



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



المدرسة الوطنية العليا للفلاحة
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE AGRONOMIQUE

الحراش (الجزائر)
El HARRACH (Alger)

THESE

Présentée en vue de l'obtention du Doctorat Es Science
En Sciences Agronomiques

Spécialité Sciences du sol

Thème

**Etude des sols salés des plaines du Cheliff.
Analyse Spatio-temporelle.**

Présentée par :
M.Ouamer-ali Karim

Soutenue publiquement le 20/07/2023 devant le jury composé de :

M.Hartani T.	Professeur
M.Djili K.	Professeur
M.Daoud Y.	Professeur
M.Hamdi-Aissa B.	Professeur
M.Benslama M ^{ed} .	Professeur
M.Djamai R.	Professeur

Président
Directeur de thèse
Co-Directeur de thèse
Examineur
Examineur
Examineur

Table des matières

	<u>Page</u>
Introduction générale	1
<u>Chapitre I. Les plaines du Cheliff, "un milieu naturel "d'exception"</u>	
Introduction	5
1. L'espace géomorphologique d'appartenance	5
1.1. Le bassin du Cheliff comme structure socle régionale	5
1.2. Les plaines du Cheliff	8
2. Evaluation de la complexité physique et biologique du milieu naturel	11
2.1. Le contexte climatique	11
2.1.1. Analyse quantitative du paramètre "Pluviométrie"	12
2.1.1.1. Aperçu général sur les trois postes pluviométriques	13
2.1.1.2. Evaluation du régime pluviométrique des trois postes	15
2.2. Cadre géologique général	19
2.3. Hydrogéologie et présentation du système aquifère de la région	22
2.4. Les aspects hydriques et les écoulements superficiels	23
2.4.1. Oued Cheliff	23
2.4.2. Les affluents ou le réseau superficiel	25
2.5. Phytogéographie de la région du Cheliff	26
2.6. La ressource en sols	29
Conclusion	32
<u>Chapitre II. Evaluation pédométrique de la salinité des sols dans le Bas-Cheliff.</u>	
Etat et tendance évolutive du phénomène sur une période de plus de cinquante ans (1956-2012).	
<i>Cas du périmètre Agricole d'El Hamadna.</i>	
Introduction	34
1. Matériels et méthodes	38
1.1. Matériel d'étude	38
1.1.1. Le site d'étude	38
1.2. Méthode d'étude	39
1.2.1. Actualisation des données quantitatives et cartographiques de l'étude pédologique <i>E1</i>	39
1.2.1.1. Acquisition et valorisation des données de prospection pédologiques	40
1.2.1.2. Identification et restauration des unités pédologiques reconnues	40
1.2.1.3. Réajustement et valorisation des données de profils d'appartenance	40
1.2.1.3.1. Organisation et mise en place de l'information	43
1.2.1.3.2. Exploitation des données originelles	45
1.2.1.3.3. Les variables calculées (manquantes) : Estimation du sodium échangeable (<i>ESP</i>) et du Sodium Adsorption Ratio (<i>SAR</i>)	46
1.2.2. Caractérisation et évaluation de l'état actuel (<i>E2</i>) de la salinité	47
1.2.2.1. Echantillonnage du sol	47
1.2.2.2. Analyses au laboratoire	50
1.2.2.2.1. Estimation des carbonates (CO_3^{2-})	50
1.2.3. Estimation de l'évolution temporelle de la salinité	52

2. Traitement des données	52
2.1. Analyses statistiques	52
2.1.1. Statistiques descriptives	53
2.1.2. Calcul des fréquences de distribution	54
2.1.3. Les relations entre EC_e et les autres variables pédologiques	54
2.2. Mise en place des profils salins	54
2.3. Le faciès chimique des solutions	55
2.4. Estimation de l'évolution des niveaux de salinité entre $E1$ et $E2$	56
2.4.1 Comparaison des profils salins	57
2.4.2. Identification du gradient d'évolution de la salinité	57
2.4.2.1. Le gradient d'évolution de EC_e par profil	57
2.4.2.2. Le gradient d'évolution de EC_e par horizon	58
3. Résultats et discussion	58
3.1. Analyse statistique	58
3.1.1. Approche globale	58
3.1.1.1. Les taux de salinité (EC_e dS/m)	58
3.1.1.1.1. Statistiques descriptives	58
3.1.1.1.2. Evaluation des fréquences de distributions des classes de taux de salinité (EC_e)	60
3.1.1.2. Caractérisation de certains paramètres de la solution du sol	61
3.1.1.3. Interactions de EC_e avec les paramètres de la solution du sol	66
3.1.1.4. Les fréquences de distribution des ESP_{eq} (<i>approche globale</i>)	75
3.1.2. Approche par horizon	77
3.1.2.1. Caractérisation des taux de EC_e	77
3.1.2.1.1. Statistiques descriptives	77
3.1.2.1.2. Evaluation des fréquences des classes de salinité par horizon	81
3.1.2.1.3. Evaluation des fréquences des classes de l' ESP_{eq}	83
3.2. Les profils de distribution de la salinité	86
3.2.1. Les types de profils salins de $E1$	86
3.2.2. Les types de profils salins en $E2$	88
3.3. Détermination du faciès chimique des solutions du sol	93
3.3.1. Mise en œuvre sur les données d'étude	93
3.3.1.1. Observations des éléments de base de $E1$	93
3.3.1.2. Observation des données de base de $E2$	95
3.4. Evaluation de l'évolution temporelle de la salinité	98
3.4.1. Comparaison des profils salins	98
3.4.2. Le gradient d'évolution de la salinité	100
3.4.2.1. Evaluation par profil	100
3.4.2.2. Evaluation par horizon	100
3.4.3. L'effet position topographique des profils	103
Conclusion	108

