



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICHE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



المدرسة الوطنية العليا للفلاحة
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE

(الحراش) الجزائر
EI 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.

M.Djili K.

M.Daoud Y.

M.Hamdi-Aissa B.

M.Benslama M^{ed}.

M.Djamai R.

Professeur

Professeur

Professeur

Professeur

Professeur

Professeur

Président

Directeur de thèse

Co-Directeur de thèse

Examineur

Examineur

Examineur



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE
الحراش(الجزائر)
EI 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	Président
M.Djili K.	Professeur	Directeur de thèse
M.Daoud Y.	Professeur	Co-Directeur de thèse
M Hamdi-Aissa B.	Professeur	Examineur
M.Benslama M^{ed}.	Professeur	Examineur
M.Djamai R.	Professeur	Examineur

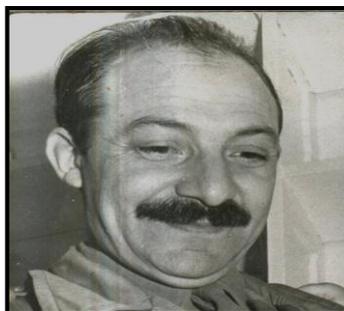
*Dédicaces
et
Remerciements*

*« Nul sacrifice, nulle victoire »
"Sam Witwicky"*

Dédicaces

- *A ma très chère, tendre, et combien courageuse mère,
*A Ma Chère et douce Femme,
A mes trois petits princes : Wassim-Chiheb, Samy et Kamyl-Aylan,
- *A Mon grand Cousin Hazi Hamoud et sa petite famille,
*A Noucha et la famille Belhimer,
A Kacem, Marina et la famille Ouyahia,
- *A la famille Boulaine,
A Véronique et Bertrand Schweisguth,
- *A Mohamed Benhacen et sa petite famille,*
- *A la famille Dekkiche,
*A la famille Youyou,
A Harrek D. et sa petite famille,
- *A Sihem Benabderrahmane et sa très chère Maman,
*A Lyes, Lamia, Isma et Samy Zebboudj,
*A Deboussi B. et sa petite famille,
*A Hakim Ouzzane et sa petite Famille,
A Skander, Wahiba, Ranim et Akram Mekersi,
- *A Malou S., Hamouni M., Touaf L., Mokhtari A., Belhadj M., Neggazi M.,
Ouchen Dj., Kradia L., et Gacem F.,*
- *Aux derniers résistants face à la médiocrité : Mahdid Fatma, Ait Oubelli M'hamed, Meamiche Hayet,
Harrek Derradji., Adaouri Mohamed., Saléha Hamlat, Nawel Bennabbed,
Boussaad Fariza, et Chettir Salima,*
- *A mes amis : Mokfinache S., Boufennir M., Maziri A., Hamlat M., Bakeli B., Kaidi R., Chekkired Z.,
Cherigui H., Zellague H., Kellou Gh., Zellague H., Kacimi Z., Remram Y., Maameri Y., Fares H., Siaci S.,
Bali N., Touati S., Achir K., Saibi Z., Saibi T., Keffi M., Abbas H., Marniche S., Missi B., et Salem N.,*
- *A tous amis(es) et Ex-collègues de l'INSID siège et El-Matmar (Relizane),
*A tous amis et Ex-collègues de la station INRAA d'El Hamadna,
*Au personnel et Amis (es) du département de science du sol de l'ENSA: El-Hadi O.F., Abdelkrim
OA., Redouane B., Ahmed O., Fares L., Fatiha K. et Fatouma L., Ahmed B. (Ex-I.N.A-G.R.),*
- *Aux réels pédologues et aux réels Chercheurs.....*

**A la mémoire de Mon défunt père :*



Feu Slimane "El-Hadj "
1930-1998



*Je ne vise pas avec ma main,
Celui qui vise avec sa main a oublié le visage de son père,
Je vise avec mon œil,*

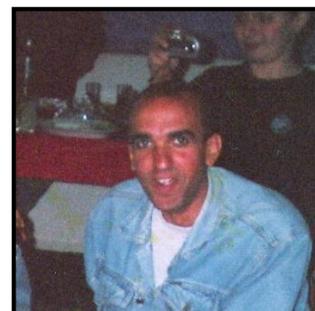
*Je ne tire pas avec ma main,
Celui qui tire avec sa main a oublié le visage de son père,
Je tire avec mon esprit,*

*Je ne tue pas avec mon arme,
Celui qui tue avec son arme a oublié le visage de son père,
Je tue avec mon cœur.*

Stéphane King

**A la mémoire de mes Amis :*

*Farid Sider
1972-2005*



Et

*Jean-Louis-Georges Boulaine
1922-2013*



Remerciements

Avant toute chose, je tiens à préciser que ce travail est l'aboutissement de Dix années (2012-2022) d'un combat épuisant contre la Diffamation, la Discrimination, le Sabotage, le Mensonge, le Machiavélisme Syndical, le Plagiat, et bien sûr la Haine dans le secteur de la Recherche Agronomique.

Néanmoins, il y a lieu de rendre un vibrant hommage au petit faisceau de lumière salutaire qui s'est dessiné tout le long de cette difficile et laborieuse traversée. Un assemblage de bonnes âmes " sauveur et salvateur ", consciencieux et prévenant, qui m'a permis de faire mes incessants déplacements entre le département de Sciences du sol de l'ENSA, la station de recherche de l'INRAA d'El Hamadna et « Mon » espace - laboratoire Sol dans mon Ex-division de recherche Sols et Gestion des Espaces Agricoles à la station de l'INRAA de Mehdi Boualem.

Dans ce sens, et en premières pensées, je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements et ma profonde gratitude:

-A mon directeur de thèse, K. Djili Pr. (département de sciences du sol ENSA), de m'avoir consacré autant de temps et d'énergie par son encadrement et son accompagnement durant ces longues années de voyage. Merci pour les conseils avisés, les orientations pertinentes et les encouragements que le temps ne me fera pas oublier, Merci de m'avoir donné la chance et l'occasion de travailler sur un sujet qui m'a vraiment passionné, Mille Merci de m'avoir guidé dans ce grand périple sur les berges « du Cheliff »,

- A mon Co-directeur de thèse, Y. Daoud Pr., tout d'abord pour son implication indéfectible dans la bonne marche de cette thèse, et aussi pour son immense et inestimable aide, sa disponibilité, ses précieux conseils et critiques. Il est et restera pour moi un exemple de rigueur scientifique et de générosité.

Et

-Aux membres du jury qui ont bien voulu, avant toute chose, consacrer avec enthousiasme une partie de leur temps à l'examen de mon travail : T. Hartani Pr. (Directeur de l'ENSA), en sa qualité de président avisé de ma thèse, M^{ed}. Benslama Pr. (Université de Bordj Badji-Mokhtar de Annaba - département de Biologie), B. Hamdi-Aissa Pr. (Université de Kasdi Merbah de Ouargla - département des sciences agronomiques) et R. Djamai Pr. (Université de Bordj Badji-Mokhtar de Annaba - département de Biologie), et aussi qui m'ont fait l'immense honneur de siéger dans mon jury de thèse et qui ont accepté la lourde charge d'être les rapporteurs de ce travail.

En guise de retour sur l'impact de la solidarité entre amoureux des sciences, collègues et/ou Amis(es), dans la réussite de ce travail, Je suis particulièrement reconnaissant à de nombreuses personnes sans qui ces remerciements n'auraient pas de sens. Je tiens à citer dans l'ordre :

- " **Feu** " *Boulaine J-L-G.* sans qui je n'aurais jamais osé me lancer dans cette thèse. La personne qui m'avait encouragée et conseillée vivement et de vive voix à travailler sur cette région. Je tiens à témoigner de son immense gentillesse, de sa disponibilité malgré ses problèmes de santé, de son dévouement, de son amour pour notre spécialité et pour la plaine du Cheliff. Je souhaite en sa mémoire adresser des pensées très fortes et très chaleureuses pour sa famille,

- " **Feu** " *M. Abdelffetah M.*, Ex-Directeur et Ex-collègue à l'INRA-Algérie, pour sa simplicité, sa gentillesse, sa disponibilité, son courage et sa patience face à l'adversité.

- *M. Ouzzane H.*, Ex-Chercheur et Ex-collègue à l'INRA-Algérie, d'une part pour son aide et ses prises de décisions remarquables qui ont facilité l'accomplissement de ce travail, d'autre part pour son soutien indéfectible et ses conseils techniques et relationnels spécifiques. Je lui exprime ici ma gratitude et mon profond respect.

- *M. Chehat F. Pr.*, Ex-Directeur de l'INRA-Algérie, pour les facilitations administratives accordées, particulièrement lors des trois années d'expérimentation et de suivi sur terrain, pour son écoute et sa confiance. Je lui exprime ici ma reconnaissance et mon profond respect.

- *M. Harvey O.R. Pr.*, Professeur assistant au Département des sciences Géologiques, Texas Christian University, qui malgré la distance qui nous sépare m'a accordé sa confiance, son aide et l'accompagnement technique et humain pour la mise en place et l'accomplissement (dans le futur) d'une collaboration scientifiques de renommée.

- *M. Négre Ch.*, Directeur Général de l'INSID, pour ses conseils, son soutien, sa disponibilité et ses encouragements.

- *M. Zanndouche W.*, Ex-Directeur Général de l'INRF, pour sa patience, sa disponibilité, son soutien constant, et son aide précieuse à l'amélioration de ce manuscrit.

- *Malou S., Dekkiche N., et Gacem F.*, mes chers (es) Amis (es), pour leur disponibilité, leur aide, leur soutien et enfin leur patience, dans les différents moments et étapes de réalisation de ce travail.

- *Mahdid F., Benabbed N. et Hamlat S.*, Ex-collègues à l'INRA-Algérie et Sœurs d'armes, pour leur sérieux, leur professionnalisme exemplaire, leur sens du devoir et pour leur vaillance face à l'adversité.

- *M. Ferrah A.*, Directeur de l'INRA-Algérie, pour son inestimable aide, sa confiance et sa disponibilité.

Mes vifs remerciements s'adressent également à :

- *M. Dekkiche B.*, un de mes enseignants au département de pédologie à l'ENSA, pour son soutien, son aide, ses conseils avisés et ses encouragements.

- *M. Habila Med*, Ex-Directeur Général de l'INSID, pour ses conseils inestimables, son soutien, et enfin l'aide accordée "particulièrement" lors des quatre années pratiques.

- **M. Kradia L.**, Ex-directeur du laboratoire de l'INSID El-Matmar, pour son accueil, sa disponibilité, son aide, ses conseils techniques et son soutien.

- **M. Termoul Kh.**, Ami et Ex-Collègue à la station INRAA d'El Hamadna, à qui je dois beaucoup tant sur le plan de mise en place de la méthodologie, du déroulement des activités, ainsi que sur le plan humain, Il est clair que les longs moments passés à discuter et à débattre de la situation de la station me manquent et vont beaucoup me manquer.

- **M. Ghazali M.**, Ex-Collègue à l'INRAA, pour son inestimable aide, sa disponibilité et ses remarques intéressantes.

- **Kellou Abd.**, Ami et Ex-collègue à l'INSID, pour ses très bons conseils, son aide, ses orientations, et pour m'avoir initié au vrai travail du S.I.G.

- **Saaoud M. et Ait-Mechedal M.**, amis et collègues, pour leur contribution et leur inestimable aide dans la réalisation de ce travail.

- **M. Gorine M.**, Ex-Dicteur de la station de l'INRAA d'El Hamadna, pour son accueil, son aide et sa disponibilité.

- **Kessal A., Bouacem Ah. et Zareb Dj.**, Amis et Ex-collègues à l'INSID, pour leur soutien, leurs aides, et leurs encouragements.

- **Mes Collègues et amis à l'INRAA : Hamid, G. Abdelkrim Kh., et M'hamed D.**, pour leur sincérité, leur accueil et les bons moments passés ensemble dans la station d'El Hamadna.

- **Mes amis : Keffi M., Zellaque H., Kacimi Z. et Remram Y.**, pour leurs encouragements et leur immense soutien.

- **For "my nuclear family"**, qui m'a toujours aidée et soutenue, plus particulièrement Ma mère pour ses encouragements et ses prières, ma femme pour son sacrifice, sa patience et son dévouement, mes enfants : Wassim-Chihab, Samy et Kamil-Aylan pour leur patience dans mes moments de crises et pour leur soutien, sans oublier mon petit frère Salaheddine (Dino) pour sa disponibilité, sa grande contribution, ses encouragements et son appui.

Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, à un moment ou un autre, à l'accomplissement de ce travail de très longue haleine.

Merci à tous !!

Abstract

ملخص

Résumé

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 $1'AR_{\text{calcite}}$ 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} .*

Table des matières

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^-)	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

Liste des tableaux
Liste des figures
Liste des abréviations

Liste des tableaux

	<u>Page</u>
Tableau I. Précipitations moyennes mensuelles des trois sections géomorphologiques de la vallée du Cheliff (INSID, 2017).	15
Tableau II. Exploitation des données de températures pour les trois postes d'étude (1990-2016).	16
Tableau III. Caractéristiques des principaux affluents du Cheliff par sous bassin versant (ABH, 2004; Mehaiguene, 2005; Toumi, 2013; Taouhri, 2015. Oulhaci, 2016).	26
Tableau IV. Localisation et classification des profils types et des unités de sols adoptées en <i>E1</i>	43
Tableau V. Structuration adoptée pour le descriptif de <i>E1</i> .	44
Tableau VI. Couple <i>ESP- SAR</i> et l'évaluation du processus de salinisation.	46
Tableau VII. Les valeurs calculées du <i>SAR</i> et de l' <i>ESP_{eq}</i> des échantillons de <i>E1</i> et <i>E2</i> .	48
Tableau VIII. Les méthodes d'analyses du sol.	50
Tableau IX. Détermination des carbonates de la solution des sols de <i>E2</i> .	51
Tableau X. Statistiques descriptives pour les données globales de <i>EC_e</i> (dS/m).	59
Tableau XI. Les fréquences de distribution des classes des taux de salinité en %.	60
Tableau XII. Statistiques descriptives de la solution du sol pour <i>E1</i> et <i>E2</i> .	62
Tableau XIII. Matrice de corrélation pour les données de <i>E1</i> et de <i>E2</i> .	66
Tableau XIV. Les fréquences de distribution des <i>ESP_{eq}</i> .	76
Tableau XV. Statistiques descriptives de <i>EC_e</i> par horizons	78
Tableau XVI. Les fréquences de distribution des taux de salinité en %	81
Tableau XVII. Les fréquences de distribution <i>ESP_{eq}</i> .	84
Tableau XVIII. Fréquence de faciès chimiques dominant par nombre de solutions de sols et par période d'étude.	97
Tableau XIX. Ecart et vitesse de salinisation moyenne entre <i>E1</i> et <i>E2</i> des profils B163, A495, B217, A567, A503.	100
Tableau XX. Ecart et vitesse de salinisation entre <i>E1</i> et <i>E2</i> par horizon.	101
Tableau XXI. Paramètres descriptifs de <i>EC_{aff}</i> (dS/m).	127
Tableau XXII. Paramètres clés des modèles d'ajustement théoriques pour <i>h1</i> .	130
Tableau XXIII. Paramètres clés des modèles d'ajustement théoriques pour <i>h2</i> .	132
Tableau XXIV. Paramètres clés des modèles d'ajustement théoriques pour <i>h3</i> .	134
Tableau XXV. Paramètres clés des modèles d'ajustement théoriques pour <i>h4</i> .	135
Tableau XXVI. Paramètres clés des modèles d'ajustement théoriques pour <i>h5</i> .	137
Tableau XXVII. Erreurs d'estimation en dS/m (validation croisée) des différents modèles d'ajustement par couche.	138
Tableau XXVIII. Validation et choix des modèles d'ajustement par couche.	141
Tableau XXIX. Superficies et pourcentages des différentes classes de salinité.	141
Tableau XXX. Méthodes d'analyses appliquées.	157
Tableau XXXI. Statistiques descriptives de <i>EC_a</i> (dS/m).	167
Tableau XXXII. Statistiques descriptifs de <i>EC_e</i> (dS/m).	170
Tableau XXXIII. Les fréquences de distribution des taux de salinité pour chaque campagne d'étude.	173
Tableau XXXIV. Les fréquences de distribution des taux de salinité par campagne et par couche.	175
Tableau XXXV. Statistiques descriptives de <i>H_p</i> (%).	178
Tableau XXXVI. Statistiques descriptives de la granulométrie (%).	184
Tableau XXXVII. Statistiques descriptives de <i>pH_e</i> .	188
Tableau XXXVIII. Statistiques descriptives du Calc.tot. (%).	195
Tableau XXXIX. Statistiques descriptives du gypse (%).	196
Tableau XL. Matrice de corrélation entre <i>EC_e</i> et les différents paramètres d'étude.	198
Tableau XLI. Synthèse des interactions observées et de leurs significations.	199

Tableau XLII. Etalonnage des données de EC_a suivants les données de EC_e pour <i>C.I.</i>	203
Tableau XLIII. Etalonnage des données de EC_a suivants les données de EC_e pour <i>C.II.</i>	204
Tableau XLIV. Etalonnage des données de EC_a suivants les données de EC_e pour <i>C.III.</i>	205
Tableau XLV. Etalonnage des données de EC_a suivants les données de EC_e pour <i>C.IV.</i>	206
Tableau XLVI. Comparaison des moyennes pour les données de traitements <i>de C.I.</i>	207
Tableau XLVII. Comparaison des moyennes pour les données de traitements <i>de C.II.</i>	207
Tableau XLVIII. Comparaison des moyennes pour les données traitements <i>de C.III.</i>	208
Tableau XLIX. Comparaison des moyennes pour les données traitements <i>de C.IV.</i>	208
Tableau L. Matrice de corrélation entre les différences de moyennes en <i>C.I.</i>	209
Tableau LI. Matrice de corrélation entre les différences de moyennes en <i>C.II.</i>	209
Tableau LII. Matrice de corrélation entre les différences de moyennes en <i>C.III.</i>	210
Tableau LIII. Matrice de corrélation entre les différences de moyennes en <i>C.IV.</i>	211
Tableau LIV. Résultats statistiques de EC_{es} . (dS/m) par campagne d'étude.	212
Tableau LV. Superficies et pourcentages des différentes classes de salinité.	216
Tableau LVI. Erreurs moyennes réelles et absolues.	222
Tableau LVII. Nombre et pourcentage des points mesurés et estimés dans les cartes.	223
Tableau LVIII. Nombre et pourcentage des points mesurés et estimés dans les cartes (Saaoud, 2014).	224
Tableau LIX. Caractérisation chimique des eaux de drainage.	236

Liste des figures

	<u>Page</u>
Figure 1. Représentation des limites du bassin du Cheliff. "Unité géographique en forme de Fer de hache" (Extrait de Boulaine (1957)).	6
Figure 2. Représentation de la composition ensemble Hydrographique Bassin du Cheliff- Zahrez (<i>ABH-CZ, 2004</i>).	8
Figure 3. Actualisation du schéma de représentation des plaines du Cheliff proposé par Boulaine (1957).	10
Figure 4. Extrait de la représentation mondiale du système de classification de Köppen-Geiger (Kottek et <i>al.</i> , 2006).	14
Figure 5. Evolution des précipitations moyennes mensuelles pour les trois postes (1990-2016).	16
Figure 6. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausse pour les trois postes (1990-2016).	17
Figure 7. Représentation du gradient d'évolution de la hauteur de pluie sur l'ensemble de la vallée.	18
Figure 8. Structure générale du bassin du Cheliff (Neurdin-Trescartes, 1995).	19
Figure 9. Cadre géologique (Perrodon, 1957 ; Mattauer, 1958).	21
Figure 10. Localisation de oued Cheliff dans le bassin (source : Despois et Raynal, 1975).	24
Figure 11. Le réseau hydrographique inséré dans le paysage des plaines du Cheliff (source : <i>ABH-CZ, 2004</i>).	25
Figure 12. Représentation biogéographiques du bassin du Cheliff : Approche Quezel et Santa (1962) et Mediouni (1997).	28
Figure 13. Délimitation de la zone d'étude. (a).Localisation du site d'étude dans l'espace géomorphologique du bassin du Cheliff. (b).Limites administratives anciennes (1942-1961) et actuelles de la station de l'INRAA région Ouest.	38
Figure 14. Les étapes du traitement cartographique. (a).Numérisation de la maille de prospection pédologique de <i>E1</i> . (b).Actualisation de la maille de prospection pour les sondages et pour les profils types implantés. (c).Restauration de la carte des sols et des unités types. (d).Carte de localisation et de mise en place des profils types pour l'étude <i>E2</i> .	41
Figure 14c. La carte des sols salés de <i>E1</i> actualisée.	42
Figure 15. Schéma de représentation d'une table ou matrice de données (Carré et Jacobson 2009).	45
Figure 14d. Les points d'observations de l'étude <i>E2</i> .	49
Figure 16. Les différents types de profils salins (Servant, 1976).	55
Figure 17. Représentation des sections du Diagramme de Piper (Kouassi et <i>al.</i> , 2012 ; Halimi et <i>al.</i> , 2018).	56
Figure 18. Fréquences des classes de salinité en %.	61
Figure 19. Fréquences des classes de sodicité en %.	76
Figure 20. Représentation des indicateurs de tendance centrale par période d'étude. a) <i>E1</i> , b) <i>E2</i> .	79
Figure 21. Les écarts de taux de salinité pour <i>E1</i> et <i>E2</i> .	81
Figure 22. Répartition des classes de salinité dans les différents horizons d'étude.	82
Figure 23. Répartition des classes de sodicité dans les différents horizons d'étude.	85
Figure 24. Les profils salins type B. a) <i>B163</i> , b) <i>A503</i> , c) <i>A495</i> , d) <i>A567</i> , e) <i>A557</i> .	87
Figure 25. Profil salin type D. <i>B217</i> .	87
Figure 26. Profils salins de distribution <i>non apparentée</i> . a) <i>A507</i> , b) <i>A570</i> , c) <i>A573</i> , d) <i>A922</i> , e) <i>A923</i> .	87
Figure 27. Profils salins type B. a) <i>B163</i> , b) <i>A503</i> , c) <i>A507</i> , d) <i>A570</i> .	89

Figure 28. Profils salins type D. <i>a)A495, b) A573, c)A922, d) A923, e) A557,f) A567,g) B217.</i>	90
Figure 29. Evolution des profils salins ou de distribution de sels pour <i>E1</i> et <i>E2</i> .	92
Figure 30. Faciès chimiques des solutions de <i>E1</i> . <i>(a)Groupe avec $EC_e < 12,2$ dS/m, (b) Groupe avec $EC_e > 12,2$ dS/m.</i>	94
Figure 31. Faciès chimiques des solutions de <i>E2</i> . <i>(a)Groupe avec $EC_e < 12,6$ dS/m, (b) Groupe avec $EC_e > 12,6$ dS/m.</i>	96
Figure 32. Profil salin des profils pour les deux périodes (<i>E1</i> et <i>E2</i>). <i>a)A503, b) A567, c)B163, d) B217, e) A495.</i>	99
Figure 33. Amplitude des écarts de salinisation par horizon entre <i>E1</i> et <i>E2</i>	102
Figure 34. Le sens de circulation de l'eau et les zones de stagnation observée en <i>E1</i> (<i>Ait-Mechedal, 2014</i>).	104
Figure 35. Les zones de stagnation observées en temps actuel. <i>(a).Représentation d'une situation extrême sur le visuel des parcelles. (b).Schéma-plan du réseau proposé par AGID (2004).</i>	106
Figure 36. Mise en place de la table ou de la matrice de données spécifiques.	118
Figure 37. Projection des points de la maille de prospection de <i>E1</i> par rapport aux groupes "U.S.R".	119
Figure 38. Représentation graphique du variogramme et de ses paramètres clés (<i>Boudries et Mezghache, 2019</i>).	124
Figure 39. Représentation des indicateurs de tendance centrale pour EC_{aff} .	129
Figure 40. Illustration de la nuée de valeurs pour le calcul des modèles de semivariogramme par horizon.	131
Figure 41. Variogramme de $EC_{aff}.h1$ et modèle d'ajustement .	132
Figure 42. Variogramme de $EC_{aff}.h2$ et modèle d'ajustement.	133
Figure 43. Variogramme de $EC_{aff}.h3$ et modèle d'ajustement.	134
Figure 44. Variogrammes de $EC_{aff}.h4$ et les modèles sélectionnés. <i>(a) exponentiel, (b) circulaire, (c) sphérique</i>	136
Figure 45. Variogramme de $EC_{aff}.h5$ et modèle d'ajustement.	137
Figure 46. Les cartes des U.S.R. ou des classes de salinité par couche pour <i>E1</i> .	142
Figure 47. Représentation et synthèse des niveaux de nappe de <i>E1</i> lors des travaux d'aménagements.	144
Figure 13b. Délimitation de la zone d'étude.	150
Figure 48. Principe de fonctionnement du conductimètre électromagnétique (<i>Lesch et al., 2005</i>).	152
Figure 49. Mise en place des points de lectures électromagnétiques à l'aide de l'EM38. <i>Phase 1 et 2 : Insertion de la maille d'étude de E1. Phase 3 : établissement de la maille de 317 points.</i>	153
Figure 50. Utilisation de l'EM38 lors de la prospection (<i>Saaoud, 2014</i>).	154
Figure 51. Localisation et choix des sondages d'étalonnages.	156
Figure 52. Phase de préparation des échantillons (<i>Séchage, broyage et tamisage</i>).	157
Figure 53. Le couvert agricole observé dans la zone d'étude pour les quatre périodes d'étude.	158
Figure 54. Représentation des différentes étapes de traitement cartographique.	164
Figure 55. Schéma de la Delaunay triangulation. <i>(a) forme simple, (b) forme complexe.</i>	166
Figure 56. Représentation des données EC_a pour les 317 points. Les profils des paramètres de tendance centrale. <i>(a) C.I, (b) C.II, (c) C.III, (d) C.IV</i>	169
Figure 57. Représentation de EC_e pour les 37 sondages. Les profils des paramètres de tendance centrale. <i>(a) C.I, (b) C.II, (c) C. III, (d) C.IV.</i>	172
Figure 58. Répartition des classes de salinité dans les différents horizons par campagne d'étude.	176

Figure 59. Profils hydriques des minima et des maxima pour les 4 campagnes de mesures.	179
Figure 60. Identification des profils hydriques par une représentation en barres.	180
Figure 61. Profil d'humidité (%). Les paramètres de tendance centrale. (a) C.I, (b) C.II, (c) C. III, (d) C.IV.	182
Figure 62. Diagramme textural des échantillons de sols des sondages d'étalonnages d'une campagne de mesure.	184
Figure 63. Profils d'argile. "Les valeurs extrêmes et la moyenne".	185
Figure 64. Les indicateurs de tendance centrale pour la fraction argileuse.	185
Figure 65. Profils de Limon. "Les valeurs extrêmes et la moyenne".	186
Figure 66. Les indicateurs de tendance centrale pour la fraction limoneuse.	186
Figure 67. Profils de Sable. "Les valeurs extrêmes et la moyenne".	187
Figure 68. Les indicateurs de tendance centrale pour la fraction sableuse.	187
Figure 69. Profils des pH_e par campagne. "Les valeurs extrêmes"	189
Figure 70. Les profils de pH_e . Les indicateurs de tendance centrale. (a)C.I, (b) C.II, (c) C. III, (d) C.IV.	190
Figure 71. L'action du milieu environnant sur des placettes en clos. (a) Etat inondation/engorgement après averse, (b) Etat inondation/engorgement après irrigation.	192
Figure 72. L'action du milieu environnant. (a) Etat de surface et effet inondation, (b) Drainage inefficent, effet recharge et flux d'une nappe à faible profondeur.	193
Figure 73. Profils de <i>Calc.tot.</i> (%). "Les valeurs extrêmes et la moyenne"	196
Figure 74. Les indicateurs de tendance centrale pour le <i>Calc.tot.</i> (%).	196
Figure 75. Profils du gypse (%). " Les valeurs extrêmes et la moyenne".	197
Figure 76. Les indicateurs de tendance centrale pour le gypse (%).	197
Figure 77. Profils des EC_{es} par campagne. "Les valeurs extrêmes et les moyennes". (a) C.I, (b) C.II, (c) C.III, (d) C.IV	213
Figure 78. Profils moyens de EC_{es} (dS/m) des quatre campagnes.	214
Figure 79. Comparaison entre profils moyens de EC_e et EC_{es} (a) C.I, (b) C.II, (c) C.III, (d) C.IV	215
Figure 80. Spatialisation des niveaux de salinité par l'exploitation des données de " EC_{es} " par horizon et par campagne d'étude.	217
Figure 81. Localisation géographique des deux sites : <i>Périmètre El Hamadna et Périmètre El Khémis.</i>	234
Figure 82. Evolution du pH en fonction du facteur de concentration.	236
Figure 83. Evolution des activités ioniques de certains éléments en fonction du facteur de concentration. (a) Activités du Ca^{++} (mole l^{-1}), (b) Activités du Mg^{++} (mole l^{-1}), (c) Activités du Na^+ (mole l^{-1}), (d) Activités K^+ (mole l^{-1}), (e) Activités du SO_4^- (mole l^{-1}).	237
Figure 84. Le faciès chimique des eaux représenté sur le diagramme de Piper.	238
Figure 85. Etat de saturation des eaux par rapport à la calcite.	238
Figure 86. Les étapes de la détermination de l'alcalinité totale (AT) des eaux. (a) Courbe de titration de l'eau à l'aide l'acide chlorhydrique 0,01N. (b) Application de la fonction de Gran (1952). (c) Ajustement de la partie linéaire de la fonction de Gran (1952).	239
Figure 87. Evolution de l'alcalinité totale (AT) en fonction du facteur de concentration.	240

Figure 88. Evolution de l' $AR_{calcite}$ et du calcium en fonction du facteur de concentration des eaux.	241
Figure 89. Synthèse des changements observés dans la mise en place des profils salins étudiés.	247
Figure 90. Spatialisation des niveaux de salinité pour une approche comparative entre les données de visualisation de EI et les données de campagnes de " EC_a ".	252

Liste des abréviations

- ABH-CZ** : Bassin hydrographique du Cheliff-Zahrez
S.N. R.E.P.A.L : Société nationale de recherche et d'exploitation de pétrole en Algérie
INSID : Institut National des sols, de l'irrigation et du Drainage
PNUD : Programme des Nations unies pour le développement
WRB : World Reference Base for soil resources FAO
M.A.T.E : Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement
BNEDER : Bureau National d'Étude pour le Développement Rural
M.R.E. : Ministère des Ressources en Eau
M.A.T.E.T. : Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du Tourisme
FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations
CPCS : Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
AGID : Agence Nationale de Réalisation et de Gestion des infrastructures Hydrauliques pour l'Irrigation et le Drainage
Alt. : Altitude
P. : Pluviométrie
T. : Température
WGS84 : World Geodetic System 1984
USSL : United States Salinity Laboratory
Péri. : Périodes
Par. : Paramètres
E. : Etude
Prof. : Profil
Hrz. : Horizon
Min. : Minimum
Méd. : Médiane
Moy. : Moyenne
Max. : Maximum
Ec.-ty. : Ecart-type
Var. : Variance
C.V. : Coefficient de corrélation
Asy. : Asymétrie
Apl. : Aplatissement
Fréq. : Fréquence
EC : Conductivité électrique
EC_e : Conductivité électrique à l'extrait de pâte saturée
pH_e : Potentiel hydrogène à l'extrait de pâte saturée
ESP : Élément sodium échangeable mesuré
ESP_{eq} : Élément sodium échangeable estimé par équation
SAR : Sodium Adsorption Ratio
CEC : Capacité d'échange cationique
meq l⁻¹ : Milliéquivalent par litre
CNS : Cartographie numérique des sols
DSM : Digital Soil Mapping
U.S.S.R. : Unités de sols salés de référence
U.S.R. : Unités de sols reconnues

EC_{aff.} : Données "de conductivité électrique" affectées
VEO : Variogramme expérimental omnidirectionnel
ME : Erreur moyenne
ASE : Moyenne de l'erreur type
RMSE : Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne
RMSSE : Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne standardisée
IEM : Induction électromagnétique
KO : Krigeage ordinaire
CEM : Conductivité électromagnétique du sol
EC_a : Conductivité électrique apparente du sol
EM_v : Lecture en position verticale
EM_h : Lectures en position horizontale
Hp.(%) : Humidité pondérale
Arg. (%) : Argile
Lim. (%) : Limon
Sab.(%) : Sable
Calc.tot.(%) : Calcaire total
Camp. : Campagne
C.(I., II., III., IV.) : campagnes de mesures ou d'étude
EC_{es.} : Conductivité électrique *estimée*
Et: Etape de traitement
Form.: Formulation
Log_{10.} : Logarithme décimal
TIN. : Réseau irrégulier triangulaire
ha : Hectare
AR_{calcite} : Alcalinité résiduelle calcite
AT : Alcalinité totale

Introduction Générale

« Savoir s'étonner à propos, est le premier pas fait sur le chemin de la découverte »

"Louis Pasteur"
(1822-1895).

Introduction Générale

Les sols constituent une ressource naturelle non renouvelable et non extensible (GIZ., 2014) qui peut être utilisée durablement pour la production agricole ou forestière. Sa destruction est souvent irréversible et sa réhabilitation est très coûteuse. Les pressions qu'elle subit engendrent des processus de dégradation plus ou moins rapides (Gis Sol., 2011). Actuellement, l'un des plus grands challenges environnementaux de l'homme, *de la perte de la biodiversité jusqu'au changement climatique*, est de la préserver contre toutes les formes de dégradation.

De l'avis de tous, la dégradation des sols est amenée à s'intensifier dans les années à venir (Steichen, 2013). Ainsi, avec l'augmentation de la population mondiale, la pression sur les sols agricoles s'exacerbera et ce capital naturel sera confronté à un déclin continu (Koch et al., 2013).

La salinisation est l'une des causes de la dégradation des sols agricoles et qui leur pose énormément de problèmes. La salinité est la plus importante cause de cette dégradation et elle est la plus répandue à l'échelle du globe (Cherlet et al., 2018). Elle est surtout fréquente dans les régions arides et semi-arides là où les précipitations sont insuffisantes pour lixivier les sels solubles du sol (FAO, 2005 ; Juan et al., 2011 ; Hossain, 2019). La salinité est un phénomène très inquiétant du fait qu'elle expose les sols à une perte de fertilité et contribue donc significativement à la mise en place du processus de désertification (Vengosh, 2003 ; ELD et UNEP, 2015 ; Feizizadeh et al., 2022), voire à l'installation d'un paysage naturel typique et spécifique (Duchaufour, 1988; Bouteyer et Loyer, 1992).

Aujourd'hui, malgré l'ampleur et la gravité de cette situation, il n'existe pas de statistiques récentes et précises sur la surface de sols affectée par la salinité à travers le monde (FAO-ITPS-GSP., 2015). Néanmoins, il est fait référence à des observations sur les différents continents avec des proportions spatiales différentes (FAO, 2020). Ces dernières varient entre 1,0693 (Ivushkin et al., 2019) et 1,125 milliard d'hectares (Wicke et al., 2011).

Dans certains cas, les effets de la salinité sont aussi observés dans les sols des régions *humides* et *sub-humides*, spécifiquement dans les zones sous l'influence de l'eau de mer et des intrusions marines (Li et al., 2014 ; FAO, 2020).

De règle générale, la salinité des sols est causée par des facteurs naturels ou anthropiques (Montoroi, 2017; Hossein, 2019; Stavi et al., 2021) et se rapporte au mécanisme d'accumulation de sels solubles - plus solubles que le gypse (Aubert, 1976 ; Cheverry et Bourrié, 1998 ; Arshad,

2008 ; Beghin, 2019). Ce phénomène évolue selon deux voies, la voie saline neutre et la voie saline alcaline. Par ces deux voies, Marlet et Job (2006) font référence à des phases de transitions dont les conditions *de formation et de mise en place* sont liées au concept d'alcalinité résiduelle.

Les systèmes de classification des sols les plus usuelles (CPCS, 1967 ; Soil Survey Staff, 1999 ; RPF, 2008 ; WRB, 2014) utilisent des langages et des termes caractéristiques pour définir les types et la nature des sols contenant de fortes teneurs en sels solubles (Girard *et al.*, 2011; FAO, 2020). De manière synthétique, il est possible d'affirmer qu'ils se basent sur l'identification des types de sels et l'intensité du phénomène causé (FAO, 2020; Bruning *et al.*, 2021). Pour ce faire, les paramètres d'étude utilisés sont la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée "EC_e" (dS/m à 25°C), le pH, le taux de sodium échangeable (ESP en % de la CEC) et le sodium adsorption ratio (SAR en (meq/l)^{1/2}). Ceci permet de subdiviser les sols salés en trois catégories, les sols salins (*Saline soils, Solonchack*), les sols à alcalis (*non Saline - Sodic soils, Solonetz*) et les sols salins à alcalis (*Saline-Sodic soils, Solontachak - Solonetz*).

En Algérie, les sols salés couvrent des surfaces très importantes ce qui impacte négativement les espaces agricoles et les écosystèmes naturels existants (Durand, 1954 ; Boulaine, 1956 ; Aubert, 1976 ; Halitim, 1985 ; 1988 ; INSID, 1998). Une évaluation sommaire de leur répartition basée sur différents travaux (Durand, 1954 ; Boulaine, 1957 ; Daoud, 1993 ; Daoud *et al.*, 1993 ; Djili, 2000 ; Douaoui et Walter, 2002 ; Touaf, 2002 ; Douaoui, 2005 ; Saidi, 2005 ; Berkal, 2006 ; INSID, 2008 ; Hadj Miloud, 2019) permet d'indiquer leur présence dans les régions suivantes :

- Les plaines littorales et intérieures *de Maghnia, de Tlemcen, d'Ain temouchent, d'Oran, de Mostaganem, de Mascara, du Cheliff, de la Mina, d'Annaba et d'El Taref.*
- Les hautes plaines Est *de Batna, de Sétif, d'Oum El Bouaghi et de Khenchela.*
- Les hautes plaines centre ouest *de Naama, de Saïda, de Tiaret, de Djelfa, et de M'sila.*
- Les abords des chotts, sebkhas (*Chott Ech Chergui, Chott Gharbi, Chott Hodna, Chott Melghir, Sebkha d'Oran, de Benziane, de Zemmoul, Zahrez Gharbi et Zahrez Chergui, etc..*).
- Et enfin, sur de grandes étendues dans les régions saharienne et les oasis (Biskra, Touggourt, Ouargla, Adrar, Bechar, etc...).

Dans l'ensemble, il est bien connu que la réhabilitation, la valorisation et la gestion des sols affectés par les sels nécessitent une gouvernance intelligente basée sur la combinaison de toutes les pratiques agro-écologiques et agro-éco systémiques consistantes.

Dans ce contexte, la proposition d'un travail de recherche sur l'une des régions salées d'Algérie, en l'occurrence les plaines du Cheliff, a été un défi fort intéressant et motivant. Fonctionnant sur l'adoption d'approches innovantes pour la promotion d'une bonne intendance des sols de cette zone à éco-paysage spécifique, l'idée recherchée et développée dans cette thématique consiste à consolider les acquis et à réétudier le phénomène de salinité dans les sols de ces plaines, avec en perspective une réhabilitation, une gestion, une protection optimale et une valorisation agricole rigoureuse.

Pour ce faire, les différentes méthodologies adoptées et organisées en chapitres sont :

- Un traitement pédométrique (quantitatif et qualitatif) comparatif sur des données d'étude de plus de cinquante ans (1956-2012) dans les sols salés de la région d'El Hamadna (Bas-Cheliff).
- Une adaptation et application d'une approche de cartographie numérique des sols (CNS) en vue de préserver et de valoriser l'héritage cartographique et pédologique de l'étude de 1956.
- Utilisation d'une approche de cartographie pédologique non invasive (IEM) combinée à une modélisation prédictive dans le cadre de suivi du phénomène de salinité sur les sols salés du site référence.
- Evaluation chimique et géochimique des eaux de drainage et prédiction des conséquences de l'irrigation sur le devenir alcalin des sols des plaines du Cheliff.

Pour ce dernier point, il y a lieu de citer le choix de deux sites relevant d'un contexte de périmètre irrigué. Le premier est situé dans la région d'El-khemis (Haut-Cheliff). Le second représente celui d'El Hamadna.

Il est utile de rappeler que le nom de ces plaines a été différemment orthographié, depuis des lustres dans les ouvrages aussi bien littéraires que scientifiques. Il s'agit d'une forme de variation des formes de noms et de leurs applications au paysage, soit par recommandations officielles, soit par erreur de lecture ou erreur de transcription, en référence au principal affluent qui les sillonnent et les creusent : "*Cheleff*", "*Chlef ou Chleff*", "*Ec-Chélif ou Ech-Chélif*", "*Chelif ou Chélif*", et "*Cheliff ou Chélif*". D'emblée, et pour construire une compréhension commune et harmonieuse à la bonne conduite du manuscrit, nous avons jugé utile de prendre en compte l'orthographe Cheliff dans tout ce qui suit.

En fin, l'organisation générale de cette thèse repose sur six chapitres. Le premier est une étude bibliographique détaillée sur les spécificités biogéographiques qui structurent et définissent le contexte de cette recherche. Les chapitres II, III, IV et V constituent le noyau de cette recherche

qui est organisée en quatre travaux interreliés, mais résolus un par un de façon indépendante. Le dernier chapitre (VI) est une synthèse des résultats obtenus associée à une conclusion sous forme de perspectives de réhabilitation, de valorisation et d'optimisation de la production agricole des sols de la région.

Chapitre I.
Les plaines du Chélif, "un milieu naturel" d'exception

« Il est exceptionnel qu'on accorde aux œuvres de la nature la stupéfaction qu'elles méritent... »
"Jean Rostand"
(1894-1977).

Chapitre I. Les plaines du Cheliff, "un milieu naturel "d'exception

Introduction

Le but de ce chapitre est d'identifier et de présenter les principaux paramètres physiques et biologiques qui structurent et définissent le milieu naturel des plaines du Cheliff.

Les différents axes développés dans cette partie s'articulent autour des points suivants :

- Le contexte climatique.
- Le cadre géologique général.
- L'hydrogéologie et le système aquifère de la région.
- Les aspects hydriques et les accumulations superficielles.
- La phytogéographie de la région du Cheliff.
- La ressource en sol.

Toutefois, cet ensemble diagnostic est précédé par une courte présentation de l'espace d'étude sur la base de la localisation, du prolongement et de la représentation spatiale de ses limites géographiques connues.

1. L'espace géomorphologique d'appartenance

Les plaines du Cheliff font partie intégrante de l'orographie de l'ensemble géomorphologique qu'est le bassin du Cheliff (figure 1).

1.1. Le bassin du Cheliff comme structure socle régionale

Le bassin du Cheliff est localisé dans l'Atlas tellien de l'Algérie occidentale (Derder et *al.*, 2011), en alignement parallèle à la côte méditerranéenne (Achour et *al.*, 1998 ; Habibi, 2018). Il occupe une portion dont l'orographie est à la fois simple et typique (Boulaine, 1957), sur fond de successions de plaines, plateaux et collines orientés suivant une direction E-W à NE-SW (Ladjadj, 2009).

A travers le temps, le bassin du Cheliff a été souvent apparenté à différentes formes :

- Fer de hache (Boulaine, 1957 ; Daoud, 1993).
- Bassin intra-montagneux (Perrodon, 1971 ; Neurdin-Trescartes, 1995 ; Derder et *al.*, 2011).
- Cuvette intra-montagneuse (El Meddahi, 2009).

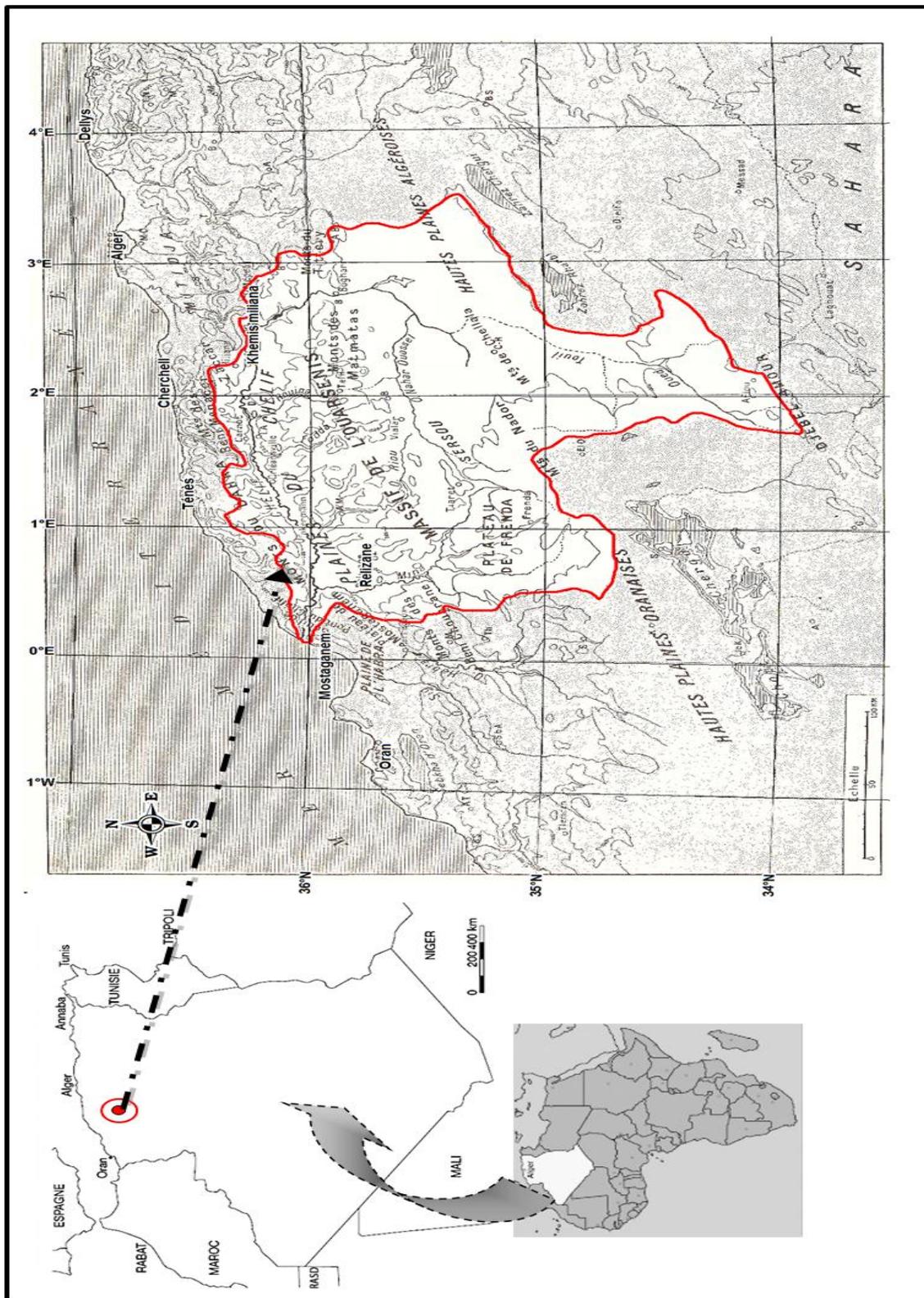


Figure 1. Représentation des limites du bassin du Cheliff.
"Unité géographique en forme de Fer de hache"
(Extrait de Boulaire (1957)).

Le bassin du Cheliff est considéré comme le plus vaste bassin hydrographique du nord du pays avec une superficie qui reste tout de même assez approximative. Les différents écrits traduisent une variation assez importante :

- 43750 km² (ABH-CZ, 2004; Bouzada, 2013 ; Habibi, 2018).
- 43816,41 km² (Rezak, 2014).
- 44035 km² (Mehaiguene, 2005).
- 44630 km² (Boulaine, 195 ; Daoud, 1993 ; Boukli et *al.*, 2010).
- 45000 km² (Achour et *al.*, 1998).

Géographiquement, il s'insère entre les latitudes 33°91" et 36°58" N et les longitudes 0°12" et 3°87" E. Ces limites sont encadrées par trois (03) zones bien distinctes :

- Au Nord, le sillon du Cheliff encadré par les deux chaînes telliennes : les monts du Zaccar (1579m) que prolongent les plateaux du Dahra au Nord et le massif de l'Ouarsenis (1985m) et les monts de Béni Chougrane (932 m) au Sud.
- Au Sud, les hautes plaines ou hauts plateaux Est-Centre-Ouest (culminants entre 900 à 1200m d'altitude) entre l'Ouarsenis et l'Atlas Saharien (avec des monts culminants entre 1490m et 2010m).
- Plus au Sud, le bassin du Zahrez.

Actuellement, le bassin versant du Cheliff est placé ou assimilé dans l'ensemble hydrographique du Cheliff-Zahrez (figure 2) sur la base de *la loi N° 83 - 17* adoptée et promulguée le 16 juillet 1983. Une loi modifiée et complétée par l'ordonnance n° 96-13 du 14 juin 1996, portant code des eaux, notamment les articles 125 à 130.

Il y a lieu d'indiquer que le texte législatif accompagnant cette loi a été agrémenté juridiquement par les dispositions d'application prévues :

- D'une part, par le Décret exécutif N° 96/100 du 17 Chaoual 1416 correspondant au 6 mars 96, portant sur le découpage du territoire national en unités hydrographiques naturelles dénommée : "*Bassins Hydrographiques*".
- D'autre part, par le Décret exécutif n°96/282 du 11 Rabie Ethani 1417 correspondant au 26 août 1996, portant création de l'agence du *Bassin hydrographique Cheliff – Zahrez*.

Structurellement, le bassin hydrographique du Cheliff-Zahrez a été compartimenté en trois sous bassins :

- Le sous bassin côtier du Dahra (3201 km²).
- Le sous bassin du Cheliff, qui à son tour, a été subdivisé en deux grands zones :

- la zone du Cheliff à l'aval du barrage Boughzoul (24028 km²) et celle à l'amont du barrage de Boughzoul (19979 km²).
- Le sous bassin du Zahrez (8989 km²).

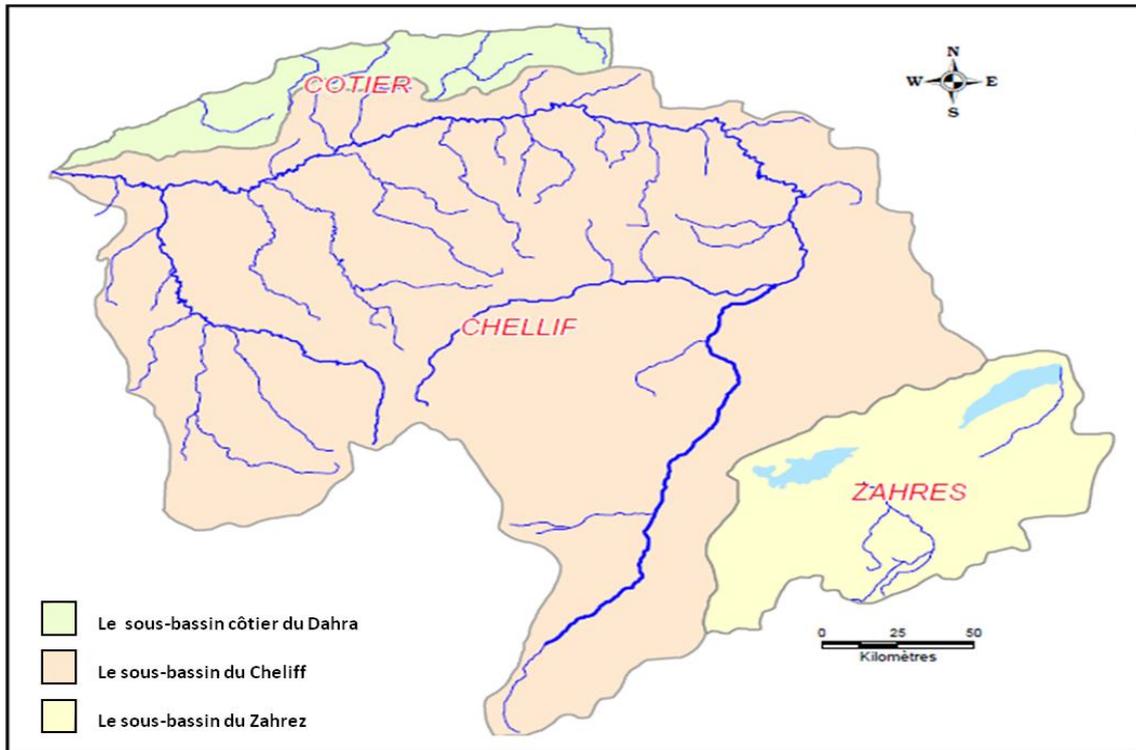


Figure 2. Représentation de la composition ensemble Hydrographique bassin du Cheliff- Zahrez (ABH-CZ, 2004).

Pour cette étude, et pour les besoins de la mise en place et l'exécution de notre schéma méthodologique, nous nous limiterons uniquement à l'évaluation du phénomène de la salinisation selon l'ancienne description du bassin versant du Cheliff (figure 1).

1.2. Les plaines du Cheliff

La vallée du Cheliff, ou la dépression du Cheliff, du nom de l'oued qui la traverse, se situe dans la partie occidentale du nord de l'Algérie central (Boukli et *al.*, 2010), en occupant la limite nord du bassin versant du Cheliff (Amichi, 2009). Il s'agit d'une immense formation qui appartient, par fraction presque égale (Pourcher, 1900), à deux pôles économiques importants, Alger et Oran (Slimani Ait-Saada, 2007).

De tout temps, les plaines du Cheliff ont été différemment schématisées (Boulaine, 1957). Les travaux réalisés jusqu'à présent laissent apparaître les formulations "géomorphologiques" caractéristiques suivantes :

- Un long couloir de plus de 225 km, sur des largeurs variables jusqu'au confluent de la Mina (Pourcher, 1900).
- Une plaine étirée, ou plutôt un chapelet de plaines faisant communiquer les basses terres oranaises avec la région algéroise (Emerit, 1957).
- Des plaines qui forment une gouttière de 190 km de long. Une formation en chapelet de bassins légèrement étagée et séparée par de modestes rétrécissements (Despois et Raynal, 1975).
- Une vaste dépression « intertellienne », constituée d'un morcellement de plaines alluviales (Brives, 1897¹ ; S.N. R.E.P.A.L., 1952 ; Boulaine, 1957; Polvèche, 1960; Daoud, 1993 ; Slimani Ait-Saada, 2007).

La mise en place de ces descriptions s'appuie sur la formulation d'un gradient géographique dont l'axe orienté grossièrement d'Est en Ouest est constitué par le cours du Cheliff.

Pour illustrer et simplifier au mieux l'agencement de ces différentes plaines dans le bassin versant du Cheliff, certains auteurs (Perrodon, 1957 ; Mattauer, 1958) et, à un degré moindre Brives (1897), ont proposé l'idée de vulgariser leur regroupement ou leur association en trois compartiments ou sections bien distinctes. Il est cité la région du *Haut-Cheliff*, la région du *Moyen-Cheliff* et la région du *Bas-Chéllif*.

Le schéma de mise en place le plus effectif de cet ensemble de plaines a été proposé par Boulaine (1957) (figure 3).

En exploitant les différents travaux menés sur les plaines de la vallée du Cheliff reposant, soit sur une approche d'étude d'ensemble (Pourcher, 1900 ; Boulaine, 1957 ; Hydrotechnique Corp., 1976; Daoud, 1993 ; INSID, 1996 ; Saïdi et al., 1998 ; Meheguaine, 2005 ; Slimani Ait-Saada, 2007 ; Meddi et Meddi, 2009 ; PNUD, 2009 ; Bouzada, 2013), ou bien sur une région ciblée (El Meddahi, 2009 ; Bradaï et al., 2012 ; Douaoui et al., 2006 *a,b* ; Abboura, 2014 ; do-Rosário, 2015 ; Touhari, 2015), il est possible de les présenter comme ci-après:

- ***L'unité géographique du Haut-Cheliff*** est comprise entre 250 m et 300 m d'altitude. Elle renferme la plaine d'El-Khémis et la plaine d'El Abadia. Cette région est située à 120 Km au Sud-Ouest d'Alger et s'étend sur une superficie d'environ 50000 ha. Elle représente la plus grande proportion de la vallée du Cheliff. La pente observée se présente avec une faible déclivité (<15%).

¹ Il a proposé une approche qui se base sur l'orographie. Elle définit l'ensemble de la région « Le Dahra », située au Nord de la plaine et comprise entre Miliana et Mostaganem : une région montagneuse (qui est la région haute), une région moyenne peu accidentée, et enfin une région basse constituée par les plaines du Cheliff.

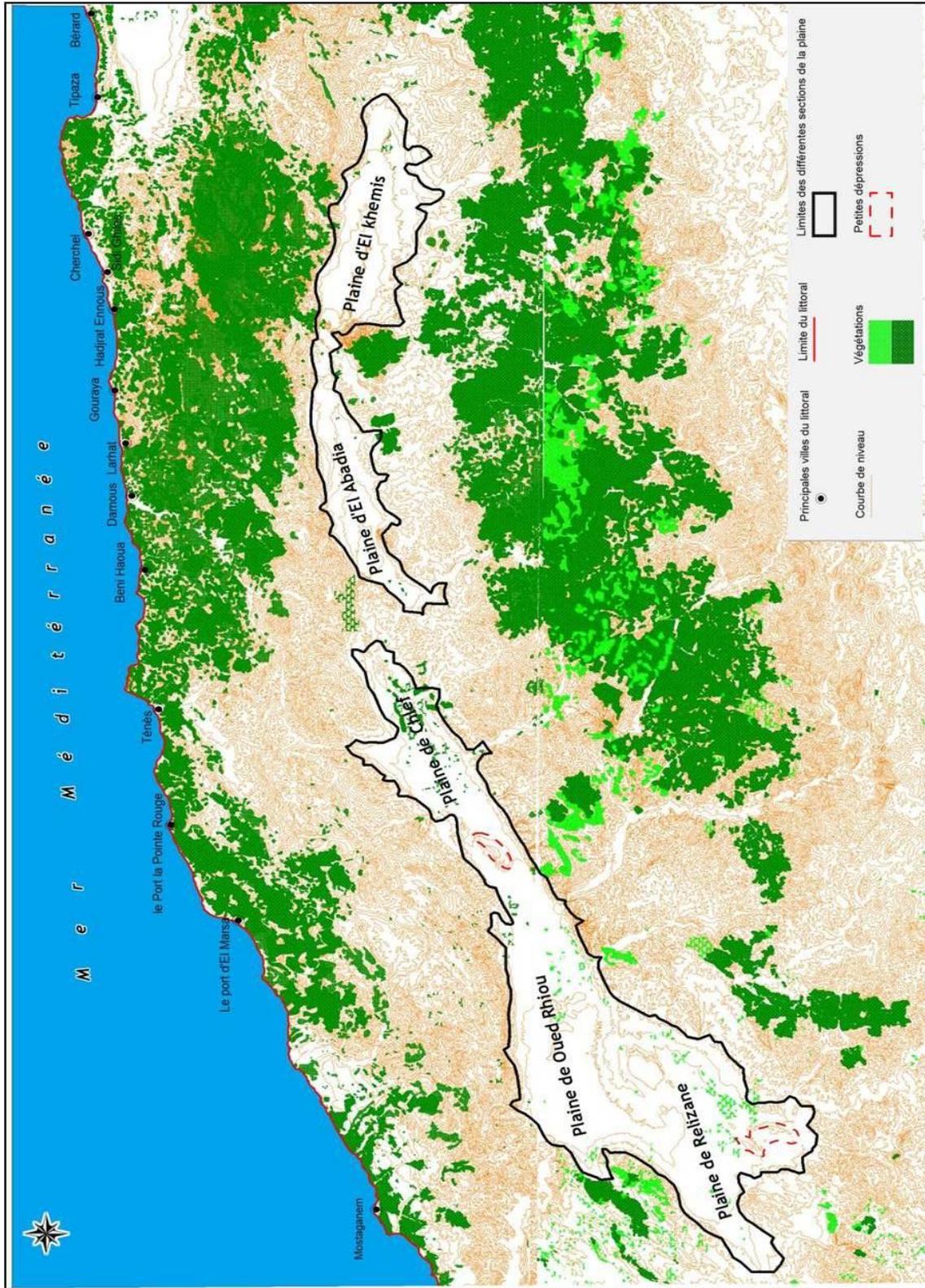


Figure 3. Actualisation du schéma de représentation des plaines du Cheliff proposé par Boulaine (1957).

Les principales villes appartenant à cette région sont *Djendel, Ain Soltane, Bir Ould Khelifa, Khemis Miliana, Sidi Lakhdar, Djelida, Arib, Ain Defla, El Amra, Ain Bouyahia, El Abbadia, El Attafs et Oued-Fodda.*

- ***L'unité géographique du Moyen-Cheliff*** est comprise entre environ 150 m et 250 m d'altitude. Cette région se situe immédiatement en aval de l'unité du *Haut-Cheliff* et renferme la plaine du Cheliff (proprement dite). Elle est localisée au centre du bassin du Cheliff à 240 km à l'Ouest d'Alger et elle s'étale sur une superficie de plus de 44000 ha. La pente observée est relativement faible.

Les principales villes situées dans cette région sont *Ouled Abbas, Labiodh Medjajas, Oum Drou, Cheliff, Chettia, Ouled Fares, Oued Sly et Sobhat.*

- ***L'unité géographique du Bas-Cheliff*** est comprise entre 35 et approximativement 150 m d'altitude. Elle représente la partie la plus basse de la vallée du Cheliff (jusqu'à l'embouchure de Mostaganem). Elle renferme la plaine d'Oued Rhiou, la plaine de Relizane, et l'extension de la région *de la Mina*. Elle est située à 250 km à l'Ouest d'Alger. La superficie de cette région est estimée à plus de 60000 ha et se caractérise généralement par un relief plat.

Les principales villes situées dans cet espace sont Boukadir, Merdja sidi Abed, Oued Rhiou, Djediouia, H'madéna et H'madéna Bourokba, Ouarizane, Oued Djemaa et Sidi Kheta.

2. Evaluation de la complexité physique et biologique du milieu naturel

Hormis les descriptifs relatifs au contexte climatique et à la ressource en sols qui ont été traités de manière spécifique à la vallée du Cheliff, les autres points développés dans cet axe ont ciblé l'aspect compréhension de la constitution, de la mise en place et du fonctionnement du bassin du Cheliff.

Sachant qu'une meilleure connaissance de cet ensemble "constituant" permettra, en premier lieu, une compréhension du passif historique de cette formation et, en second lieu, une évaluation et un suivi de la dynamique évolutive de la salinité dans *l'espace sol et dans le temps.*

2.1.Le contexte climatique

Depuis plus de cent ans, le climat des plaines du Cheliff a été abordé, décrit et/ou traité dans plusieurs études de caractérisation. Ces dernières ont été réalisées :

- Soit sur fond **d'approche groupée - systématique très détaillée** (Pourcher, 1900 ; Seltzer, 1946 ; Yacono, 1954 ; Durand, 1954; Boulaine, 1957; Hydrotechnique corp., 1976; Daoud, 1993; Mehaiguen, 2005; Slimani Ait-Saada, 2007; Rata, 2010; Bouzada, 2013).

- Soit sur fond **d'approche scindée-sélective** (Douaoui, 2005 ; Saidi, 2005 ; Amichi, 2009; Bettahar et *al.*, 2009; El Meddahi, 2009; Abdelhafid, 2010 ; Yahiaoui, 2011; Bouchenouk, 2013; Tamazouzt, 2013 ; Abourra, 2014; Ait-Mechedal, 2014 ; Aissaoui et Messaoudi, 2015, do Rosário, 2015; Touhari, 2015; Bradai, 2017, Ziane et *al.*, 2017 ; Hadj-miloud, 2019).
- Ou bien sur fond **méthodologique spécifique** (Capolini et *al.*, 1969 ; Achour et *al.*, 1998 ; Achit et Meddi, 2004 ; Meddi et Meddi, 2004 ; 2009 ; Boukli et *al.*, 2007 ; 2010 ; Meguenni et Remini, 2008 ; PNUD, 2009 ; Medejerab et Henia, 2011 ; Mehaiguene, 2013 ; Kartoubi et *al.*, 2017 ; Habibi, 2018 ; Ziane et *al.*, 2021).

De manière succincte, le climat des plaines du Cheliff, placé dans le contexte climatique de l'Algérie du Nord, constitue une particularité par son été chaud et sec et son hiver frais avec des températures tempérées et de faibles précipitations, un printemps écourté et un automne très bref.

2.1.1. Analyse quantitative du paramètre "Pluviométrie"

Dans les zones sèches, il est connu que la pluie ne parvient pas à éliminer les sels de la solution du sol. Le plus souvent, ces sels sont transportés latéralement sur de courtes distances, et, en raison d'un drainage insuffisant, s'accumulent dans les dépressions (Boulaine, 1957 ; Massoumi, 1968 ; WRB, 2014). Cette absence de drainage, et en même temps la forte évaporation, favorisent de plus en plus l'accumulation dans le sol de ces éléments solubles, qui ont certains effets régressives sur les propriétés physiques des sols et sur la végétation (Massoumi, 1968 ; Aubert, 1983 ; Waskom et *al.*, 2012).

Dans la vallée du Cheliff, particulièrement dans la région du Bas-Cheliff et de la Mina, ces différents facteurs constituent les problèmes les plus graves pour la mise en valeur agricole des terres et le devenir des sols (Boulaine, 1957 ; Daoud, 1993 ; INSID, 1998 ; Saidi, 2004 ; Saïdi et *al.*, 2004 ; Gherina et *al.*, 2008). Les faibles apports d'eau de pluies, les processus de lessivage vertical et de déplacement latéral des sels restent, ainsi, moins complets comparativement à ceux des régions humides. De ce fait, lorsqu'il y a un phénomène de lessivage, il reste limité au profil et les sels ne sont pas exportés en dehors. Ces derniers ont, au contraire, tendance sous l'action de l'évaporation et du déficit d'humidité à se concentrer dans le profil et surtout dans les horizons superficiels (Boulaine, 1957 ; Pouget, 1968 ; Massoumi, 1968 ; Servant, 1976 ; Daoud, 1993 ; Bradai et *al.*, 2008 ; Girard et *al.*, 2011).

Pour cette partie nous ne nous sommes focalisés que sur le paramètre "**Pluviométrie**".

Dans l'ensemble, il est connu que les précipitations (surtout liquides) agissent en fonction de leur fréquence, d'une part sur le comportement hydrologique (débit et crues) du principal cours d'eau de la vallée du Cheliff, en l'occurrence *oued Cheliff*, et de ses différents affluents et, d'autre part, sur la dynamique évolutive à long terme des sols des différentes plaines.

Les données utilisées pour conceptualiser les hauteurs de pluies observées ont été obtenues à partir des stations météorologiques de type poste pluviométrique (PP) mises en place par l'Office Nationale de Météorologie (ONM)² à *Khemis Miliana, Cheliff et Relizane*. Ces derniers, qui par ordre d'agencement géographique, correspondent à chacune des entités géomorphologiques (connues) de la vallée du Cheliff.

L'évaluation est réalisée sur une chronique pluviométrique de vingt-sept ans (27ans), s'étalant entre 1990 et 2016. Cette série temporelle est choisie pour des raisons pratiques liées, d'une part à la disponibilité et l'accessibilité à l'information la plus récente, et d'autre part à l'aspect connaissance du milieu pour une meilleure prise en charge des problématiques d'échantillonnage (sols et eau). Le traitement de l'information a été réalisé à l'aide du tableur Excel. L'expression des résultats est proposée sous forme de tableau et de graphiques représentatifs des différentes périodes de ce phénomène.

2.1.1.1. Aperçu général sur les trois postes pluviométriques

Cette présentation est structurée autour de la localisation géographique, d'une brève représentation du milieu et du type de climat qui prédomine.

- **Poste de Khemis Miliana:** *36,2377° N., 2,2127 °E., Alt.: 330m*

La région de Khemis Miliana est considérée comme la porte naturelle proprement dite du Cheliff (Slimani Ait-Saada, 2007). De par sa position géographique au pied des pentes des massifs de Miliana, en retrait et complètement isolée de l'influence marine, elle s'identifie par une continentalité très marquée du climat. Elle est, de ce fait, moins arrosée que le versant Nord et subit des conditions d'un milieu plus aride (Yacono, 1955 ; Slimani Ait-Saada, 2007). Selon le système de classification de **Köppen-Geiger** (Kottek et *al.*, 2006 ; Climate-Data.org., 2019) le climat dans la région est de type *Csa* (figure 4). Un climat méditerranéen, avec des étés chauds et secs et des hivers doux et humides.

- **Poste de Cheliff :** *36,21° N., 1,33° E., Alt. :144m*

Située dans une cuvette séparée de la mer par les monts du Dahra, Cheliff est considérée

² Le droit d'exploiter les données a été octroyé à l'INSID.

comme l'une des régions les plus chaudes d'Algérie (Boulaine, 1957), voire l'une des régions torrides (Slimani Ait-Saada, 2007). En effet, les maximas de températures célèbres observées (46,5°C, 47°C et 48°C) sont comparables aux observations effectuées au Sahara.

Selon le système de classification de **Köppen-Geiger** (figure 4) (Kottek et al., 2006 ; Climate-Data.org., 2019) le climat de la région de Cheliff et de ses localités est de type *Csa* ce qui indique un climat méditerranéen, avec des étés chauds et secs et des hivers doux et humides.

- **Poste de Relizane** : 35,6108° N., 0,6766° E., Alt. : 79m

Comme les autres portions de la vallée du Cheliff, la contrée de Relizane a un climat considéré comme spécial. Il est spécifiquement très rude et très contrasté (Yacono, 1955 ; Boulaine, 1957), évoquant plus une région relativement sèche qu'une localité particulièrement chaude (Pourcher, 1900 ; Daoud, 1993 ; Slimani Ait-Saada, 2007). Selon la classification de **Köppen-Geiger** (Kottek et al., 2006 ; Climate-Data.or., 2019) (figure 4), le climat de la région de Relizane est de type *BSh*. Il s'agit donc d'un climat de steppe, à n'importe quelle période de l'année, avec de faibles précipitations.

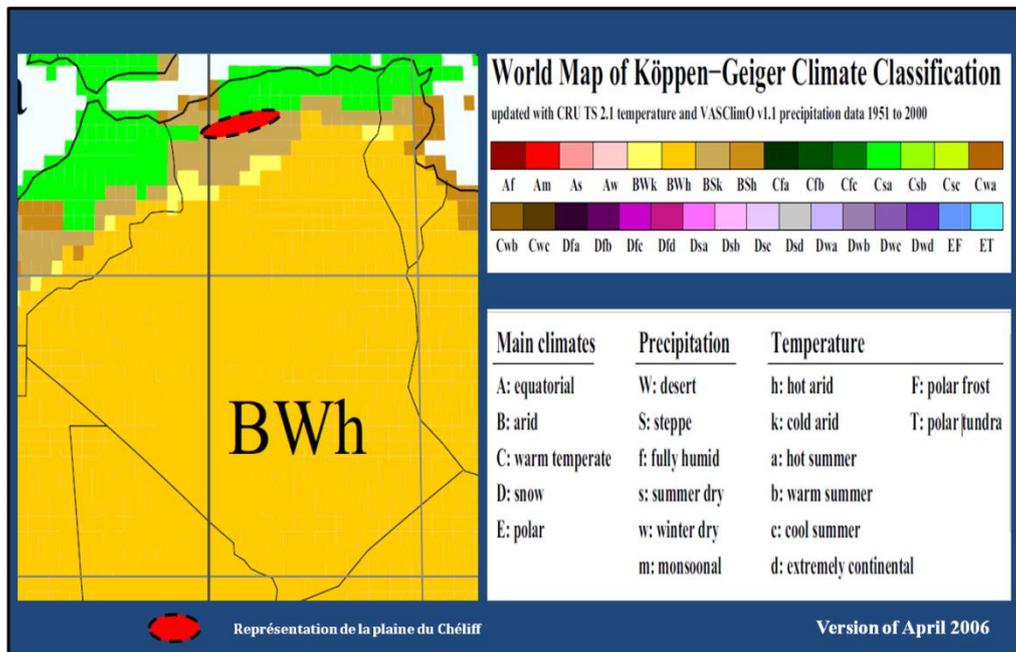


Figure 4. Extrait de la représentation mondiale du système de classification de Köppen-Geiger (Kottek et al.,2006).

En synthétisant, il est possible de noter que la mise en oeuvre du système de classification de **Köppen-Geiger** permet d'indiquer que les régions de Khemis Miliana et de Cheliff semblent s'identifier par un climat beaucoup plus doux que celui observé dans la région de Relizane.

2.1.1.2. Evaluation du régime pluviométrique des trois postes

Le régime pluviométrique des plaines du Cheliff est assez spécifique. Globalement, il est présenté comme perturbé (*fréquence, intensité et durée*), résultant de la combinaison de divers conditions climatiques locales (Boulaine, 1957 ; ABH-CZ, 2004 ; Slimani Ait-Saada, 2007 ; Meddi et Meddi, 2009 ; Meddi et *al.*, 2009; Ghenim et *al.*, 2011 ; Kartoubi et *al.*, 2017).

Dans notre approche descriptive, nous nous sommes intéressés aux données pluviométriques moyennes enregistrées sur une période de vingt-sept ans (1990-2016). Les valeurs obtenues pour chaque poste pluviométrique sont exposées dans le tableau I.

Tableau I. Précipitations moyennes mensuelles des trois sections géomorphologiques de la vallée du Cheliff (INSID, 2017)

P.moy (mm) (1990-2016)	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Jui.	Aou.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Cum.
Khemis-Miliana	53,5	57,2	52,7	41,9	27,7	8,6	1,9	3,6	24,1	35,6	61,2	54,8	422,8
Cheliff	48,5	54,6	41,4	43,4	29,8	5,3	2,1	3,9	19,6	31,9	59,8	45,7	386
Relizane	37,4	37,8	34	38,3	22	5,5	1,6	3,5	14,7	26,7	55	32	308,5

Pour cette période d'observation de près de trente ans, nous distinguons ce qui suit :

- La période la plus arrosée démarre *en Octobre* et s'étale jusqu'à *Avril* pour les trois postes. Les précipitations mensuelles notées montrent que *Novembre* est le mois le plus pluvieux sur l'ensemble de la plaine (P >55 mm).
- La période des faibles précipitations se situe pendant la période estivale. Elle débute en *Juin* et se termine en *Août*. Les hauteurs de pluies sont inférieures à 10 mm pour l'ensemble de la plaine. Le mois de *Juillet* est le mois le moins pluvieux (P <2,1 mm).
Il y a lieu d'indiquer qu'au cours de cette période, les précipitations observées sont essentiellement dues à des phénomènes orageux locaux (Kottek et *al.*, 2006 ; Climate-Data. Org., 2019).
- La différence effective des précipitations annuelles ou, plus précisément, le déficit entre les trois stations, reproduit une séquence numérique (de déficit) croissante : elle passe de 36,8mm entre **Khemis Miliana** et **Cheliff**, à 77,5mm entre **Cheliff** et **Relizane**, et à 114,3mm entre **Khemis Miliana** et **Relizane**.
- Les totaux pluviométriques annuelles diminuent dans le sens **Khemis Miliana** (422, 38mm), **Cheliff** (386 mm) et **Relizane** (308,5 mm).

La représentation *graphique des moyennes* mensuelles sur vingt-sept ans (27) pour chaque station permet de mieux apprécier les différences et les changements intervenus dans l'évolution des pluies sur toute la vallée sur la période référence (figure 5).

