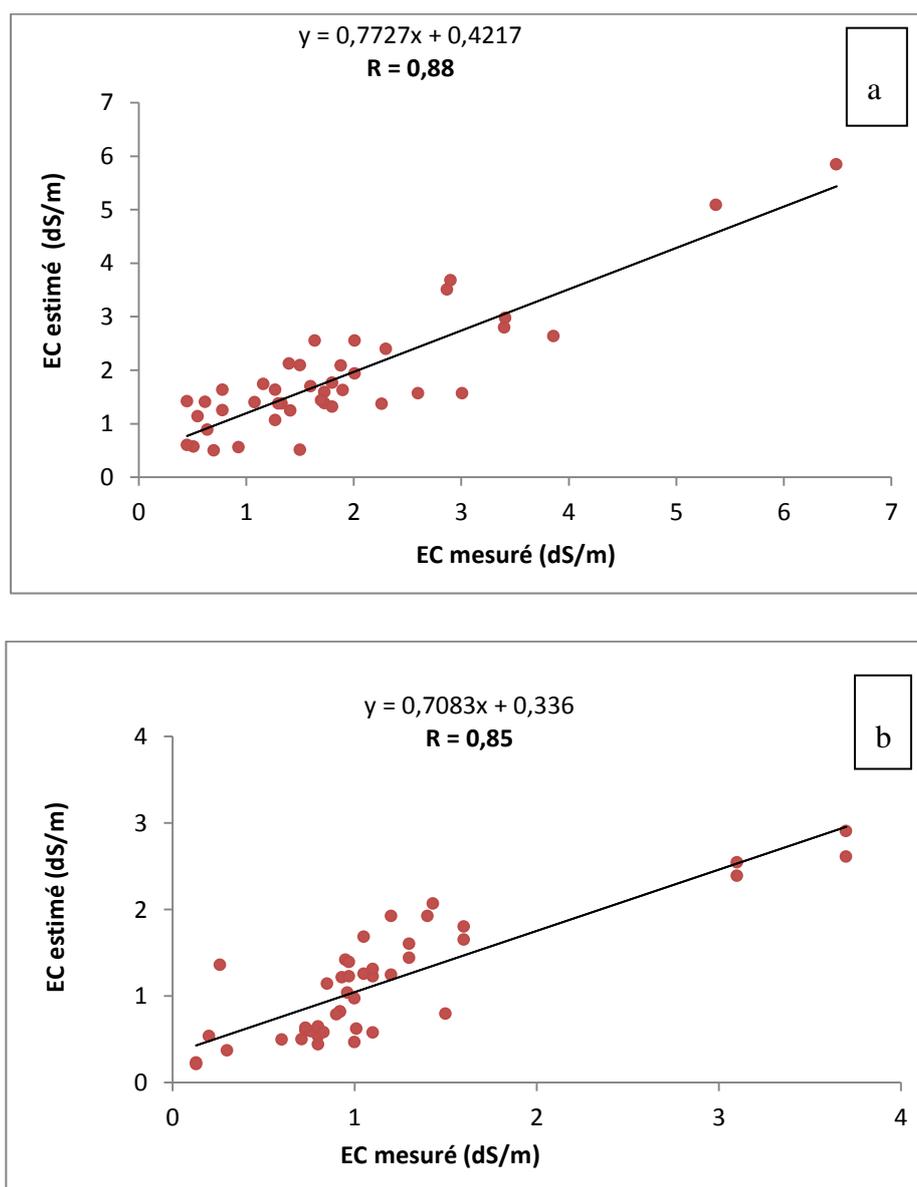
$$CE = 0.05 SO_4^{2-} + 0.08 Cl^- + 0.009 \quad (\text{Eq. 2}).$$

Tableau 32. Valeurs des paramètres utilisés dans la validation des équations.

	R	R <sup>2</sup>	ME	RMSE
0-15 cm	0.88	0.77	0.003	0.75
15-35 cm	0.85	0.75	0.005	0.81

La figure 35 illustre l'ajustement entre les valeurs observées et prédites.

## Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols



**Figure 35.** Diagrammes de dispersion des données mesurées et estimées (CE) : Profondeur 0 - 15 (a) ;  
profondeur 15 - 35 (b).

### 5.3.9 Cartographie de la salinité des sols

Ces dernières années, les techniques en informatique et en interpolation spatiale ont bouleversé non seulement les possibilités d'expression cartographique, mais aussi la conception même de la gestion des données. La cartographie de la conductivité électrique a été faite par les valeurs des équations proposées en utilisant des méthodes d'interpolation et des techniques SIG dans le but de localiser les zones à haut risque. Elle peut également constituer un outil d'aide à la décision pour le gestionnaire afin de prendre d'éventuelles mesures telles que la sensibilisation des agriculteurs ou d'éventuels plans de développement :

## Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols

installation de systèmes de drainage, choix des cultures en fonction de la tolérance à la salinité. La figure 36 montre les cartes de salinité pour les deux horizons du sol.

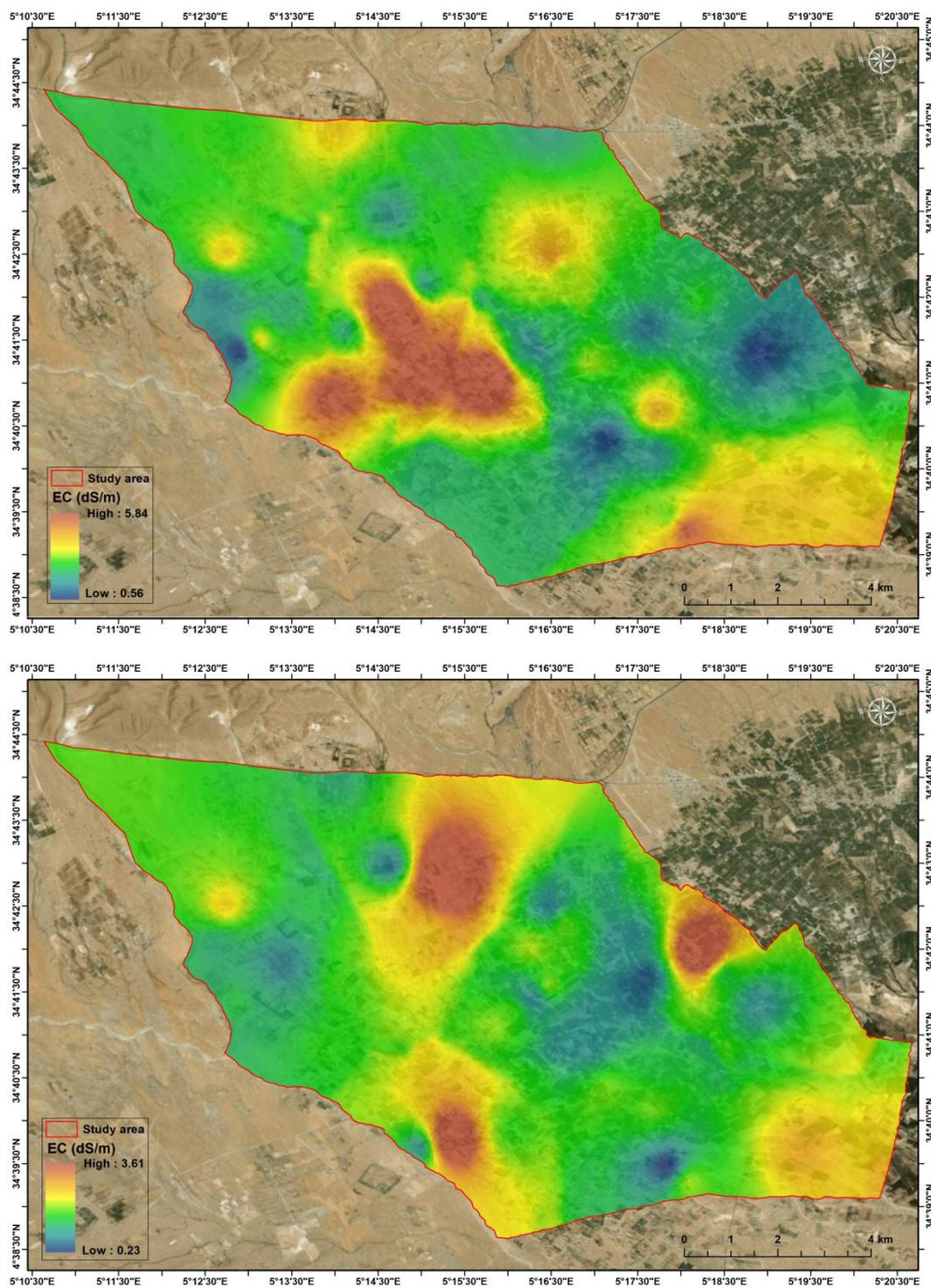


Figure 36. Cartes de la salinité du sol.

## Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols

### 5.4. Discussion

Il est largement reconnu que les sols des zones arides (et semi-arides) dans lesquelles l'agriculture irriguée est pratiquée, présentent un risque important de salinisation, attesté en premier lieu par des valeurs élevées du pH. Dans le périmètre d'El Ghrous, par exemple, la plupart des valeurs se situent dans les limites qu'Aubert (1983) avait proposées comme seuils de dégradation des sols irrigués (pH; 8,0-9,0). Deuxièmement, les valeurs de conductivité électrique (CE) sont celles qui expliquent mieux les effets de la salinisation. Les valeurs de ces deux paramètres ont donc montré une grande hétérogénéité indiquant une variabilité spatiale dans la zone d'étude. Par ailleurs, 75% de nos échantillons ont dépassé le niveau de  $1 \text{ dS m}^{-1}$  proposé par Durand (1983) comme point de départ de la salinisation et là où commence à poser un problème pour la gestion des terres.

Le cation et l'anion dominants de nos sols sont le calcium et le sulfate. Cette dominance semble être due à la dissolution des sels d'évaporation tels que la calcite, gypse et l'anhydrite (Lotfi *et al.*, 2018).

L'excès de calcium par rapport aux ions sulfate peut être lié à l'échange cationique de  $\text{Ca}^{2+}$  au lieu de  $\text{Na}^+$  combiné à la dissolution du gypse (Lotfi *et al.*, 2018; Bouteraa *et al.*, 2019). La dissolution du gypse est influencée par la saturation ou la sursaturation de la calcite. En outre, tous les échantillons ont montré une déficience en bicarbonate par rapport à des cations tels que le calcium et le magnésium. Ce déficit est probablement dû à la saturation de la dolomite. Selon Risacher and Fritz (2009) le calcium et le bicarbonate ne peuvent pas augmenter simultanément. Cependant, nos conclusions suggèrent également que d'autres processus se déroulent le long de la dissolution des halites. Par exemple, l'excès de sodium pourrait être dû à des réactions d'échange avec l'argile où le sodium est libéré et remplacé par des ions de calcium (Ncibi *et al.*, 2020).

La saturation des échantillons, analysée par le modèle PHREEQC, montre que les minéraux carbonatés sont sensibles aux précipitations tandis que les minéraux sulfatés sont susceptibles d'être dissous. Les principaux processus qui contrôlent la composition chimique des sels dissous dans ces sols sont la dissolution de l'halite, du gypse et de l'anhydrite ainsi que la précipitation de la calcite, de l'aragonite et de la dolomite liée aux processus d'échanges ioniques entre eux et avec les minéraux argileux (Lotfi *et al.*, 2018).