Chapitre III. Application des concepts de la cartographie numérique dans la conservation du patrimoine ou de l'héritage cartographique des sols salés des plaines du Bas-Cheliff.

Cas de l'étude des sols de la station d'étude des sols salins des Hamadéna de 1956.

Introduction	113
1. Matériels et méthodes	115
1.1. Cadre général d'utilisation du concept	116
1.2. Mise en application de l'approche <i>CNS</i>	116
1.2.1. Formalisation d'une expertise pédologique existante	116
1.2.2. Spécificités méthodologiques établies	117

1.2.2.1. Mise en place et type de données exploitées	117
1.2.2.2. Grille d'interpolation et processus d'exploitation des données	118
1.3. Application de la technique d'interpolation spatiale pour la cartographie numérique des "U.S.R." de EI	120
1.3.1. Choix de la technique d'estimation	122
1.3.2. Evaluation et validation de l'approche de modélisation	125
2. Résultats et discussions	127
2.1. Statistiques descriptives des données de EC_{aff} . de la nouvelle matrice	127
2.2. La cartographie par interpolation des niveaux de salinité de EI	129
2.2.1. Analyse variographique et modélisation de la structure spatiale	129
2.2.1.1. Evaluation de la structure spatiale de $h1$	130
2.2.1.2. Evaluation de la structure de $h2$	132
2.2.1.3. Evaluation de la structure de $h3$	133
2.2.1.4. Evaluation de la structure de $h4$	135
2.2.1.5. Evaluation de la structure de $h5$	137
2.2.2. Validation des modèles les plus performants	138
2.2.3. Etablissement des cartes des U.S.R. ou des classes de salinité par couche	141
Conclusion	145

Chapitre IV. Utilisation de la conductivité électrique apparente (EC_a) par induction électromagnétique (IEM) dans la cartographie et l'évaluation de la salinité des sols agricoles du Bas-Cheliff.

Cas du périmètre agricole d'El Hamadna.

Introduction	148
1. Matériels et Méthodes	150
1.1. Le site d'étude	150
1.2. Mesure de IEM à l'aide de l'EM38	151
1.2.1. Fonctionnalité de l'EM38	151
1.2.2. Fonctionnement théorique	151
1.2.3. Application méthodologique de l'EM38 dans le cas de cette étude	152
1.2.3.1. Mesures et acquisition des données	152
1.2.3.2. Stratégie et protocole de collecte des données	154
1.3. Les échantillons de sols de calibration et de validation	155
1.4. Analyses des échantillons de sol	157
1.5. Utilisation et historique de l'occupation du sol	158
2. Traitement des données	159
2.1. Analyse statistique	159
2.1.1. Statistiques descriptives	159
2.1.2. Calcul des fréquences de distribution des taux de salinité (EC_e)	160
2.1.3. Profils de distribution des différents paramètres	160
2.1.4. Les relations entre les taux de salinité (EC) et les variables pédologiques choisies	160
2.2. Etalonnage des valeurs de EC_a	160
2.2.1. Principe de mise en œuvre	161
2.3. Cartographie et visualisation des classes de salinité des sols d'El Hamadna	162
2.3.1. Mise en œuvre méthodologique	163
2.4. Evaluation de la qualité des traitements	165
3. Résultats et discussions	166
3.1. Caractérisation des données de EC_a	167
3.2. Caractérisation des données de EC_e	170
3.3. Analyses des fréquences de distribution de EC_e	173
3.3.1. Approche Globale	173