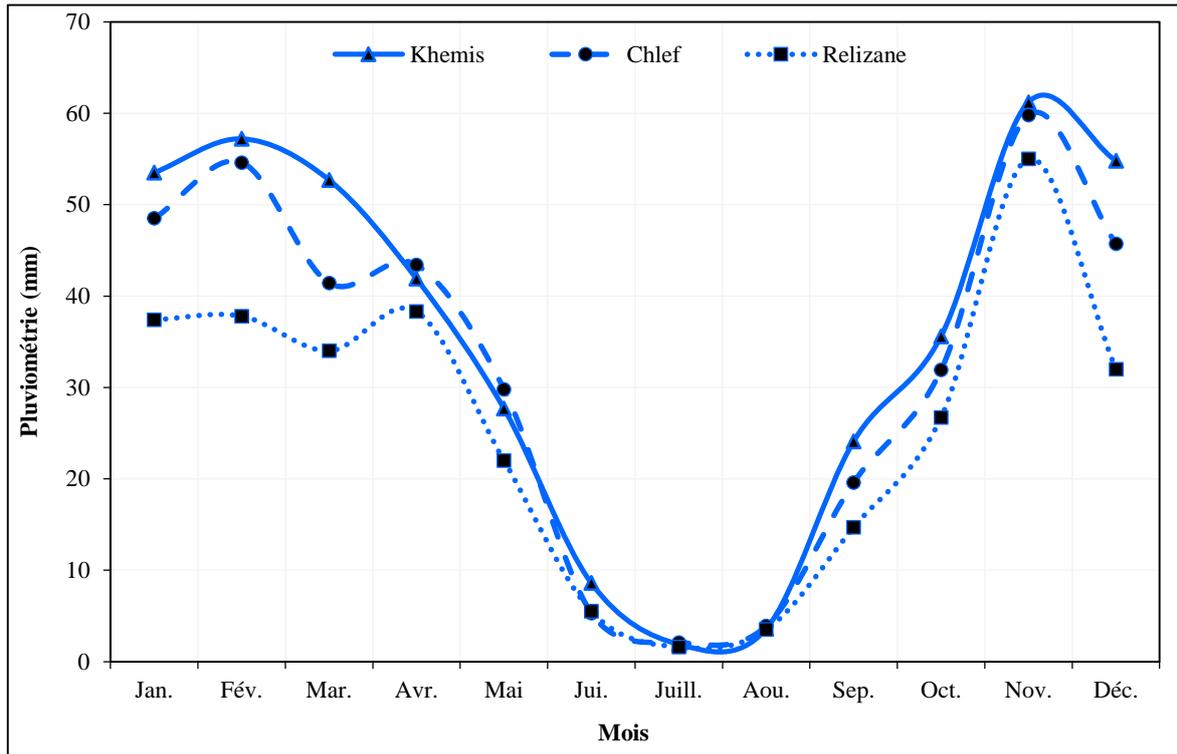


Figure 5. Evolution des précipitations moyennes mensuelles pour les trois postes (1990-2016).

Au regard de l'allure de succession très schématique des trois courbes pluviométriques (Khemis-Cheliff-Relizane), sur fond d'une ondulation très caractéristique, voire presque similaire, il est possible d'entrevoir :

- Une période très sèche qui correspond à la saison d'été (*Juin, Juillet et Août*), caractérisée par un déficit pluviométrique bien marqué (<10 mm).
- Une période plus ou moins humide qui correspond au reste de l'année. Une période marquée, il faut le souligner, par une légère succession de mois humides et de mois relativement secs.

En réalité, ce n'est que grâce à l'insertion de la donnée température (tableau II) et la visualisation du *diagramme Ombrothermique* (Bagnouls et Gaussen, 1953) où $P.(mm) = 2T.$, que l'on pourra réellement délimiter ces deux périodes.

Tableau II. Exploitation des données de températures pour les trois postes d'étude (1990-2016).

Poste	Paramètres	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Jui.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Khemis-Miliana	<i>P. (mm)</i>	53,5	57,2	52,7	41,9	27,7	8,6	1,9	3,6	24,1	35,6	61,2	54,8
	<i>T.moy. (°C)</i>	9,4	10,5	13	15,4	19,4	24,1	28,6	28,8	24,8	19,4	14	10,5
Cheliff	<i>P. (mm)</i>	48,5	54,6	41,4	43,4	29,8	5,3	2,1	3,9	19,6	31,9	59,8	45,7
	<i>T.moy. (°C)</i>	9,8	11,1	13,6	16	20,2	25,2	29	29,2	25,3	19,7	14,1	10,4
Relizane	<i>P. (mm)</i>	37,4	37,8	34	38,3	22	5,5	1,6	3,5	14,7	26,7	55	32
	<i>T.moy. (°C)</i>	10	11,4	13,4	16,1	19,8	23,3	27,7	28,4	24,8	19,6	14,4	10,8

Avant de visualiser le diagramme proprement dit, il est utile de préciser que les données de températures exploitées montrent que le contraste est assez bien marqué entre les mois d'hiver et ceux de l'été. Les moyennes mensuelles minimales sont atteintes au mois de *Janvier* ou *Février* (inférieures à 11,4 °C), alors que les moyennes mensuelles maximales sont atteintes en *Juillet* ou *Août* (entre 27,7°C et 29,2°C).

L'insertion des données de températures sur le même graphique que les précipitations moyennes mensuelles des trois postes d'étude (1990-2016)(figure 6) permet de distinguer les deux périodes recherchées :

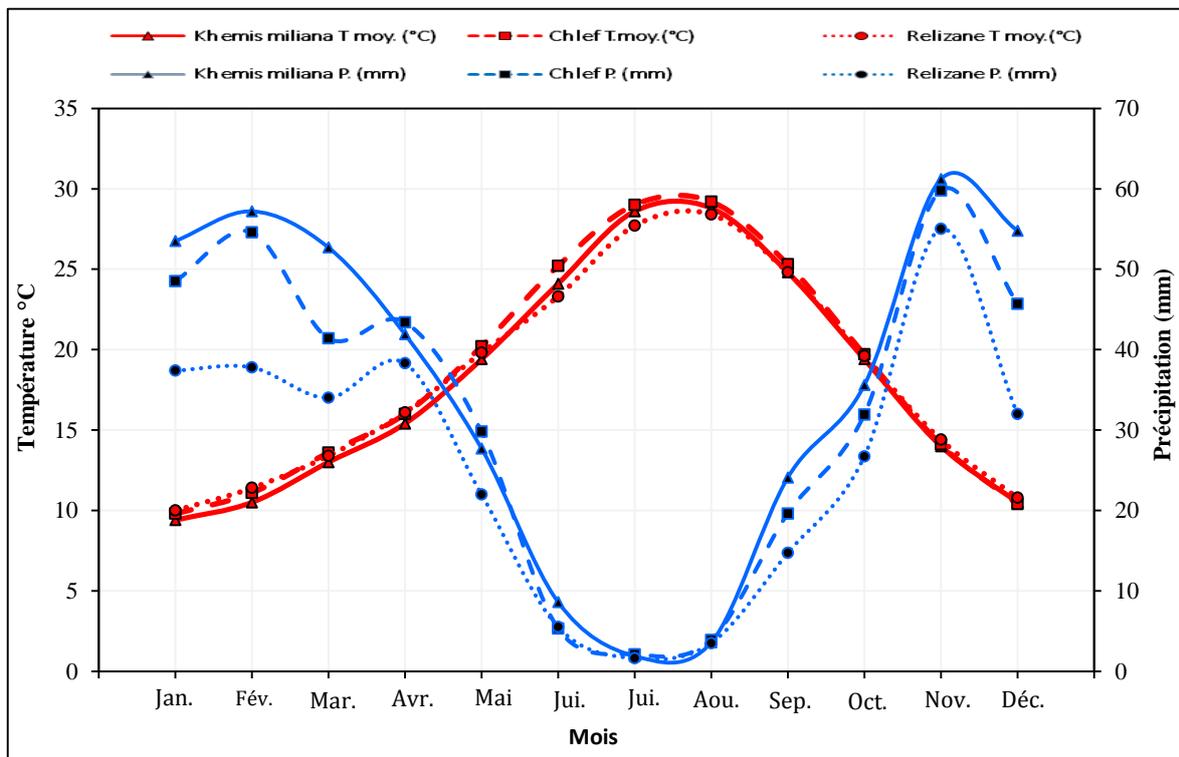


Figure 6. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson pour les trois postes (1990-2016).

- La saison sèche, qui correspond à toute la partie pour laquelle les courbes de températures se tiennent au-dessus des courbes pluviométriques, s'étale pour les trois postes (à quelques jours près) de la *mi-Avril* jusqu'au mois *d'Octobre*. Une période pendant laquelle les valeurs des températures moyennes mensuelles sont supérieures à celles des précipitations.
- La saison humide, qui s'individualise par un schéma à l'inverse du précédent, s'étale du mois *d'Octobre* au mois *d'Avril*.

Il se dégage, ainsi, que le déficit pluviométrique et l'effet de la période sèche sont plus accentués en allant *de Khemis-Miliana* vers **Relizane**, même si on enregistre un léger équilibre dans les conditions de milieu sur les deux premiers postes d'étude.

A ce stade de l'analyse, il est possible de traduire la succession graphique observée dans les figures 5 et 6 sous forme de gradient géographique. Un gradient d'allure régressif (figure 7), allant de la région du *Haut-Cheliff* à l'est vers la région du *Bas-Cheliff* à l'ouest.

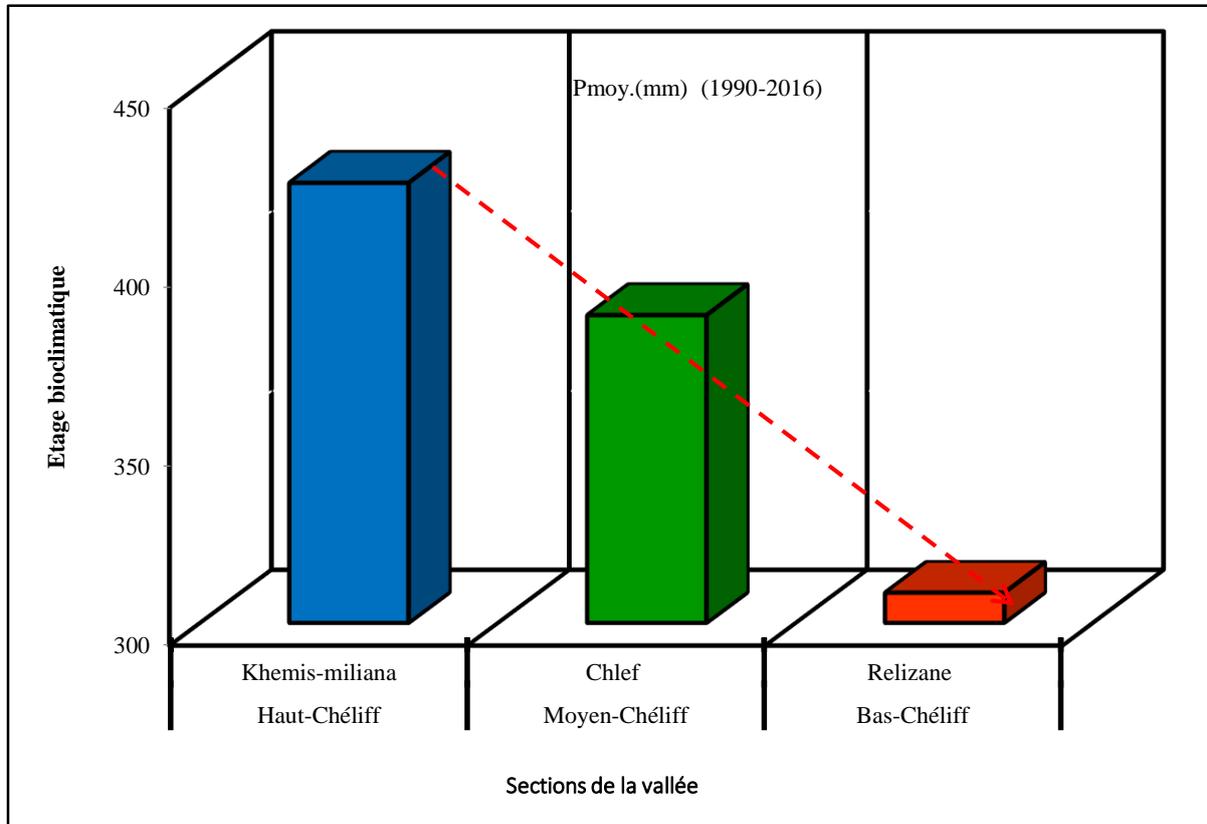


Figure 7. Représentation du gradient d'évolution de la hauteur de pluie sur l'ensemble de la vallée.

En se référant aux spécificités de la région d'étude, les résultats atteints concordent, en grande partie, avec ce qui a été rapporté par différentes études :

- Un gradient d'aridité (croissant) (Le Houérou et *al.*, 1977 ; Le Houérou, 1979 ; Nedjraoui, 2001), bien représenté et justifié, qui est visible de la région du *Haut-Cheliff* vers la région du *Bas-Cheliff* (Boulaine, 1957 ; Daoud, 1993 ; Achour et *al.*, 1998).
- Apparition de périodes de sécheresse de durée variables, alternant parfois avec des périodes d'inondations dues à des pluies torrentielles (Boulaine, 1957 ; ABH-CZ, 2004 ; Saïdi, 2004 ; Meddi et Meddi, 2009 ; Meddi et *al.*, 2009 ; Ghenim et *al.*, 2011).

De là, on peut dire que la situation est telle que ces conditions extrêmes vont affecter les différentes sources d'eau et l'équilibre des sels dans le sol. Ces derniers ont évolué et/ou vont (encore) évoluer sous l'action de divers flux hydrothermaux (Chaboureau, 2012); *flux de chaleur, flux hydriques, flux de matières minérales, etc...*, intervenant pendant une certaine durée. Les

facteurs prépondérants qui y interviennent vont favoriser l'accroissement de l'intensité du phénomène de salinisation dans les différentes sources d'eaux d'irrigation (Daoud, 1993 ; Hartani et *al.*, 2007) et aussi dans la couverture pédologique (Servant, 1976 ; Hachicha, 2007 ; Girard et *al.*, 2011) par *l'ascension des sels (effet remontée capillaire), par la concentration de la solution du sol et enfin par la précipitation des sels dans la zone racinaire ainsi que les horizons superficiels.*

2.2. Cadre géologique général

Le bassin du Cheliff appartient aux bassins sédimentaires *sub-littoraux allongés* (sillon telliens) *Est-Ouest* (Glangeaud, 1952 ; S.N.R.E.P.A.L., 1952 ; Neurdin-Trescartes, 1995) (figure 8). Il est de type intramontagneux (Thomas, 1985 ; Neurdin-Trescartes, 1995 ; Derder et *al.*, 2011) en forme rhombique (Neurdin-Trescartes, 1995).

Il est considéré comme l'un des plus importants bassins néogènes «post-poussée», avec une subsidence lente, du nord de l'Algérie (en plus des bassins de Constantine, de la Soumam, et de la Mitidja) (Brives, 1897 ; S.N.R.E.P.A.L., 1952 ; Mattauer, 1958 ; Derder et *al.*, 2011). Pour S.N.R.E.P.A.L. (1952), Perrodon (1957) et Meghraoui et *al.* (1986), son histoire est étroitement liée aux phases ultimes et paroxysmales de l'orogénèse alpine.

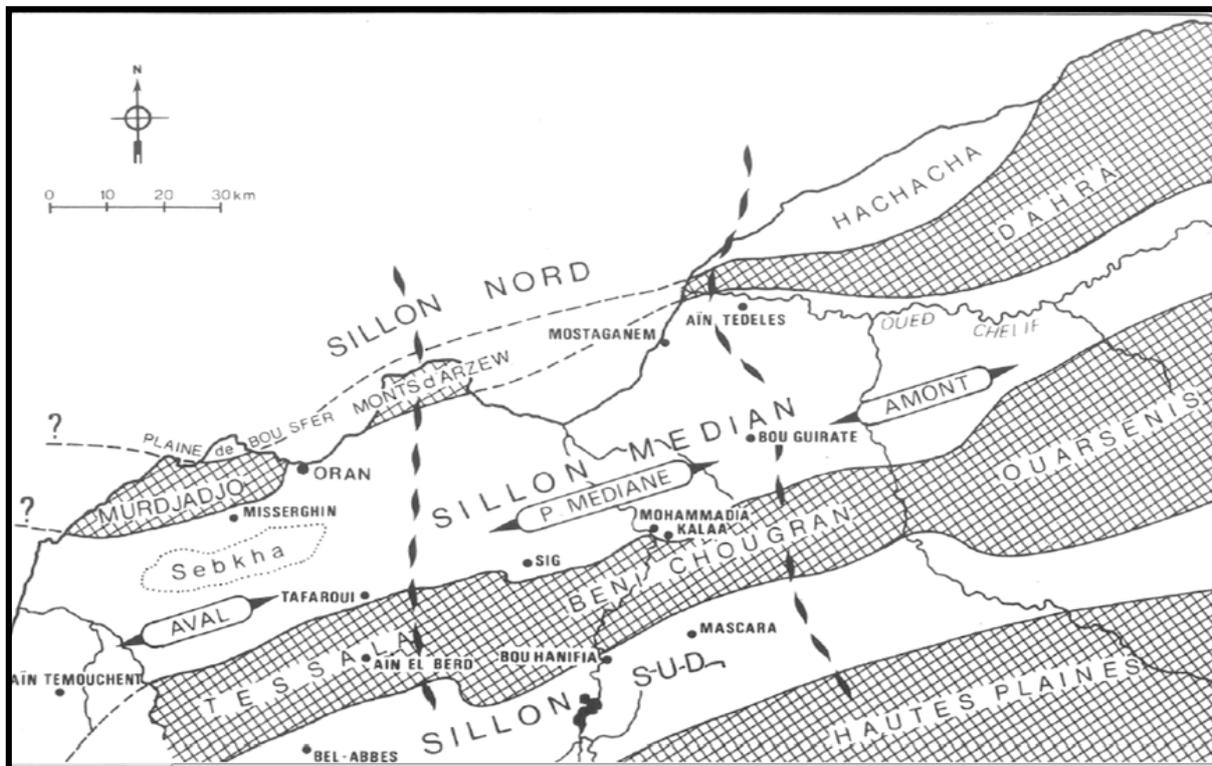


Figure 8. Structure générale du bassin du Cheliff (Neurdin-Trescartes, 1995).

Durant les deux siècles passés, les différents travaux géologiques réalisés sur le bassin, de dimensions variées, ont permis, d'une part d'identifier et de faire connaître ses traits structurants, stratigraphiques et géodynamiques et, d'autre part, d'édifier les bases de la stratigraphie et de la tectonique des régions étudiées. Les principaux travaux consultés sont ceux de Pomel (1892), Replin (1895), Brives (1897), Glangeaud (1932), Anderson (1936), Betier et *Divers* (1941), Fallot (1942), Lafitte (1950), Caire et *al.* (1951), Calembert (1937 ; 1952), Brisson et Magné (1955), Cheylan et *al.* (1955), Dalloni (1935 ; 1939 ; 1940 ; 1952 ; 1955), Mattauer (1951 ; 1958), Perrodon (1957), Polvèche (1960), Boulaine (1957 ; 1961), Delmotte (1966), Lepvrier et *al.* (1970), Hydrotechnique corp., (1976), Kirreche (1977), et Tighlit (1990).

Des travaux plus récents, en appliquant des techniques nouvelles et en utilisant des moyens d'investigations plus appropriés, ont apporté plus d'informations sur les différentes régions du bassin du Cheliff (Despois et Raynal, 1975 ; Meghraoui, 1982 ; 1988 ; Thomas, 1985 ; Meghraoui et *al.*, 1986 ; Tighilt, 1990 ; Neurdin-Trscartes, 1995 ; Achour et *al.*, 1998 ; ABH-CZ, 2004 ; Belhadj et *al.*, 2008 ; Ladjadj, 2009 ; Derder et *al.*, 2011 ; Bouchenouk, 2013 ; Touahri, 2015). En les synthétisant, les descriptions géologiques obtenues ont fait ressortir une disposition des terrains en roches ou formations à affleurements plus récents au centre (vers les plaines) et plus anciens vers les bordures du bassin (figure 9) :

- Au Nord, le *Tell septentrional* est représenté par une suite de reliefs parallèles formés de terrains « **Jurassiques-Crétacés** ». Les massifs montagneux qui sont généralement cités sont *Djebel Diss*, *Djebel Zegmoun*, *Dahra*, *Beni-mennacer*, *Mont Gountas*, *Mont Zaccar* et *les massifs épi-métamorphiques à schistosités du Doui, de Rouina et de Témoulga*.

Il est utile d'indiquer que quelques descriptions font référence à un recouvrement de ces formations de *croûtes calcaires*, de *limons* et de *dunes quaternaires*.

- Au sud, le *Tell méridional* est représenté par un ensemble de massif montagneux (*Monts des Beni Chougrane* et le *Massif de l'Ouarsenis*) où le substratum y est principalement *marno-calcaire* (ou *formations carbonatées*) et qui correspond à *l'allochtone tellien* avec ses différentes nappes.

- Au centre ou entre ces ensembles, il est observé les plaines du Cheliff constituées par des «dépôts de formations néogènes et quaternaires (anciens et récents)».

Pour une meilleure consolidation des données sur leur mise en place, leur structure et leur dynamique évolutive, différents auteurs (Thomas, 1985 ; Meghraoui et *al.*, 1986 ; Neurdin-

Trescartes, 1992 ; Meghraoui et *al.*, 1996 ; Derder et *al.*, 2011) considèrent qu'ils est plus judicieux de cerner le paramètre géophysique du milieu. L'expertise réalisée sur les limites structurales du bassin du Cheliff a montré que ces formations telliennes semblent être passées par trois phases tectoniques (Ladjadj, 2009) :

- Une phase *infra-crétacé*, compressive qui a donné lieu à des plis NE-SW.
- Une phase à composante tangentielle qui a intervenu après *le Sénonien et le Paléocène* et serait en partie responsable de l'épimétamorphisme.
- Une phase datée *Aquitano-Burdigalienne*, compressive et profonde génératrice d'un nouvel épimétamorphisme.

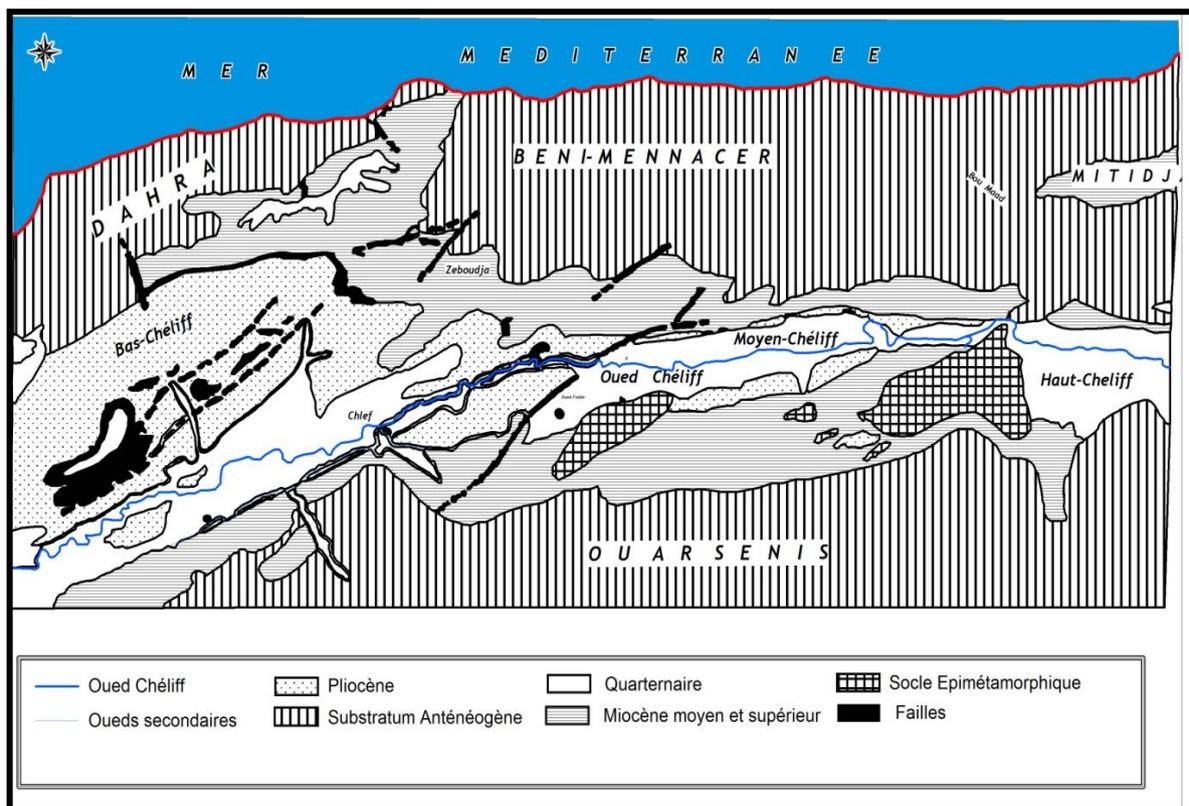


Figure 9. Cadre géologique (Perrodon, 1957 ; Mattauer, 1958).

L'aspect remplissage sédimentaire du bassin, ou bien l'évaluation stratigraphique, peut-être d'un apport considérable dans l'affinement des informations sur les changements qui se sont produits au cours des temps géologiques et d'avancer (ainsi) plus d'hypothèses sur cette morphogénèse de *fin-Cénézoïque (ou ère tertiaire)* (Vergnolle, 1985). L'évaluation proposée par Mehaiguen (2013) laisse entrevoir la répartition des dépôts sédimentaires suivants :

- *Des calcaires* parfois *dolomitisés* où les circulations favorisées par la fissuration ou l'érosion *karstique* tels que *les calcaires liasiques* du Zaccar éminemment perméables (près d'un tiers des précipitations s'y infiltrent), de Rouina et Temoulga.

- Des *calcaires à lithothamniées* du *Miocène supérieur*.
- Des *dépôts détritiques* à perméabilités variables tels que *les grès et poudingues* du *Miocène*, *les sables, les galets, les graviers et les poudingues* du *Pliocène* et du *Quaternaire*.
- Des *alluvions récentes* du *quaternaire* souvent *argilo-limoneuses* et peu favorables à l'infiltration.
- Des *alluvions grossières* acheminées de certains secteurs ou certaines zones du *Haut, Moyen et Bas-Cheliff*.
- Des formations imperméables ou très peu perméables représentant la majorité des dépôts de la région (*séries crétacées et tertiaires* du Dahra et de l'Ouarsenis).

Il est également fait référence *aux grès* plus ou moins consolidés du *Barrémien* et de *l'Albien* dans une partie de la plaine d'Ain-Oussera et du plateau du Sersou, et enfin du *Calabrien* sur le plateau de Mostaganem.

2.3. Hydrogéologie et présentation du système aquifère de la région

De nombreuses formations géologiques présentées ci-dessus contiennent des eaux souterraines. Les plus anciens remplissages sont attribués au *Jurassique* et les plus récents correspondent aux *alluvions quaternaires* (Perrodon, 1957 ; Mattauer, 1958 ; Meghraoui, 1982 ; ElMeddahi, 2009 ; Bouzada, 2013).

En reprenant la morphologie du sillon d'oued Cheliff, Boulaine (1957), ABH-CZ (2004 ; 2008) et El Meddahi (2009) ont observé les nappes aquifères suivantes :

- **La nappe aquifère des alluvions quaternaires** : Les alluvions sont constituées de limons et d'argiles, occupant la majorité de la surface des plaines, sous laquelle se trouvent *les formations grossières de galets et graviers*. Ces derniers :
 - suivent un axe situé au Nord du lit actuel d'oued Cheliff et sur toutes les plaines de l'Est vers l'Ouest,
 - à l'Est, ils longent la bordure Nord du bassin au pied du *massif Gountas* en se rapprochant de l'oued avec un décrochement vers l'Ouest et,
 - vers l'extrémité ouest du bassin, ils longent la bordure Nord de la vallée.

Ces alluvions sont grossières et bien développées au niveau des embouchures des oueds latéraux.

- **La nappe des grès pliocènes** : Ces formations apparaissent, d'une part dans la région du *Moyen-Cheliff*, en bordure du massif de Temoulga et à l'Ouest d'El-Abadia, sous forme de

grés et de sables, d'autre part dans la région du *Haut Cheliff*, sous forme de grés et conglomérats et d'argile gréseuse.

- **La nappe des calcaires jurassiques** : C'est un système aquifère karstique à surface libre, à structure tabulaire ou plissée et/ou fracturée, plus ou moins compartimenté. Sa capacité de régulation varie suivant la hauteur noyée. Cette formation est connue en affleurement dans les massifs de Zaccar, Rouina et Temoulga.

Toutefois, les conditions paléogéographiques étant très variées, les formations aquifères identifiées semblent présenter une extension limitée (Ladjal, 2013).

2.4. Les aspects hydriques et les écoulements superficiels

Le bassin versant du Cheliff est présenté comme un système complexe et original (Boulaine, 1957). Il s'agit d'un ensemble drainant, de l'écoulement ou du ruissellement des eaux, structuré autour du lit ou des berges du principal oued collecteur qui est oued Cheliff.

Le descriptif détaillé de ce système laisse apparaître l'intervention de 24 sous bassins hydrographiques, donnant lieu à un réseau d'écoulement chevelu très dense (ABH-CZ, 2004). D'après Slimani Ait-Saada (2007) et Bouchenouk (2013), il s'agit d'un réseau d'oueds à écoulement visible que durant la période pluvieuse (*Décembre - Janvier - Février*).

2.4.1. Oued Cheliff

Le Cheliff s'étire sur une longueur estimée entre 700 km (Achour et *al.*, 1998 ; Slimani Ait-Saada, 2007) et 800 km (ABH-CZ, 2004). Il prend sa source sur la limite du *Tell* et du *Sahara* dans l'*Atlas Saharien*, plus précisément dans le *Djebel Amour* (1937m), près d'*Aflou* (ABH-CZ, 2004) (figure 10).

Ainsi, résultant de la jonction effective des deux grands cours d'eau des hautes plaines centre-ouest qui sont oued Touil et Nahr Ouassal (Despois et Raynal, 1975 ; Touhari, 2015), il prend d'abord une direction *Sud-Nord* et franchit la chaîne de Médéa (au niveau de Boughar). Ensuite, suivant une orientation *SE-NW*, il traverse le massif de Gantas, et enfin il coule en oblique d'*Est en Ouest* jusqu'à la mer méditerranée avec son embouchure sur le littoral de Mostaganem.

Par son parcours, oued Cheliff imprime un morcellement caractéristique à la plaine qui porte son nom. Il peut être, de ce fait, considéré comme un élément naturel incontournable dans sa géographie (Boulaine, 1957 ; Slimani Ait-Saada, 2007).



Figure 10. Localisation de oued Cheliff dans le bassin (source : Despois et Raynal, 1975).

2.4.2. Les affluents ou le réseau superficiel

Il est connu que le réseau hydrographique des sous bassins versants de la rive gauche est beaucoup plus dense et beaucoup plus étendu que celui de la rive droite (Boulaine, 1957 ; Capolini *et al.*, 1969 ; Despois et Raynal, 1975 ; ABH-CZ, 2004 ; Mehaiguene, 2005 ; 2013). La représentativité de ce schéma dans l'espace d'étude est bien illustrée par la figure 11.

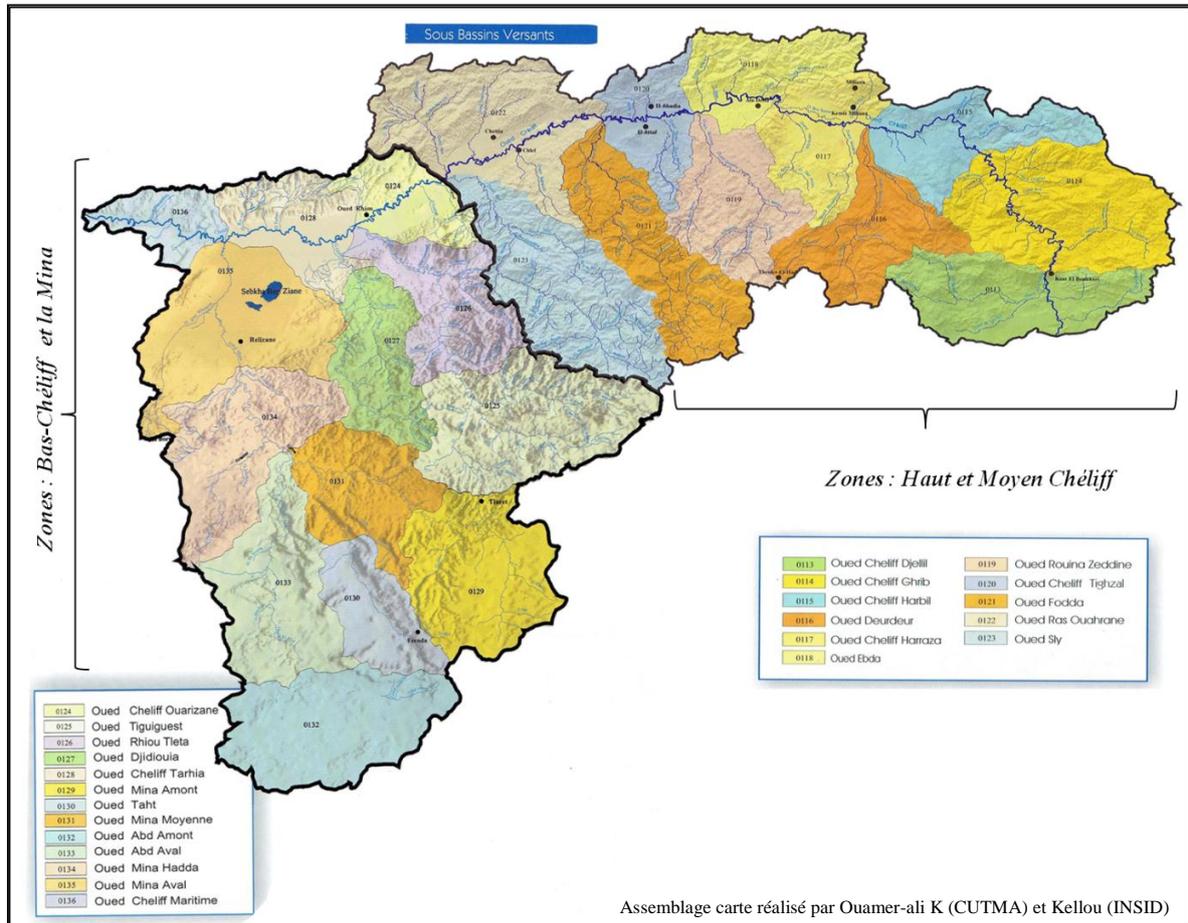


Figure 11. Le réseau hydrographique inséré dans le paysage des plaines du Cheliff (source : ABH-CZ, 2004).

A l'heure actuelle, il s'agit du schéma hydrographique le plus explicite et le plus précis du bassin. Il traduit les données morphométriques et hydrographiques obtenues par ABH-CZ (2004). Un schéma synthèse qui permet d'identifier dix huit (18) affluents majeurs de l'oued Cheliff.

L'identification et le passage en revue de certaines caractéristiques de ces affluents, par unités et sous bassins géographiques d'appartenances, sont exposés dans le tableau III.

Tableau III. Caractéristiques des principaux affluents du Cheliff par sous bassin versant (ABH, 2004 ; Mehaiguene, 2005 ; Toumi, 2013 ; Taouhri, 2015 ; Oulhaci, 2016).

Région ou Unité	Sous bassin	Code S/BV	Longueur (km)	Superficie (km ²)	Périmètre (km)
Haut Cheliff	Oued Cheliff Djellil	0113	77	992,85	178,67
	Oued Cheliff Ghrib (Chorfa)	0114	68	2800	249,42
	Oued Harbil	0115	30	238,84	166,89
	Oued Deurdeur	0116	73	468	136,47
	Oued Harreza	0117	29	743,97	141,13
	Oued Ebda	0118	25	680,55	139,60
	Oued Rouina Zeddine	0119	100	869	169,25
	Oued Cheliff Tighzal	0120	30	570,52	141,37
Moyen Cheliff	Oued Fodda,	0121	117	1161,32	211,35
	Oued Ras Oued Ouahrane	0122	39 52	1437,37	224,12
	Oued Sly	0123	130	1405,47	225,12
Bas-Cheliff	Oued Ouarizane	0124	21	564,72	121,28
	Oued Tiguiguest	0125	-	1513,02	202,89
	Oued Rhiou Tléta	0126	173	928,45	183,57
	Oued Djidiouia	0127	107	835,36	160,38
	Oued Cheliff Tarhia	0128	24	759,63	145
	Oued Mina Amont	0129	50	1324	176
	Oued That	0130	51	677,08	128
	Oued Mina Moyenne	0131	53	892,21	162
	Oued Abd Amont Oued Abd Aval	0132 0133	76 84	1499 1228,61	188 198
	Oued Mina Hadda Oued Mina Aval	0134 0135	66 69	1250,8 1462,2	191,70 210,05
	Oued Cheliff Maritime	0136	10	431,41	112

2.5. Phytogéographie de la région du Cheliff

Il est admis que la mise en place et le développement des "paysages végétaux" est conditionné par l'effet du contraste orotopographique (géosystème) (Despois et Raynal, 1975 ; Le Houérou, 1995 ; Tassin, 2012), conjugué à l'effet d'accroissement brutal de la variabilité des précipitations (Despois et Raynal, 1975 ; Tassin, 2012).

Le bassin du Cheliff semble présenter cette même dynamique structurante. En premier lieu, un aspect géomorphologique qui se traduit par une grande diversité physiionomique, suivant un gradient géographique Nord-Sud, d'où ressortent les formations suivantes (Despois et Raynal, 1975 ; Mediouni, 1997):

- Les zones montagneuses : appartenant *au système Tellien (Tell septentrional et Tell méridional)* et au relief complexe et escarpé.
- La grande et vaste plaine d'oued Cheliff : appartenant aux formations *des plaines Littorales et intérieures de l'Ouest*.

- Quelques zones steppiques : appartenant à l'exposition *Nord des hautes plaines Centre-Ouest*.

En second niveau, un gradient pluviométrique en régression du front Nord, avec les régions telliennes, vers les parties plus au Sud, avec les régions steppiques (Despois et Rayanal, 1975 ; Le Houérou et *al.*, 1977 ; Le Houérou, 1979 ; Kaabeche, 2000 ; Nedjraoui, 2001 ; FAO, 2005 ; Ouamer-ali, 2009 ; Chedded, 2015 ; Bessaoud *et al.*, 2019).

Cette variabilité morpho-climatique se traduit, sensiblement, par des divisions biogéographiques³ bien délimitées (figure 12), des bioclimats variés (*Sub-humide* à *aride*) et une abondante végétation méditerranéenne et steppique qui se distribue du *Nord* au *Sud* selon les étages bioclimatiques sources (Santa, 1949 ; Braun-Blanquet et *al.*, 1952 ; Guinochet, 1954 ; Quezel et Santa, 1962 ; Le Houérou, 1979 ; Mediouni, 1997 ; Kaabeche, 2000 ; Nedjraoui, 2001 ; Kazi Tani et *al.*, 2010 ; Bessaoud *et al.*, 2019).

Pour les différentes sections de la vallée, le descriptif de la composante biogéographique du bassin permet d'avoir une idée sur la couverture végétale qui s'y trouve. La zonation de territoires spécifiques ou d'association de la plaine se présente (loin de l'influence anthropique) avec (Mediouni, 1997):

- *le sous-secteur des sahels littoraux (OR1),*
- *le sous-secteur des basses plaines "littorales et intérieures Ouest "(OR2) et,*
- *le sous-secteur de l'Atlas Tellien (A2 et OR3).*

D'après Mediouni (1997) et Tassin (2012), cette diversité des habitats engendre une diversité écosystémique et paysagère d'une extrême richesse. Des annotations qui semblent convenir grandement au milieu constituant des plaines et de leurs bordures. Sur la base des différentes études réalisées (Quezel et Santa, 1962 ; Rivas-Martinez, 1981 ; Le Houérou, 1995 ; Mediouni, 1997 ; Kaabeche, 2000 ; Kazi Tani et *al.*, 2010 ; Yahi et Djellouli, 2010 ; FAO, 2012 ; M.A.T.E., 2015 ; Bessaoud *et al.*, 2019), il est possible de distinguer trois principales compositions :

- écosystème forestier / montagneux : Entre *Sub-humides* et *arides*,
- écosystème basses plaines (*littorales* et *intérieures*) et,
- écosystème agricole.

³- L'utilisation du concept biogéographique permet de rattacher les habitats à un niveau supra national, conditionné par l'évolution naturelle de la diversité biologique. Leur expression horizontale sous sectorielle tient compte d'un facteur prépondérant qui est la continentalité : *Les aires de distribution de la flore et de la faune dépendent en grande partie de ce facteur* (Mediouni 1997).

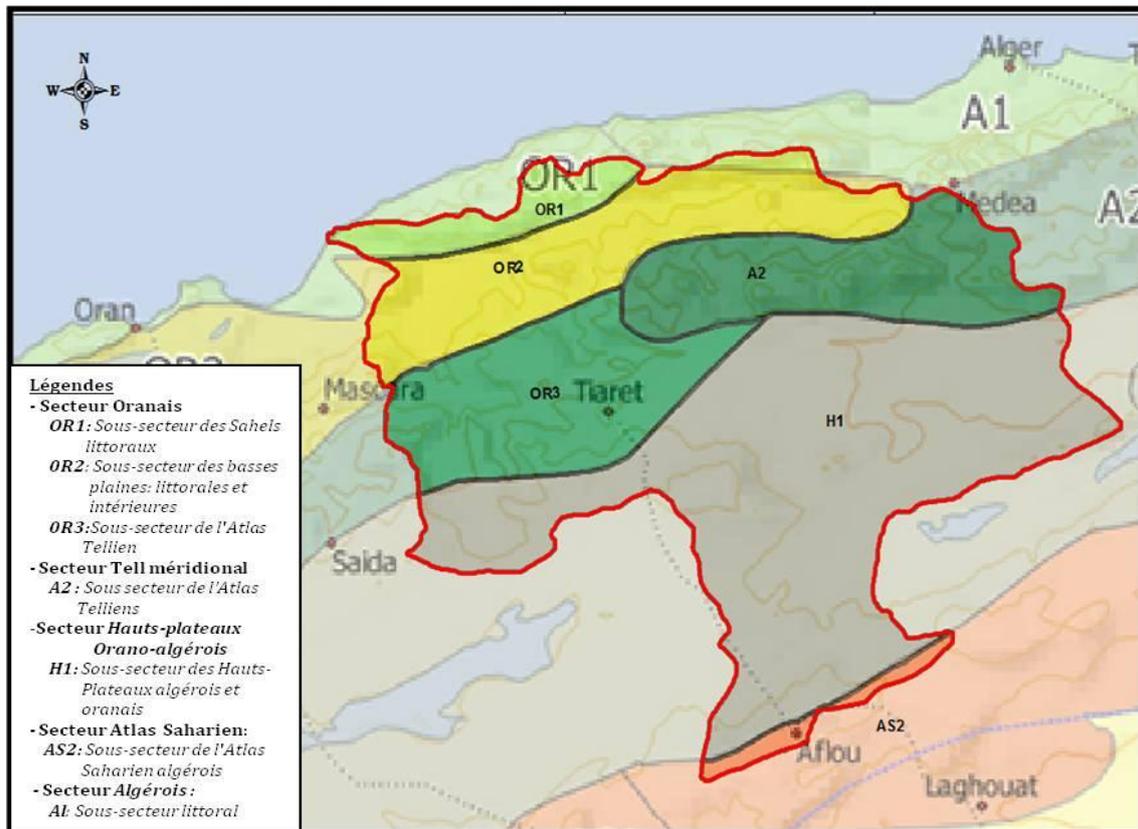


Figure 12. Représentation biogéographiques du bassin du Cheliff. Approche Quezel et Santa (1962) et Mediouni (1997).

Dans l'ensemble, il est indiqué que le paysage végétal des plaines du Cheliff et de leurs flancs a été largement défriché et dégradé. Ce qui a pour conséquence la mise en place d'une situation d'ordre agricole et éco-environnemental spécifique (Quezel et Simonneau, 1960 ; 1963 ; Boulaïne, 1957 ; Hydrotechnique corp., 1976 ; McDonald et BNEDER, 1990 ; Daoud et *al.*, 1993 ; Saidi et *al.*, 2004 ; Douaoui et Hartani, 2007 ; Yahyaoui, 2011), voire des plus contraignantes. Il est possible de synthétiser cette situation comme suit :

- Pour les parties montagneuses (*Le Dahra et le plateau de Mostaganem, les Monts du Zaccar, De Beni-Menacer et de Gontas, le Massif de l'Ouarsenis et les Monts de Matmata,*), à cause des incendies, des déboisements et un surpâturage endémique, la forêt et les maquis ne subsistent plus que sur les portions les mieux arrosées. Ils se composent (sans distinction) de *Chênes verts, Chênes lièges, du groupement à pin d'Alep, du groupement à Cèdre de l'atlas, le Caroubiers, le Jujubier, l'Eucalyptus, Lentisques, l'arbousier, le ciste, le romarin, la bruyère, l'Olivier sauvage, le groupement à Thuya, le Palmier Nain, etc...*

Dans les zones où la forêt a été dégradée par l'activité humaine, il y a eu apparition, d'une part de formations végétales serrées d'*arbustes* et de *buissons* (BNEDER, 2009 ; FAO, 2012 ; M.A.T.E., 2015), d'autre part de superficies agricoles où la principale spéculation exploitée

est l'arboriculture à pépins (M.A.T.E., 2015).

- Pour les différentes sections de la vallée (*Haut-Cheliff, Moyen-Cheliff, Bas-Cheliff*), à cause d'une agriculture extensive et la pratique des cultures sous irrigation, les sols de ces régions s'identifient et subissent la progression en continue des phénomènes de salinisation et d'hydromorphie. Il reste que cette progression semble plus accentuée et avec de graves conséquences sur la pédosphère de la région du *Bas-Cheliff*.

Dans les zones où *la contrainte sol* ne se pose pas, les cultures dominantes les plus produites sont la *céréaliculture* (*Blé, Orge, avoine*), les *maraîchages* (*piment, poivrons, tomate, melon, pastèque, artichaut, oignon, betteraves, pomme de terre*) et l'*arboriculture* (*vigne, oliviers et vergers d'agrumes*).

Dans les conditions spéciales d'un milieu salé, ce sont les conditions physiques et chimiques du sol, très variées selon la station, qui vont déterminer le type de cultures mises en place :

- soit l'occupation par un couvert agricole avec des spécificités locales, tel que l'olivier, le blé, l'orge, le sorgho, la luzerne, le carthame, la betterave sucrière, les graines de lin, la patate *douce*, et quelques primeurs,
- soit par la constitution de groupements permanents ou édaphiques (Daumas et *al.*, 1952 ; Simonneau, 1953 ; Dubuis et Simonneau, 1956 ; 1957 ; 1959 ; Quezel et Simonneau, 1960 ; 1963) présentés comme « végétation spontanée », essentiellement halophile (à différents degrés). Une végétation caractéristique identifiée par quelques espèces :

Salsola vermiculata, Typha angustifolia, Suaeda Fruticosa et quelques sous associations, Spergularia sp., Arthrocnemum sp., Salsola tetrandra et longifolia, Atriplex halimus, Eucalyptus sp., Salicornia europaea, Halocnemum sp., Halopeplis amplexicaulis, Ononis crinita, Lepidium rigidium, Trifolium alexandrium, Genista numidica, sous-association a Inula crithmoïdes, etc...

2.6. La ressource en sols

L'importance des sols des plaines dans le paysage du bassin du Cheliff a été suffisamment cernée. Il s'agit de l'espace où se concentre la plus grande part des activités anthropiques (M.R.E., 2003 ; M.A.T.E.T., 2009 ; 2014).

Généralement, ils sont présentés comme des sols formés surtout dans des alluvions quaternaires (Boulaine, 1956 ; 1957 ; Saidi, 1985 ; Daoud, 1993 ; Daoud et *al.*, 1993 ; Douaoui et *al.*, 2001 ; Ghérina et *al.*, 2008). Morphologiquement, ils sont en majorité peu différenciés, plus ou moins

calcaires, de texture variable, parfois hydromorphes ou à caractères hydromorphes (Saïdi et *al.*, 1998 ; Ghérina et *al.*, 2008), parfois à caractères vertiques, parfois à caractères ou de type salins (Boulaine, 1957 ; Daoud, 1993).

La synthèse des différents travaux menés sur les sols des différentes sections ou régions de la vallée du Cheliff (Boulaine, 1956 ; 1957 ; Durand, 1959 ; Peter et Ghoul, 1972 ; Mc Donald et BNEDER, 1990 ; Aimé, 1991 ; Daoud, 1993 ; Douaoui et *al.*, 2004 ; Douaoui, 2005 ; Saidi et *al.*, 2008 ; Amichi, 2009 ; Bouzada, 2013 ; Hadj-miloud, 2019) fait ressortir selon la CPCS (1967) les principales classes suivantes :

- La classe des sols peu évolués / Sous classe des sols peu évolués non climatiques :

Elle est représentée par :

- **les sols peu évolués d'apport alluvial** : Ils sont localisés sur les *terrasses récentes*, sur les *bourrelets* de l'oued Cheliff et des différents affluents, et sur les *zones d'épandages et*,
- **les sols peu évolués d'apport alluvial et colluvial** : Ils sont observés au niveau de certains *piedmonts des monts* (ou Djebels) et *des glacis anciens colluvionnés*. Ils occupent la majeure partie des plaines du *Haut-Cheliff*.

- La classe des sols Calcimagnésiques / Sous classes des sols carbonatés :

Cette classe de sols est observée généralement sur les *versants des monts* (des Djebels) et *en bordures des plaines* ; ils sont caractéristiques des zones *des piémonts* du mont Zaccar et des monts du Dahra et de l'Ouarsenis. Ils se présentent sous forme d'associations de sols plus ou moins érodés, qui peuvent évoluer sur *du calcaire dur ou tendre, des grès, des marnes ou des croûtes et/ou des encroutements calcaires*.

D'après Boulaine (1956) et Douaoui (2005), lorsque la roche mère n'affleure pas à la surface, ces types de sols sont assimilés spécialement au groupe des sols rendziniformes.

De plus, c'est une unité de sols qui est observée sous forme de poches éparses dans les différentes sections de la vallée *proprement dite* (*Haut, Moyen et Bas-Cheliff*), essentiellement sur les *bourrelets des différents affluents*.

- La classe des sols Hydromorphes

C'est une unité de sols qui est observée dans la plaine proprement dite. Elle s'identifie par des sols profonds avec un drainage imparfait à inexistant dû à leur position basse et à leur *texture*

argileuse à très argileuse. Ils se trouvent pour la plupart dans *les vallées* de la Merdja et de l'oued Fodda.

- La classe des sols Halomorphes ou Sodiques ou sols Salés :

Actuellement, c'est une classe qui est identifiée par l'appellation sols salés (Daoud, 1993 ; Douaoui, 2005 ; Hadj-miloud, 2010 ; 2019). Elle est caractérisée par la sous classe suivante :

- ***sous classe des sols salins à complexe sodique (solontchaks sodique)*** : Elle est localisée essentiellement sur *les terrasses récentes* (ou les dépressions) du *Bas-Cheliff* et *la Mina*, en occupant la majeure partie de l'espace. Elle est également observée dans la région de Bled Souala dans *le Moyen-Cheliff*.

Dans l'ensemble, ces unités s'identifient par *une texture argileuse* sur tout le profil, une structure généralement dégradée qui est très remarquable et qui devient rapidement massive vers la base du profil, la présence de nombreuses figures d'accumulations salines, et enfin la présence de signes d'hydromorphie (surtout à la base du profil).

- La classe des sols à Sesqui-oxydes de fer et de manganèse (Mc Donald et BNEDER, 1990 ; Daoud, 1993 ; ElMeddahi, 2009).

- La classe des sols Isohumiques (Mc Donald et BNEDER, 1990 ; ElMeddahi, 2009).

- La classe des Vertisols (Mc Donald et BNEDER, 1990 ; Douaoui, 2005 ; ElMeddahi, 2009).

Néanmoins, il est utile de noter que dans certains écrits, il est fait référence à l'existence dans les plaines d'autres classes de sols (selon des taxonomies originales) de superficies très réduite, telles que :

- Les Solonetz (Durand, 1956).

- Les sols Insaturés, les sols des Marais, et les sols Rouges (Durand, 1959).

- Les sols Dunaires, les sols Calciques, les sols Bruns, et les sols très Evolués (Boulaine, 1957 ; Durand, 1959).

- Les sols Marrons (Boulaine, 1957 ; Kayser, 1959).

Conclusion

Les plaines du Cheliff font partie intégrante de l'orographie de l'ensemble géomorphologique qu'est le bassin du Cheliff. Un ensemble hydrographique qui est considéré comme le plus vaste dans le nord du pays. Géographiquement, elles occupent sa limite nord.

Les plaines sont encadrées au *nord* par le *Tell septentrional* représenté par *les monts* du Zaccar que prolongent les plateaux du Dahra et au *sud* par le *Tell méridional* représenté par *le massif* de l'Ouarsenis et *les monts* de Béni Chougrane.

Depuis plus de deux siècles, l'idée popularisée et adoptée a été de compartimenter ces plaines, qui bordent le plus grand cours d'eau d'Algérie, en trois sections d'alignement hydrogéographiques. Nommément, il est question du *Haut-Cheliff*, du *Moyen-Cheliff* et du *Bas-Chellif*.

Le climat qui règne dans les plaines est conditionné par la morphologie de l'ensemble d'appartenance. En occupant le fond du bassin à l'abri des influences des principales masses d'air (vents pluvieux), en cause l'effet obstacles topographiques (ceinture tellienne), la région ainsi très peu arrosée est soumise à un déficit hydrique ou phénomène de sécheresse très intense. Un phénomène qui épouse un gradient géographique régressif d'orientation *Est-Ouest*.

Les différentes études géologiques réalisées dans la région ont reconnu la nature *sédimentaire* ou *détritique* des différentes sections de la vallée du Cheliff. Les évaluations effectuées les assimilent à des dépôts de *formations néogènes* et *quaternaires* (anciens et récents). Le schéma de mise en place de ces dépôts, appelés aussi phases d'évolution par comblement, a été rendu possible grâce, d'une part aux mouvements tectoniques caractéristiques de la région, à l'orographie spécifique du bassin d'appartenance, et aux phénomènes d'érosion observés et, d'autre part, à la nature des formations anciennes disposées en anneaux le long des bordures du bassin.

Sous l'angle hydrogéologique, il est souvent signifié que de nombreuses formations géologiques peuvent constituer des acquières potentiellement exploitables. Néanmoins, les données disponibles indiquent que les plus anciens remplissages peuvent être attribués au Jurassique et les plus récents semblent correspondre aux alluvions quaternaires.

Le réseau hydrographique qui alimente le principal oued des plaines est apparenté à un chevelu très dense. Issus de 24 sous bassins hydrographiques dont les dix-huit (18) principaux affluents

identifiés ont un régime d'écoulement temporaire. Un écoulement qui n'est visible que durant la période pluvieuse.

Le couvert végétal des différentes sections de la vallée s'identifie dans la plupart des cas par une agriculture extensive en irriguée et spécialisée : *spécultations complémentaires, primeurs et vergers*. Néanmoins, l'application de l'approche biogéographique permet d'observer l'existence de certaines aires spécifiques. Des aires de répartition où la végétation qui prend racine est souvent spécifique, comme pour le *Bas-Cheliff* avec la végétation *spontanée d'halophiles*, des conditions "particulières ou spéciales" déterminées par les contraintes liées au sol en association avec le climat local.

Les sols caractéristiques des plaines du Cheliff sont définis comme des alluvions quaternaires. Ces alluvions sont constituées essentiellement par les apports des différents sous bassins hydrographiques du bassin du Cheliff. Ces apports dominés par des schistes et des marnes sont souvent riches en sels, d'où l'existence du phénomène de salinité (salinité primaire) dans la région.

Globalement, les sols des plaines du Cheliff sont divisés en quatre (04) grandes classes : la classe des sols Peu évolués, la classe des sols Calcimagnésiques, la classe des sols Hydromorphes et la classe des sols Halomorphes ou Sodiques ou Salés.

D'un point de vue opérationnel, il est utile d'indiquer que le succès de l'objectif d'évaluation ou de tout autres types d'investigation sur la problématique de salinité des sols à l'échelle de la région d'El Hamadna, dans le Bas-Cheliff, passe nécessairement par la composante et la contribution de tout ce qui est généré et drainé des autres unités géographiques entourant et appartenant au Cheliff. Dans ce sens, nous avons privilégié l'aspect reconstitution et présentation de la grande richesse et diversité physique et biogéographique de la *dimension Bassin d'appartenance* pour une meilleure compréhension, spécification, et éventuellement maîtrise des processus d'évolution prédominants pouvant impacter de manière indirecte et régressive l'environnement et la biosphère de notre région.

Chapitre II.

*Evaluation pédométrique de la salinité des sols dans le Bas-Cheliff.
Etat et tendance évolutive du phénomène sur une période de plus
de cinquante ans (1956-2012).
Cas du périmètre Agricole d'El Hamadna.*

*« Les faits sont têtus. Il est plus facile de s'arranger avec les statistiques »
"Mark Twain"
(1835-1910).*

Chapitre II.
Evaluation pédométrique de la salinité des sols dans le Bas-Cheliff.
*Etat et tendance évolutive du phénomène sur une période
de plus de cinquante ans (1956-2012).*
Cas du périmètre agricole d'El Hamadna.

Introduction

Les rapports que l'homme entretient avec l'espace géographique qui l'environne sont assez complexes. Ces rapports donnent lieu souvent à des interactions cruciales (Slimani-Ait saada, 2007).

La région du Bas-Cheliff, désignée depuis longtemps comme une zone à haut potentiel de production agricole (Boulaine, 1957 ; Daoud *et al.*, 1993 ; Saidi *et al.*, 1999 ; Bradai *et al.*, 2012 ; Amichi, 2013), peut être présentée comme un "*espace exemple d'interactions*". Etant un espace géographique qui se caractérise par son milieu physique dégradé, dont la salinisation est la principale manifestation (Boulaine, 1957 ; Daoud, 1993 ; Amichi, 2013 ; Ziane *et al.*, 2017 ; Hadj-Miloud, 2019 ; Ziane *et al.*, 2021), il ressort que la dynamique de développement agricole et les pratiques des agriculteurs sont conditionnées par le mode de gestion de la salinisation et de ses niveaux critiques (Hartani *et al.*, 2007 ; 2012 ; Amichi, 2013). Une adaptation qui serait difficile à atteindre dans la mesure où ce phénomène progresse très "*rapidement*" dans les terrains *non ou légèrement salés* sous les conditions défavorables du milieu (Daoud, 1993 ; INSID, 1998 ; Saidi, 2005). Ce constat est confirmé par les travaux de Walter *et al.* (2001) et Douaoui et Walter (2002) qui indiquent qu'entre 80 à 85% des sols de cette unité géographique sont affectés par la salinisation à différents degrés.

Devant ce profond bouleversement des conditions de la pédosphère, sous l'impulsion des aléas du milieu, les différentes connaissances acquises sur ces sols (Daoud, 1993 ; Badraoui *et al.*, 1998 ; Douaoui *et al.*, 2004 ; FAO, 2006 ; Douaoui *et al.*, 2006 ; Hartani *et al.*, 2007 ; INSID, 2008 ; Bradai et Douaoui, 2012 ; Bradai *et al.*, 2012 ; Amichi, 2013 ; Abdelkrim et Bradai, 2015 ; Ziane *et al.*, 2017 ; Abdelkrim *et al.*, 2021) ont mis en avant la responsabilité du développement de l'irrigation (*méthodes d'irrigation inappropriées, mauvaise qualité de l'eau, drainage insuffisant, réutilisation des eaux de drainage, etc...*) dans la dynamique et la progression des sels dans les sols de cette plaine. Assez souvent, le schéma de mise en place

repris dénote que l'irrigation avec une eau de mauvaise qualité fait fluctuer, en somme, le niveau piézométrique d'une nappe souvent proche de la surface (Durand, 1956 ; Boulaine, 1957 ; AGID, 2004 ; Douaoui et *al.*, 2004). Une fluctuation qui induit la remontée des sels dans le profil de sol, soit par capillarité, soit au cours de remontées significatives lors de grandes crues (Boulaine, 1957 ; Douaoui et *al.*, 2004).

La salinité du sol, qui est un indicateur chimique important de la qualité du sol (Zheng et *al.*, 2009 ; Bilgili, 2013), affecte non seulement le processus physique, chimique et biologique du sol (Karlen et *al.*, 2008), mais réduit également la productivité du sol (Vaughan et *al.*, 2005 ; Li et *al.*, 2007 ; Lachhab et *al.*, 2013), la durabilité du sol (Ammari et *al.*, 2013 ; FAO-ITPS-GPS, 2015) et la croissance de la végétation (Sumner et *al.*, 1998 ; Juan et *al.*, 2011 ; Yu et *al.*, 2014).

De règle générale, la salinisation se rapporte au processus d'accumulation des sels solubles dans le sol (Cheverry et Bourrié, 1998 ; Arshad, 2008 ; Hosain, 2019). Elle est localisée dans les régions arides et semi-arides et là où sévit aussi un faible drainage naturel et une faiblesse des précipitations insuffisantes pour les lixivier du sol (FAO, 2005 ; Juan et *al.*, 2011 ; Hosain, 2019).

Les sels solubles les plus courants dans les sols sont des composés des cations Ca^{++} , Mg^{++} , K^{+} et Na^{+} et des anions Cl^{-} , SO_4^{-} , CO_3^{-} et HCO_3^{-} (Douaïk, 2005). Leur association donnerait lieu à des composés chimiques qui sont plus solubles que le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et la calcite (CaCO_3). Il s'agit principalement des sels chlorurés (NaCl , KCl , MgCl_2 , CaCl_2), sulfatés (Na_2SO_4 , MgSO_4), bicarbonatés (NaHCO_3), carbonatés (Na_2CO_3) ou encore de sels plus ou moins hydratés (Montoroï, 1993).

La présence de ces différents sels dans les sols peut avoir différentes origines. Elle peut être aussi bien naturelle (*le matériau parental du sol, la nappe proche de la surface, l'effet évaporation et la topographie*), qu'anthropogénique (*les systèmes d'exploitation et les pratiques d'irrigation inappropriés, la mauvaise qualité de l'eau, l'insuffisance ou l'absence de drainage, etc...*) (Vaughan et *al.*, 2005 ; Amezketa, 2006 ; Ammari et *al.*, 2013 ; Zhang et *al.*, 2014 ; Hossain, 2019). Pour faire la distinction entre ces deux sources d'apports et pour une meilleure compréhension des processus et des phénomènes qui en découlent, il est généralement utilisé la terminologie chronologique (Daoud, 1993 ; Slama, 2004 ; Ruan et *al.*, 2010 ; Juan et *al.*, 2011) salinisation primaire et salinisation secondaire.

Du point de vu conceptuel, le suivi et l'évolution des sels solubles dans les sols sont très souvent exprimés par la combinaison des effets de paramètres spécifiques, qui sont la conductivité électrique (EC dS/m à 25°C), le taux de sodium échangeable (ESP en % de la CEC), et le sodium adsorption ratio (SAR en $(\text{meq/l})^{1/2}$) (Girard *et al.*, 2011 ; Juan *et al.*, 2011).

Une bonne stratégie de gestion du phénomène de salinisation et la restauration des sols salés requièrent une prédiction du mouvement des sels et de la distribution de la salinité dans le profil et dans l'espace.

Sur le plan méthodologique, la connaissance de la distribution spatiale et temporelle de la salinité des sols est la base des études d'observation des sources de salinisation, d'étude de modélisation, de l'amélioration des conditions des sols affectés par des sels solubles, et de l'évaluation de la durabilité des terrains agricoles face à ce processus (Corwin *et al.*, 2006 ; Douaïk *et al.*, 2007 ; Zhang *et al.*, 2014 ; Diouf, 2020). La salinité est variable dans l'espace et dans le temps (Daoud, 1993 ; Walter *et al.*, 2001; Douaïk *et al.*, 2007 ; Amichi, 2013 ; Ait-Mechedal, 2014 ; Saaoud, 2014 ; Diouf, 2020). A terme, elle peut engendrer une modification de la composition chimique de la solution du sol (Loyer *et al.*, 1989 ; Daoud, 1993 ; Bradaï *et Douaoui*, 2012).

La variation de la concentration de cette dernière est proportionnelle à la EC pour certains ions, elle peut être particulière pour d'autres ions impliqués dans la précipitation des minéraux (Daoud, 1993 ; Laoufi, 2010 ; Boussoussa, 2012 ; Ait-Mechedal, 2014 ; 2021). Pour cela, la prise en compte de la dynamique des sels dans le profil et la mise en place des profils salins est un bon moyen d'investigation (Zhang *et al.*, 2011 ; Bilgili, 2013 ; Yu *et al.*, 2014 ; Zhang *et al.*, 2014).

A la base, il s'agit d'une idée de recherche initiée par Servant (1976) et reprise par Montoroï (1993) sur la présence ou non de gradients verticaux de salinité. Ces dernier correspondent à des expressions de grandeurs de taux favorables à des variations qui peuvent être rapides (Loyer, 1991 ; Vaughan *et al.*, 2005 ; Girard *et al.*, 2011 ; Chen *et al.*, 2012 ; Zhang *et al.*, 2014) qui sont liés inévitablement (Daoud, 1993 ; Douaoui *et al.*, 2004):

- Soit au fonctionnement hydrique et structural des sols.
- Ou bien aux conditions hydriques et géochimiques aux limites du profil de sol, principalement à l'apport d'eau d'irrigation et aux fluctuations des nappes.

De même, la prédiction de l'aspect géochimique de la salinité est une démarche souvent utilisée et qui pourrait s'avérer fructueuse pour une meilleure connaissance des conséquences de la salinité sur le sol et son environnement (Marlet et *al.*, 2007 ; Nezli et *al.*, 2007 ; Ouamer-ali et *al.*, 2018). En tenant compte des réactions d'équilibres, des mécanismes d'échanges et des conditions d'évolution des milieux qui s'y déroulent, Marlet et Job (2006) estiment que la salinité découle de deux voies spécifiques, la voie saline neutre et la voie alcaline. Néanmoins, ils insistent sur le fait que la condition de leur formation reste "plus" liée au concept de l'alcalinité résiduelle.

Ce chapitre a pour objectif principal d'observer et d'évaluer la progression du phénomène de salinisation dans les sols du périmètre d'El Hamadna, région du Bas-Cheliff, en se basant sur une approche quantitative-statistique combinée aux concepts de la cartographie. Il s'agit dans un premier temps d'actualiser et de rafraichir les données cartographiques et quantitatives de l'étude réalisée par Durand en 1956 (*E1*). En second lieu, il s'agit de caractériser et d'évaluer l'état actuel de la salinité à partir d'échantillons de sols prélevés en 2012 (*E2*) sur les mêmes (emplacements de) profils exploités en *E1*. Enfin, nous évaluerons l'évolution temporelle du phénomène de salinisation dans les profils et dans l'espace d'étude sur une durée de plus de cinquante ans, c'est-à-dire sur la période *E1-E2*.

L'approche que nous avons adoptée repose grandement sur une sélection de paramètres physico-chimiques représentatifs de la mise en place du processus de salinisation et de son évolution. Afin de répondre au mieux à la problématique posée, nous avons opté pour ce qui suit :

- L'élaboration de deux matrices de données informatisées ; *une pour les données de l'étude E1 et une seconde pour les données de l'étude E2.*
- La réalisation de traitements statistiques et la visualisation de la distribution de la salinité dans les profils.
- La détermination des facies chimiques des solutions des sols.
- L'estimation du sens et de l'intensité de la variation de l'état de salinité dans les horizons, sur une durée de 56 ans, par une approche comparative.

1. Matériels et méthodes

Pour les besoins des différentes étapes de l'étude, la prise en compte des points d'échantillonnage a été effectuée après une vérification et une validation minutieuse du géo-positionnement de chaque profil. L'opération a nécessité l'utilisation d'un **GPS Garmin Trex-H** (modèle de Système de positionnement global) en respectant les aspects méthodologiques et morphologiques décrits dans le document maître de l'étude *E1*.

1.1. Matériel d'étude

1.1.1. Le site d'étude

Cette partie d'étude couvre l'aire de l'ancienne délimitation administrative de la station expérimentale d'étude des sols salins des Hamadéna (Relizane). Cette aire d'étude est localisée dans la partie la plus occidentale des plaines du Bas-Cheliff, à l'Ouest d'Alger. Elle est délimitée dans le système géodésique WGS84 (*fuseau31*) par les latitudes $35^{\circ}56'42''$ – $35^{\circ}55'30''N$. et les longitudes $0^{\circ}44'24''$ – $0^{\circ}45'18''E$. Il s'agit des limites administratives effectives durant la période allant de 1942 à 1961 (figure 13).

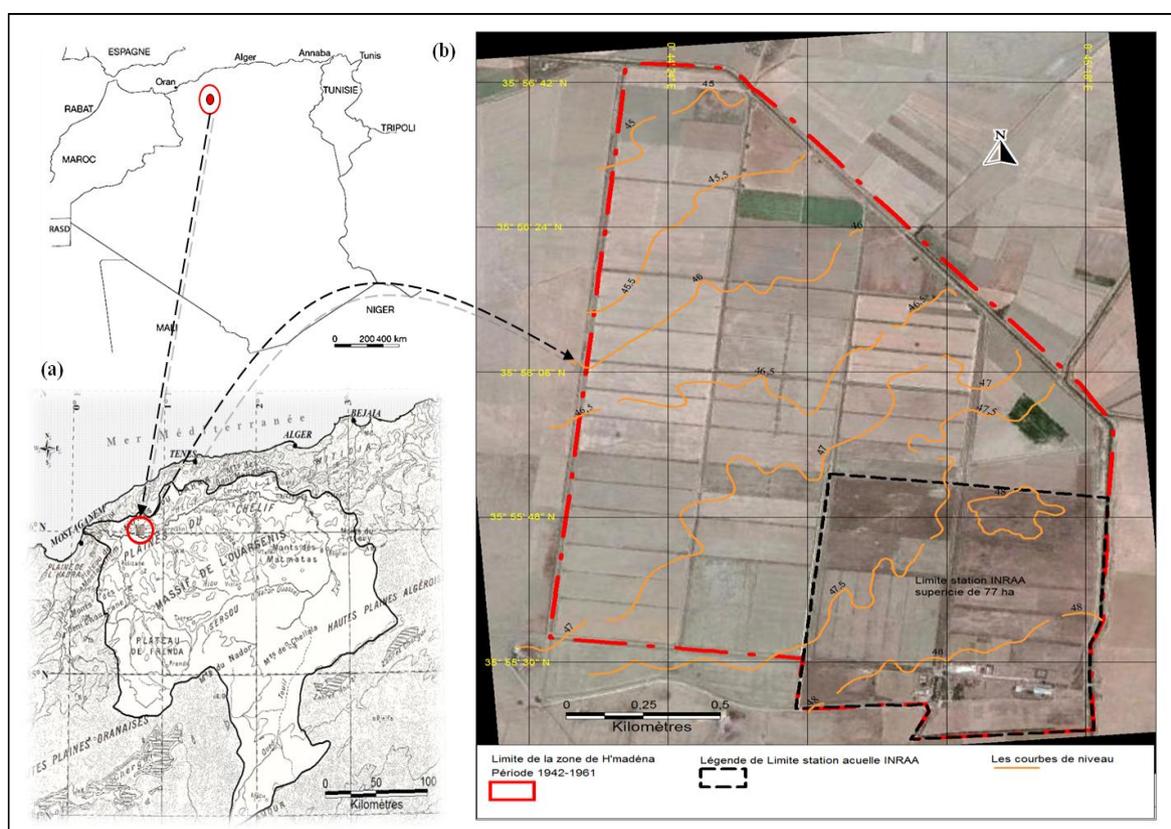


Figure 13. Délimitation de la zone d'étude.

(a). Localisation du site d'étude dans l'espace géomorphologique du bassin du Cheliff.
(b). Limites administratives anciennes (1942-1961) et actuelles de la station de l'INRAA région Ouest.

Cette station qui s'étalait sur une superficie de plus de 250 ha, avec une légère pente *SE-NW* de 1,5%, a été créée en 1942 dans le cadre de la mise en place d'un vaste programme de paysannat indigène (politique de gestion des colonies françaises) (Durand, 1956).

Seulement, l'absence de drainage naturel, la remontée de la nappe, l'apparition de contraintes d'hydromorphie accentuée et de salinité ont poussés les gestionnaires de la station à la transformer, une première fois, en une station hydro-agricole. Une station qui avait pour premier objectif de mener des essais de drainage et de mise en place de cultures en irrigué. Malheureusement, l'expérience a été de courte durée. L'absence de suivi et la désorganisation qui a fait suite à la fin de la seconde guerre mondiale (1945-1950) ont été derrière l'échec de cette tentative. Il faut attendre l'avènement des années 50, et l'affectation du site à la direction de l'Hydraulique et de l'équipement rural d'Alger, plus précisément au service des études scientifiques (S.E.S), pour avoir une relance effective du projet, mais sous une autre formulation. Ainsi, il a été décidé sa transformation, cette fois-ci, en une station expérimentale d'étude des sols salins, appellation qu'elle gardera jusqu'au début des années 60 (Durand, 1956).

Actuellement, cet ensemble est subdivisé en deux zones. Une première zone en activité sous forme de concession agricole, couvrant plus de 173 ha. Une seconde zone, d'une superficie de plus de 77ha, représentant les limites actuelles de la station de recherche de l'Institut National de la recherche Agronomique d'Algérie (INRAA) à El Hamadna dans la région Ouest (figure 13b).

1.2. Méthode d'étude

1.2.1. Actualisation des données quantitatives et cartographiques de l'étude pédologique *E1*

En tenant compte des concepts fondamentaux de la cartographie de base et des sciences géomatiques (*type de support, projections et systèmes cartographiques, échelles, qualité, généralisation cartographique, représentation de la planimétrie, du relief et habillage de la carte, écriture et rédaction cartographique, modèles et structuration des données cartographiques, etc...*), cet objectif a été réalisé en trois étapes successives :

- Acquisition et valorisation des données de prospection pédologique : Une étape de mise en *forme et de visualisation des informations techniques disponibles ; rafraichissement, vectorisation, numérisation et transformation (ajustement).*

- Identification et restauration des unités pédologiques reconnues.
- Réajustement et valorisation des données de profils types d'appartenance.

1.2.1.1. Acquisition et valorisation des données de prospection pédologiques

Le traitement appliqué s'appuie sur les principes de la philosophie méthodologique de préservation, de conservation et de gestion d'un héritage cartographique (Carré et Boettinger, 2008 ; Kyriazi et *al.*, 2010 ; Jobst, 2011 ; Legrain et *al.*, 2011 ; Solar, 2016) ou d'un patrimoine cartographique (Hongye, 2009 ; Livieratos, 2009 ; Curt et *al.*, 2016). Les différentes étapes accomplies sont présentées dans la figure 14. Les principaux aspects spécifiques cités sont :

- L'*aspect* rafraîchissement, numérisation et *transformation (ajustement)* de la maille (50-100m) de prospection pédologique utilisée en *EI* (Etape I). Il est possible de l'identifier par l'étape d'extraction et de transformation des données de géo-positionnement en format numérique (ou digital).
- L'*aspect identification et emmagasinement des données* de l'ensemble des points de la maille de prospection (sondages et profils « types implantés ») (Etape II).
- L'*aspect reprise des unités de profils types en respectant* la terminologie originelle (celle utilisée en *EI*) et *visualisation de la carte des sols* (Etape III).

Les différents traitements cartographiques ont été réalisés à l'aide du logiciel *Mapinfo* 8,5 et l'exploitation du tableur *Excel* 2010. Pour la projection et la localisation des sondages et des profils « types implantés », les coordonnées géographiques utilisées sont les degrés décimaux. Les valeurs fixées ont été ajustées en se référant au système géodésique « *WGS 84* ».

1.2.1.2. Identification et restauration des unités pédologiques reconnues

Les données pédologiques exploitées sont issues des différentes étapes de l'approche classique de cartographie⁴ des sols adoptée en *EI* (figure 14a, 14b, 14c).

Une attention particulière aux résultats de l'étape d'actualisation de la carte des sols et des unités de profils types (figure 14c) permet de distinguer, *selon la légende de la carte* 10 types de sols salés.

1.2.1.3. Réajustement et valorisation des données de profils types d'appartenance

Les profils types identifiés et restaurés dans cette étude sont au nombre de onze. Les caractéristiques géographiques, cartographiques et pédologiques des différents profils sont

⁴ L'approche classique de cartographie des sols repose sur la réalisation, en premier lieu d'observations morphologiques (sondages et profils) stratifiés, en second lieu sur des mesures des conditions et des traits du milieu immédiat (Walter, 2002).