La zone d'étude est caractérisée par un climat aride et des sols avec des croûtes superficielles de chaux, de gypse et d'autres sels. Sous l'irrigation, la précipitation de calcite et la

## *Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols*

dissolution du gypse pourrait influencer les propriétés physiques par la cimentation des particules sous forme d'accumulations gypso-calcaires. Ce phénomène est particulièrement important dans les zones où le niveau des eaux souterraines est plus élevé (Marlet and Job, 2006). Ce type de voie de salinité est la voie saline neutre à dominance de sulfates. Cette voie présente les principaux dangers pour l'évolution vers de faibles concentrations de calcium, et donc une plus grande probabilité de dégradation de la structure du sol (Bourrie, 2014).

La solution de sol est saturée de calcium, ce qui diminue d'une part l'assimilabilité du phosphore par son insolubilisation sous forme de phosphate tricalcique et provoque une carence des oligo-éléments (Fe, Mn, Cu et Zn) sous des formes moins assimilables à cause du pH élevé (Bulletin Pédagogique de la FAO-55). La présence d'une couche indurée ou imperméable gêne la pénétration des racines et de l'eau. L'incorporation de la matière organique, les labours profonds et la gestion rigoureuse de l'eau d'irrigation jouent un rôle important dans l'amélioration des sols gypsifères (Bulletin Pédagogique de la FAO-55).

La durabilité de ces zones ne peut être garantie que si nous comprenons les mécanismes de cette variabilité spatiale de la salinité à différentes échelles. Dans ce domaine, l'un des principaux problèmes auxquels les scientifiques doivent faire face est la détermination de la conductivité électrique en autant de points que nous le pouvons. La méthode de la pâte saturée est longue et il n'est parfois pas facile de déterminer et de prélever des échantillons aux points souhaités (par exemple, en l'absence d'autorisation du propriétaire). Par conséquent, la méthodologie de prélèvement des échantillons et de la cartographie de la salinité que nous avons proposée dans cette étude pourrait atténuer de ces problèmes en cas de nécessité.

Enfin, une autre question qui se pose est celle de la durabilité socio-économique de ce type de zones dans lesquelles l'absence d'activités industrielles et d'investissements touristiques, ainsi qu'un taux de chômage élevé, ont conduit à une expansion notable de l'agriculture irriguée. Ainsi, le contrôle de la qualité des sols et de l'eau semble être crucial pour la survie de nombreux habitants, mais pas seulement à El Ghrous mais dans d'autres régions similaires en Algérie.

### **5.5 Conclusion**

La salinité est souvent le critère le plus apprécié pour évaluer la qualité des sols dans les zones arides, en particulier lorsque ces sols sont irrigués par des eaux souterraines. L'étude (ACP) a expliqué les principaux facteurs responsables de l'augmentation de la charge saline des sols. La salinité de la couche arable s'explique par les valeurs des cations et la salinité du sous-sol

## *Chapitre 5: Caractérisation géochimique des sols*

par les valeurs des anions, les ions les plus importants étant le calcium, le sulfate et le chlorure. L'alcalinité résiduelle calcite est totalement négative, donc la solution contient plus de  $\text{Ca}^{2+}$  que d'alcalinité, ce qui fait que durant le processus de concentration et de cristallisation de la calcite, la composition de la solution va diminuer en alcalinité et augmenter en calcium, ce qui explique la voie de salinité de type neutre. Les indices de saturation indiquent que les minéraux carbonatés sont susceptibles à se précipiter par contre, les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre et leur dissolution contribuerait à l'acquisition de la charge saline de sol. Les équations obtenues et les cartes établies ont été validées et ont montré des valeurs fiables. Nous pensons donc qu'il pourrait s'agir de bons outils d'aide à la décision pour les agriculteurs, les parties prenantes et les décideurs, ainsi que pour les scientifiques, car l'utilisation de ces équations peut supposer un gain de temps et d'argent important pour les travaux sur le terrain et en laboratoire, ainsi que pour les réactifs. Enfin, nous suggérons l'installation de réseaux de drainage afin d'évacuer les eaux chargées salées. En outre, les agriculteurs devraient réfléchir à la possibilité de cultiver des espèces plus adaptées à la salinité car cela semble un phénomène imparable.

# Conclusion générale

## *Conclusion générale*

### **Conclusion générale**

La dégradation des sols par la salinité est considérée comme étant un problème préoccupant tant pour les scientifiques que pour les preneurs de décisions et touche directement les agriculteurs. Afin d'établir les stratégies adéquates pour remédier à l'aggravation de ce problème à la fois agricole et environnemental, il est nécessaire d'appliquer les outils d'analyse spatiale et de cartographie pour mieux comprendre les facteurs qui contribuent à l'augmentation de la charge saline des sols.

Cette étude est basée sur une approche multidisciplinaire : (i) la géostatistique qui a pour objectif d'évaluer les niveaux de la salinité des sols (classes) dans la région d'El Ghrous et de cartographier la distribution spatiale de ces classes de salinité, (ii) la télédétection pour le suivi de la variabilité spatio-temporelle de la salinité et le changement dans l'occupation du sol en se basant sur des données satellitaires multi spectrales (images Landsat), et (iii) l'approche géochimique pour comprendre les processus géochimiques qui se produisent au niveau des sols irrigués et qui déterminent la voie de salinité pour une meilleure connaissance des processus et des conséquences de cette salinisation sur la qualité des sols et sur l'environnement.

La salinité est considéré comme le critère le plus apprécié pour évaluer la qualité des sols dans les zones arides, en particulier lorsque ces sols sont irrigués avec des eaux de qualité médiocre comme dans le cas de du périmètre du Ziban. La distribution de fréquence de la CE du sol montre que la classe C3 (modérément saline) est dominante (58,94 %) et la classe C4 (sol très salin) représente 24,73 % de la superficie totale. Les classes C1 et C2 (classe non saline et classe légèrement saline) représentent un faible pourcentage dans la zone d'étude. En outre, plus de 88% des points analysés ont une  $EC > 1dS\ m^{-1}$ , qui est le niveau minimum de salinité à partir duquel elle pourrait poser de réels problèmes pour la gestion des sols.

Les résultats obtenus par l'application du krigeage ordinaire (KO) ont montré que la région est sévèrement touchée par ce phénomène. L'application du krigeage d'indicatrices (KI) a été appliquée pour établir les cartes de probabilité. Ce type de krigeage a montré que 84 % de la zone avait la plus forte probabilité (>75%) de dépasser  $1\ dS\ m^{-1}$  (la valeur seuil minimale pour la salinité), et plus de 10 % de la zone avait une forte probabilité (50-75%) pour la même valeur seuil. Ces chiffres indiquent que pas moins de 94% de la superficie totale du périmètre est susceptible d'être touchée par la salinité

## *Conclusion générale*

Dans cette étude nous avons évalué la capacité des données Landsat 8 OLI et Landsat 5 TM à surveiller la salinité des sols dans les palmeraies d'El Ghrous, et à détecter les changements de la couverture des sols. L'utilisation des indices spectraux, qui sont dérivés de l'image satellitaire Landsat 8OLI a montré de faibles corrélations avec les indices de sol et de végétation, tous les indices n'étaient pas significatifs pour prédire la salinité du sol dans ce périmètre. Ces faibles corrélations peuvent s'expliquer par ; (1) nos mesures sur le terrain ont été effectuées sur des terres cultivées et irriguées, (2) la salinité a montré une diminution sous l'effet de lessivage dans la couche supérieure par les irrigations, ce qui rend la salinité difficilement détectable.

L'application de la classification supervisée pour détecter les changements dans l'occupation du sol entre 2009 et 2017 a montré qu'il y a eu un changement et une dynamique spatio-temporelle très importante dans la région d'El Ghrous. Une augmentation très remarquable dans la superficie occupée par la plasticulture (production de légumineuses en serre) a été observée, même si seulement 30 % de la superficie initiale a été conservée. Ce phénomène est justifié par la dynamique de la filière dans l'espace et dans le temps, entraînant une baisse de la fertilité des sols, et une dégradation causée par l'utilisation accrue d'eau d'irrigation saline, qui pousse les agriculteurs à se déplacer vers d'autres parcelles pour assurer une meilleure production.

Sur 886,59 ha en 2009, les sols salins ont perdu une partie de leur surface principalement pour les classes des sols nus, plasticulture et la végétation dense, et ont conservé 227,25 ha de sa propre surface ; sa superficie en 2017 était de 573 ha. Cette diminution est très remarquable en raison des récents développements hydro-agricoles réalisés dans la région.

La caractérisation géochimique des sols s'avère une démarche très nécessaire pour pouvoir prédire l'évolution des sols. En effet, les tests de saturation vis-à-vis des minéraux montrent une sursaturation en minéraux carbonatés et une sous-saturation en minéraux évaporitiques, ce qui veut dire que les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter et les minéraux sulfatés de se dissoudre. Cela pourrait expliquer l'enrichissement de sol en sulfate et en calcium, déjà confirmé par le faciès chimique dominant ( $\text{CaSO}_4$ ) dans le diagramme de Riverside. L'étude statistique multivariée (ACP) a montré que les ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  sont responsables essentiellement de l'augmentation de la charge saline dans les sols. A cet effet nous avons essayé de proposer des équations dans le but d'estimer la salinité par les moindres paramètres possibles responsables de cette dernière.

## *Conclusion générale*

En guise de perspectives, il est possible de réduire la salinisation soit par lixiviation du sel de la zone racinaire, soit par le changement des pratiques de gestion agricole, ou par l'utilisation des plantes tolérantes au sel. Le maintien de l'agriculture irriguée peut être assuré par une meilleure pratique d'irrigation telle que l'adoption d'une méthode de drainage partiel de la zone racinaire et une irrigation contrôlée pour optimiser l'utilisation de l'eau. La gestion du périmètre nécessite aussi le maintien de l'équilibre entre les besoins en eau des cultures et les irrigations, en apportant seulement le volume nécessaire pour satisfaire ces besoins, ce qui permet d'éviter la remontée de la nappe phréatique et le mouvement du sel vers la surface du sol.

L'utilisation de cultures tolérantes au sel est l'une des stratégies les plus recommandée pour diminuer de l'effet néfaste de la salinité. La tolérance des cultures aux sels permettra également une utilisation plus efficace de l'eau d'irrigation de mauvaise qualité. Il est nécessaire alors de comprendre les mécanismes de limitation du sel sur la croissance des différentes cultures.

La réalisation de réseaux de drainage collectifs, la sensibilisation et l'accompagnement des agriculteurs par la formation et la vulgarisation devient une nécessité pour une meilleure gestion des ressources naturelles dans le périmètre du Ziban.

