République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ferhat Abbas – Sétif 1

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Agronomiques

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master académique

Domaine : "Sciences de la Nature et de la Vie"

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Aménagement Hydro-Agricole

Thème :

ÉTUDE DE LA RELATION ENTRE LA SALINITE ET L'ETAT STRUCTURAL DES SOLS DANS L'ECO-COMPLEXE DES ZONES HUMIDES SALEES DE SETIF : DIAGNOSTIC ET PERSPECTIVES DE GESTION DURABLE DE LA SEBKHA BAZER-SAKRA

Présenté par :

Mlle. Dakhli Yousra

Mlle. BOUZID Lamis

Devant le jury composé de :

Présidente :	Dr. Benarrab Hadouda	Université Ferhat Abbas – Sétif 1
Examinateur :	Dr. Larkem Imane	Université Ferhat Abbas – Sétif 1
Promoteur :	Dr. Belghemmaz Salah	Université Ferhat Abbas – Sétif 1

Année universitaire: 2025/2026

Introduction

Au cours des dernières décennies, la dégradation des sols par la salinisation et la sodisation est devenue une préoccupation majeure à l'échelle mondiale, en particulier dans les régions arides et semi-arides. La salinisation résulte de l'accumulation de sels solubles dans le sol, tandis que la sodisation correspond à l'enrichissement du complexe d'échange en sodium, susceptible de dégrader les propriétés physiques du sol (Richards, 1954 ; Szabolcs, 1989). Ces processus peuvent avoir une origine primaire, liée au matériau parental, à la topographie et à l'hydrologie, ou une origine secondaire, induite par les activités humaines, notamment l'irrigation associée à un drainage insuffisant (Rengasamy, 2006 ; Marlet et Job, 2006).

Les régions arides et semi-arides y sont particulièrement exposées, car la faiblesse et l'irrégularité des précipitations, associées à une évapotranspiration élevée, favorisent la remontée capillaire et la concentration des sels dans les horizons superficiels (Abrol *et al.*, 1988). La salinisation constitue ainsi une menace pour la qualité des sols, la disponibilité de l'eau, la productivité agricole et la durabilité des écosystèmes (Hopmans *et al.*, 2021 ; FAO, 2024).

En Algérie, les sols salés sont largement représentés dans les zones steppiques, les Hautes Plaines et les régions sahariennes, où les conditions climatiques et hydrologiques favorisent leur formation (Halitim, 1988 ; Daoud et Halitim, 1994). Le phénomène est aggravé dans certains périmètres irrigués par l'utilisation d'eaux souterraines minéralisées et par un drainage insuffisant, qui entraînent une dégradation progressive des sols (Douaoui et Hartani, 2007). La gestion de la salinité et de la sodicité constitue donc un enjeu pour la préservation des terres agricoles et des milieux naturels du pays.

La région de Sétif, située dans les Hautes Plaines de l'Est algérien, abrite un éco-complexe de zones humides salées qui regroupe Sebkhet Melloul, Sebkhet El-Hameit, Chott El-Fraïne, Sebkhet Bazer-Sakra et Chott El-Beïda (Baaziz *et al.*, 2011). Ces dépressions endoréiques, situées à haute altitude et soumises à une forte évaporation, accumulent des dépôts évaporitiques salins (Demdoum *et al.*, 2015). Les sols qui leur sont associés présentent une forte variabilité spatiale de leurs propriétés physico-chimiques, en relation avec la position topographique, le régime hydrique et la nature des matériaux (Aliat *et al.*, 2016).

La sebkha de Bazer-Sakra a été inscrite en 2004 sur la liste des zones humides d'importance internationale de la Convention de Ramsar. Elle est alimentée par les précipitations et par l'oued El Melah, qui reçoit en continu les eaux usées de la ville d'El Eulma. Elle abrite des roselières et une végétation halophyte qui offrent un habitat à de nombreuses espèces d'oiseaux d'eau, tandis que sa périphérie est occupée par des parcours pâturés et par la céréaliculture (FDR Ramsar, 2016). Ce site concentre donc des enjeux écologiques, pastoraux et agricoles étroitement liés à l'état de ses sols.