3.3.2. Approche par couche d'étude	174
3.4. Caractéristiques des échantillons sol de sondages	178
3.4.1. Le taux de H_p (%)	178
3.4.2. La texture	183
3.4.2.1. La fraction argileuse	183
3.4.2.2. La fraction limoneuse	185
3.4.2.3. La fraction sableuse	186
3.4.3. Le pH_e	188
3.4.3.1. Mise en place pratique	191
3.4.4. Le calcaire total (%)	194
3.4.5. Le gypse	196
3.5. Relations entre EC_e et les paramètres pédologiques étudiés	198
3.6. Etalonnage des données de EC_a et détermination de $EC_{estimée}$	200
3.6.1. Identification et essai des équations d'étalonnage	201
3.6.2. Choix de l'équation d'étalonnage à exploiter	202
3.6.2.1. Test de comparaison de moyennes	202
3.6.2.2. Test de corrélation	209
3.7. Application des équations obtenues par campagne.	211
3.8. Cartographie et visualisation des classes de salinité	214
3.8.1. Visualisation et évaluation de la répartition spatiale des taux de EC_{es}	216
3.8.2. Qualité de l'estimation	221
3.8.2.1. <i>Test 1</i>	222
3.8.2.2. <i>Test 2</i>	223
Conclusion	224

Chapitre V. Mesure et évaluation du caractère conservatif de l'alcalinité résiduelle calcite dans les eaux de drainage.

Cas des sols salés sous climat méditerranéen aride.

Introduction	233
1. Matériel et méthodes	234
1.1. Matériel d'étude	234
1.2. Méthodes d'étude	235
2. Résultats	235
2.1. Caractérisation chimique des eaux de drainage	235
2.2. Le faciès chimique des eaux et l'état de saturation vis-à-vis de la calcite	238
2.3. L'alcalinité des eaux	239
3. Discussion des résultats	241
Conclusion	243

Chapitre VI. Synthèse et conclusion générale

Références bibliographiques

Annexes

Index

Abstract

This research focused on : **(1)** a detailed analysis of the biogeographical specificities of the *Cheliff salt plains*, **(2)** a comparative pedometric treatment on salinity data of an episode of more than fifty years (1956-2012), **(3)** an application of the concept of preservation and enhancement of a cartographic heritage on the 1956 data, **(4)** a predictive modeling of salinity by electromagnetic induction (EMI) using EM38 (*Geonics Ltd.*) and **(5)** a chemical and geochemical assessment of drainage waters and prediction of the consequences of irrigation on the alkaline fate of the *Cheliff plains* soils. Overall, this methodological implementation was carried out at the level of the perimeters of *El-Khemis (Upper Cheliff)* and the former boundary of the experimental station of *El Hamadna (Lower Cheliff)*.

The results obtained have shown that the *Cheliff plains* are conditioned by the morphology of the basin formation they belong to. They are subject to a very intense water deficit, which is expressed as an *East-West* regressive geographical gradient. The pedometric study on the data (more than 50 years) allowed to confirm the idea that the evolution of salinity is "considerable" and that it is dominated by the presence of large amounts of soluble salts, under the impulse of characteristic effects of the form of association of Na^+ . It also allowed, taking into account the specificities of the environment and the aspects of vertical and lateral movements of the soil solution, to associate this evolution to a temporal gradient of salinization/desalinization trend of the depth horizons. The application of the concept of processing a legacy of soil data to the 1956 matrix provided an initial cartographic "snapshot" of the perimeter from the beginning of the reclamation operations (1954-1956) of the saline soils. The EM38 survey of five soil depths made it possible to confirm the pedometric observations and to represent the levels of salinity variations in space and time by cartographic layers. The salinity profiles obtained are downward and very salty to hyper-salty at depth. Finally, the evaluation of the chemical and geochemical signature of the different soil solutions studied in application of $1'AR_{calcite}$ demonstrated that the evolution of the salinization of these soils is oriented towards the neutral saline pathway and the absence of the alkalinization process.

Key words: *Cheliff, salinity, pedometry, drainage, CNS, EM38, modeling, soil chemistry and geochemistry, chemical facies, $AR_{calcite}$.*

ملخص

يحمل هذا العمل في طياته: (1) تحليل مفصل للخصائص البيوجغرافية للسهول الملحية (المالحة) بواد الشلف، و (2) معالجة بيدومترية مقارنة، لمعطيات الملوحة على امتداد أكثر من 50 سنة: 1956 – 2012، و (3) تجسيد مفهوم وقاية وتثمين الموروث الخرائطي لمعطيات 1956 و (4) تحديث التنبؤ بالملوحة بأسلوب التأثير الكهرومغناطيسي IEM، بطريقة EM38 و (5) التقييم الكيميائي و الجيوكيميائي لمياه الصرف و استشراف تأثير السقي على المستقبل الألكاني (القاعدي) لترتبة سهول واد الشلف.

وبشكل عام، فإن هذه المنهجية تم تجسيدها على مستويين؛ أراضي سهل الشلف العلوي (منطقة الخميس)، وكذا على مساحات محطة تجارب الحمادنة (الشلف السفلي).