# Références bibliographiques

## References bibliographiques

- Abdelly, C., Lachaâl, M., Grignon, C., Soltani, A., Hajji, M., 1995. Association épisodique d'halophytes stricts et de glycophytes dans un écosystème hydromorphe salé en zone semi-aride. *Agronomie*, 15(9-10), 557-568.
- Abdenmour, M.A., Bradai, A., Douaoui, A., 2018. Contribution de la géostatistique multiparamétrique pour la cartographie de l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation (Cas du Moyen Chélif Occidental). *Algerian Journal of Arid Environment* 8, 104-114. .
- Abdenmour, M.A., Douaoui, A., Bradai, A., Bennacer, A., Pulido Fernández, M., 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, 105-124.
- Afrasinei, G.M., Melis, M.T., Buttau, C., Bradd, J.M., Arras, C., Ghiglieri, G., 2017. Assessment of remote sensing-based classification methods for change detection of salt-affected areas (Biskra area, Algeria). *Journal of Applied Remote Sensing* 11, 016025.
- Aidaoui, S., 1994. Ressource en eau et aménagement hydro-agricole dans la région de Biskra" Ziban,[Algérie]. Thèse de doctorat. Université Nancy 2.
- Alam, M., Bhutta, M., 2004. Comparative evaluation of canal seepage investigation techniques. *Agricultural Water Management* 66, 65-76.
- Aldakheel, Y.Y., 2011. Assessing NDVI spatial pattern as related to irrigation and soil salinity management in Al-Hassa Oasis, Saudi Arabia. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 39, 171-180.
- Al-Droubi, A., 1976. Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. *Persée-Portail des revues scientifiques en SHS (in French)*.
- Alexandre, C., Borrallho, T., Durão, A., 2018. Evaluation of salinization and sodification in irrigated areas with limited soil data: Case study in southern Portugal. *Spanish Journal of Soil Science* 8, 102-120.
- Al-Khaier, F., 2003. Soil salinity detection using satellite remote sensing. *ITC*.
- Alrasbi, S.A.R., Hussain, N., Schmeisky, H., 2010. Evaluation of the growth of date palm seedlings irrigated with saline water in the Sultanate of Oman. *IV International Date Palm Conference* 882, pp. 233-246.
- Amichi, H., Bouarfa, S., Kuper, M., Ducourtieux, O., Imache, A., Fusillier, J.L., Bazin, G., Hartani, T., Chehat, F., 2012. How does unequal access to groundwater contribute to marginalization of small farmers? The case of public lands in Algeria. *Irrigation and drainage* 61, 34-44.
- Amorós, A., Rivera, D., Larrosa, E., Obón, C.J.F., 2014. Physico-chemical and functional characteristics of date fruits from different Phoenix species (Arecaceae). 69, 315-323.
- ANAT, 2003. Schéma directeur des ressources en eau de la Wilaya de Biskra, Dossier 2, Agence nationale de l'aménagement du territoire, Algérie.

- ANAT, 2006. Monographie de la wilaya de Biskra, 150.
- ANRH, 2008. Enquête sur les crues de la wilaya de Biskra. 50.
- Aouidane, L., 2017. Origines de la salinisation des eaux et des sols d'une zone à climat semi-aride: Cas de Remila (W. Khenchela). These de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- Aragüés, R., Medina, E., Zribi, W., Clavería, I., Álvaro-Fuentes, J., Faci, J., 2015. Soil salinization as a threat to the sustainability of deficit irrigation under present and expected climate change scenarios. *Irrigation science* 33, 67-79.
- Arar, A., 1975. Soils, irrigation and drainage of the date palm. 3. FAO Technical Conference on the Improvement of Date Production, Processing and Marketing, Baghdad (Iraq), 6 Dec 1975.
- 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.
- Ashraf, M., McNeilly, T., 2004. Salinity Tolerance in Brassica Oilseeds. *Critical Reviews in Plant Sciences* 23, 157-174.
- Asrar, A., Abdel-Fattah, G., Elhindi, K., 2012. Improving growth, flower yield, and water relations of snapdragon (*Antirrhinum majus* L.) plants grown under well-watered and water-stress conditions using arbuscular mycorrhizal fungi. *Photosynthetica* 50, 305-316.
- Aubert, G., 1976. Les sols sodiques en Afrique du Nord.
- Aubert, G., 1978. Méthodes d'analyses des sols. Centre national de documentation pédagogique, Centre régional de documentation pédagogique de Marseille ( in French).
- Aubert, G., 1983. Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodique. 4<sup>e</sup>. *Cash. Orostom. Ser. Ped. Vol* (in French), 73-78
- Aydemir, S., Najjar, N., 2005. Application of two amendments (gypsum and langbeinite) to reclaim sodic soil using sodic irrigation water. *Soil Research* 43, 547-553.
- Azzouzi, S.A., Vidal-Pantaleoni, A., Bentounes, H.A.J.I.A., 2017. Desertification monitoring in Biskra, Algeria, with Landsat imagery by means of supervised classification and change detection methods. 5, 9065-9072.
- Baize, D., 1988. A guide to standard pedological analyses. A guide to standard pedological analyses.
- Balpande, S., Deshpande, S., Pal, D., 1996. Factors and processes of soil degradation in vertisols of the Purna Valley, Maharashtra, India. *Land Degradation & Development* 7, 313-324.
- Barbachea, A., Beghami, Y., Benmessaoudc, H., 2018. Study and diachronic analysis of forest cover changes of Belezma-Algeria. *Geographica Pannonica* 22, 253-263.
- Barbiero, L., Valles, V., Cheverry, C., 2004. Reply to JW Van Hoorn "Some observations with respect to sodicity hazard of irrigation waters". *Agricultural Water Management* 68, 177-184.

Bilgili, A.V., 2013. Spatial assessment of soil salinity in the Harran Plain using multiple kriging techniques. *Environmental monitoring and assessment* 185, 777-795.

Blaylock AD (1994) Soil salinity, salt tolerance, and growth potential of horticultural and landscape plants. University of Wyoming, Cooperative Extension Service, Department of Plant.

Bot, A., Nachtergaele, F., Young, A., 2000. Land resource potential and constraints at regional and country levels. FAO, Rome, Italy.

Bouammar, B., 2010. Le développement agricole dans les régions Sahariennes: étude de cas de la région d'Ouargla et de la région de Biskra. These de Doctorat. Université Kasdi Merbah. Ouargla.

Bouarfa, S., Marlet, S., Douaoui, A., Hartani, T., Mekki, I., Ghazouani, W., ... & Kuper, M. (2009). Salinity patterns in irrigation systems, a threat to be demystified, a constraint to be managed: field evidence from Algeria and Tunisia. *Irrigation and Drainage*, 58(S3), S273-S284.

Bouarfa, S., Kuper, M., 2012. Groundwater in irrigation systems: from menace to mainstay. *Irrigation and Drainage* 61, 1-13.

Bouaziz, M., Matschullat, J., Gloaguen, R.J.C.R.G., 2011. Improved remote sensing detection of soil salinity from a semi-arid climate in Northeast Brazil. *Comptes Rendus Geoscience*, 343(11-12), 795-803..

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.

Bouchemal, F., 2017. Diagnostic de la qualité des eaux souterraines et superficielles de la région de Biskra. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra.

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* 75.

Boufekane, A., Saighi, O., 2016. Kriging method of study of the groundwater quality used for irrigation-case of Wadi Djendjen plain (North-East Algeria). *Journal of Fundamental Applied Sciences* 8, 346-362.

Bougherara, A., Lacaze, B., 2009. Etude préliminaire des images Landsat et Alsat pour le suivi des mutations agraires des Ziban (extrême nord-est du Sahara algérien) de 1973 à 2007. Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF Alger Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF Alger.

Bourrie, G., 2014. Swelling clays and salt-affected soils: demixing of Na/Ca clays as the rationale for discouraging the use of sodium adsorption ratio (SAR). *Eurasian Journal of Soil Science* 3, 245-253.

Boutera, O., Mebarki, A., Bouaicha, F., Nouaceur, Z., Laignel, B., 2019. Groundwater quality assessment using multivariate analysis, geostatistical modeling, and water quality index (WQI): a case of study in the Boumerzoug-El Khroub valley of Northeast Algeria. *Acta Geochimica* 38, 796-814.

- Bradai, A., 2017. Evolution de la qualité géochimique des eaux souterraines utilisées dans l'irrigation et leur impact sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Thèse doctorat d'état.
- Bradai, A., Douaoui, A., 2013. Evolution géochimique de la solution des sols irrigués par les eaux à alcalinité résiduelle positive en conditions contrôlées. Application au Bas-Chélif. *Nature Technology*, 27-32.
- Bradai, 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, 04016023.
- Bradai, A., Douaoui, A., Hartani, T., 2012. Some problems of irrigation water management in lower Cheliff plain (Algeria). *Journal of Environmental Science and Engineering*. A 1, 271-278.
- Bradai, A., Douaoui, A., Marlet, S., 2008. Qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols dans la plaine du Bas-Cheliff, Algérie. *Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb*. Cirad, p. 7 p.
- Bradai, A., Douaoui, A., Marlet, S., Hartani, T., Bouarfa, S., 2011. La reconversion à l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation et ses risques dans le plaine du Bas-Chélif (Nord-Ouest d'Algérie). *Hommes la Terre, l'Eau*, 43-44.
- Bui, E., 2013. Soil salinity: a neglected factor in plant ecology and biogeography. *Journal of arid environments* 92, 14-25.
- Carillo, P., Annunziata, M.G., Pontecorvo, G., Fuggi, A., Woodrow, P., 2011. Salinity stress and salt tolerance. *Abiotic stress in plants—Mechanisms adaptations* 1, 21-38.
- Cassel, F., Goorahoo, D., Sharmasarkar, S., 2015. Salinization and yield potential of a salt-laden Californian soil: an in situ geophysical analysis. *Water, Air, & Soil Pollution* 226, 422.
- Castrignano, A., Maiorana, M., Fornaro, F., Lopez, N., 2002. 3D spatial variability of soil strength and its change over time in a durum wheat field in Southern Italy. *Soil and Tillage Research* 65, 95-108.
- Chandio, A.S., Lee, T.S., Mirjat, M.S., 2013. Simulation of horizontal and vertical drainage systems to combat waterlogging problems along the Rohri Canal in Khairpur District, Pakistan. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 139, 710-717.
- Chebbah, M., 2007. Lithostratigraphie, Sédimentologie et Modèles de Bassins des dépôts néogènes de la région de Biskra, de part et d'autre de l'Accident Sud Atlasique (Zibans, Algérie). Thèse doctorat d'état.
- Chevry, C., 1974. Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad: Dynamique des sels en milieu continental subaride dans des sédiments argileux et organiques (in French).
- Chevry, C., Bourrié, G., 2003. Salinisation of soils. *Soil, fragile interface*. INRA Editions, Paris, 129-150.
- Corwin, D., Lesch, S., Oster, J., Kaffka, S., 2006. Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma* 131, 369-387.