La salinité agit d'abord sur la solution du sol. Une concentration élevée en sels augmente le potentiel osmotique et limite l'absorption de l'eau par les racines, ce qui réduit la croissance de la plupart des plantes cultivées (Munns, 2002 ; Munns et Tester, 2008). Les cultures diffèrent toutefois par leur tolérance : les céréales sont modérément tolérantes à tolérantes, alors que de nombreuses cultures maraîchères sont sensibles (Maas et Hoffman, 1977).

Les sels et le sodium modifient également les propriétés physiques du sol. Lorsque la proportion de sodium échangeable est élevée, les argiles gonflent et se dispersent, ce qui réduit la stabilité des agrégats, la porosité, l'infiltration et la conductivité hydraulique, et favorise la formation de croûtes de battance (Rengasamy et Olsson, 1991 ; Sumner, 1993 ; Qadir et Schubert, 2002). À l'inverse, une concentration électrolytique élevée favorise la floculation des argiles et peut maintenir la perméabilité du sol malgré la présence de sodium (Quirk et Schofield, 1955 ; Shainberg et Letey, 1984). La dispersion dépend en outre de la nature des argiles, du pH et des effets mécaniques (Frenkel *et al.*, 1978 ; Chorom et Rengasamy, 1995 ; Curtin *et al.*, 1994). L'état structural résulte donc de l'équilibre entre la composition cationique et la concentration électrolytique de la solution du sol (Rengasamy et Sumner, 1998 ; Oster et Shainberg, 2001 ; Rengasamy, 2010).

La structure du sol désigne l'organisation des particules en agrégats et de l'espace poral qui les sépare. Elle conditionne l'infiltration, l'aération, la rétention de l'eau et la résistance à l'érosion (Bronick et Lal, 2005). La stabilité des agrégats, évaluée par exemple par des tests de désagrégation, constitue l'un de ses principaux indicateurs (Le Bissonnais, 1996 ; Amézketa, 1999). Elle dépend de la texture, de la nature des argiles, de la composition ionique, de la matière organique et des carbonates. La matière organique favorise l'agrégation par la formation

d'associations organo-minérales et par l'activité biologique (Tisdall et Oades, 1982), et elle peut atténuer certains effets de la sodicité (Nelson et Oades, 1998). La densité apparente et la porosité fournissent des indications simples sur la compacité du sol, mais elles ne remplacent pas les mesures directes de stabilité structurale.

Dans les milieux salés et pâturés, la structure peut être affectée par des facteurs supplémentaires. Le piétinement du bétail compacte les premiers centimètres du sol, surtout lorsqu'il est humide (Greenwood et McKenzie, 2001), et l'irrigation avec des eaux riches en sodium peut dégrader ses propriétés physiques (Halliwell *et al.,* 2001).

La conductivité électrique (CE) est l'indicateur le plus couramment utilisé pour estimer la concentration globale en sels solubles d'un sol. Elle est généralement mesurée sur l'extrait de pâte saturée (ECe) ou sur des suspensions sol/eau, ces dernières nécessitant une conversion pour être comparées aux seuils de référence (Richards, 1954 ; Rhoades *et al.*, 1992). La CE ne renseigne toutefois ni sur la composition ionique de la solution, ni sur le risque de sodicité.

Le rapport d'adsorption du sodium (SAR) et le pourcentage de sodium échangeable (ESP) sont utilisés pour évaluer ce risque (Richards, 1954 ; Sposito et Mattigod, 1977). Ils ne tiennent cependant compte que du sodium, du calcium et du magnésium, et ignorent l'effet dispersif du potassium, ainsi que l'effet différencié du magnésium (Reeve *et al.,* 1954 ; Smith *et al.,* 2015). Les seuils proposés pour l'interprétation de la qualité de l'eau d'irrigation ont également été remis en question (Ayers et Westcot, 1985 ; Qadir *et al.,* 2021).