أظهرت النتائج أن سهول الشلف مرتبطة بمورفولوجيا المنطقة التي تتربع عليها حيث تعاني من شح في المياه والذي يتجسد بدوره في شكل محور شرق- غرب، تفرضه جغرافية المنطقة.

الدراسة البيدومترية للمعطيات على امتداد 50 سنة أثبتت فكرة أن تطور الملوحة يصبح معتبرا من خلال التواجد الكثيف للأملاح المذابة بمفعول تكاثف خصائص الاندماج لـ Na^+ (أيونات الصوديوم) وسمحت هذه الفكرة، اعتبارا للخصائص البنائية وكذا الحركية العمودية والأفقية لمحلل التربة، سمحت بربط هذا التطور بالتدرج الزمني بازواجية ظاهرة ملوحة / تحلية وذلك على الآفاق البعيدة.

إن تطبيق مفهوم معالجة موروث البيانات الخاصة بالتربة حسب مصفوفة 1956، قد سمح بالحصول على "صورة" خرائطية أصلية للمنطقة، مع بداية عمليات استصلاح الأراضي المالحة (1954-1956).

إن الاستشعار بواسطة EM38 على خمسة أعماق ترابية سمح بدعم الاستنتاج البيدومتري، والإطلاع - حسب الطبقات الخرائطية - على مستويات تغير الملوحة عبر المساحات وكذا الزمن، و أن النماذج الملحية المكتسبة هي تنازلية وشديدة إلى جد شديدة الملوحة مع العمق.

أخيرا، فإن تقييم التركيبة الكيميائية والجيوكيميائية لمختلف محاليل التربة المدروسة بطريقة ($AR_{calcite}$) تبين أن تطور الملوحة في هذه التربة تنتج نحو الملوحة المعتدلة و غياب مفعول الأثر القاعدي.

كلمات مفتاحية: واد الشلف، ملوحة، بيدومتري، صرف المياه، الخرائط الرقمية للتربة، EM38، نمذجة البيانات،

كيمياء و جيوكيمياء التربة، البنية الكيميائية، $AR_{calcite}$

Résumé

Ce travail de recherche a porté sur : (1) une analyse détaillée des spécificités biogéographiques des plaines salées du Cheliff, (2) un traitement pédométrique comparatif sur des données de salinité d'un épisode de plus de cinquante ans (1956-2012), (3) une application du concept de préservation et de valorisation d'un héritage cartographique sur les données de 1956, (4) une modélisation prédictive de la salinité par induction électromagnétique (IEM) moyennant l'EM38 (*Geonics Ltd.*) et sur (5) une évaluation chimique et géochimique des eaux de drainage et prédiction des conséquences de l'irrigation sur le devenir alcalin des sols des plaines du Cheliff. Dans l'ensemble, cette mise en place méthodologique a été opérée au niveau des périmètres d'*El-Khemis (Haut-Cheliff)* et de l'ancienne délimitation de la station expérimentale d'*El Hamadna (Bas-Cheliff)*.

Les résultats obtenus ont montré que les plaines du Cheliff sont conditionnées par la morphologie de leur ensemble (bassin) d'appartenance. Elles sont soumises à un déficit hydrique très intense qui s'exprime sous forme de gradient géographique régressif *Est-Ouest*. L'étude pédométrique sur les données d'un épisode de plus de 50 ans a permis de conforter l'idée que l'évolution de la salinité est "considérable" et qu'elle est dominée par la présence de fortes quantités de sels solubles, sous l'impulsion d'*effets caractéristiques* de la forme d'association du Na^+ . Elle a permis également, en tenant compte des spécificités du milieu et des aspects de mouvements verticaux et latéraux de la solution du sol, d'associer cette évolution à un gradient temporel de tendance *Salinisation/Désalinisation* des horizons de profondeur. L'application du concept de traitement d'un héritage de données de sols à la matrice de 1956 a permis l'obtention d'une "photographie" cartographique initiale du périmètre dès le début des opérations de mise en valeur (1954-1956) des sols salés. La prospection par l'EM38 sur cinq profondeurs de sol a permis de conforter les observations pédométriques et de représenter par couches cartographiques les niveaux de variations de la salinité dans l'espace et dans le temps. Les profils salins ainsi obtenus sont descendants et *très salés à hyper-salés* en profondeur. Enfin, l'évaluation de la signature chimique et géochimique des différentes solutions du sol étudiées en application de l'*AR_{calcite}* a démontré que l'évolution de la salinisation de ces sols s'oriente vers la voie saline neutre et l'absence du processus d'alcalinisation.

Mots clés : *Cheliff, salinité, pédométrie, drainage, CNS, EM38, modélisation, chimie et géochimie des sols, facies chimiques, AR_{calcite}.*