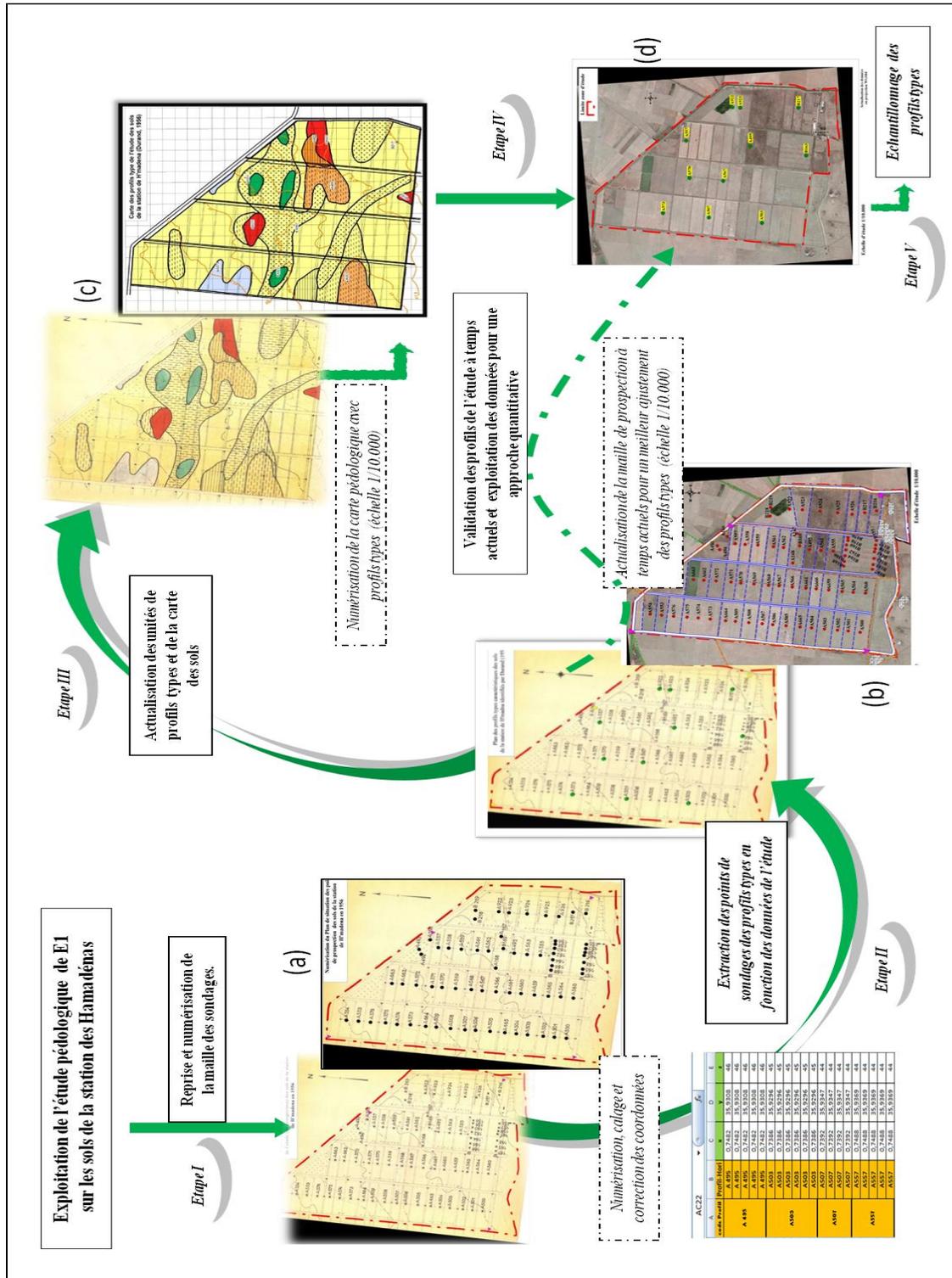


Figure 14. Les étapes du traitement cartographique.
 (a) Numérisation de la maille de prospection pédologique de E1, (b) Actualisation de la maille de prospection pour les profils types implantés, (c) Restauration de la carte des sols et des unités types, (d) Carte de localisation et de mise en place des profils types pour l'étude E2

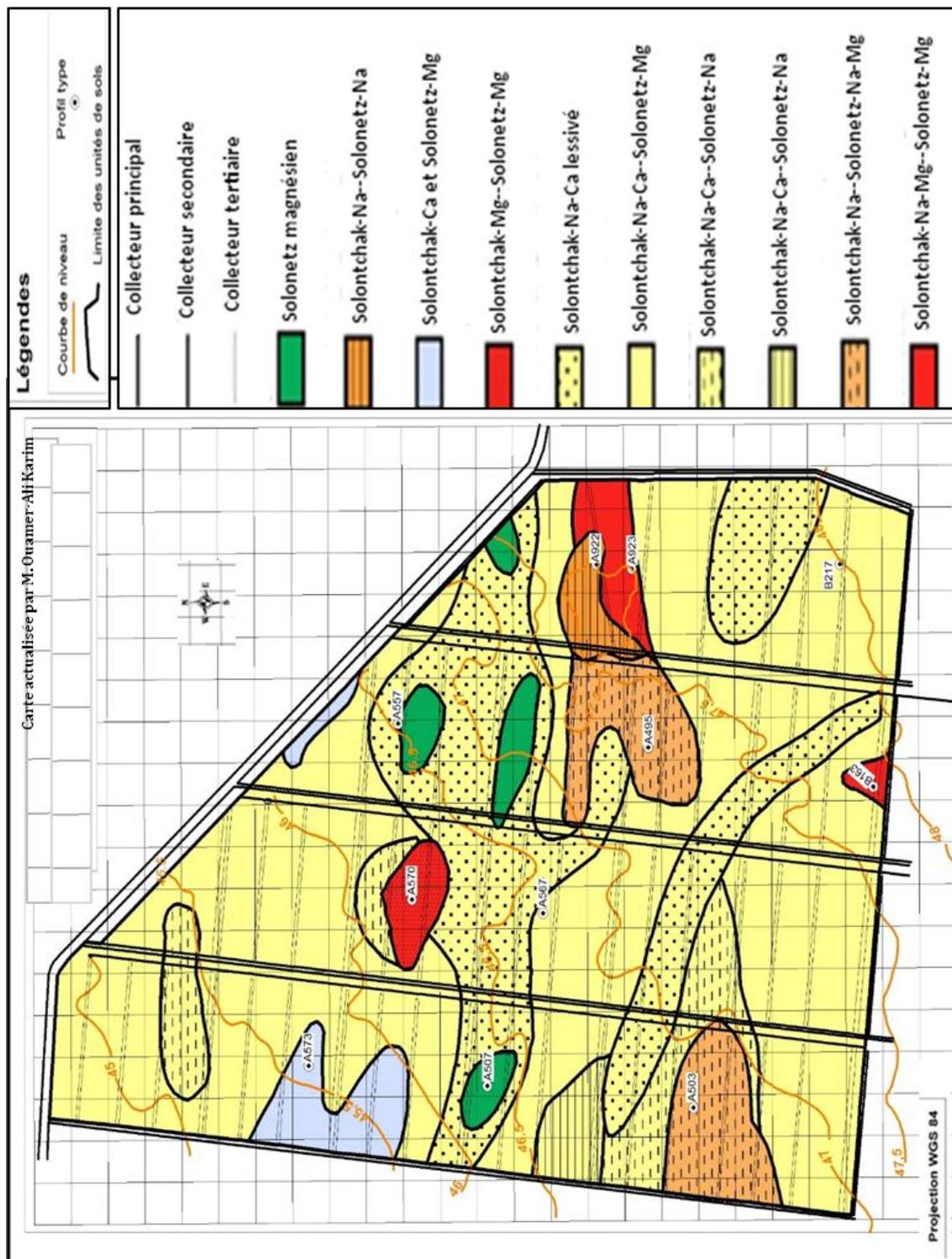


Figure 14c. La carte des sols salés de *EI* actualisée.

résumées dans le tableau IV. Les données exploitées proviennent systématiquement de chaque unité de sol observée et décrite.

Tableau IV. Localisation et classification des profils types et des unités de sols adoptées en *EI*.

Profils	Corrdonnées			Classifications Durand	Correspondance WRB
	X	Y	Z		
A 495	0,7482	35,9308	46	Solontchaks Na Solonetz Na Mg	Sodic Solonchaks (Clayic, Chloridic, Calcaric, Drainic, Ochric, Hypersalic)
A 503	0,7386	35,9296	45	Solontchaks Na Mg Solonetz Na Mg	Eutric Calcaric Sodic Salic Cambisols (Clayic, Drainic, Ochric)
A 507	0,7392	35,9347	44	Solonetz magnésiens	Eutric Calcaric Sodic Cambisols (Clayic, Drainic)
A 557	0,7488	35,9369	44	Solontchaks Na Ca Solonetz Mg léssivés	Eutric Calcaric Sodic Cambisols (Clayic, Drainic)
A 567	0,743803	35,9334	43	Solontchaks Na Ca Solonetz Na Mg	Eutric Calcaric Sodic Cambisols (Clayic, Drainic)
A 570	0,74423	35,9365	45	Solontchaks Mg Solonetz Mg	Eutric Calcaric Sodic Cambisols (Clayic, Drainic)
A 573	0,7398	35,9391	44	Solontchaks Ca Solonetz Mg	Cambic Calcisols (Clayic, Ochric, Sodic)
A 922	0,75304	35,93213	44	Solontchaks Na Solonetz Na	Sodic Solonchaks (Clayic, Chloridic, Calcaric, Drainic, Ochric, Hypersalic,
A 923	0,7529	35,9312	44	Solontchaks Na Mg Solonetz Mg	Fluvic Sodic Solonchaks (Clayic, Chloridic, Calcaric, Drainic, Hypersalic)
B 163	0,7471	35,9253	45	Solontchaks Na Mg Solonetz Mg	Sodic Solonchaks (Clayic, Chloridic, Calcaric, Drainic, Hypersalic)
B 217	0,753	35,9261	47	Solontchaks Na Ca Solonetz Mg	Eutric Calcaric Sodic Fluvisols (Clayic, Drainic, Ochric).

La différence observée entre le nombre de profils types (onze) et le nombre d'unités de sols identifiées (dix) relève des principes de base de l'approche classique de cartographie des sols qui a été adoptée en *EI*. La confirmation et la validation des doutes sur de possibles différences morphologiques dans deux sous unités de sols d'appartenance ont amené l'équipe technique de *EI* à réaliser deux profils dans une même unité cartographique.

1.2.1.3.1. Organisation et mise en place de l'information

Pour les besoins de la méthodologie, la profondeur maximale d'investigation pour les observations ponctuelles (actualisation et de prélèvements) a été limitée sur la base d'un profil cultural⁵ d'une profondeur d'enracinement allant jusqu'à 1,20m. La structure du descriptif des différentes observations est présentée dans le tableau V.

⁵Le profil cultural est un outil de diagnostic agronomique qui permet à partir de l'examen d'une couche de sol de tirer des principes d'action pour la pratique agricole (Hénin et al., 1969).

Tableau V. Structuration adoptée pour le descriptif de *E1*.

Prof.	Code du prof.	Hrz Caract.	Niveaux d'invest.
A495	A495	h1	0-20cm
	A495	h2	20-40cm
	A495	h3	40-80cm
	A495	h4	80-100cm
	A495	h5	100-108cm
A503	A503	h1	0-25cm
	A503	h2	25-75cm
	A503	h3	75-85cm
	A503	h4	85-93cm
	A503	h5	93-100cm
	A503	h6	100-115cm
A507	A507	h1	0-30cm
	A507	h2	30-50cm
	A507	h3	50-105cm
	A507	h4	105-145cm
A557	A557	h1	0-30cm
	A557	h2	30-65cm
	A557	h3	65-75cm
	A557	h4	75-90cm
	A557	h5	90-100cm
A567	A567	h1	0-25cm
	A567	h2	25-65cm
	A567	h3	65-90cm
	A567	h4	90-115cm
	A567	h5	115-120cm
A570	A570	h1	0-30cm
	A570	h2	30-70cm
	A570	h3	70-80cm
	A570	h4	80-110cm
	A570	h5	110-130cm
A573	A573	h1	0-20cm
	A573	h2	20-35cm
	A573	h3	35-65cm
	A573	h4	65-72cm
	A573	h5	72-95cm
	A573	h6	>95cm
A922	A922	h1	0-2cm
	A922	h2	2-40cm
	A922	h3	40-80cm
	A922	h4	80-110cm
	A922	h5	>110cm
A923	A923	h1	0-10cm
	A923	h2	10-50cm
	A923	h3	50-115cm
	A923	h4	>115cm
B163	B163	h1	0-10cm
	B163	h2	10-50cm
	B163	h3	50-120cm
	B163	h4	120-200cm
B217	B217	h1	0-25cm
	B217	h2	25-52cm
	B217	h3	52-76cm
	B217	h4	76-110cm

1.2.1.3.2. Exploitation des données originelles

L'idée recherchée et développée dans ce qui suit repose sur la conception et la mise en œuvre sous tableur Excel d'une table ou d'une matrice⁶ de stockage et de gestion facile et rapide de l'information. Une table à agencement bien défini (lignes et colonnes) qui peut être assimilée à une banque de données simplifiée et spécifique à ce cas d'étude.

L'approche technique adoptée pour la construction de cette structure repose sur le modèle conceptuel proposé par King et Girard (1988), Carré et Jacobson (2009) et Baccini (2010) relatif à une organisation des données sous la forme d'un tableau statistique de type individus-variables (figure 15). Les variables exploitées sont extraites ou calculées (donc de caractère quantitatif), avec une combinaison d'affichage de type horizons-variables :

- Les variables extraites sont : le taux de salinité exprimé par la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (EC_e), le pH_e du sol de l'extrait de pâte saturée, et enfin les ions en solution : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} , CO_3^{--} , et HCO_3^- .
- Les variables calculées sont : l'ESP et le SAR.

		← Variables →			
		V_1	.....	.....	V_n
↑ Individus ↓	<i>Soil id</i>	<i>Hz. id</i>	.....	.....	.....
	<i>S1</i>	H1,1	.....	.....	.....
	<i>S1</i>	H1,2	.....	.....	.....
	<i>S1</i>	H1,3	.....	.....	.....
	<i>S2</i>	H2,1	.....	.....	.....
	<i>S2</i>	H2,2,	.....	.....	.....
	<i>S2</i>	H2,3	.....	.....	.....

	<i>Sn</i>	Hn,1	.....	.....	.....

Figure 15. Schéma de représentation d'une table ou matrice de données (Carré et Jacobson 2009).

Cependant, ce type de mise en place requière, au préalable, l'application d'une série de mesures et de prétraitements. Une forme d'ajustement et de formulation (implémentation et harmonisation) des données introduites et stockées sur la base de normes internationales (*code d'écriture, unité de mesure, ajustement de variables, etc.*). Augusto et al. (2006), HWSD(2009), Genot et al. (2012) et Lagacherie et al. (2013) estiment qu'il s'agit là d'une étape indispensable dans la standardisation des données stockées.

⁶ La principale différence entre les tables et les matrices est que les tables peuvent inclure uniquement des groupes de lignes, alors que les matrices ont des groupes de lignes et des groupes de colonnes.

1.2.1.3.3. Les variables calculées (manquantes) : Estimation du sodium échangeable (ESP) et du Sodium Adsorption Ratio (SAR)

Ce sont deux paramètres reconnus et utilisés comme des indices ou des indicateurs de salinité (Seilsepour et *al.*, 2009 ; Zare et *al.*, 2014). Différemment appréciés et utilisés dans l'évaluation du processus de salinisation des sols, il ressort que leur représentativité méthodologique semble s'individualiser en fonction du milieu d'étude, c'est-à-dire le sol ou l'eau d'irrigation (USSL, 1954 ; FAO, 1999 ; Legros, 2007 ; Levy, 2012 ; Sonon et *al.*, 2015).

Afin de cerner et de mieux comprendre l'importance de chaque paramètre dans l'évaluation de ce processus, il est essentiel d'observer les points descriptifs du tableau VI.

Tableau VI. Couple ESP- SAR et l'évaluation du processus de salinisation

Paramètres	Rôles possibles	Auteurs
ESP	Déterminer l'existence d'un risque de sodisation (enrichissement en Na ⁺) du complexe d'échange du sol.	Valles et <i>al.</i> (1983), Douaoui et <i>al.</i> (2004), Saïdi et <i>al.</i> (2004), Saïdi (2005), Legros (2007), Levy (2012).
	Indicateur de l'effet de l'état physique d'un sol salin, sodique ou salin-sodique sur le développement des plantes.	Lamond et Whitney (1992)
	La classification et la caractérisation des sols salins, sols sodiques, et salins-sodiques.	Lamond et Whitney (1992), Juan et <i>al.</i> (2011), WRB (2014).
SAR	Identification de l'horizon diagnostique Natrique.	Legros (2007), WRB (2014).
	L'estimation ou la prédiction de l'ESP à partir de l'analyse du taux des cations sodium, Calcium et Magnésium dans un extrait (ou en solution) de sol saturé.	USSL (1954), Servant (1976), Seilsepour et <i>al.</i> (2009), Levy (2012), Zare et <i>al.</i> (2014).
	Déterminer et classer le risque sodium dans une eau d'irrigation.	USSL (1954), Durand (1961), Bresler et <i>al.</i> (1982), Lesch et Suarez (2009), Levy (2012).
	Déterminer la sensibilité des sols, sous l'effet du processus de salinisation, à la dégradation physique.	Saïdi (2012).

Dans notre cas, et tenant compte des données pédologiques recueillies, l'ESP (1) a été estimé à partir des valeurs calculées pour le SAR(2). Il s'agit de l'application d'une approche empirique qui reste toujours d'actualité (Bertrand et *al.*, 1993 ; Levy, 2012) (tableau VII). Les équations utilisées (1) et (2) ont été établies par USSL (1954) :

$$(1) \text{ESP}_{eq} = 100(-0,0126 + 0,01475 \times \text{SAR}) / 1 + (-0,0126 + 0,01475 \times \text{SAR})$$

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

Où ESP_{eq} représente le taux de sodium échangeable estimé, le SAR représente le Sodium Adsorption Ratio, Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} identifient les cations en $meq l^{-1}$.

En synthétisant, il ressort que les étapes essentielles dans l'élaboration de la table standardisée sont les suivantes :

- L'emmagasinement ou la compilation de l'information pédologique existante en relation avec la thématique.
- La vérification et la mise en conformité de l'information à exploiter : il s'agit du traitement d'harmonisation et de standardisation des données.
- L'estimation des variables manquantes par approche analytique ou mathématique.

1.2.2. Caractérisation et évaluation de l'état actuel (E2) de la salinité

Dans cette étape, il s'agit d'évaluer l'état actuel de la salinité dans les sols de l'ancienne délimitation administrative du périmètre d'étude des sols salins des Hamadéna. L'approche utilisée se base sur le prélèvement et l'analyse au laboratoire d'échantillons de sols actuel issus des mêmes emplacements d'observations (ou profils) réalisés en *EI*.

1.2.2.1. Echantillonnage du sol

L'échantillonnage du sol a été effectué entre Avril et Mai 2012 à l'aide d'une tarière pédologique avec manchon de rallonge ($L_{tot.} = 1,50m$; $\emptyset = 7 cm$). L'aspect épaisseur des horizons adopté lors de l'étude originelle (tableau V) a été considéré comme le paramètre déterminant dans la réalisation de l'approche comparative.

La phase prélèvement sur site d'expérimentation nous a permis de récupérer 53 échantillons de sols à partir des onze (11) profils réimplantés (figure,14d).

La phase de réimplantation des profils types a été précédée par une description de la nature du couvert végétal présent dans le périmètre. Ainsi, les profils A503, A507, A573, A570, A567, A557, B217 sont localisés dans une zone cultivée en céréaliculture, avec une prédominance de l'orge, alors que les profils A495, A922, A923, B163 se situent dans des zones mises en *jachère* (non exploitée ou abandonnée) depuis plus de 30 ans.

Tableau VII. Les valeurs calculées du SAR et de l'ESP_{eq} des échantillons de E1 et E2

Péri.		1956		2012	
Prof.	Hrz.	SAR	ESP	SAR	ESP
A 495	h1	73,11	51,59	15,14	21,29
	h2	79,20	53,61	42,21	61,61
	h3	65,91	48,97	73,82	108,70
	h4	45,26	39,58	88,61	130,74
	h5	33,22	32,32	102,59	151,56
A503	h1	14,36	16,61	30,13	43,61
	h2	39,40	36,25	49,80	72,92
	h3	36,01	34,15	66,44	97,71
	h4	39,88	36,53	83,78	123,53
	h5	31,54	31,16	70,42	103,64
	h6	35,34	33,71	76,12	112,13
A507	h1	-	-	9,87	13,43
	h2	-	-	20,85	29,79
	h3	-	-	49,93	73,11
	h4	5,50	6,41	36,21	52,66
A557	h1	-	-	11,00	15,12
	h2	12,07	14,19	14,93	20,98
	h3	12,20	14,34	25,31	36,43
	h4	17,54	19,75	32,24	46,76
	h5	16,58	18,83	35,24	51,23
A567	h1	8,82	10,51	3,57	4,05
	h2	13,08	15,28	21,21	30,32
	h3	22,39	24,10	39,49	57,56
	h4	15,34	17,60	57,09	83,78
	h5	17,54	19,75	60,04	88,18
A570	h1	-	-	15,53	21,87
	h2	13,91	16,14	53,98	79,14
	h3	-	-	56,98	83,62
	h4	16,15	18,41	61,59	90,49
	h5	20,01	22,03	61,06	89,69
A573	h1	8,94	10,66	3,22	3,52
	h2	3,59	3,88	18,78	26,71
	h3	-	-	56,83	83,39
	h4	-	-	54,40	79,77
	h5	12,07	14,19	51,93	76,09
	h6	5,44	6,34	51,79	75,89
A922	h1	-	-	20,87	29,82
	h2	78,98	53,54	85,99	126,83
	h3	87,52	56,11	86,49	127,57
	h4	-	-	154,62	229,07
	h5	-	-	80,69	118,94
A923	h1	34,14	32,93	83,41	122,99
	h2	-	-	69,59	102,41
	h3	17,58	19,79	89,79	132,49
	h4	-	-	81,72	120,46
B163	h1	17,13	19,36	6,15	7,89
	h2	26,25	27,25	16,50	23,30
	h3	28,36	28,86	53,44	78,34
	h4	37,98	35,39	37,86	55,12
B217	h1	16,39	18,64	0,98	0,19
	h2	28,62	29,05	15,24	21,44
	h3	34,45	33,14	28,03	40,49
	h4	33,68	32,62	29,17	42,19

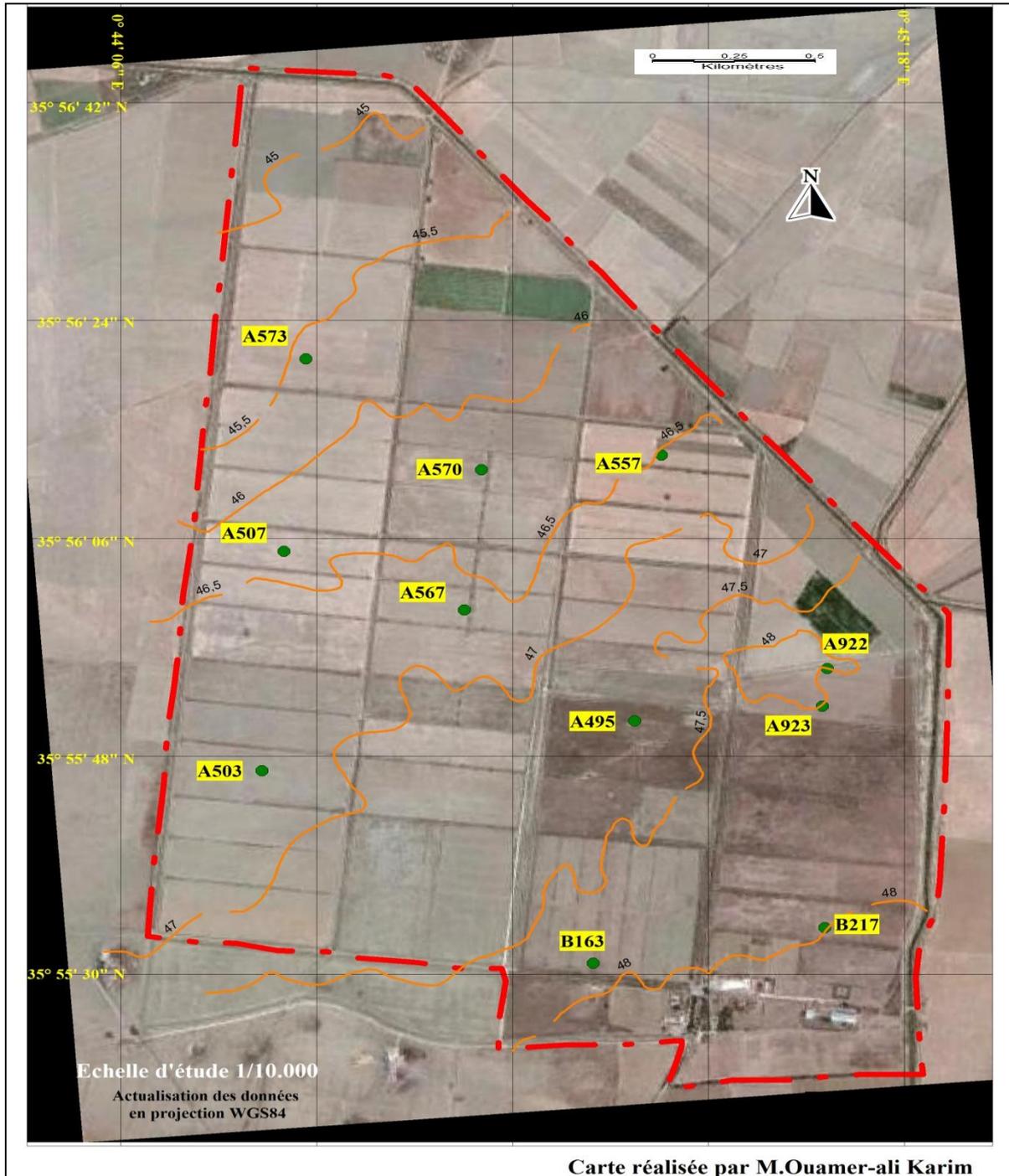


Figure 14d. Les points d'observations de l'étude E2.

1.2.2.2. Analyses au laboratoire

Les principales analyses et les différents protocoles appliqués pour la caractérisation des échantillons de sols s'appuient sur des méthodes standards décrites par USSL (1954). La représentation sommaire des différents principes d'étude est donnée dans le tableau VIII.

Tableau VIII. Les méthodes d'analyses du sol.

Par.	Méthodes
pH_e	Détermination sur l'extrait de pâte saturée et mesure à l'aide d'un pH-mètre classique (potentiométrique).
EC_e (dS/m)	Détermination sur l'extrait de pâte saturée et à l'aide d'un conductivimètre classique.
Na^+ , K^+ et Ca^{++}	Déterminer sur l'extrait de pâte saturée et utilisation d'un Photométrie d'absorption atomique.
Mg^{++}	Détermination sur l'extrait de pâte saturée et utilisation d'un Spectrophotométrie à flamme d'émission atomique
Cl^-	Application de la Méthode de Mohr avec titration au nitrate d'argent ($AgNO_3$ 0,1N).
CO_3^{--} et HCO_3^-	Application de la méthode volumétrique avec titration à l'acide sulfurique (H_2SO_4 0,1N).
SO_4^{--}	Méthode gravimétrique par précipitation au chlorure de baryum ($BaSO_4$ à 10%).

De même que pour la partie valorisation des données acquises antérieurement (étude originelle), certaines variables prises en compte à ce niveau sont calculées. En plus de l' ESP_{eq} (1) et du $SAR(2)$, nous avons aussi estimé les valeurs des carbonates (CO_3^{--}).

1.2.2.2.1. Estimation des carbonates (CO_3^{--})

En se référant aux travaux de Garrels et Christ (1967) et Drever (1997), il ressort qu'un calcul arithmétique sur la base d'un traitement sur les données du pH (3) peut être appliqué pour estimer les concentrations de la solution en carbonates (CO_3^{--}) (6) (tableau IX). Le schéma du principe de calcul repose sur le déroulement des réactions d'équilibres suivantes :

$$(3) \quad pH = \log[H^+], \text{ soit } [H^+] = 10^{-pH}$$

$$(4) \quad CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \text{ soit } [H_2CO_3] = K \times [pCO_2] \quad \text{avec } K = 10^{-1,46}$$

$$(5) \quad H_2CO_3 \rightleftharpoons HCO_3^- + H^+ \text{ Soit } [HCO_3^-] = K_1 \times [H_2CO_3]/[H^+] \text{ avec } K_1 = 10^{-6,35}$$

$$(6) \quad HCO_3^- \rightleftharpoons CO_3^{--} + H^+ \text{ Soit } [CO_3^{--}] = K_2 \times [HCO_3^-]/[H^+] \text{ avec } K_2 = 10^{-10,32}$$

Tableau IX. Détermination des carbonates de la solution des sols de E2.

<i>Prof.</i>	<i>Hrz</i>	<i>pH</i>	<i>[H⁺] (mole l⁻¹)</i>	<i>CO₃⁻ (meq l⁻¹)</i>
A 495	h1	8,3	5,01E-09	0,02
	h2	7,45	3,55E-08	0,003
	h3	7,95	1,12E-08	0,01
	h4	7,97	1,07E-08	0,01
	h5	7,5	3,16E-08	0,005
A503	h1	8,29	5,13E-09	0,005
	h2	8,15	7,08E-09	0,01
	h3	7,49	3,23E-08	0,004
	h4	8,01	9,77E-09	0,01
	h5	8,15	7,08E-09	0,03
	h6	8,17	6,76E-09	0,02
A507	h1	8,35	4,47E-09	0,04
	h2	8,02	9,55E-09	0,01
	h3	7,41	3,89E-08	0,003
	h4	7,51	3,09E-08	0,002
A557	h1	8,32	4,79E-09	0,04
	h2	7,66	2,19E-08	0,009
	h3	7,64	2,29E-08	0,006
	h4	8,02	9,55E-09	0,01
	h5	8,07	8,51E-09	0,008
A567	h1	8,36	4,36E-09	0,005
	h2	7,73	1,86E-08	0,003
	h3	7,65	2,24E-08	0,004
	h4	7,51	3,09E-08	0,004
	h5	7,47	3,39E-08	0,001
A570	h1	8,34	4,57E-09	0,03
	h2	7,41	3,89E-08	0,002
	h3	7,98	1,05E-08	0,01
	h4	7,87	1,35E-08	0,005
	h5	7,92	1,20E-08	0,02
A573	h1	7,91	1,23E-08	0,01
	h2	7,7	1,99E-08	0,005
	h3	7,03	9,33E-08	0,002
	h4	7,82	1,51E-08	0,006
	h5	7,73	1,86E-08	0,004
	h6	7,15	7,08E-08	0,001
A922	h1	8,38	4,17E-09	0,03
	h2	8,29	5,13E-09	0,03
	h3	7,79	1,62E-08	0,007
	h4	7,67	2,138E-08	0,004
	h5	7,53	2,95E-08	0,008
A923	h1	8,23	5,89E-09	0,01
	h2	8,29	5,13E-09	0,02
	h3	8,02	9,55E-09	0,01
	h4	7,82	1,51E-08	0,008
B163	h1	7,84	1,44E-08	0,005
	h2	8,27	5,37E-09	0,009
	h3	7,69	2,04E-08	0,004
	h4	8,05	8,91E-09	0,01
B217	h1	8,24	5,75E-09	0,008
	H2	8,04	9,12E-09	0,008
	H3	7,53	2,95E-08	0,005
	H4	7,47	3,39E-08	0,003

Où le traitement sur les données de pH est marqué par l'application de l'échelle logarithmique (en incluant un facteur 10) aux changements de concentration de l'ion H^+ , et K , K_1 et K_2 représentent des constantes d'équilibres définies,

Les équations (4) et (5) représentent les réactions complémentaires explicatives de la chimie génératrice des carbonates.

1.2.3. Estimation de l'évolution temporelle de la salinité

L'approche appliquée est une évaluation mixte "qualitative-quantitative" comparative. L'objectif recherché est la détermination de la variabilité spatiale et verticale de la distribution des sels dans les sols de l'ancienne délimitation du périmètre d'étude des sols salins des Hamadénas entre les périodes *E1* et *E2*. Une comparaison qui permettra, ainsi, de cerner l'évolution temporelle du phénomène sur un épisode de plus de cinquante ans (56ans).

2. Traitement des données

Le traitement des données à ce niveau s'articule autour des trois points synthétisés ci-après :

- Calculs statistiques.
- La mise en place graphique des différents profils salins de distribution.
- La détermination des faciès chimiques caractéristiques des échantillons étudiés.

Cet ensemble d'opération cible l'information stockée et traitée sur une composition de deux matrices. La première matrice d'information couvre l'étude *E1* et la seconde compile les données de l'étude *E2*. La masse d'information introduite pour chaque matrice concerne 11 profils pédologiques, 53 horizons et 11 variables physico-chimiques.

2.1. Analyses statistiques

Les étapes de traitements adoptées sont les suivantes :

- Les statistiques descriptives pour l'ensemble des données.
- Calcul des fréquences de distribution des taux de salinité (EC_e) et des taux de l'élément sodium échangeable estimé (ESP_{eq}).

Pour le deuxième paramètre, il est important d'indiquer que sa prise en compte dans la représentation des fréquences de distribution du phénomène de salinisation est motivée par :

- son étroite relation avec l'aspect sodisation du sol et de son complexe adsorbant (Boulaine, 1957 ; Daoud et *al.*, 1993 ; Saïdi et *al.*, 2004 ; Saïdi, 2005 ; Girard et *al.*,

2011 ; Bradaï et *al.*, 2012) et,

- le fait qu'il est quasi présent dans la composition chimique de sels minéraux évaporitiques (Al-Droubi, 1976 ; Loyer et *al.*, 1983 ; Bockheim et Hartemink, 2013 ; Girard et *al.*, 2011), qui peuvent interférer dans la dynamique de la salinisation au sens pédologique.

- Les relations statistiques pouvant exister entre EC_e (dS/m) et quelques variables. Ces dernières sont de deux natures :

- les variables extraites ou analysées qui sont EC_e , le pH_e et les ions en solutions (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} , CO_3^{--} , HCO_3^-) et,
- les variables calculées par approche thématique qui sont : Le CO_3^{--} (pour $E2$), l' ESP_{eq} et le SAR .

Il y a lieu d'indiquer que les carbonates pour $E1$ n'ont pas été mesurés. Une tentative de les estimer par approche mathématique (comme pour les carbonates) n'a pas abouti à des résultats exploitables.

Les différents calculs statistiques sont réalisés à l'aide du tableur Excel 2010, et du logiciel Statistica v8,1.

2.1.1. Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives prises en considération sont la moyenne (*Moy.*), le minimum (*Min.*), le maximum (*Max.*), la médiane (*Méd.*), l'écart type (*Ec.-ty.*), la variance (*Var.*), les coefficients d'asymétrie (*Asy.*) et d'aplatissement (*Apl.*), et enfin le coefficient de variation (*C.V.*).

Les différentes étapes de ces traitements ont été scindées en deux parties, la première partie concerne l'ensemble des données, sans distinction de profils et d'horizons, et la seconde partie couvre les données par horizon caractéristique ou strate d'étude.

Par nécessité méthodologique, il y a lieu de préciser que les *coefficients d'asymétrie (Asy.)* et *d'aplatissement (Apl.)* non pas été générés systématiquement pour l'ensemble des variables pédologique. Ainsi, il a été décidé de les présenter que pour la variable discriminante de la salinité qui est EC_e .

2.1.2. Calcul des fréquences de distribution

Ce traitement a porté d'abord sur la distribution des fréquences de EC_e et des taux de l' ESP_{eq} pour l'ensemble des données, sans distinction de profils et d'horizons et, ensuite, par niveau ou strate spécifique selon l'ordonnement proposé dans le tableau V.

La représentation des valeurs de EC_e (dS/m) se base sur une structuration en cinq classes telles que proposées par USSL (1954) :

- Classe 1 (C1) :** non salés (<2 dS/m)
- Classe 2(C2) :** peu salés (2-4 dS/m)
- Classe 3(C3):** moyennement salés (4-8 dS/m)
- Classe 4(C4):** salés (8-16 dS/m)
- Classe 5(C5):** très salés à hyper-salés (>16 dS/m)

Pour les taux de l' ESP_{eq} (%), la représentation a été structurée en fonction des quatre classes proposées par FAO (1984) :

- Classe 1 (C1) :** sodicité légère (< 5%)
- Classe 2(C2):** sodicité modérée (5-20%)
- Classe 3(C3):** sodicité grave (20 – 45%)
- Classe 4(C4):** sodicité très grave (> 45 %)

2.1.3. Les relations entre EC_e et les autres variables pédologiques

Il est admis que l'étude des relations est l'un des caractères essentiels de la pédologie (Boulaine, 1979). Dans ce qui est présenté, il s'agit de rechercher les éventuelles relations entre EC_e et les différents paramètres extraits ou mesurés sur les données globales.

Cette approche a été développée sur fond de réalisation de matrice de corrélation.

2.2. Mise en place des profils salins

C'est une approche de traitement graphique traduisant la visualisation des taux de salinité dans les profils par projection verticale de l'information. Elle s'apparente à une reproduction dérivée du concept des profils salins observés et étudiés par Servant (1976). La schématisation de ce concept est abordée au travers les profils types suivants (figure 16) :

- **Le profil de type A :** Le gradient de salinité est orienté vers la surface, où le maximum de salinité est observé. Ce type de profil de distribution ascendant s'observe à la suite d'une

saison sèche qui provoque une évaporation et une concentration des sels dans la partie supérieure du sol. Il peut être favorisé également par la présence d'une nappe salée peu profonde.

- **Le profil de type B :** Le maximum de salinité est localisé au niveau de la partie médiane du profil. Ce profil convexe résulte d'une phase de désalinisation des profils de type A.
- **Le profil de type C :** Le maximum de la salinité se localise au niveau de la partie supérieure et au niveau de la base du profil. Ce type de profil caractérise une phase de ré-salinisation des profils.
- **Le profil de type D :** Le gradient de salinité est descendant. Le maximum de salinité se situe à la base du profil. Ce type de distribution est observé dans les sols qui présentent une bonne lixiviation des sels et une nappe profonde.

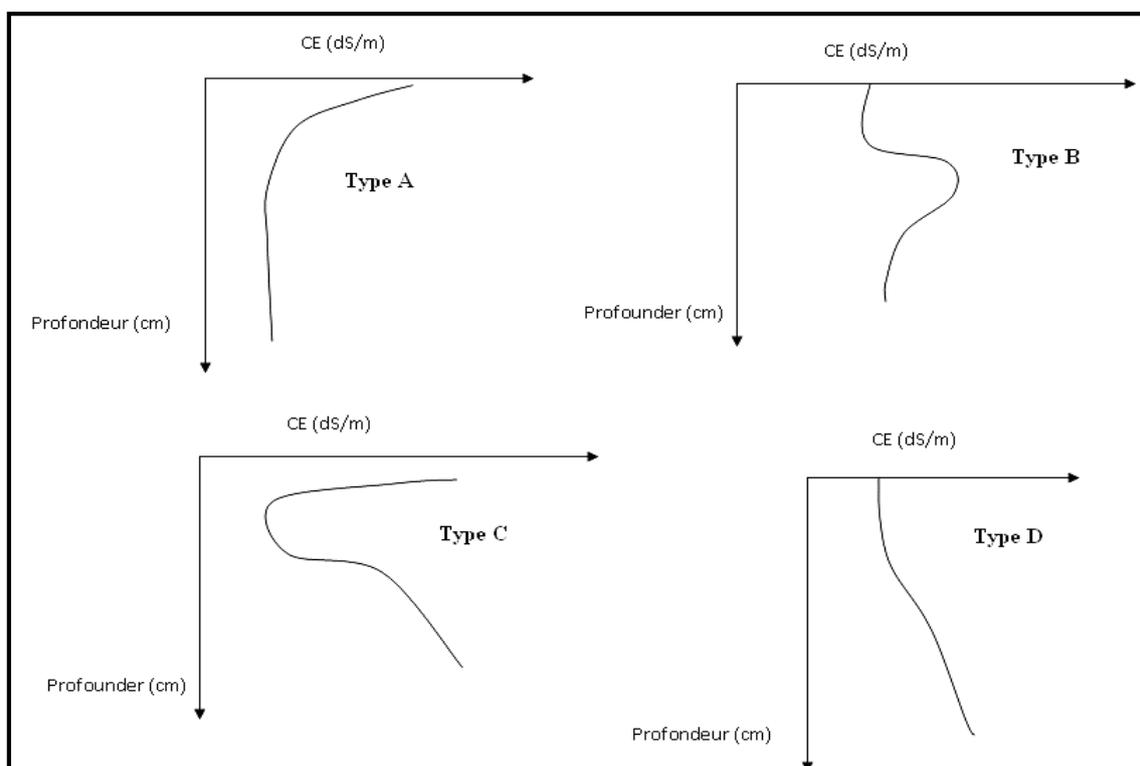


Figure 16. Les différents types de profils salins (Servant, 1976).

Les différents calculs et ajustement graphiques proposés à ce niveau sont réalisés à l'aide du tableur Excel 2010.

2.3. Le faciès chimique des solutions

Le recours à des diagrammes et graphiques divers est très utile en géochimie. Le but est de mieux visualiser les caractéristiques importantes d'un échantillon ou d'un groupe

d'échantillons. Plusieurs logiciels, dont celui de Simler (2012), permettent de représenter ces différents diagrammes. Ce dernier permet de réaliser ce qui suit :

- Les *Diagrammes de Piper, Stiff, Schoeller-Berkalov, Korjinski, Riverside et Wilcox, Stabler, ternaire.*
- Les statistiques (fréquences, matrice de corrélation), calcul de balance ionique et de conductivité.
- Simulation de neutralisation, datation ^{14}C , relation ^{18}O et deutérium.
- Transfert vers PHREEQ d'une partie ou de l'ensemble des données avec récupération des résultats.

Dans la présente étude, c'est le diagramme de Piper qui a été utilisé pour représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons de solutions de sol (figure 17). Cet outil est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, sur la base des proportions des cations et des anions présents dans la solution du sol.

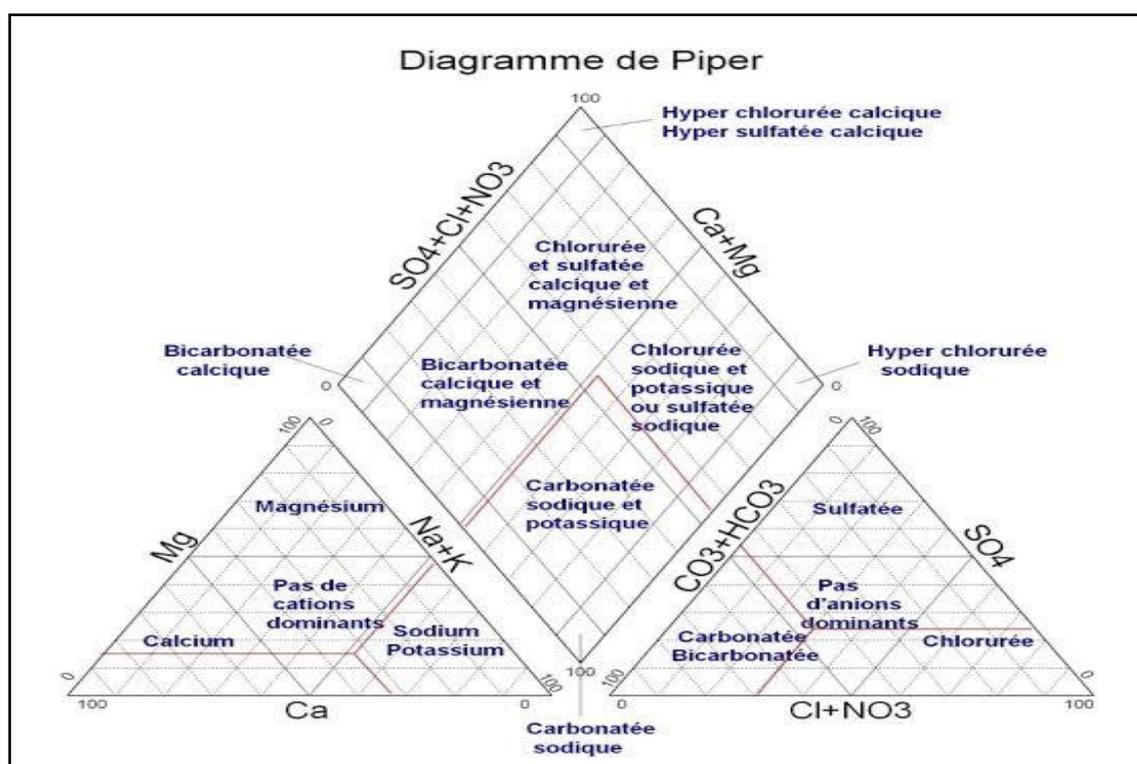


Figure 17. Représentation des sections du Diagramme de Piper
(Kouassi *et al.*, 2012 ; Halimi *et al.*, 2018).

2.4. Estimation de l'évolution des niveaux de salinité entre E1 et E2

Cette opération est scindée en deux étapes : un traitement initial pour comparer la dynamique

descriptive des mouvements imprimée par la salinité entre les mêmes profils salins, et un second traitement pour estimer et évaluer le sens du phénomène *inter* et *intra* profil.

Pour le second exercice, notre choix s'est porté sur l'application d'une méthode de calcul mathématique. Un calcul qui est basé sur la détermination de l'*écart entre la salinité moyenne et la vitesse de salinisation moyenne*. Le but recherché est la mise en évidence et l'expression d'un gradient d'évolution du phénomène étudié.

Il y a lieu d'indiquer que ce gradient peut exprimer deux formes d'évolution. Une première configuration qui traduit une éventuelle tendance régressive du milieu et une seconde forme qui s'apparente à une possible amélioration des conditions du milieu.

2.4.1 Comparaison des profils salins

Ce traitement est réalisé sur les profils de distribution des niveaux de sels identifiés lors de l'étape schématique de mise en place des profils salins selon le concept de Servant (1976). Il est utile de préciser que les profils choisis doivent présenter des données analytiques complètes sur toutes les strates sélectionnées.

2.4.2. Identification du gradient d'évolution de la salinité

2.4.2.1. Le gradient d'évolution de EC_e par profil

Il correspond à l'estimation de la vitesse de salinisation observée entre les profils de $E1$ et $E2$. Le calcul de ce processus est réalisé par une division de l'écart de la salinité moyenne des profils entre les périodes comparées par le temps (56 ans) (7). L'équation caractéristique s'écrit comme suit :

$$(7) \quad V_{Sm} = Ec_{Sm}/T$$

Où V_{Sm} est la vitesse de salinisation moyenne estimée en $dS/m/ann\acute{e}e$, Ec_{Sm} est l'écart de la salinité moyenne des profils obtenu par la différence entre les valeurs moyennes de la EC_{E2} et celles de la EC_{E1} ($Ec_{Sm} = EC_{E2} - EC_{E1}$) en dS/m , et T représente la durée de temps qui s'est écoulée entre les deux périodes en année. Il est utile d'observer que pour les valeurs moyennes de EC de chaque profil le calcul se fait à partir des valeurs de EC de chaque horizon pondérées par leur épaisseur (8). L'équation appliquée est notée comme suit :

$$(8) \quad EC_m = (\sum(EC_{hor} \times Ep_{hor})/Ep_{pro})$$

2.4.2.2. Le gradient d'évolution de EC_e par horizon

L'approche appliquée à ce niveau d'étude correspond à l'exercice réalisé lors de la détermination du gradient d'évolution de la salinité entre profils. Le schéma d'évaluation appliqué cible ainsi l'aspect horizon d'étude des deux périodes comparées.

Le calcul de la vitesse de salinisation est réalisé par une division de l'écart de la salinité pour chaque horizon par la durée du temps qui s'est écoulée (56 ans). L'équation utilisée (9) s'identifie par un simple ajustement de celle appliquée précédemment (7), donnant lieu à la formulation suivante :

$$(9) \quad V_{Sh} = EC_{Sh}/T$$

Où V_{Sh} est la vitesse de salinisation obtenue entre chaque horizon exprimée en dS/m/année, EC_{Sh} est l'écart de la salinité entre chaque horizon obtenu par la soustraction des valeurs de EC_{E2} et celles de EC_{E1} ($EC_{Sh} = EC_{E2} - EC_{E1}$) exprimée en dS/m, et T représente la durée de temps qui s'est écoulée entre les deux périodes en année.

Pour ce traitement, l'évaluation des données a été limitée à seulement 4 horizons. Il s'agit d'une structuration morphologique commune qui permettra de réaliser une comparaison du processus de salinisation sur un même nombre d'horizon pour tous les profils⁷.

3. Résultats et discussion

3.1. Analyse statistique

3.1.1. Approche globale

Les traitements et les calculs sont réalisés sur les données dans leurs globalités sans distinctions de profils et d'horizons.

3.1.1.1. Les taux de salinité (EC_e dS/m)

3.1.1.1.1. Statistiques descriptives

L'analyse des données a été menée sur un effectif de 40 horizons pour le quantitatif de l'étude $E1$ et un effectif de 53 horizons pour le quantitatif de l'étude $E2$.

Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau X. L'absence d'information (données manquantes) pour les échantillons d'étude de $E1$ n'a pas été mentionnée comme valeur nulle ($\neq 0$) et n'a pas été prise en compte dans les étapes de calculs.

⁷ La matrice standardisée fait apparaître que les profils $B163$ et $B217$ présentent 4 horizons, les profils $A495$ et $A567$ présentent 5 horizons et le profil $A503$ présente 6 horizons.

Tableau X. Statistiques descriptives pour les données globales de EC_e (dS/m).

<i>Péri.</i>	<i>Niv.</i>	<i>N Act.</i>	<i>Moy.</i>	<i>Méd.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Var.</i>	<i>Ec-ty.</i>	<i>Asy. (Skew.)</i>	<i>Apl. (kurt.)</i>	<i>C.V.(%)</i>
<i>E1</i>	Globale	40	16,6	12,2	5,0	43,4	121,9	11	1,2	0,5	67
<i>E2</i>		53	15,3	12,6	0,7	51,7	137,1	11,7	0,96	0,6	77

L'analyse de la synthèse des deux jeux de données traduit des profils moyens assez bien pourvus en sels. Les valeurs moyennes obtenues sont de l'ordre de 16,6 dS/m et de 15,3dS/m. respectivement pour les échantillons de *E1* et de *E2*.

Selon les normes d'interprétation de U.S.S.L.(1954), il s'agit de profils à horizons salés à très salés. Notons que cette description doit être utilisée avec précaution, puisque les valeurs des médianes obtenues indiquent que 50 % des horizons étudiés présentent, sur les (deux) périodes, des valeurs de EC_e inférieures à 12,6 dS/m.

Le traitement des données montre, également, que les valeurs de EC_e obtenues varient dans les limites des gammes 5 - 43,5 dS/m et 0,7 - 52 dS/m respectivement pour les échantillons de *E1* et de *E2*. En se référant aux critères de U.S.S.L. (1954), il est possible de conclure ce qui suit :

- Les valeurs minimales observées signifient la présence d'horizons non salés (<2dS/m) pour l'étude *E2*, et la prédominance d'horizons moyennement salés (4-8 dS/m) pour *E1*.
- Les valeurs maximales notées indiquent clairement la prédominance de la classe très salés à hyper-salés (>16 dS/m) pour les deux campagnes de mesures.

Dans les deux cas (*E1* et *E2*), l'écart de valeurs observé entre les extrêmes de chaque gamme de salinité reflète une très grande variabilité de ce paramètre, d'où l'hétérogénéité assez importante des données exploitées. Les fortes valeurs de la variance (Var. >121) et, surtout, celles du C.V. (>30%) le confirment (Gomes et Garcia, 2002)⁸.

D'un autre côté, l'expertise analytique de ces écarts permet d'observer une évolution du phénomène étudié sur fond d'élargissement des classes structurantes de *E1* vers *E2*. Pour être plus précis, il est noté que les profils des sols de la zone d'étude s'identifient morphologiquement, à différents endroits, aussi bien par des couches à accroissement assez contraignant des taux de salinité (>50dS/m) que par des couches où l'effet de désalinisation (<1ds/m) est très significatif .

Pour ce qui est des paramètres d'asymétrie (Skew.) et d'aplatissement (Kurt.), qui sont des paramètres de mesure de la forme de la répartition des masses de données, leur évaluation sur

⁸ L'évaluation du C.V. a été réalisée sur la base des classes établies par Gomes et Garcia (2002) : *Faible* <10%, *Modéré* 10-20%, *Elevé* 20-30%, *Très élevé* > 30%.

la base du principe de la fourchette « -1 à +1 » fixée par PazGonzales et al. (2000), Virgilio et al.(2007) et Kavianpoor et al.(2012) montre que seules les données de mesures de $E1$ ne répondent pas à une distribution de loi normale. Ce sont des données qui développent donc une *légère déviation positive (>+1)*. D'après Harvey et Morgan (2009), Croft et al.(2013) et Jafarian Jeloudar et al.(2014), il est plus que souhaitable de procéder à leur ajustement ou leur transformation en \log_{10} dans le cas où il est prévu leur exploitation dans une étude plus approfondie (*exp : approche géostatistique*).

3.1.1.1.2. Evaluation des fréquences de distributions des classes de taux de salinité (EC_e)

Le calcul des fréquences de distribution des taux de salinité (EC_e) a couvert les données de $E1$ et de $E2$. Les traitements ont été réalisés sur la base du découpage en classes ($C1$ à $C5$) établi par USSL (1954) : $C1$ - Non salés (<2 dS/m), $C2$ - Peu salés (2-4 dS/m), $C3$ - Moyennement salés (4-8 dS/m), $C4$ - Salés (8-16 dS/m), $C5$ - Très salés à hyper-salés (>16 dS/m). Le résultat est présenté dans le tableau XI et illustré par la figure 18.

Tableau XI. Les fréquences de distribution des classes des taux de salinité en %.

Péri.	Fréquences des classes de taux de salinité				
	$C1$	$C2$	$C3$	$C4$	$C5$
$E1$	0	0	25	35	40
$E2$	11	6	15	32	36

Ces traitements révèlent que :

- Pour les données de $E1$, il est noté une dominance des échantillons de $C5$ avec 40% de l'effectif, ils sont suivis par les échantillons de $C4$ avec 35% et enfin les échantillons de $C3$ avec 25% de la composante.

Il y a lieu d'indiquer que les échantillons de $C2$ et les échantillons de $C1$ n'ont pas été observés (0%).

- Pour les données de $E2$, il ressort une dominance des échantillons de $C5$ avec 36 % de l'effectif, ils sont suivis par les échantillons de $C4$ avec 32 % de la masse d'information. Les 32% de l'information traitée qui restent sont répartis entre les échantillons de $C3$ avec 15 % de l'effectif, les échantillons de $C1$ avec 11% et enfin les échantillons de $C2$ avec seulement 6 %.

Globalement, ces données montrent une nette prédominance de la classe $C5$ sur l'ensemble de la durée temporelle ($E1$ - $E2$). Les proportions obtenues sont respectivement de 75 et 68 %. Les données restantes indiquent :

- L'effet de la classe C3 avec 25% de l'effectif pour les données de l'étude de E1.
- L'élargissement des classes de représentativité des niveaux de salinité dans les sols pour les données de l'étude de E2. Il est noté qu'en plus de la classe C3 qui couvre 15% de l'effectif, il y a apparition de la classe C1 (11%) et de la classe C2 (6%).
- Les séries structurantes des niveaux de salinité identifiées sont :
 - C5 > C4 > C3 >>> C1 = C2 = 0 pour E1 et,
 - C5 > C4 > C3 > C1 > C2 pour E2.

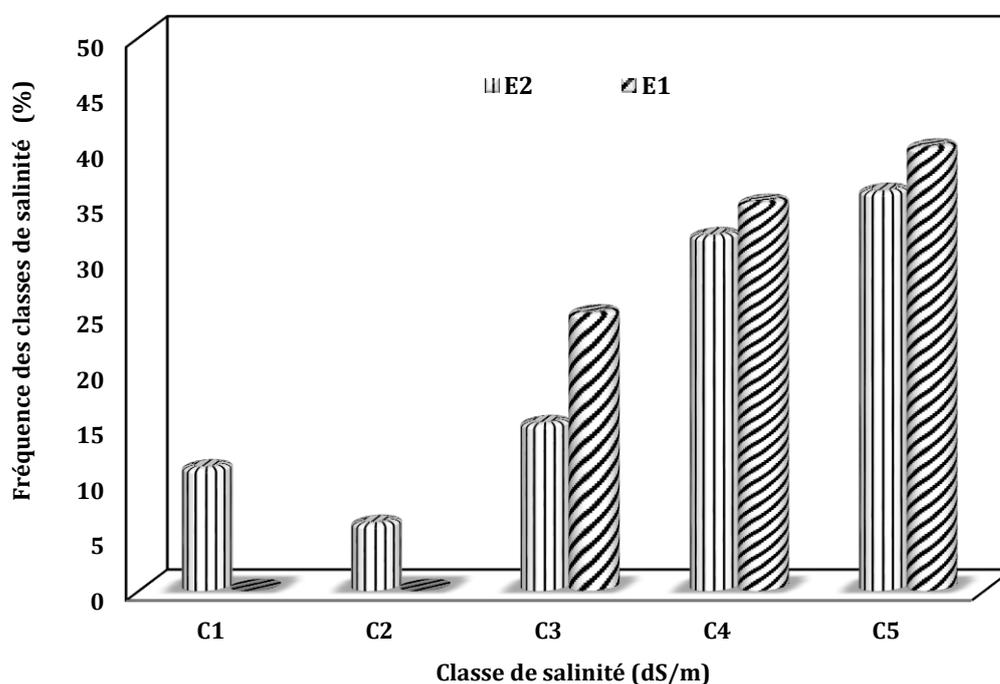


Figure 18. Fréquences des classes de salinité en %.

3.1.1.2. Caractérisation de certains paramètres de la solution du sol

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats statistiques de 11 éléments et paramètres chimiques de la solution du sol. Ces éléments qui sont soit mesurés, soit calculés mathématiquement, représentent un complément d'information sur le phénomène de salinisation pour les deux périodes d'étude (E1 et E2).

Ce traitement propose une représentation globale des gammes de variations des différentes variables considérées, grâce notamment aux paramètres de position (*Moy.* et *Med.*) et de dispersion (*Min.*, *Max.*, *Var.*, *Ec.-ty.* et le *C.V.*). La synthèse des principaux résultats est exprimée dans le tableau XII.

En première approche, et en tenant compte de l'ordre de grandeur des coefficients de variation (*C.V.*) pour les structures de données de E1 et de E2, il ressort que la majorité des paramètres,

sauf le pH_e ($< 4\%$) et un degré moindre le K^+ , présentent *sensiblement* des CV élevés ($> 30\%$). Ceci indique que les différentes variables considérées ont, dans l'ensemble, une dispersion assez marquée. En d'autres termes, elles sont caractérisées par une hétérogénéité assez importante.

Tableau XII. Statistiques descriptives de la solution du sol pour *E1* et *E2*.

Par.	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SAR	ESP _{eq}
Unités	/	méq l ⁻¹									%
E1											
<i>N.Act.</i>	40	40	40	40	24	40	40	40	Non observé	40	40
<i>Moy.</i>	7,7	34,3	23,2	104,2	1,4	95,6	52,3	9,6		28,9	26,3
<i>Méd.</i>	7,7	22,5	20,8	77,2	1,3	62,7	32,8	8,3		21,2	23,1
<i>Min.</i>	7,3	10	8,3	10,9	1,3	14,1	14,6	5,0		3,6	3,9
<i>Max.</i>	8,3	172,5	62,5	341,3	2,6	245,1	192,7	23,3		87,5	56,1
<i>Var.</i>	0,1	988,8	183,3	6259,7	0,2	4349,6	2122,8	16,8		460,5	187,5
<i>Ec.ty.</i>	0,3	31,4	13,5	79,1	0,4	66	46,1	4,1		21,5	13,7
<i>C.V.(%)</i>	3	92	58	76	30	69	88	43		74	52
E2											
<i>N.Act.</i>	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
<i>Moy.</i>	7,9	26,5	3	140,7	0,3	151,1	11,2	0,01	2,3	48	70,2
<i>Méd.</i>	7,9	25,8	2,6	139,4	0,3	120	10,8	0,01	2,0	49,9	73,1
<i>Min.</i>	7	0,8	1,7	0,8	0,2	5	1,9	0,0	0,5	0,98	0,2
<i>Max.</i>	8,4	59	6	588,5	0,3	490	23,1	0,04	5	154,6	100
<i>Var.</i>	0,1	207,8	1	12141,5	0,0	15167,7	31,8	0	1	971,3	2155,6
<i>Ec.Ty.</i>	0,3	15	1	110,2	0,03	123,2	5,6	0,01	1	31,2	46,4
<i>C.V.(%)</i>	4	54	34	78	10	82	51	93	43	65	66

Pour ce qui est de l'étude de la structuration analytique de chaque paramètre indépendamment, comme seconde approche évaluative, il se trouve que l'évaluation des masses d'informations obtenues (sur les deux campagnes) peut être abordée selon les grandes lignes du schéma méthodologique dissociatif appliqué en sciences du sol (Ouamer-ali, 2009):

- Les paramètres physico-chimiques qui sont représentés, d'une part par les variables à grande gamme de variation ou à grande étendue :

- les taux d'ESP_{eq} qui sont compris dans l'intervalle [3,9 - 56,1 %] pour la campagne d'étude *E1* et l'intervalle [0,2 - 100 %] pour la campagne *E2*. Ce sont deux gammes de taux qui semblent exprimer à la fois un *gradient d'accroissement* de sodicité "*intra et inter*" campagne d'étude, accompagné d'un élargissement des classes de structuration des niveaux de salinité. Dans les deux cas de figure, les amplitudes observées (*intra*) sont très importantes, elles dépassent largement les 45%. Sur la base de la gamme d'interprétation de la F.A.O (1984), il est question d'amplitude de variation d'échantillons allant de sodicité légère ($< 5\%$) vers des échantillons à sodicité très grave ($> 45\%$) et,

- les taux de SAR qui sont compris dans l'intervalle $[3,6 - 87,5 \text{ méq } l^{-1}]$ pour la campagne d'étude $E1$ et l'intervalle $[1 - 154,6 \text{ méq } l^{-1}]$ pour la campagne $E2$. Ces taux s'identifient, comme pour l' ESP_{eq} , par une large variation des valeurs. Cette dernière semble confirmer l'effet gradient d'accroissement du risque de sodisation du complexe adsorbant des sols " *intra et inter*" période d'étude, sur la base d'un élargissement des classes structurantes.

D'autre part par le pH_e qui est le paramètre le plus homogène dans l'espace et dans le temps, en référence aux intervalles assz réduits $[7,3 - 8,3]$ et $[7 - 8,4]$ respectivement pour $E1$ et $E2$.

L'observation de "l'effet valeurs" de la variance et de l'écart-type d'estimation semble confirmer cet état de fait. Le pH_e s'identifie, dans les deux cas de figure, par les valeurs ($< 0,5$) de l'écart type et de la variance qui restent les plus faibles, représentant ainsi des données très groupées autour de la moyenne et à un degré moindre de la médiane.

- Les éléments chimiques ou les ions en solution, avec une composante qui peut être divisée en trois paliers :

- le premier palier est composé par les cations et les anions à grandes gammes de variation ou à grandes étendues :
 - pour les cations, il s'agit du Ca^{++} et du Na^+ . Les limites extrêmes observées pour chaque élément sont respectivement de $[10 \text{ méq } l^{-1} - 172,5 \text{ méq } l^{-1}]$ et $[10,9 \text{ méq } l^{-1} - 341,3 \text{ méq } l^{-1}]$ pour $E1$ et de $[0,75 \text{ méq } l^{-1} - 59 \text{ méq } l^{-1}]$ et $[0,8 \text{ méq } l^{-1} - 588,5 \text{ méq } l^{-1}]$ pour $E2$.

Les amplitudes indiquées pour les gammes de Ca^{++} et Na^+ semblent reposer sur une très large variation des valeurs, en allant de $E1$ vers $E2$. Une variabilité qui est confirmée, pour chaque élément spécifié, d'une part par les valeurs de l'écart-type d'estimation, cernées respectivement dans les intervalles $[31,4 - 15]$ et $[79 - 110]$, d'autre part par les fortes valeurs de la variance, cernées respectivement dans les intervalles $[988,9 - 200,1]$ et $[6260 - 12140]$,

- pour les anions, il est question des chlorures (Cl^-) et des sulfates (SO_4^{--}). Les limites extrêmes observées pour chaque élément sont respectivement de $[14,1 \text{ méq } l^{-1} - 245,1 \text{ méq } l^{-1}]$ et $[14,6 \text{ méq } l^{-1} - 192,7 \text{ méq } l^{-1}]$ pour $E1$ et de $[5 \text{ méq } l^{-1} - 490 \text{ méq } l^{-1}]$ et $[1,9 \text{ méq } l^{-1} - 23,1 \text{ méq } l^{-1}]$ pour $E2$.

Il est clair que les amplitudes indiquées pour chaque gamme d'élément montrent une large variation de valeurs de $E1$ vers $E2$. Une variabilité qui est confirmée, pour chaque *élément spécifié*, par les valeurs de l'écart-type d'estimation qui sont cernées respectivement entre [65 - 123] et [46 - 5,6] et par les valeurs de la variance qui sont cernées respectivement dans les gammes [4350-15200] et [2123 - 32].

De plus, l'évaluation combinée de l'ensemble des gammes structurantes (du palier) laisse entrevoir la mise en place de deux schémas de distribution en opposition, en allant de $E1$ vers celles de $E2$:

- le premier schéma traduit un *gradient d'accroissement* majeur des teneurs de Na^+ et Cl^- "intra et inter" période d'étude,
- le second schéma identifie un *gradient de diminution* à double effet pour les éléments Ca^{++} et SO_4^{--} : Un *effet de resserrement* de chaque gamme des taux "intra" période d'étude, reposant sur un *effet de diminution* des teneurs en ces éléments pour l'aspect "inter" période d'étude.

Il y a lieu d'observer que ce double effet (amplitude et intensité) est plus important dans le cas des ions sulfates. En résumé, il est noté un passage d'une différence d'effet de 178,1 $még\ l^{-1}$ en $E1$ à une différence de 21,2 $még\ l^{-1}$ en $E2$.

- le second palier est représenté par les cations et anions à petite gamme de variation ou à faible étendue :
 - pour les cations, il est fait référence au magnésium (Mg^{++}). Les limites extrêmes observées sont comprises entre [8,3 $még\ l^{-1}$ - 65,5 $még\ l^{-1}$] pour les données de $E1$ et entre [1,7 $még\ l^{-1}$ - 6 $még\ l^{-1}$] pour ceux de $E2$,
 - pour les anions, il s'agit seulement des ions carbonates (CO_3^{--}). Les limites extrêmes observées sont comprises entre [5 $még\ l^{-1}$ - 23,3 $még\ l^{-1}$] pour les données de $E1$ et entre [0 $még\ l^{-1}$ - 0,04 $még\ l^{-1}$] pour ceux de $E2$.

Il y a lieu d'indiquer que les données sur les ions bicarbonates (HCO_3^-) ne peuvent pas faire l'objet d'approche comparative, du moment que l'information couvrant la campagne de $E1$ n'est pas disponible. Pour les données de structure de $E2$, les ions bicarbonates sont compris dans l'intervalle [0,5 $még\ l^{-1}$ - 5 $még\ l^{-1}$].

Dans l'ensemble, il est clair que les amplitudes des données de magnésium et des carbonates sont très serrées à gammes réduites. Néanmoins, la tendance "*évolutive*

régressive" des taux dans les gammes des deux structures de données (disponibles) nous orientent vers le schéma organisationnel suivant :

- ✓ pour le Mg^{++} , les valeurs structurantes des données de *E2* donnent lieu à des taux divisés par *des dénominateurs cernés entre [5 - 11]* par rapport aux valeurs de *E1*,
- ✓ pour les HCO_3^- , les valeurs structurantes des données de *E2* donnent lieu à des taux divisés par *des dénominateurs de l'ordre "de plus 500"* par rapport aux valeurs de *E1* et,
- ✓ pour les deux cas de figure, la structuration des données traduit clairement *une mise en place* à double effet, en allant de *E1* vers *E2*: Un *effet de resserrement* de la gamme des taux "*intra*" période d'étude, associé à un *effet de diminution des teneurs* des ions spécifiés "*inter*" période d'étude. Un ensemble structurant qui est plus important sur l'intervalle des ions carbonates.

Ce schéma d'orientation des tendances globales (*intra et inter*) est confirmé par l'évolution régressive assez frappante, pour chaque élément cité :

- des valeurs de l'écart-type d'estimation avec les intervalles [13,5 - 1] et [4,1- 0,01] respectivement pour les données de *E1* et *E2*,
 - des valeurs de la variance avec les intervalles [183,3 - 1] et [16,8 - 0] respectivement pour les données de *E1* et *E2*.
- et enfin, le dernier palier est représenté par K^+ qui s'identifie par une contribution très réduite dans les deux cas. Les intervalles identifiés sont de [1,3 *még l⁻¹* - 2,6 *még l⁻¹*] pour les échantillons de *E1* et l'intervalle de [0,2 *még l⁻¹* - 0,3 *még l⁻¹*] pour les échantillons de *E2*.

L'expertise de l'ensemble de ces évaluations de structures analytiques permet d'énoncer les hypothèses suivantes:

- Pour les niveaux d'informations un (01) et deux (02), sauf pour le *pH*, les disparités de disponibilités observées pour les différents paramètres peuvent être associées à ce qui suit :
 - la période de prélèvement des échantillons de sols qui est différente et l'impact des conditions spécifiques du milieu : *conditions climatiques, types de sols, oscillation de nappe différemment chargée et les conditions du drainage* (Massoumi, 1968 ; Daoud et al., 1993 ; Yang et al., 2011 ; Nijimbere, 2014 ; Zhang et al., 2014 ; Escudier et al., 2019),

- les types de réactions chimiques et les espèces chimiques produites (Dabin, 1968 ; Massoumi, 1968 ; Al-Droubi, 1976 ; Dosso, 1980 ; Bertrand et al., 1993 ; Daoud et al., 1993 ; Girard et al., 2011 ; Ait-Mechedal, 2014 ; Nijimbere, 2014) et,
- les processus d'altération ou de néoformation de minéraux avec comme résultats possible la rétrogradation ou la libération d'éléments (Paquet et al., 1966 ; Al-Droubi, 1968 ; Halitim, 1985 ; Daoud et al., 1993 ; Saïdi, 2005 ; Girard et al., 2011 ; Nijimbere, 2014).

- Pour le descriptif de l'élément K^+ , il est possible d'indiquer que sa disponibilité très réduite est généralement liée au fait qu'elle est contrôlée, soit par le phénomène d'échange cationique (*effet complexe adsorbant*) et l'*effet rétrogradation* par des minéraux argileux (Daoud, 1993 ; M'hiri, 2002 ; Saïdi, 2005 ; Ait-Mechedal, 2011 ; Boussoussa, 2012 ; Ait-Mechedal et al., 2017), ou bien par son absorption au maximum (*effet pompage*) par les plantes (Grattan et Grieve, 1999 ; Hamrouni et al., 2011 ; Hernandez et al., 2014).

Pour ce dernier point, il est question d'une stratégie d'adaptation aux conditions d'un milieu salin via son utilisation dans la régulation osmotique.

- Les séries ioniques structurantes globales sont :

- $Na^+ > Cl^- > SO_4^{--} > Ca^{++} > Mg^{++} > CO_3^{--} > K^+$ pour E1 et,
- $Na^+ > Cl^- > Ca^{++} > SO_4^{--} > Mg^{++} > K^+ > CO_3^{--}$ pour E2.

3.1.1.3. Interactions de EC_e avec les paramètres de la solution du sol

Il est question ici de rechercher les relations statistiques entre EC_e et les paramètres physico-chimiques du sol (ESP_{eq} , SAR , pH_e) et les cations et anions de la solution du sol (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- , CO_3^{--}).

Les traitements ont été réalisés sur la base d'une matrice de corrélation pour l'ensemble des données de E1 et de E2. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau XIII.

Tableau XIII. Matrice de corrélation pour les données de E1 et de E2.

Péri.	Var.	Prob.	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	CO ₃ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	SAR	ESPeq
E1	EC _e (dS/m)	r	-0,16	0,8	0,6	0,96	-0,16	0,95	0,85	-0,36	--	0,6	0,65
		p	0,5	<0,001	0,002	<0,001	0,461	<0,001	<0,001	0,062	--	0,003	<0,001
r		-0,35	0,84	0,8	0,97	0,218	0,91	0,5	-0,23	0,3	0,831	0,831	
p		0,085	<0,001	<0,001	<0,001	0,12	<0,001	<0,001	0,100	0,035	<0,001	<0,001	

* : relation significative "en gras" marquée à $p < 0,05$

Ce tableau montre que :

- Les valeurs du coefficient de corrélation (r) entre EC_e et les différentes variables étudiées sont comprises entre -0,36 et 0,97.
- Les relations entre EC_e d'une part et le pH , K^+ et CO_3^{--} d'autre part pour $E1$ et $E2$ ne sont pas statistiquement significatives ($p > 0,05$).
- Les autres relations entre EC_e et les autres paramètres étudiés sont statistiquement significatives ($p < 0,05$) et positives ($r > 0,3$).
- La classification de ces variables par ordre d'intensité de corrélation avec EC_e se présentent comme suit :
 - $Na^+ > Cl^- > SO_4^{--} > Ca^{++} > ESP_{eq} > Mg^{++} > SAR$ pour la séquence de $E1$ et,
 - $Na^+ > Cl^- > Ca^{++} > ESP_{eq} = SAR > Mg^{++} > SO_4^{--} > HCO_3^-$ pour la séquence de $E2$.

A partir de ces résultats, il s'avère que l'évolution de la majorité des variables de $E1$ et $E2$ est liée à celle de EC_e , à l'exception du pH_e , du potassium et des ions carbonates qui semblent présenter une évolution spécifique et indépendante de la salinité.

Un juste retour, combiné, sur les spécificités d'appartenance méthodologique de chaque variable (Aubert, 1976 ; Servant, 1976 ; Daoud, 1993 ; Saïdi, 2005 ; Ammari et al., 2013 ; Boualla, 2018) et sur les caractères d'organisation et de composition identifiés précédemment (effets paliers) nous permettra d'émettre des hypothèses allant dans le sens de la cinétique évolutive ou du comportement de chaque élément en milieu salé :

-Cas des paramètres physico-chimiques :

- la relation entre les taux de salinité et les taux ESP_{eq} - SAR a déjà fait l'objet de nombreuses études et d'observations, tant au niveau local (Boulaine, 1957 ; Daoud, 1993 ; Daoud et al., 1999 ; Djili, 2000 ; Touaf, 2002 ; Douaoui, 2005 ; Saïdi, 2005 ; Hamouni, 2006 ; Bradaï et al., 2008 ; Saïdi et al., 2004 ; 2008 ; Hadj Miloud, 2010 ; Saïdi, 2012 ; Ait-Mechedal, 2014 ; Boualla, 2018), qu'international (Bresler et al. ; 1982 ; Aubert, 1983 ; Lamond et Whitney, 1992 ; Summer, 1993 ; Marlet et Job, 2006 ; Akbarzadeh et Taghizadeh, 2010 ; Bockheim et Hartemink, 2013). Ces différents travaux ont montré que d'une façon générale, la salinité des sols s'accompagne toujours d'une sodisation du complexe adsorbant.

Par rapport à notre cas d'étude, les données d'observations et les résultats atteints sont en adéquation avec ce qui a été obtenu dans ces différents travaux. Ainsi, il est possible

de dire que la salinité observée s'accompagne d'une *augmentation simultanée* et *assez importante* de ces deux paramètres, et donc des niveaux de sodisation, dans l'espace et dans le temps,

- pour ce qui est des valeurs du pH_e pour $E1$ et $E2$, même si elles n'indiquent pas une interaction significative avec les phases de salinisation et/ou de désalinisation, elles laissent apparaître tout de même une évolution légèrement alcaline des conditions édaphiques du milieu d'accueil étudié (Bocoum, 2004) (Annexe I). Ce résultat permet d'avancer que, quelle que soit la teneur en sels, même à de très faibles taux, le pH_e se situe toujours entre 7 et 8,5, avec une gamme *préférentielle* allant de 7,3 à 8,3 sur une période de plus de cinquante ans.

Il y a lieu d'indiquer que cette gamme de pH_e , que nous pouvons considérer comme *préférentielle*, a été déjà reconnue par différents auteurs (Halitim et *al.*, 1984 ; Lamond et Whitney, 1992 ; Salim et Tessier, 1998 ; Busaidi et Cookson, 2003 ; Marlet et Job, 2006 ; Bradai et *al.*, 2008 ; Waskom et *al.*, 2012 ; Bockheim et Hartemink, 2013) comme acceptable vis-à-vis du risque d'alcalinisation ($pH < 8,5 \approx 9$) dans le cas des sols salés et des sols salés et sodiques.

-Cas des éléments en solution : Dans ce qui suit, nous présentons d'abord les cations (Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} et K^+) et ensuite les anions (Cl^- , SO_4^{--} , CO_3^{--} et HCO_3^-) :

- **les cations :**

- **le sodium :** dans la majorité des cas, il est admis que la mise en place du processus de salinisation est en relation étroite avec la présence de Na^+ sous forme très soluble ($NaCl$, Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , etc..) ou sous forme échangeable. Une situation qui nécessite (Servant, 1976 ; Duchaufour, 1995 ; Girard et *al.*, 2011):

- ✓ une condition de station avec existence d'une source locale de sodium (*nappe salée, dépôt sédimentaire salin...*) et,
- ✓ une condition climatique extrême permettant la conservation du Na^+ dans le profil.