- Dai, J., Duan, L., Dong, H., 2015. Comparative effect of nitrogen forms on nitrogen uptake and cotton growth under salinity stress. *Journal of plant nutrition* 38, 1530-1543.
- Daoudi, A., Lejars, C., 2016. De l'agriculture oasisienne à l'agriculture saharienne dans la région des Zibans en Algérie. Acteurs du dynamisme et facteurs d'incertitude. *New Medit*, 45-52.
- Daoudi, A., Lejars, C., 2016. From oasis agriculture to Saharan agriculture in the Ziban region. Actors of dynamism and factors of uncertainty/De l'agriculture oasisienne a l'agriculture saharienne dans la region des Ziban en Algeria. Acteurs du dynamisme et facteurs d'incertitude. *New Medit* 15, 45-53.
- Davis, E., Wang, C., Dow, K., 2019. Comparing Sentinel-2 MSI and Landsat 8 OLI in soil salinity detection: a case study of agricultural lands in coastal North Carolina. *International Journal of Remote Sensing* 40, 6134-6153.
- De Martonne, E., 1926. Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité. *Météorologie* 2, 449-459.
- Debieche, T.H., 2002. Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle: application à la basse plaine de la Seybouse Nord-Est algérien. Thèse de doctorat. Besançon.
- Dehni, A., Lounis, M., 2012. Remote sensing techniques for salt affected soil mapping: application to the Oran region of Algeria. *Procedia Engineering* 33, 188-198.
- Delgado, C., Pacheco, J., Cabrera, A., Batllori, E., Orellana, R., Bautista, F., 2010. Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: The case of Yucatan, Mexico. *Agricultural Water Management* 97, 1423-1433.
- Delhomme, J., 1978. Kriging in the hydrosociences. *Advances in water resources* 1, 251-266.
- Derdour, H., 1981. Contribution à l'étude de l'influence du taux de sodium échangeable sur le comportement des sols au compactage. Thèse de doctorat.
- Djamai, R., 2007. Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du système endoréique du lac Fetzara (Nord-Est algérien). Thèse de doctorat. INA
- Djamai, R., Fadel, D., Laïfa, A., Benslama, M., Daoud, Y., Vallès, V.J.S.R.d.S.e.d.I.T., 2011. Le concept d'alcalinité résiduelle et évolution géochimique des processus. Application aux sols salés du lac Fetzara (Nord-Est algérien). 23, 90-98.
- Djihed, R., Bouhoun, D.M., Boutoutaou, D., Djaghoubi, A., 2017. Study of Hydro-Saline Characteristics of Soils a Palm Grove in Basin of Ouargla (Northern Algerian Sahara). *Journal of Agricultural Science Research* 1, 1-10.
- Douaïk, A., 2005. Evaluation of the space-time variability of soil salinity by statistical, geostatistical and bayesian maximum entropy methods. Ghent University.
- Douaoui AEK, Nicolas H, Walter C (2006) Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data *Geoderma* 134:217-230 doi:10.1016/j.geoderma.2005.10.009

- Douaoui, A., 2005. Variabilité spatiale de la salinité en relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chélif. Apport de la géostatistique et de la télédétection. Thèse Doct. d'Etat, INA-Alger.
- Douaoui, A., Hartani, T., 2007. Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Troisième atelier régional du projet Sirma. Cirad, p. 5 p.
- Douaoui, A., Hartani, T., Lakehal, M., 2006. La salinisation dans la plaine du Bas-Cheliff: acquis et perspectives. Economies d'eau en Systèmes IRigués au Maghreb. Deuxième atelier régional du projet SIRMA.
- Douaoui, A., Lepinard, P., 2010. Remote sensing & soil salinity: mapping of soil salinity in the Algerian plain "Lower-Cheliff". *Geomatics Expert* 76, 36-41.
- Douaoui, A., Nicolas, H., Walter, C., 2006. Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data. *Geoderma* 134, 217-230.
- Droubi, A., Cheverry, C., Fritz, B., Tardy, Y., 1976. Géochimie des eaux et des sels dans les sols des polders du lac Tchad: Application d'un modèle thermodynamique de simulation de l'évaporation. *Chemical Geology* 17, 165-177.
- Drouiche, A., Chaib, W., Rezeg, A., Bougherira, N., 2013. Risque de contamination des eaux souterraines par les nitrates en régions arides; cas d'Elghrous (Région des Ziban-Sud-Est Algérien). *Journal Algérien des Régions Arides*.
- DSA, 2013. Monographie agricole de la wilaya de Biskra. Direction des Services Agricoles (DSA) de la Wilaya de Biskra.
- DSA, 2013. Rapport annuelle des activités agricoles. Biskra, Algérie: Direction Des Services Agricoles.
- Durand, J., 1983. The irrigable soils agency Cultural and Technical Cooperation. Academic Press France.
- Durand, J., 1983b. Irrigable soils: a pedological study. *Irrigable soils: a pedological study*.
- Eldeiry, A.A., Garcia, L.A., 2011. Using indicator kriging technique for soil salinity and yield management. *Journal of irrigation and drainage engineering* 137, 82-93.
- Elhag, M., 2016. Evaluation of different soil salinity mapping using remote sensing techniques in arid ecosystems, Saudi Arabia. *Journal of Sensors* 2016.
- ESRI, 2011. ArcGIS desktop: release 10. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA.
- Essington, M.E., 2015. Soil and water chemistry: an integrative approach. CRC press.
- Fan, G., Qiang, H., Xiaoyi, S., Zhenglong, Y., 2011. Study on dynamic changes of the soil salinization in the upper stream of the Tarim river based on RS and GIS. *Procedia Environmental Sciences* 11, 1135-1141.
- FAOSTAT, F., 2010. Statistics division. Food and Agriculture Association of the United Nations (2013.): <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx# ancor>.

- Farifteh, J., Farshad, A., George, R., 2006. Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modelling, and geophysics. *Geoderma* 130, 191-206.
- Feller, C., 2013. Georges Aubert, 1913-2006, et les sols. IRD.
- Fernandez-Buces, N., Siebe, C., Cram, S., Palacio, J., 2006. Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation: A case study in the former lake Texcoco, Mexico. *Journal of Arid Environments* 65, 644-667.
- 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. *J Environmental monitoring assessment* 189, 177.
- Franzen, D., 2007. Salt accumulation processes. North Dakota state Univ., Fargo ND 58105.
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press on Demand.
- Gorji, T., Tanik, A., Sertel, E., 2015. Soil salinity prediction, monitoring and mapping using modern technologies. *Procedia Earth and Planetary Science* 15, 507-512.
- Grünberger, O., 2015. Dynamiques salines des sols des milieux arides et semi-arides. Thèse de doctorat. Université de Montpellier.
- Harivandi, M.A., 1999. Interpreting turfgrass irrigation water test results. UCANR Publications.
- 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, 681-687.
- Howari, F.M., Goodell, P.C., 2008. Characterization of salt-crust build-up and soil salinization in the United Arab Emirates by means of field and remote sensing techniques. *Remote Sensing of Soil Salinization*. CRC Press, pp. 154-167.
- Huang, C., Davis, L., Townshend, J., 2002. An assessment of support vector machines for land cover classification. *International Journal of remote sensing* 23, 725-749.
- Huete, A., Liu, H., De Lira, G., Batchily, K., Escadafal, R., 1994. A soil color index to adjust for soil and litter noise in vegetation index imagery of arid regions. *Proceedings of IGARSS'94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, pp. 1042-1043.
- Juan, P., Mateu, J., Jordan, 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, 62-72.
- Kebibèche, D., Daoudi, A., 2013. Dynamique des systèmes de production agricoles dans la commune d'El Ghrous, wilaya de Biskra. Mémoire d'ingénieur. ENSA-El-Harrach. Alger.
- Khan, N.M., Rastoskuev, V.V., Shalina, E.V., Sato, Y., 2001. Mapping salt-affected soils using remote sensing indicators-a simple approach with the use of GIS IDRISI.
- Kharytonov, M.M., Islem, B.M., Maatoug, M.h.J.E.R., Engineering, Management, 2018. Vegetation dynamics of Algerian's steppe ecosystem. Case of the region of Tiaret. 74, 60-70.

- Khiari, A., 2002. Une région pionnière dans le Sahara algérien: El Ghrouss. *Méditerranée* 99, 27-30.
- Kloppmann, W., Bourhane, A., Asfirane, F., 2011. Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau. Emploi des outils géochimiques, isotopiques et géophysiques. BRGM.
- Kotuby, J., Koenig, R., Kitchen, B., 1997. Salinity and Plant Tolerance. Utah State University Extension. AG-SO-03., Utah.
- 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., *Integrated groundwater management*. Springer, Cham, pp. 583-615.
- Lea, C., Curtis, A.J.N.P.S., Fort Collins, Colorado, USA, 2010. Thematic accuracy assessment procedures: National Park Service Vegetation Inventory, version 2.0. Natural Resource Report NPS/2010/NRR-2010/204.
- Leenaers, H., Okx, J., Burrough, P., 1990. Comparison of spatial prediction methods for mapping floodplain soil pollution. *Catena* 17, 535-550.
- 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, 82-88.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Llamas, M.R., Martínez-Santos, P., 2005. Intensive groundwater use: silent revolution and potential source of social conflicts. *American Society of Civil Engineers*.
- Lopez-Gunn, E., Ramón Llamas, M., 2008. Re-thinking water scarcity: Can science and technology solve the global water crisis? , *Natural Resources Forum*. Wiley Online Library, pp. 228-238.
- Lotfi, D., Yann, L., Gerhard, S., Mohamed, H., Rajouene, M., 2018. Identifying the origin of groundwater salinisation in the Sidi El Hani basin (central-eastern Tunisia). *Journal of African Earth Sciences* 147, 443-449.
- Luenberger, D.G., 1979. *Introduction to dynamic systems; theory, models, and applications*.
- Majdoub R, Hachicha M, El Amri A, Melki M (2012) Etude de la dynamique de l'eau et du transfert des sels dans un sol sablo-limoneux du Sahel Tunisien. *Eur J Sci Res* 80:499-507
- Margat, J., 2008. *Les eaux souterraines dans le monde*, BRGM Editions. UNESCO/BRGM, Paris/Orléans, France, 187pp.
- Margat, J., 2011. *Eaux souterraines et irrigations [Groundwater and Irrigation]*. Groundwater, 24th European ICID conference, Orléans, France, pp. 14-16.
- Marlet, S., 2004. Evolution des systèmes d'irrigation et gestion de la salinité des terres irriguées. Séminaire sur la modernisation de l'agriculture irriguée. IAV Hassan II, p. 11 p.
- Marlet, S., Job, J.-O., 2006. *Processus et gestion de la salinité des sols*.

- Marlet, S., Vincent, B., Vidal, A., Bouarfa, S., Wu, J., Yang, J., N'Diaye, M.K., Kuper, M., Zimmer, D., 2005. Gestion de l'eau et de la salinité et redistribution des sels dans les périmètres irrigués.
- Mashimbye, Z.E., 2013. Remote sensing of salt-affected soils. Stellenbosch: Stellenbosch University.
- Masoud, A., Koike, K., 2006. Arid land salinization detected by remotely-sensed landcover changes: A case study in the Siwa region, NW Egypt. *Journal of Arid Environments* 66, 151-167.
- Mathieu, C., Pieltain, F., 2003. Soil chemical analysis: methods chosen. *tec. and Doc.* Paris: Lavoisier, 374p.
- Matinfar, H.R., Panah, S.K.A., Zand, F., Khodaei, K., 2013. Detection of soil salinity changes and mapping land cover types based upon remotely sensed data. *Arabian Journal of Geosciences* 6, 913-919.
- McIntyre, D., 1979. Exchangeable sodium, subplasticity and hydraulic conductivity of some Australian soils. *Soil Research* 17, 115-120.
- Melgani, F., Bruzzone, L., 2004. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 42, 1778-1790.
- Mendoza, M.E., Granados, E.L., Geneletti, D., Pérez-Salicrup, D.R., Salinas, V., 2011. Analysing land cover and land use change processes at watershed level: a multitemporal study in the Lake Cuitzeo Watershed, Mexico (1975–2003). *Applied Geography* 31, 237-250.
- Metternicht, G., Zinck, J., 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote sensing of Environment* 85, 1-20.
- Munns, R., 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, cell & environment* 25, 239-250.
- Munns, R., Tester, M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59, 651-681.
- Ncibi, K., Chaar, H., Hadji, R., Baccari, N., Sebei, A., Khelifi, F., Abbes, M., Hamed, Y., 2020. A GIS-based statistical model for assessing groundwater susceptibility index in shallow aquifer in Central Tunisia (Sidi Bouzid basin). *Arabian Journal of Geosciences* 13, 98.
- Nezli, I., Achour, S., Djabri, L., 2007. Approche géochimique des processus d'acquisition de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'oued M'ya, (Ouargla). *Larhyss Journal*.
- 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.
- ONM, 2016. National Meteorological Office Climate data for the Biskra region.