Pour dépasser ces limites, Rengasamy et Marchuk (2011) ont proposé le rapport cationique de stabilité structurale du sol (CROSS), qui intègre, en plus du sodium, les effets dispersifs du potassium et les effets floculants du calcium et du magnésium, pondérés par des coefficients propres à chaque cation. Le CROSS prédit mieux la dispersion des argiles que le SAR et se prête à la détermination de la concentration électrolytique seuil, c'est-à-dire la concentration en sels en dessous de laquelle la dispersion apparaît pour un CROSS donné (Marchuk et Rengasamy, 2012 ; Dang *et al.*, 2018). Il constitue ainsi un outil pertinent pour orienter la gestion de l'irrigation et la préservation de la structure des sols affectés par les sels. Son calcul exige toutefois le dosage des principaux cations solubles (Na^+, K^+, Ca^{2+} et Mg^{2+}).

Malgré les travaux consacrés aux zones humides salées des Hautes Plaines, les relations entre la salinité et les propriétés physiques et hydriques des sols de la sebkha de Bazer-Sakra restent peu documentées. Une conductivité électrique élevée n'implique pas nécessairement une dégradation de la structure : l'effet des sels dépend de la composition ionique, de la texture, de la matière organique et des conditions hydriques. En l'absence d'un diagnostic de référence, il est difficile de définir des stratégies de gestion adaptées, qu'il s'agisse du drainage, du lessivage ou des amendements (Qadir et Oster, 2004).

L'objectif général est de réaliser un diagnostic de la relation entre la salinité et l'état structural des sols de la sebkha de Bazer-Sakra, afin de dégager des perspectives de gestion durable. Il s'agit plus précisément de caractériser la salinité des sols par la conductivité électrique, ainsi que leur pH et leur teneur en calcaire total, à deux profondeurs ; de déterminer la matière organique, l'humidité pondérale, la densité apparente, la porosité et le degré de saturation de l'horizon superficiel ; de comparer la CE, le pH et le calcaire total entre les horizons 0–30 et 30–60 cm ; d'examiner, par des analyses statistiques appropriées, les relations entre la CE et les propriétés physiques et hydriques ; et enfin de proposer des orientations de gestion et d'identifier les analyses complémentaires nécessaires à l'application du concept CROSS.

Conformément au modèle IMRD, ce mémoire comprend, après cette introduction, un chapitre consacré au matériel et aux méthodes, un chapitre présentant les résultats et leur discussion, puis une conclusion générale qui rassemble les principaux enseignements et les perspectives de recherche.