Dans cette étude, les analyses révèlent que Na^+ est largement dominant par rapport aux autres cations dans les solutions des sols et qu'il présente une relation statistique *significative-positive* et *intense* ($r_{E1 \text{ et } E2} \geq 0,95$, $p < 0,001$) avec EC_e .

Ces résultats concordent avec les travaux de Boulaine (1957), Halitim (1985), Daoud (1993), Saïdi (2005), Ait-Mechedal (2014), Bradai (2017) et Hadj-Miloud (2019) qui

ont révélé que les sols salés de la région du Cheliff sont caractérisés par un enrichissement excessif de Na^+ sous forme soluble et échangeable.

Il est à noter que ces résultats concernent une région où le taux excessif de sodium en solution est régi, d'une part, par la dissolution de la Halite ($NaCl$) qui est la forme de sel la plus répandue (Durand, 1954 ; Boulaine, 1957 ; Halitim, 1985 ; Daoud, 1993 ; Djili, 2000; Touaf, 2002; Saïdi *et al.*, 2004; Saïdi, 2005) et, d'autre part, par la présence :

- ✓ soit d'une nappe peu profonde fortement chargée en ion sodium (généralement, il est fait référence à une nappe diversement concentrée) (Durand, 1956 ; Boulaine, 1957 ; Servant, 1976 ; Bouteyer et Loyer, 1992 ; Daoud, 1993),
- ✓ ou bien par le fait que le sodium, de par sa grande disponibilité ne rentre pas dans les phénomènes de précipitation de minéraux jusqu'à des valeurs de EC_e très élevées (Al-Droubi, 1976 ; Al-Droubi *et al.*, 1980; Bresler *et al.*, 1982 ; Daoud, 1993 ; Saïdi, 2005 ; Girard *et al.*, 2011).

À titre complémentaire, il y a lieu d'indiquer que l'apport de Na^+ suite à l'altération de certains minéraux primaires riches en sodium (les feldspaths, *exp* : cas de l'Albite) n'est pas à exclure comme rapporté par Saïdi (2005) et Girard *et al.* (2011).

- **Le calcium et le magnésium** : Les données du tableau XIII montrent que l'accroissement de EC_e des sols s'accompagne, dans l'ensemble, d'une hausse de la concentration de Ca^{++} et Mg^{++} en *E1* et *E2*.

Comme première approche d'évaluation, il est possible de confirmer que ces résultats sont en accord avec ceux de certaines études antérieures (Durand, 1956 ; Boulaine, 1957 ; Aubert, 1976 ; Hydrotechnique corp., 1976 ; Halitim *et al.*, 1984 ; Daoud, 1993 ; Daoud *et al.*, 1993 ; Hadj-miloud, 2010 ; Bradai, 2017 ; Boualla, 2018). Ces thématiques de recherche ont montré que les sols salés de la région du Cheliff sont carbonatés riches en ces éléments, soit sous la forme la plus simple d'ions libres (Ca^{++} et Mg^{++}), ou bien sous la forme de combinaison de sels de chlorures de calcium et de chlorures de magnésium.

Comme seconde approche d'expertise, et sur la base de la prise en compte des données descriptives individuelles qui décrivent leur fonctionnement et les variations

de leur taux dans les profils chimiques des solutions, il est possible d'indiquer que l'évolution de ces deux éléments sur l'ensemble de l'épisode n'est pas en adéquation effective avec *l'effet d'accroissement* (observation statistique) cité plus haut. En effet, le schéma d'évolution qui se dessine indique que :

- ✓ l'ion Ca^{++} varie d'une proportion de constitution de 23% de la somme des cations en *E1* vers une proportion (moindre) de 20% de la somme des cations en *E2* et,
- ✓ l'ion Mg^{++} varie d'une proportion de constitution de 16% de la somme des cations en *E1* vers une proportion (moindre) de 4% en *E2*,

En se référant aux travaux de Dabin (1968), Massoumi (1968), Ek (1973), Al-Droubi (1976), Al-Droubi et al. (1980), Bresler et al. (1982), Le Brusq et Loyer (1982), Loyer (1991), Bertrand et al. (1993), Daoud (1993), Montoroi (1993), Hammi et al. (2001), Marlet et Job (2006) et Nijimbere (2014), ce résultat peut être expliqué par l'existence d'une dynamique saline évolutive propre à chaque élément dans la solution du sol. Cette dynamique est conditionnée ou contrôlée par les étapes du cheminement chimique réactionnel et l'effet de combinaisons d'espèces "hypothétiques", généralement solubles qu'il est possible d'observer (Dabin, 1968 ; Massoumi, 1968 ; Dosso, 1980 ; Ek, 1973 ; Servant, 1976 ; Daoud, 1993 ; Laribi et Alzubaidi, 2007 ; Ait-Mechedal, 2014 ; Nijimbere, 2014 ; Grûnberger, 2015 ; Ait-Mechedal, 2021):

- ✓ $CaCO_3, CaSO_4, CaMg(CO_3)_2, Ca(HCO_3)_2, CaH_2(CO_3)_2$ et $CaCl_2$,
- ✓ $MgCO_3, MgSO_4, Mg(HCO_3)_2, MgH_2(CO_3), Mg(OH)_2, MgCO_3 \cdot 3H_2O$ et $MgCl_2$

Une analyse plus fine de cette voie de mise en place a permis à Dabin (1968), Massoumi (1968), Al-Droubi (1976), Servant (1976), Dosso (1980) et Lallemand-Barrès (1980) à identifier la composante qui conditionne le caractère de l'évolution de ces deux éléments en solution. Il est question :

- ✓ de la nature du système chimique,
- ✓ des valeurs des rapports qu'il y a entre les ions dans la solution de départ,
- ✓ de la limite de solubilité de certaines compositions et,
- ✓ des conditions de milieu : *le type d'argile, la température, l'évaporation, l'activité de l'eau et la pression partielle du gaz carbonique.*

- **Le potassium** : les données d'analyses sur le comportement du potassium en solution ne révèlent pas de relation ou d'interaction précise entre sa concentration et les niveaux de salinité identifiés dans les différents échantillons.

Ce résultat rejoint celui de Feigenbaum (1987), Jalali (2008), Ait-Mechedal et *al.* (2017) qui expliquent que l'évolution des teneurs de K^+ dans les sols salés est en réalité influencée "plus" par le cation de la forme saline dominante, dans notre cas le Na^+ (*effet sodicité*), que par l'expression de l'intensité du phénomène (EC_e). Néanmoins, les faibles taux identifiés et la légère tendance régressive observée entre les deux périodes suggèrent que la disponibilité de cet élément pourrait être contrôlée par :

- ✓ le phénomène d'échange cationique et l'*effet sélectif* du complexe adsorbant (Al-Droubi, 1976 ; Girard et *al.*, 2011 ; Ait-Mechedal et *al.*, 2017 ; Boualla, 2018),
- ✓ le processus de rétrogradation par des minéraux argileux (Al-Droubi, 1976 ; Daoud, 1993 ; Saïdi, 2005 ; Djemai et *al.*, 2006 ; Ait Boussoussa, 2012 ; Ait-Mechedal et *al.*, 2017 ; Boualla, 2018) et,
- ✓ l'absorption (*effet pompage*) par les cultures (Al-Droubi, 1976 ; Grattan et Grieve, 1999 ; Hamrouni et *al.*, 2011 ; Hernandez et *al.*, 2014 ; Boualla, 2018).

• **les anions :**

- **le chlore** : c'est l'élément le plus dominant par rapport aux autres anions dans les profils chimiques des solutions de sols. Son comportement dans le milieu vis-à-vis des niveaux de salinité est semblable à celui de l'ion sodium. L'évaluation réalisée montre que l'évolution de sa concentration est *intensément liée* ($r_{E1 \text{ et } E2} > 0,90$ pour $P < 0,001$) sur les deux périodes, aux différents niveaux de salinité.

Cet état de fait peut être jugé cohérent du moment que la présence et l'abondance du chlore dans les échantillons de solution de sols sont considérées comme des caractéristiques des sols salés des plaines du Cheliff (Durand, 1956 ; Boulaïne, 1957 ; Aubert, 1976; Hydrotechnique corp., 1976; Halitim, 1985; Daoud, 1993; Saïdi, 2005; Ait-Mechedal, 2014; Bradai, 2017; Hadj-Miloud, 2019). Les résultats obtenus font apparaître que l'augmentation de EC_e s'accompagne par l'augmentation de la concentration de Cl^- .

D'un point de vue descriptif, Boulaine (1957), Servant (1976), Halitim (1985), Daoud (1993), Saïdi (2005) et Ait-Mechedal (2021) estiment que cette tendance relationnelle peut être attribuée, sur fond d'association réactionnel au sodium, au déroulement et à l'évolution de la cinétique de « dissolution » de la Halite ($NaCl$). Al-Droubi (1976), Lovett et al. (2005) et Osswald (2016) confirment l'importance de cet aspect réactionnel, tout en insistant sur les spécificités chimiques de cette forme inorganique de Cl^- , dans l'enrichissement des sols des sites ou endroits très localisés. Spécifiquement, il est fait références aux *bassins sédimentaires où il y a des roches de type évaporites*.

Toutefois, Stumm et Morgan (1981) considèrent que l'accumulation excessive de cet élément est dû au simple fait qu'il s'agit d'un élément chimique qui ne rentre pas dans des associations ou dans les précipitations de minéraux à des salinités inférieures ou égales à celle de l'eau de mer.

➤ **les sulfates** : les résultats (tableau XIII) montrent que l'accroissement de EC_e des sols s'accompagne de celui de SO_4^{2-} ,

L'association des ions SO_4^{2-} avec les taux de salinité des sols des plaines du Cheliff a déjà fait l'objet de nombreuses observations (Durand, 1956 ; Boulaine, 1957 ; Aubert, 1976 ; 1983 ; Daoud, 1993 ; Daoud et al., 1993 ; Saïdi, 2005 ; Douaoui et al., 2006 ; Bradai, 2017 ; Boualla, 2018). Des observations qui confortent en grande partie nos résultats.

Pourtant, la mise en avant de l'évolution des valeurs du coefficient de corrélation, et aussi des taux de disponibilité en solution (*effets paliers*), par rapport à l'ensemble de l'épisode temporel (56 ans) permet de déduire l'existence d'une relation particulière. Le coefficient de corrélation semble mentionner une variation régressive allant de 0,85 en $E1$ vers 0,5 en $E2$.

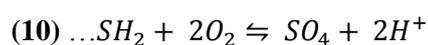
Ceci démontre que la salinité des sols semble s'accommoder, en réalité, d'une diminution de l'intensité relationnelle avec les ions sulfatés dans l'espace et dans le temps.

Au regard des conclusions suggérées par les différents travaux réalisés, d'une part à l'échelle régionale (selon les références ci-dessus), et d'autre part à l'échelle

internationale (Dabin, 1968 ; Massoumi, 1968 ; Al-Droubi, 1976 ; Servant, 1976 ; Dosso, 1980 ; Bresler et *al.*, 1982 ; Loyer, 1991 ; Bouteyer et Loyer, 1992 ; Bertrand et *al.*, 1993 ; Montoroi, 1993 ; Hammi et *al.*, 2001 ; Nijimbere, 2014 ; Saaoud, 2014 ; Ait-Mechadal, 2021), il ressort que l'évolution à long terme des SO_4^{2-} pourrait être contrôlée par des phénomènes de précipitation des minéraux sulfatés. Un mécanisme qui serait suffisant pour limiter dans le temps la disponibilité et l'augmentation de *cet élément* avec les niveaux de salinité.

En fonction des conditions du milieu (saturation) et des constituants de la solution du sol, il est possible de supposer et d'envisager la précipitation de minéraux, tels que : l'anhydrite et le gypse ($CaSO_4$), le sulfate de magnésium ($MgSO_4$), la thénardite (Na_2SO_4), la mirabilite ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$), la glaubérite ($Na_2Ca(SO_4)_2$) et la bloedite ($Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$). Cependant, ces hypothèses ne peuvent être vérifiées que par une approche minéralogique.

D'un autre point de vue, il est admis que les conditions extrêmes du milieu peuvent jouer un rôle dans l'aspect diminution de la disponibilité des sulfates par une évolution chimique (10). D'après Massoumi (1968), Al-Droubi (1976), Loyer et *al.* (1989), Loyer (1991), Bertrand et *al.* (1993), Nijimbere (2014) et Bourrié (2018), il est question de la mise en place d'un milieu réducteur avec production de soufre, sous l'impulsion de conditions *d'hydromorphie - d'anaérobie*.



- **Les carbonates et les bicarbonates:** ils sont présentés, généralement, comme deux éléments indissociables en solution du sol (Eaton, 1950 ; Ek, 1973 ; Kuper, 1997), relevant de la voie d'évolution du système d'équilibre $pH - CO_2 - H_2O$ (Garrels et Christ, 1967 ; Daoud, 1993 ; Al-Busaidi et Cookson, 2003).

Selon les travaux de Martin (1993) et Marlet et *al.* (2006) sur les sols méditerranéens, il ressort que les carbonates sont produits à de trop faibles quantités pour être décelés. Ces observations sont analogues à celles de Boulaine (1957), Aubert (1976 ; 1983), Daoud (1993), Achour et *al.* (1997), Hadj-miloud (2010), Laoufi (2010), Ait-Mechedal (2014), Bradai (2017) et Boualla (2018) dans les sols des régions de l'Ouest Algérie. Des observations qui ont montré que le fonctionnement et l'évolution de ces

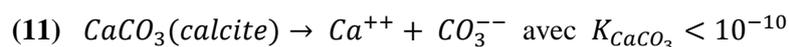
derniers reposent (plus) sur des systèmes d'équilibre chimiques carbonatés favorisant principalement la production de HCO_3^- "dans le milieu" au lieu de CO_3^{--} .

Dans notre étude, les résultats obtenus ne semblent pas corroborer, ne serait-ce que pour le cas de CO_3^{--} , les résultats énoncés dans la bibliographie (références ci-dessus) :

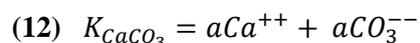
- ✓ **pour les carbonates**, même si leur interaction avec EC_e ne révèle pas de corrélation significative ($p > 0,05$) (tableau XIII), il semble possible d'observer ce qui suit :
 - la tendance régressive notée entre les coefficients de corrélation ($r = -0,36$, $p = 0,062$) pour $E1$ vers ($r = -0,23$, $p = 0,100$) pour $E2$ et,
 - l'allure des données des taux d'accumulation (tableau X) laisse entrevoir une diminution conséquente des extrêmes avec le temps ($E1$ vers $E2$) ; en allant de l'intervalle $[5,00- 24 \text{ méq } l^{-1}]$ vers l'intervalle $[0,00-0,04 \text{ méq } l^{-1}]$, des taux de carbonates.
- ✓ **pour les bicarbonates** : les données d'analyses indiquent que ces anions libres n'ont pas été décelés (ou données non disponibles) en $E1$ contrairement à $E2$. Pour cette dernière, l'interaction des bicarbonates avec EC_e est significative ($p < 0,05$ avec $r = 0,3$).

Pour expliquer la mise en place propre à chaque paramètre, nous pouvons émettre les suppositions réactionnelles suivantes :

- ✓ **cas de l'observation des anions carbonatés en $E1$** : leur libération dans le milieu peut être associé à ce qui suit (Ek, 1973 ; Bresler et al., 1982 ; Achour et al., 1997 ; Busaidi et Cookson, 2003 ; Legros, 2007 ; 2009 ; Nijimbère, 2014) :
 - la dissolution de calcite cristalline **(11)** présente dans le système carbonaté :

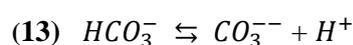


Où K qui est la constante d'équilibre de l'équation, représente le produit des activités des ions Ca^{++} et CO_3^{--} **(12)**,



Ce processus se met en place dès que le milieu carbonaté subit des apports fort excessifs en Ca^{++} soluble de sources autres que du $CaCO_3$ disponible et du complexe d'échange du sol. Comme source d'apport, il est généralement fait référence aux apports excessifs de gypse dissous (effet paires d'ions). Un minéral qui est préconisé comme amendement lors de l'aménagement de sols salés,

- ou bien à la dissolution des calcaires présents dans les roches carbonatés qui ont été en contact avec une eau chargée en CO_2 (milieu ouvert); *cas des mouvements de nappes lors des phases de désengorgement par drainage (début de réhabilitation du périmètre).*
- ✓ **cas de l'absence des carbonates en E2** : il est possible de l'associer, soit à la dynamique d'élimination par association avec le calcium soluble en solution (Dabin, 1968 ; Droubi et al., 1980 ; Dosso, 1980 ; Busaidi et Cookson, 2003), communément appelée " *précipitation des minéraux calciques* " (Daoud, 1993 ; Martin, 1993 ; Marlet et al., 2006), soit à la libération des anions bicarbonatés (processus abordé ci-dessous) et enfin,
- ✓ **cas de l'apparition des anions bicarbonates en E2**: le processus de leur libération dans le milieu peut être assimilé :
 - au déroulement d'une simple réaction chimique sur fond de changement de concentration de l'ion H^+ . La réaction d'équilibre est celle identifiée par Ek (1973), Garrels et Christ (1967) et Legros (2007 ; 2009) **(13)**:



3.1.1.4. Les fréquences de distribution des ESP_{eq} (approche globale)

Le calcul des fréquences de distribution des ESP_{eq} a été opéré sur la base du principe du découpage en classes proposé par FAO (1984) : **C1-** *sodicité légère (< 5%)*, **C2-** *sodicité modérée (5-20%)*, **C3-** *sodicité grave (20 – 45%)*, **C4-** *sodicité très grave (> 45 %)*. Le résultat du traitement est formulé dans le tableau XIV.

Cette évaluation laisse apparaitre que :

- Les données de *EI* sont caractérisées par : un (01) échantillon de la classe *C1*, dix huit (18) échantillons de la classe *C2*, seize (16) échantillons de la classe *C3* et, enfin, cinq (05)

échantillons de la classe *C4*.

- Les données de *E2* s'identifient par : trois (03) échantillons de la classe *C1*, trois (03) échantillons de la classe *C2*, treize (13) échantillons de la classe *C3* et, enfin, trente quatre (34) échantillons de la classe *C4*.

Tableau XIV. Les fréquences de distribution des ESP_{eq} .

Péri.	<i>E1</i>				<i>E2</i>			
Classe de sodicité (%)	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>
Hrz.	1	18	16	5	3	3	13	34
Tot. Hrz.	40				53			
Fréquences (%)	2,5	45	40	12,5	5,66	5,66	24,53	64,15

Pour une meilleure appréciation de l'évolution ESP_{eq} et une meilleure visualisation de l'effet *sodicité* pour chaque structure de données (*E1* et *E2*), nous avons illustré les résultats sous forme d'un histogramme de fréquences (figure 19).

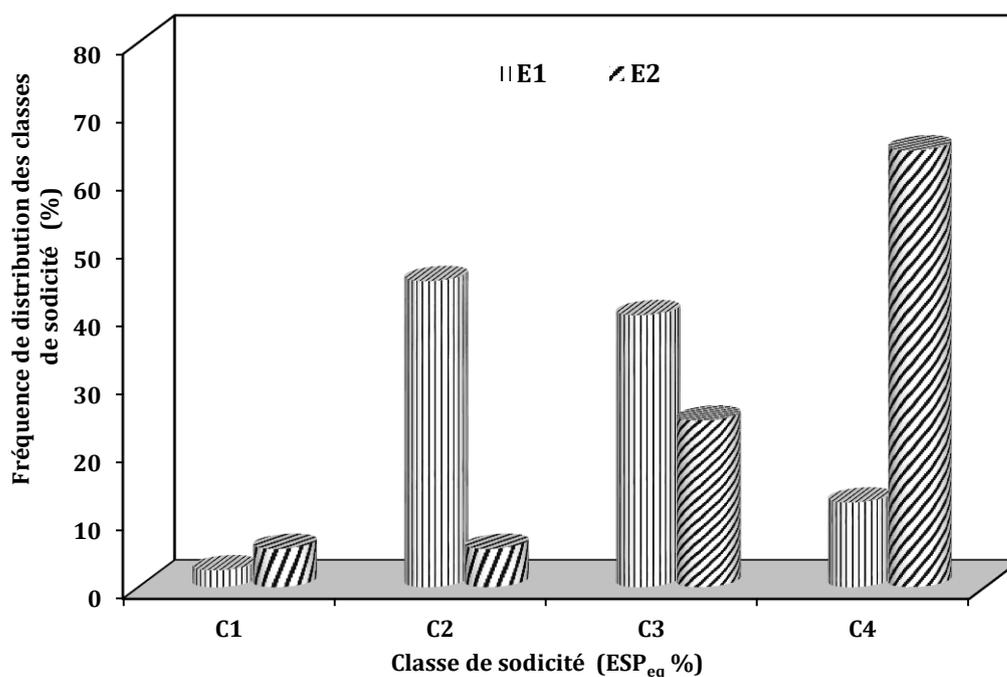


Figure 19. Fréquences des classes de sodicité en %.

La figure 19 révèle ce qui suit :

- Une prédominance de *C2* et *C3*, respectivement avec 45% et 40% des échantillons, sur les autres classes, pour *E1*, et de *C4* avec 64,15% des échantillons, sur les autres classes, pour *E2*.
- Les fréquences des autres classes chutent brutalement pour chaque campagne d'étude, produisant ainsi des valeurs d'effectifs comprises entre :
 - 2,5 et 12,5%, en allant de *C1* vers *C4* pour *E1* et,

- 5,66 et 24,53 %, en allant (du même niveau) de la classe *C1* et de *C2* vers la classe *C3* pour *E2*.
- L'allure des barres de fréquences de distribution des *ESPeq* exprime sensiblement une tendance d'inversion des conditions d'accumulation ou de concentration de l'élément " dans le sol ", en allant de la masse d'information de *E1* vers celle de *E2*.

En synthétisant, il ressort que les niveaux de sodicité de *tendance grave à très grave* sont passés d'un effectif avoisinant 53% pour *E1* vers un effectif avoisinant 89% des échantillons pour *E2*, au moment où les niveaux de sodicité du complexe adsorbant de *tendance légère à modérée* ont régressé d'un effectif avoisinant 48 % en *E1* vers un effectif avoisinant 11% en *E2*.

Ainsi, il semble possible de conclure que la composition de chaque structure de données s'appuie sur un schéma de classification bien spécifique :

- $C2 > C3 > C4 > C1$ pour *E1* et,
- $C4 > C3 > C2 = C1$ pour *E2*.

3.1.2. Approche par horizon

Les calculs sont effectués par horizons caractéristiques ou strates (sans distinction d'épaisseur), sur la base de l'ordonnancement des données identifié dans le tableau V. Comme pour l'approche globale, l'absence d'information pour certaines données de *E1* n'a pas été mentionnée comme valeur nulle ($\neq 0$).

3.1.2.1. Caractérisation des taux de EC_e

3.1.2.1.1. Statistiques descriptives

Les résultats des statistiques descriptives effectuées par horizons caractéristiques et par période sont énoncés dans le tableau XV.

Pour une simplification des résultats et un meilleur rapprochement visuel par rapport aux situations morphologiques salines reconnues dans les systèmes de désignation des sols (Richard, 1954 ; Servant, 1976 ; Djili, 2000 ; RPF, 2008 ; Ouamer-ali, 2009 ; Bockheim et Hartemink, 2013), il a été adopté dans les différentes sections suivantes la formulation descriptive d'association de couvertures. L'information obtenue laisse apparaître ce qui suit :

- Pour *E1*, il a été traité :
 - 16 horizons *de surface (h1)* et *de sub-surface (h2)*,

- 16 horizons *de moyen profil* (h3-h4) et,
 - 8 horizons *de bas-profil* (h5-h6),
- Pour *E2*, il a été traité :
- 22 horizons *de surface* (h1) et *de sub-surface* (h2),
 - 22 horizons *de moyen profil* (h3-h4) et,
 - 9 horizons *de bas-profil* (h5-h6).

Tableau XV. Statistiques descriptives de EC_e par horizons.

Par.	Péri.	<i>E1</i> par horizon						<i>E2</i> par horizon					
		h1	h2	h3	h4	h5	h6	h1	h2	h3	h4	h5	h6
N actif		7	9	8	8	6	2	11	11	11	11	7	2
Moy.		12	13,5	24,5	19,2	13	14,5	3	9	17,9	22,4	27	18,9
Méd.		11,3	10,2	24,1	17,7	10	14,5	1,7	7,5	19	25,3	24,4	18,9
Min.		6,1	5,42	6,9	6,8	5	7,5	0,7	2,6	6,9	8,5	8,9	14,9
Max.		18	30,8	43	43,4	31,2	21,6	8,7	16,8	31,5	41,2	51,7	23
Var.		21,1	64,7	231,2	151,7	91,8	99,2	7,1	22,2	61,9	129,5	214,2	33
Ec.-ty.		4,6	8	15	12,3	9,6	9,9	2,7	4,7	7,9	11,4	14,6	5,7
Asy.(Skew.)		0,3	1,4	0,1	1,1	1,7	-	1	0,2	0,2	0,2	0,5	-
Apl.(kurt.)		-1,1	1,8	-2,2	1	3	-	-0,26	1,2	-0,88	-1,4	0,01	-
C.V '(%)		38	59	61	64	73	68	77	52	44	51	54	30

A la lecture de ce tableau, il est possible de dire que les données obtenues pour *E1* et *E2* sont assez cohérentes et confortent les observations de l'approche globale. En d'autres termes, la mise en place et la quantification de la salinité par horizon caractéristique reposent (ainsi) sur des niveaux de variations importants dans le profil et dans le temps.

Ensuite, du point de vue de l'interprétation, le détail descriptif des faits se révèle riche d'enseignements sur le phénomène étudié et nous permet d'aller plus loin dans sa représentation dans le profil:

- Pour les niveaux de variation, l'utilisation des *C.V.* calculés permet l'expression de la totalité des changements observés dans le déroulement du processus de salinisation (Chang et *al.*, 1988 ; Yang et *al.*, 2011 ; Jafarian Jeloudar et *al.*, 2014). L'échelle d'appréciation de ces valeurs nous oriente sur les deux voies suivantes :

- sur l'ensemble des données, les *C.V.* varient dans l'intervalle [38-73 %] pour *E1* et dans l'intervalle [30-77%] pour *E2*. Conformément aux normes établies par Gomes et Garcia (2002), les valeurs de *C.V.* sont considérées comme très élevées (>30%). Ceci signifie que nos mesures (*pour les deux cas de figures*) ont une dispersion assez marquée. En

d'autres termes, elles sont caractérisées par une hétérogénéité assez importante,

- par horizon caractéristique, ces intervalles de taux de salinité traduisent un gradient d'opposition de variabilités ou d'hétérogénéités entre $E1$ et $E2$ selon la profondeur du sol. Le schéma qui se dessine est :

- une augmentation de la variation de EC_e , en allant des couches *de surface (h1) et de sub-surface (h2) vers les niveaux de bas-profil (h5-h6) pour E1 et,*
- un effet de légère diminution de la variation de EC_e , en allant des couches *h1 et h2 vers les niveaux de bas-profil (h5-h6) pour E2.*

- Pour les indicateurs de tendance centrale selon chaque période, qui sont la médiane et la moyenne, ils présentent des valeurs qui se rapprochent, voire dans certains cas égales (figure 20). D'après Obi et Udoh (2011) ceci indique que les valeurs aberrantes ne dominent pas ces indicateurs de positions, ainsi que les données d'étude.

Toutefois, il est utile de noter que la tendance des valeurs médianes, qui restent légèrement inférieures aux moyennes, nous orientent vers une asymétrie positive (*dissymétrie à gauche*) de la forme de répartition (Annexe II) des données de EC_e .

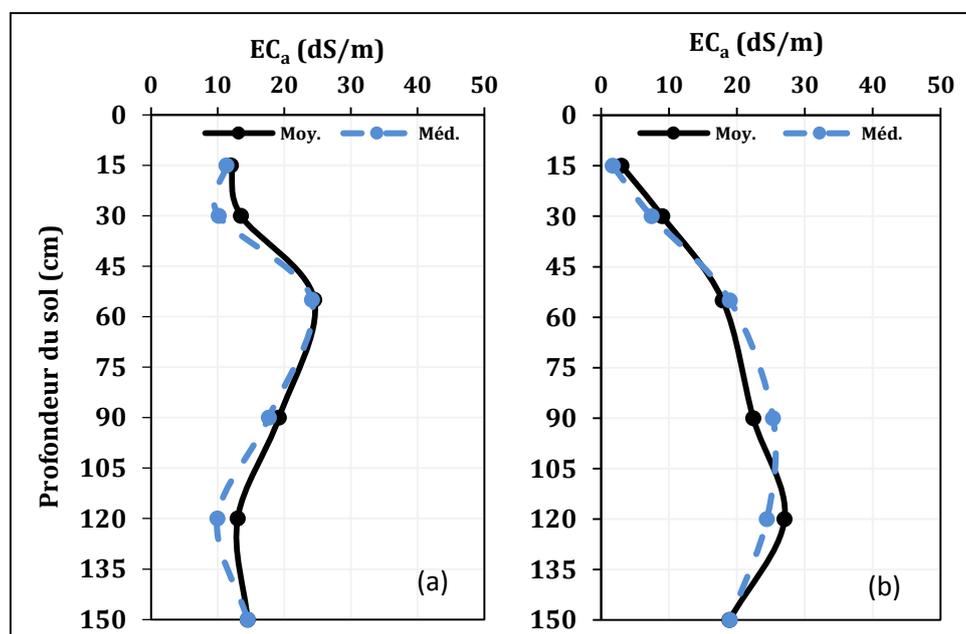


Figure 20. Représentation des indicateurs de tendance centrale par période d'étude.
a) $E1$, b) $E2$

Allant dans le même ordre d'idée, l'assimilation des paramètres d'asymétrie et d'aplatissement dans l'expertise confirme l'existence d'une légère déviation par rapport à une distribution de

loi normale dans certains horizons d'étude. Il est question des horizons h_2 , des horizons h_3 et h_4 , et des horizons h_5 et h_6 pour les données de $E1$.

En se référant au principe de la fourchette « -1 à +1 » proposée par PazGonzales et *al.*(2000), Virgilio et *al.* (2007), Kavianpoor et *al.*(2012), il ressort que ces horizons présentent une *déviati on positive (>+1)*. D'après Emadi et *al.* (2008) il convient donc de prendre des précautions particulières dans le cas d'une utilisation plus approfondie de ces données (Chap.III, § 2.2.). Pour Harvey et Morgan (2009), Croft et *al.* (2013) et Jafarian Jeloudar et *al.* (2014), cela correspond à un ajustement Log_{10} pour stabiliser leur variance.

Enfin, et sur la base des autres paramètres descriptifs, il est possible d'indiquer que les données affichées permettent :

- De confirmer l'hétérogénéité observée sur l'ensemble des taux de salinité pour les deux périodes, grâce :

- à la gamme des écarts des valeurs extrêmes (*Min.-Max.*) ou «*l'effet amplitude*». Il s'agit d'écarts de valeurs cernés entre 11,5 dS/m et 36,6 dS/m pour $E1$ et entre 7,5 dS/m et \approx 43dS/m pour $E2$ et,
- aux différents niveaux de valeurs affichés par la variance et l'écart-type de chaque période :
 - la variance est identifiée par des valeurs importantes, *allant de 21* jusqu'à 230 pour $E1$ et de 7 jusqu'à environ 215 pour $E2$ et,
 - l'écart-type est représenté par des valeurs allant de 4,6 jusqu'à environ 12,5 pour $E1$ et de 2,7 jusqu'à environ 15 pour $E2$.

- De noter que les gammes d'écarts de EC_e ou «*l'effet amplitude* » permet de schématiser un "*accroissement excessif*" de la salinité selon une différence de localisation dans le profil et avec le temps (figure 21) :

- pour $E1$, il est observé dans la partie moyenne du *profil* (36,1 et 36,6 dS/m) et,
- pour $E2$, il est observé à la base du *profil* (32,7 et \approx 43 dS/m).

Globalement, les valeurs de EC_e identifiées pour les deux cas de figure schématisent une variation des taux de salinité, allant d'horizons *salés* vers des horizons *très salés* (U.S.S.L., 1954), sur la base d'un gradient d'accroissement excessif morphologique "spécifique" (selon la profondeur) et temporel.

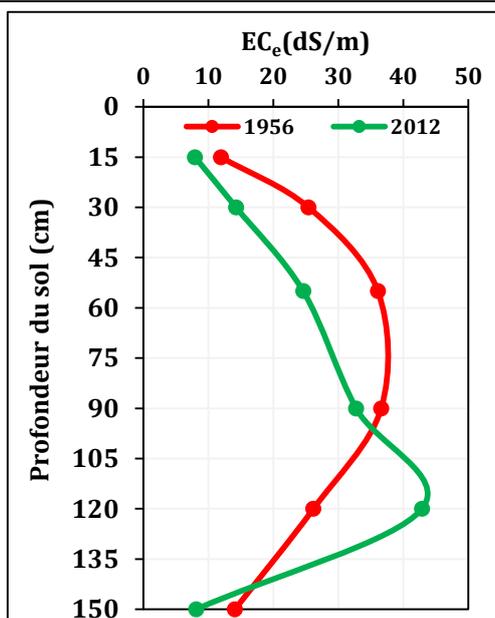


Figure 21. Les écarts de taux de salinité pour *E1* et *E2*.

3.1.2.1.2. Evaluation des fréquences des classes de salinité par horizon

Cette analyse est basée sur l'ordonnement (h_1, \dots, h_i , avec $i \leq 6$) adopté pour le descriptif des différents points d'observation (tableau V). Elle est appliquée sur les données d'analyses des deux périodes d'étude (*E1* et *E2*).

L'évaluation repose sur la combinaison des horizons identifiés ci-dessus et des cinq classes de salinité établies par U.S.S.L. (1954). Le résultat est exposé dans le tableau XVI.

Tableau XVI. Les fréquences de distribution des taux de salinité en %

Hrz.	Péri.	C1	C2	C3	C4	C5
h1	<i>E1</i>	0	0	29	42	29
	<i>E2</i>	55	9	27	9	0
h2	<i>E1</i>	0	0	33,3	33,4	33,3
	<i>E2</i>	0	18	36,5	36,5	9
h3	<i>E1</i>	0	0	12,5	37,5	50
	<i>E2</i>	0	0	9	36	55
h4	<i>E1</i>	0	0	12,5	25	62,5
	<i>E2</i>	0	0	0	45	55
h5	<i>E1</i>	0	0	33,5	50	16,5
	<i>E2</i>	0	0	0	29	71
h6	<i>E1</i>	0	0	0	50	50
	<i>E2</i>	0	0	0	50	50

De manière générale, le tableau XVI montre qu'hormis l'horizon *h1* de *E2* qui s'identifie par plus de 50 % de l'effectif couvert par la classe *C1*, la majorité de la composante des autres horizons de *E1* et *E2* est dominée par les classes *C4* et *C5*.

Pour une meilleure appréciation de ces résultats, nous les avons illustrés sous forme d'histogramme de fréquence (figure 22). L'allure du graphique présenté ci-dessous montre ce qui suit :

- Pour *E1* :

- les classes *C1* et *C2* n'apparaissent pas dans les effectifs des différents horizons d'étude. Les valeurs des fréquences obtenues sont égales à zéro (0%),
- les classes *C4* et *C5*, présentes dans tout le profil, semblent s'orienter préférentiellement vers une localisation accrue en *h3-h4* et *h5-h6*,
- et enfin, les taux de salinité pour la classe *C3* indiquent, malgré quelques fluctuations, une localisation inverse.

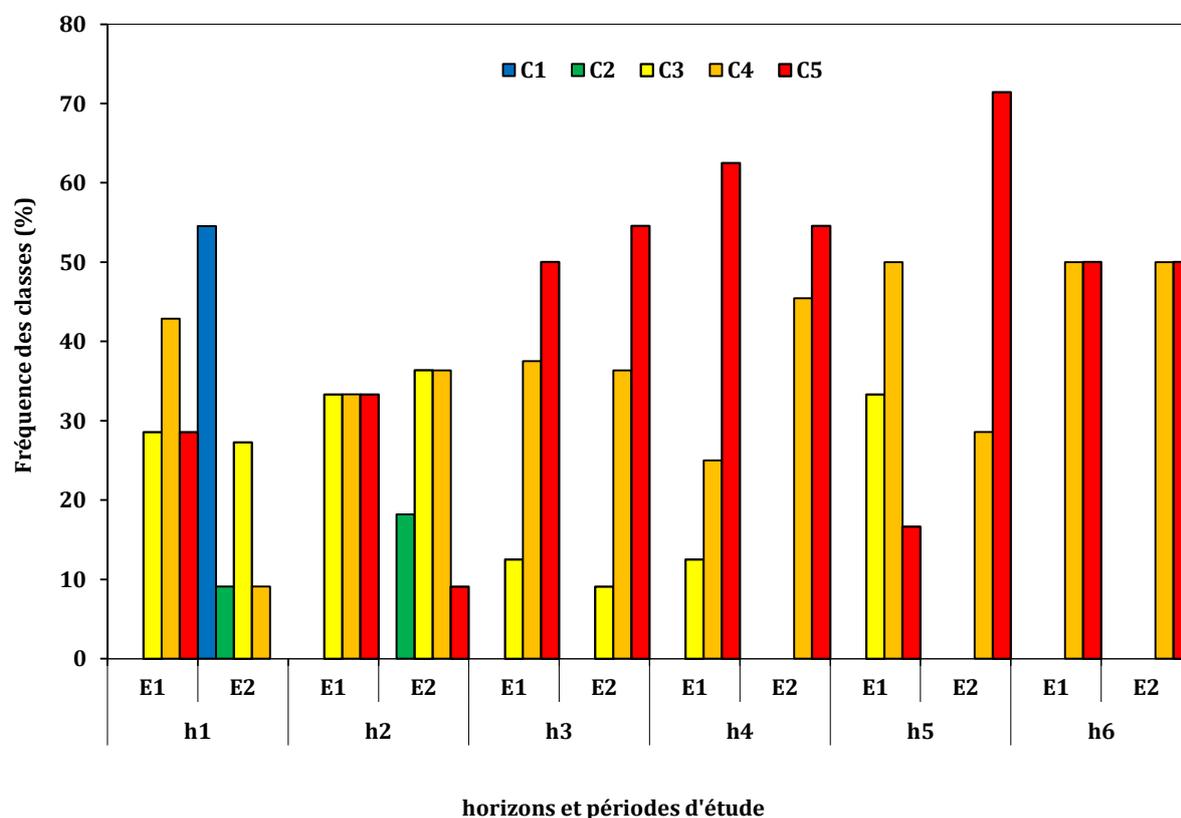


Figure 22. Répartition des classes de salinité dans les différents horizons d'étude.

-Pour *E2* :

- les classes *C1* et *C2* caractérisent uniquement l'effectif des couches superficielles. En fait, la classe *C1* est localisée dans les horizons *h1* (55%). Alors que la classe *C2* s'étale de la couche *h1* (9%) vers la couche *h2* (18%),

- les fréquences des classes *C1* et *C2* chutent brutalement dans les autres catégories d'horizons, donnant lieu à des valeurs d'effectifs observées nulles (0%),
- la classe *C3* s'identifie par une localisation, seulement, dans les horizons supérieurs des profils (*h1*, *h2* et *h3*), avec une allure plus soutenue pour les horizons *h1* et *h2*,
- et enfin, les classes *C4* et *C5* étalent une orientation préférentielle vers les horizons *h3-h4* et les horizons *h5-h6*.

Il est donc possible de dire que ce traitement suggère qu'il existe des changements "marquants" dans la mise en place des différentes classes de salinité entre *E1* et *E2*. D'après Daoud (1993) et Djamaï (2007), ceci peut être interprété ou considéré comme une forme d'évolution dans les niveaux de la salinité des sols dans le cas de notre région d'étude. Un schéma d'évolution qui semble reproduire :

- **Un effet de surface et de sub-surface**, donnant lieu à une forme de désalinisation :

- dans les horizons *h1*, il est noté la diminution importante des effectifs de la classe *C4* et la disparition de la classe *C5*, associés à une forme d'emprise :
 - en premier lieu, de la *C1* avec plus de 50% des effectifs,
 - en second lieu, de la *C3* et de la *C2* avec un cumul de plus de 35% des effectifs.
- dans les horizons *h2*, il est noté une diminution, de plus de 70%, de la classe *C5* qui s'accompagne de la disparition de la classe *C1* et d'une augmentation des effectifs, d'un côté pour les classes *C2* et *C3*, de l'autre de la classe *C4*.

- **Un effet de moyen et de bas-profil**, donnant lieu à une forme d'accumulation de sels et d'accroissement de la salinité selon la profondeur. Il ressort, ainsi :

- une emprise des classes *C4* et *C5* qui s'accompagne d'une tendance de diminution, voire de disparition, malgré de légères fluctuations dans les niveaux *h3* et *h5*, de la classe *C3*.

- **De même que pour le traitement effectué pour l'analyse globale**, il ressort d'une vue d'ensemble de cette représentativité « des classes de salinité » l'approximation des séries structurantes suivantes :

- $C5 > C4 > C3$ pour *E1* et,
- $C5 > C4 > C3 > C1 > C2$ pour *E2*.

3.1.2.1.3. Evaluation des fréquences des classes de l' ESP_{eq}

De même que pour EC_e l'évaluation des fréquences de distribution pour l' ESP_{eq} est exécutée à partir de l'organisation du descriptif des différents points d'étude ($h1, \dots, h_i$, avec $i \leq 6$) du

tableau V. Le traitement couvre, dans le même sens, la matrice d'information de *E1* et *E2*.

La démarche de calcul repose sur la combinaison entre les horizons identifiés ci-dessus et les quatre (04) classes de sodicité proposées par FAO (1984). Le résultat est exposé dans le tableau XVII.

Le trait marquant de ce traitement est la mise en avant de l'enrichissement excessif de nos échantillons de sols, avec le temps et selon la profondeur, en ions sodium échangeable. Ainsi, il ressort que la classe *C4* est la plus présente dans l'ensemble des horizons de *E2*. Elle s'identifie par *un gradient d'accroissement* avec la profondeur. Ce traitement permet d'entrevoir, aussi, les faits suivants :

- Les classes *C2* et *C3* sont les plus répandues dans *E1*.
- Les trois classes de sodicité "allant de *C2* à *C4*" sont caractéristiques des horizons superficiels des deux périodes. Il est possible de spécifier les horizons *h2* de *E1* et les horizons *h1* de *E2*.
- Les classes *C1* et *C2* sont faiblement répandues à inexistantes dans les horizons de la région d'étude en *E2*.

Tableau XVII. Les fréquences de distribution de l'*ESP_{eq}*.

Hrz.	Péri.	Classes de sodicité (ESP%)			
		C1 <i>sodicité légère</i>	C2 <i>sodicité modérée</i>	C3 <i>sodicité grave</i>	C4 <i>sodicité très grave</i>
h1	<i>E1</i>	0	71,4	14,3	14,3
	<i>E2</i>	27,3	27,3	36,4	9
h2	<i>E1</i>	11	33,5	33,3	22,2
	<i>E2</i>	0	0	54,55	45,45
h3	<i>E1</i>	0	25	50	25
	<i>E2</i>	0	0	18,2	81,8
h4	<i>E1</i>	0	50	50	0
	<i>E2</i>	0	0	9,1	90,9
h5	<i>E1</i>	0	50	50	0
	<i>E2</i>	0	0	0	100
h6	<i>E1</i>	0	50	50	0
	<i>E2</i>	0	0	0	100

Pour mieux exprimer les données de ce traitement nous avons décidé de les afficher sous forme d'histogramme de fréquences (figure 23).

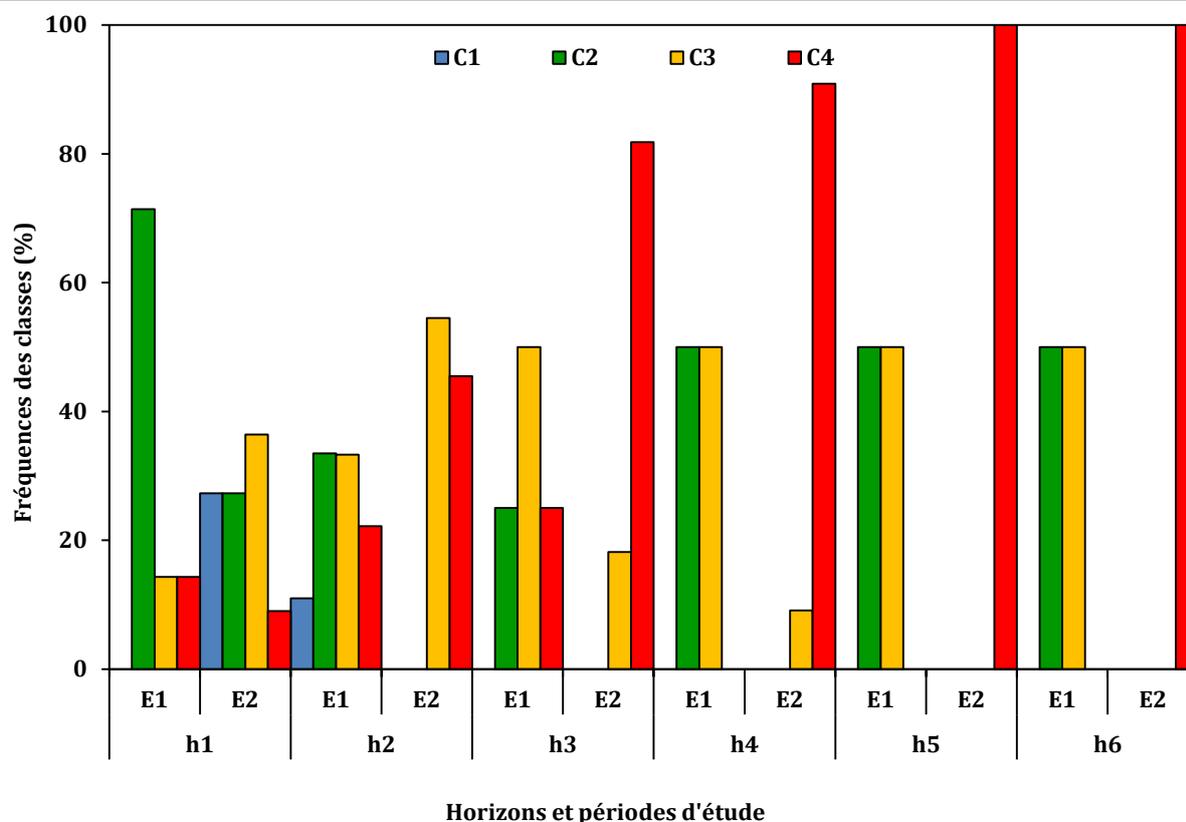


Figure 23. Répartition des classes de sodicité dans les différents horizons d'étude.

Le descriptif de cette figure fait apparaître ce qui suit :

- Pour *E1* :

- la classe *C1* définit uniquement les horizons *h2* (11%). Sa présence n'est pas signalée dans les autres catégories d'horizons (0%),
- la classe *C2* couvre l'effectif de chaque horizon de cette période. Les valeurs observées sont comprises entre 25% et moins de 75% selon l'horizon considéré,
- la classe *C3* présente, malgré de légères fluctuations en *h1* et en *h2*, une allure très homogène dans l'ensemble des effectifs des autres horizons caractéristiques (50%),
- et enfin, la classe *C4* s'exprime par une légère localisation dans la partie supérieure des profils (*h1*, *h2*, *h3*). Selon l'ordre de citation, les valeurs de répartition obtenues sont de 14, 3%, 22,2% et enfin de 25%.

- Pour *E2* :

- les fréquences des classes *C1* et *C2* caractérisent uniquement les horizons *h1*, avec des valeurs égales à 27,3%. Leur disponibilité chute brutalement, par la suite, dans les autres catégories d'horizons, donnant lieu à des valeurs d'effectifs nulles (0%),

- la classe *C3* est observée dans les horizons *h1*, *h2* et *h3-h4*. Toutefois, elle s'identifie par une légère prédominance dans les deux premiers niveaux cités (*h1* et *h2*), avec des valeurs de répartition cernées entre 35 et 55%,
- et enfin, la classe *C4*, même si elle est observée sur l'ensemble des niveaux de profil, s'oriente préférentiellement vers une localisation *de moyen* (*h3-h4*) et *de bas-profil* (*h5-h6*), avec des valeurs de répartition qui dépassent les 80%.

Les résultats de ce traitement font apparaître, d'une part une grande adéquation avec les observations des données du traitement globale, d'où ressort l'aspect accroissement « *excessif* » avec le temps des niveaux de sodisation du complexe adsorbant des sols d'El Hamadna, d'autre part l'importance et l'intensité évolutive de ce processus en fonction d'un gradient de profondeur propre aux différents profils.

De même que pour l'évaluation effectuée pour l'approche globale, il ressort d'une appréciation globale de cette représentativité « des classes de sodicité » la mise en place des séries structurantes suivantes :

- $C2 > C3 > C4 > C1$ pour *E1* et,
- $C4 > C3 > C2 = C1$ pour *E2*.

3.2. Les profils de distribution de la salinité

Dans cette section, nous présentons les résultats relatifs au traitement graphique de la distribution des sels au sein des onze (11) profils pédologiques identifiés et structurés dans le tableau V. L'approche appliquée sur les données de *E1* et *E2* est dérivée du concept de projection verticale des données de salinité et des profils y afférents établi par Servant (1976).

3.2.1. Les types de profils salins de *E1*

L'étude des profils de distribution des sels de *E1* révèle trois types de profils salins (figures 24, 25, 26):

- Le premier type de profil salin est illustré par la figure 24(a, b, c, d, e). Ce type de profils de distribution s'apparente à un profil salin de type B. Cette distribution couvre cinq (05) profils, il s'agit de *B163*, *A503*, *A495*, *A567* et *A557*.

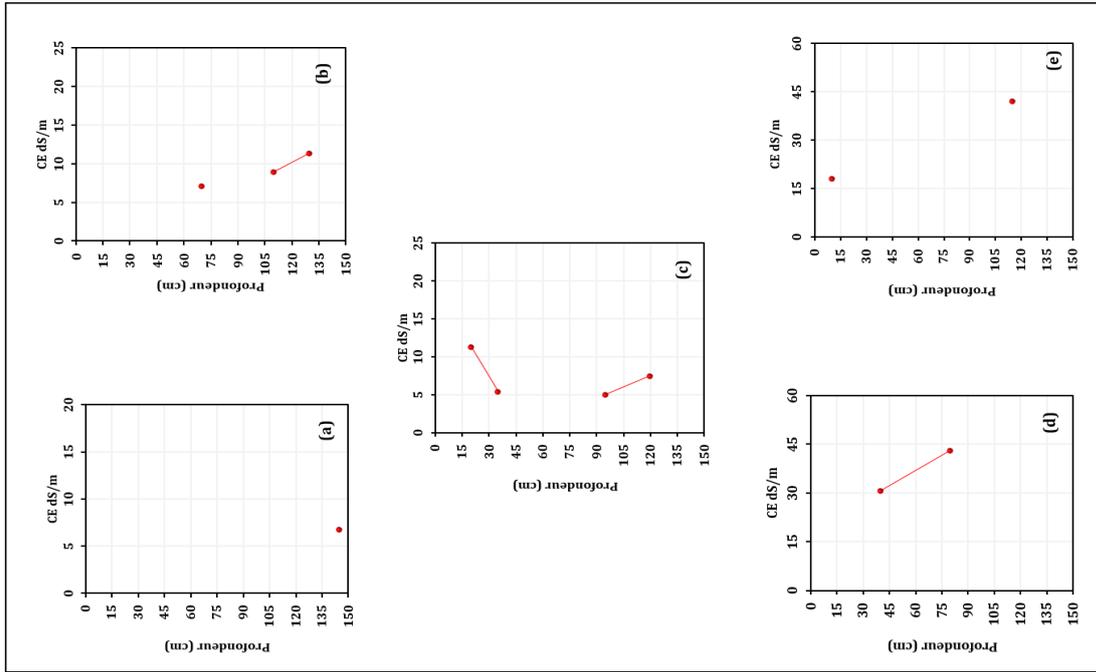


Figure 26. Profils salins de distribution non apparentée.
a) A507, b) A570, c) A573, d) A922, e) A923

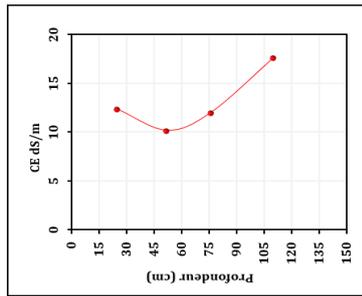


Figure 25. Profil salin type D.
B217

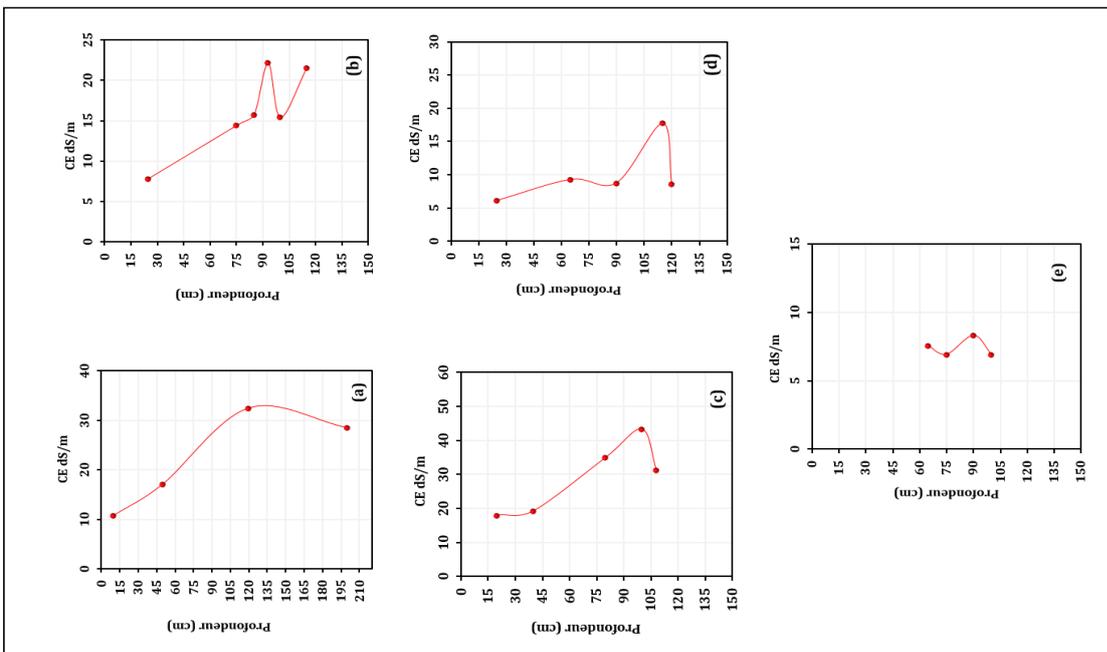


Figure 24. Les profils salins type B.
a) B163, b) A503, c) A495, d) A567, e) A557

Cette représentation de profils traduit la mise en place d'une distribution des sels selon un gradient descendant.

- Le second type de profil salin est représenté par la figure 25. Ce type de profil de distribution correspond à un profil salin de type D. Cette représentation ne concerne qu'un (01) seul profil, il s'agit du *B217*.

Ce graphique montre, aussi, une distribution des sels selon un gradient descendant. La salinité s'accroît, donc, avec la profondeur des sols.

- Le dernier type de profil salin observé (figure 26) concerne cinq (05) profils, il s'agit des profils *A507*, *A570*, *A573*, *A922* et *A923*. Les graphiques représentatifs ne correspondent à aucun des types de profils de distribution des sels proposés par Servant (1976).

En réalité, ce type de distribution de sels traduit une schématisation tronquée en raison du manque de valeurs de conductivité électrique dans certains niveaux ou horizons d'étude.

3.2.2. Les types de profils salins en E2

L'étude des profils de distribution des sels pour les données de *E2* révèle deux types de profils salins (figures 27, 28):

- Le premier profil de distribution est représenté dans la figure 27. Ce type de profil correspond à un profil salin convexe de type B. Il concerne 4 profils de l'étude, il s'agit des profils *B163*, *A503*, *A507* et *A570*.

L'allure de distribution dans ce type de profil montre un effet de concentration maximale des sels dans le moyen profil.

- Le second profil de répartition est illustré par la figure 28. Cette dernière expose un profil salin de type D. Une représentation qui couvre sept (07) profils, il s'agit des profils *A495*, *A573*, *A922*, *A923*, *A557*, *A567* et *B217*.

La représentation cartographique (Figure 29) de ces différents types de profils salins selon leur localisation dans l'espace d'étude, permet, d'une part de les associer au contexte de leur milieu et, d'autre part, de distinguer les variations morphologiques observées (sur fond d'oppositions) sur l'ensemble de l'épisode temporel:

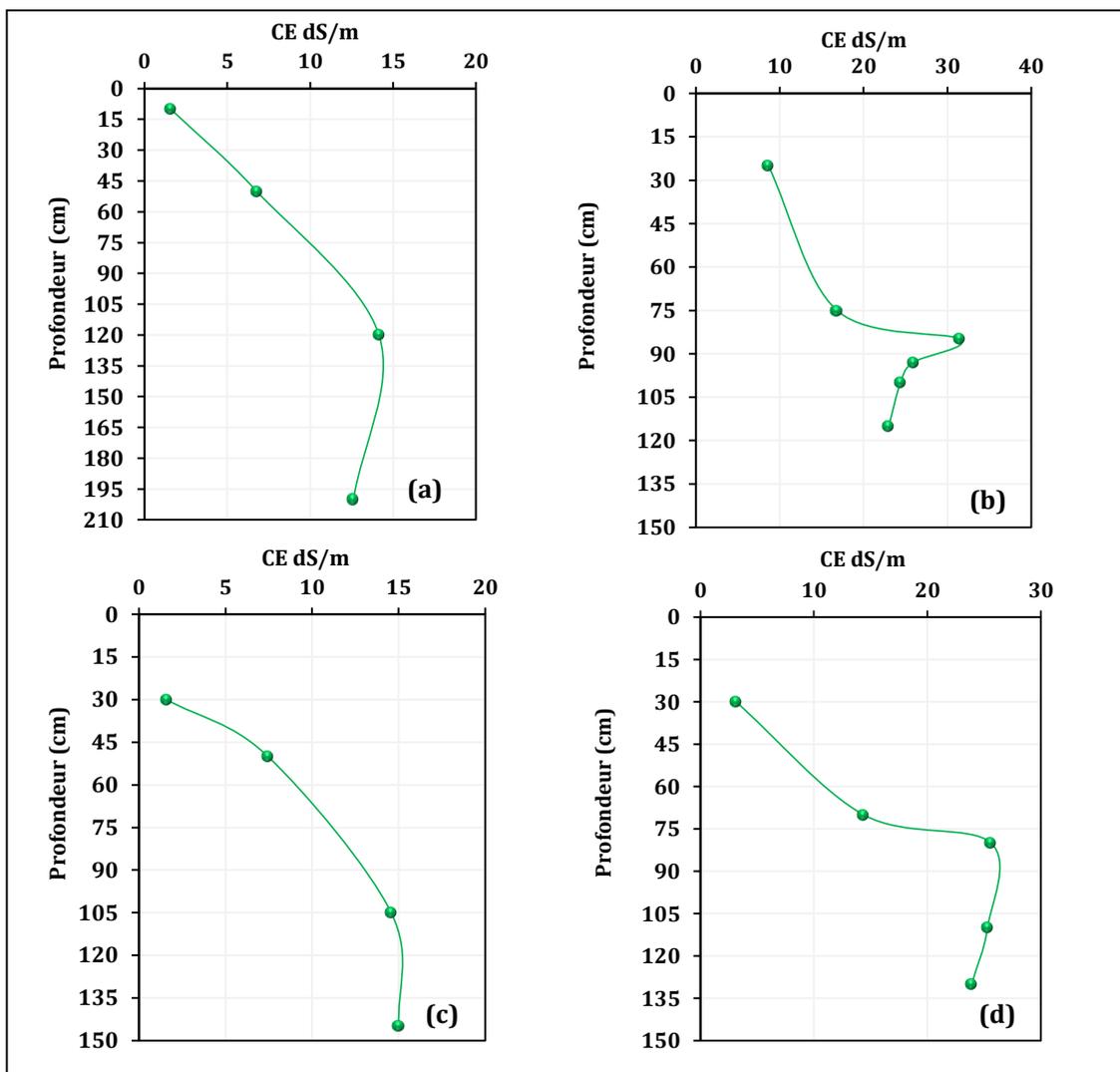


Figure 27. Profils salins type B.
a) B163, b) A503, c) A507, d) A570

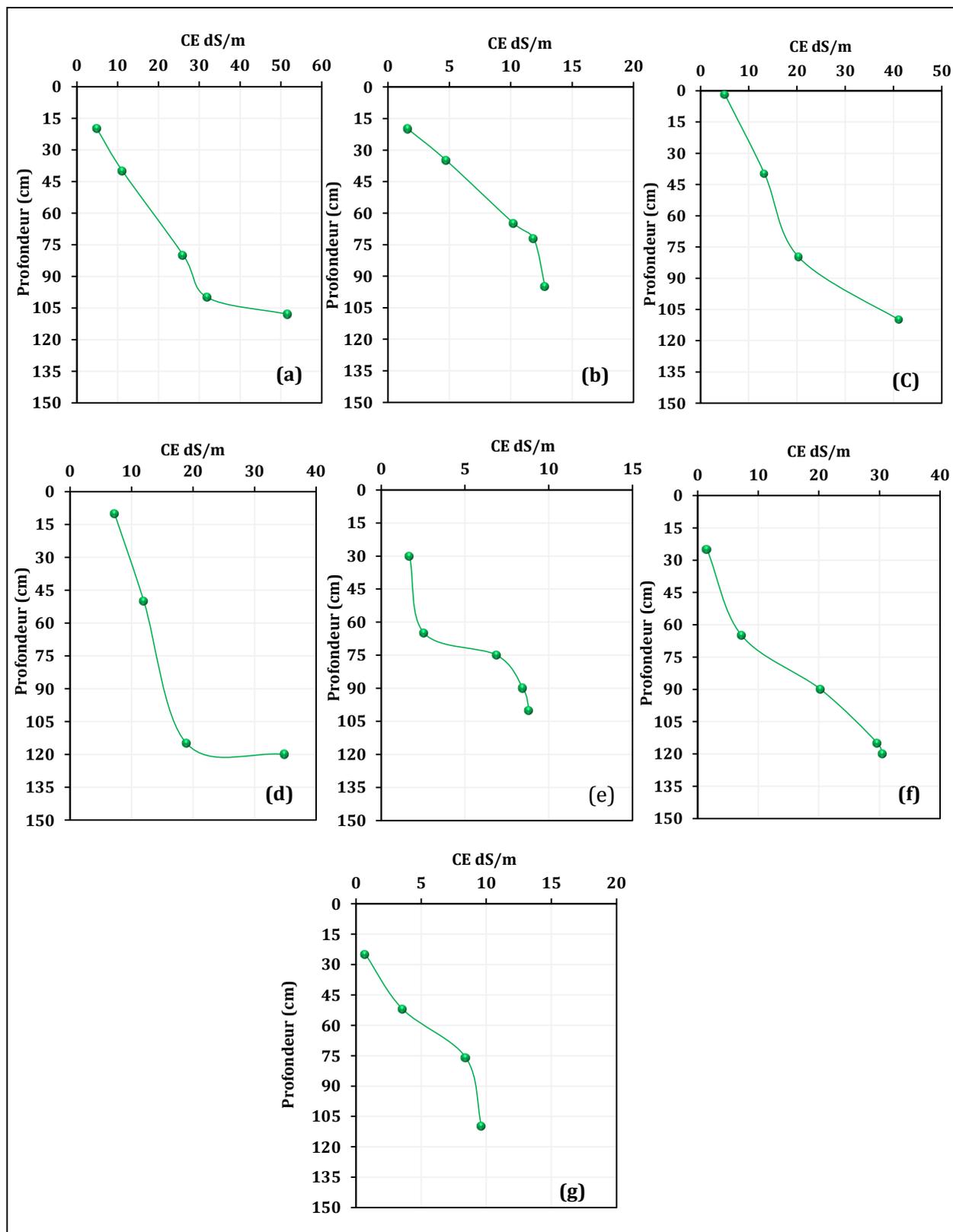


Figure 28. Profils salins type D.
a) A495, b) A573, c) A922, d) A923, e) A557, f) A567, g) B217

- Le profil salin de type B observé dans A507, de localisation Ouest dans le site, et A570, localisé dans le centre du site, dérivent d'une forme de distribution *non apparentée à celle de Servant*.
- Le profil salin de type D observé dans A573 ; de localisation Nord-Ouest, et dans A922 et A923, de localisation Est, dérivent d'une forme de distribution *non apparentée à l'approche Servant*.
- Le profil salin de type D observé dans A557, de localisation Nord, et dans A495 et A567, localisés dans le centre du site, dérivent d'une forme B initiale.
- Le profil salin de type B observé dans B163, de localisation Sud, et A503, de localisation Sud-Ouest, et le profil salin de type D observé dans le cas de B217, de localisation SudSud-Est, traduisent une stabilisation de la même forme de distribution des sels dans le temps.

Dans l'ensemble, le profil de distribution des sels pour *E1* et *E2* révèle la prédominance de deux types de profils salins, les profils salins de *type B* et de *type D*. Morphologiquement, ce sont deux types de distribution caractérisés par un gradient de salinité descendant, où seule la localisation du niveau de salinité maximum diffère.

L'appréciation globale sur les données de la distribution des sels dans ces profils indique une dépendance vis-à-vis de la variabilité des paramètres endogènes et /ou exogènes du milieu d'appartenance (Pouget, 1968 ; Servant, 1976 ; Heurteaux et Servant, 1979 ; Girard et *al.*, 2011).

Généralement, il est indiqué que les concentrations de sels et/ou les états remarquables dans les couches moyennes et moyennes à profondes, seraient dues :

- A l'effet faible profondeur de nappe (*effet fluctuation, infiltration, etc...*) et l'inefficience du réseau de drainage mis en place (Boulaine, 1957 ; Daoud, 1993 ; Douaoui, 2005).
- A une lixiviation partielle ou à un faible entrainement hors du profil des sels des horizons de surface pendant la période pluvieuse (Servant, 1976 ; Loyer et *al.*, 1989 ; Loyer, 1991 ; Girard et *al.*, 2011 ; Nijimbère, 2014 ; Grûnberger, 2015).
- Et/ou à l'effet des propriétés mécaniques des sols contraignantes, sous l'impulsion d'une texture relativement fine à très fine et l'impact destructurant du sodium sur la structure des sols (Durand, 1956 ; Boulaine, 1957 ; Daoud, 1993 ; Douaoui et *al.*, 2004 ; Saïdi et *al.*, 2004 ; Saïdi, 2005).



Figure 29. Evolution des profils salins ou de distribution de sels pour E1 et E2.

3.3. Détermination du faciès chimique des solutions du sol

La détermination des faciès chimiques et de leur évolution se base sur la proportion des principaux cations et anions présents dans la solution du sol.

Les calculs et les graphiques ont été réalisés sur une composition de deux matrices (*E1* et *E2*). Chaque matrice concerne 11 profils pédologiques, 53 horizons et 11 variables physico-chimiques.

3.3.1. Mise en œuvre sur les données d'étude

Le faciès chimique des différentes solutions de sols est obtenu à partir du diagramme de Piper. Le traitement a été réalisé à l'aide du logiciel diagrammes de Simler (2012). Cet outil ne traite simultanément que 30 solutions. Pour faciliter le calcul, les données exploitées dans le diagramme de Piper ont été divisées en deux groupes sur la base de la valeur médiane de EC_e extraite du tableau X (approche globale).

3.3.1.1. Observations des éléments de base de *E1*

L'évaluation de la proportion des éléments majeurs (de base) présents en solution repose essentiellement sur :

- La composition cationique, d'où ressort :

- le sodium qui domine les cations avec une part qui varie de 22,3 à ≈ 90 %,
- le calcium qui s'identifie par une proportion cernée entre 5,3 et ≈ 47 %,
- le magnésium avec une part comprise entre 4,4 et ≈ 43 % et enfin,
- le potassium avec une part qui varie de 0,3 à 3 %.

- La composition anionique, d'où ressort :

- les chlorures qui dominent les anions présents dans la solution de sols avec une part qui est comprise entre 26,7 et ≈ 84 %,
- les sulfates qui ont une proportion variant de 10,4 à 59 % et,
- les carbonates qui présentent des proportions allant de 1,4 à 24,2 %.

La représentation des différents échantillons de solutions de sols (*E1*) sur le diagramme de Piper est illustrée dans la figure 30.

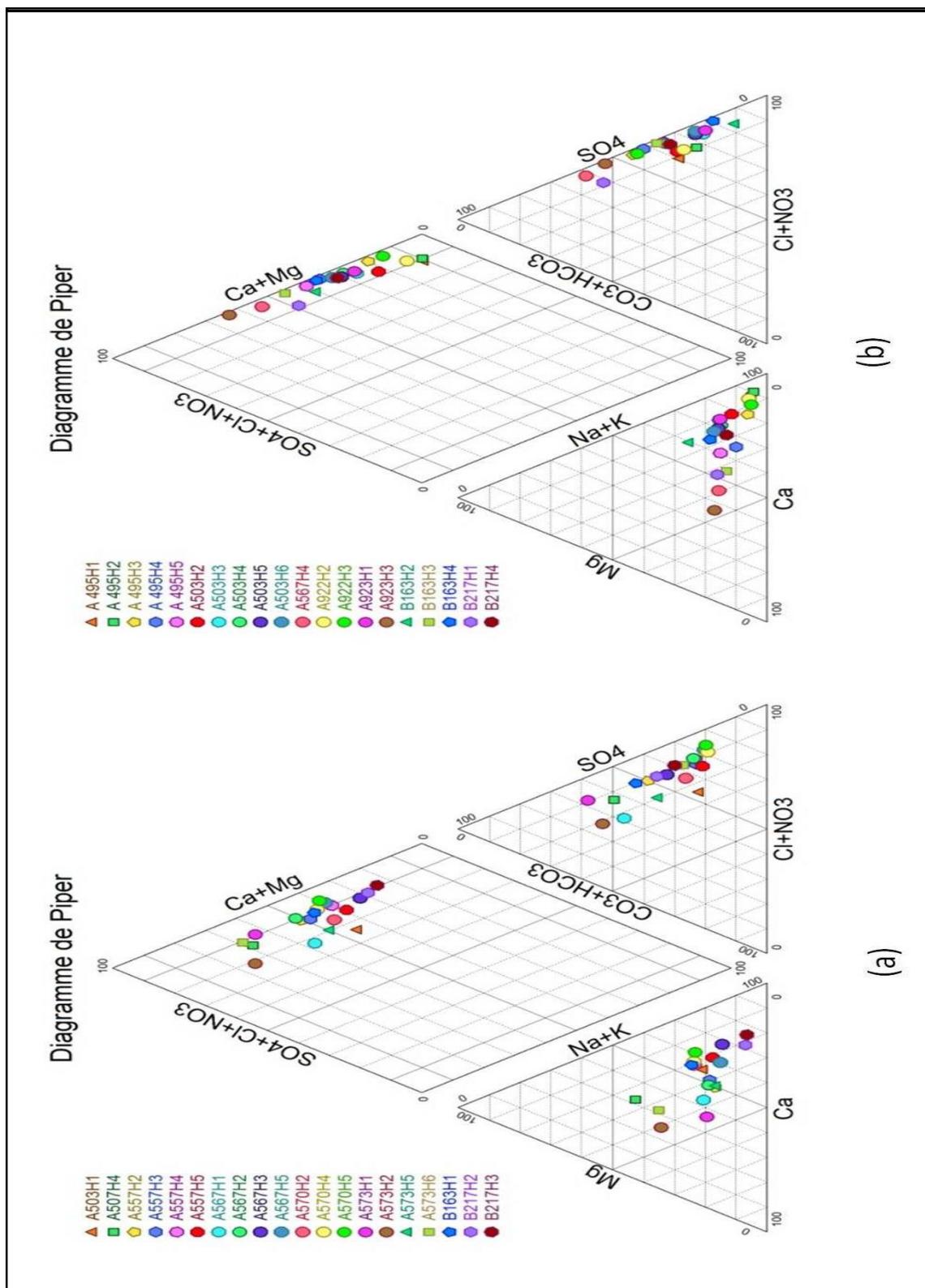


Figure 30. Faciès chimiques des solutions de EI.
 (a) Groupe avec $EC_e < 12.2 \text{ dS/m}$, (b) Groupe avec $EC_e > 12.2 \text{ dS/m}$.

L'analyse du diagramme de Piper (*a*, *b*) a permis d'identifier cinq types de faciès chimiques de la solution de sols :

- Un faciès de type *chloruré sodique* pour la majorité des échantillons.
- Un faciès de type *chloruré - sans dominance de l'un des cations* pour les échantillons A557h3, A567h2 et A573h6.
- Un faciès de type *sulfaté - sans dominance de l'un des cations* pour les échantillons B217h1, A507h4, A567h4, A573h1, A573h2 et A923h3.
- Un faciès de type *sans dominance de l'un des anions - sodique* pour l'échantillon B163h1.
- Un faciès de type *sans dominance de l'un des anions - sans dominance de l'un des cations* pour les échantillons A567h1, A557h2 et A573h5.

3.3.1.2. Observation des données de base de E2

L'analyse de la proportion des éléments majeurs présents en solution repose essentiellement sur :

- La composition cationique, d'où ressort :
 - le sodium qui présente une part qui varie de 21 à 92,5 %,
 - le calcium qui s'identifie par une proportion cernée entre 5,8 et ≈51 %,
 - le magnésium avec une part comprise entre 0,8 et ≈ 53 % et enfin,
 - le potassium avec une part qui varie de 0,04 à 20 %.
- La composition anionique, d'où ressort :
 - les chlorures qui dominent les anions présents dans la solution des sols avec plus de 50% des taux. Leur part est comprise entre 51,5 et 97,9 %,
 - les sulfates qui ont une proportion variant de 1,4 à 38,2 % et enfin,
 - les bicarbonates qui présentent des proportions allant de 0,3 à 21,5 %. La représentation des différents échantillons de solution de sols (*E2*) sur le diagramme de Piper est illustrée par la figure 31.

L'analyse du diagramme de Piper (*a*, *b*) a permis de mettre en évidence trois types de faciès chimiques de la solution des sols :

- Un faciès de type chloruré sodique qui domine la solution des sols pour la majorité des échantillons.
- Un faciès de type chloruré magnésien pour un (01) échantillon, il s'agit de B217h1.