- Otukei, J.R., Blaschke, T., 2010. Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12, S27-S31.
- Ouendeno, M.L., 2014. Le marché du foncier agricole et le développement de la plasticulture dans les zones de mise en valeur. Thèse de doctorat.
- Ouerdachi, L., Boutaghane, H., Hafsi, R., Tayeb, T.B., Bouzahar, F.J.E.P., 2012. Modeling of underground dams Application to planning in the semi arid areas (Biskra, Algeria). *Energy Procedia*, 18, 426-437.
- Pal, D., Kadu, P., Vaidya, P., Balpande, S., Satyavathi, P., Pal, D., 2003. Use of hydraulic conductivity to evaluate the suitability of Vertisols for deep-rooted crops in semiarid parts of central India. *Soil use and Management* 19, 208-216.
- Parida, A.K., Das, A.B., 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and environmental safety* 60, 324-349.
- Parkhurst, D., Appelo, C., 2005. PHREEQC-2 version 2.12: A hydrochemical transport model. US Geological Survey Central Region Research, USGS Water Resources Division.
- Pazand, K., Khosravi, D., Ghaderi, M.R., Rezvanianzadeh, M.R., 2018. Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater in a semi-arid region using major ion chemistry: A case study of Ardestan basin in Central Iran. *Groundwater for Sustainable Development* 6, 245-254.
- Pearson, R.L., Miller, L.D., 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie. *Remote sensing of environment*, VIII, p. 1355.
- Philippeau, G., Philippeau, G., 1986. Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales? Institut technique des céréales et des fourrages (ITCF).
- Qadir, M., Ghafoor, A., Murtaza, G., 2000. Amelioration strategies for saline soils: a review. *Land Degradation & Development* 11, 501-521.
- Qadir, M., Oster, J., Schubert, S., Noble, A., Sahrawat, K., 2007. Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Advances in agronomy* 96, 197-247.
- Qiao, H., Wan, X., 2019. Object-Based Classification from Tiangong-2 Using Support Vector Machine Optimized with Evolutionary Algorithm., *Proceedings of the Tiangong-2 Remote Sensing Application Conference*. Springer, pp. 222-231.
- Ramoliya, P., Pandey, A.J.N.Z.J.o.C., Science, H., 2003. Soil salinity and water status affect growth of *Phoenix dactylifera* seedlings. 31, 345-353.
- Rata, M., 2010. Variabilité spatio-temporelle de la salinité des sols dans la plaine du Bas Chéelif-Etablissement d'une Banque de Données. Mémoire de magistère université de Chlef.
- Rechachi MZ (2017) Impact de la qualité des eaux d'irrigation sur la salinisation des sols en régions arides et semi arides: cas de la région du Ziban., Thèse doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra.
- Rhoades, J., 1990. Determining soil salinity from measurements of electrical conductivity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 21, 1887-1926.

- Richa, A., Douaoui, A., Bettahar, N., Qiang, Z., & Mailhol, J. C. (2015). Assessment and modeling the influence of nitrogen input in the soil on groundwater nitrate pollution: plain of Upper Cheliff (North Algeria). *Global NEST Journal*, 17(4), 744-755.
- Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. LWW.
- Risacher, F., Fritz, B., 2009. Origin of salts and brine evolution of Bolivian and Chilean salars. *Aquatic Geochemistry* 15, 123-157.
- Rock, B., Vogelmann, J., Williams, D., Vogelmann, A., Hoshizaki, T., 1986. Remote Detection of Forest Damage: Plant responses to stress may have spectral “signatures” that could be used to map, monitor, and measure forest damage. *Bioscience* 36, 439-445.
- Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., 2009. L'Analyse de l'eau 9e édition Entièrement Mise À Jour Dunod Paris (in French).
- Roli, F., Fumera, G., 2001. Support vector machines for remote sensing image classification. *Image and Signal Processing for Remote Sensing VI. International Society for Optics and Photonics*, pp. 160-166.
- Rouse Jr, J.W., Deering, D., Haas, R., Welch, R., Harlan, J., Whitney, P., 1977. Applied regional monitoring of the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation in the Great Plains corridor.
- Safarbeiranvand, M., Amanipoor, H., Battaleb-Looie, S., Ghanemi, K., Ebrahimi, B., 2018. Quality evaluation of groundwater resources using geostatistical methods (case study: Central Lorestan Plain, Iran). *Water resources management* 32, 3611-3628.
- 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, 40.
- Shah, T., 2010. Taming the anarchy: Groundwater governance in South Asia. Routledge.
- Shahbaz M, Ashraf M (2013) Improving Salinity Tolerance in Cereals *Critical Reviews in Plant Sciences* 32:237-249 doi:10.1080/07352689.2013.758544
- Shrivastava P, 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* 22:123-131 doi:https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001
- Sonnenfeld, P., Perthuisot, J.-P., 1984. Brines and evaporites. Wiley Online Library.
- Staenz, K., Secker, J., Gao, B.-C., Davis, C., Nadeau, C., 2002. Radiative transfer codes applied to hyperspectral data for the retrieval of surface reflectance. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 57, 194-203.
- 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, 1163-1170.
- Szabolcs, I., Varallyay, G., 1979. Review of research on salt-affected soils. Unesco.
- Taher, M., Yossif, H., 2017. Change Detection of Land Cover and Salt Affected Soils at Siwa Oasis', Egypt. *Alexandria science exchange journal* 38, 446-462.

- Tejada, M., Gonzalez, J., 2008. Influence of two organic amendments on the soil physical properties, soil losses, sediments and runoff water quality. *Geoderma* 145, 325-334.
- USSLS, U., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: United States Department of Agriculture.
- Valles, V., 1987. Modélisation des transferts d'eau et de sels dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation. *Persée-Portail des revues scientifiques en SHS*.
- Vapnik, V., 1998. *Statistical Learning Theory*, New York, 1998. John Wiley and Sons, Inc.
- Walter, C., McBratney, A.B., Douaoui, A., Minasny, B., 2001. Spatial prediction of topsoil salinity in the Chelif Valley, Algeria, using local ordinary kriging with local variograms versus whole-area variogram. *Soil Research* 39, 259-272.
- Wang, J.J., Harrell, D.L., Bell, P.F.J.S.S.o.A.J., 2004. Potassium buffering characteristics of three soils low in exchangeable potassium. 68, 654-661.
- Wang, M., Wan, Y., Ye, Z., Lai, X., 2017. Remote sensing image classification based on the optimal support vector machine and modified binary coded ant colony optimization algorithm. *Information Sciences* 402, 50-68.
- Wang, Y., Deng, C., Liu, Y., Niu, Z., Li, Y.J.S.o.t.T.E., 2018. Identifying change in spatial accumulation of soil salinity in an inland river watershed, China. 621, 177-185.
- Webster, R., Oliver, M.A., 2007. *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley & Sons.
- Xi, C., JinFeng, Y., Zhi, C., GePing, L., Qing, S., WenQiang, X., 2009. A spatial geostatistical analysis of impact of land use development on groundwater resources in the Sangong Oasis Region using remote sensing imagery and data. *Journal of Arid Land* 1, 1-8.
- Yahiaoui, I., Douaoui, A., Zhang, Q., Ziane, A., 2015. Soil salinity prediction in the Lower Cheliff plain (Algeria) based on remote sensing and topographic feature analysis. *Journal of Arid Land* 7, 794-805.
- Yamaguchi T, Blumwald E (2005) Developing salt-tolerant crop plants: challenges and opportunities *Trends in Plant Science* 10:615-620, doi:<https://doi.org/10.1016/j.tplants>.
- Yang, J., 2006. Recent evolution of soil salinization in China and its driving processes. The 18th World Congress of Soil Science. A presentation in part.
- Yeh, A.G.o., Li, X., 1997. An integrated remote sensing and GIS approach in the monitoring and evaluation of rapid urban growth for sustainable development in the Pearl River Delta, China. *International Planning Studies* 2, 193-210.
- Youcef, D., Amor, H., 1994. Irrigation et salinisation au Sahara algérien. *Science et changements planétaires / Sécheresse* 5, 151-160.
- Zhang, J., Zhang, Y., Zhou, T., 2001. Classification of hyperspectral data using support vector machine. *Proceedings 2001 International Conference on Image Processing (Cat. No. 01CH37205)*. IEEE, pp. 882-885.
- Zouggari, H., 1996. Modélisation des interactions ioniques dans les solutions concentrées d'électrolytes à partir de l'étude expérimentale de la solubilité des sulfates de sodium et de

magnésium. Application aux saumures et aux sols salés en zone aride. Thèse de Doc. ENSA, Rennes France. 184p.

# Annexe

*Analyse physico-chimique de la première profondeur*

<i>échan</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>k</i>	<i>SO4</i>	<i>Cl</i>	<i>HCO3</i>	<i>CE</i>	<i>pH</i>	<i>SAR</i>
1	37,07	5,50	6,30	0,25	7,10	1,19	1,25	1,33	7,90	0,97
2	28,20	9,27	11,90	1,17	25,50	8,00	4,00	3,86	8,60	1,94
3	14,23	7,53	2,18	0,55	6,90	2,80	1,70	0,51	8,10	0,47
4	23,25	16,44	5,23	0,80	13,20	8,30	2,30	1,08	7,82	0,83
5	35,80	16,96	6,64	8,66	10,80	4,10	0,50	1,27	8,30	0,91
6	12,21	7,65	14,45	0,04	8,50	2,60	2,00	0,64	8,31	3,24
7	68,07	4,81	15,01	0,30	50,50	12,20	5,70	6,49	7,97	1,76
8	34,07	0,70	1,10	0,11	13,00	6,40	1,00	0,78	8,18	0,19
9	30,86	8,10	23,41	0,18	5,50	3,80	1,50	0,45	8,29	3,75
10	38,23	11,24	13,37	1,49	7,18	12,50	4,50	3,01	8,12	1,90
11	42,68	5,72	9,31	0,60	19,30	9,20	3,50	1,64	7,93	1,34
12	17,44	24,34	5,26	0,30	11,20	7,80	2,70	1,27	8,41	0,81
13	47,86	18,10	17,61	1,42	7,00	4,20	11,50	2,01	7,84	2,17
14	8,01	6,46	11,37	0,05	6,70	2,30	1,20	0,93	8,53	2,99
15	62,87	25,39	28,65	0,70	39,00	8,40	2,50	5,37	8,70	3,05
16	40,86	8,84	7,35	0,07	33,00	6,20	3,30	2,87	8,92	1,04
17	27,27	10,48	13,48	0,08	18,30	4,80	4,20	1,88	8,07	2,19
18	38,86	4,41	27,33	0,40	16,00	3,90	3,40	2,01	7,74	4,15
19	20,06	2,03	11,06	0,99	13,00	4,25	2,10	0,62	8,10	2,35
20	55,27	19,72	21,97	1,33	25,50	7,60	2,90	2,90	8,19	2,54
21	76,87	20,29	36,33	1,44	3,80	11,80	5,30	3,41	8,70	3,69
22	19,25	2,81	4,85	0,55	13,00	4,40	23,00	0,78	8,00	1,03
23	9,42	3,05	2,43	0,07	17,50	4,10	0,80	1,41	7,80	0,69