SOMMAIRE

الملخص

Résumé

Abstract

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction

Chapitre I. Matériel et méthodes

1. Présentation de la zone d'étude

1.1. Contexte de la zone d'étude

1.2. Bassin hydrographique et hydrologie de surface

1.3. Géomorphologie et géologie

1.4. Hydrogéologie : circulation des eaux souterraines

1.5. Le climat

1.5.1. La température

1.5.2. Les précipitations

1.6. Occupation du sol et caractéristiques écologiques

1.6.1. La flore

1.6.2. La faune

1.6.3. Activité agricole et zone de pâturage

1.7. Les sols

2. Méthode d'échantillonnage du sol

2.1. Choix des sites d'étude

2.2. Stratégie d'échantillonnage

3. Traitement des échantillons et préparation de la terre

3.1. Séchage à l'air libre

3.2. Broyage

3.3. Tamisage à 2 mm

4. Analyses de laboratoire

4.1. Détermination du pH (méthode de la suspension 1/5)

4.2. Détermination de la conductivité électrique (méthode de la suspension 1/5)

4.3. Détermination du calcaire total ($CaCO_3$ %, méthode au calcimètre de Bernard)

4.4. Détermination de la matière organique (MO %, méthode d'Anne)

4.5. Détermination de l'humidité pondérale (H %, méthode gravimétrique par séchage à l'étuve).

4.6. Détermination de la densité apparente (Da, méthode du cylindre)

4.7. Détermination de la porosité totale (P %)

4.8. Détermination du degré de saturation (Sr %)

4.9. Analyses statistiques

Chapitre II. Résultats et discussion

1. Présentation générale des résultats

2. Caractérisation physico-chimique des sols

2.1. Potentiel hydrogène (pH)

2.2. Conductivité électrique (CE)

2.3. Calcaire total ($CaCO_3$)

2.4. Matière organique et carbone organique

3. Caractérisation physique et hydrique des sols

3.1. Humidité pondérale

3.2. Densité apparente et porosité

3.3. Degré de saturation

4. Relation entre salinité et état structural

4.1. Organisation des données pour l’analyse statistique

4.2. Relations entre la conductivité électrique et les propriétés du sol

4.3. Relations entre les autres propriétés du sol

4.4. Analyse de sensibilité des corrélations

4.5. Comparaison des deux profondeurs

5. Discussion : salinité et état structural

6. Cas particulier des échantillons E1 et E6

7. Rôle du calcaire et de la matière organique

8. Discussion générale

9. Synthèse des résultats statistiques

10. Limites de l’étude

11. Conclusion

Conclusion

Références Bibliographiques

الملخص

يتناول هذا العمل مشكلة التملّح والصودية التي تهدّد تربة المناطق الرطبة المالحة في المناطق شبه الجافة، من خلال دراسة سبخة بازر–سكرة (سطيف، الجزائر)، ويهدف إلى تشخيص العلاقة بين الملوحة والحالة البنيوية والمائية للتربة تمهيدًا لتقييم لاحق قائم على مفهوم .CROSS اعتمدت الدراسة على اثنتي عشرة عينة تربة مركّبة أُخذت من ستة مواقع وعلى عمقين (0–30 و30–60 سم)، وحُدِّدت فيها الأس الهيدروجيني والناقلية الكهربائية وكربونات الكالسيوم والمادة العضوية، إضافةً إلى الرطوبة الوزنية والكثافة الظاهرية والمسامية ودرجة التشبّع في الطبقة السطحية، ثم حُلِّلت العلاقات بين المتغيرات باستخدام ارتباط سبيرمان مع تصحيح هولم واختبار ويلكوكسون للمقارنة بين العمقين. بيّنت النتائج أن التربة قلوية (متوسط الأس الهيدروجيني 8,48) وشديدة الكلسية (متوسط كربونات الكالسيوم 37,17%)، مع تباين كبير في الملوحة السطحية) من 3,96 إلى 75,80 .(dS/m ولم تظهر علاقة ذات دلالة إحصائية بين الناقلية الكهربائية ومؤشرات الحالة البنيوية أو المائية بعد التصحيح، رغم رصد اتجاهات متوسطة، منها علاقة سلبية مع الرطوبة (ρ = −0,49) وإيجابية مع الكثافة الظاهرية(ρ = +0,54) ، كما لم تُسجَّل فروق معنوية بين العمقين. وتخلص الدراسة إلى أن الناقلية الكهربائية وحدها لا تكفي لتفسير الحالة البنيوية للتربة، وأن حساب مؤشر CROSS يستلزم تحديد الكاتيونات الرئيسية والتركيب الحبيبي وقياس الثبات البنيوي مباشرةً، بما يسمح بتقييم دقيق لخطر الصودية ووضع استراتيجيات تسيير ملائمة تشمل الصرف والغسل والتعديل الكلسي عند الاقتضاء.

الكلمات المفتاحية: التملّح، الصودية، الناقلية الكهربائية، الكثافة الظاهرية، المسامية، الثبات البنيوي، بازر–سكرة، سطيف، CROSS.

Résumé

La salinisation et la sodisation constituent des contraintes importantes pour les sols des zones humides salées des régions semi-arides. Cette étude vise à caractériser la salinité et à examiner sa relation avec certains indicateurs de l'état structural et hydrique des sols de la sebkha de Bazer-Sakra (Sétif, Algérie), dans la perspective d'une évaluation ultérieure basée sur le concept CROSS.