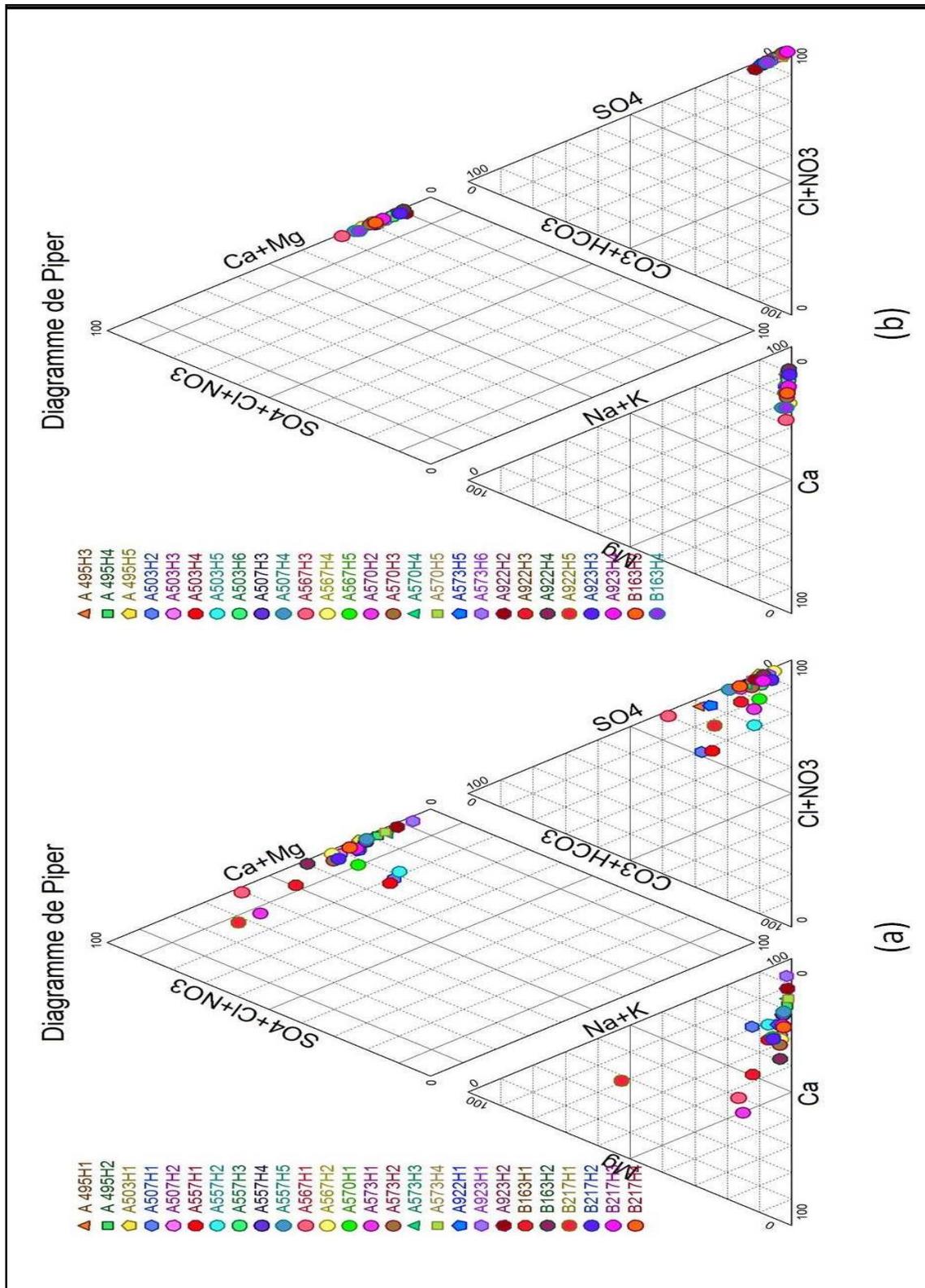


Figure 31. Faciès chimiques des solutions de E2.
(a) Groupe avec $EC_e < 12,6 \text{ dS/m}$. (b) Groupe avec $EC_e > 12,6 \text{ dS/m}$.

- Un faciès de type chloruré sans dominance de l'un des cations pour les échantillons *B163h1*, *A573h1* et *A567h1*.

Les solutions de sols des échantillons se caractérisent par des faciès chimiques très variables.

De l'observation des données du diagramme de Piper de chaque traitement se dégage une forme d'organisation évolutive dans les profils et dans le temps (chronoséquences). Cette dernière identifie une dynamique de mise en place allant de cinq types de faciès chimiques pour *E1* à trois types de faciès chimiques pour *E2*.

En première analyse, ces résultats dénotent clairement qu'une part des solutions (environ 24%) a évolué (ou migré) vers le faciès chloruré sodique (tableau XVIII). La proportion est passée d'un taux d'environ 67% en *E1* à plus de 92% du total des échantillons en *E2*.

Aussi, et dans le même ordre d'idée, il a été observé l'apparition d'un faciès chloruré magnésien qui reste, tout de même, de faible représentativité par rapport au faciès chloruré sodique. La proportion identifiée ne concerne que 2% des échantillons étudiés.

Tableau XVIII. Fréquence de faciès chimiques dominant par nombre de solutions de sols et par période d'étude.

Faciès	<i>E1</i>		<i>E2</i>	
	S.S.	%	S.S.	%
Chloruré sodique	27	67,5	49	92
Chloruré magnésiens	00	00	01	2
Chloruré sans dominance de l'un des cations	03	7,5	03	6
Sulfaté sans dominance de l'un des cations	06	15	00	00
Sans dominance de l'un des anions - sodique	01	2,5	00	00
Sans dominance de l'un des anions - sans dominance de l'un des cations	03	7,5	00	00
Total		100%		100%

Nb : solutions de sols = S.S

En seconde analyse, le comportement des autres faciès suit sensiblement l'organisation proposée dans le milieu. Il s'exprime par une diminution conséquente, voire disparition (0%), de la proportion des autres faciès chimiques, tels que : le faciès de type *sulfaté sans dominance de l'un des cations*, le faciès *sans dominance de l'un des anions – sodique*, et enfin le type *sans dominance de l'un des anions - sans dominance de l'un des cations*.

Il y a lieu d'indiquer aussi, qu'au bout de l'épisode temporel, le faciès chloruré sodique caractérise principalement les solutions de sols qui ont une EC_e élevée [4 - 51,7dS/m], alors que

les autres faciès (identifiés) sont observés pour des niveaux de EC_e plus faibles. Les valeurs de correspondances varient dans la gamme de 0,7 dS/m et 1,7 dS/m.

Sur la base des travaux de Dosso (1980) et Marlet et Job (2006), il est possible de conclure que ces sols évoluent selon la voie saline neutre à dominante chlorurée.

Sur le plan géochimique, le faciès chimique chloruré sodique ne favorise pas les phénomènes de précipitation des sels jusqu'à des niveaux de salinité très élevés (Droubi *et al.*, 1980 ; Bresler *et al.*, 1982 ; Daoud, 1993 ; Girard *et al.*, 2011). Sur le plan agronomique, ce faciès est néfaste pour la croissance des plantes. En effet, les concentrations élevées en sodium et en chlore provoquent des perturbations multiples sur le métabolisme, la croissance et le développement des plantes aux niveaux moléculaire, biochimique et physiologique (Munns, 2002).

3.4. Evaluation de l'évolution temporelle de la salinité

Cette étude réalisée sur les sols salés de l'ancienne délimitation de la station d'El Hamadna repose grandement sur une approche mixte "*qualitative-quantitative*" comparative, axée dans l'ensemble sur la comparaison des données de profils salins entre *E1* et *E2*.

3.4.1. Comparaison des profils salins

L'étude comparative des profils de distribution des sels entre les deux périodes a porté sur cinq profils seulement, il est cité *B163*, *B217*, *A495*, *A503* et *A567*. Ces profils présentent des données complètes pour tous les horizons concernant l'étude *E1*. La comparaison des données de *E1* avec celles de *E2* permettra de cerner l'évolution temporelle de la salinité durant une période de plus de 50 ans (56 ans).

La comparaison des profils salins révèle la présence de trois cas d'observations (Figure 32):

- La salinité a augmenté dans tout le profil *A503* en *E2* par rapport à *E1*.
- La salinité a diminué en surface et elle a augmenté en profondeur pour le profil *A567* en *E2* par rapport à *E1*.
- La salinité a diminué dans tout le profil en *E2* par rapport à *E1* pour les profils *B163*, *A495* et *B217*.

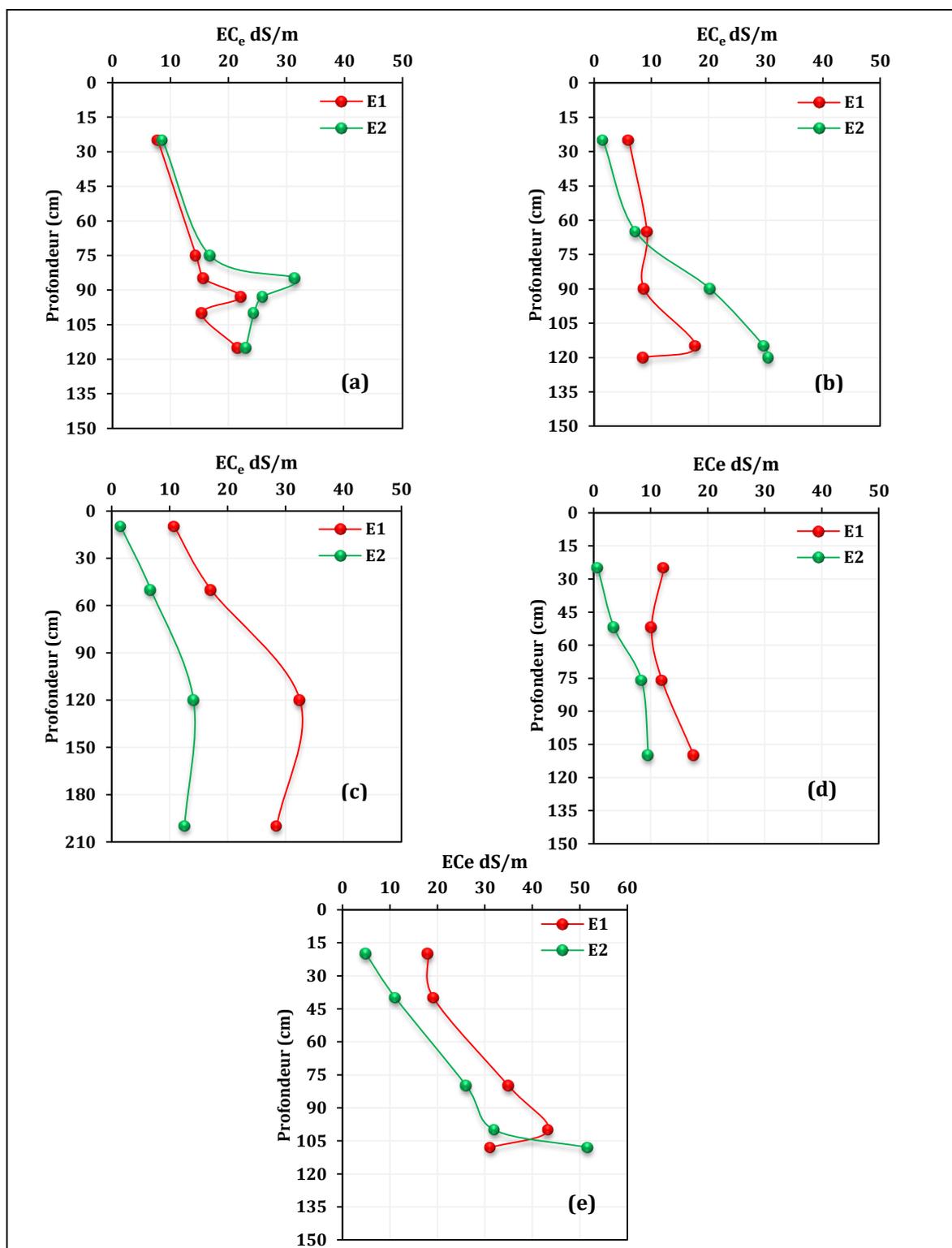


Figure 32. Profil salin des profils pour les deux périodes (E1 et E2).
a)A503, b) A567, c)B163, d) B217, e) A495.

3.4.2. Le gradient d'évolution de la salinité

Ce calcul mathématique, qui est basé sur la détermination de l'écart entre la salinité moyenne et la vitesse de salinisation moyenne, permettra de cerner le sens d'évolution du phénomène par profil et par horizon du sol entre les deux périodes références.

3.4.2.1. Evaluation par profil

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats de l'estimation de la vitesse de salinisation moyenne (V_{Sm}) observée entre les profils de *E1* et *E2*. L'évaluation est réalisée sur la base du rapport de l'écart de salinité moyenne (EC_{Sm}) sur la durée temporelle (T). Les résultats sont présentés pour chaque profil dans le tableau XIX.

Tableau XIX. Ecart et vitesse de salinisation moyenne entre *E1* et *E2*
des profils *B163*, *A495*, *B217*, *A567*, *A503*.

Prof.	EC_e moy. (dS/m) (<i>E1</i>)	EC_e moy. (dS/m) (<i>E2</i>)	EC_{Sm} (dS/m) entre <i>E1</i> et <i>E2</i>	V_{Sm} (dS/m/année)
B163	26,75	11,43	-15,32	-0,27
A495	30,10	20,07	-10,04	-0,18
B217	13,35	5,86	-7,49	-0,13
A567	10,30	13,74	3,44	0,06
A503	13,46	16,99	3,53	0,06

Les résultats de ce tableau montrent que :

- Les profils *A495*, *B163* et *B217* présentent une désalinisation entre *E1* et *E2* à une vitesse moyenne comprise entre 0,13 et 0,27 dS/m par année.
- Les profils *A567* et *A503* ont enregistré une légère salinisation entre *E1* et *E2* à une vitesse moyenne de 0,06 dS/m par année.

3.4.2.2. Evaluation par horizon

Comme pour l'approche globale, cet exercice cible l'estimation de la vitesse moyenne de salinisation de chaque horizon (V_{Sh}) entre *E1* et *E2*. Toutefois, l'évaluation est réalisée par rapport aux horizons (Le calcul adopté repose sur la détermination du rapport de l'écart de salinité entre horizon d'étude (EC_{Sh}) par la durée du temps (T) qui s'est écoulée (56 ans). Les résultats sont présentés pour chaque horizon dans le tableau XX.

Il est utile d'indiquer que de part la morphologie assez différente des profils considérés, l'étude a été limitée à 4 horizons seulement par profil (tableau V). Ceci permettra d'obtenir une même comparaison de salinité (sur fond d'harmonisation) par horizon sur tous les profils.

Tableau XX. Ecart et vitesse de salinisation entre *E1* et *E2* par horizon.

Hrz	Prof.	EC_e dS/m (<i>E1</i>)	EC_e dS/m (<i>E2</i>)	EC_{Sh} (<i>E2-E1</i>) (dS/m)	V_{Sh} en dS/m par an
h1	B163	10,83	1,59	-9,25	-0,16
	A495	18,00	4,95	-13,05	-0,23
	B217	12,33	0,73	-11,61	-0,20
	A567	6,08	1,55	-4,53	-0,08
	A503	7,83	8,66	0,83	0,01
h2	B163	17,17	6,77	-10,40	-0,18
	A495	19,17	11,18	-7,99	-0,14
	B217	10,17	3,57	-6,60	-0,12
	A567	9,25	7,27	-1,98	-0,03
	A503	14,42	16,82	2,40	0,04
h3	B163	32,50	14,15	-18,35	- 0,32
	A495	35,00	26,10	-8,90	- 0,16
	B217	12,00	8,43	-3,57	- 0,06
	A567	8,75	20,30	11,55	0,20
	A503	15,75	31,50	15,75	0,28
h4	B163	28,50	12,61	-15,89	- 0,28
	A495	43,35	32,00	-11,35	- 0,20
	B217	17,58	9,63	-7,95	- 0,14
	A567	17,75	29,70	11,95	0,21
	A503	22,17	25,90	3,73	0,07

Les résultats obtenus montrent que :

- L'horizon de *surface* (*h1*) présente une désalinisation à une vitesse comprise entre 0,08 et 0,23 dS/m par année pour les profils *A495*, *B217*, *B163* et *A567*. En revanche, il laisse ressortir une salinisation à une vitesse de 0,01 dS/m par année pour le profil *A503*.
- L'horizon de *sub-surface* (*h2*) présente une désalinisation à une vitesse variant entre 0,03 et 0,18 dS/m par année pour les profils *B163*, *A495*, *B217* et *A567*, il est noté une salinisation pour le profil *A503* à une vitesse de 0,04 dS/m par année.
- Les horizons *de moyen* (*h3* et *h4*) et *bas-profil* (*h5* et *h6*) présentent une désalinisation selon une vitesse variant de 0,06 à 0,32dS/m par année pour les profils *B163*, *A495* et *B217*. En revanche, ils indiquent une salinisation pour les profils *A503* et *A567* à une vitesse variant de 0,07 à 0,28 dS/m par année.

En synthétisant, il est clair que ces deux estimations complémentaires confortent et affinent les observations de l'étape descriptive comparative et font ressortir :

- Le déroulement de l'effet *gradient salinisation/désalinisation* au niveau des différents horizons de variation hétérogène entre *E1* et *E2*.
- Des effets et une évolution temporelle de la salinité spécifique à deux catégories de situations (figure 33):

- les profils A495, B163 et B217 qui présentent une désalinisation entre E1 et E2. La mise en place du phénomène traduit un gradient relativement plus important avec les horizons de profondeur du sol (Figure 33a), où l'intensité la plus marquée a été observée pour les niveaux bas du profil B163. La vitesse observée est de l'ordre de 0,13 à 0,27 dS/m par année et,
- les profils A567 et A503 qui présentent une tendance à la salinisation des horizons entre les périodes E1 et E2. La mise en place du phénomène traduit un gradient d'accroissement plus important selon la profondeur du sol (Figure 33b), avec une " allure accrue spécifique" au profil A503. La vitesse observée est de l'ordre de 0,06 dS/m par année.

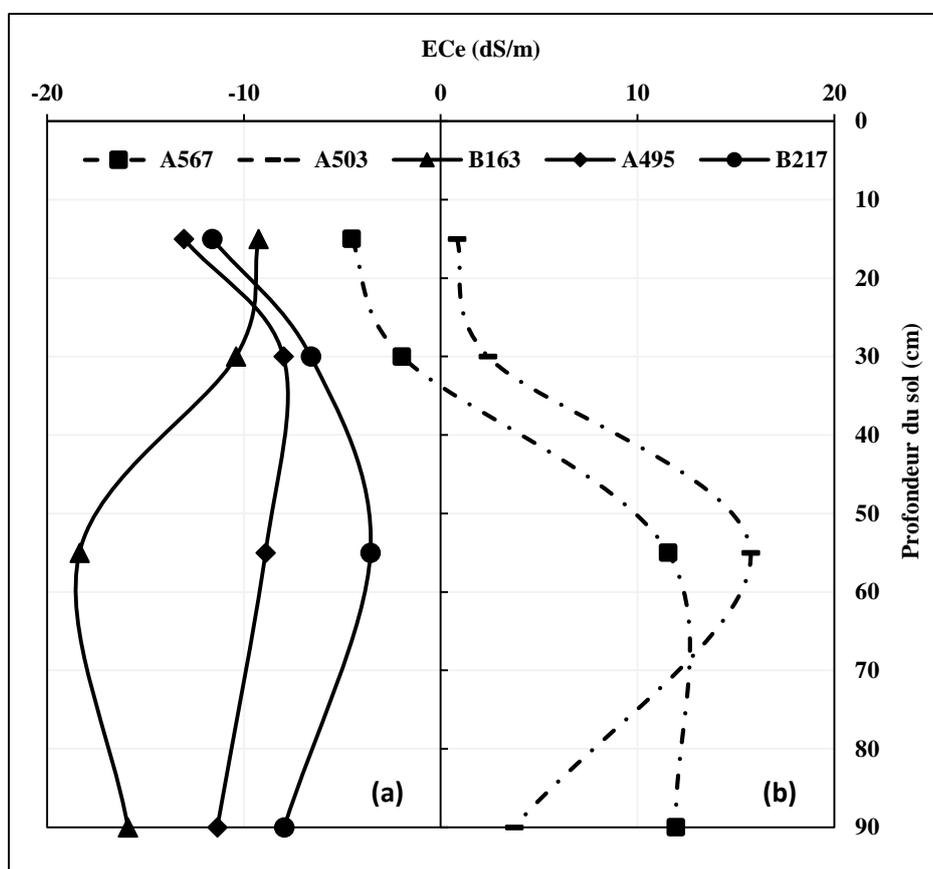


Figure 33. Amplitude des écarts de salinisation par horizon entre E1 et E2.

En tenant compte des différents travaux réalisés sur les sols salés des plaines du Cheliff, il est possible d'associer le déroulement de ces deux cas de figures :

- Au développement des caractéristiques morphologiques et pédogénétiques spécifiques à chaque horizon. Un déroulement "à effet" indépendant ou combiné sur la base (Boulaine,

1957 ; Aubert, 1976 ; 1983 ; Bertrand *et al.*, 1993 ; Daoud, 1993 ; Douaoui, 2005 ; Saïdi, 2005):

- *des caractéristiques structurales,*
 - *du type de texture,*
 - *de la nature des argiles,*
 - *des phases d'humectation et dessiccation,*
 - *des conditions d'hydromorphie et de drainage,*
 - *de la nature des minéraux et des processus de leur altération ou de leur néoformation,*
 - *d'oscillation de nappe différemment chargée et,*
 - *des types de réactions chimiques et les espèces chimiques produites.*
- Et/ou à leur position ou à leur localisation dans le paysage où l'enrichissement en sels se fait par sédimentation (Benchetrit, 1956 ; Durand, 1956 ; Boulaine, 1957 ; Durand, 1959 ; Aubert, 1976 ; Hydrotechnique corp., 1976 ; Daoud, 1993).

Il y a lieu de savoir qu'il s'agit là d'une forme d'apport qui est décuplée par les flux hydriques au niveau des zones inondables et/ou des dépressions ou des bas fonds.

Cet état de fait peut être jugé cohérent et plus logique dans son ensemble, du moment que la présence, l'abondance et la dynamique des sels dans les sols de la zone ont été souvent associés à l'aspect écoulement préférentiel de l'eau dû à l'effet topographique (Durand, 1956 ; Boulaine, 1957 ; Hydrotechnique corp., 1976 ; Daoud, 1993 ; Gherina *et al.*, 2008).

3.4.3. L'effet position topographique des profils

Comme étape clé, la reprise des données d'analyses des deux approches, sur fond du descriptif de localisation et de positionnement dans *le contexte environnant*, nous permet d'orienter un peu plus le traitement. La figure 34 qui illustre la localisation des profils comparés et le sens de circulation de l'eau en *EI* montre :

- Dans un premier cas, "*l'effet localisation des profils comparés et le sens de circulation de l'eau*" dans la zone. La topographie ou le microrelief (même faible) semble induire deux sens spécifiques de circulation (préférentiel) de l'eau :
- une circulation qui s'oriente des parcelles où se situent les 3 profils *A495, B163 et B217* (*altitude comprise entre 47 et 48m*) vers celles des profils *A567 et A503* (*altitude inférieure à 47m*) et,

- une circulation qui s'oriente du profil A567, d'une part vers le profil A503, d'autre part vers une zone d'évacuation localisée un peu plus haut au Nord Ouest.

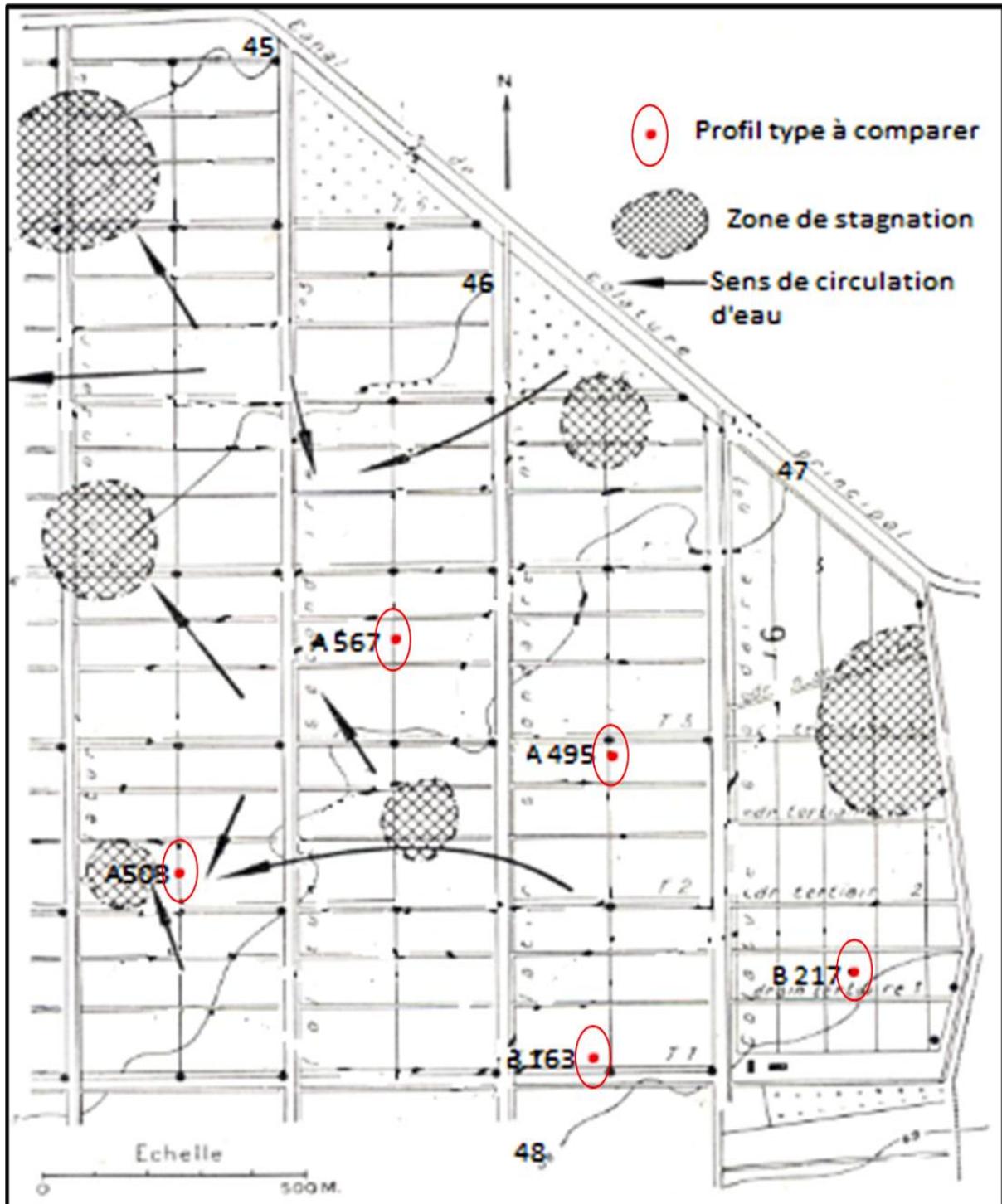


Figure 34. Le sens de circulation de l'eau et les zones de stagnation observée en EI (Ait-Mechedal, 2014).

Il y a lieu de noter que pour ce second point, les deux prolongements, au mode de circulation de l'eau, sont présentées graphiquement comme deux zones probables de stagnation ou d'accumulation d'eau.

Dans l'ensemble, les résultats atteints confirment que la localisation de chaque profil joue un rôle déterminant dans son fonctionnement salin. Ainsi, les profils localisés dans la partie relativement haute de la zone d'étude se sont désalinisés entre *E1* et *E2*, alors que les profils localisés plus bas (1 à 2 m de dénivelé), sont, quant à eux, enrichis en sels.

- Dans un deuxième cas, et au vu de l'état d'abandon du canal principal d'évacuation et des drains (*à ciel ouvert*) régulateurs internes et externes (Figure 34), la non efficacité du réseau de drainage dans :

- l'évacuation (par lixiviation) et l'élimination des sels des sols de la zone, principalement les *solums* des profils caractéristiques *A567* et *A503* et,
- l'abaissement du niveau de la nappe, plus particulièrement dans les différentes zones probables de stagnation ou d'accumulation d'eau (localisation *Nord Ouest* et *Sud Ouest*).

Pour le second point, les données hydrologiques de Durand (1956) et AGID (2004) ont démontré la véracité de l'*effet fluctuant* d'une nappe près de la surface, dont la profondeur peut varier, selon les saisons, entre 1 à 2,5m de la surface du sol.

Toutefois, le fonctionnement hydrologique du sol à l'issue de la mise en place par AGID (2004) d'un réseau de drainage qui comprend *des drains enterrés et à ciel ouvert, des collecteurs enterrés et à ciel ouvert, des regards visibles et des bouches de décharges* (figure 35b), laisse entrevoir un scénario beaucoup plus complexe (figure 35a). Un scénario lié à l'effet combiné entre le réseau à ciel ouvert (*E1*) et le réseau mixte actuel (*E2*), selon les normes requises (FAO, 2001 ; N.S.W.G., 2004 ; Mermoud, 2006 ; Cissé, 2012), qui n'a pas été atteint. Les effets négatifs de ce dysfonctionnement et son ajustement aux conditions du milieu s'identifient comme suit :

- Apparition de nouvelles zones de stagnation (*quatre zones*), conditionnées par le non respect de l'*effet déclivité pente* (orientation *Nord*) (figure 35a).
- Obstruction d'un nombre important de regards (partie aval du périmètre) par les écoulements de masse du flanc *Sud* (*indications en rouge* figure 35a, 35b).

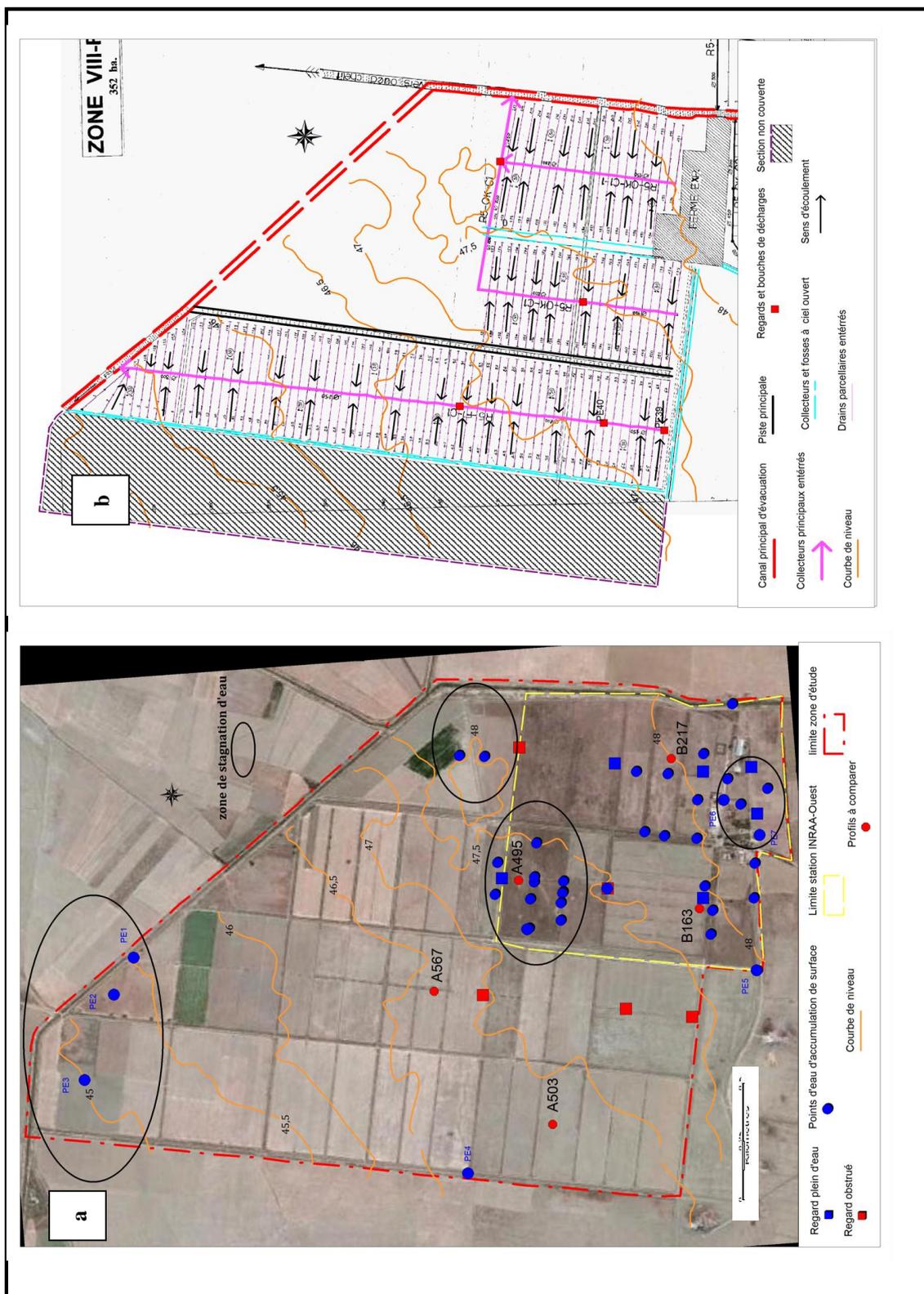


Figure 35. Les zones de stagnation observées en temps actuel.
 (a) Représentation d'une situation extrême sur le visuel des parcelles,
 (b) Schéma-plan du réseau proposé par AGID (2004).

- Apparition d'engorgements fréquents et néfastes sur la surface du sol, particulièrement après des pluies torrentielles,
- Endoréisation du fonctionnement du système à différents degrés : les niveaux conjugués des eaux de surfaces et de profondeurs, et aussi les sels ne sont pas évacués vers l'extérieur (*indications en rouge et en bleu figure 35a,b*).

Ce constat d'ensemble, lié aux caractéristiques du réseau de drainage (mixte) et les conditions spécifiques du milieu, suggère une multitude d'hypothèses pour l'expliquer :

- L'état des canaux principaux ouverts et enterrés et des nouveaux drains enfouis (par rapport aux anciens) est insuffisante pour assurer l'évacuation des couches profondes du sol et le mouvement contrôlé des eaux.
- La nature argileuse du sol et l'instabilité structurale peut influencer aussi en réduisant le lessivage des sels dans ces mêmes couches, et même son extension dans les autres couches des profils.
- Genèse d'écoulements préférentiels de l'eau selon les conditions de milieu pouvant être observées.
- Une perturbation du cycle hydrologique de la nappe peu profonde (Grünberger, 2015). Ce qui se traduit par :
 - une dynamique ou une cinétique d'équilibre des sels ; *processus de dissolution-recristallisation régie toujours par les flux d'eau*, au niveau des parcelles des trois (03) profils A495, B163 et B217 et,
 - une dynamique de déséquilibre au niveau des deux autres emplacements de profils A503 et A567, qui repose sur la combinaison des effets (Mtimet et Hachicha, 1993 ; Lahlou et al., 2003 ; Vaughan et al., 2005 ; Hachicha, 2007 ; Yu et al., 2014) :
 - de niveau et d'écoulement préférentiel des apports latéraux chargés en sels (à partir des profils en localisation plus élevée) et,
 - de processus d'évaporation intense, qui ajuste une redistribution interne (par oscillation et par capillarité) de la salinité selon une concentration orientée vers les horizons supérieurs.

Conclusion

Le présent chapitre démontre le potentiel de l'approche *quantitative-statistique* combinée aux concepts *de la cartographie de base et des sciences géomatiques* dans la caractérisation, la distribution et le suivi du phénomène de salinisation dans les sols.

L'idée recherchée cible l'observation, la caractérisation et l'évaluation de la progression du phénomène de salinisation des sols dans la région d'El Hamadna (Bas-Cheliff) sur une durée de plus de cinquante ans, c'est-à-dire sur la période 1956 (*E1*)-2012 (*E2*).

Les différentes étapes de ces traitements ont nécessité la valorisation et l'exploitation de onze profils types.

Les principaux résultats obtenus montrent que le profil moyen pour l'ensemble des données de *E1* et *E2* est bien pourvu en sels. La valeur moyenne de EC_e est supérieure à 15 dS/m avec un C.V.

L'examen des autres paramètres statistiques (*min, max, écarts de valeurs, etc.*), permet, d'une part de confirmer la forte variation ou hétérogénéité des valeurs de salinité observées et, d'autre part, de mettre en évidence une tendance à l'accroissement de ces valeurs sur fond d'élargissement des classes structurantes de ce processus quand on s'oriente de *E1* vers *E2*.

La structure des niveaux de salinité identifiée sur les deux études de référence est organisée comme ci-après :

- $C5 > C4 > C3$ pour *E1*.
- $C5 > C4 > C3 > C1 > C2$ pour *E2*.

Le traitement des fréquences de distribution des classes de salinité pour l'ensemble des données montre une nette prédominance des classes des *sols salés (C4) et très salés à hyper-salés (C5)* pour *E1* et *E2*. En effet, les données obtenues sur les deux périodes traduisent une très légère tendance à la stabilisation des effectifs affectés par ces deux classes de salinité. Les proportions obtenues sont respectivement de 75 % en *E1* et 68 % en *E2*.

Les autres proportions observées semblent correspondre à un élargissement (de représentativité) des classes de salinité des sols avec le temps. Ainsi, il est noté un passage de la classe des *sols moyennement salés (C3)* avec 25% de l'effectif en *E1* vers une combinaison à trois classes de salinité en *E2*, avec :

- La classe des *sols moyennement salés (C3)* pour seulement 15% de l'effectif des observations.
- L'apparition des classes des *sols non salés (C1)* et des *sols peu salés (C2)*, avec respectivement 11% et 6% des effectifs.

La caractérisation des éléments dissous dans la solution du sol (11 éléments) représente le complément d'information sur le phénomène de salinisation entre $E1$ et $E2$. Les résultats indiquent que, mis à part le pH_e qui est très homogène ($C.V. < 4\%$), toutes les autres variables considérées présentent des $C.V.$ très élevés ($> 30\%$).

L'étude des interactions entre les niveaux de salinité et certains paramètres de la solution du sol (mesurés et estimés) a mis en évidence une évolution significative positive entre la majorité des paramètres pour la durée temporelle référence et EC_e . Une cinétique évolutive qui semble reposer sur le comportement ou la réaction de chaque élément en fonction des conditions du milieu. L'intensité de l'ordre d'interaction s'identifie par les séquences structurantes suivantes :

- $Na^+ > Cl^- > SO_4^{2-} > Ca^{2+} > ESP_{eq} > Mg^{2+} > SAR$ pour la séquence de $E1$.
- $Na^+ > Cl^- > Ca^{2+} > ESP_{eq} = SAR > Mg^{2+} > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ pour la séquence de $E2$.

Connaissant l'association existentielle qui se met en place, en milieu salés, entre EC_e et le sodium échangeable (ESP), donnant lieu à priori à une sodisation avérée du complexe adsorbant, il a été décidé d'introduire dans notre étude une évaluation analytique des taux de l' ESP_{eq} .

Dans ce sens, le calcul des fréquences de distribution pour l'ensemble des données dénote la prédominance des classes de sodicité de tendance *grave (C3) à très grave (C4)*. Les niveaux observés sont passés d'un effectif avoisinant 53% en $E1$ vers un effectif avoisinant 89% des échantillons en $E2$. Les taux restant correspondent proportionnellement à l'effet des classes de sodicité de *tendance légère à modérée*. Chaque structure de données s'appuie sur un schéma de classification bien spécifique :

- $C2 > C3 > C4 > C1$ pour $E1$.
- $C4 > C3 > C2 = C1$ pour $E2$.

Les traitements statistiques sont également abordés par horizons caractéristiques, comme identifiés précédemment, sans distinction d'épaisseur. Les résultats obtenus montrent que la structuration des niveaux de EC_e semble adopter une certaine représentativité de la distribution de la structure statistique des données de l'approche globale. Ainsi, il ressort que la plupart des profils moyens de chaque matrice d'étude sont assez bien pourvus en sels et que les écarts des

valeurs des taux de salinité par couche s'identifient par des niveaux de variations ou d'hétérogénéité assez importante ($CV > 30\%$) et une légère allure de tendance centrale.

Partant de cet aspect de distribution, et tout en y associant les principaux traits méthodologiques adoptés, il est possible d'observer que les valeurs de EC_e , apparentées aux deux cas de figure, semblent indiquer un schéma de variation des taux de salinité allant d'horizons *salés* vers des horizons *très salés à hyper-salés* (U.S.S.L., 1954), sur la base d'un *gradient d'accroissement morphologique descendant spécifique et temporel*.

Le calcul des fréquences des classes de salinité par horizons fixés (*surface (h1), sub-surface(h2), moyen profil (h3-h4), bas-profil (h5-h6)*) pour les deux études de référence, a permis non seulement de confirmer cet aspect de mise en place spécifique et de répartition pour les données de salinité, mais aussi de reproduire au réel le schéma d'évolution temporel de la salinité dans les profils :

-D'une part, il existe un effet *de surface* et de *sub-surface* qu'on peut assimiler à une forme de désalinisation. Les principales caractéristiques identifiées sont :

- l'augmentation des effectifs de la classe *des horizons non salé (C1)* et *des horizons peu salés (C2)*,
- la diminution importante des effectifs de la classe *des horizons salés (C4)* et la disparition de la classe *des horizons très salés à hyper-salés(C5)* et,
- la présence soutenue de la classe des horizons moyennement salés (*C3*) *sous l'allure d'une phase intermédiaire ou de transition*.

- D'autre part, il est considéré un effet *de moyen* et *de bas-profil*, donnant lieu à une forme d'accumulation de sels et donc d'accroissement de la salinité avec la profondeur. La principale spécificité accordée est une emprise des classes *des horizons salés (C4)* et *des horizons très salés à hyper-salés(C5)*, accompagnée d'une tendance de diminution, voire de disparition, malgré de légères fluctuations dans les niveaux *h3* et *h5*, de la classe *des horizons moyennement salés (C3)*.

Comme pour le traitement effectué pour l'analyse globale, il ressort de cette représentativité « des classes de salinité » la même organisation "structurante" des fréquences de distribution :

- $C5 > C4 > C3$ pour *E1*,
- $C5 > C4 > C3 > C1 > C2$ pour *E2*.

L'évaluation des fréquences de distribution de l' ESP_{eq} a été abordée (aussi) par horizons fixés (*surface, sub-surface, moyen profil, profondeur*), toujours pour les deux études de référence.

Les résultats obtenus révèlent une grande adéquation avec les observations des données du traitement globale. Ainsi, il ressort l'aspect accroissement « *excessif* » avec le temps (plus de 50 ans) des niveaux de sodisation du complexe adsorbant des sols d'El Hamadna d'une part, et, d'autre part, l'importance et l'intensité évolutive de ce processus en fonction d'un gradient de profondeur propre aux différents profils.

Allant dans le même sens que l'évaluation effectuée pour l'approche globale, il ressort la mise en place des séries structurantes suivantes :

- $C2 > C3 > C4 > C1$ pour *E1*.
- $C4 > C3 > C2 = C1$ pour *E2*.

Le profil de distribution des sels révèle la présence de deux types de profils salins, les profils salins de *type B* et de *type D*. Ces profils sont caractérisés par un gradient de salinité descendant, où seule la localisation du niveau de salinité maximum diffère.

Les faciès chimique des solutions de sols présentent des variations sur l'ensemble de la durée temporelle d'étude. Les données d'observation du diagramme de Piper expriment la mise en place d'une dynamique évolutive allant de cinq types de faciès chimiques en *E1* vers trois types de faciès chimiques en *E2*.

La grande part des solutions a évolué vers le faciès chloruré sodique. La proportion est passée d'un taux d'environ 67% en *E1* à plus de 92% du total des échantillons en *E2*. Le reste est composé du faciès de type chloruré magnésien (2%) et du faciès chloruré sans dominance ($\approx 6\%$).

Les changements observés dans le milieu indiquent la disparition des faciès de types *sulfaté sans dominance de l'un des cations, sans dominance de l'un des anions – sodique*, et enfin le type *sans dominance de l'un des anions - sans dominance de l'un des cations*,

L'évolution temporelle de la salinité des sols entre *E1* et *E2*, réalisée sur la base d'une approche mixte "*qualitative-quantitative*" comparative entre les données *inter* et *intra* profils salins des deux périodes références, est très variable. Dans l'ensemble, la comparaison des profils salins révèle la présence de trois situations :

- La salinité a augmenté dans tout le profil *A503* en *E2* par rapport à *E1*.

- La salinité a diminué en surface et elle a augmenté en profondeur en *E2* par rapport à *E1* dans le profil *A567*.
- La salinité a diminué dans tout le profil en *E2* par rapport à *E1* dans les profils *A495*, *B217* et *B163*.

En somme, les résultats obtenus montrent que :

- La salinité des sols de la région d'EL Hamadna, dans le Bas-Cheliff, est très hétérogène. Elle peut atteindre des niveaux de salinité très élevés et présente un faciès dominant *chloruré sodique*.
- L'évolution de la salinité des sols sur une période temporelle de plus de cinquante ans (56ans) met en évidence l'impact de l'inefficience du drainage (naturel et artificiel) et de l'ambiance physico-chimique caractéristique de la solution du sol sur le fonctionnement du milieu ciblé.

Les aspects impactés par les potentiels changements sont :

- l'équilibre des rapports *sol-eau*,
- la dynamique des éléments chimiques en solution et l'évolution des faciès chimique d'appartenance et,
- le déterminisme, le contrôle du sens de variation et de l'intensité du niveau de salinité des sols.

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.

« Ce que l'on fait dans sa vie résonne dans l'éternité »

Dixit Maximus

(Le général-Gladiateur)

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

Les anciennes cartes ont une valeur scientifique, culturelle et artistique (Hongye, 2009). Elles doivent être considérées à la fois comme sources de données géographiques et comme faisant partie du patrimoine cartographique (Kyriazi et *al.*, 2010). La préservation de ce patrimoine est un processus continu dont les nombreuses données caractéristiques doivent être intégrées, enregistrées, acquises et analysées (Cheng et *al.*, 2010).

A l'heure de l'émergence de nouveaux domaines de la science et de la technologie (Daniil et *al.*, 2014), il y a beaucoup de spécialistes qui tentent de protéger, rechercher et recycler des anciennes cartes grâce à la numérisation (Hongye, 2009). En cela, ils cherchent à remettre la cartographie et ses produits à leur place distincte en tant que produits importants de l'intelligence et du *savoir-faire* humains (Livieratos, 2008). L'expression "**Patrimoine cartographique**" est entrée officiellement dans le glossaire de la communauté internationale de cartographie en 2005 (Livieratos, 2008 ; Kyriazi et *al.*, 2010). Maintenant, il est possible de dire qu'elle est ancrée dans l'immense domaine des technologies numériques modernes de l'information et de la communication (Livieratos, 2008 ; Miletic-Drder, 2008).

L'utilisation des nouvelles technologies ouvre de nouvelles perspectives dans la préservation et la valorisation de tout patrimoine cartographique. Cela se rapporte à l'exploitation de nouvelles ressources digitales, sur fond de nouveau comportement méthodologique (Eimberck et Joly, 2008 ; Laroche et *al.*, 2011 ; Hellec et *al.*, 2015 ; Wallender et *al.*, 2020) et d'outils de traitements puissants (Tsioukas et *al.*, 2006 ; Daniil et *al.*, 2014) dans le processus d'acquisition, de gestion des données et d'exploitation d'anciens supports cartographiques (Dobos et *al.*, 2006 ; Jobst, 2009 ; Kyriazi et *al.*, 2010).

Ainsi, la protection et la préservation du patrimoine cartographique, qui est une nouvelle tendance dans la culture cartographique moderne (Livieratos et Myrdis, 1990 *in* Tsioukas et

al., 2006 ; Jobst, 2009), se positionne comme une amorce importante pour toute thématique de recherche locale, régionale et mondiale.

En science du sol, cette approche de conservation et de préservation de données et de supports cartographiques de différentes natures est également recherchée et requise. Les travaux réalisés durant ces cinquante dernières années le confirme (Webster et Burrough, 1972 ; King , 1984 ; Daoud, 1993 ; Djili, 2000 ; Walter, 2002 ; McBratney et *al.*, 2003 ; Walter et *al.*, 2006 ; Eimberck et Joly, 2008 ; Lagacherie, 2008 ; Boettinger et *al.*, 2010 ; Minasny et McBratney, 2010 ; Tanasă et *al.*, 2010 ; Grunwald et *al.*, 2011 ; Laroche et *al.*, 2011 ; Hartemink et *al.*, 2013 ; Hempel et *al.*, 2013 ; Lehmann et *al.*, 2013 ; Vayesse et Lagacherie, 2015 ; Minasny et McBratney, 2016 ; Arrouays et *al.*, 2017 ; Zhang et *al.*, 2017).

Il y a lieu de savoir que les données pédologiques héritées, comprenant principalement des cartes pédologiques basées sur des données d'observation ponctuelles de profils et sur des polygones, peuvent servir d'entrée à l'ensemble des procédures de la cartographie numérique des sols (Arrouays et *al.*, 2017 ; Zhang et *al.*, 2017).

La *cartographie numérique des sols (CNS)* ou *Digital Soil Mapping (DSM)* est actuellement considérée comme une sous-discipline de la science des sols (Minasny et MacBratney, 2016 ; Arrouays et *al.*, 2017 ; Zhang et *al.*, 2017). Cette branche d'étude se présente comme complémentaire, de façon opérationnelle, de la cartographie classique des sols (Lemercier et *al.*, 2013).

Par son application, la *CNS* permet de produire, quelle que soit l'échelle de travail, une information homogène assortie d'une estimation des incertitudes (Hempel et *al.*, 2013), de façon documentée et répétable (Lemercier et *al.*, 2013). Une forme de description ou de structuration que King et *al.* (2005) associent aux procédés ou aux conditions de mise en place d'un système d'information géographique (SIG) et de base de données spécifique (cas des bases de données prédictives).

Les techniques de fonctionnement appliquées en *CNS* sont nombreuses. Elles sont basées sur l'interpolation spatiale entre observations ponctuelles du sol (traitements statistiques, traitements géostatistiques) et/ou sur les relations *sol-paysage* (Zhu, 1999 ; Walter, 2002 ; MacBratney et *al.*, 2003 ; Dobos et *al.*, 2006 ; Minasny et MacBratney, 2010 ; Grunwald et *al.*, 2011 ; Lehmann et *al.*, 2013 ; Hempel et *al.*, 2013 ; Piikki et *al.*, 2017 ; Balkovič et *al.*, 2018).

Néanmoins, leur mise en œuvre reste tributaire, inévitablement, de la disponibilité de données pédologiques fiables et normalisées (Zhu et al., 2008 ; Minasny et MacBratney, 2010 ; Legrain et al., 2011 ; Lagacherie et al., 2013 ; Lehmann et al., 2013 ; Vayesse et Lagacherie, 2015).

Dans ce chapitre, deux objectifs distincts sont visés. Le premier s'inscrit dans la logique de traitement d'un héritage de données de sols, sur la base du principe de préservation et de gestion des informations sources. Le second consiste en une visualisation actualisée des limites et/ou des contours des unités de cartographie pédologique de l'étude *EI* dans les sols salés de la région d'El Hamadna, en appliquant les techniques d'interpolation spatiale des données utilisés par la géostatistique.

1. Matériels et méthodes

Les spécifications d'exploitation contemporaines n'imposent pas de méthodes pour produire les données, mais recommandent d'utiliser la meilleure méthode disponible en fonction des données d'entrée ou de l'information initiale (Hempel et al., 2013). Le modèle conceptuel de l'approche cartographique usuelle présente des données qui peuvent être récoltés et modernisés moyennant l'utilisation des techniques quantitatives contemporaines (Minasny et McBratney, 2016). La cartographie numérique des sols (*CNS*) peut jouer pleinement ce rôle. Elle donne lieu, généralement, à l'estimation et à la prédiction des classes de sol ou des propriétés de sol en utilisant, d'une part les données pédologiques disponibles et, d'autre part, les données spatiales des éléments du paysage (auxiliaires) en relation (de causalité ou non) avec les sols. Ces éléments du paysage sont identifiés par le terme "*covariables du sol*" (McBratney et al., 2003 ; Lagacherie et al., 2013). De manière pratique, l'application associative de cet ensemble fait référence à la formulation suivante :

$$(14) \quad S = f(s, c, o, r, p, a, n) + \varepsilon$$

Où s représente le sol, c représente les propriétés climatiques de l'environnement en un point donné, o correspond aux organismes vivants, r identifie le relief, p c'est le matériel parental, a l'âge ou le temps, n donne la position dans l'espace, et enfin ε l'erreur.

Les différentes sections du traitement qui seront abordées s'appuient essentiellement sur quelques principes de la *CNS*. Les axes méthodologiques proposés sont synthétisés successivement comme suit (Scull et al., 2003 ; Grunwald, 2006 ; Carré et Boettinger, 2008 ; Hempel et al., 2013 ; Lagacherie et al., 2013 ; Lehman et al., 2013 ; Minasny et McBratney ;

2016):

- Mise en application de l'approche *CNS* et de l'approche de formalisation d'une expertise pédologique existante.
- Etablissement d'une base de données adaptée aux spécificités de l'étude.
- Cartographie par technique d'interpolation spatiale de la salinité et des unités cartographiques caractéristiques.

1.1. Cadre général d'utilisation du concept

Le traitement *CNS* est appliqué sur les données générées lors de l'étape (d'actualisation) de l'approche classique de cartographie des sols de l'étude *EI* (Figure 14c).

1.2. Mise en application de l'approche *CNS*

Le principe retenu est que l'intégration des données de salinité dans le système de traitement projeté soit dictée par les critères cartographiques d'unités homogènes. L'originalité de cette démarche repose sur un traitement à deux voies. La première identifie une reprise de l'évaluation du phénomène de salinisation sur son aspect *unidimensionnel* ou *surfacique* d'époque. La seconde correspond à une mise en avant de l'aspect bidimensionnelle des données par l'exploitation de l'aspect *strate ou horizon*.

1.2.1. Formalisation d'une expertise pédologique existante

Dans ce qui suit, l'information recherchée et obtenue va jouer un grand rôle. La cartographie de la salinité est envisagée du point de vue des conditions du milieu, des points d'échantillonnage, du mode de répartition des unités ainsi que de la disponibilité des données.

En se référant aux aspects méthodologiques présentés dans les travaux de Leenhardt *et al.* (1994), Bui *et al.* (1999), Lagacherie et Voltz (2000), Lagacherie (2002), Moran et Bui (2002), Walter (2002), Legrain *et al.* (2011), Lemerrier *et al.* (2012), Lagacherie (2013) et Lehmann *et al.* (2007, 2013), il ressort que l'aspect retenu permet l'utilisation des valeurs de propriétés de profils représentatifs (dérivées) dans (d') une expertise pédologique de secteur de référence d'extension limitée (*profils représentatifs / unités de sols*) pour cartographier, également, une (ou les) propriété(s) de sol sur une zone à prédire ou de représentativité du secteur de référence. Pour plus de précision, il est généralement fait référence à une zone (d'expertise) qui ne doit ou ne peut contenir (au maximum) que des observations ou des descriptions morphologiques.

1.2.2. Spécificités méthodologiques établies

Par rapport au contexte de cette recherche, il y a lieu d'indiquer que la distribution des unités de sols a été reliée à deux sources de données en *EI*:

- L'expertise du pédologue avec une mise en avant des données descriptives des conditions du milieu : il est fait référence à l'aspect géomorphologique du terrain, à la nature de la roche mère, aux spécificités hydrodynamiques et hydrologiques des sols ; *ce qui a permis la distinction entre les sols à drainage naturel favorables et ceux soumis à des périodes d'engorgement ou d'inondation*, aux formes d'accumulations observées et à l'occupation du sol.
- Les données issues de la description et des analyses physico-chimiques des observations ponctuelles ou de profils types.

Pour le second point, il est utile d'indiquer que l'implantation des observations (profils) s'est effectuée selon la méthode appliquée en *EI*. L'ensemble des points d'étude ont été observés et décrits morphologiquement, puis échantillonnés.

1.2.2.1. Mise en place et type de données exploitées

Les données utilisées proviennent d'une base de données cartographique spécifique. Cette dernière a été générée à partir de la banque de données source, utilisée (précédemment) dans l'évaluation quantitative de la salinité des sols dans le Bas-Cheliff (*Chap.II, § 1.2.1.3.2*).

Pour la présente recherche, l'évaluation ne tient compte, comme donnée d'entrée, que de EC_e qui est un paramètre discriminant. La procédure de construction de la nouvelle table ou matrice de données spécifiques est résumée dans la figure 36.

En réalité, la mise en place traduit une forme d'ajustement (ou dérivation structurelle) de la banque de données (source) dans laquelle nous avons utilisé les onze profils types "**des unités de sols salés de référence (U.S.S.R.)**" de *EI*. Toutefois, pour les besoins de la procédure et des résultats qui en découleront, ces unités sont identifiées et notées sous la formulation "**d'unités de sols reconnues (U.S.R.)**".

La nouvelle matrice de données des "**U.S.R.**" ainsi obtenue et structurée sur la base d'un ajustement en ligne est composée de 350 horizons, issus de 70 points d'observations dont 11 profils pédologique.

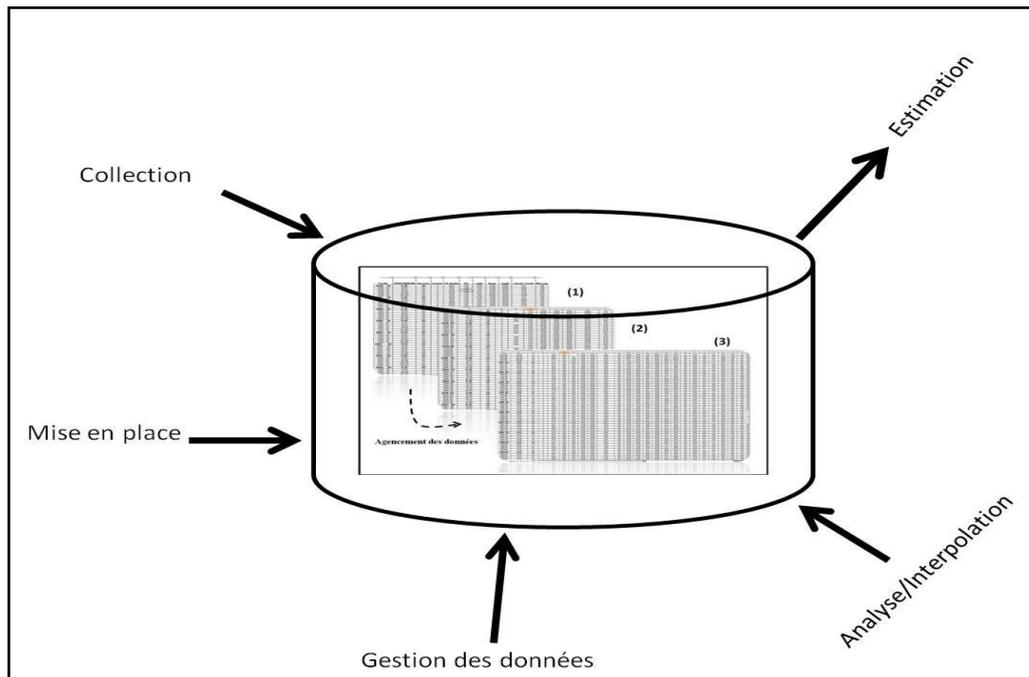


Figure 36. Mise en place de la table ou de la matrice de données spécifiques.

1.2.2.2. Grille d'interpolation et processus d'exploitation des données

Pour ce faire, nous avons opté pour un retour au schéma de la maille de prospection systématique pédologique (50-100m) de *EI* utilisé pour dessiner les contours et les plages cartographiques lors de la minute de terrain (figure 14a). Seulement, les données quantitatives qui seront associées cette fois aux points de la maille sont issues de la nouvelle matrice des "U.S.R."

La saisie numérique de l'ensemble des informations a été réalisée à l'aide du tableur Excel. Les différentes étapes de cartographie et de traitements de données ont été réalisées à l'aide de combinaison entre les logiciels *MapInfo* et *Arcgis 9.3*. Bien que cet exercice parait simple, la réussite de cette démarche méthodologique nécessite, inévitablement, le respect d'un certains nombres d'ajustements techniques. Les différents ajustements adoptés sont les suivants :

- Création et visualisation d'un support cartographique "*mixte*" (figure 37): Ce dernier s'identifie par la projection et/ou la superposition des points de la maille de projection source (figure 14a) sur la carte des sols définitive de *EI*(figure 14c).
- La mise en place et l'ajustement de la table de gestion de données avec l'ensemble des points d'identification.
- L'harmonisation et la fixation du nombre d'horizons à cinq couches par points d'observation.

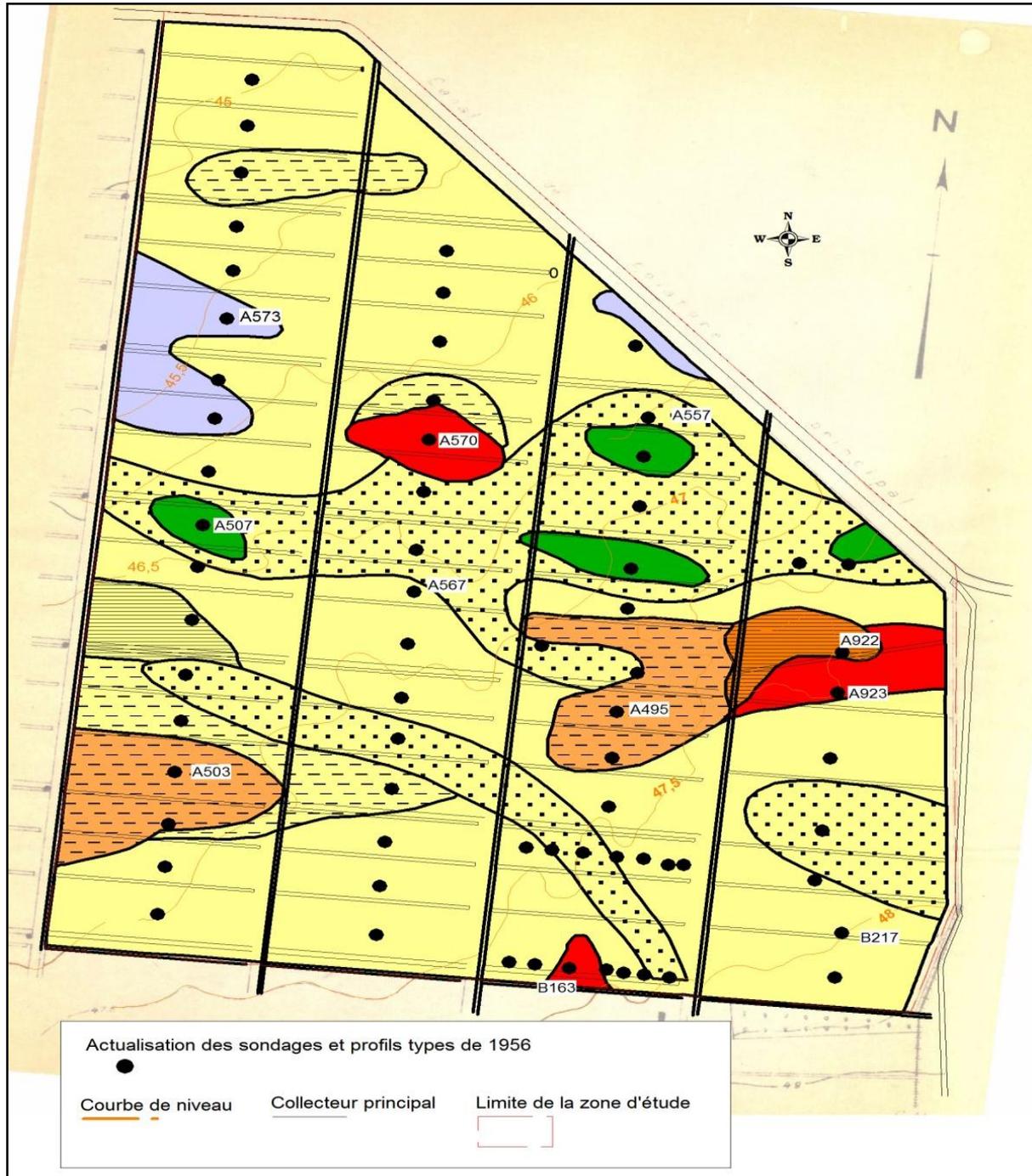


Figure 37. Projection des points de la maille de prospection de E1 par rapport aux groupes "U.S.R".

- L'ajustement et la validation des coordonnées géographiques pour chaque ligne d'information.
- L'application de la procédure d'affectation et d'intégration des valeurs de la propriété déterminante/discriminante, qui est EC_e , correspondant à l'unité de sol de référence et à son profil référence, en chaque point d'observations de la maille (Voltz et al., 1997 ; Lagacherie, 2002):
 - la combinaison et la représentation de ces données quantitatives par couche et par point d'étude ont été effectuées à l'aide de jeux de filtres (traitement informatique).
- Extraction et mise à jour de la nouvelle matrice de gestion des nouveaux points d'étude.
- Vérification et contrôle des données de la nouvelle matrice (implémentation et harmonisation).
- Tenir compte et évaluer le nombre de points d'étude où la donnée de mesure par affectation " EC_{aff} " (et par niveau) n'est pas disponible.
- Application du traitement d'interpolation spatiale aux nouvelles données.
- Le choix de la méthode d'interpolation (à utiliser) la plus efficace : « *Le but à atteindre est l'estimation et la visualisation de la couverture pédologique la plus cohérente et la plus représentative* ».

Il est utile de rappeler que ce choix est dicté par la densité de points de mesure (dans notre cas « valeurs affectées ») disponibles ou obtenues (Bourennane et King, 2003 ; Malherbe et Rouil, 2003 ; Webster et Oliver, 2007 ; Li et Heap, 2008 ; Hengl, 2009) :

- dans le cas où la densité de points de mesure est importante, il sera appliqué des règles simples d'interpolation et,
- dans le cas où la densité de points de mesure n'est pas importante ou si seulement peu de points de mesure sont disponibles, l'évaluation nécessitera l'usage de techniques de traitement complémentaires et plus sophistiquées, souvent regroupées sous le terme "techniques de modélisation spatiale".

1.3. Application de la technique d'interpolation spatiale pour la cartographie numérique des "U.S.R." de EI

Il est admis que la variabilité spatiale des propriétés des sols peut être cartographiée en utilisant l'une des techniques d'interpolation connues (Cambardella et Karlen, 1999 ; Bourennane et King, 2003 ; MacBratney et al., 2003 ; Minasny et MacBratney, 2010 ; Taghizadeh-Mehrjardi

et *al.*, 2014 ; Lehmann et *al.*, 2013 ; Hempel et *al.*, 2013 ; Gorji et *al.*, 2017 ; Piikki et *al.*, 2017 ; Balkovič et *al.*, 2018). Pour les spécialistes, il est question des techniques dont le fonctionnement permet l'estimation, aussi, de valeurs dans des points (endroits) où il n'y a aucune valeur (Burrough et McDonnell, 1998 ; Kyriakidis, 2004 ; Longley et *al.*, 2005 ; Marojou, 2007, Gorji et *al.*, 2017 ; Mei et *al.*, 2017) ou bien non échantillonnés (Kalivas et *al.*, 2002 ; Karydas et *al.*, 2009 ; Li et Heap, 2008 ; 2014).

Différentes méthodes d'interpolation spatiale ont été développées dans différents domaines pour différentes applications (Zhou et *al.*, 2007 ; Ikechukwu et *al.*, 2017). Toutefois, l'aspect facteur opérant ou contraignant, tels que la méthode d'échantillonnage, la taille de l'échantillon et les propriétés des données peut interférer sur les performances de ces méthodes (Li et Heap, 2008 ; Sarmadian et *al.*, 2014 ; Chhipa, 2018).

Ceci amène à dire qu'à priori, il est impossible de définir et de privilégier la performance technique d'un algorithme d'interpolation complet ou d'une méthode unique par zone (Zandi et *al.*, 2011 ; Sarmadian et *al.*, 2014 ; Gorji et *al.*, 2017). Ceci est dû au fait que chaque approche de prédiction et d'interpolation est basée sur la corrélation entre la structure spatiale et les caractéristiques ou les paramètres du sol à chaque endroit (McBratney et *al.*, 2003 ; Longley et *al.*, 2005 ; Li et Heap, 2008 ; 2014).

En sciences environnementales, il est fait référence à la disponibilité de plus de trente-huit (38) méthodes d'interpolations susceptibles d'être exploitées (Li et Heap, 2008 ; 2014). La synthèse des travaux réalisés par Malherbe et Rouil (2003), Webster et Oliver (2007), Hengl (2009), Li et Heap (2008, 2014) et Chhipa (2018) permet de les répartir en trois catégories de techniques:

- Les techniques d'interpolation classiques basées sur des algorithmes purement déterministes (*loi mathématique*). Leur mode de résolution des difficultés s'assimile à une évolution d'estimation qui est prévisible et ne laisse aucune chance au hasard. En contre mesure, l'obtention d'une telle configuration optimale nécessite la disponibilité de certains paramètres (en plus) pour la prédiction de valeurs.
- Les techniques d'estimation géostatistique qui s'appuient à la fois sur le caractère aléatoire et probabiliste du phénomène considéré, et sur l'existence d'une certaine structure spatiale entre les points. Cette propriété constitue un avantage majeur de ces techniques qui, en outre, permet d'intégrer des informations auxiliaires pour améliorer considérablement l'estimation et la

prédiction du phénomène dans le contexte spatial. Ces techniques sont scindées en deux groupes : *Mono-variables et Multi-variables*.

De règles générales, il est indiqué que ces techniques d'estimation s'appliquent (dans une large mesure) à des *variables régionalisées* qui prennent leurs valeurs dans des régions délimitées de l'espace appelées champs.

- Les techniques combinées relevant du domaine de l'apprentissage automatique et des approches hybrides. Une tentative réaliste pour mieux se coller à la réalité du terrain qui comprend une part stochastique non considérée par les différents modèles déterministes. Ce qui s'accorde à considérer l'exploitation conjointe des procédures précédentes pour augmenter l'efficacité du traitement.

A titre d'exemple, il est possible de citer *l'optimisation et l'exploitation des données spatio-temporelles, les prévisions et les estimations sur la base de modèles plus sophistiquées, la dérivation à partir de la régression-krigeage, le développement de packages d'optimisation d'échantillonnage de données (assimilation de données, l'adaptation statistique, l'exploitation de cartographies d'erreurs, etc..), la possibilité de générer des rapports d'analyse de données intelligente et l'utilisation de modèles de prédiction multi-temporels et multi-variés*.

En somme, il s'agit de techniques de résolution et développement purement mathématiques qui peuvent s'avérer très complexes, qui restent néanmoins réservés aux spécialistes.

1.3.1. Choix de la technique d'estimation

L'objectif de cette démarche est d'atteindre la représentation cartographique la plus cohérente et la plus caractéristique, sur fond d'approche moderne, des "U.S.S.R" de *E1*. La maille d'étude utilisée dans ce traitement comporte les données quantitatives adaptées des "U.S.R".

En tenant compte des aspects de robustesse et de facilité de mise en œuvre liées, en premier lieu, à la nature, à la composante et à la structure de la masse de la nouvelle matrice à exploiter, en second lieu, à la maniabilité et les facilitations de traitement et d'ajustement qui peuvent être proposées (voir plus haut), notre choix s'est porté sur l'utilisation de l'approche géostatistique.

Historiquement, ce sont les travaux de Matheron (1963) qui s'identifient comme la base théorique de la plupart des pratiques actuelles. Créée à l'origine pour prédire les probabilités de distribution des teneurs en éléments précieux dans l'exploitation minière et générer, ainsi, des

schémas d'échantillonnage optimaux pour les opérations d'extractions (Bourgine, 1996 ; Rajaonarison, 2015 ; Séguret et Emery, 2019), la science de la géostatistique s'est considérablement développée depuis plus de 50 ans en s'étendant à plusieurs domaines d'application (Ecker, 2003 ; Webster et Oliver, 2007 ; Li et Heap, 2008 ; 2014).

La géostatistique moderne est une branche en développement rapide de statistiques appliquées avec un vaste ensemble de méthodes et modèles pour l'analyse, le traitement et la représentation de données spatialement distribuées. L'utilisation de géostatistiques permet d'améliorer la fiabilité et la qualité des décisions basées sur des données distribuées spatialement (Meshalkina, 2007).

Elle est en réalité basée sur l'analyse statistique des corrélations spatiales d'un phénomène (Gascuel-Odoux et al., 1991 ; Bourgine, 1996 ; Malherbe et Rouil, 2003 ; Webster et Oliver, 2007).

En première approximation, la géostatistique permet d'établir une enquête sur la continuité spatiale entre les observations. Pour cela, elle propose une des méthodes les plus utilisées qui est la fonction de semi-variance. Cette fonction exprime *la variabilité quadratique moyenne observée entre une paire de valeurs mesurées à des emplacements d'échantillonnage voisins séparés par un vecteur de distance* (Zawadzki et al., 2011 ; Meilianda et al., 2012). Les valeurs de semi-variance sont ensuite tracées en fonction de la distance de séparation entre des paires de points d'échantillonnage et le tracé est généralement appelé un variogramme ou semivariogramme expérimental (McBratney et Webster, 1986 ; Zawadzki et al., 2011 ; Semar et al., 2019). L'estimateur du semi-variogramme est définie comme ci-dessous (Zawadzki et al., 2011 ; Yang et al., 2011 ; Bhunia et al., 2018) :

$$(15) \quad \gamma(h) = \frac{1}{2Nh} \sum_{i=1}^{Nh} (Z(x_i + h) - Z(x_i))^2$$

Où $\gamma(h)$ représente l'amplitude de la distance de décalage entre les deux emplacements d'échantillons, $N(h)$ représente le nombre de paires d'observation séparées par la distance h , Z identifie la variable aléatoire étudiée à l'emplacement x_i .

Additivement, la mise en place définitive du semivariogramme passe inévitablement par une phase d'ajustement à l'aide de modèles théoriques. Le but recherché à ce niveau est l'obtention d'une modélisation de la description de la variabilité spatiale de qualité et la plus représentative

visuellement pour pouvoir par la suite l'adapter à tout l'espace d'étude. Le *semi-variogramme* expérimental peut être ajusté par différents modèles théoriques, il est possible de citer *le Stable*, *l'Exponentiel*, *le Circulaire*, *le Sphérique*, *le Gaussien* et *le Quadratique rationnel*. Des modèles qui sont identifiés et définis par les paramètres clés de structure suivants (figure 38):

- *l'effet pépité (nugget effect) (C_0)*,
- *le seuil ou le palier ($C_0 + C$) et*,
- *la plage de dépendance spatiale ou la portée (a).*

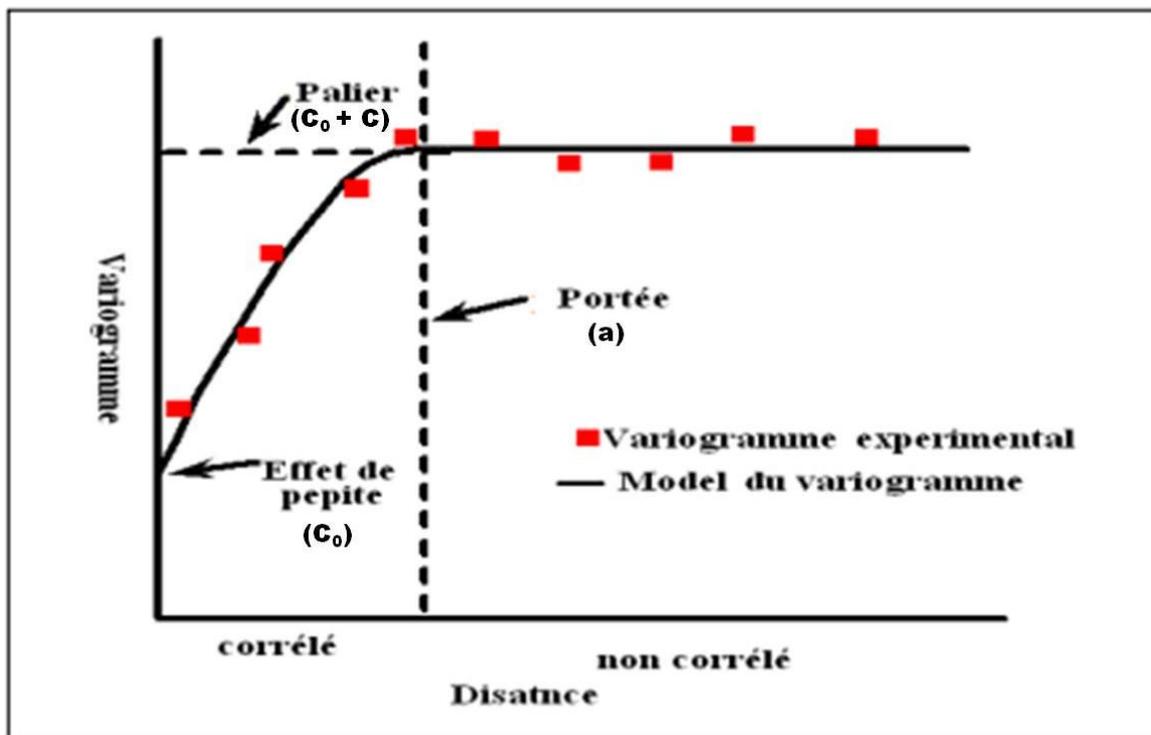


Figure 38. Représentation graphique du variogramme et de ses paramètres clés
(Boudries et Mezghache, 2019).

En second niveau d'évaluation, elle tire parti de la corrélation spatiale entre les observations pour :

- Prédire et estimer les valeurs des variables étudiées à des emplacements non échantillonnés à l'aide d'informations liées à une ou plusieurs variables qualitatives disponibles (Bilgili, 2013 ; Michot et *al.*, 2013 ; Bhunia et *al.*, 2018).
- Permettre l'obtention d'une cartographie de prédiction ou d'estimation du phénomène de qualité (Bourgine, 1996 ; Aşkin et *al.*, 2012 ; Kavianpoor et *al.*, 2012.).