24	16,83	5,27	3,80	0,12	18,70	6,00	1,50	1,73	8,15	0,81
25	24,65	1,50	5,65	2,60	17,00	3,80	1,60	1,16	8,35	1,10
26	45,25	14,86	4,96	0,06	17,45	5,30	3,50	2,30	8,14	0,64
27	21,47	3,41	5,30	0,05	17,80	6,90	0,80	1,60	8,10	1,06
28	33,46	8,89	5,48	0,10	11,20	4,50	3,50	2,60	7,80	0,84
29	31,26	3,65	5,38	0,17	9,70	3,80	2,80	1,73	7,80	0,91
30	11,64	4,46	6,45	0,09	5,80	1,80	0,20	0,70	7,70	1,61
31	40,06	1,50	7,50	0,04	5,50	3,60	1,90	2,26	8,30	1,16
32	45,27	7,05	19,96	0,50	9,80	5,41	3,20	1,40	8,40	2,76
33	13,21	21,10	15,33	0,10	13,40	5,60	31,00	1,80	8,20	2,62
34	19,63	3,41	6,46	0,05	2,80	8,65	1,80	1,50	7,80	1,35
35	17,86	2,43	5,70	0,08	15,70	8,00	1,30	1,70	8,11	1,27
36	16,41	4,81	2,40	1,30	16,40	8,30	0,60	1,30	7,78	0,52
37	57,15	13,21	16,49	0,25	5,60	19,25	1,50	1,50	7,90	1,97
38	41,57	15,24	12,63	0,03	6,80	18,50	2,80	1,90	8,00	1,68
39	11,50	4,70	5,47	0,01	7,50	3,80	0,60	0,45	8,10	1,36
40	35,25	7,68	6,08	1,35	12,90	8,00	0,20	1,80	7,90	0,93
41	49,12	14,23	19,06	0,50	17,30	9,80	3,80	3,40	8,10	2,39
42	33,48	9,65	1,30	0,10	6,80	1,80	0,80	0,55	7,90	0,20

*Analyse physico-chimique de la deuxième profondeur*

<i>échan</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>k</i>	<i>SO4</i>	<i>Cl</i>	<i>HCO3</i>	<i>SAR</i>	<i>ph</i>	<i>CE</i>
1	36,07	1,50	3,65	0,17	7,40	1,12	0,25	0,60	7,90	1,33
2	16,03	5,27	0,68	0,17	25,50	3,50	0,50	0,15	8,30	3,86
3	17,23	10,53	0,18	0,55	6,00	2,80	1,00	0,03	8,00	0,51
4	27,25	19,44	0,23	0,61	11,20	6,30	1,00	0,03	7,70	1,08
5	38,48	12,96	21,37	11,66	3,80	4,10	1,00	2,98	8,40	1,27
6	7,21	3,65	17,45	0,04	3,50	1,80	2,00	5,30	7,70	0,64
7	36,07	0,81	9,01	0,19	21,50	7,50	3,00	1,48	8,00	6,49
8	36,07	0,41	1,35	0,11	16,00	8,40	1,00	0,22	8,25	0,78
9	30,86	8,10	26,41	0,18	6,50	2,80	2,00	4,23	8,20	0,45
10	17,23	3,24	3,37	0,49	2,18	5,50	3,00	0,74	8,10	3,01
11	41,68	1,62	3,31	0,08	18,00	6,20	2,50	0,50	7,90	1,64
12	18,44	11,34	3,26	0,21	15,20	3,80	1,80	0,60	8,30	1,27
13	28,86	8,10	7,61	0,42	2,00	1,20	9,00	1,25	7,80	2,01
14	6,01	4,46	5,37	0,02	5,70	1,80	-	1,66	8,40	0,93
15	32,87	15,39	5,65	0,14	27,00	3,90	1,50	0,81	8,60	5,37
16	30,86	2,84	0,35	0,03	29,00	4,20	2,30	0,06	8,70	2,87
17	33,27	6,48	3,48	0,08	17,00	2,80	3,10	0,55	7,90	1,88
18	30,86	0,41	16,33	0,21	11,00	1,90	2,40	2,92	7,90	2,01
19	30,06	2,03	9,06	0,99	19,00	2,25	2,10	1,60	8,10	0,62
20	35,27	9,72	1,97	0,33	15,50	3,60	1,90	0,29	8,30	2,90
21	36,87	7,29	16,33	0,44	1,80	4,80	2,30	2,46	8,60	3,41
22	23,25	0,81	2,85	0,55	16,00	5,40	2,70	0,58	7,90	0,78
23	8,42	4,05	0,43	0,07	20,50	5,10	0,90	0,12	7,90	1,41

24	16,83	5,27	1,80	0,12	18,70	3,90	0,50	0,38	8,30	1,73
25	25,65	-	3,65	2,32	15,00	1,80	1,30	0,72	8,40	1,16
26	25,25	4,86	0,96	0,06	10,45	2,30	1,50	0,17	8,10	2,30
27	34,47	0,41	1,30	0,05	30,00	8,90	1,80	0,22	8,20	1,60
28	28,46	6,89	2,48	0,06	6,00	2,50	2,50	0,42	7,90	2,60
29	31,26	3,65	0,38	0,17	8,70	3,10	2,70	0,06	8,00	1,73
30	21,64	4,46	0,45	0,07	10,80	1,80	0,40	0,09	7,80	0,70
31	30,06	-	3,50	0,04	3,50	2,60	0,90	0,64	8,40	2,26
32	35,27	4,05	10,96	0,03	5,80	3,41	1,20	1,75	8,30	1,40
33	3,21	8,10	5,33	0,06	7,40	1,60	2,10	1,59	8,10	1,80
34	15,63	0,41	0,46	0,05	1,80	4,00	1,50	0,11	7,80	1,50
35	28,86	2,43	1,70	0,08	25,70	10,00	2,30	0,30	8,20	1,70
36	6,41	0,81	0,40	0,95	11,40	5,30	0,30	0,15	7,90	1,30
37	27,15	3,21	6,49	0,15	4,60	12,25	0,50	1,18	8,00	1,50
38	31,57	5,24	2,63	0,03	7,80	10,50	1,70	0,43	8,00	1,90
39	27,50	4,70	2,47	0,01	12,60	5,80	1,00	0,44	8,10	0,45
40	55,25	13,68	2,08	1,24	24,90	13,00	0,20	0,25	8,00	1,80
41	25,12	4,23	9,06	0,09	9,30	4,80	2,10	1,67	8,00	3,40
42	35,48	7,65	0,30	0,10	5,80	1,70	0,80	0,05	7,90	0,55

# Production scientifique



# Geochemical characterization of the salinity of irrigated soils in arid regions (Biskra, SE Algeria)

Mohamed Amine Abdennour<sup>1</sup> · Abdelkader Douaoui<sup>2</sup> · Jesús Barrena<sup>3</sup> · Manuel Pulido<sup>3</sup> · Abdelhamid Bradai<sup>4</sup> · Amel Bennacer<sup>5</sup> · Chiara Piccini<sup>6</sup> · Alberto Alfonso-Torreño<sup>3</sup>

Received: 2 April 2020 / Revised: 4 July 2020 / Accepted: 4 August 2020

© Science Press and Institute of Geochemistry, CAS and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2020

**Abstract** The agriculture in Biskra, southeastern Algeria, is based on traditional practices and characterized by small irrigated fields. In the last decades, the increasing demand in water as well as the scarcity of rainfall has forced many farmers to use groundwater of low quality to maintain the profitability of their crops. Unfortunately, this practice seems to be the main harmful factor for soil quality in the region since it is responsible for the salinization of the irrigated areas. Aiming to assess the impact of this phenomenon, the soils of the irrigated perimeter of El Ghrous—a representative rural community located in the west of Biskra—have been analyzed. A set of 82 soil samples was collected from top and subsoil (0–15 and 15–35 cm respectively), on which the following physico-chemical analyzes were performed:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,

$\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , pH, electrical conductivity (EC) and sodium adsorption ratio. A Principal Component Analysis was performed to individuate the geochemical processes that influenced significantly the evolution of soil salinity and its pathways. The results showed a calcium sulfate ( $\text{CaSO}_4$ ) facies with a high risk of salinity and a low to medium risk of alkalinity. The calcite residual alkalinity and generalized residual alkalinity decreased as the solutions became more concentrated. Most of the samples were oversaturated in carbonate minerals (aragonite, calcite, and dolomite) and undersaturated in evaporitic minerals (anhydrite, gypsum, and halite). Finally, two multiple linear regressions (using cations and anions as independent variables) have been proposed to quantify soil salinity. These equations, with an accuracy of 85 %, can represent a time and money-saving tool for managers and farmers to estimate the EC, in comparison to the traditional estimation methods.

✉ Mohamed Amine Abdennour  
ma.abdennour@univ-biskra.dz;  
abdennourmohamedamine@gmail.com

- <sup>1</sup> Laboratory of Ecosystem Diversity and Agricultural Production System Dynamics in Arid Zones (DEDSPAZA), Mohamed Khider University, 07000 Biskra, Algeria
- <sup>2</sup> Laboratory of Crop Production and Sustainable Valorization of Natural Resources, Djilali Bounaama University, 44225 Khemis Miliana, Algeria
- <sup>3</sup> GeoEnvironmental Research Group, University of Extremadura, 10071 Cáceres, Spain
- <sup>4</sup> Laboratory of Water and Environment, Hassiba Ben Bouali University, 02180 Chlef, Algeria
- <sup>5</sup> Laboratory of Valorization and Conservation of Biological Resources, Faculty of Sciences, Mohamed Bougara University, 35000 Boumerdes, Algeria
- <sup>6</sup> Research Centre for Agriculture and Environment, Council for Agricultural Research and Economics, Via della Navicella 2-4, 00184 Rome, Italy

**Keywords** Electrical conductivity · Cations · Anions · Soil quality · Saturation index · PHREEQC

## 1 Introduction

Soil salinization is a dynamic issue that constitutes a chronic threat to physicochemical soil properties (Besser et al. 2017). On a global scale, the estimated loss of arable land through soil salinization and alkalization amounts to about 10 Mha each year (Jalali 2007). Thus, in arid regions, several researchers investigated the effects of soil salinization on crop production, in Tunisia (Besser et al. 2017; Haj-Amor et al. 2017), Egypt (Salem and Osman 2017), Spain (Niñerola et al. 2017), Iran (Jalali 2007), and China (Wang et al. 2015). Salinization occurred in many



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

# Environmental and Sustainability Indicators

journal homepage: [www.journals.elsevier.com/environmental-and-sustainability-indicators/](http://www.journals.elsevier.com/environmental-and-sustainability-indicators/)

## Predictive mapping of soil electrical conductivity as a Proxy of soil salinity in south-east of Algeria



Mohamed Amine Abdenmour<sup>a,\*</sup>, Abdelkader Douaoui<sup>b</sup>, Chiara Piccini<sup>c</sup>, Manuel Pulido<sup>d</sup>,  
Amel Bennacer<sup>e</sup>, Abdelhamid Bradai<sup>f</sup>, Jesús Barrena<sup>d</sup>, Ibrahim Yahiaoui<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Laboratory of Ecosystem Diversity and Agricultural Production System Dynamics in Arid Zones (DEDSPAZA), Mohamed Khider University, Biskra, 07000, Algeria

<sup>b</sup> Laboratory of Crop Production and Sustainable Valorization of Natural Resources, Djilali Bounaama University, Khemis Miliana, 44225, Algeria

<sup>c</sup> Council for Agricultural Research and Economics, Research Centre for Agriculture and Environment, Via Della Navicella 2-4, 00184, Rome, Italy

<sup>d</sup> GeoEnvironmental Research Group, University of Extremadura, Cáceres, 10071, Spain

<sup>e</sup> Laboratory of Valorization and Conservation of Biological Resources, Faculty of Sciences, Mohamed Bougara University, Boumerdes, BP, 35000, Algeria

<sup>f</sup> Laboratory of Water and Environment, Hassiba Ben Bouali University, Chlef, 02180, Algeria

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Ordinary kriging  
Cokriging  
Indicator kriging  
Spatial variability  
Saturation index  
Biskra

### ABSTRACT

In semi-arid and arid areas soil salinity has adverse effects both on the environment and agricultural production. The region of Biskra (South-East of Algeria) underwent a strong agricultural transformation from traditional oasis agriculture to an almost exclusive production of dates involving market gardening throughout the year. The main goal was to predict the spatial variation of EC using geostatistics and a Geographic Information System (GIS), comparing also the performance of two classical geostatistical interpolators - Ordinary Kriging (OK), using only point data, and Cokriging (CK), introducing also auxiliary variables to improve prediction accuracy (SI gypsum and  $SO_4^{2-}$ , obtained from the analysis of the chemical and geochemical processes of soil salinization). For this study, a total of 42 soil samples were randomly collected from topsoil (0–15 cm) in the irrigated perimeter of El Ghrous, a representative rural community located in the west of Biskra. Aiming to better understand the processes that most influence the evolution of soil salinity in this area, some chemical parameters were determined, among which the electrical conductivity (EC). Moreover, some terrain parameters were derived from a digital elevation model as auxiliary information, and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated from satellite imagery. The prediction efficiency of the methods was evaluated by calculating the mean error (ME) and the root mean square error (RMSE). The resulting maps showed that soils in the study area are affected by salinization. Cross-validation results showed a better performance in estimating EC of CK, after the introduction of the covariates, than OK, with an RMSE value of 0.92 vs. 1.53. This suggests a greater efficiency of CK in EC prediction in this area, confirming that the introduction of some auxiliary data correlated to the target variable significantly improves the interpolation. A third kriging technique, Indicator Kriging (IK) was applied to generate a map of the probability of exceeding a given threshold.