Douze échantillons composites ont été prélevés sur six sites à deux profondeurs (0–30 et 30–60 cm) et analysés pour le pH, la conductivité électrique (CE), le $CaCO_3$, la matière organique (MO), ainsi que, dans l'horizon 0–30 cm, l'humidité pondérale, la densité apparente, la porosité et le degré de saturation.

Les sols étudiés sont alcalins (pH moyen de 8,48) et fortement calcaires ($CaCO_3$ moyen de 37,17 %), avec une salinité très hétérogène en surface (CE de 3,94 à 75,78 dS m^{-1}). Les corrélations de Spearman réalisées sur les six sites de surface n'ont révélé aucune relation statistiquement significative entre la CE et les indicateurs structuraux ou hydriques après correction de Holm. Des tendances modérées à fortes ont néanmoins été observées, notamment une relation négative entre la CE et l'humidité ($\rho = -0,49$) et une relation positive avec la densité apparente ($\rho = +0,54$), mais elles restent insuffisantes pour établir une relation causale ou un seuil critique de salinité.

La comparaison entre les deux profondeurs n'a également montré aucune différence significative pour la CE, le pH ou le $CaCO_3$. Ces résultats soulignent l'hétérogénéité spatiale des sols de Bazer-Sakra et les limites d'une interprétation de l'état structural fondée uniquement sur la CE.

Le calcul du CROSS nécessite comme étape complémentaire le dosage des principaux cations (Na^+, K^+, Ca^{2+} et Mg^{2+}), associé à une caractérisation granulométrique et à des mesures directes de la stabilité structurale. Ces données permettront de mieux évaluer le risque de sodicité et de définir des stratégies de gestion adaptées, notamment en matière de drainage, de lessivage et, lorsque cela est justifié, d'amendement calcique.

Mots clés : Salinisation, sodicité, conductivité électrique, densité apparente, porosité, Bazer-Sakra, Sétif, CROSS.

Abstract

Salinization and sodification are important constraints affecting soils in salt-affected wetlands of semi-arid regions. This study aims to characterize soil salinity and examine its relationship with selected indicators of soil structural and water status in the Bazer-Sakra sebkha (Sétif, Algeria), as a preliminary step toward a subsequent assessment based on the CROSS concept.

Twelve composite soil samples were collected from six sites at two depths (0–30 and 30–60 cm) and analyzed for pH, electrical conductivity (EC), $CaCO_3$, and organic matter (OM), while gravimetric water content, bulk density, porosity, and degree of saturation were determined in the 0–30 cm layer.

The studied soils were alkaline (mean pH 8.48) and highly calcareous (mean $CaCO_3$ content 37.17%), with highly heterogeneous surface salinity (EC ranging from 3.94 to 75.78 dS m^{-1}). Spearman correlation analyses performed on the six surface sites revealed no statistically significant relationships between EC and structural or water-status indicators after Holm correction. Nevertheless, moderate to strong trends were observed, particularly a negative relationship between EC and soil moisture ($\rho = -0.49$) and a positive relationship with bulk density ($\rho = +0.54$); however, these trends are insufficient to establish a causal relationship or define a critical salinity threshold.

Comparison between the two depths also revealed no significant differences in EC, pH, or $CaCO_3$. These findings highlight the spatial heterogeneity of Bazer-Sakra soils and the limitations of assessing soil structural status based solely on EC.

Calculation of the CROSS index requires, as an additional step, the determination of the main cations (Na^+, K^+, Ca^{2+}, and Mg^{2+}), together with particle-size characterization and direct measurements of structural stability. These data will provide a more comprehensive assessment of sodicity risk and support the development of appropriate management strategies, particularly regarding drainage, leaching, and, where justified, calcium amendments.

Keywords: Salinization, sodicity, electrical conductivity, bulk density, porosity, Bazer-Sakra, Sétif, CROSS.