L'outil utilisé dans cet exercice est le krigeage. Ce dernier, qui se présente comme une méthode d'interpolation spécifique à la géostatistique (Isaaks et Srivastava, 1989 ; Bourguine, 1996 ;

Goovaerts, 1999), est un estimateur statistique qui donne un poids statistique à chaque observation, de sorte que leur structure linéaire ne sera pas biaisée et présentera une variance d'estimation minimale (Kumke et al., 2005). L'estimateur du krigeage s'exprime comme suit :

$$(16) \quad Z(x_0) = \sum_{i=1}^{N_{nb}} \lambda_i Z(x_i)$$

Où $Z(x_0)$ représente la valeur estimée de la variable d'intérêt à l'emplacement non échantillonné x_0 , λ_i représente le poids attribué à la valeur connue de la variable à l'emplacement x_i déterminé sur la base du modèle de semi-variogramme, et n identifie le nombre d'observations voisines.

1.3.2. Evaluation et validation de l'approche de modélisation

Dans ce qui suit, il est question d'évaluer les observations obtenues et l'efficacité des différents traitements prédictifs "appliqués" sur fond de validation croisée. Les différents traitements et les étapes d'évaluation ont été réalisés à l'aide du module *Geostatistical Analyst d'Arcgis*. Les principales phases adoptées sont :

- L'appréciation de la qualité du meilleur modèle d'ajustement de la variabilité des valeurs de EC_{aff} . (entre estimées et prédites) sur la base du coefficient de corrélation significatif « $r = \sqrt{R^2}$ » le plus élevé, associé à la qualité des différents paramètres clés des semivariogrammes théoriques cités (Leenaers et al., 1990). Il y a lieu de savoir que :
 - la signification du test de corrélation est estimée à partir de la table ajustée des valeurs critiques du coefficient de corrélation (Annexe III), après comparaison entre le « **r observé** » et le « **r critique** » et,
 - dans le cas où il y a plus d'un modèle qui donne satisfaction, le choix définitif reposera sur la prise en compte des données d'évaluation de la qualité de l'interpolation (étape ci-dessous).
- La mesure de la performance de l'interpolation (avec possibilité d'utilisation dans le choix des modèles) correspondant à la qualité du krigeage fixé et au degré de l'erreur des cartes de prédiction ou d'estimation du phénomène est réalisée par estimation statistique de certains critères. Il s'agit de *l'erreur moyenne (ME)(17)*, la *moyenne de l'erreur type (ASE)(18)*, la *racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)(19)* et enfin la *racine carrée de l'erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)(20)*. Un ensemble de calcul dont l'obtention se base sur (Hu et al., 2004 ; Juan et al., 2011 ; Mahmoodifard et al., 2014 ; Arétouyap et al., 2016 ; Bergeron, 2016) :

$$(17) ME = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)]$$

$$(18) ASE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Z(x_i) - (\sum_{i=1}^n Z(x_i)/n))^2 \right]^{1/2}$$

$$(19) RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)]^2}$$

$$(20) RMSSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^n [Z^*(x_{Si}) - Z(x_{Si})]^2}$$

Où N est le nombre de points d'observation, $Z(x_i)$ est la valeur observée à l'emplacement i et $Z^*(x_i)$ est la valeur prédite ou estimée à l'emplacement i , $Z(x_{Si})$ valeur observée standardisée, $Z^*(x_{Si})$ valeur prédite standardisée.

Pour l'interprétation et la validation de ces différentes estimations, il est généralement fait référence aux considérations de choix suivantes :

- Des valeurs proche de zéro pour **ME**.
- Des valeurs de **ASE** et **RMSE** proches et les plus faibles que possibles.
- des valeurs de **RMSSE** proches ou égales 1.

En sciences du sol, il y a lieu de signaler que la géostatistique a été utilisée par différents auteurs tels que Gascuel-Odoux et al. (1991), Bourgault et al. (1997), Goovaerts (1998), Walter et al. (2001), Douaoui et al. (2006), Webster et Oliver (2007), Harvey et Morgan (2009), Diggle et al. (2010), Meirvenne et Meklit (2010), Delbari et al. (2011), Guarigliardi et al. (2012), Juan et al. (2011), Aşkin et al. (2012), Lark (2012), Bhunia et al. (2018) et Donahoo et al. (2020).

En synthétisant, la réalisation de la présente étude a nécessité les étapes suivantes :

- Création et exploitation d'une nouvelle matrice de données.
- Utilisation du logiciel **Arcgis 9.3** et de ses modules d'analyses spécifiques.
- Mise en forme, ajustement des données et leur intégration dans l'interface du logiciel.
- Adaptation de la structure des données par horizon ou strate d'étude.
- Réalisation de l'analyse géostatistique à l'aide du logiciel **Arcgis** sur la base de son mode *sélectif-automatique*. Les traitements réalisés sont les suivants :
 - statistiques descriptives de chaque horizon ou strate,
 - application de l'approche variographique et de modélisation,
 - application de la technique de krigeage et d'estimation,

- et en dernier, validation et choix des modèles les plus performants.

-Etablissement des cartes d'isovaleurs de salinité.

2. Résultats et discussions

Cette partie a pour objet de présenter les résultats de la visualisation actualisée des limites et/ou des contours des "unités de sols reconnues" extrait des données de *E1*. L'approche méthodologique adoptée se base sur les principes de traitements de la *CNS*.

La représentation des niveaux de salinité par *CNS* a été réalisée par l'application de la méthode de géostatistique, précisément avec le choix de la technique du *krigeage ordinaire (KO)*. Cette technique est considérée, d'une part comme la plus familière et la plus simple à utiliser (Pang et al., 2011 ; Tripathi et al., 2015) et, d'autre part, comme la plus habituellement utilisée pour interpoler et estimer la salinité des sols (Bilgili, 2013 ; Fourati et al., 2017).

L'ensemble de cette opération a été initié sur la base d'une matrice de données spécifique (§ 1.2.2.1.), structurée selon un tableau de type "combinaisons" *profils ou individus et horizons* en ligne et *variable* en colonne.

Il y a lieu d'indiquer que les ajustements et les traitements sur *EC_{aff}* ont été harmonisés et adoptés en respectant les cinq intervalles de profondeurs 0 à 30 cm (*EC_{aff} h1*), 30 à 60 cm (*EC_{aff} h2*), 60 à 90 cm (*EC_{aff} h3*), 90 à 120 cm (*EC_{aff} h4*) et 120 à 150 cm (*EC_{aff} h5*).

2.1. Statistiques descriptives des données de *EC_{aff}* de la nouvelle matrice

L'analyse descriptive des données de cette matrice est menée sur un effectif (actif) de 277 horizons, correspondants à 54 horizons *h1*, 65 horizons *h2*, 62 horizons *h3*, 65 horizons *h4*, et, enfin, 31 horizons *h5*. Les résultats obtenus sont énoncés dans le tableau XXI.

Il y a lieu d'indiquer que l'absence d'information n'a pas été mentionnée comme valeur nulle ($\neq 0$).

Tableau XXI. Paramètres descriptifs de *EC_{aff}* (dS/m).

Niveau	Par.	N Act.	Moy.	Méd.	Min.	Max.	Var.	Ec.-ty.	Asy.	Apl.	C.V
Par hrz.	<i>EC_{aff} h1</i>	54	12,6	12,3	6,1	30,8	14,2	4,0	2,1	10,0	30
	<i>EC_{aff} h2</i>	65	10,8	10,2	5,4	43,5	27,1	5,2	4,34	25,4	48
	<i>EC_{aff} h3</i>	62	14,1	12,0	6,9	43,0	82,3	9,1	2,1	3,4	64
	<i>EC_{aff} h4</i>	65	17,5	17,6	6,8	43,5	77,9	9,0	1,78	3,8	51
	<i>EC_{aff} h5</i>	31	12,3	8,6	5	31,2	87,4	9,3	1,5	0,5	76

Au vu des résultats obtenus, la procédure de cartographie (protocole et méthode) mise à contribution s'avère un choix judicieux pour restituer :

- Les différentes couches de l'information pédologique géoréférencées, et notamment l'intégration de l'aspect tridimensionnel dans l'étude (*Il s'agit d'une représentation simplifiée des profils de sol sous forme d'intervalles de profondeur invariants*).
- Un nouveau jeu de données de même ordre de grandeur que celui de la banque de données source (*Chap.II, §§ 3.1.1.1. et 3.1.2.1*). Ceci permet d'avoir une idée précise (à première vue sans sous-estimation ou surestimation de l'information) sur la situation de la zone au début des opérations de mise en valeur.
- Un schéma d'observation "spatiale" des données potentiellement précieux pour la cartographie du phénomène ce qui permettra d'assurer "avec précision" une réponse aux besoins et exigences de notre thématique globale.

Comme première lecture, il est possible d'avancer que les résultats observés sont adaptés et conformes aux connaissances préexistantes de la distribution des taux de salinité dans le contexte de cette étude. Analytiquement, il est possible de les résumer comme ci-après :

- Des taux générés de EC_{aff} variant dans la limite de gamme 5 - 43,5 dS/m selon la couche considérée.
- Un écart de valeurs entre les extrêmes de salinité qui reflète :
 - une très grande variabilité des taux de ce paramètre, allant d'amplitudes de 24 à plus de 36 dS/m et,
 - des profils salins, variant de la classe salée à hyper-salée et d'aspect descendant.
- Un effet valeurs de la variance (>14), de l'écart-type d'estimation (>4) et enfin du C.V. (> 30%) très important qui permet de confirmer l'expression des états de fait cités ci-dessus.

Néanmoins, l'observation des indicateurs de mesure de position et de la forme de répartition de ce jeu de donnée, respectivement moyenne - médiane et les paramètres d'asymétrie et d'aplatissement, laisse apparaître qu'une approche de normalisation (Harvey et Morgan, 2009 ; Croft et al., 2013 ; Jafarian Jeloudar et al., 2014) doit être appliquée pour l'optimisation des performances du rendu de l'approche géostatistique qui sera appliquée un peu plus loin dans ce chapitre. Ces anomalies sont :

- La tendance des valeurs médianes, qui restent légèrement inférieures aux moyennes (h_2 , h_3 et h_5) (figure 39), donnant lieu à une asymétrie positive de la forme de répartition (Annexe II)

de ces données générées.

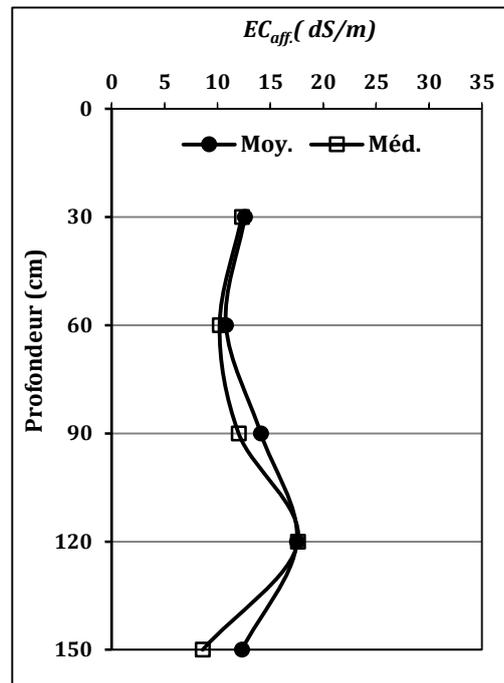


Figure 39. Représentation des indicateurs de tendance centrale pour EC_{aff} .

- Les paramètres d'asymétrie (Skew.) et d'aplatissement (Kur.) qui, sur la base du principe de la fourchette « -1 à $+1$ » montrent que les données ciblées ne répondent pas à une distribution de loi normale. Effectivement, ils développent une *légère déviation positive* ($>+1$).

2.2. La cartographie par interpolation des niveaux de salinité de $E1$

Après avoir obtenu les valeurs de EC_{aff} des différentes couches, et pour générer les cartes d'isovaleurs relatives à chacune des couches, il est nécessaire de procéder au préalable à l'analyse de la structure spatiale de ce paramètre. Le but principal de cette opération est la détermination du semivariogramme théorique qui s'ajuste le mieux au semivariogramme expérimental et qui sera utilisé pour estimer par *KO* les valeurs sur des points où l'échantillonnage n'a pas pu être effectué.

Il est utile d'indiquer que l'approche géostatistique a été réalisée sur des valeurs de EC_{aff} transformées en \log_{10} . Un ajustement analytique adopté pour stabiliser leur variance (étant une distribution qui ne répond pas à une loi normale).

2.2.1. Analyse variographique et modélisation de la structure spatiale

Cette approche se base sur l'étude variographique des données de EC_{aff} par horizon. Elle traduit l'exercice d'ajustement et de choix entre le variogramme expérimental (*VE*) et l'un (le plus

adéquat) des six modèles théoriques expérimentés : *Stable, Exponentiel, Circulaire, Sphérique, Gaussien et enfin Quadratique rationnel.*

A titre représentatif, la nuée variographique qui fournit le visuel graphique de toute paire de points de données (entre mesurées et estimées), intervenant dans le calcul de chaque variogramme de $EC_{aff.}$, est illustrée dans la figure 40.

2.2.1.1. Evaluation de la structure spatiale de hI

La prédiction de la structure spatiale de " $EC_{aff.}hI$ " est effectuée sur 54 mesures. Le variogramme expérimental omnidirectionnel (VEO) a été calculé sur une distance d'environ 1700m avec des PAS distants de 50 à 100 m. Les paramètres indicateurs des différents modèles théoriques qui sont ajustés à ce variogramme expérimental sont présentés dans le tableau XXII.

Tableau XXII. Paramètres clés des modèles d'ajustement théoriques pour hI .

Modèle	C_0 (dS/m)	C_0+C (dS/m)	C_0/C_0+C (%)	$a(m)$	Ani.	Dir.(°)	$|r_{obs}|$ ($|r_{théo}|$)
<i>Stable</i>	5,070	20,690	0,250	1334,81	1,54	143,08	0,400 _(0,269)
<i>Exponentiel</i>	0,000	18,670	0,000	1334,81	1,63	128,84	0,520 _(0,269)
<i>Circulaire</i>	1,511	19,260	0,079	1334,81	1,96	121,28	0,480 _(0,269)
<i>Sphérique</i>	0,188	18,440	0,010	1334,81	2,14	116,36	0,505 _(0,269)
<i>Gaussien</i>	5,070	20,690	0,245	1334,81	1,54	143,08	0,400 _(0,269)
<i>Quadratique rationnel</i>	0,017	16,630	0,001	1334,81	2,98	108,10	0,458 _(0,269)

A la lecture de ce tableau, il ressort que les six modèles présentés définissent des relations *représentatives et intéressantes* (Annexe IV- hI). Elles sont toutes significatives ($r_{obs} > r_{théo}$) à $\alpha = 0,05$ (ddl=52).

Néanmoins, en s'appuyant sur les critères de sélection fixés qui sont le coefficient de corrélation significatif le plus élevé et la qualité des paramètres de structure, il ressort que le modèle *exponentiel* peut être considéré comme l'ajustement le plus adapté. Il est approprié et logique *d'écarter* les ajustements restants de l'étape de modélisation.

De là, on est en mesure de dire que le VEO spécifique à la couche de surface est ajusté par un modèle *exponentiel avec un effet de pépité nul* (0 (dS/m)^2), un palier de $18,67 \text{ (dS/m)}^2$ et une portée de 1334,81 m (Figure 41).

L'autre trait important de l'approche d'ajustement du VEO est l'observation de l'aspect directionnel de la structure des données et l'évolution de la salinité. Dans ce sens, le traitement surfacique directionnel dans différentes directions, spécifiquement 0° - 45° - 90° et 135° , a montré

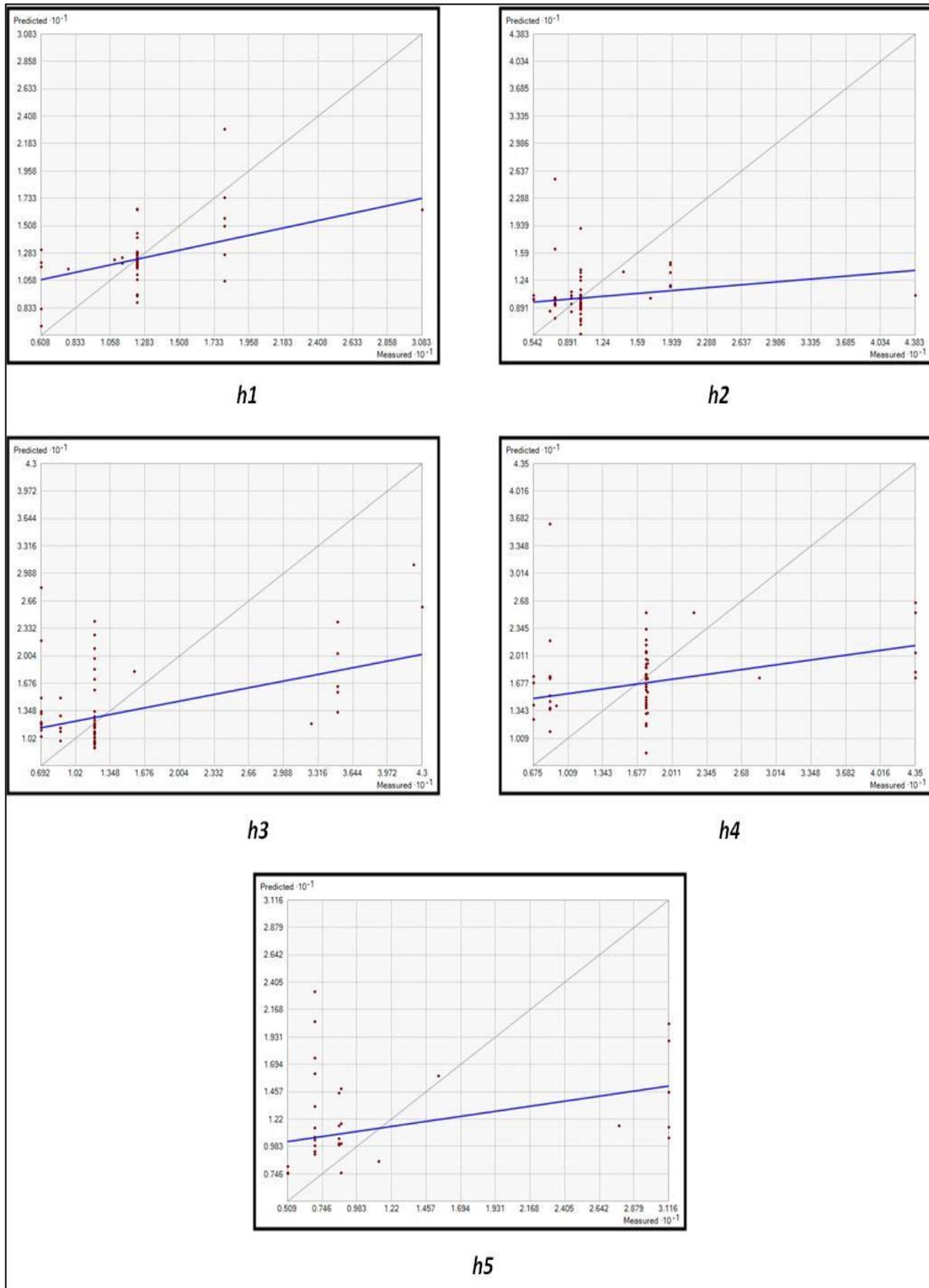


Figure 40. Illustration de la nuée de valeurs pour le calcul des modèles de semivariogramme par horizon.

que la portée effective et le seuil identifient un comportement anisotrope pour une tolérance angulaire de 45° , avec les caractéristiques suivantes :

- Egal à 1,63 selon la direction $128,8^\circ$.
- D'orientation *Sud Est*.

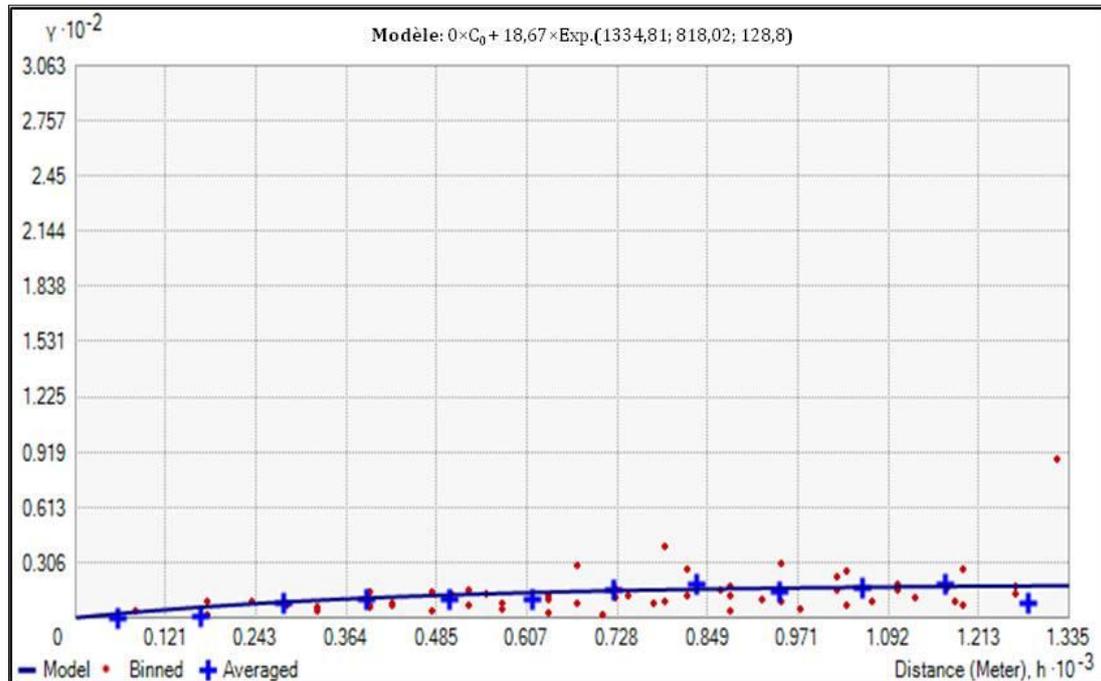


Figure 41. Variogramme de $EC_{eff. h1}$ et modèle d'ajustement.

2.2.1.2. Evaluation de la structure de $h2$

Pour ce niveau, le traitement de la structure spatiale des données de " $EC_{eff. h2}$ " est effectué sur 65 points de mesures. Le VEO a été calculé sur une distance d'environ 1700m avec des PAS distants de 50 à 100m. Les paramètres indicateurs des différents modèles théoriques qui sont ajustés à ce variogramme expérimental sont présentés dans le tableau XXIII.

Tableau XXIII. Paramètres clés des modèles d'ajustement théoriques pour $h2$.

Modèle	C_0 (dS/)	C_0+C (dS/m)	C_0/C_0+C (%)	$\alpha(m)$	Ani.	Dir.($^\circ$)	$|robs| (|r(théo)|)$
<i>Stable</i>	4,13	32,59	0,127	1360,07	2,27	119,70	0,328 _(0,245)
<i>Exponentiel</i>	0,00	34,27	0,000	1408,08	1,75	132,36	0,350 _(0,245)
<i>Circulaire</i>	3,60	34,25	0,105	1336,68	2,2	117,07	0,295 _(0,245)
<i>Sphérique</i>	2,28	33,81	0,067	1408,08	2,0	117,94	0,307 _(0,245)
<i>Gaussien</i>	9,17	32,78	0,279	1215,05	2,12	117,07	0,297 _(0,245)
<i>Quadratique rationnel</i>	0,032	32,29	0,001	1057,62	1,49	129,37	0,289 _(0,245)

L'analyse de ce tableau montre que l'ensemble des modèles notés définissent des ajustements *représentatifs et intéressants* (Annexe IV- $h2$). Ils sont tous significatifs à $\alpha = 0,05$ (ddl=63).

Toutefois, la prise en compte des valeurs du coefficient de corrélation le plus important et la qualité des paramètres de structure montrent que le modèle exponentiel semble être le plus adapté. Il est donc approprié et rationnel *de rejeter* toutes les autres formes d'ajustement et de modélisation (*stable, circulaire, sphérique, gaussien, quadratique rationnel*).

A partir de là, on peut dire que le VEO représentatif de la structure spatiale de $EC_{aff.h2}$ est ajusté par un modèle exponentiel avec un effet de pépité nul (0 (dS/m)^2), un palier de $34,27 \text{ (dS/m)}^2$ et une portée de $1408,08 \text{ m}$ (Figure 42)

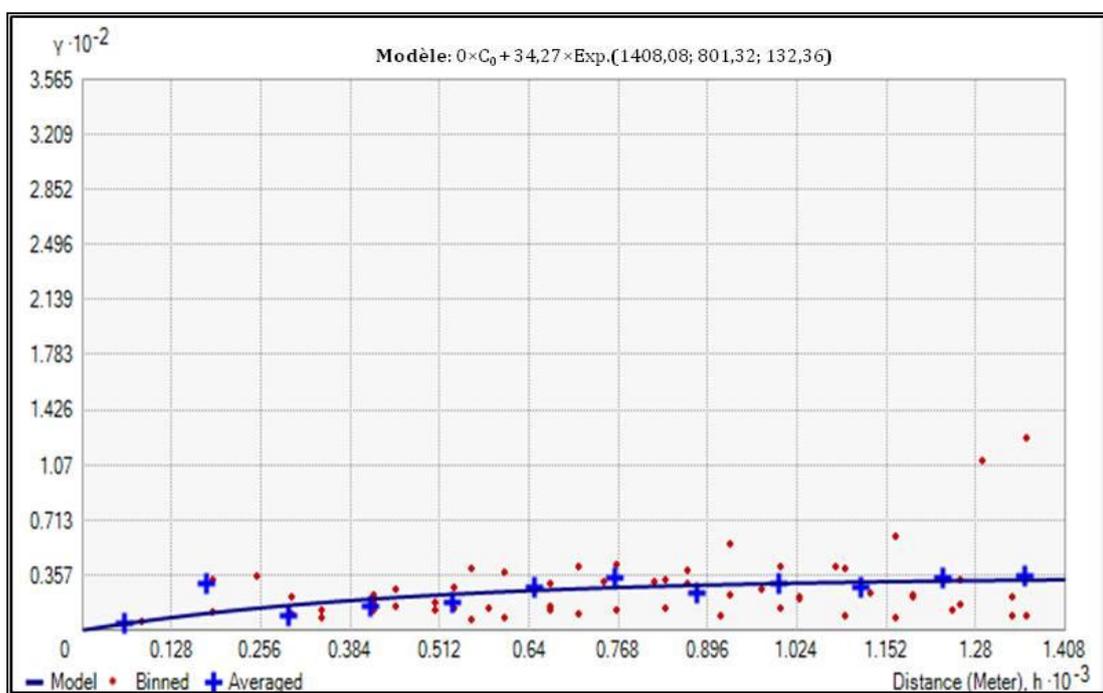


Figure 42. Variogramme de $EC_{aff.h2}$ et modèle d'ajustement.

L'examen de l'aspect directionnel de la structure des données et l'évolution de la salinité (selon les indications citées précédemment) traduit la mise en place d'un comportement anisotropique, pour une tolérance angulaire de 45° , avec les caractéristiques suivantes :

- Egal à $1,75$ selon la direction $132,36^\circ$,
- D'orientation *SudEst*.

2.2.1.3. Evaluation de la structure de $h3$

La détermination de la structure spatiale des données de " $EC_{aff.}$ " représentant la couche $h3$ est réalisée sur 62 mesures. Le VEO a été calculé sur une distance d'environ 1700m avec des points

de mesures distants de 50 à 100m. Les paramètres indicateurs des différents modèles théoriques qui sont ajustés à ce variogramme expérimental sont présentés dans le tableau XXIV.

Tableau XXIV. Paramètres clés des modèles d'ajustement théoriques pour h_3 .

Modèle	C_0 (dS/)	C_0+C (dS/m)	C_0/C_0+C (%)	α (m)	Ani.	Dir.( °)	| robs | (| r(théo) |)
<i>Stable</i>	42,76	107,28	0,398	997,27	2,07	106,87	0,413 _(0,250)
<i>Exponentiel</i>	0,00	105,32	0,000	997,27	2,37	125,68	0,471 _(0,250)
<i>Circulaire</i>	32,20	107,29	0,300	997,27	1,88	105,82	0,417 _(0,250)
<i>Sphérique</i>	28,92	105,61	0,274	997,27	1,78	104,76	0,435 _(0,250)
<i>Gaussien</i>	42,76	107,28	0,398	997,27	2,07	106,87	0,413 _(0,250)
<i>Quadratique rationnel</i>	0,101	101,11	0,001	948,65	2,98	143,78	0,465 _(0,250)

Idem que pour les deux couches précédentes, les résultats obtenus à ce niveau montrent que c'est le modèle *exponentiel* qui semble être le plus adapté.

En conséquence, le *VEO* caractéristique de la structure spatiale de $EC_{aff.h_3}$ est ajusté par un modèle *exponentiel avec un effet de pépité nul* (0 (dS/m)^2), un palier qui tend vers $105,32 \text{ (dS/m)}^2$ et une portée égale à $997,27 \text{ m}$ (Figure 43)

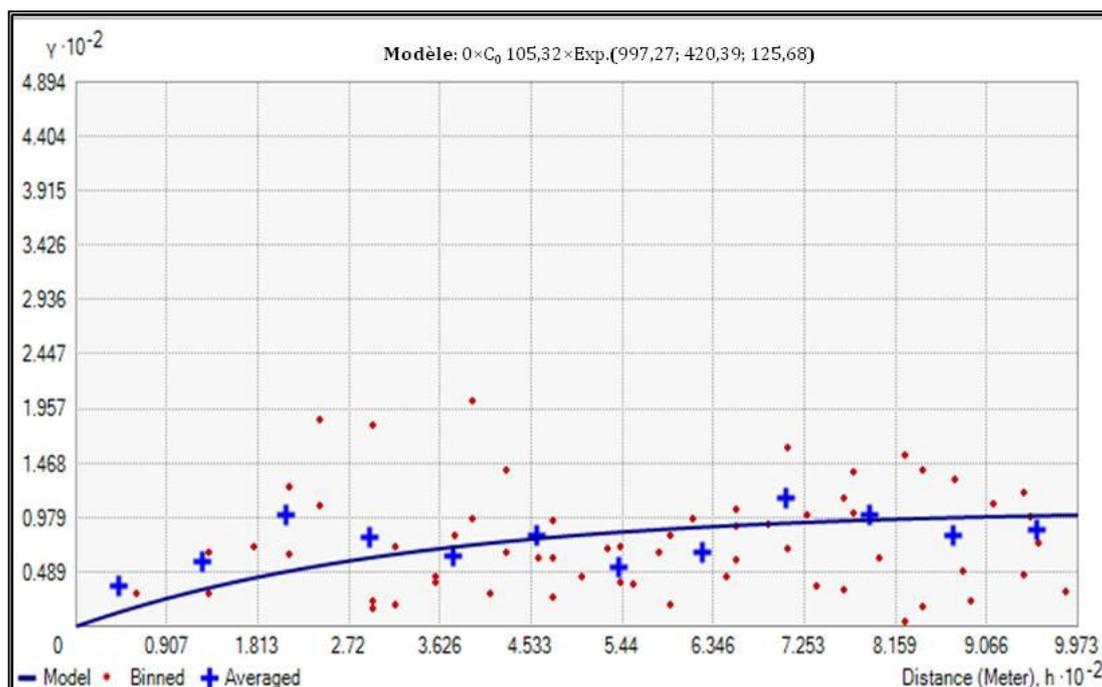


Figure 43. Variogramme de $EC_{aff.h_3}$ et modèle d'ajustement.

L'expression analytique de l'aspect directionnel de la structure des données de salinité expose le déroulement d'un comportement anisotrope, pour une tolérance angulaire de 45° , égal à $1,75$ selon la direction $125,68^\circ$ et une orientation *SudEst*.

2.2.1.4. Evaluation de la structure de $h4$

L'étude de la structure spatiale des données de " $EC_{aff.}$ " identifiant la couche $h4$ est opérée sur 65 mesures. Le VEO a été calculé sur une distance d'environ 1700m avec des points de mesures distants de 50 à 100m. Les paramètres indicateurs issus des modèles théoriques appliqués pour l'ajustement sont présentés dans le tableau XXV.

Tableau XXV. Paramètres clés des modèles d'ajustement théoriques pour $h4$.

Modèle	C_0 (dS/)	C_0+C (dS/m)	C_0/C_0+C (%)	α (m)	Ani.	Dir.( °)	| robs | (|$r_{(théo)}$|)
<i>Stable</i>	0,092	92,11	0,001	292,2	1,80	147,48	0,408 _(0,245)
<i>Exponentiel*</i>	0,00	92,46	0,000	380,07	1,37	110,91	0,412 _(0,245)
<i>Circulaire*</i>	0,00	90,56	0,000	288,28	1,43	141,16	0,412 _(0,245)
<i>Sphérique*</i>	0,00	90,3	0,000	318,96	1,41	139,74	0,412 _(0,245)
<i>Gaussien</i>	0,092	92,11	0,001	292,2	1,80	147,48	0,408 _(0,245)
<i>Quadratique rationnel</i>	0,095	95,11	0,001	380,07	1,06	120,41	0,288 _(0,245)

A partir de ce tableau, il est clair que les différents modèles notés définissent des ajustements représentatifs et intéressants.

Ceci dit, la prise en compte et l'intégration de la donnée "*conditions de sélection*" nous permet de réduire le nombre des ajustements, les plus adaptés, à trois modèles (*). Ce qui correspond aux modèles *exponentiel*, *circulaire* et *sphérique* (Figure 44a,b,c). En application méthodique, le VEO des données de $EC_{aff.h4}$ est ajusté successivement à ces trois modèles. Les paramètres appliqués sont :

- Un effet de pépite nul (0 (dS/m)^2) pour l'ensemble.
- Des paliers respectifs d'environ 92,46, 90,56 et 90,3 (dS/m^2).
- Des portées respectives d'environ 380,07, 288,28 et 318,96 m (Figure 44a,b,c).

L'expression analytique de l'aspect directionnel identifie la mise en place dans les trois cas de figure (a,b,c) d'un comportement anisotrope, pour une tolérance angulaire de 45 :

- Egale à 1,37, 1,43 et 1,41 selon les directions respectives de $110,91^\circ$, $141,16^\circ$ et $139,74^\circ$.
- Une orientation *EstSudEst* à *SudEst* par rapport aux données du périmètre.

Si on tient compte de cet état de fait, il est évident que le choix du VEO représentatif de la structure spatiale de $EC_{aff.h4}$ va dépendre de l'estimation statistique des erreurs de prédiction ou d'estimation de la qualité de l'interpolation par KO par rapport à chaque modèle testé.

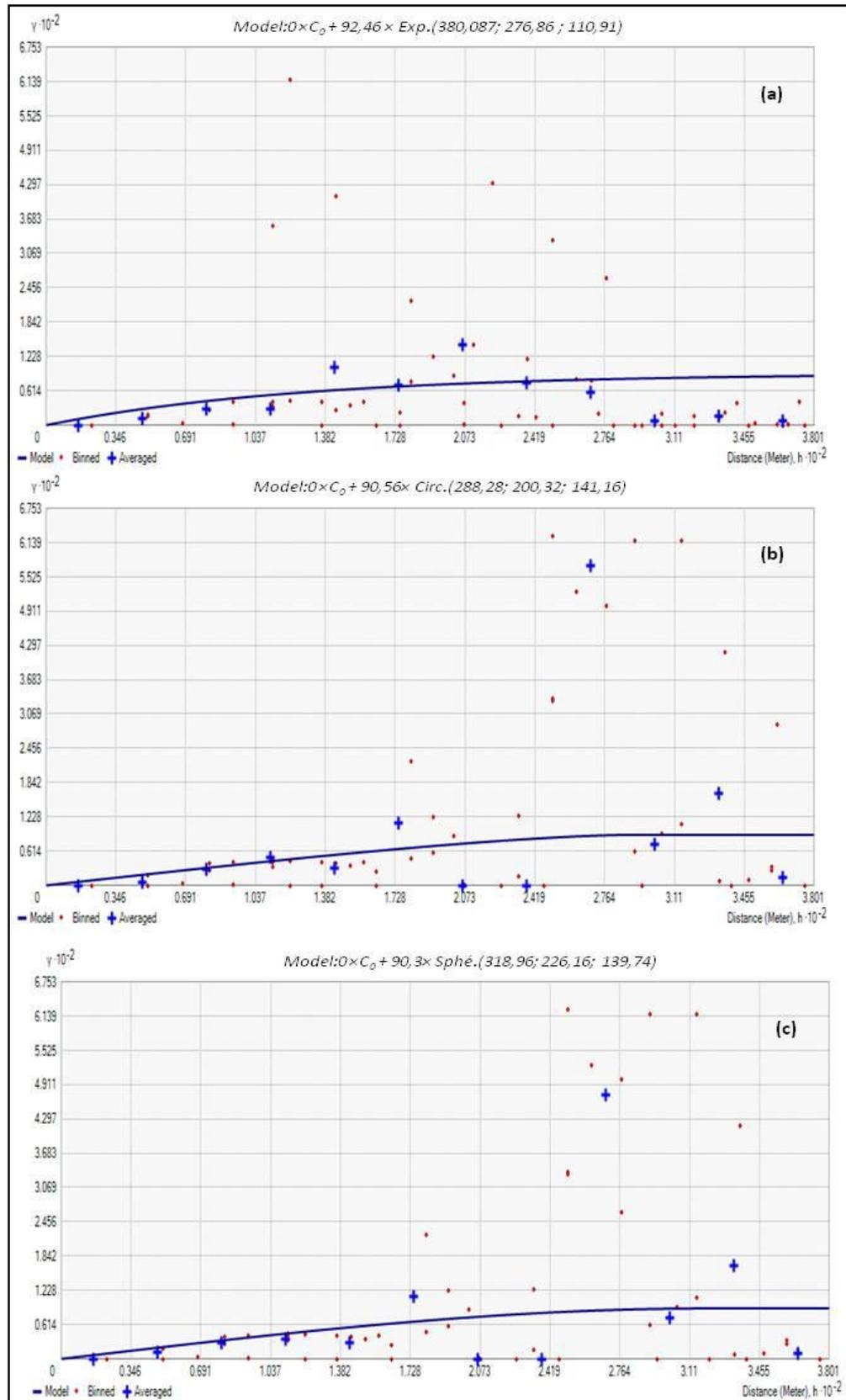


Figure 44. Variogrammes de $EC_{aff}.h4$ et les modèles sélectionnés.
 (a) exponentiel, (b) circulaire, (c) sphérique

2.2.1.5. Evaluation de la structure de h_5

Le traitement géo-spatial est effectué sur 31 mesures de " $EC_{aff.}$ ", représentant la couche h_5 . Le VEO a été calculé sur une distance d'environ 2000m avec des points de mesures distants de 50 à 100m. Les paramètres indicateurs résultants des différents modèles d'ajustement théoriques qui sont ajustés à ce variogramme expérimental sont présentés dans le tableau XXVI.

Tableau XXVI. Paramètres clés des modèles d'ajustement théoriques pour h_5 .

Modèle	C_0 (dS/)	C_0+C (dS/m)	C_0/C_0+C (%)	α (m)	Ani.	Dir.(°)	| robs | (|r(théo)|)
Stable	0,00	107,68	0,00	708,11	1,96	2,10	0,384 _(0,356)
Exponentiel	22,965	107,64	0,213	708,11	1,96	1,58	0,267 _(0,356)
Circulaire	54,088	107,16	0,505	708,11	1,40	95,62	0,192 _(0,356)
Sphérique	49,879	104,15	0,479	708,11	1,96	4,57	0,218 _(0,356)
Gaussien	63,67	105,25	0,605	708,11	1,70	93,16	0,159 _(0,356)
Quadratique rationnel	20,110	110,27	0,200	708,11	1,96	173,14	0,307 _(0,356)

Au regard des données affichées, et indépendamment des couches précédentes, il est clair que seul le modèle stable est le plus adapté (*conditions de sélection*). Les cinq autres modèles sont de ce fait rejetés.

A partir de là, le VEO representative de la structure spatiale de $EC_{aff.}h_5$ est ajusté par un modèle stable avec un effet de pépité nul (0 (dS/m)^2), un palier qui tend vers $107,68 \text{ (dS/m)}^2$ et une portée d'environ 708,11 m (Figure 45).

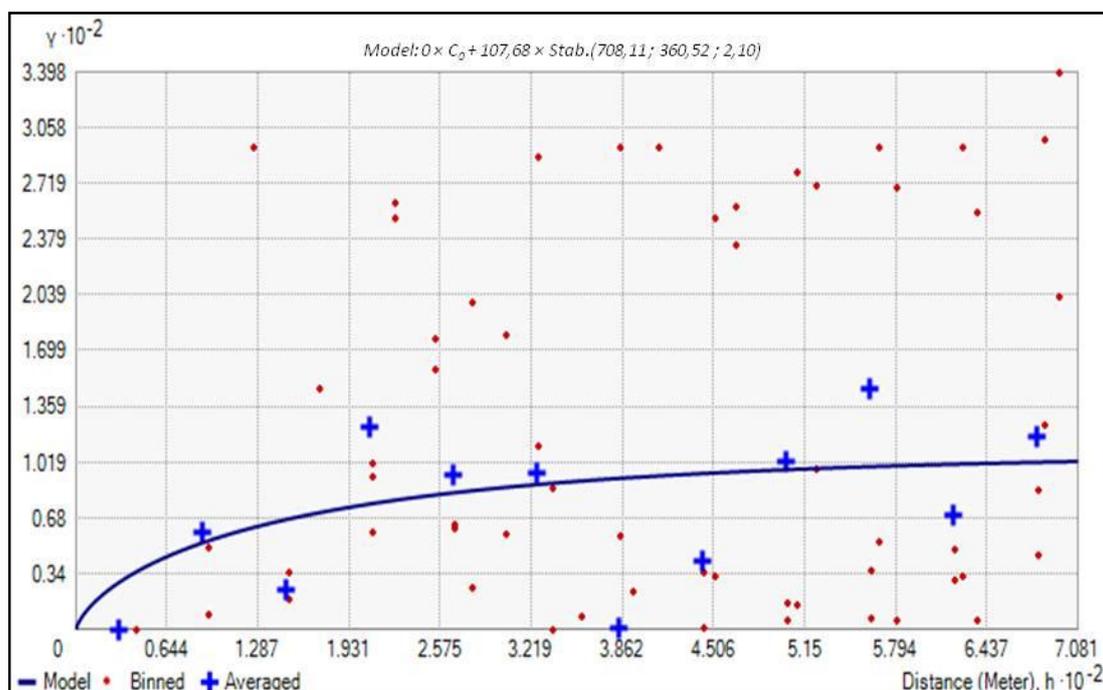


Figure 45. Variogramme de $EC_{aff.}h_5$ et modèle d'ajustement.

Le développement analytique de l'aspect directionnel dénote la mise en place d'un comportement anisotropique, pour une tolérance angulaire de 45°, égal à 1,96 selon la direction 2,10° et une orientation *NordNordEst* par rapport au périmètre.

2.2.2 Validation des modèles les plus performants

Ce traitement est une étape importante dans la confirmation et la mise en place des modèles de quantification et de représentation de la distribution spatiale de la salinité.

De plus, il permet de faire ressortir la justesse et la précision des estimations et des variances d'interpolation spatiale par horizon pour chaque modèle testé (estimation des erreurs) (Annexe V). Les critères de validation sont présentés dans le tableau XXVII.

Tableau XXVII. Erreurs d'estimation en dS/m (validation croisée) des différents modèles d'ajustement par couche

Hrz.	Modèle	Par.*			
		ME	RMSE	ASE	RMSSE
h1	<i>Stable</i>	-0,01	3,504	2,585	1,307
	<i>Exponentiel*</i>	-0,003	3,267	2,160	1,030
	<i>Circulaire</i>	-0,01	3,341	2,335	1,321
	<i>Sphérique</i>	-0,0008	3,301	2,164	1,367
	<i>Gaussien</i>	-0,019	3,504	2,585	1,307
	<i>Quadratique rationnel</i>	0,016	3,369	2,788	1,518
h2	<i>Stable</i>	-0,0114	5,477	3,458	1,380
	<i>Exponentiel*</i>	-0,0140	5,60	3,372	1,050
	<i>Circulaire</i>	-0,0107	5,575	3,298	1,495
	<i>Sphérique.</i>	-0,0127	5,595	3,185	1,522
	<i>Gaussien.</i>	-0,0124	5,696	3,576	1,465
	<i>Quadratique rationnel</i>	-0,0790	5,749	2,83	2,998
h3	<i>Stable</i>	-0,00910	8,300	7,810	1,078
	<i>Exponentiel*</i>	0,00265	7,965	7,629	1,060
	<i>Circulaire</i>	-0,00418	8,254	7,767	1,073
	<i>Sphérique</i>	-0,00242	8,181	7,755	1,069
	<i>Gaussien</i>	-0,00910	8,300	7,810	1,078
	<i>Quadratique rationnel</i>	0,00527	7,825	7,693	1,0747
h4	<i>Stable</i>	0,0062	8,669	7,381	1,538
	<i>Exponentiel*</i>	0,0066	8,639	8,532	0,990
	<i>Circulaire</i>	-0,0099	8,875	7,776	1,091
	<i>Sphérique</i>	-0,0077	8,893	7,947	1,072
	<i>Gaussien</i>	0,0062	8,669	7,381	1,538
	<i>Quadratique rationnel</i>	-0,0138	8,574	8,212	1,019
h5	<i>Stable*</i>	0,0260	8,975	9,321	0,990
	<i>Exponentiel</i>	0,0254	9,064	9,456	0,947
	<i>Circulaire</i>	0,0293	9,442	9,686	0,985
	<i>Sphérique</i>	0,2940	9,261	9,652	0,960
	<i>Gaussien</i>	0,0404	9,625	9,853	0,987
	<i>Quadratique rationnel</i>	0,0338	8,812	8,798	0,955

**Critère de choix* : ME proche de zéro, ASE et RMSE proches et plus faibles que possibles, RMSSE proche ou égale 1,

A partir de ce tableau, il ressort ce qui suit :

- En premier lieu, il est conforté l'ensemble des observations de l'étude variographique, et par conséquent du choix issu de l'exercice d'ajustement du *VEO* :
 - d'une part pour les couches d'étude *h1*, *h2* et *h3* avec la validation du *modèle exponentiel*,
 - d'autre part pour la couche d'étude *h5* avec la validation du *modèle stable*.
- En second lieu, de permettre le choix et la fixation du modèle exponentiel pour l'exercice d'ajustement de la couche *h4*, au détriment des deux autres modèles intéressants (ayant répondu aux deux premiers critères de sélection) qui sont le *circulaire* et le *sphérique*.

Globalement, l'analyse des différents variogrammes réalisés montre que les niveaux de salinité sont bien structurés selon les couches étudiées. Les principales propriétés s'identifient comme suite :

- Un effet de pépite nul pour chaque modélisation d'ajustement. Ceci traduit et expose l'absence de variabilité à courte distance et une densité d'échantillonnage suffisante (et rationnelle) pour bien restituer la structure spatiale.
- Des portées d'influences, cernées entre 380 m et 1410 m, d'autant moins importantes que les données de mesures s'éloignent des couches *superficielles*. Néanmoins, il est possible de confirmer que l'ensemble de ces variations (sur les portées) représentent les limites au-delà desquelles les valeurs concentration deviennent complètement décorrélatées ou spatialement indépendantes.
- Un ensemble de palier, qui par ses valeurs élevées (de 18,67 à 107,65 (dS/m)²) exprime, aussi bien les niveaux de salinité que le niveau d'hétérogénéité spatiale observée. Cette dernière qui reste nettement croissante et plus importante avec les données de moyen à bas-profils.

Il y a lieu de noter que ce gradient croissant selon la profondeur conforte les données du *C.V.* sur l'observation d'hétérogénéité assez marquée des couches de profondeurs.

En se référant aux travaux de Webster (1985), Goovaerts (1997), Leaners et *al.* (1990), Chauvet (1992), Walter et *al.* (2001), Juan et *al.* (2011), Kavianpoor et *al.* (2012), Bilgili (2013), Mahmoodifard et *al.* (2014), Arétouyap et *al.* (2016), Bergeron (2016) et Herbert (2017), ces résultats suggèrent :

- D'une part que les différents traitements obtenus ne sont pas affectés d'erreurs de mesures significatives et/ou que les variations, voire les effets de la micro-variabilité locale (plus courtes que les distances d'échantillonnages) sont bien contrôlés.
- D'autre part que la mise en place observée révèle une continuité spatiale ou une structure spatiale très élevée des données de salinité (une bonne autocorrélation) selon la couche d'étude et la direction considérée.

Allant dans le même sens d'interprétation, il est indiqué que l'expression du ratio Nugget/Sill $[(C_0 / (C_0 + C))]$, exprimé en pourcentage, peut à la fois engendrer :

- Une forme de vérification de la véracité des observations sur l'étendue de l'autocorrélation spatiale des données de *EC* et (ainsi) de rendre compte de l'existence de dépendance spatiale ou non (Shi et al., 2005 ; Yang et al., 2011 ; Bhunia et al., 2018) selon la zone d'influence (Campbell, 1978 ; Gajem et al., 1981).
- Un intérêt dans l'évaluation "*appréciative*" de l'impact de l'effet des facteurs de formation des sols, qui peuvent être *structurelles-naturelles ou anthropique* (Brodský et al., 2004 ; Yang et al., 2011 ; Bigili, 2013 ; Bhunia et al., 2018), sur la variabilité spatiale de la salinité des sols.

Pour notre cas d'étude, la mise en avant des valeurs du ratio obtenues conforte les remarques suggérées ci-dessus et donne lieu au schéma qui suit :

- Dans un premier temps, et tenant compte de la classification proposée par Cambardella et al.(1994)⁹, il est montrée clairement l'existence d'une autocorrélation spatiale forte entre les données ($<0,25$) sur l'ensemble des couches (tableau XXII, XXIII, XXIV, XXV, XXVI).
- Dans un deuxième temps, l'assimilation des données de ce ratio aux conclusions de certains travaux (Shi et al., 2005 ; Juan et al., 2011 ; Keshavarzi et Samardian, 2012 ; Bilgili, 2013 ; Bhunia et al., 2018) permet de considérer que l'expression de la structure et la variabilité spatiale de la salinité en *EI* est affectée et contrôlée par les facteurs *structurelles-naturelles*.

Pour plus de précisions, il est cité :

- la topographie (ou *microtopographie*),
- les spécificités hydrologiques du milieu (*inondation*, effet du drainage, *effet de nappe salée* : *fluctuation*, *remontée*, *écoulement*, *infiltration*, etc..),

⁹ La structuration du ratio $[C_0/(C_0+C)]$ correspond à : $<0,25$: une autocorrélation spatiale forte, $0,25-0,75$: une autocorrélation spatiale modérée, $>0,75$: une autocorrélation spatiale faible).

- les propriétés du sol et,
- les conditions climatiques extrêmes.

2.2.3. Etablissement des cartes des U.S.R. ou des classes de salinité par couche

Ce qui suit a pour objet de représenter graphiquement la distribution spatiale de la salinité obtenue par KO. Explicitement, il s'agit de la valorisation cartographique "spécifique" à l'étape de validation des modèles les plus appropriés et les plus performants pour l'interpolation au niveau des cinq couches d'étude. Ces modèles d'interpolation sont synthétisés dans le tableau XXVIII.

Tableau XXVIII. Validation et choix des modèles d'ajustement par couche.

Hrz.	Modèles	Par.			
		ME	RMSE	ASE	RMSSE
h1	<i>Exponentiel.</i>	-0,003	3,267	2,160	1,030
h2	<i>Exponentiel.</i>	-0,0140	5,60	3,372	1,050
h3	<i>Exponentiel.</i>	0,00265	7,965	7,629	1,060
h4	<i>Exponentiel.</i>	0,0066	8,639	8,532	0,990
h5	<i>Stable</i>	0,0260	8,975	9,321	0,990

La mise en place cartographique aboutit à la formation de cinq cartes thématiques (Figure 46). La lecture de ces représentations se fait du haut vers le bas (*h1* à *h5*). Les spécificités de chaque couche d'étude sont indiquées dans le tableau XXIX.

L'interprétation de ces cartes est effectuée sur la base des superficies en hectares et en pourcentages des cinq classes de salinité retenues par USSL (1954).

Au-delà de l'intérêt d'illustrer les taux de variation de la salinité dans le contexte environnemental de *EI*, il est intéressant de citer l'apport de l'approche de cartographie **des U.S.R.** dans la correction et l'ajustement de la superficie d'étude à 300 hectares.

Tableau XXIX. Superficies et pourcentages des différentes classes de salinité

Couches d'étude	Classe de salinité									
	C1		C2		C3		C4		C5	
	<i>ha</i>	%	<i>ha</i>	%	<i>ha</i>	%	<i>ha</i>	%	<i>ha</i>	%
h1	0	0	0	0	6	2	273	91	21	7
h2	0	0	0	0	19	6,3	267	89	14	4,7
h3	0	0	0	0	3	1	263	87,7	34	11,3
h4	0	0	0	0	0	0	87	29	213	71
h5	0	0	0	0	150	50	122	40,7	28	9,3

D'une manière générale, la lecture de ce tableau associée à l'analyse des cartes spécifiques (figure 46) font apparaître l'absence des classes *C1* et *C2*, avec en parallèle une large prédominance des niveaux de salinité allant de *C3* à *C5* sur l'ensemble des couches de la zone

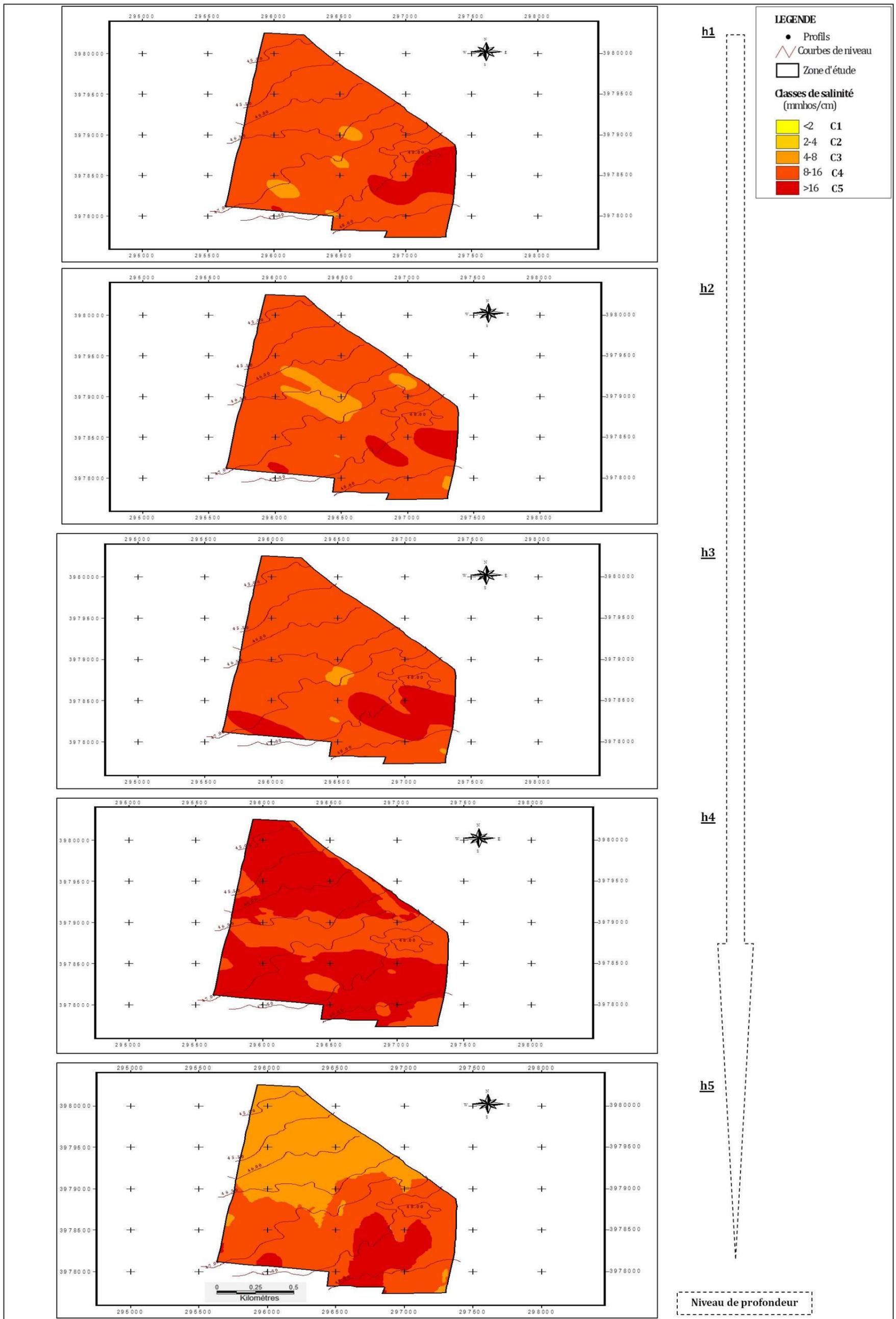


Figure 46. Les cartes des U.S.R. ou des classes de salinité par couche pour EI.

d'étude. Toutefois, il est intéressant d'indiquer que la manifestation de cette gamme de classe traduit, en réalité, une certaine singularité dans la localisation et la répartition de l'effet *C3* dans le profil.

L'expertise plus détaillée de la mise en place des niveaux de salinité permet d'établir le schéma suivant :

- Dans les couches *h1*, *h2* et *h3*, les niveaux de salinité sont caractérisés par les classes *C3*, *C4* et *C5*. La classe *C4* est prédominante avec un taux de recouvrement de l'ordre de 91 % en *h1*, de 89 % en *h2*, et de 88 % en *h3*. Les classes *C5* (< 11%) et *C3* (< 6%) sont, par contre, faiblement représentées selon la couche considérée.
- Dans la couche *h4*, les niveaux de salinité sont beaucoup plus homogènes que dans les trois précédentes couches. En effet, ils s'identifient uniquement par les classes *C5* (71%) et *C4* (29%).
- Dans la couche *h5*, et comparativement à ce qui a été représenté précédemment, la classe *C3* est beaucoup plus représentée en terme de taux de recouvrement (50%) proportionnellement à une mise en association des classes *C4* (40,7%) et *C5* (9,3%).

Partant de l'expertise pédologique de *E1*, et disposant d'une bibliographie conformes aux observations (Boulaine, 1957 ; Aubert, 1976 ; Servant, 1976 ; Pouget, 1980 ; N'Diaye et Guindo, 1998), il est possible d'indiquer que les éléments de compréhension de cette forme *d'apparition, d'intensité des traits morphologiques et d'évolution de la salinité dans le profil*, ne serait-ce que de manière locale, sont à rechercher dans l'existence d'une nappe d'eau salée superficielle et des opérations de mise en place du réseau de drainage (Figure 47).

Dans ce sens, le suivi piézométrique des niveaux de cette nappe et de ses mouvements, entrepris durant la même période d'étude, a permis de connaître que sa recharge repose sur les flux d'eaux venant de l'association *Marais de Saint-Aimé « actuellement Djidiouia »-Drain principal à l'Est* et les flux d'eaux venant des coteaux (par écoulement et infiltration) au *SudEst*.

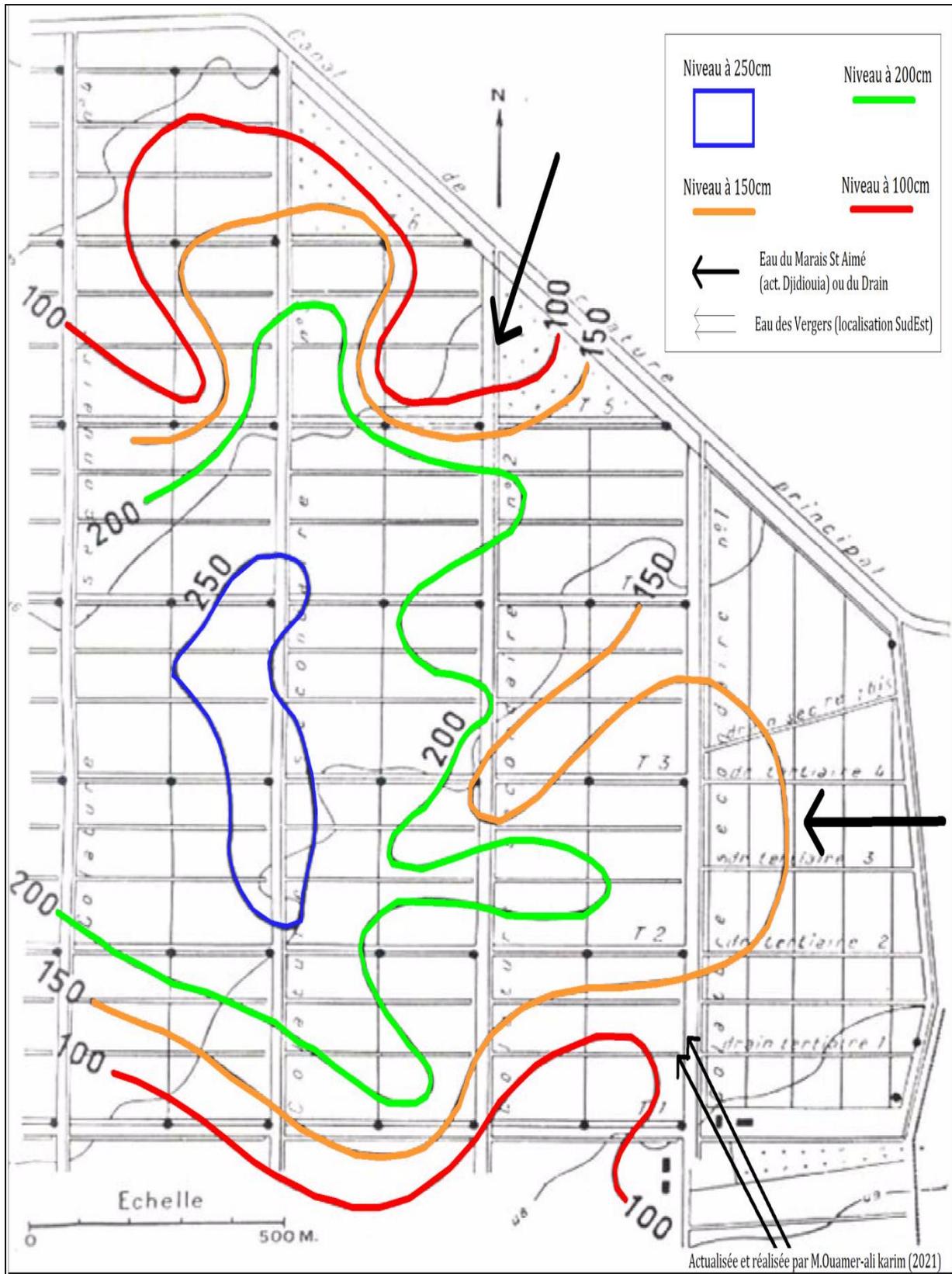


Figure 47. Représentation et synthèse des niveaux de nappe de EI lors des travaux d'aménagements.

Conclusion

Cette étude a montré que l'application des principes de la *C.N.S* dans la préservation et la gestion d'un héritage de données de sols d'une part et, d'autre part, l'obtention d'une représentation cartographique la plus cohérente et la plus caractéristique des unités salées de l'étude de *EI* est possible.

La donnée EC_e a été prise comme paramètre discriminant (seule donnée d'entrée) pour décrire et maîtriser au mieux l'organisation et la mise en place des différentes unités salées recherchées.

Le développement méthodologique adopté a porté sur la combinaison entre la formulation d'expertise pédologique source (*EI*), un traitement cartographique de consolidation, la mise en œuvre de l'aspect volume ou tridimensionnel dans la mise en place des données de salinité, l'intégration et l'exploitation des informations spécifiques spatialisées et, enfin, l'application des méthodes de traitements "statistiques et géostatistiques".

L'attribution d'une formulation à connotation spécifique à la donnée spatialisée permettrait d'objectiver la connaissance établie de la procédure de traitement. Ainsi, le choix s'est porté sur la formulation " $EC_{aff.}$ ". Cette indication d'affectation apporte et intègre les informations essentielles aux concepts et aux principes qui fondent le développement méthodologique proposé.

La banque de données de " $EC_{aff.}$ " ainsi mise en avant est composée de 350 horizons et de 70 points d'observations, dont les onze profils types de *EI*.

La valorisation analytique des données $EC_{aff.}$ issues des différentes étapes de mise en place méthodologique montre une très grande variabilité des taux de salinité. Les écarts extrêmes identifiés couvrent de larges gammes, pouvant dépasser parfois 40 dS/m selon les couches considérées. Les profils obtenus présentent une accumulation des sels croissante avec la profondeur. Ils sont, de ce fait, caractérisés par un schéma de variation des taux de salinité allant d'horizons *salés* vers des horizons *très salés* à *hyper-salés*, sur la base d'un *gradient d'accroissement morphologique descendant spécifique*.

L'examen des autres paramètres statistiques (*Moy., Med., écarts de valeurs C.V., etc.*), a permis, d'une part de confirmer la forte variation ou hétérogénéité des valeurs de salinité observées et, d'autre part, de mettre en évidence une tendance à l'accroissement de ces valeurs avec la profondeur du sol.

Au fil de l'analyse et des traitements complémentaires, point d'équilibre (Moy. – Med.) et la forme de répartition ou de distribution (*Asy.* et *Apl.*) des données, il s'est avéré qu'une application d'une méthode de normalisation (= *loi normale*) est plus que nécessaire. Ainsi, l'optimisation des performances du rendu dans le cas d'une *approche géostatistique* est conditionnée par une transformation ou un ajustement en Log_{10} des données exploitées.

L'approche géostatistique pour établir les cartes de salinité de *EI* a été appliquée sur la base du *kriégeage ordinaire (KO)*. Son application, en recherchant le degré de précision sur fond de validation croisée, a donné lieu à un ajustement des variogrammes expérimentaux omnidirectionnels en fonctions indicatrices bien spécifiques. Il est observé :

- Des modèles théorique exponentiels pour les couches *h1*, *h2*, *h3* et *h4*.
- Le modèle théorique stable pour la couche *h5*.

L'analyse affinée de ces résultats a permis de mettre en évidence que les niveaux de salinité et leur variabilité dans les différentes couches sont :

- D'un côté bien structurés, avec un effet de pépite (C_0), des valeurs de palier (C) et des valeurs de la portée.
- D'un autre côté dépendant d'une logique de terrain et de condition locale, d'où ressortent deux schémas d'évolution par rapport à la localisation des parcelles:
 - la première, une d'orientation *SudEst* à *EstSudEst* pour les couches *h1*, *h2*, *h3* et *h4*,
 - la seconde, une d'orientation *Nord* pour la couche *h5*,

Les cartes développées sont très fiables et très intéressants dans l'obtention de "*la photographie*" initiale du périmètre (avant mise en valeur) et dans la visualisation de cette mise en place. Ainsi, la cartographie en courbes d'isovaleurs a montré que les couches supérieures des profils (*h1*, *h2* et *h3*) à une large majorité (dépassant les 88% de la superficie) sont salées (8 dS/m – 16 dS/m), la partie basse des profils avec la couche *h4* est très salée à extrêmement salée (> 16 dS/m) sur plus de 70% de la superficie totale et enfin la couche de profondeur "*h5*" marqué par une équité territoriale (50-50%) entre moyennement salés (4dS/m-8dS/m) et salés à plus (8dS/m-16dS/m à >16dS/m) sur le taux de recouvrement d'ensemble.

Pour ce qui est des situations marquées "*observées*", et érigées en deux schémas d'évolution, les observations ont montré l'impact possible de :

- L'effet mixte du *Marais de Saint-Aimé « actuellement Djidiouia »* - *drain principal à l'Est* et les flux d'eaux venant des coteaux (ou vergers) au *Sud*.

- L'effet "évacuation" de la nappe d'eau et l'effet de pente lors des travaux de mise en place du drain principal pour la portion *Nord*.

Plus généralement, ce travail a montré que la mise en œuvre de l'approche *CNS* sur les données d'une ancienne étude couvrant les sols salés dans le Bas-Cheliff est plus qu'acceptable. Elle a permis de réaliser et de dresser des cartes des niveaux de salinité sur la base de 5 classes et réparties selon 5 niveaux de profondeurs, à partir de deux acquis:

- Un nouveau jeu de données représentatif de l'ancien périmètre de la station expérimentale d'étude des sols salins des Hamadéna au début des opérations de mise en valeur des sols salés (1954 -1956).
- Un schéma d'observation spatiale des données de mesures de densité importante.

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.*

« On peut tous être le héros de sa propre vie, tous autant que nous sommes,
à condition d'avoir le courage d'essayer »

*Optimus Prime
(The Last Knight)*

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

Pour comprendre, évaluer et suivre le développement de la salinité dans l'espace et dans le temps, des méthodes rapides et fiables ont été mises au point et mises à la disposition des utilisateurs. Il s'agit, en particulier, des méthodes pouvant effectuer des mesures rapides in-situ (Sudduth et al., 2011 ; Yao et al., 2016 ; Zaman et al., 2018). Parmi ces méthodes, il y a celles qui reposent sur l'exploitation des technologies (de capteurs) de détection proximale de propriétés de sol (Michot et al., 2013 ; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2013 ; Visconti et de Paz, 2016 ; Adamchuk, 2018).

L'induction électromagnétique (IEM), qui est une méthode géophysique conçue pour mesurer la conductivité électromagnétique du sol (CEM), est une technologie de détection proximale largement appliquée (Visconti et de Paz, 2016 ; Bjorn Moller et al., 2020). Elle présente, d'une part l'avantage majeur de ne pas être intrusive pour le sol, puisque l'appareil de mesure associé n'est pas en contact avec ce dernier (Visconti et de Paz, 2016 ; Yao et al., 2016), d'autre part d'avoir la capacité à produire un grand nombre de mesures géo-référencées qui peuvent être associées à la variabilité de la salinité et de la sodicité à l'échelle du terrain et du paysage (Doolittle et Brevik, 2014).

Son utilisation et son adaptation à l'agriculture a été largement motivée, au début, par le besoin d'effectuer des mesures fiables, rapides et faciles du phénomène de salinité (Corwin, 2008 ; Yao et al., 2016). Ce choix technique offre des avantages distincts par rapport aux méthodes traditionnelles qui, sur la base d'un échantillonnage classique du sol suivi d'une analyse en laboratoire, présentent un processus d'évaluation fastidieux, coûteux et long (Johnston et al., 1994 ; Yao et al., 2016 ; Zaman et al., 2018).

L'appareil portable de mesure type EM38 (*Geonics Ltd*, Mississauga, ON, Canada) est le capteur d'IEM le plus connu et le plus largement utilisé en science du sol (Toushmalani, 2010 ; Sun et al., 2012 ; 2013 ; Yao et al., 2016 ; Iddir, 2021) et en agriculture (Sudduth et al., 2001 ; Herrero et Aragüés, 2003 ; Heil et Schmidhalter, 2017). Les applications de terrain permettent

l'obtention des mesures de la conductivité électrique apparente du sol (EC_a). Des mesures qui vont servir de moyen de prédire et d'estimer l' EC_e dans toute la zone d'étude (Lesch et *al.*, 1995 ; Harvey et Morgan 2009 ; Sun et *al.*, 2012 ; Heil et Schmidhalter, 2017).

A partir de là, il est clair que le défi majeur dans l'utilisation des valeurs de EC_a est leur conversion en conductivité de l'extrait de pâte saturée (EC_e). Allant dans ce sens, un certain nombre de modèles ont été développés au cours des quatre dernières décennies pour décrire les aspects de mise en place de la procédure d'association " $EC_a - EC_e$ " pour ce genre d'instrument (McNeill, 1980 ; Rhoades et Corwin, 1981 ; McKenzie et *al.*, 1989 ; Slavich et Petterson, 1990 ; Nettleton et *al.*, 1994 ; Sheets et *al.*, 1994 ; Lesch et *al.*, 1998 ; Triantafilis et *al.*, 2000 ; Vlotman, 2000 ; Nogues et *al.*, 2006 ; Yao et *al.*, 2007 ; Lesch, 2012 ; Heil et Schmidhalter, 2017 ; Iddir, 2021).

De manières très succinctes, il ressort que les différentes approches proposées semblent reposer (à la base) sur des analyses de régressions linéaires avec le développement (par ajustement) d'autres procédures de différentiation :

- Evaluation sur la base de *coefficients multiples*.
- Valorisation par *coefficients de pondération* associée à la profondeur.
- Valorisation par *coefficients pré-établis, calculés ou modélisés*.
- Ajustement par un *modèle logistique (approche mixte)*.
- Valorisation (par approche intégrée) d'une simulation inversée des profils salés.

Issus de l'application avancée de toutes ces procédures, il y a lieu d'indiquer que les meilleurs résultats de traitement sont obtenus si les lectures de EC_a sont combinées avec des valeurs EC_e de différentes plages de profondeur et en respectant un cloisonnement en classes des niveaux de salinité (Heil et Schmidhalter, 2017).

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer la salinité des sols et de prédire sa répartition dans le profil, dans l'espace et dans le temps à l'aide de la technique de l'IEM via l'EM38. Cette évaluation électromagnétique est réalisée sur les sols salés de la région d'El Hamadna.

Pour ce faire, la démarche adoptée dans cette étude repose sur les axes suivants:

- Les mesures de EC_a sur quatre campagnes de mesures.
- Le prélèvement et la caractérisation des échantillons de sol de calibration et d'ajustement des mesures de EC_a .

- L'application de statistiques classiques sur l'ensemble des données, l'étalonnage et la calibration des mesures de EC_a sur la base d'analyses de régressions linéaires.
- La réalisation et la visualisation de cartes des niveaux de salinité de chaque campagne.

1. Matériels et Méthodes

Dans ce qui suit, nous projettons de mettre en avant la distribution spatiale et temporelle des niveaux de salinité dans les sols agricoles du Bas-Cheliff à l'aide de l'IEM, en utilisant l'appareil de mesure portatif EM38 (Geonics Ltd, Mississauga, ON, Canada).

La méthodologique de collecte des données est réalisée selon une grille d'échantillonnage systématique combinée entre le "PAS" de mesures de l'EM38 et celui des sondages pédologiques de calibration.

1.1. Le site d'étude

Le périmètre agricole ciblé couvre l'ancienne délimitation administrative de la station expérimentale d'étude des sols salins des Hamadéna (1942 à 1961) (figure 13b). Une zone d'étude qui s'étale sur une superficie de 300ha.

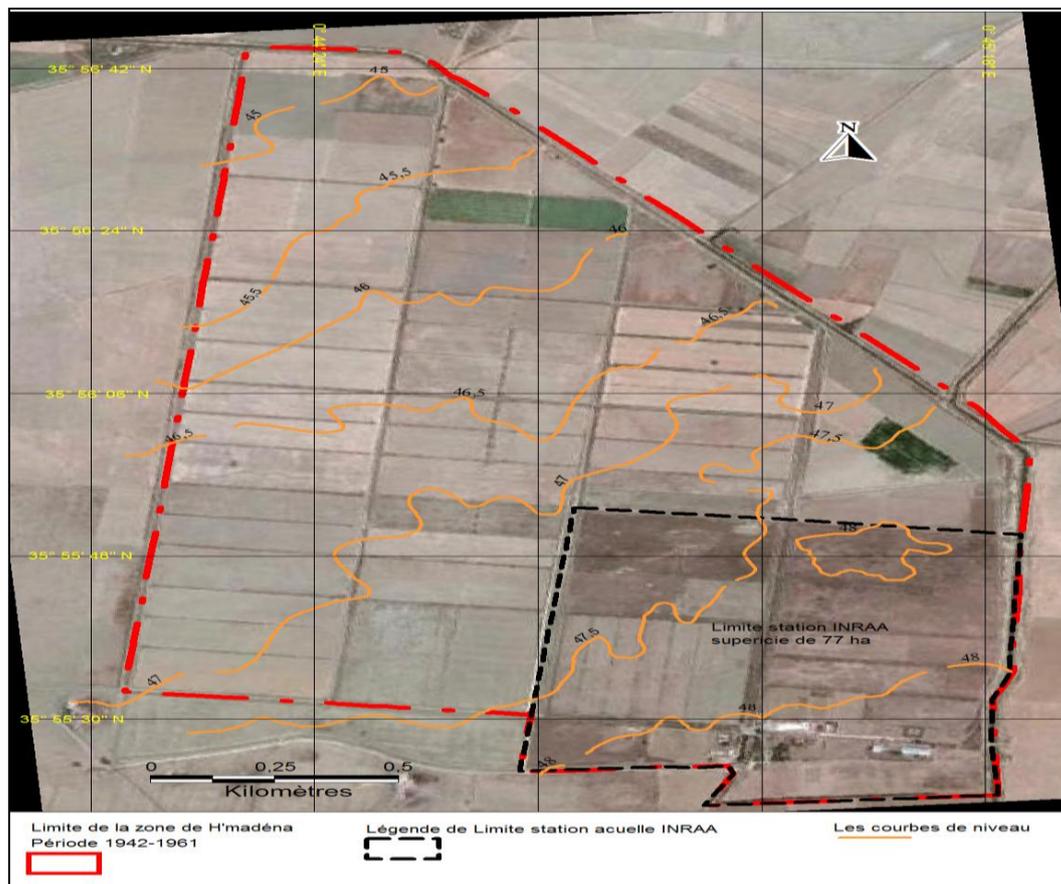


Figure 13b. Délimitation de la zone d'étude.