### 1. Introduction

Understanding how soil properties vary in space is a key issue for making fair decisions within a framework of sustainable agriculture (Norouzi et al., 2010; Chagas et al., 2018). In the particular case of the province of Biskra (South-East of Algeria) the arid conditions have forced farmers to use groundwater for irrigation, but the utilized groundwater not always has an acceptable quality. This influences largely both soil quality and crop yields, leading to land degradation in several cases, as well as the agricultural development (Boufekane and Saighi, 2016;

Adimalla and Taloor, 2020).

The Biskra region is characterized by a strong phonicultural potential (date palm) with more than 5 million date palms and nearly 100,000 water points (wells and boreholes) (Rechachi, 2017). All these potentials constitute a factor of progress and improvement of the living conditions of the local population and food satisfaction at the country level (Rechachi, 2017). Unfortunately, this achievement is threatened by an irrational management of the resources, particularly the soil. Agricultural land surface in the region of Biskra has increased from 87,187 ha in 2008 to 105,927 ha in 2015, i.e. an increase of 17.5% according to the

\* Corresponding author.

E-mail address: [ma.abdenmour@univ-biskra.dz](mailto:ma.abdenmour@univ-biskra.dz) (M.A. Abdenmour).

<https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100087>

Received 16 May 2020; Received in revised form 2 November 2020; Accepted 19 November 2020

Available online 24 November 2020

2665-9727/© 2020 Published by Elsevier Inc. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

# Application of kriging techniques for assessing the salinity of irrigated soils: the case of El Ghrous perimeter, Biskra, Algeria

## AUTHORS

Abdenmour M. A.<sup>\*,1</sup>  
ma.abdenmour@univ-biskra.dz

Douaoui A.<sup>2</sup>

Bradai A.<sup>3</sup>

Bennacer A.<sup>4</sup>

Pulido Fernández M.<sup>5</sup>

\* Corresponding Author

<sup>1</sup>Laboratory of ecosystem diversity and agricultural production system dynamics in arid zones (DESPAZA), Faculty of Natural Sciences and Life, Agronomy Department, University of Mohamed Khider of Biskra, Algeria.

<sup>2</sup>University Center of Morsli Abdellah, Tipaza 42000, Algeria. Laboratory of Crop Production and Sustainable Valorization of Natural Resources, University of Djilali Bounaama-Khemis Miliana, Ain Defla 44225, Algeria.

<sup>3</sup>Laboratory of Water and Environment, Faculty of Natural Sciences and Life, Department of Water, Environment and Sustainable Development, University of Hassiba Benbouli, Chlef, Algeria.

<sup>4</sup>Laboratory of Valorization and Conservation of Biological Resources, Faculty of Sciences, University M'hamed Bougara of Boumerdes, Algeria.

<sup>5</sup>Geo-Environmental Research Group, University of Extremadura, Avenida de la Universidad s/n. 10071 Cáceres, Spain.

*Aplicación de técnicas de kriging para estimar la salinidad de suelos bajo riego: el caso del perímetro de El Ghrous, Biskra, Algeria*  
*Aplicação de técnicas de kriging para avaliar a salinidade de solos sujeitos a rega: o caso do perímetro de El Ghrous, Biskra, Argélia*

Received: 25.02.2019 | Revised: 16.05.2019 | Accepted: 04.06.2019

## ABSTRACT

In semi-arid and arid areas, soil salinity has adverse effects both on the environment and agricultural production. The main causes of this salinization come from natural or anthropogenic processes, which is certainly an environmental problem that affects more than 20% of the world's land. This study was made in order to map the spatial distribution of soil salinity of the irrigated perimeter of El Ghrous in southeastern Algeria. These maps were performed based on data collected from 190 soil samples from 0 to 15 cm deep. We used ordinary kriging (OK) to analyze the spatial variability of soil salinity, while indicator kriging (IK) was used to analyze salinity versus threshold values. The salinity map predicted by the electrical conductivity (EC) values using the ordinary kriging (OK) method showed the different classes of salinity according to Durand's classification with moderately saline 3rd order dominance, while the unsalted soil ( $EC < 0.6 \text{ dS m}^{-1}$ ) represents a very low percentage (1.5%). The indicator kriging (IK) was carried out by four thresholds which correspond to the salinity class limits:  $EC > 0.6$ ,  $EC > 1$ ,  $EC > 2$ ,  $EC > 3$ , and  $EC > 4 \text{ dS m}^{-1}$ , for developing probability maps to determine risk areas. This study has shown the spatial trend of soil salinity by geolocation of different classes, and to carry out risk maps using geostatistical techniques.

## RESUMEN

*En zonas semiáridas y áridas, la salinidad del suelo tiene efectos adversos sobre el medio ambiente y la producción agrícola. La salinización es un proceso natural y/o inducido por el ser humano que afecta a más del 20% de la superficie mundial y que no para de crecer preocupantemente día tras día. El objetivo de este estudio fue elaborar mapas de distribución espacial de la salinidad en el perímetro irrigado de El Ghrous, en el sureste de Argelia. Estos mapas se realizaron a partir de datos recogidos de 190 muestras de suelo de 0 a 15 cm de profundidad. Se usó kriging ordinario (OK) para analizar la variabilidad espacial de la salinidad del suelo, mientras que el kriging indicador (IK) se utilizó para analizar la salinidad en función de sus valores umbrales. El mapa de salinidad usando valores de conductividad eléctrica (CE) obtenido por OK mostró las diferentes clases de salinidad establecidas por Durand, donde dominaron los valores de salinidad moderada de 3er orden, mientras que los suelos no salinos ( $CE < 0,6 \text{ dS m}^{-1}$ ) representaron un porcentaje muy bajo (1,5%). El IK fue usado con 4 valores umbrales que corresponden a los límites de salinidad utilizados para elaborar los mapas de riesgo:  $CE > 0,6$ ,  $CE > 1$ ,  $CE > 2$ ,  $CE > 3$  y  $CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$ . Este estudio ha mostrado la tendencia espacial de la salinidad del suelo localizando espacialmente sus diferentes clases y ha servido para producir mapas de riesgo mediante técnicas de geoestadística.*

## DETECTION OF SOIL SALINITY AS A CONSEQUENCE OF LAND COVER CHANGES AT EL GHROUS (ALGERIA) IRRIGATED AREA USING SATELLITE IMAGES

ABDENNOUR Mohamed Amine<sup>1\*</sup>, DOUAOUI Abdelkader<sup>2</sup>, BENNACER Amel<sup>3</sup>, Manuel Pulido Fernandez<sup>4</sup> and BRADAI Abdelhamid<sup>5</sup>

1. University of Mohamed Khider., Biskra, Faculty of Natural Sciences and Life, Agronomy department, Laboratory of Ecosystem diversity and agricultural production system dynamics in Arid Zones, Biskra, Algeria

2. University of Morsli Abdellah, Tipaza, Laboratory of Crop Production and Sustainable Valorization of Natural Resource, Algeria. of Djilali Bounaama-KhemisMiliana, Ain-Defla 44225, Algeria

3. University M'hamed Bougara of Boumerdes, Faculty of Sciences, Laboratory of Valorization and Conservation of Biological Resources, Algeria

4. University of Extremadura, Geo Environmental Research Group, Avenue. of the University s/n, 10071, Caceres, Spain

5. University of Hassiba Benbouli, Chlef, Faculty of Natural Sciences and Life, department of Water, Environment and Sustainable Development, Laboratory of Water and Environment, Algeria

*Reçu le 20/05/2019, Révisé le 09/06/2019, Accepté le 10/06/2019*

### Abstract

**Description of the subject:** Remote sensing is an important tool for studying soil characteristics, such as salinity and for monitoring changes in land cover and land use.

**Objective:** This study aims to examine the applicability of Landsat imagery data for soil salinity prediction in El Ghrous palm groves and for the detection of land-use changes that occurred between 2009 and 2017.

**Methods:** Two methods were assessed for the detection of salty soils, the first one; use of spectral indices, which are derived from the Landsat 8OLI satellite image and second one, is application of a non-parametric supervised classification for the detection of changes in land.

**Results:** Combinations between image data and field measurements show that there is not significant correlation. Landsat imagery has shown that the study area has different soil cover units. The superposition map produced indicated major changes in the class of vegetable crops under cover (plasticulture), and a decrease in the surface of salty grounds 9% to 5% during this period.

**Conclusion:** The results of this study explain the expansion in land use mainly for the plasticulture sector and show the advantage of agricultural land development project.

**Keywords:** Salinity index ; Supervised classification ; Land use ; Change detection ; Satellite image.

## DÉTECTION DE LA SALINITÉ DES SOLS EN CONSÉQUENCE DES CHANGEMENTS DE COUVERTURE DE TERRE DANS LE PÉRIMÈTRE IRRIGUÉ D'EL GHROUS (ALGÉRIE) À L'AIDE D'IMAGES SATELLITES

### Résumé

**Description du sujet :** La télédétection est un outil important pour l'étude des caractéristiques du sol, telles que la salinité, et pour la surveillance des changements dans la couverture et l'utilisation des sols.

**Objectifs :** Cette étude vise à examiner l'applicabilité des données d'imagerie Landsat pour la prévision de la salinité des sols dans les palmeraies El Ghrous et pour la détection des changements d'affectation des sols survenus entre 2009 et 2017.

**Méthodes :** Deux méthodes ont été évaluées pour la détection des sols salins, la première : l'utilisation d'indices spectraux dérivés de l'image satellite Landsat 8OLI et la seconde, l'application d'une classification non paramétrique supervisée pour la détection des changements des terres.

**Résultats :** Les combinaisons entre les données d'images et les mesures sur le terrain montrent qu'il n'y a pas de corrélation significative. L'imagerie Landsat a montré que la zone d'étude a différentes unités de couverture du sol. La carte de superposition produite indique des changements majeurs dans la classe des cultures légumières sous abri (plasticulture), et une diminution de la surface des sols salins de 9 à 5 % durant cette période.