1.2. Mesure de IEM à l'aide de l'EM38

Avant d'aborder l'aspect pratique d'utilisation de l'EM38, nous avons considéré qu'il est utile de précéder cette étape par un bref rappel descriptif des caractéristiques techniques de l'appareil.

1.2.1. Fonctionnalité de l'EM38

La profondeur d'exploration - dans un profil homogène - tend jusqu'à 1,5 ou 2 m en mode vertical et à 0,75 ou 1 m en mode horizontal (Anderson-Cook et *al.*, 2002 ; Lesch et *al.*, 2005). La distance *inter-spirale* est de 1 m et il fonctionne à une fréquence de 13,2 kHz. L'appareil est alimenté par une batterie de 9V et lit la CEM (Rhoades, 1993 ; Rhoades et *al.*, 1999).

1.2.2. Fonctionnement théorique

La mesure se fait en plaçant le dispositif au niveau du sol et en enregistrant les lectures des compteurs. Le dispositif comprend deux bobines électriques situées à ses deux extrémités, l'une transmettrice (Tx) et l'autre réceptrice (Rx). La bobine transmettrice induit un champ magnétique primaire (H_p) qui crée des boucles de courant électriques circulaires dans le sol. L'importance de ces boucles est proportionnelle à la conductivité électrique de la couche du sol. Chaque boucle de courant produit un champ électromagnétique secondaire (H_s) proportionnel à la valeur du courant de la boucle. Le champ secondaire est superposé au champ primaire, et les deux sont arrêtés, amplifiés, puis mesurés par la bobine réceptrice de l'instrument (figure 48).

L'amplitude et la phase du champ secondaire diffèrent de celles du champ primaire en raison de certaines propriétés du sol (taux d'argile, teneur en eau, et salinité), de la distance *inter-bobines* et de leur orientation, de la fréquence du courant, et de la distance au-dessus de la surface de sol (Corwin et Lesch, 2005).

L'IEM s'utilise en place sans perturbation du sol ni prélèvement d'échantillon. L'appareil est simplement posé sur le sol ou maintenu horizontalement à une certaine hauteur. Il n'y a donc pas de contact sol-sonde, et la mesure est immédiate (Job et *al.*, 1987). Bien que la profondeur de la pénétration de la mesure par l'EM38 puisse être changée en soulevant l'instrument au-dessus de la surface de sol, il reste néanmoins difficile de déterminer la profondeur et le volume du sol concernés par la mesure (Corwin et Lesch, 2003).

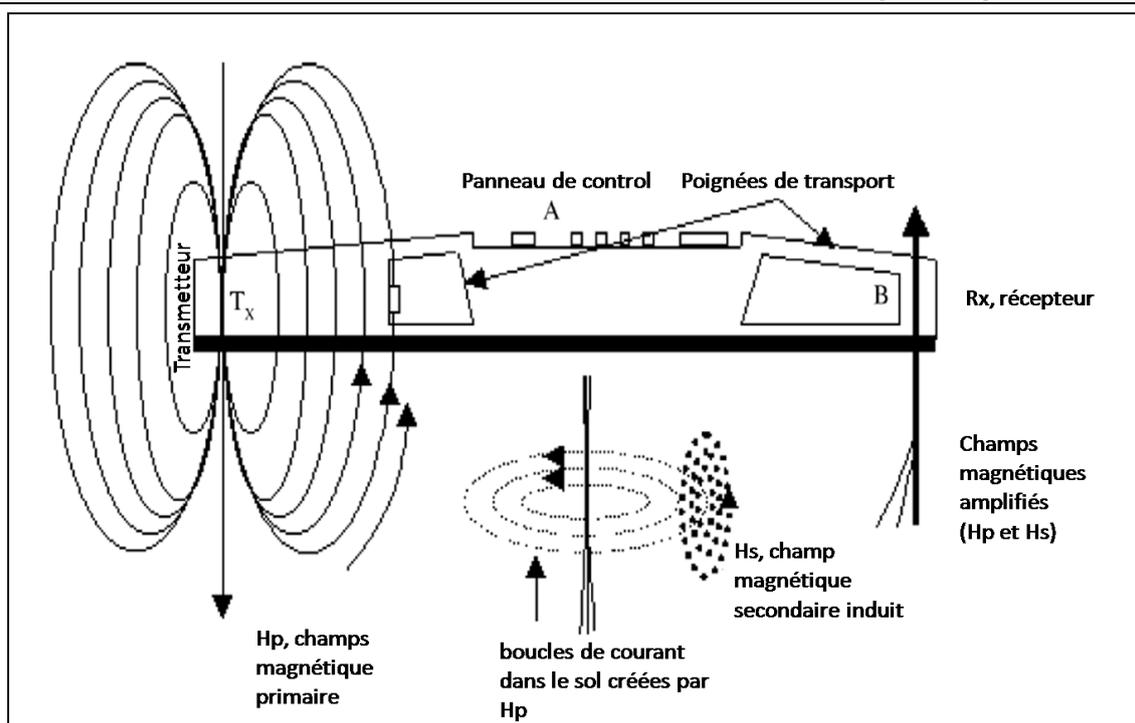


Figure 48. Principe de fonctionnement du conductimètre électromagnétique (Lesch et al., 2005).

1.2.3. Application méthodologique de l'EM38 dans le cas de cette étude

Les mesures de l'EM38 ont été réalisées sur la base d'une grille « *d'un PAS* » d'étude de 50 à 75 m. Cette grille a été élaborée et mise en application en tenant compte de la maille de prospection systématique établie en *E1*.

Le schéma explicatif de la réalisation et l'obtention de la grille des lectures de l'EM38 est synthétisé dans la figure 49. Analytiquement, ce processus de recouvrement méthodologique a permis d'identifier et de considérer 317 points de mesures (figure 49 ; phase 3).

1.2.3.1. Mesures et acquisition des données

La fréquence de suivi a été fixée à deux campagnes de lectures par année (2012-2013 et 2013-2014). Les mesures ont été effectuées en Mai-Juin (*fin saison humide-début saison sèche*) et Novembre-Décembre (*fin saison sèche -début saison humide*), lors de conditions d'humidité de terrain favorables. L'intervalle de temps correspondant entre chaque campagne de lectures et de prélèvements peut être considéré de 6 mois.

La réalisation des différentes campagnes de mesure a été précédée par la phase de calibration de l'EM38 en accord avec les spécificités et les instructions du fabricant (Abdu et al., 2007 ;

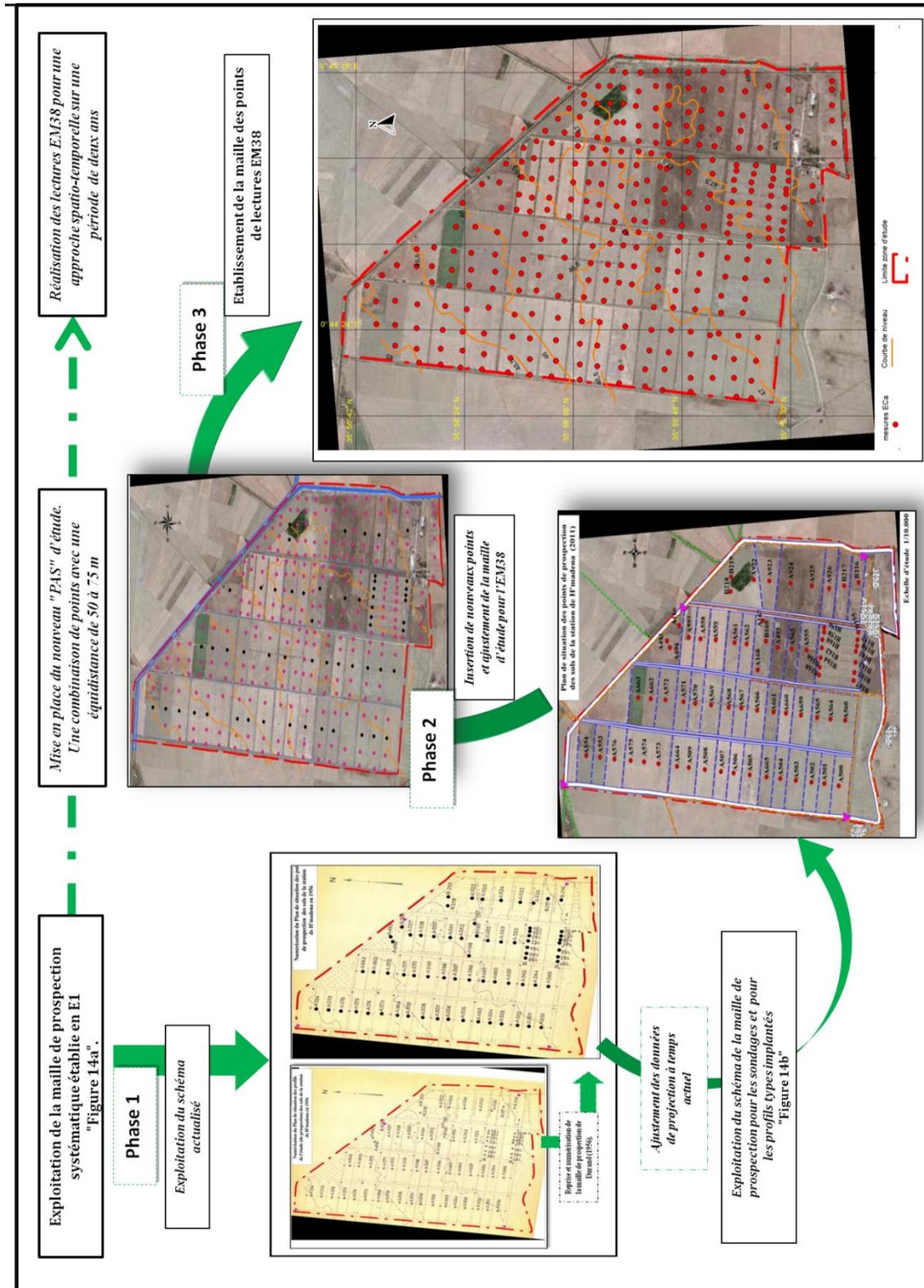


Figure 49. Mise en place des points de lectures électromagnétiques à l'aide de l'EM38. Phase 1 et 2 : Insertion de la maille d'étude de EI, Phase 3 : établissement de la maille de 317 points.

Harvey et Morgan, 2009 ; Cetin et *al.*, 2012 ; Wang et *al.*, 2016 ; Donahoo et *al.*, 2019 ; 2020 ; Iddir, 2021).

1.2.3.2. Stratégie et protocole de collecte des données

L'élévation de l'instrument à l'aide d'une règle-mètre en bois renforcé et son maintien en position parallèle au-dessus du niveau du sol permet d'obtenir plusieurs couches de stratification. Les mesures de l'EM38 ont été effectuées selon deux schémas (figure 50).

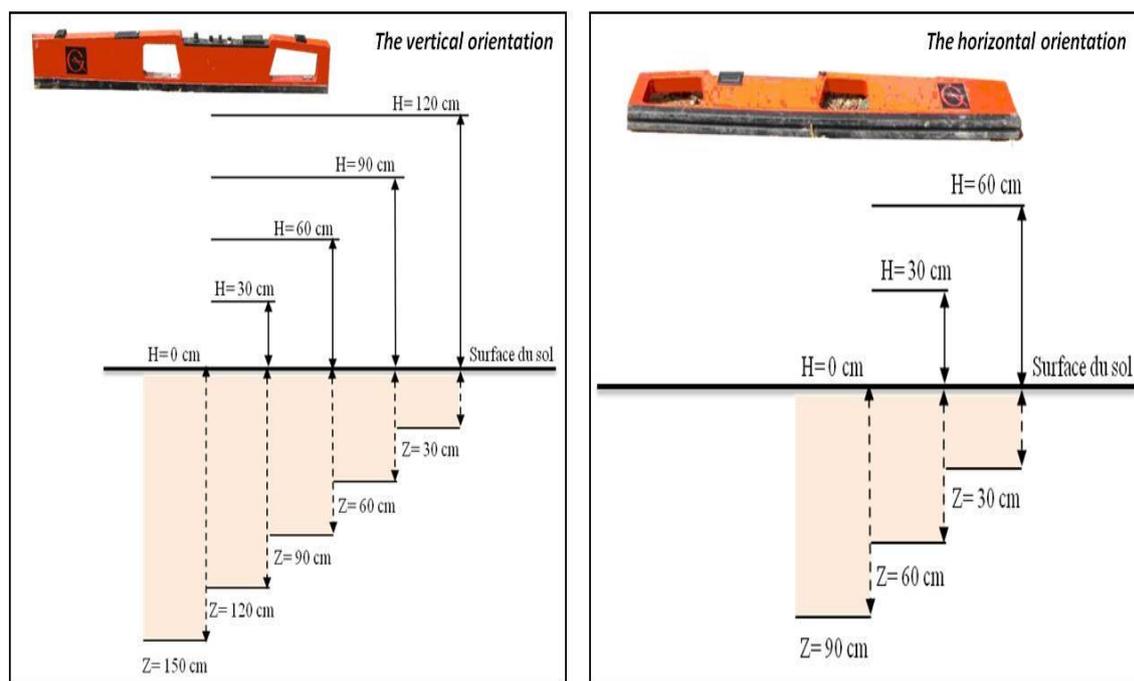


Figure 50. Utilisation de l'EM38 lors de la prospection (Saaoud, 2014).

Le premier en position verticale, identifié comme EM_v , avec cinq (05) couches de profondeur [0 à 30 cm (EM_{v1}) ; 0 à 60 cm (EM_{v2}) ; 0 à 90 cm (EM_{v3}) ; 0 à 120 cm (EM_{v4}) ; 0 à 150 cm (EM_{v5})].

Le second en position horizontale, identifié comme EM_h , avec trois (03) couches de profondeur [0 à 30 cm (EM_{h1}) ; 0 à 60 cm (EM_{h2}) ; 0 à 90 cm (EM_{h3})].

Cependant, ce ne sont que les EM_v qui seront présentées et exploitées dans les différentes parties de cette étude. Ce schéma de position des lectures a été choisi à cause de sa grande capacité d'exploration qui peut atteindre 1,5 à 2 m de profondeur dans un profil homogène (Lesch et *al.*, 2005). Cette démarche a permis de réaliser 1585 mesures EM_v (317 points de mesures x 5 profondeurs), soit 6340 mesures pour les quatre campagnes.

Additionnellement, la température au niveau du sol a été mesurée à l'aide de thermomètre classique sur une profondeur de 50 cm (*Poste pluviométrique-site El Hamadna*). Une étape

originale (dans notre pays) qui va permettre une normalisation des données de l'EM38 à la température de référence de 25°C (Weller et *al.*, 2006 ; Harvey et Morgan, 2009 ; Cetin et *al.*, 2012 ; Yao et *al.*, 2016 ; Wang et *al.*, 2016 ; Donahoo et *al.*, 2019 ; 2020). L'équation de calcul adoptée (21) est celle proposée par Sheets et Hendricks (1995) :

$$(21) \quad EC_{25^{\circ}C} = EC_T [0,447 + 1,4034 \exp(-T/26,815)]$$

Où EC_T représente les mesures de EM_v et T° identifie la température moyenne du sol ($^{\circ}C$) aux mêmes conditions.

Comme indiqué dans les travaux de Rhoades et Corwin (1981), Lesch et *al.* (1995), Herrero et *al.* (2003), Yao et *al.* (2007), Harvey et Morgan (2009), Cetin et *al.* (2012), Wang et *al.* (2016), Heil et Schmidhalter (2017), Donahoo et *al.* (2019 ; 2020) et Iddir (2021) la variable déterminée dans le présent contexte d'étude est exprimée par EC_a globale du sol.

1.3. Les échantillons de sols de calibration et de validation

Sur la base du détail quantitatif et descriptif des 317 points de mesures de EC_a (figure 49-phase 3), nous avons retenu trente-sept points de sondages (figure 51) géo-référencés. Le choix de ces points a été fait en tenant compte de la variation spatiale des gammes des lectures de l'EM38. Cette variation s'exprime par un gradient d'évolution des valeurs allant de la plus faible à la plus élevée, épousant ainsi les différentes sections parcellaires observées (pour une orientation *SudNord*). Le but recherché est une considération optimale de la représentation spatiale des valeurs de IEM (Corwin et Lesch, 2003 ; Weller et *al.*, 2006 ; Triantafilis et *al.*, 2009 ; Douaik et *al.*, 2011 ; Donahoo et *al.*, 2019 ; 2020 ; Iddir, 2021).

Par la suite, et au niveau de chaque point de sondage, nous avons effectué des prélèvements d'échantillons de sols à l'aide d'une tarière pédologique avec *manchon de rallonge* ($L_{tot.} = 1,50m$; $\varnothing = 7\text{ cm}$). La couche limite de prélèvement des échantillons de sols a été fixée à une profondeur maximale de 150 cm. La prise des échantillons a été opérée selon les cinq couches de profondeur des lectures de l'EM38. Des profondeurs définies dans les différentes parties de ce chapitre par $h1$, $h2$, $h3$, $h4$ et $h5$ sur la base d'une incrémentation d'épaisseur de 30 cm. Ce mode d'échantillonnage ainsi mis en œuvre a donné lieu à 185 ($nbr_{tot.} = 37 \times 5\text{ hrz.}$) échantillons de sol par campagne d'étude et 740 ($nbr_{tot.} = 37 \times 5\text{ hrz.} \times 4\text{ Camp.}$) échantillons de sol pour les quatre campagnes à analyser au laboratoire.

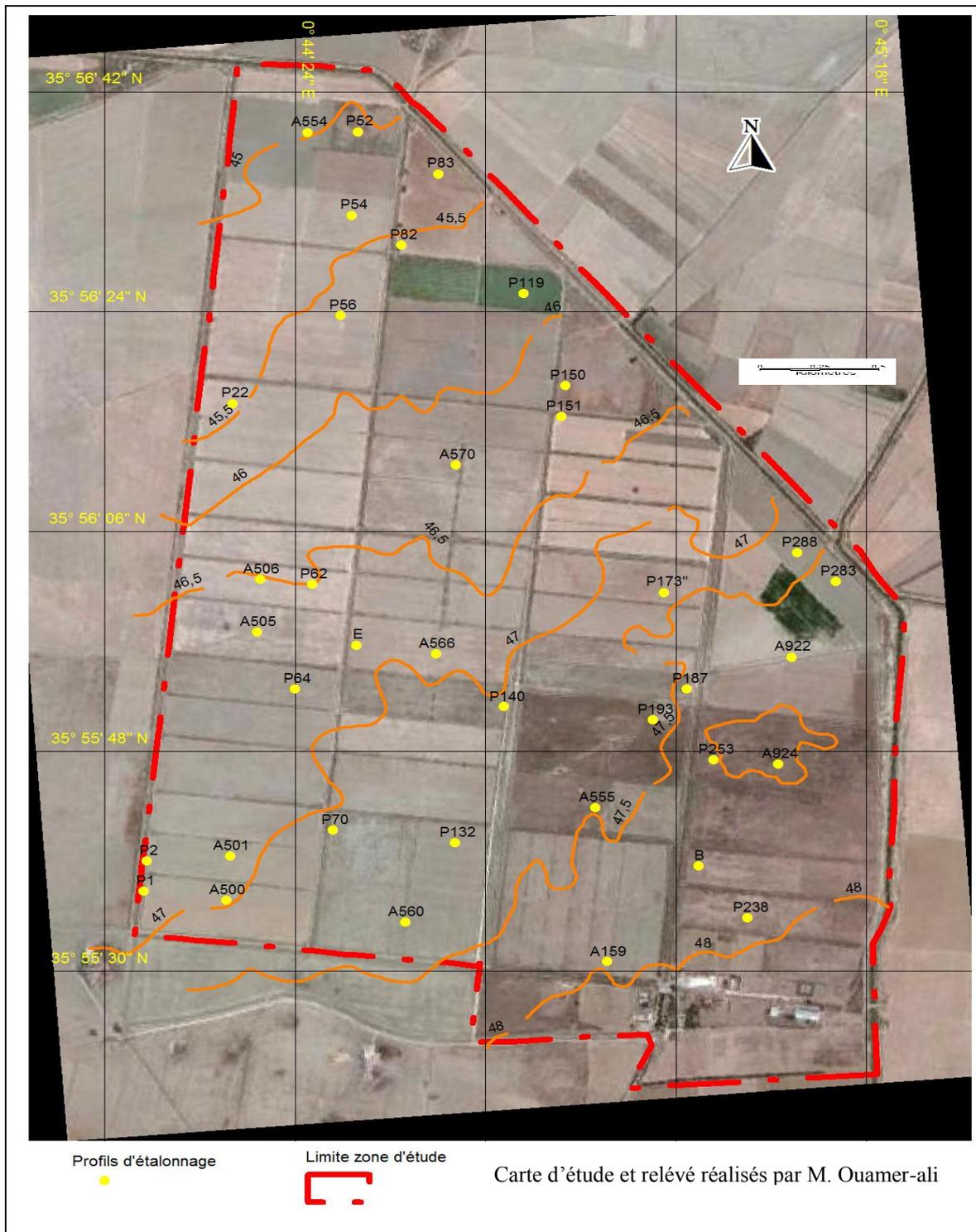


Figure 51. Localisation et choix des sondages d'étalonnage.

1.4. Analyses des échantillons de sol

Après séchage à l'air ambiant (figure 52), les échantillons de sol ont été broyés et tamisés à 2 mm pour les analyses de caractérisation standards. Les différentes méthodes d'analyses utilisées ont été réalisées sur les préparations de l'extrait de pâte saturée selon le protocole de USSL (1954).



Figure 52. Phase de préparation des échantillons
(Séchage, broyage et tamisage).

Les principes d'étude et les différentes méthodes d'analyses appliqués dans la caractérisation des échantillons de sols sont résumés dans le tableau XXX.

Tableau XXX. Méthodes d'analyses appliquées.

Paramètres d'étude	Méthodes
EC_e (dS/m)	Déterminée sur l'extrait de pâte saturée à l'aide d'un conductivimètre classique.
H_p (%)	Elle est déterminée par l'obtention du rapport de l'eau contenue dans un échantillon du sol au poids du même échantillon après dessiccation à 105°C pendant 24 h, l'équation appliquée est $H_p(\%) = M_e \times 100 / M_s$ Avec : M_e = poids d'eau contenu dans un échantillon de sol (gr) ; M_s = poids de l'échantillon sec (gr).
Analyse granulométrique	Méthode internationale à la pipette de Robinson. La détermination des argiles (0 à 2 μ m), des limons (2 à 50 μ m), et des sables (50 à 2000 μ m).
pH_e	Déterminé sur l'extrait de pâte saturée par la mesure (potentiométrique) à l'aide d'un pH-mètre classique.
Calc. Tot. (%)	Méthode volumétrique au calcimètre de Bernard.
Gypse (%) "CaSO ₄ 2H ₂ O"	Déterminé par le test au Chlorure de Baryum et par attaque à l'Acide Chlorhydrique concentré.

1.5. Utilisation et historique de l'occupation du sol

Il est admis que l'observation des cultures peut être un bon indicateur de l'effet variation des niveaux de salinité dans les sols (Corwin et Lesch, 2005). Dans le cas de la zone d'étude, l'occupation et la productivité des sols ne dérogent pas à la logique contraignante du stress salin et à celle de la capacité de tolérance des cultures aux sels (Isla et al., 2003 ; Lisan, 2008 ; Rozema et Flowers, 2008 ; Girard et al., 2011). La mise en place "culturale" identifiée et observée, durant les quatre campagnes de lecture EM38, indique clairement la prédominance des céréales, principalement l'orge (figure 53).

Néanmoins, les données de reconnaissances nous ont permis de noter, aussi, "le juste retour" à la vocation productive originelle pour ce qui est de l'artichaut et du sorgho en irrigué dans certaines parcelles du périmètre.



Figure 53. Le couvert agricole observé dans la zone d'étude pour les quatre périodes d'étude.

2. Traitement des données

Le traitement des données a été réalisé selon deux paliers d'intervention :

- Une analyse statistique sur :

- les données de EC_a et les données de EC_e obtenues lors des quatre campagnes de mesures de l'EM38 et,
- les paramètres pédologiques analysés et calculés (tableau XXX) issus des échantillons des trente-sept sondages de calibration et relatifs uniquement à la première campagne de mesure de l'EM38.

- Etalonnage des valeurs de EC_a pour les quatre campagnes de mesures sur la base de régressions linéaires multiples.

Les différents traitements sont réalisés à l'aide du tableur Excel 2010 et du logiciel Statistica v8,1.

2.1. Analyse statistique

Les différents traitements effectués sont :

- Les statistiques descriptives pour l'ensemble des données.
- Le calcul des distributions de fréquences des taux de salinité (EC_e (dS/m)).
- Les profils de distribution des paramètres au niveau des couches des sondages de calibration.
- Les relations statistiques entre EC_e (dS/m) et certaines variables pédologiques choisies.

2.1.1. Statistiques descriptives

Dans cette partie, les statistiques descriptives pris en considération sont *le minimum (Min.)*, *la moyenne (Moy.)*, *le maximum (Max.)*, *la médiane (Méd.)*, *l'écart type (Ec-ty)*, *la variance (Var.)*, *les coefficients d'asymétrie (Asy.)* et *d'aplatissement (Apl.)*, et enfin *le coefficient de variation (C.V.)*.

L'évaluation établie couvre les valeurs de EC_a et de EC_e (dS/m) des échantillons des sondages de calibration et les variables pédologiques choisies pour les différents échantillons de sols des quatre campagnes d'étude.

Il y a lieu d'indiquer que les *coefficients Asy.* et *Apl.* n'ont pas été générés systématiquement pour l'ensemble des variables pédologiques. Ils ont été introduits, par nécessité méthodologique, seulement lors de la valorisation analytique des données des deux variables discriminantes (EC_a et EC_e).

2.1.2. Calcul des fréquences de distribution des taux de salinité (EC_e)

Ce traitement a porté sur la distribution des fréquences des taux de EC_e pour l'ensemble des données, sans distinction de profils et d'horizons, et ensuite pour chaque couche d'étude. La représentation des valeurs de EC_e dans les échantillons de sols se base sur les cinq classes proposées par USSL (1954) : **C1**(<2 dS/m), **C2**(2-4 dS/m), **C3**(4-8 dS/m), **C4** (8-16 dS/m), **C5**(>16 dS/m).

2.1.3. Profils de distribution des différents paramètres

C'est une approche de traitement graphique traduisant la visualisation des valeurs propres aux paramètres "*Min., Méd., Moy., Max.*". dans les différentes couches d'étude des sondages de calibration.

Les cinq couches des points de sondages s'identifient par les intervalles de profondeurs suivants : $h1 = [0 \text{ à } 30 \text{ cm}]$, $h2 = [30 \text{ à } 60 \text{ cm}]$, $h3 = [60 \text{ à } 90 \text{ cm}]$, $h4 = [90 \text{ à } 120 \text{ cm}]$, $h5 = [120 \text{ à } 150 \text{ cm}]$.

2.1.4. Les relations entre les taux de salinité (EC) et les variables pédologiques choisies

Il est connu que plusieurs paramètres édaphiques peuvent influencer la salinité des sols (Corwin et Scudiero, 2019). Bien que dans les sols salins la salinité est le facteur dominant des mesures de EC_a (McNeill, 1980 ; Herrero et al., 2003 ; Isla et al., 2003 ; Nogues et al., 2006; Saaoud, 2014 ; Heil et Schmidhalter, 2017 ; Slavitch et al., 2017 ; Iddir, 2021), il est nécessaire d'identifier les autres paramètres édaphiques susceptibles d'influencer leur interprétation.

A ce niveau, il s'agit de rechercher les éventuelles relations "*statistiquement significatives*" en EC_e (dS/m) et certaines variables pédologiques, mesurées et analysées, au niveau des cinq couches d'étude fixées. Cette approche est développée sur fond de réalisation de matrice de corrélation. Les variables ciblées, en tenant compte différentes approches d'étude, sont $H_p(\%)$, les paramètres de texture (*Arg., Lim., Sab.*), le pH_e , le *Calc.tot.* (%), et enfin le Gypse.

2.2. Etalonnage des valeurs de EC_a

L'objectif de cette approche est d'étalonner et de calibrer les données de EC_a en utilisant les valeurs de EC_e relatives aux échantillons de sols des trente sept sondages de calibrations.

Pour ce faire, des équations de régressions linéaires multiples ont été construites et testées en vue de la conversion et de l'adaptation des valeurs de EC_a pour chaque campagne de mesure et

par couche d'observation. A la fin, l'équation la plus significative sera retenue et utilisée.

2.2.1. Principe de mise en œuvre

Le principe adopté reprend le concept méthodologique développé par Rhoades et Corwin (1981) permettant de relier les lectures de EC_a des points de sondages avec les EC_e des mêmes points en fonction de la profondeur du sol. Une approche d'étalonnage qui se traduit par l'obtention de deux formulations mathématiques :

- La première série de formulations consiste à relier les EC_e de chaque couche du sol aux différentes EC_a pour les différentes profondeurs d'étude. Les équations de régression multiples sont de type (22) :

$$(22) \quad EC_e z(\text{cm}) = a EC_a z_1 + b EC_a z_2 + \dots + x EC_a z_n$$

- La deuxième série de formulations consiste à relier les EC_a de chaque couche du sol aux différentes EC_e pour les différentes profondeurs d'étude. Les équations de régression multiples sont de type (23):

$$(23) \quad EC_a z(\text{cm}) = a EC_e z_1 + b EC_e z_2 + \dots + x_i EC_e z_n$$

Où z_n est la profondeur d'investigation en **cm**, x_i représente la contribution de chaque variable intégrée dans la formulation.

La sélection de l'équation la plus significative par couche et par campagne d'étude s'appuie sur les étapes d'évaluation suivantes :

- Décrire et fixer les relations entre la variable privilégiée, appelée variable dépendante (expliquée), et les variables appelées variables indépendantes (ou explicatives).
- Tester le degré de signification de chaque équation de régression, en comparant le R calculé avec le R critique de la table de Fischer (Annexe III).
- Sélectionner les équations de régression "significatives" les plus pertinentes par référence au coefficient multiple « R » (racine carré de R^2) le plus élevé.
- Extraire les équations de régression les plus appropriés en tenant compte de la notification du coefficient multiple « R » la plus élevée. Pour cela, il a été utilisé le « R critique » estimé "en première approche" à un niveau de signification où le risque d'erreur est $\alpha = 0,001$ (Rondeux, 1993 ; Foucart, 2006 ; Ouamer-ali, 2009).

- Choisir et valider l'équation d'étalonnage la plus représentative par niveau et par campagne d'étude en appliquant le *t-test* de la comparaison des moyennes et le test de corrélation.

L'utilisation du concept de Rhoades et Corwin (1981), dans le contexte de cette recherche, a fait l'objet auparavant d'une pré-évaluation analytique et cartographique par Saaoud(2014). Une étude considérée comme un "*traitement test*", avec comme base d'information "*seules*" les données de la première campagne de mesures de l'EM38 (*période Mai-Juin*).

En fait, le choix de ce concept méthodologique a été rendu possible sur la base d'un traitement *analytique-comparative* (par opposition) au concept d'évaluation proposé par Herrero et al. (2003). Un second concept qui prône plus la valorisation de la moyenne arithmétique des niveaux de salinité dans le profil au lieu et place d'une représentation en strate ou couche. Par modélisation, la formule indique la liaison entre $EC_{e,moy}$ des cinq couches (variable expliquée) et la EM_v de 0 à 150 cm (variable explicative). L'équation est de type (24):

$$(24) \quad EC_{e,moy} z \text{ (cm)} = aEC_a z + b$$

Où Z est l'épaisseur d'investigation de 0-150 en cm, a représente la contribution de la variable intégrée dans la formulation.

De manière très succincte, les résultats du *t-test* de la comparaison des moyennes et principalement ceux du *test de corrélation* (entre les deux concepts), d'où ressort EC_e vs $EC_{Rhoades \text{ et Corwin (1981)}}$ avec un r de 0,807 nettement plus grand que EC_e vs $EC_{Herrero \text{ et al. (2003)}}$ avec un r de 0,777, ont conclus que les équations de prédiction de Rhoades et Corwin (1981) pour chaque couche sont celles qui prédisent et estiment le mieux les valeurs de EC_e dans le contexte de cette étude.

2.3. Cartographie et visualisation des classes de salinité des sols d'El Hamadna

Cette partie est consacrée au développement d'une méthodologie permettant de représenter ou de visualiser les différentes $EC_{estimée}$ ($EC_{es.}$) identifiées et présentées dans la partie précédente. Pour ce faire, une mise en place complète et spécifique des données a été réalisée. Il est question d'une adaptation et d'une harmonisation de l'information compilée lors de chaque campagne de mesures (en fonction des équations) par référence aux valeurs de $EC_{es.}$ aux points de sondages et par ajustement aux différentes grilles de mesures.

Pour le traitement cartographique proprement dit, les différentes étapes seront pilotées par le logiciel *ArcView GIS 3,2*[®] (ESRI) et ses modules d'analyses et de modélisations *Spatial Analyst* et *3D Analyst*.

2.3.1. Mise en œuvre méthodologique

La mise en œuvre des opérations de traitements cartographiques est exécutée avec le logiciel *ArcView GIS*[®] via sa fonction d'évaluation automatique (avec paramètres par défaut). Il s'agit d'un couplage logique des données de *positionnement* (*points, lignes ou polygones*) à des données *alphanumériques* assimilées, sous forme de tables dites "attributaires", et par l'analyse des données vectorielles par approche spatiale pour en tirer des informations statistiques et des cartes thématiques.

A partir de là, il est possible d'indiquer que le respect des applications de fonctionnement du logiciel et des règles de décision, en optant pour des croisements de données par opérateurs logiques (Bernier et al., 2014 ; Hellec et al., 2015), permettra de valoriser au mieux (*analyser, créer, réaliser des requêtes*) les données en tout point de la zone pour en déduire des schémas de relations plausibles. Le principe général de mise en place est explicité par la figure 54, il comprend plusieurs étapes :

- L'étape d'intégration et de répartition spatiale des valeurs de EC_{es} , en les attribuant à différents points d'une grille spécifique, et leur représentation sous le format *Shapefile* (1).
- L'étape d'exploitation de l'extension "*Spatial Analyst*" qui donnera lieu à l'interpolation dictée, la classification et l'ajustement des différentes EC_{es} identifiées après leur conversion en *Grid* ; une représentation qui exprime la variation spatiale des niveaux de salinité dans la zone (1 et 2).
- L'étape d'exploitation de la calculatrice raster (*map-calculator*) où le logiciel va réaliser le fusionnement des différentes variations par rapprochement (3).
- L'étape de calcul des superficies des unités salines : l'opération est réalisée à l'aide de l'extension *XTools*, intégrée dans le logiciel. Son interface d'exploitation repose sur la spécification des unités des distances (*km*) et des superficies (*ha*) (4).

Pour ce qui est de l'analyse spatiale, sur fond d'interpolation sans ajustement de paramètres, il y a lieu de savoir qu'*ArcView GIS*[®] génère (avec les modules *TIN* et *GRID*) des modèles d'estimation caractéristiques du *réseau irrégulier triangulaire (TIN)*, selon l'algorithme

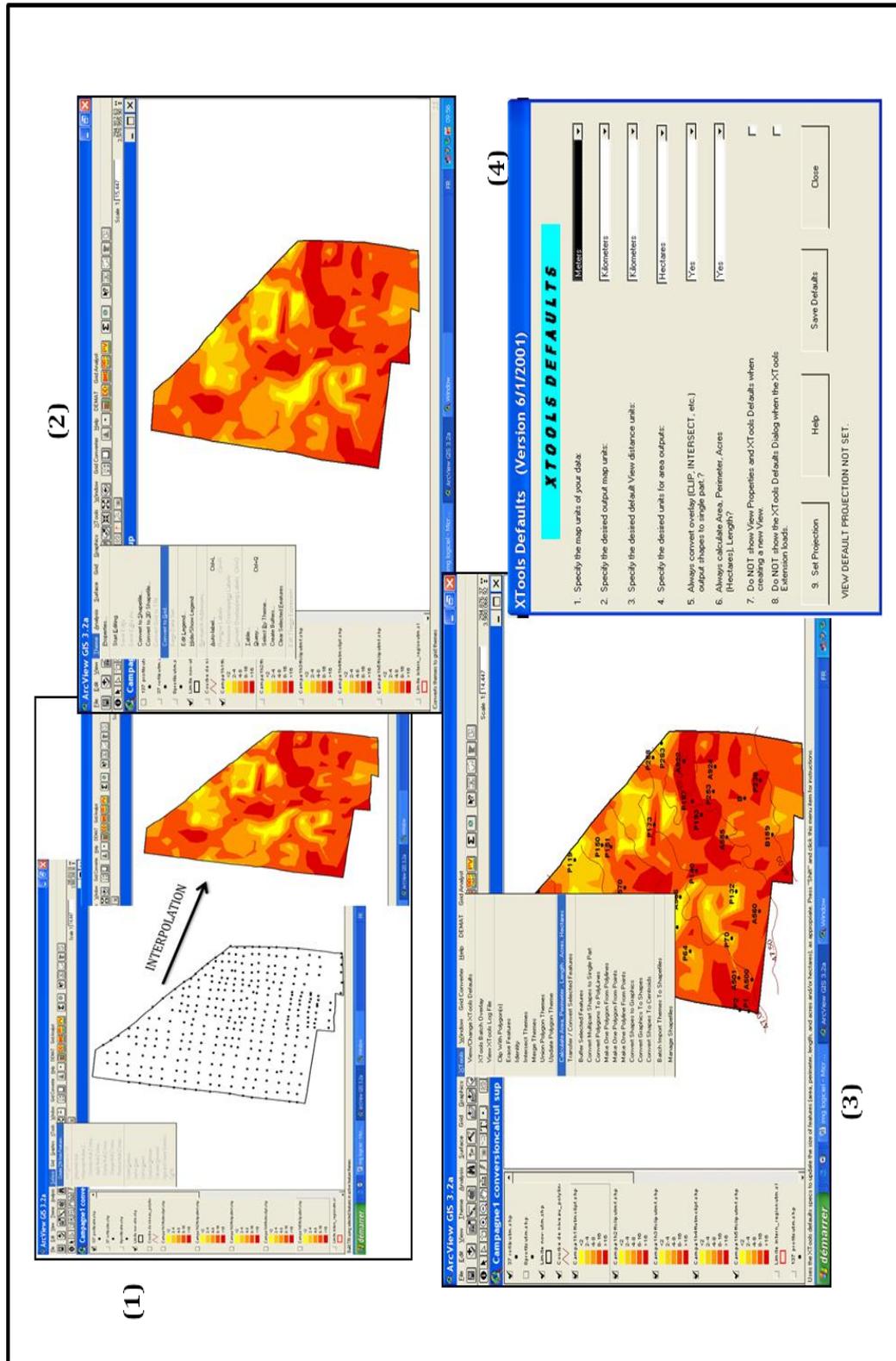


Figure 54. Représentation des différentes étapes de traitement cartographique.

spécifique de la triangulation de "Delaunay" (Tsai, 1993 ; Felgueiras et Goodchild, 1995 ; Thomas, 2003 ; Longley et al., 2005 ; ESRI, 2008).

Cette méthode d'estimation combinée a été fréquemment décrite (Olender, 1980 ; Tsai, 1993 ; Felgueiras et Goodchild, 1995 ; Mitas et Mitasova, 1998 ; Pajarola et al., 2002 ; Valgma, 2002 ; Longley et al., 2005 ; ESRI, 2008 ; Li et Heap 2008; Liu et al., 2008). Dans ce qui suit, nous nous limiterons donc à une brève description de l'ensemble.

L'interpolation par modèles d'estimation du réseau irrégulier triangulaire (TIN) a été développée et mise en avant par Peucker et al. (1976). Cette technique d'interpolation est considérée comme l'une des approches d'analyse spatiale les plus simples à utiliser (Felgueiras et Goodchild, 1995 ; Longley et al., 2005).

La TIN est une technique de traitement qui s'appuie sur des notions de géométrie (Tsai, 1993 ; Liu et Wu, 2019). Son mode de fonctionnement, qui demande la disponibilité d'un très grand nombre d'observations, permet de représenter un état de surface (d'où ressort la position spatiale de points de mesures disponibles) en un ensemble de facettes triangulaires contiguës ne se chevauchant pas, de tailles et de formes irrégulières (Peucker et al., 1976 ; Chen et Guevara, 1987 ; Tsai, 1993).

En ce qui concerne l'apport de la contribution des critères de "Delaunay", la spécification adoptée a pour objectif de garantir la tendance (Tsai, 1993 ; Felgueiras et Goodchild, 1995 ; Li et al., 2004 ; Longley et al., 2005) (figure 55) :

- Qu'aucun sommet ne se trouve à l'intérieur des cercles dans lesquels les triangles du réseau sont circonscrits : *chaque cercle repose seulement sur les trois sommets qui ont donné naissance au triangle.*
- L'angle intérieur minimal de tous les triangles est augmenté au maximum : *ce qui permet d'éviter autant que possible les triangles longs et étroits.*
- Certaines formes associées des polygones (structures) partagent un bord commun.
- Chaque triangle ne contient aucun autre point de mesures à l'intérieur.

2.4. Evaluation de la qualité des traitements

Les méthodes ou tests d'évaluation de la précision et de la qualité de représentation des niveaux de salinité appliqués sont de deux types :

- Le premier test consiste à calculer les erreurs moyennes de prédiction. Il s'agit, en fait, de calculer la différence moyenne entre les valeurs de EC_e et les valeurs de EC_{es} . pour chaque niveau d'étude, en valeurs réelles et en valeurs absolues.
- Le deuxième test consiste à calculer le pourcentage des EC_e et EC_{es} . qui se situent dans leurs propres plages au sein des cartes d'isovaleurs de la salinité.

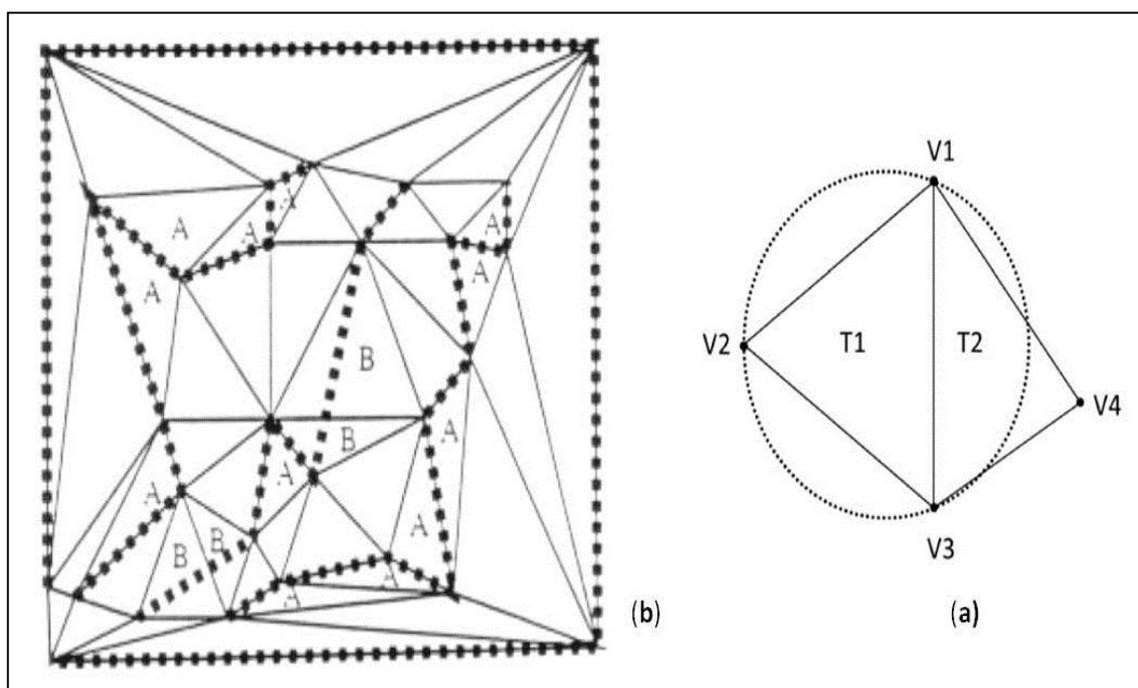


Figure 55. Schéma de la Delaunay triangulation.
 (a) forme simple, (b) forme complexe

3. Résultats et discussions

Ce travail sur les sols salés de la région d'El Hamadna a été initié sur la base d'une méthode de cartographie non invasive, en référence à l'induction électromagnétique à l'aide de l'EM38 (Geonics Ltd, Mississauga, ON, Canada).

Dans le détail, l'application de l'EM38 a été renouvelée sur quatre campagnes de mesures, en respectant les conditions de milieu favorables (état hydrique et température). Les différentes étapes de mesures et les traitements d'évaluations spécifiques ont été réalisés à chaque fois sur la base d'une grille régulière de 317 points d'étude ($nbr_{tot} = 317 \times 5 \text{ hrz.} \times 4 \text{ Camp.}$) et la caractérisation physico-chimique "associative" de trente-sept (37) sondages de calibrations ($nbr_{tot.} = 37 \times 5 \text{ hrz.} \times 4 \text{ Camp.}$). De plus, l'intégration de la notion bidimensionnelle de l'information par la mise en avant de l'aspect *horizon* dans l'approche méthodologique, a permis de visualiser l'évolution du phénomène selon cinq (05) couches de profondeurs.

Pour les besoins de cette partie, nous n'avons tenu compte que des mesures de l'EM38 en mode verticale (EM_v). Cet ensemble méthodologie permettra, en premier lieu, de présenter les résultats relatifs à :

- La structure et les caractéristiques des valeurs de EC_a .
- La structure et la distribution des valeurs de EC_e et les caractéristiques analytiques des différents paramètres pédologiques observés dans les échantillons de calibrations.
- Les relations et les éventuelles interactions entre EC_e et les paramètres de texture (*Arg., Lim., Sab.*), le pH_e , le *Calc.tot.*, et enfin le $CaSO_4 \cdot 2H_2O$.
- L'étalonnage des valeurs de la EC_a par association aux valeurs de EC_e .

En second lieu, de réaliser des cartes d'isovaleurs des niveaux de salinité pour les quatre campagnes de mesures.

3.1. Caractérisation des données de EC_a

L'étude a porté sur 6340 valeurs de EC_a relatives aux quatre campagnes de mesures. La présentation des résultats des traitements statistiques descriptifs est établie par campagne de suivi et par couche d'étude (317 valeurs) (tableau XXXI).

Tableau XXXI. Statistiques descriptives de EC_a (dS/m).

Camp.	Hrz.	N Act.	Moy.	Méd.	Min.	Max.	Var.	Ec.-ty.	Asy.	Apl.	C.V.%
<i>EC_a C.I</i>	h1	317	94,0	92,3	31,1	224,9	1134,8	33,7	0,9	1,4	36
	h2	317	131,1	125,7	46,1	324,1	2252,4	47,5	1,0	1,7	36
	h3	317	176,1	169,5	50,7	479,8	4786,4	69,2	1,2	2,6	39
	h4	317	246,7	230,7	65,7	711,6	11062,1	105,2	1,3	2,9	43
	h5	317	346,0	325,2	80,7	1017,2	23437,1	153,1	1,3	2,8	44
<i>EC_a C.II</i>	h1	317	83,4	80,3	28,9	215,8	1047,5	32,4	1,0	2,0	39
	h2	317	121,0	115,4	46,4	317,4	2063,1	45,4	1,2	2,7	38
	h3	317	170,1	160,6	52,7	467,9	4403,5	66,4	1,4	3,6	39
	h4	317	229,1	210,8	69,0	702,5	9899,8	99,5	1,5	4,0	43
	h5	317	319,4	297,3	81,5	983,6	19520,6	139,7	1,4	3,6	44
<i>EC_a C.III</i>	h1	317	104,7	99,6	42,7	256,1	1273,7	35,7	1,0	1,5	34
	h2	317	136,1	129,2	40,3	358,1	2636,1	51,3	1,1	1,8	38
	h3	317	195,6	182,6	56,9	632,0	6245,6	79,0	1,5	4,4	40
	h4	317	270,3	251,4	66,4	827,6	13884,0	117,8	1,3	2,9	44
	h5	317	375,6	348,6	91,3	1160,8	29045,9	170,4	1,3	3,0	45
<i>EC_a C.IV</i>	h1	317	88,8	87,8	23,2	207,9	962,7	31,0	1,0	2,1	35
	h2	317	119,7	114,9	31,0	285,4	1746,3	41,8	1,2	2,5	35
	h3	317	165,9	160,1	36,2	453,3	3910,6	62,5	1,4	3,6	38
	h4	317	229,6	215,7	45,2	662,5	8433,9	91,8	1,5	3,6	40
	h5	317	307,8	291,9	54,2	858,8	17099,8	130,8	1,4	3,2	42

Avec C : identifiant la campagne d'étude ou de mesure

A la lecture de ce tableau, il est possible de noter :

En premier lieu, un écart assez conséquent entre les valeurs extrêmes au sein d'une même couche de chaque campagne de mesure:

- La première campagne (C.I) de mesures présente des gammes d'écart de valeurs de EC_a égales à : [194] en $h1$, [279] en $h2$, [430] en $h3$, [647] en $h4$, et enfin [940] en $h5$.
- La deuxième campagne (C.II) de mesures s'identifie par des gammes d'écart de valeurs de EC_a égales à : [192] en $h1$, [272]en $h2$, [414] en $h3$, [635] pour $h4$, et enfin [902] en $h5$.
- La troisième campagne (C.III) de mesures comporte des gammes d'écart de valeurs de EC_a égales à : [214] en $h1$, [318] en $h2$, [575] en $h3$, [761] en $h4$, et enfin [1069] en $h5$.
- La quatrième campagne (C.IV) de mesures montre des gammes d'écart de valeurs de EC_a égales à : [184] en $h1$, [255] en $h2$, [417] en $h3$, [617] en $h4$, et enfin [831] en $h5$.

Cet écart entre les valeurs extrêmes de chaque gamme semble reposer et traduire le schéma structurant suivant :

- d'une part, une très grande variabilité spatiale de ce paramètre pour les données des différentes campagnes,
- d'autre part, un accroissement de l'étendue de l'écart des valeurs qui tend à évoluer excessivement selon la profondeur des sondages.

Une mise en place conforté (par campagne de suivi et par horizon d'étude) par les très fortes valeurs observées pour *l'écart-type d'estimation* (>31), *la variance* (>900) et *le coefficient de variation* (>30%).

- En second lieu, et en y visualisant la figure 56a,b,c,d des paramètres de tendance centrale, une légère prédominance des valeurs moyennes (dans toutes les couches) sur les valeurs médianes (*asymétrie positive*). Ceci signifie que la distribution des valeurs de EC_a repose sur un étalement (à droite) de l'allure de la structure des données vers les valeurs élevées.

Néanmoins, la mise en avant des valeurs moyennes, seulement, révèle un accroissement assez conséquent de EC_a en fonction de la profondeur. Cette allure indique le développement de **profils salins descendants**.

- En dernier, et en s'appuyant sur l'évaluation des paramètres d'asymétrie (Skew.) et d'aplatissement (Kurt.) sur la base du principe de la fourchette « -1 à +1 » (PazGonzales et al., 2000 ; Virgilio et al., 2007 ; Kavianpoor et al.,2012), la majorité des données de mesures exploité développent une *déviaton positive* (> +1) et ne répond donc pas à une distribution

de loi normale. Dans la perspective d'un traitement cartographique spécifique et l'utilisation de technique d'*interpolation spatiale* pour la valorisation de ces données, Harvey et Morgan (2009), Croft *et al.* (2013) et Jafarian Jeloudar *et al.*(2014) estiment qu'il est plus que souhaitable d'accomplir un ajustement ou une transformation Log_{10} avant leur exploitation.

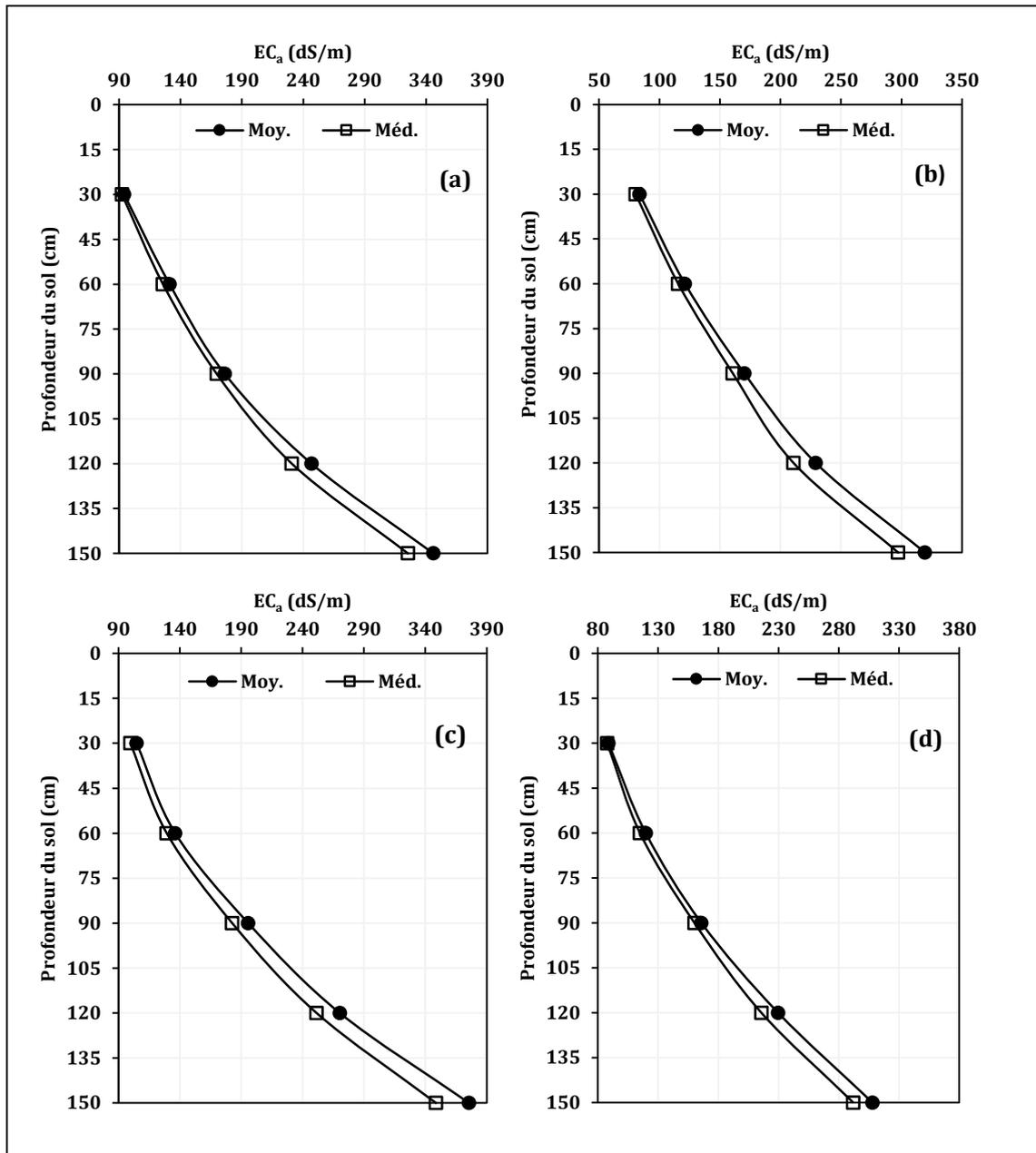


Figure 56. Représentation des données EC_a pour les 317 points.
 Les profils des paramètres de tendance centrale.
 (a) C.I, (b) C.II, (c) C.III, (d) C.IV

3.2. Caractérisation des données de EC_e

L'évaluation a été réalisée sur 740 valeurs pour l'ensemble des quatre campagnes de mesures. La présentation des résultats des traitements statistiques descriptifs est faite par campagne de mesures et par couche (37 valeurs) comme indiqué dans le tableau XXXII.

Tableau XXXII. Statistiques descriptifs de EC_e (dS/m).

Camp.	Hrz.	N Act.	Moy.	Méd.	Min.	Max.	Var.	Ec.-ty.	Asy.	Apl.	C.V.%
<i>EC_e C.I</i>	h1	37	12,5	7,5	1,1	70,2	198,7	14,1	2,5	7,2	113,0
	h2	37	21,8	16,0	3,5	66,2	249,1	15,8	1,4	1,7	72,0
	h3	37	25,9	20,2	3,7	72,8	252,9	15,9	1,2	1,4	61,0
	h4	37	26,3	23,7	4,2	79,5	227,2	15,1	1,3	3,1	57,0
	h5	37	26,3	23,4	5,0	71,0	181,7	13,5	1,2	2,2	51,0
<i>EC_e C.II</i>	h1	37	10,5	6,4	2,0	58,4	119,5	10,9	2,7	9,5	104,0
	h2	37	19,6	16,5	2,9	49,4	163,7	12,8	1,0	0,1	65,0
	h3	37	22,2	18,8	4,2	55,7	156,5	12,5	1,0	0,6	56,0
	h4	37	24,4	22,1	7,4	62,2	160,2	12,7	1,1	1,2	52,0
	h5	37	24,4	22,9	7,3	60,0	139,5	11,8	1,0	0,9	48,0
<i>EC_e C.III</i>	h1	37	9,5	5,4	1,8	60,9	124,6	11,2	3,2	12,3	118,0
	h2	37	20,4	17,8	4,9	55,1	161,5	12,7	1,2	1,1	62,0
	h3	37	23,0	20,3	3,4	58,8	162,3	12,7	1,2	1,4	55,0
	h4	37	24,1	21,9	8,5	65,0	143,1	12,0	1,4	2,7	50,0
	h5	37	24,0	22,5	8,3	62,2	122,3	11,1	1,3	2,8	46,0
<i>EC_e C.IV</i>	h1	37	12,3	10,1	1,9	45,2	81,9	9,1	1,7	3,8	74,0
	h2	37	17,8	16,2	2,8	48,0	100,3	10,0	1,0	0,9	56,0
	h3	37	20,2	18,0	4,6	45,9	109,5	10,5	1,0	0,2	52,0
	h4	37	21,8	20,0	5,8	53,9	120,1	11,0	1,0	0,8	50,0
	h5	37	22,8	21,8	6,4	54,1	115,5	10,7	1,0	1,0	47,0

Avec C : identifiant la campagne d'étude ou de mesure

Les résultats révèlent que les taux de salinité sont très variables et ce quelle que soit la campagne d'étude. Ces taux varient entre $\approx 1,1$ dS/m et 79,5 dS/m. Cette variation de gamme de EC_e signifie que les différentes couches de sol de la région d'étude se caractérisent par une grande hétérogénéité de la salinité.

Allant dans le même sens d'idée, les valeurs élevées de l'écart-type (>9), de la variance (>80) et du C.V. ($>45\%$) confirment cette tendance globale d'évolution. En se référant aux critères de U.S.S.L. (1954), il ressort que la variation des *gammes de salinité* identifiée peut être assimilée à la mise en place de niveaux de salinité, dans les couches étudiées, allant de non salés vers *très salés à hyper-salé*.

L'observation détaillée de ce phénomène par campagne et par couche de profondeur montre que les niveaux de salinité expriment :

- Un effet valeurs extrêmes (Min.-Max.) par horizon, d'où ressort des gammes d'écart de taux supérieures à 62 dS/m pour C.I, 46 dS/m pour C.II, 50 dS/m pour C.III, et 41 dS/m pour C.IV.

Cette structuration de gammes est basée sur :

- des valeurs minimales allant de ≈ 1 dS/m en surface vers ≈ 5 dS/m en profondeur pour C.I, de ≈ 2 dS/m en surface vers $\approx 7,5$ dS/m en profondeur pour C.II, de $\approx 1,9$ dS/m en surface vers $\approx 8,5$ dS/m en profondeur pour C.III, et de ≈ 2 dS/m en surface vers une valeur $\approx 6,5$ dS/m en profondeur pour C.IV et,
- des valeurs maximales sur l'ensemble des couches d'observation qui dépassent largement ≈ 66 dS/m pour C.I, $\approx 49,5$ dS/m pour C.II, ≈ 55 dS/m pour C.III, et ≈ 45 dS/m pour C.IV.

Cette représentation d'effet de gammes assez spécifiques montre que :

- pour les EC_e minimales, les sols étudiés sont par endroits non salés à peu salés (< 4 dS/m) dans les trois premières couches de profils. Au-delà de cette profondeur, toutes les couches étudiés deviennent moyennement salés à hyper-salés ($EC_e > 4-8$ dS/m) et,
- pour les EC_e maximales, la salinité est excessive ($EC_e > 50$ dS/m) dans toutes les couches de sol et ce, quelle que soit la campagne de mesures considérée.

- Un effet des indicateurs statistiques de tendance centrale, sur la base de la médiane et de la moyenne, construit sur une différence assez notable entre les deux paramètres (figure 57a,b,c,d). La tendance des valeurs médianes qui se positionnent au-dessous des moyennes dans les quatre campagnes, signifie la présence d'une légère asymétrie positive de EC_e . Ce résultat suggère un léger effet des valeurs élevées sur les données de masse.

- Un effet profil moyen d'accroissement de la salinité selon la profondeur des sols dans toute la région d'étude. En effet, la EC_e moyenne qui est de $\approx 12,45$ dS/m en surface passe à $\approx 26,5$ dS/m en profondeur pour C.I, de $\approx 10,5$ dS/m en surface passe à 24,5 dS/m en profondeur pour C.II, de 9,5 dS/m en surface passe à ≈ 24 dS/m en profondeur pour C.III, de ≈ 12 dS/m en surface passe à ≈ 23 dS/m en profondeur pour C.IV. Le profil de distribution de la salinité pour chaque campagne est donc **de type descendant** (figure 57 a, b,c,d).

Dans le même sillage, l'utilisation des indicateurs de dispersion, en référence à l'écart type, à la variance et au C.V., permet de confirmer dans une large mesure la totalité des changements, de mise en place et de déroulement du processus de salinisation, identifié jusqu'à présent. Il s'agit :

- D'abord, de confirmer l'écart des valeurs observées entre les valeurs extrêmes (Min.-Max.) et de ce fait la grande variabilité spatiale de ce paramètre. Il est cité :

- des données d'écart type $> \approx 9$,
- des données de variance $> \approx 82$ et,
- des données de C.V. toutes très élevées ($> 50\%$), dépassant même 100% au niveau des horizons $h1$ de C.I, C.II, et C.III.

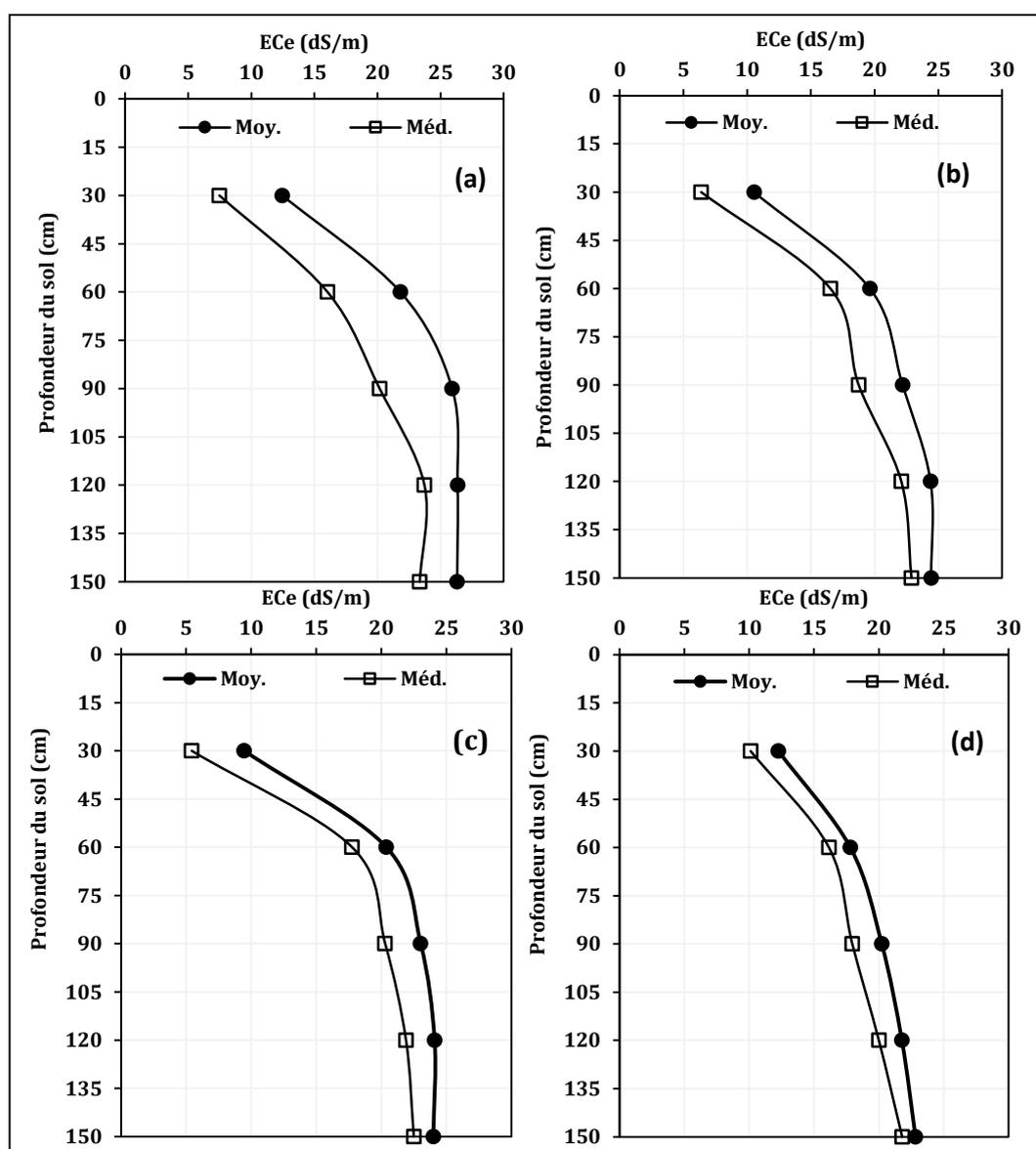


Figure 57. Représentation de EC_e pour les 37 sondages.
 Les profils des paramètres de tendance centrale.
 (a) C.I, (b) C.II, (c) C. III, (d) C.IV.

- Ensuite, de dessiner grâce, notamment, au C.V. une tendance à l'accroissement de l'intensité du processus de salinisation (fortes teneurs) sur fond de rétrécissement et de resserrement des

classes d'identification. La mise en place de cette structuration s'oriente des couches $h1$ et $h2$ vers les niveaux $h5$.

En complément de la valorisation descriptive des résultats par campagne et par horizon, la vérification des paramètres d'asymétrie (Skew.) et d'aplatissement (Kurt.), sur la base du principe de la fourchette « -1 à +1 », montre que la plupart de ces données présentent une *légère déviation positive* et ne répondent pas, ainsi, à une distribution de loi normal. Il convient donc de prendre des précautions particulières dans le cas d'une utilisation plus approfondie de ces données (Exp : *application de la transformation Log_{10} pour stabiliser la forte variance*).

3.3. Analyses des fréquences de distribution de EC_e

Le calcul des fréquences de distribution des niveaux de salinité a ciblé les données de mesures de 185 échantillons pour chaque campagne de mesure. Il a été réalisé sur la base du découpage en classes établi par USSL (1954).

3.3.1. Approche Globale

Pour cette étape, le traitement est opéré sur l'ensemble des données de chaque campagne d'étude (prises dans leurs globalités) sans distinctions des profils et des couches d'investigation. Les résultats sont représentés dans le tableau XXXIII.

Tableau XXXIII. Les fréquences de distribution des taux de salinité pour chaque campagne d'étude.

Classe de salinité	C.I		C.II		C.III		C.IV	
	Nbr. Horz.	Fréq. (%)	Nbr. Horz.	Fréq. (%)	Nbr. Horz.	Fréq. (%)	Nbr. Horz.	Fréq. (%)
C1	2	1,1	0	0	2	1,1	1	0,5
C2	11	6	10	5,4	9	4,9	4	2,2
C3	19	10,3	26	14,1	20	10,8	23	12,4
C4	45	24,3	38	20,5	47	25,4	52	28,1
C5	108	58,3	111	60	107	57,8	105	56,8
	$\Sigma_{tot.}$		$\Sigma_{tot.}$		$\Sigma_{tot.}$		$\Sigma_{tot.}$	
	185	100	185	100	185	100	185	100

Avec C : identifiant la campagne d'étude ou de mesure

Ce traitement laisse ressortir que :

- Moins de 1,1 % des échantillons de sol des quatre campagnes de mesures sont de *la classe C1* (<2 dS/m).
- Entre 2,2% et 6% des échantillons de sol des quatre campagnes de mesures sont de *la classe C2* (2-4 dS/m).

- Entre 10,3% et 14,1% des échantillons de sol des quatre campagnes de mesures sont de la classe **C3** (4-8 dS/m).
- Entre 20,5% et 28,1% des échantillons de sol des quatre campagnes de mesures sont de la classe **C4** (8-16 dS/m).
- Plus de 56,8 % des échantillons de sol des quatre campagnes de mesures sont de la classe **C5** (>16 dS/m).

Globalement, il ressort que *les échantillons salés et très salés à hyper-salés (C4 - C5)* sont les plus répandus, avec plus de 80% des données de traitement des quatre campagnes de mesures. Les pourcentages restants, sur fond d'accroissement des proportions de 15% à environ 20%, représentent la variation de gammes allant *d'échantillons non salés à moyennement salés (C1 à C3)*.

3.3.2. Approche par couche d'étude

Cette analyse est basée sur la combinaison des cinq classes de salinité de USSL (1954) avec les cinq (05) couches d'investigation (*h1, h2, h3, h4 et h5*) fixés pour chaque campagne d'étude. Les résultats sont indiqués dans le tableau XXXIV.

En première lecture, l'analyse des résultats des quatre campagnes de mesures indique que :

- La classe **C1** (*sols non salés*) est caractéristique, dans une large mesure, uniquement de l'horizon de *surface (h1)*.
- La classe **C2** (*peu salés*) est observée (avec plus d'intensité que la précédente) sur la partie supérieure des profils (*h1, h2 et h3*).
- Les autres classes de salinité ; **C5** (*salés à hyper-salés*), **C4** (*salés*) et un degré moindre la classe **C3** (*moyennement salés*), prédominent clairement dans l'ensemble des couches de chaque campagne. Leur répartition semble identifier une caractéristique "visuelle" apparentée pour les profils dans l'espace et dans temps.

Pour mieux visualiser la distribution et la localisation des taux de salinité dans le profil des quatre campagnes, nous avons traduit les données sous forme d'histogrammes de fréquences (figure 58). L'examen de cette figure fait apparaître ce qui suit :

Tableau XXXIV. Les fréquences de distribution des taux de salinité
par campagne et par couche.

Camp.	Niveau d'investigation		Classes de salinité					$\Sigma_{tot.}$
			C1	C2	C3	C4	C5	
<i>ECe C.I</i>	h1	Nbr.	2	9	10	8	8	37
		Fréq.(%)	5	24	27	22	22	100
	h2	Nbr.	0	1	4	13	19	37
		Fréq.(%)	0	3	11	35	51	100
	h3	Nbr.	0	1	1	10	25	37
		Fréq.(%)	0	3	3	27	68	100
	h4	Nbr.	0	0	2	7	28	37
		Fréq.(%)	0	0	5	19	76	100
	h5	Nbr.	0	0	2	7	28	37
		Fréq.(%)	0	0	5	19	76	100
<i>ECe C.II</i>	h1	Nbr.	0	8	14	7	8	37
		Fréq.(%)	0	22	38	19	22	100
	h2	Nbr.	0	2	4	12	19	37
		Fréq.(%)	0	5	11	32	51	100
	h3	Nbr.	0	0	4	9	24	37
		Fréq.(%)	0	0	11	24	65	100
	h4	Nbr.	0	0	2	5	30	37
		Fréq.(%)	0	0	5	14	81	100
	h5	Nbr.	0	0	2	5	30	37
		Fréq.(%)	0	0	5	14	81	100
<i>ECe C.III</i>	h1	Nbr.	2	8	15	7	5	37
		Fréq.(%)	5	22	41	19	14	100
	h2	Nbr.	0	0	4	12	21	37
		Fréq.(%)	0	0	11	32	57	100
	h3	Nbr.	0	1	1	10	25	37
		Fréq.(%)	0	3	3	27	68	100
	h4	Nbr.	0	0	0	10	27	37
		Fréq.(%)	0	0	0	27	73	100
	h5	Nbr.	0	0	0	8	29	37
		Fréq.(%)	0	0	0	22	78	100
<i>ECe C.IV</i>	h1	Nbr.	1	3	11	12	10	37
		Fréq.(%)	3	8	30	32	27	100
	h2	Nbr.	0	1	4	13	19	37
		Fréq.(%)	0	3	11	35	51	100
	h3	Nbr.	0	0	3	11	23	37
		Fréq.(%)	0	0	8	30	62	100
	h4	Nbr.	0	0	2	11	24	37
		Fréq.(%)	0	0	5	30	65	100
	h5	Nbr.	0	0	3	5	29	37
		Fréq.(%)	0	0	8	14	78	100

Avec C.I, C.II, C.III, C.IV : les identifiants des campagnes d'étude et des mesures

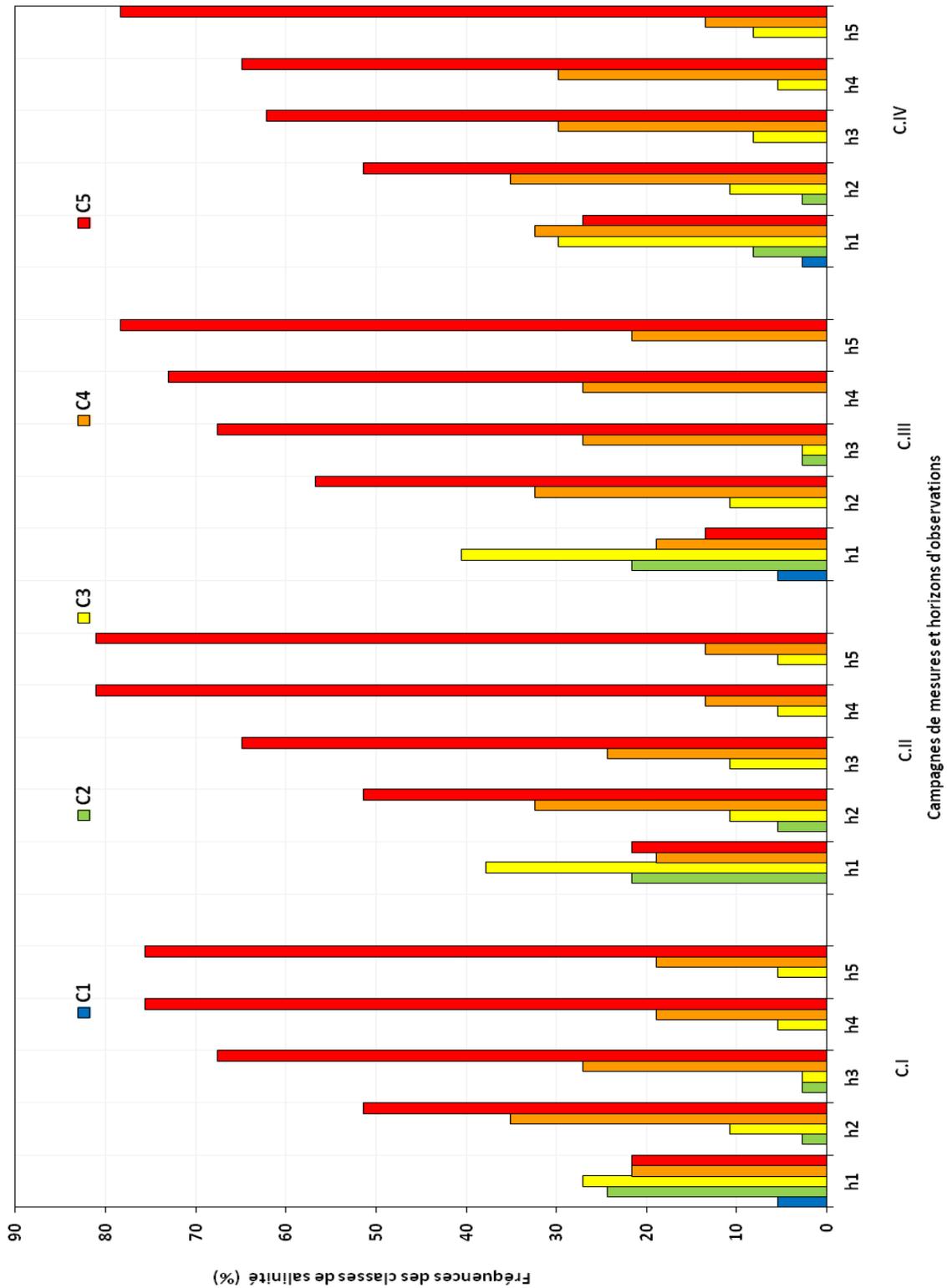


Figure 58. Répartition des classes de salinité dans les différents horizons par campagne d'étude.