**Conclusion :** Les résultats de cette étude expliquent l'expansion de l'utilisation des terres principalement pour le secteur de la plasticulture et montrent l'avantage du projet de développement des terres agricoles.

**Mots clés:** Indice de salinité; Classification supervisée; Utilisation des terres ; Détection de changement; image satellite.

\* Auteur correspondant: ABDENNOUR Mohamed Amine, E-mail: ma.abdenmour@univ-biskra.dz



## Performance of random forest and buffer analysis of Sentinel-2 data for modelling soil salinity in the Lower-Cheliff plain (Algeria)

Ibrahim Yahiaoui <sup>a</sup>, Abdelhamid Bradai <sup>b</sup>, Abdelkader Douaoui <sup>a,c</sup>  
and Mohamed Amine Abdennour <sup>d</sup>

<sup>a</sup>Laboratory of Crop Production and Sustainable Valorization of Natural Resources, Department of Biology, Faculty of Nature, Life & Earth Sciences, University Djilali Bounaama of Khemis Miliana, Khemis Miliana, Algeria; <sup>b</sup>Laboratory of Water and Environment, Faculty of Nature & Life Sciences, Department of Water, Environment and Sustainable Development, University Hassiba Ben Bouali, Chlef, Algeria; <sup>c</sup>Department of Nature and Life Sciences, Institute of Science, University Center Morsli Abdellah of Tipaza, Tipaza, Algeria; <sup>d</sup>Laboratory of Ecosystem Diversity and Agricultural Production System Dynamics in Arid Zones, Department of Agronomy, Faculty of Nature and Life Sciences, University of Mohamed Khider, Biskra, Algeria

### ABSTRACT

Modelling approaches are becoming an efficient tool in the forecasting of the salinization spread impact on the local and global scales. In the Lower-Cheliff plain, updating the information on soil salinity expansion is more than required as it continues to damage the agricultural environment in there. Through this study, we adopted an artificial methodology that consists of a combination of buffer analysis using Sentinel-2 data and machine learning modelling to assess their aptitude in the prediction and mapping of soil salinity. The adopted random forest (RF) algorithm included the reflectance information from the bands from Blue ( $\rho_{\text{Blue}}$ ), Green ( $\rho_{\text{Green}}$ ), Red ( $\rho_{\text{Red}}$ ), Near infrared (NIR), Vegetation red-edge (VRE) and Shortwave Infrared (SWIR), optimized with the geospatial buffering based on the 91 soil random samples collected during the summer of 2019 and measured for the Electrical Conductivity (EC) in the laboratory. The outputs from the geospatial buffering refined the goodness of the correlation between field data and the variables set from bands reflectance and selected salinity indices. The obtained coefficient of determination ( $R^2$ ) with Multiple Linear Regression (MLR) and Partial Least Square regression (PLS) models proved an improvement in the multivariable prediction of soil salinity with the optimized Sentinel-2 data ( $R^2 = 0.61$  and  $0.68 + \text{RMSE of } 3.36 \text{ and } 2.87 \text{ dS m}^{-1}$  respectively), compared to the results from the 2015 multiple regression model. Given the high values of  $R^2 = 0.77$  and  $0.95$  and the low values of  $\text{RMSE} = 2.29$  and  $1.18 \text{ dS m}^{-1}$  respectively; the RF regressor was very efficient in predicting EC either with all variables or with selected variables from the variable importance measure based on the mean decrease accuracy (MDA). The random forest classifier performed top of the range classification with an overall Accuracy (OA) about 99%, estimating that over 75% of the study area surface is suffering from the salinization extent.

### ARTICLE HISTORY

Received 22 June 2020  
Accepted 31 August 2020

**CONTACT** Ibrahim Yahiaoui  [i.yahiaoui@univ-dbkm.dz](mailto:i.yahiaoui@univ-dbkm.dz)  Laboratory of Crop Production and Sustainable Valorization of Natural Resources, Department of Biology, Faculty of Nature, Life & Earth Sciences, University Djilali Bounaama of Khemis Miliana, Khemis Miliana 44225, Algeria



# Soil erosion in Mediterranean chestnut tree plantations at risk due to climate change and land abandonment

Jesús Barrena-González<sup>1\*</sup>, Javier Lozano-Parra<sup>2</sup>, Alberto Alfonso-Torreño<sup>1</sup>, Carlos Lozano-Fondón<sup>3</sup>, Mohamed Amine Abdennour<sup>4</sup>, Artemi Cerdà<sup>5</sup> and Manuel Pulido-Fernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INTERRA Research Institute, University of Extremadura, Avenida de la Universidad s/n, 10071 Cáceres, Spain

<sup>2</sup> Institute of Geography, Pontificia Universidad Católica de Chile, Avda, Vicuña Mackenna 4860, Santiago de Chile, Chile

<sup>3</sup> University of Parma, Life Sciences and Environmental Sustainability, Park Area of Sciences 11/a, 43124 Parma, Italy

<sup>4</sup> University of Mohamed Khider of Biskra, Faculty of Natural Sciences and Life, 07000 Biskra, Algeria

<sup>5</sup> University of Valencia, Soil Erosion and Degradation Research Group (SEDER), Blasco Ibañez 28, 46010-Valencia, Spain

## Abstract

Chestnut cultivation is a type of traditional centennial exploitation in southern areas of Extremadura. Currently, chestnut is in danger of extinction due to the effects of climate change, some diseases (*e.g. Cryphonectria parasitica*) and land mismanagement. The high temporal variability of rainfall leads to soil erosion in chestnut cultivation. New forms of management are proposed to try, among other things, to reduce soil losses. This study quantifies soil losses in areas under tree canopies and open areas considering two different age plantations; 1990s and 1960s. To achieve the proposed goal 18 erosion plots were installed as paired plots under tree canopies and open areas in both plantations. The total amount of rainfall per event, tree cover, bare soil, runoff coefficient and sediment concentration were also measured in every plot. The results showed that the highest percentage of bare soil (> 45%) coincides with the period of greatest tree cover (> 75%). The open areas and the youngest plantation showed soil losses higher than the areas under the tree and the oldest plantation. In addition, soil losses increase as higher percentages of bare soil are recorded. We conclude that the size of the trees and a better soil stability in older plantations help reduce soil losses.

**Key words:** soil losses; land management; rural areas; traditional crops; sustainability

Editor: Bohdan Konôpka

## 1. Introduction

There are many theories relating to the origin of chestnut trees but no clear evidence has appeared yet about the existence of this species in Europe. Some authors are frequently considering that a natural origin of chestnut trees exists in eastern Europe (Martín et al. 2007). Something similar happens in the Iberian Peninsula with the natural origin of this specie. The hypothesis most accepted has been an introduction by the human bounded to the stage of the Roman Empire during the reconquest (Conedera & Krebs 2007). Nevertheless, some recent researches have shown the presence of chestnut trees before to the Roman era (Pulido et al. 2007).

In Europe, the chestnut tree can be found in many countries. France occupies the first position followed by Italy and Spain (Conedera et al. 2016). Also, the presence of this specie involves that the sweet chestnut (*Castanea sativa*) industry have a great economic potential in some

countries in Europe (Centeno et al. 1998). The chestnut tree appears in Iberian Peninsula in almost all territory (Conedera et al. 2016), especially in areas in which accumulated rainfall is above to 1,000 mm y<sup>-1</sup> within an altitudinal range between 500 and 1,200 m, with a cultivated area of 36,682 ha. The largest area of chestnut trees is in Galicia (24,592 ha) followed by Andalusia (8,856 ha) and Extremadura (2,481 ha) according to the Ministry of Agriculture, Fisheries and Food in 2018. In Extremadura, the chestnut trees are mainly located in mountain areas due to weather conditions.

The chestnut trees crop has had a large tradition in Europe since Roman period until today (Conedera et al. 2004), hence the extension of this crop occupies the most varied range of landscapes and soils. Acid soils are the best pedological type for the development of chestnuts since it has low clay content and a high percentage of organic matter (Berrocal 1998). Currently, traditional

\*Corresponding author. Jesús Barrena-González, e-mail: [jesusbarrena@unex.es](mailto:jesusbarrena@unex.es)

Article

# Identifying Problems in Watering Ponds with Different Purposes

Manuel Pulido <sup>1,\*</sup>, Alberto Alfonso-Torreño <sup>1</sup>, Jesús Barrena-González <sup>1</sup>,  
Rafael Robina-Ramírez <sup>2</sup> and Mohamed Amine Abdennour <sup>3</sup>

<sup>1</sup> GeoEnvironmental Research Group (GIGA), University of Extremadura, 10071 Cáceres, Spain; albertoalfonso@unex.es (A.A.-T.); jesusbarrena@unex.es (J.B.-G.)

<sup>2</sup> Faculty of Business, Finance and Tourism, University of Extremadura, 10071 Cáceres, Spain; rrobina@unex.es

<sup>3</sup> Faculty of Natural Sciences and Life, University of Mohamed Khider, 07000 Biskra, Algeria; abdenmourmohamedamine@gmail.com

\* Correspondence: mapulidof@unex.es; Tel.: +34-6-8408-0710

Received: 27 July 2020; Accepted: 20 August 2020; Published: 22 August 2020



**Abstract:** The main goal of this study was to identify the problems that are putting the viability of watering ponds at risk. For doing that, we have analyzed five different study cases: (I) livestock consumption, Mediterranean climate (rangelands of SW Spain), (II) multifunctional ponds (Arroyo de la Luz, Spain), (III) ecotourism (Valdepajares de Tajo, Spain), (IV) crop irrigation and fish farming, semi-arid climate (the wilaya of Ouargla, Algeria), and (V) livestock consumption, humid subtropical climate (Prudentópolis, Brazil). The identification of problems was made through surveys, personal interviews, local knowledge and literature review as well as through the analysis of water quality parameters such as the concentration of phosphates and fecal coliforms in some ponds. We have identified problems of water shortage (ca. 50% of rangeland farmers), pollution induced by agriculture (maximum values of phosphates = 1.33 mg L<sup>-1</sup>) and livestock farming (maximum value of fecal coliforms ≈ 7000 cfu mL<sup>-1</sup>), low potability for human consumption (score: 2.8/7.0), invasive species such as *Azolla filiculoides* (10 out of 17 watering ponds), high water temperature for aquaculture in summer (Algeria) and the increase of turbidity in nearby water courses due to the actions of free-fattening pigs (Brazil), among many other problems. We conclude an extra effort by stakeholders is still needed in order to agree mitigation strategies.

**Keywords:** watering ponds; livestock; ecotourism; fish farming; shortage; *Escherichia coli*

## 1. Introduction

It has been estimated that about 50% of Earth's land surface are drylands [1] and more than 4 billion people are usually facing problems of water scarcity [2]. These numbers could be higher if we consider water scarcity is not an exclusive problem of arid regions since it is common in semi-arid and transitional areas (e.g., Mediterranean climate type), particularly in summer [3]. Furthermore, climate change could extend its negative effects on water resources to other parts of the world that have not experienced problems of water availability yet [4] within a global context of overpopulation and great pressure on vital resources [5].

The effects of water scarcity have been mitigated by humanity since ancient times through the construction of infrastructures (reservoirs, aqueducts, cisterns, etc.) [6]. Nowadays, these big infrastructures to store and distribute water for human supply, power, and agriculture are very frequent, at least in countries such as Spain in which dry periods are recurrent [7]. Nevertheless, little attention is usually paid to small-size infrastructures such as watering ponds designed by farm owners and/or