- La classe de salinité **C1** n'est observée que dans *h1* avec un effectif de moins 5% dans chacune des quatre campagnes de mesures.
- La classe **C2** indique dans la partie supérieure des profils (*h1*, *h2* et *h3*) un léger schéma d'alternance par campagne d'étude. Elle est notée de ce fait : dans 24% des effectifs de *h1*, 3% des effectifs de *h2* et 3% des effectifs de *h3* pour *C.I*, dans 22% des effectifs de *h1* et 5% des effectifs de *h2* pour *C.II*, dans 22 % des effectifs de *h1* et 3% des effectifs de *h3* pour *C.III*, et enfin dans 8% des effectifs de *h1* et 3% des effectifs de *h2* pour *C.IV*.
- Les fréquences de ces deux classes chutent brutalement dans les autres couches, donnant lieu à des valeurs d'effectifs nulles (0%).
- Les classes **C5**, **C4** et à un degré moindre **C3** présentent des fréquences de distribution qui sont les plus répandues dans les sols étudiés et ce quels que soient les horizons observés et quelle que soit la campagne de mesure. Les fréquences caractéristiques sont :
 - pour **C5** entre 14% et 81% des effectifs de l'ensemble des horizons des quatre campagnes,
 - pour **C4** entre 14% et 35% des effectifs de l'ensemble des horizons des quatre campagnes et,
 - pour **C3** entre 0 % et 41% des effectifs de l'ensemble des horizons des quatre campagnes.
- La classe **C5** augmente toujours du haut vers le bas du profil avec préférentiellement une concentration en *h3-h4* et *h4-h5*, alors que la classe **C3** et à une moindre mesure la **C4** présentent une localisation légèrement inverse.

En dernier lieu, il est utile d'observer qu'hormis "*l'aspect fluctuant spécifique*" des fréquences de distribution de certaines classes de salinité, particulièrement dans le cas de **C1** et de **C2** observées seulement dans les horizons de la partie supérieure des profils (*h1*, *h2*, *h3*), **C4** et **C5** présentent une prédominance (80 %) sur l'ensemble des autres classes, et cela quels que soient les autres horizons ciblés.

En conséquence, il ressort que la structure des données des fréquences de salinité dans les profils pour l'ensemble des campagnes répond de manière sensible à *la représentativité décroissante* suivante : **C5 > C4 > C3 > C2 > C1**.

3.4. Caractéristiques des échantillons sol de sondages

A ce niveau, nous présentons une description statistique des données du sol relatives à H_p (%), aux éléments de la texture, au pH_e , aux taux de Calc.tot (%), et enfin au taux de $CaSO_4 \cdot 2H_2O$.

Les analyses ont été effectuées sur les 185 échantillons provenant des 37 sondages d'étalonnage cités antérieurement. Ces sondages ont été réalisés sur la base d'une incrémentation de cinq (05) couches de profondeurs, correspondant aux couches 0 cm – 30 cm (h1), 30 cm – 60 cm (h2), 60 cm – 90 cm (h3), 90 cm – 120 cm (h4) et 120 cm – 150 cm (h5).

Notons que seuls H_p (%) et le pH_e cumulent les données de mesures des quatre campagnes d'étude.

3.4.1. Le taux de H_p (%)

Les résultats relatifs à H_p (%) sont présentés dans le tableau XXXV.

Tableau XXXV. Statistiques descriptives de H_p (%).

Camp.	Hrz.	N Act.	Moy.	Méd.	Min.	Max.	Var.	Ec.ty.	C.V.%
<i>Hum. C.I</i>	h1	37	10,1	9,9	5,7	14,9	6,4	2,5	25
	h2	37	15,1	15,5	7,6	21,9	15,9	4,0	26
	h3	37	17,5	17,6	8,6	24,2	21,7	4,7	27
	h4	37	18,1	19,1	8,7	26,6	23,3	4,8	27
	h5	37	19,0	19,1	8,8	30,9	26,0	5,1	27
<i>Hum.C.II</i>	h1	37	22,1	21,6	12,5	32,1	15,7	4,0	18
	h2	37	19,8	19,2	7,8	32,1	29,5	5,4	27
	h3	37	20,8	20,6	6,0	37,5	31,5	5,6	27
	h4	37	22,0	21,7	9,0	32,5	26,1	5,1	23
	h5	37	23,8	22,9	13,6	43,8	34,9	5,9	25
<i>Hum C.III</i>	h1	37	16,8	16,7	6,0	23,4	12,4	3,5	21
	h2	37	20,8	21,4	8,9	27,3	19,3	4,4	21
	h3	37	21,2	21,6	11,0	29,7	19,2	4,4	21
	h4	37	22,1	22,9	12,0	30,6	24,7	5,0	22
	h5	37	23,8	24,4	12,3	34,8	24,5	5,0	21
<i>Hum. C.IV</i>	h1	37	21,7	22,4	12,8	31,7	18,4	4,3	20
	h2	37	19,0	19,3	11,8	28,4	14,4	3,8	20
	h3	37	19,9	20,1	11,2	26,9	14,6	3,8	19
	h4	37	22,3	23,1	9,0	29,0	19,0	4,4	20
	h5	37	23,8	23,5	14,0	30,7	13,3	3,6	15

A la lecture de ce tableau, il ressort que les taux de H_p (%) observés pour les quatre campagnes d'étude reposent sur :

- Des valeurs extrêmes (Min.-Max.) définissant des gammes d'écart de taux ou des étendues supérieures à $\approx 10\%$ pour C.I, $\approx 20\%$ pour C.II, $\approx 17\%$ pour C.III et $\approx 16\%$ pour C.IV. Une structuration de gammes axée, analytiquement, sur :

- des valeurs minimales, au sein d'une même couche de sols, cernées entre $\approx 6\%$ et $\approx 9\%$

pour C.I, entre $\approx 6\%$ et $\approx 14\%$ pour C.II, entre $\approx 6\%$ et $\approx 12\%$ pour C.III et entre $\approx 9\%$ et 14% pour C.IV et,

- des valeurs maximales sur l'ensemble des couches d'observation qui dépassent largement $\approx 15\%$, pour C.I, $\approx 32\%$ pour C.II, $\approx 23\%$ pour C.III et $\approx 27\%$ pour C.IV.

Ces écarts assez importants identifient, ainsi, une certaine variabilité spatiale des données obtenues sur les quatre campagnes d'étude. Un état de fait qui est, d'une part bien illustré par les profils hydriques des minima et maxima (figure 59), d'autre part bien conforté par:

- les valeurs modérées à élevées du C.V. ($15 < C.V. < 27\%$) et,
- les valeurs élevées de la variance ($\approx 26 < Var. < \approx 443$) et de l'écart-type ($\approx 5 < Ec.-Ty. < \approx 19$).

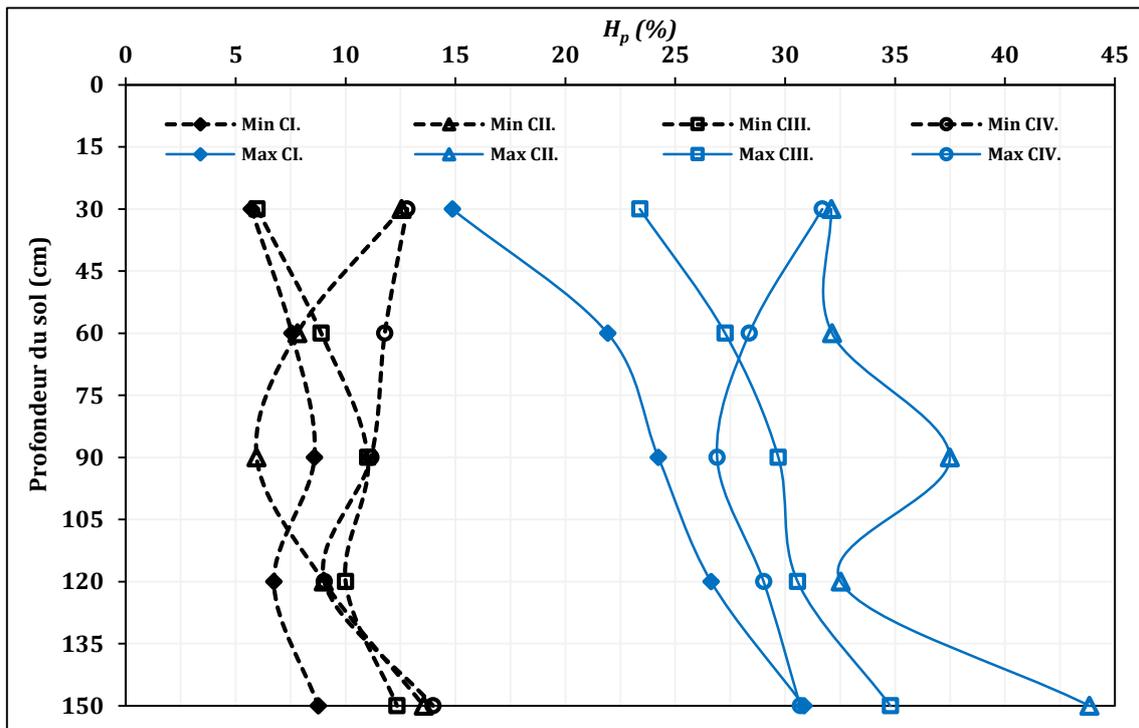


Figure 59. Profils hydriques des minima et des maxima pour les 4 campagnes de mesures.

Afin d'accroître l'intérêt d'une telle démarche de quantification et de valorisation des taux extrêmes de ce paramètre, il est intéressant d'introduire une approche d'illustration des modalités en barres (figure 60). Une représentation qui permet non seulement de confirmer la grandeur et l'importance des étendues de $H_p(\%)$ citées précédemment, mais aussi d'associer à leur mise en place et à leur déroulement deux schémas d'organisation, d'allure *intra et inter campagne* ciblée, bien distinct :

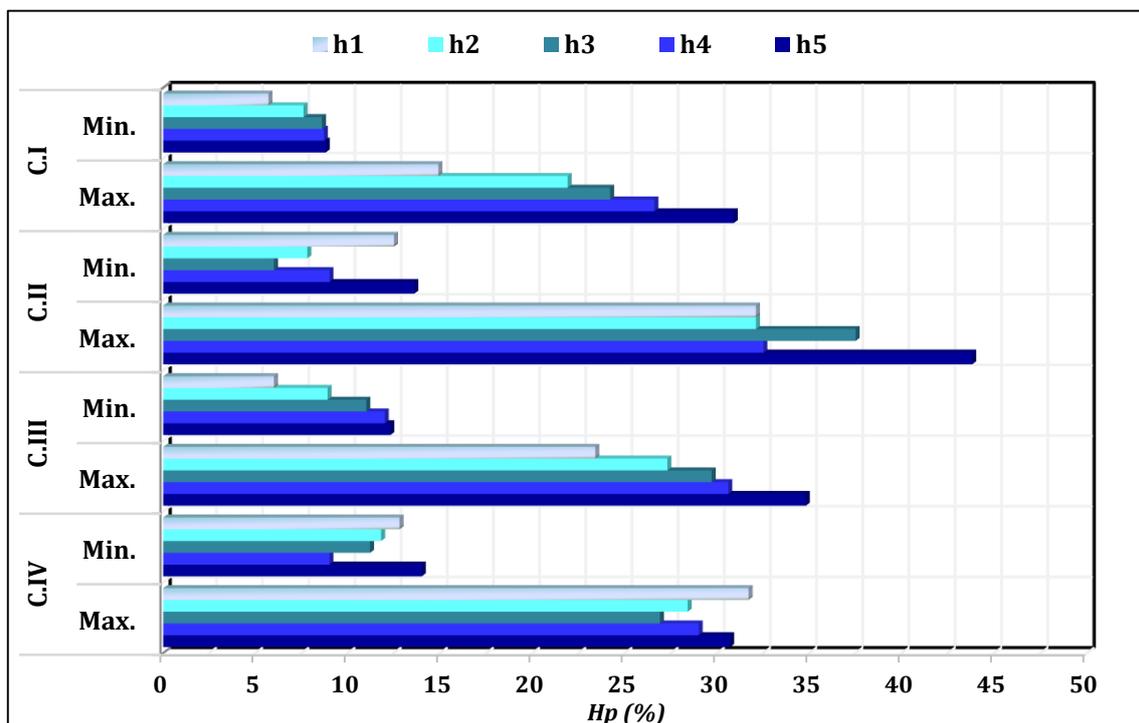


Figure 60. Identification des profils hydriques par une représentation en barres.

- un premier schéma d'organisation qui correspond au déroulement des campagnes C.I et C.III, relatives aux périodes de prélèvements des mois de *Mai-Juin* (*fin saison humide-début saison sèche*) : Il repose sur un front d'évolution des taux de $H_p(\%)$, pour les deux gammes de valeurs extrêmes, qui exprime sous forme d'un fort gradient *intra et inter campagne* "croissant" du haut vers le bas-profil.

Globalement, l'orientation structurelle observée ici repose sur des intervalles de données extrêmes allant de ≈ 6 à $\approx 27\%$ en *h1* et *h2* vers $\approx 8,5$ à $\approx 35\%$ en *h3-h4* et *h4-h5*,

- un second schéma d'organisation qui correspond au déroulement des campagnes C.II et C.IV, relatives aux périodes de prélèvements des mois de *Novembre-Décembre* (*fin saison sèche-début saison humide*) : Il repose sur un front de progression des taux de $H_p(\%)$ assez perturbé ou irrégulier. Une situation bien établie au regard des deux gammes de valeurs extrêmes.

Néanmoins, une minutieuse expertise des profils hydriques y afférents laisse apparaître des spécificités de propagation, en relation avec l'intensité d'humidification et la hauteur des profils ciblée. Ainsi, il est possible de noter :

- un effet de légère stabilisation des taux et de leur intensité dans les horizons superficiels (*h1* et *h2*) et de *bas-profil* et,

➤ un effet d'opposition des taux et de leur intensité dans les horizons *du moyen profil* ($h3-h4$).

- Des paramètres de tendance centrale en représentation de profil, par référence aux moyennes et médianes, s'identifiant par une distribution des valeurs de $H_p(\%)$ très rapprochées, voire égales (*Moy. = Med.*)(figure 61 *a,b,c,d*). Une situation qui permet de constater que:

- d'une part, la structure des données utilisées exprime une distribution symétrique,
- d'autre part, les valeurs aberrantes "*très grandes ou très petites*" ne dominent pas et, de ce fait, ne semblent pas fausser ces paramètres de positions, ainsi que l'ensemble des données d'étude.

En somme, ces observations démontrent que les taux de $H_p(\%)$ des échantillons de sols, même s'ils sont marqués par leurs écarts assez importants et variables, présentent des données très groupées autour de la valeur moyenne. En conséquence, la configuration des profils hydriques moyens (figure 61 *a,b,c,d*) permet :

- de confirmer l'organisation présentée plus haut (*a-c* et *b-d*) et de décrire parfaitement la variabilité des taux de $H_p(\%)$ par campagne d'étude en fonction de la morphologie et,
- de révéler, qu'en réalité :
 - cette mise en place ou la variabilité spatiale et temporelle des taux de $H_p(\%)$ ne semble s'individualiser que sur les 90cm premier centimètre, c-à-d, en allant des *horizons de surface* vers ceux *de moyen profil* et que,
 - pour les quatre campagnes d'étude, les taux d'humidification sont légèrement grandissants en fonction de la profondeur.

En se référant aux travaux de Boulaine (1957), Dubreuil (1969), Freeze (1974), Zante (1984), Zante et Dieye (1985), Musy et Soutter (1991), Daoud (1993), Douaoui et *al.*, (2004), Saïdi et *al.*, (2004), Bruand et Coquet (2005), Vincent (2007) et Gorraab (2016), il ressort que l'ensemble de cette organisation analytique dépend, *de manière synchronique*, des conditions de milieu qui ont prévalu avant et pendant l'échantillonnage. Ces dernières peuvent être résumées comme suite :

- *Etat de l'humidité initiale des sols.*

- Les événements météorologiques, sous forme *d'effet averses et/ou pluies; de grande intensité et de fréquence, et des températures et une évapotranspiration importante.*

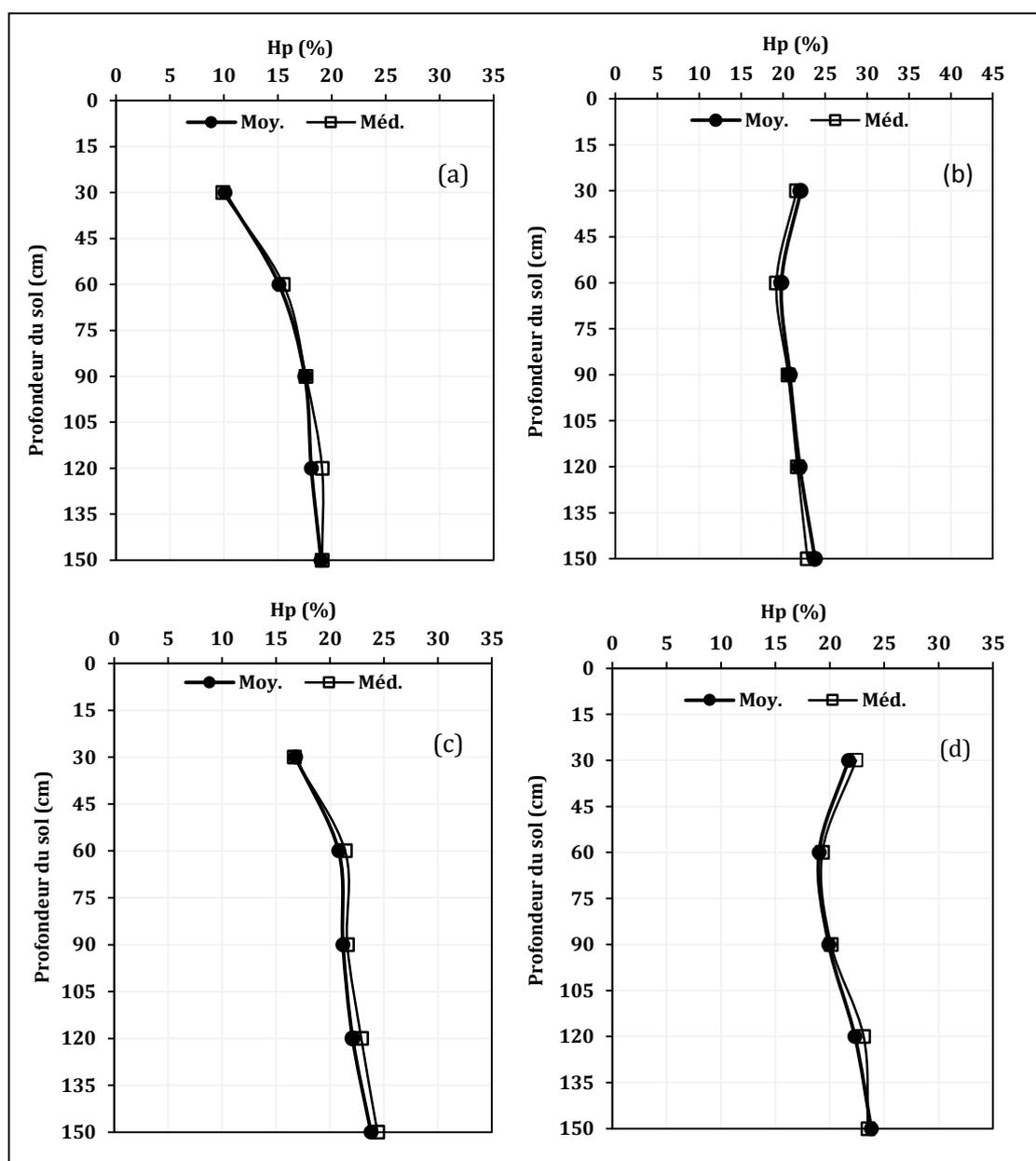


Figure 61. Profil d'humidité (%).
 Les paramètres de tendance centrale
 (a) C.I, (b) C.II, (c) C. III, (d) C.IV.

- La mécanique du milieu physique : dépendance à l'argile et de son importance dans les horizons.
- En dernier, le régime hydrique spécifique des sols, d'où ressort:
 - le mode de mouvement et de pénétration de l'eau,
 - l'effet ruissellement et inondation/engorgement et,

- *l'effet mise en place et fluctuation d'une nappe à faible profondeur.*

3.4.2. La texture

L'analyse granulométrique a été réalisée sur les échantillons de sols d'une seule campagne d'étude. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau XXXVI et illustrés par la figure 62.

3.4.2.1. La fraction argileuse

Le tableau XXXVI révèle que les valeurs minimales des taux d'argile oscillent entre 6 et ≈ 16 % et que les valeurs maximales se situent entre 67 et 75 % selon la couche de sol considérée. Les écarts entre ces limites extrêmes au sein d'une même couche sont donc assez forts. Ce résultat est largement confirmé :

- En premier lieu, par l'observation des écarts entre les profils argileux *des minima* et *des maxima* (figure 63).
- En second lieu, par les C.V. qui se situent aux environs de 30 % dans les couches de surface et de 40 % dans les autres couches. Ces valeurs traduisent ainsi la forte variabilité spatiale, d'où l'hétérogénéité assez importante des données exploitées pour ce paramètre.

L'examen des données des descripteurs de tendance centrale, à savoir les valeurs moyennes et médianes, et de leur illustration graphique (figure 64) permet un éclairage important sur les observations rapportées ci-dessus (*variabilité* et *hétérogénéité*) et conduit à valoriser un peu plus les rapports ou les liens entre les données. De ce point, il ressort que l'allure de l'interaction indique une très légère prédominance des valeurs médianes (dans toutes les couches) sur les valeurs moyennes (*asymétrie négative ou dissymétrie à droite*). Une forme de répartition de ce paramètre qui implique une légère influence des valeurs faibles sur la masse de données traitée.

Néanmoins, en portant un intérêt particulier sur les valeurs moyennes de ce paramètre, il s'avère qu'elles sont homogènes dans les différents horizons d'étude. Les valeurs sont comprises, dans l'ensemble, entre 42 et 49 % d'argile. Ce faisant, la mise en avant du profil argileux moyen, illustré respectivement dans les figures 63 et 64, fait apparaître une distribution d'aspect assez homogène de ce paramètre dans le profil et la prédominance du caractère argileux dans les sols salés de la région d'El Hamadna.

Tableau XXXVI. Statistiques descriptives de la granulométrie (%).

Hz.	Par.	N Act.	Moy.	Méd.	Min.	Max.	Var.	Ec.-ty.	C.V.
h1	Arg.	37	48	51	6	68	155,9	12,3	26
	L.	37	34	34	21	48	26,0	5,0	15
	S.	37	18	15	1	69	175,2	13,1	74
h2	Arg.	37	49	51	16	74	201,0	14,0	29
	L.	37	38	36	23	64	92,6	9,5	25
	S.	37	14	10	2	38	115,8	10,6	78
h3	Arg.	37	45	48	9	75	296,5	17,0	38
	L.	37	34	36	4	50	102,9	10,0	29
	S.	37	21	12	1	88	442,6	20,8	100
h4	Arg.	37	42	44	10	67	310,8	17,4	41
	L.	37	38	39	4	83	134,0	11,4	30
	S.	37	20	14	0	72	360,8	18,7	93
h5	Arg.	37	43	46	6	70	317,6	17,6	41
	L.	37	37	36	11	79	131,1	11,3	30
	S.	37	20	11	0	72	360,1	18,7	95

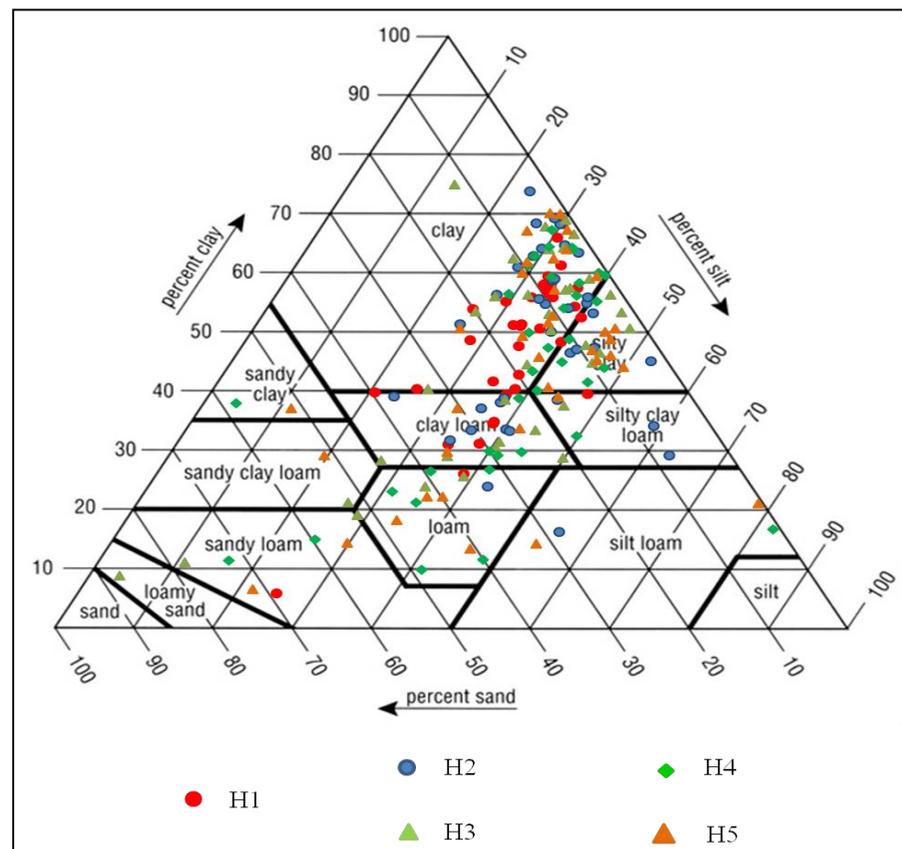


Figure 62. Diagramme textural des échantillons de sols des sondages d'étalonnages d'une campagne de mesure.

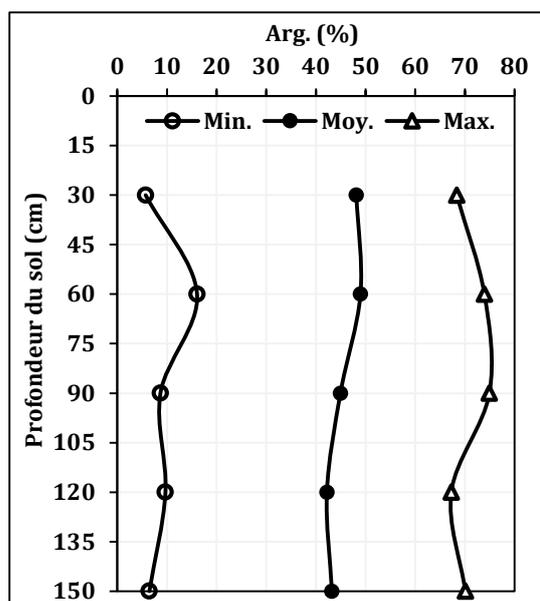


Figure 63. Profils d'argile.
 "Les valeurs extrêmes et la moyenne."

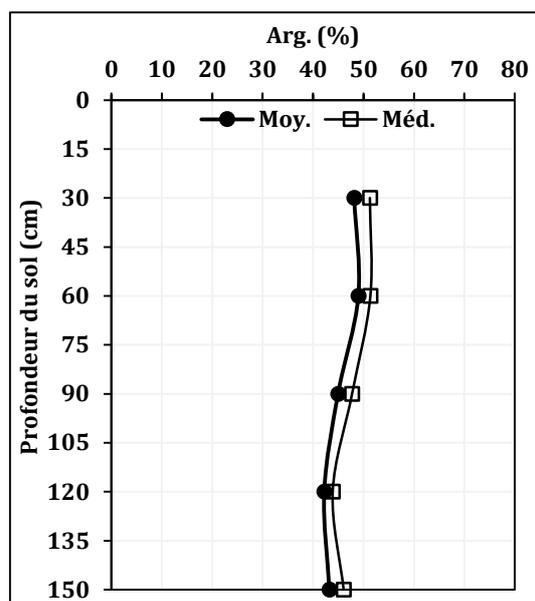


Figure 64. Les indicateurs de tendance centrale pour la fraction argileuse.

Ainsi, il est possible de conclure que ces résultats s'alignent sur les données de traitement du diagramme textural (figure 62). Des données qui révèlent que la quasi-majorité des couches de sol étudiées sont argileuses à argilo-limoneuses (*Clay, Clay loam, Silty clay*).

3.4.2.2. La fraction limoneuse

Les taux de limons oscillent entre 4 % et 83 % (tableau XXXVI). Ces valeurs signifient que ce paramètre est caractérisé par une très grande variation de ses teneurs. Les paramètres de dispersion qui sont le coefficient de variation ($15\% < C.V. < 30\%$), l'écart type d'estimation ($5 < Ec\text{-}ty. < 11,5$) et la variance ($26 < Var. < 134$) le confirment, en particulier dans les couches profondes. Cette hétérogénéité est parfaitement illustrée par les profils limoneux des minima et des maxima (figure, 65).

L'évaluation des indicateurs de tendance centrale et de leur représentation graphique (figure 66) tend à minimiser l'effet de la variation indiquée ci-dessus. En effet, les taux de limon observés semblent être très rapprochés, voire égaux ($Moy. = Méd.$), avec des valeurs limitées entre 34 % et 39 % selon la couche de sol considérée. Ce résultat suggère plutôt une distribution très homogène des taux de limons dans le profil.

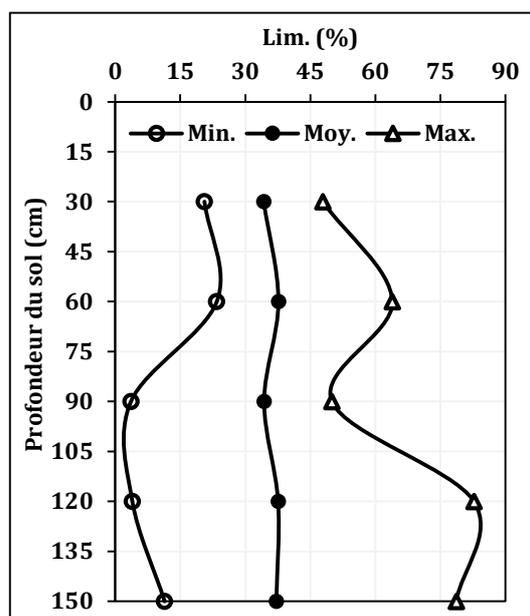


Figure 65. Profils de Limon.
 "Les valeurs extrêmes et la moyenne".

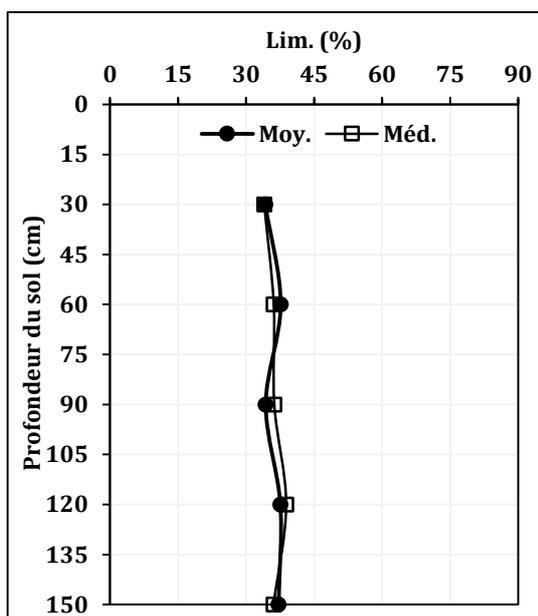


Figure 66. Les indicateurs de tendance centrale pour la fraction limoneuse.

Partant de ce constat, il est clair que la prise en compte des profils limoneux moyens, observés respectivement dans les figures 65 et 66, conforte et valide non seulement cet aspect d'homogénéité des taux de limon dans le profil, mais démontrent également la richesse des sols étudiés en cet élément.

Pour ce dernier point, il y a lieu d'indiquer qu'il s'agit d'un caractère morphologique bien mis en évidence par le diagramme textural (figure 62). L'indication primordiale que l'on peut extraire (des observations) est que la majorité des classes texturales des échantillons de sols contiennent des quantités très appréciables de limons (*silty clay loam, silt loam, loam*).

3.4.2.3. La fraction sableuse

Le tableau XXXVI révèle que la fraction sableuse est la fraction texturale qui varie le plus dans les sols étudiés. Les taux de sable varient de 0 % à 88 % selon l'horizon ciblé. Les écarts observés sont assez conséquents, allant jusqu'à composer l'essentiel de la constitution granulométrique du sol (avec plus de 85 % d'amplitude). Cette très grande variabilité est confirmée par l'allure des profils sableux des minima et des maxima (figure 67), ainsi que par l'écart type d'estimation ($10,5 < Ec\text{-}ty. < 21,$), de la variance ($175 < Var. < 450$) et du coefficient de variation ($74 \% < C.V. < 100 \%$). La représentation graphique des indicateurs de tendance centrale le confirme. En effet, l'impact de la très grande variabilité (citées plus haut) se fait ressentir sur la masse d'information des taux traités (figure 68). Il s'inscrit sous forme d'une

prédominance des valeurs moyennes (dans toutes les couches) sur les valeurs médianes (asymétrie *positive*), avec un effet accentué dans les couches profondes.

A ce titre, un retour sur l'insertion du profil sableux moyen dans le plan des extrêmes (figure 67) confirme l'allure imprimée par les valeurs extrêmes des données sur les taux moyens et suggère la partition de ces taux dans le profil selon deux schémas :

- L'effet des taux *de surface* et de *sub-surface*.
- L'effet des taux *de moyen* et de *bas-profil*.

Additionnellement, il y a lieu de savoir que cet "*aspect impact*" des fortes valeurs de sable, en *h3-h4* et en *h4-h5*, a été bien mis en évidence par le diagramme textural (figure 62). Les indications qui en résultent s'apparentent à l'*effet texture* d'environ 15 échantillons de sols, identifiés par les horizons *h3*, *h4* et *h5*, dont la constitution est largement dominée par le sable (*sandy clay*, *sandy clay loam*, *loamy sand*, *sandy loam*).

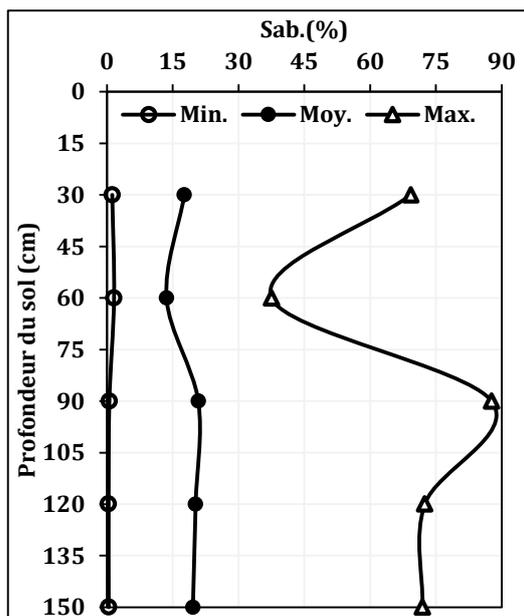


Figure 67. Profils de Sable :
 "Les valeurs extrêmes et la moyenne".

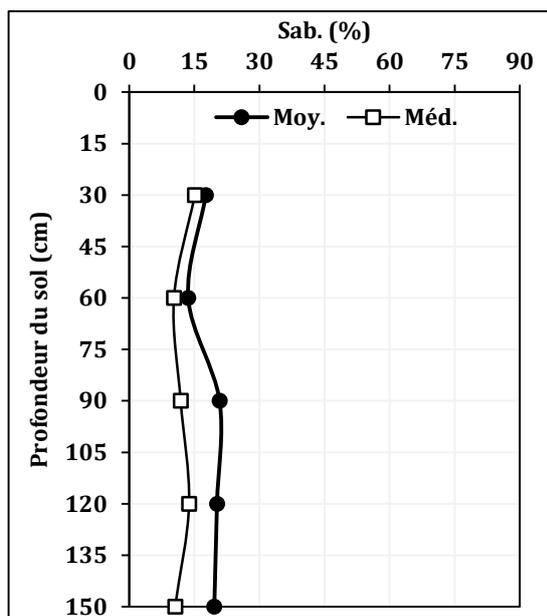


Figure 68. Les indicateurs de tendance centrale pour la fraction sableuse.

Au total, nous pouvons conclure que quelle que soit la fraction granulométrique considérée, celle-ci varie assez fortement dans l'espace et dans le profil. Cette variation est dans l'ordre **Sable > Argile > Limo**. De même, il ressort que la texture est dominée par la fraction argileuse qui est suivie par la fraction limoneuse et en dernier par la fraction sableuse. En effet, les classes texturales observées sont dans l'ordre **Clay > Silty Clay > Clay loam > Loam**, et les fractions Sandy sont très peu ou pas représentées. Les profils texturaux moyens avec quelques

spécificités morphologiques confortent ces indications et fixent l'ordre suivant : profil argileux ($\approx 42\%$ < argile < $\approx 52\%$) > profil limoneux ($\approx 34\%$ < limon < $\approx 39\%$) > profil sableux ($\approx 14\%$ < sable $\approx 21\%$).

Ces résultats de granulométrie concordent avec ceux obtenus par différents auteurs sur les sols de la plaine du Cheliff (Durand, 1956 ; Boulaïne, 1957 ; Aubert, 1976 ; Saidi, 1985 ; Daoud et *al.*, 1993 ; Douaoui, 2005 ; Saidi, 2005 ; Saidi et *al.*, 2008 ; Hadj-Miloud, 2010). En effet, les résultats obtenus font apparaître que la fraction argileuse est majoritairement dominante dans les profils et que les horizons superficiels sont relativement plus argileux que les horizons profonds. Les taux d'argile observés sont dans la plupart des cas supérieurs à 40%.

3.4.3. Le pH_e

L'évaluation du pH de l'extrait de pâte saturée a été menée sur les échantillons de sols des quatre (04) campagnes d'étude. Les résultats obtenus sont énoncés dans le tableau XXXVII.

Tableau XXXVII. Statistiques descriptives de pH_e .

Par.	Hrz.	N. Act.	Moy.	Méd.	Min.	Max.	Var.	Ec.-ty.	C.V.
<i>pHe C.I</i>	h1	37	8,0	7,9	7,0	8,9	0,2	0,4	6
	h2	37	7,8	7,8	7,1	8,6	0,1	0,3	4
	h3	37	7,7	7,7	7,1	8,4	0,1	0,3	4
	h4	37	7,6	7,5	7,1	8,5	0,1	0,3	4
	h5	37	7,6	7,6	7,0	8,2	0,1	0,3	4
<i>pHe C.II</i>	h1	37	7,9	7,9	7,3	8,6	0,1	0,4	5
	h2	37	7,7	7,7	7,3	8,6	0,1	0,3	4
	h3	37	7,7	7,6	7,2	8,4	0,1	0,3	4
	h4	37	7,6	7,5	7,2	8,6	0,1	0,3	4
	h5	37	7,6	7,6	7,0	8,2	0,1	0,3	4
<i>pHe C.III</i>	h1	37	7,9	7,9	7,3	8,6	0,1	0,4	4
	h2	37	7,7	7,7	7,2	8,4	0,1	0,3	4
	h3	37	7,7	7,6	7,2	8,3	0,1	0,3	4
	h4	37	7,5	7,5	7,0	8,5	0,1	0,3	4
	h5	37	7,6	7,6	7,0	8,1	0,1	0,3	4
<i>pHe C.IV</i>	h1	37	7,9	7,9	7,4	8,6	0,1	0,3	4
	h2	37	7,7	7,7	7,2	8,4	0,1	0,3	4
	h3	37	7,7	7,6	7,1	8,4	0,1	0,3	4
	h4	37	7,5	7,5	7,1	8,6	0,1	0,3	4
	h5	37	7,6	7,5	7,0	8,1	0,1	0,3	4

Globalement, les valeurs du pH_e montrent une évolution très rapprochée en fonction de la profondeur du sol et du temps. Les résultats indiquent des taux extrêmes cernés entre 7,00 et 8,9, sur la base d'écart qui sont plus grands en surface qu'en profondeur (figure, 69). Cet intervalle traduit une variation assez conséquente des domaines de pH selon le *spectre actif* (Loyer, 1991), caractéristiques de nos sols. En se référant aux normes établies par Bocoum

(2004) (Annexe I), il s'avère que les différentes solutions du sol analysées varient dans la gamme *neutre à très alcaline*.

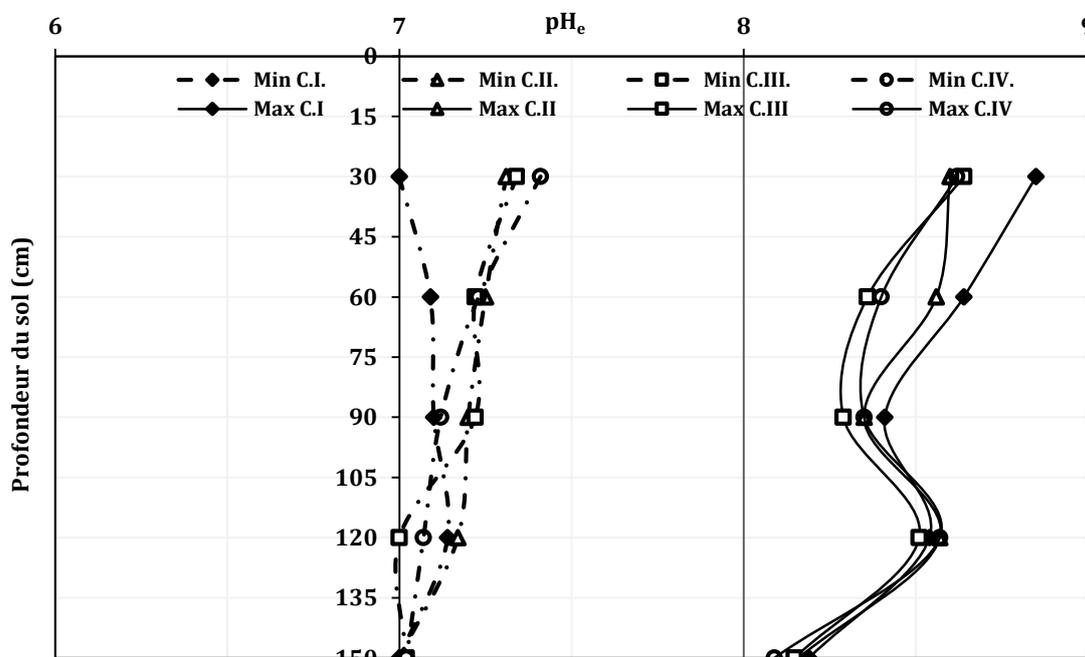


Figure 69. Profils des pH_e par campagne.
 "Les valeurs extrêmes".

En intégrant d'autres indicateurs de dispersion dans l'évaluation des données, identifiés par les faibles valeurs du $C.V.$ ($<6\%$), de l'écart type d'estimation ($\approx 0,265 < Ec\text{-}ty. < \approx 0,45$) et de la variance ($0,07 < Var. < \approx 0,2$), il est noté, à contrario, des résultats qui minimisent d'une façon significative *l'effet analytique* observé et orientent l'estimation du degré de variation du pH vers un ordre de grandeur beaucoup plus faible que celui indiqué par la gamme d'interprétations. En d'autres termes, ce paramètre est présenté comme ayant une très faible variabilité ou dispersion de taux et très homogène.

Compte tenu de ce qui précède, il est clair qu'on se trouve confronté à une situation assez paradoxale qui peut prêter à confusion. Dans ce sens, et tenant compte du fait que les unités de pH , sur le plan pédologique, ne permettent pas l'expression des variations réelles du milieu physique, il devient alors irrationnel, voire aberrant, de vouloir associer l'intensité de la variabilité de ce paramètre (dans notre contexte) à une représentativité aussi "**incertaine**".

Pour les indicateurs de tendance centrale, il est mis en évidence une légère emprise des valeurs moyennes sur les valeurs médianes (asymétrie positive) en particulier dans les horizons de moyens et bas-profil. Cette allure de partition, bien illustrée dans la figure 70 (*a, b, c, d*), suggère un léger effet des valeurs élevées sur la distribution des pH_e .

Toutefois, la mise en avant spécifique des valeurs moyennes de ce paramètre et l'allure des profils y afférents permet de valider à postériori certaines de nos appréciations d'ensemble. Il convient de citer :

- La tendance d'évolution typiquement décroissante vers la profondeur.
- L'absence de l'influence des saisons. Ce qui donne lieu à une distribution d'aspect homogène et une stabilisation du pH dans le temps par couche de sols.

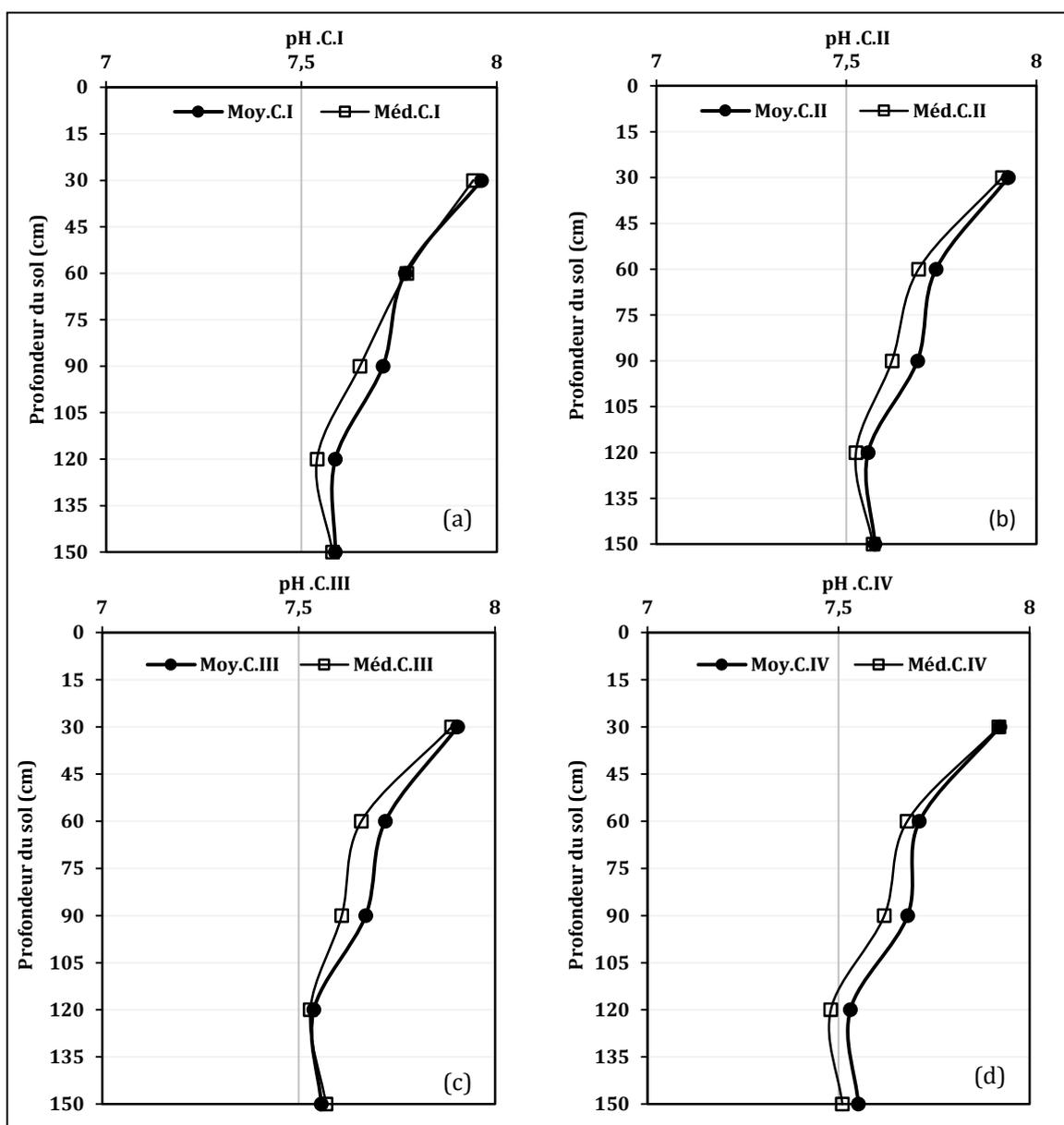


Figure 70. Les profils de pH_e .
 Les indicateurs de tendance centrale :
 (a) C.I, (b) C.II, (c) C. III, (d) C.IV.

Du point de vue pratique, il est considéré que les différentes causes physico-chimiques de la diminution du pH peuvent être engendrées par la mise en place de "**conditions spécifiques et complexes du milieu**" (Ek, 1973 ; McBride, 1994 ; Scholtus, 2003 ; Legros, 2007 ; Nijimbère, 2014 ; Harter et Motis, 2016 ; Zaman et al., 2018). Ces conditions seraient rythmées (en continue) par l'immixtion de la dynamique des eaux (*effet d'une nappe permanente, irrigations, remarquables épisodes pluvieux, ruissellement, inondation, écoulements latéraux et profonds, évaporation, etc...*) dans le déroulement de certains processus pédogénétiques du sol (Ek, 1973 ; Bottner, 1982 ; Loyer et al., 1992 ; McBride, 1994 ; Nijimbère, 2014 ; Grünberger, 2015).

Comme processus pédogénétiques références, il est possible de citer :

- La *dissolution-précipitation* de minéraux caractéristiques (Exp: Calcite, Dolomite, Magnésite, etc...) (Dabin, 1968 ; Massoumi, 1968 ; Dosso, 1980 ; Daoud, 1993 ; Saidi, 2005 ; Nijimbère, 2014 ; Grünberger, 2015).
- La minéralogie des argiles (Exp: *néoformation* d'argiles magnésiennes) (Dosso, 1980 ; Dabin, 1985 ; Agoumé et Birang, 2009 ; Koulibaly, 2011).
- La perte de la structure, les types d'évolution de la matière organique (*en fonction de la nature du couvert*), les pertes de certaines réserves minérales par lessivage et lixiviation, et enfin la libération de certains éléments toxiques (Pernes-Debuyser et Tessier, 2002 ; Agoumé et Birang, 2009 ; Koulibaly, 2011 ; Nijimbère, 2014).

3.4.3.1. Mise en place pratique:

Dans notre contexte d'étude, les observations faites durant les quatre campagnes permettent d'associer la mise en place des "**conditions spécifiques**" à une aggravation¹⁰ contraignante et cyclique des mécanismes de fonctionnements hydrologiques et hydrodynamiques des sols du périmètre agricole (Figures 71 et 72). Cette aggravation, qui se traduit par une évacuation difficile et lente des eaux hors des parcelles, est schématisée par :

- Un effet *stagnation d'eau (en fine lame)* en surface (figures 71a,b).
- Un état de surface et effet *engorgement* (figures 72a,b).
- Un effet "*fluctuation*" d'une nappe à faible profondeur qui peut atteindre dans certains endroits une position *sub-affleurante* à *affleurente* (15-30cm), combiné à une déficience du drainage (dans les deux cas de figure).

¹⁰ Techniquement, elle est la résultante des dysfonctionnements du système de drainage (*Chap. II, §3.4.3*) et de l'application de méthodes culturales et d'aménagements, dont une partie est héritée, qui sont non conformes aux conditions actuelles du périmètre.



Figure 71. L'action du milieu environnant sur des placettes en clos.
(a) Etat inondation/engorgement après averse, (b) Etat inondation/engorgement après irrigation

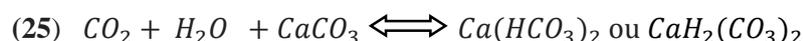


Figure 72. L'action du milieu environnant.
(a) État de surface et effet inondation, (b) Drainage inefficace, effet recharge et flux d'une nappe à faible profondeur.

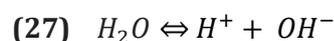
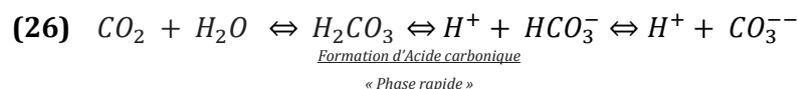
Pour mieux visualiser cette tendance régressive, il est possible de compléter et de conforter les indications caractéristiques de cette aggravation par un retour sur les annotations de la figure 35 (*Chap.II, §3.4.3.*), relatives au scénario du plan de situation de l'état du drainage dans la zone d'étude.

A partir de là, cet ensemble va donner lieu au développement d'aspects réactionnels chimiques et géochimiques où il est clairement mis, *cas de nos sols salés riche en calcaire*, l'accent sur l'intervention de la pression partielle équilibrante en CO_2 (pCO_2) et de son pouvoir tampon dans (Ek, 1973 ; McBride, 1994 ; Marlet *et al.*, 2007 ; Cailleau *et al.*, 2009 ; Nijimbère, 2014 ; Grünberger, 2015 ; Harter et Motis, 2016) **(25)** :

- Le déplacement de l'équilibre du milieu dans le sens de la dissolution du *Calc.tot* (%).
- L'annihilation de l'activité des espèces chimiques alcalinisantes ; principalement les carbonates et les sulfates (Dosso, 1980 ; Valles *et al.*, 1989 ; Gonzalez-Barrios, 1992).
- La stabilisation « *du domaine des activités chimiques* » dans la gamme neutre ($pH=7$). Un schéma que Cheverry (1974) et Barbiero *et al.* (1995) présentent comme une évolution des solutions de sols vers la voie saline neutre.



Dans ces conditions, il est possible de décomposer cette réaction en une série de réactions chimiques partielles d'équilibres qui interviennent (simultanément) lors de ce phénomène **(26)**, **(27)** et **(28)** :



3.4.4. Le calcaire total (%)

Les traitements d'analyses ont été réalisés sur les échantillons de sols d'une seule campagne d'étude. Les principaux résultats sont synthétisés dans le tableau XXXVIII.

Tableau XXXVIII. Statistiques descriptives du $Calc.tot.(%)$.

Hrz.	N Act.	Moy.	Méd.	Min.	Max.	Var.	Ec.-ty.	C.V.(%)
h1	37	12,000	11,880	8,490	15,280	2,253	1,501	13
h2	37	12,376	12,310	8,490	16,980	4,601	2,145	17
h3	37	13,146	12,730	8,910	18,250	5,170	2,274	17
h4	37	13,352	13,160	8,910	18,250	5,715	2,391	18
h5	37	13,328	14,000	8,060	17,400	5,685	2,384	18

A la lecture de ce tableau, il ressort que les taux de $Calc.tot.(%)$ évoluent dans une gamme limitée par les valeurs extrêmes $\approx 8\%$ et $\approx 18\%$, selon la couche de sol considérée. Sur la base des normes proposées par Lozet et Mathieu (1990) et Djili (2000) (Annexe VI), il ressort que la minimale de $\approx 8\%$ marque la présence d'horizon à faibles teneurs en $Calc.tot.(%)$. La maximale de 18% indique la présence d'horizons à moyennes teneurs en $Calc.tot.(%)$. Cet écart de teneurs assez réduit nous donne un aperçu sur la faible variabilité ou la faible dispersion des taux de ce paramètre dans les sols étudiés.

Cette tendance est bien illustrée, en premier lieu par l'allure des courbes des minima et des maxima (figure 73), en second lieu par les valeurs de l'écart type d'estimation ($1,5 < Ec.ty. < 2,4$), de la variance ($2,2 < Var. < \approx 6$) et à un degré moindre les valeurs du coefficient de variation ($13 \% < C.V. < 18 \%$). L'expression des données moyennes et médianes sur fond de valeurs très rapprochées (figure 74), voire égales ($Moy. = Med.$), convergent distinctement vers les mêmes constatations statistiques et conforte l'aspect d'homogénéité observé sur les données d'ensemble. En effet, ces représentations montrent que ces indicateurs ne sont pas influencés par un effet valeurs extrêmes "exagérément grandes ou petites". Les taux de $Calc.tot.(%)$ observés oscillent dans l'intervalle très réduit de $\approx 12\%$ et 14% selon la couche de sol considérée.

Ces résultats suggèrent donc que ces échantillons de sols sont moyennement pourvus en ce paramètre et que sa distribution est homogène dans le profil et dans l'espace.

L'allure du profil $Calc.tot.(%)$ moyen, projeté et identifié, particulièrement dans le plan des extrêmes (figure 73), le confirme.

Ceci étant, il y a lieu de relever que ces résultats rejoignent, assez sensiblement, les observations issues des travaux de Durand (1956), Boulaine (1957), Hydrotechnique *corp.* (1976), Daoud (1993), Douaoui et *al.* (2004), Saïdi et *al.* (2008), Hadj-Miloud (2010 ; 2019) qui ont montré que les teneurs en calcaire total des sols de la zone sont faibles à moyennes et qu'elles varient peu

dans le profil. D'une manière générale, ils insistent sur une distribution pratiquement homogène dans toutes les couches.

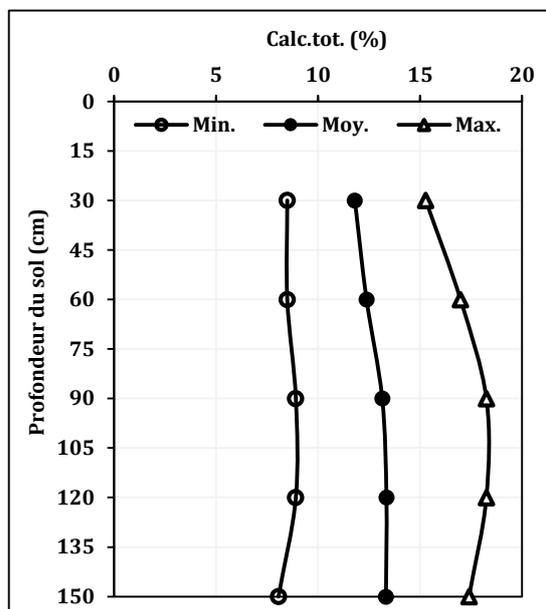


Figure 73. Profils de *Calc.tot.* (%).
 "Les valeurs extrêmes et la moyenne".

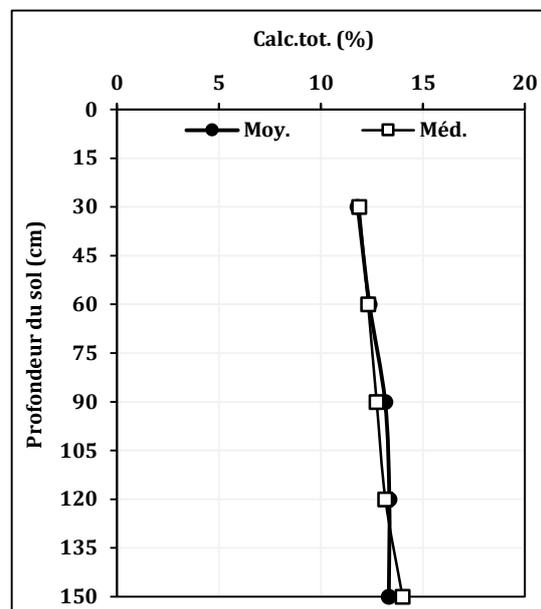


Figure 74. Les indicateurs de tendance centrale pour le *Calc.tot.* (%).

3.4.5. Le gypse

La détermination des taux de gypse été effectuée sur les échantillons de sols d'une seule campagne d'étude. Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau XXXIX.

Globalement, ce tableau révèle que les teneurs en gypse ne sont pas très importantes dans les échantillons. Les taux extrêmes "très représentatifs" oscillent dans une très petite gamme (figure 75), allant de l'état de trace (< 1 %) à environ 5,6 %. Selon les normes établies par Barzanji (1973) et FAO(1990), il s'agit de sols à très faible teneurs en gypse (Annexe VII). Pourtant, ces taux de gypse, malgré leurs très faibles teneurs dans le sol, semblent varier fortement dans les horizons et dans l'espace. En effet, les valeurs des *C.V.* dépassent très largement les 50%.

Tableau XXXIX. Statistiques descriptives du *gypse*(%).

Hrz.	N Act.	Moy.	Méd.	Min.	Max.	Var.	Ec.ty.	C.V.(%)
h1	37	2,5	2,3	trace	5,4	2,4	1,5	62
h2	37	2,9	2,6	trace	5,6	2,9	1,7	58
h3	37	2,9	2,2	0,5	5,3	3	1,7	60
h4	37	2,8	2,4	trace	5,4	2,7	1,6	57
h5	37	2,7	2,3	trace	5,5	2,8	1,7	63

En considérant l'allure des indicateurs de tendance centrale et leur représentation graphique (figure 76), il est possible d'évoquer la grande adéquation et la complémentarité avec les observations de l'étendu de la distribution. Cela se traduit, en tout premier lieu, par l'effet logique de la "tendance faibles valeurs " selon l'horizon, cerné entre 2,2 et 2,9 %, ensuite par l'effet *emprise* des moyennes sur les médianes (asymétrie positive), en particulier dans les horizons de moyen-profil, donnant lieu à l'étirement de la masse de données vers les valeurs élevées.

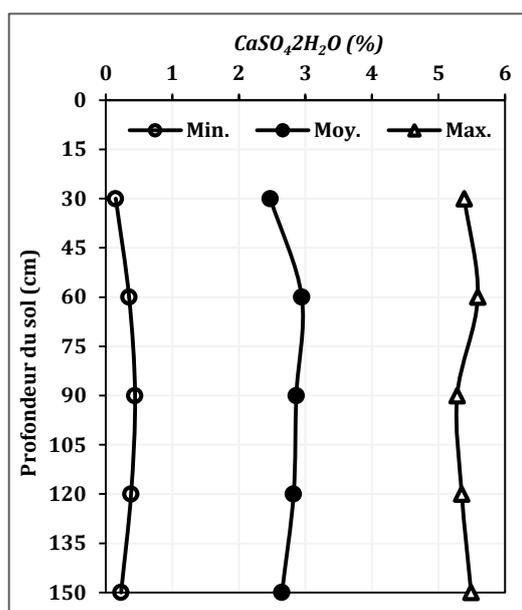


Figure 75. Profils du gypse (%).
 " Les valeurs extrêmes et la moyenne".

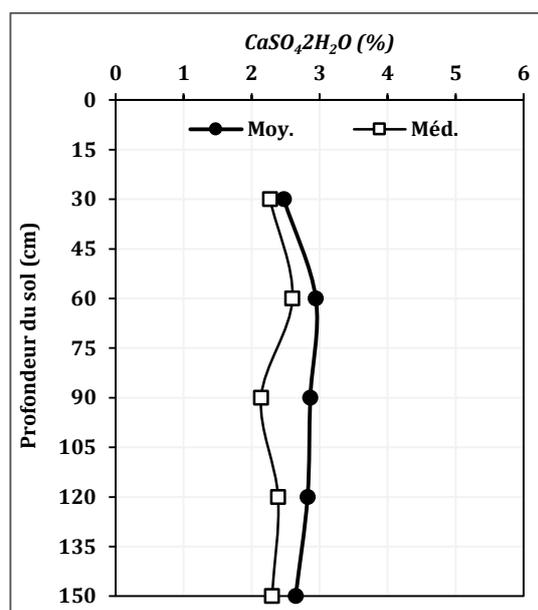


Figure 76. Les indicateurs de tendance centrale pour le gypse (%).

Néanmoins, une vue d'ensemble des résultats, en tenant compte des paramètres de dispersions ($Ec.-ty.$, $Var.$ et $C.V.$) et des taux moyens, permet de constater une certaine constance dans les taux de gypse dans les différentes couches du sol. Ce résultat suggère que la distribution du gypse dans le profil est d'aspect homogène. Cette tendance de répartition est confortée par l'insertion de la courbe du gypse moyen dans le plan des extrêmes (figure 75).

Allant dans le même sens méthodologique que pour le calcaire total, les résultats obtenus pour le sulfate de calcium ont déjà été consignés dans certains travaux effectués dans la même région d'étude par Boulaine (1957), Hydrotechnique *corp.* (1976), Daoud (1993), Douaoui (2005) et Hadj-Miloud (2010 ; 2019). Dans l'ensemble, il est indiqué que les teneurs en gypse sont très faibles, plus précisément, elles sont comprises entre l'état de trace et 5% et qu'elles varient très peu dans le profil.

3.5. Relations entre EC_e et les paramètres pédologiques étudiés

Le traitement a été mené sur la base des régressions simples entre EC_e et les six (06) paramètres pédologiques étudiés (H_p , pH_e , Arg., Lim., Sab., Calc.tot. et le Gypse). Les associations qui ont pris forme dans la matrice de calcul sont au nombre de 140 couples. Les résultats obtenus sont énoncés dans le tableau XL.

Tableau XL. Matrice de corrélation entre EC_e et les différents paramètres d'étude.

Camp.	Hrz.	Prob.	Arg. (%)	L. (%)	S. (%)	pH_e	Calc.tot. (%)	Gypse(%)	H_p (%)
<i>EC_e C.I</i>	h1	r	0,023	-0,297	0,090	-0,403	-0,058	-0,070	0,227
		p	0,894	0,075	0,595	0,013	0,735	0,679	0,175
	h2	r	0,157	-0,09	-0,112	-0,471	-0,153	0,026	0,250
		p	0,353	0,597	0,508	0,003	0,366	0,879	0,130
	h3	r	0,183	-0,171	0,309	-0,400	0,174	-0,350	0,157
		p	0,183	0,065	0,703	0,015	0,302	0,034	0,350
	h4	r	-0,019	-0,019	0,023	-0,512	-0,022	-0,268	-0,040
		p	0,913	0,913	0,894	0,001	0,899	0,108	0,832
	h5	r	-0,004	-0,12	0,074	-0,004	0,204	-0,113	-0,220
		p	0,981	0,497	0,670	0,981	0,225	0,505	0,192
<i>EC_e C.II</i>	h1	r	0,158	-0,297	-0,037	-0,241	-0,027	-0,049	0,392
		p	0,351	0,074	0,830	0,151	0,872	0,774	0,820
	h2	r	0,330	-0,180	-0,27	-0,351	-0,198	0,007	0,012
		p	0,100	0,296	0,116	0,033	0,239	0,969	0,940
	h3	r	0,267	-0,032	-0,201	-0,208	-0,355	-0,420	0,059
		p	0,109	0,852	0,230	0,217	0,084	0,010	0,730
	h4	r	0,153	-0,019	-0,130	-0,089	-0,310	-0,267	-0,240
		p	0,364	0,910	0,439	0,600	0,080	0,110	0,155
	h5	r	0,055	-0,026	-0,037	0,203	0,000	-0,139	-0,427
		p	0,745	0,88	0,830	0,228	1,000	0,413	0,008
<i>EC_e C.III</i>	h1	r	-0,091	-0,297	0,197	0,035	-0,031	-0,086	-0,008
		p	0,594	0,074	0,242	0,835	0,855	0,613	0,965
	h2	r	0,208	-0,125	-0,150	-0,243	-0,166	-0,023	0,340
		p	0,218	0,460	0,378	0,148	0,327	0,892	0,104
	h3	r	0,265	-0,057	-0,187	-0,087	-0,184	-0,449	0,177
		p	0,112	0,736	0,267	0,607	0,275	0,005	0,296
	h4	r	0,089	0,040	-0,106	-0,032	-0,211	-0,389	-0,027
		p	0,601	0,816	0,530	0,852	0,209	0,017	0,877
	h5	r	0,032	-0,019	-0,018	0,201	-0,044	-0,255	-0,264
		p	0,851	0,909	0,914	0,232	0,798	0,128	0,114
<i>EC_e C.IV</i>	h1	r	0,263	-0,204	-0,174	-0,160	-0,115	0,021	0,135
		p	0,116	0,226	0,303	0,345	0,499	0,901	0,425
	h2	r	0,089	-0,129	-0,268	-0,350	-0,221	0,082	0,358
		p	0,072	0,446	0,108	0,048	0,189	0,630	0,140
	h3	r	0,265	0,070	-0,310	-0,087	-0,184	-0,449	0,280
		p	0,112	0,678	0,062	0,607	0,275	0,005	0,095
	h4	r	0,225	-0,022	-0,139	-0,074	-0,208	-0,307	0,074
		p	0,180	0,897	0,413	0,663	0,217	0,064	0,665
	h5	r	0,187	-0,047	-0,147	0,131	0,076	-0,228	-0,267
		p	0,268	0,781	0,385	0,439	0,655	0,175	0,110

A la lecture de ce tableau, il ressort que :

- Les coefficients de corrélation (r) entre EC_e et les différents paramètres pédologiques étudiés sont compris entre $-0,512$ et $0,392$.

- Les seules relations (nbr=11) statistiquement significatives ($p < 0,05$) sont celles entre EC_e d'un côté et le pH_e et le gypse de l'autre et elles sont négatives. De manière structurale, celles-ci répondent à la mise en place suivante :

- avec le pH_e , elle est identifiée dans les quatre premiers horizons de la *C.I* et dans *h2* pour les campagnes *C.II* et *C.I*,
- avec le gypse, elle est identifiée dans *h3* pour les quatre campagnes et dans *h4* pour *C.III*.

Il y a lieu d'indiquer que ces relations, même si elles sont significatives ($P < 0,05$), elles restent néanmoins faibles ($r < 0,360$),

- Les autres corrélations qui restent (nbr = 129) ne sont pas statistiquement significatives ($p > 0,05$).

De cet ensemble, il est possible de conclure que, mis à part le pH_e et le $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ qui présentent une relation inversement proportionnelle avec les taux de salinité sur certaines couches, les autres paramètres pédologiques (H_p , *texture*, *Calc.tot.*) semblent évoluer de manière spécifique et indépendante de EC_e sur l'ensemble du descriptif méthodologique.

En comparant ces résultats avec les données bibliographiques disponibles sur la même région, sans tenir compte des spécificités méthodologiques adoptées, il est possible de noter ce qui suit (Tableau XLI):

- Soit des tendances relationnelles *divergentes*.
- Soit des tendances relationnelles *convergentes*.
- Ou bien, la mise en avant de certaines relations non spécifiées dans la bibliographie.

Tableau XLI. Synthèse des interactions observées et de leurs significations.

Tendances convergentes	r_c	Auteurs	Tendances divergentes	r_c	Auteur
$EC_e - Arg.$	0,12	Saïdi (2004)	$EC_e - Arg.$	-0,34*	Douaoui (2005)
				-0,57*	Hadj-Miloud(2010)
$EC_e - Lim.$	0,02	Saïdi (2004)	$EC_e - Lim.$	Néant	
	-0,14	Douaoui (2005)			
$EC_e - Sab.$	-0,11	Saïdi (2004)	$EC_e - Sab.$	0,29*	Douaoui (2005)
$EC_e - pH$	0,29	Hadj-Miloud(2010)	$EC_e - pH$	0,28*	Saïdi (2004)
				0,24*	Douaoui (2005)
$EC_e - CaCO_3$	-0,06	Douaoui (2005)	$EC_e - CaCO_3$	0,46*	Saïdi (2004)
$EC_e - H_p$ relation non spécifiée					
$EC_e - gypse$ relation non spécifiée					

*: relation significative

Pour Boulaine (1957), Halitim (1988), Mhiri et al.(1998), Djili (2000), Ben Hassine (2004), Hadj-milou (2010), Nijimbere (2014) et Zaman et al.(2018), cette tendance évolutive très hétéroclite peut être expliquée par l'effet variations, avec le temps, des interactions qui existent (*de manière directe ou indirecte*) entre le développement du processus de salinisation et l'association :

- **Echelles d'organisation du sol** : *minéral argileux, taux d'argile, nature des agrégats, horizons successifs, profil vertical, parcelle de culture et le type de système d'exploitation.*
- **Conditions favorables du milieu** : *la situation géomorphologique de la zone favorisant l'endoréisme les conditions hydrologiques des eaux, un drainage artificiel déficient et contraignant, les conditions d'évapotranspiration.*

3.6. Etalonnage des données de EC_a et détermination de $EC_{estimée}$

Cette partie a pour objet de présenter les résultats de l'étalonnage et de calibration des valeurs de EC_a grâce au concept méthodologique développé par Rhoades et Corwin (1981). Un choix qui a été rendu possible par le biais d'une évaluation *analytique - comparative* au concept d'étude de Herrero et al. (2003) (§2.2.1).

Le concept d'étude de Rhoades et Corwin, qui repose sur une approche de prédiction ou de modélisation (équations de régressions linéaires multiples) *bien spécifique* (§2.2.1), a permis de transformer les valeurs de EC_a des sondages de références (*nbr = 37*) suivant les valeurs de EC_e des mêmes points (*nbr = 37*), *et vice versa*, sur la base d'une représentation en strate. Aussi, en respectant les étapes descriptives précédentes, il ressort les intervalles de profondeur suivants : *0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm, 90-120 cm, et 120-150 cm*. La mise en place et l'application de ce concept passent par les étapes suivantes :

- Identification et essai des équations d'étalonnage.
- Choix de l'équation d'étalonnage à exploiter.
- Application de l'équation choisie et détermination de $EC_{estimée}$ (EC_{es}).

A ce titre, l'opération d'ajustement a été scindée en deux niveaux. Le premier niveau a ciblé et exploité 1480 valeurs (EC_a et EC_e), représentant (à l'aide de huit matrices) les données de mesures de 37 sondages sur quatre campagnes. Le second niveau a ciblé 12680 valeurs (EC_a et EC_e), représentant (à l'aide de huit matrices) les données de mesures de 317 points sur les mêmes campagnes d'étude.

3.6.1. Identification et essai des équations d'étalonnage

L'étalonnage des données de EC_a a ciblé les 37 sondages de chaque campagne. Le traitement a été effectué selon les modalités méthodologiques fixées par Rhoades et Corwin (1981). Il se base sur les deux formulations d'équations de régression linéaire multiples (29) et (30) :

$$(29) \dots Y_{1,2,\dots,i} = x_1 EC_{a1} + x_2 EC_{a2} + x_3 EC_{a3} + x_4 EC_{a4} + x_5 EC_{a5} + e_i \text{ (Form.1)}$$

$$(30) Y_{1,2,\dots,i} = x_1 EC_{e1} + x_2 EC_{e2} + x_3 EC_{e3} + x_4 EC_{e4} + x_5 EC_{e5} + e_i \text{ (Form.2)}$$

Où : $Y_{1,2,\dots,i}$ est l'ensemble des variables expliquées obtenues par l'équation de détermination, représentant la conductivité électrique estimée ($EC_{es1,es2,\dots,esi}$) par horizon, $EC_{a1,a2,\dots,ai}$ est l'ensemble des variables explicatives intégré dans la formulation, représentant la conductivité électrique apparente par horizon, $EC_{e1,e2,\dots,ei}$ est l'ensemble des variables explicatives intégré dans la formulation, représentant la conductivité électrique de la pâte saturée par horizon, $x_{1,2,\dots,i}$ représente la contribution de chaque variable intégrée dans la formulation, e_i représente les résidus.

Dans le but, d'une part d'affiner la qualité des données exploitées et de prescrire certaines aberrations analytiques (*valeurs extrêmes, autocorrélation, variances importantes, manque de normalité, Hétéroscédasticité, etc...*), d'autre part d'optimiser la réponse statistique des traitements et des différents modèles de calculs, nous avons scindé ce traitement en trois étapes :

- Une première étape (**Et.1**) où les données sont considérées *sans ajustement* ; en tenant compte des matrices d'origines.

- Deux étapes restantes, il est cité **Et.2** et **Et.3**, où nous avons procédé, comme suggéré par différents auteurs (Harvey et Morgan, 2009 ; Croft et al., 2013 ; Jafarian Jeloudar et al., 2014 ; Donahoo et al., 2019 ; 2020) à une transformation des données en Log_{10} . L'idée développée repose sur une mise en place à deux structures de traitement pour chaque campagne:

- un premier traitement *avec ajustement partiel* des données en Log_{10} (**Et.2**). A ce niveau, nous nous sommes contentés de transformer (seulement) les données dont des paramètres d'asymétrie (Skew.) et d'aplatissement (Kurt.) présentent une *légère déviation positive ou négative, c.-à.-d.* ne répondent pas à une distribution de loi normale et,
- un second traitement répondant à un *ajustement total* (sans distinctions spécifiques) des données en Log_{10} (**Et.3**)

Les différents types d'étalonnages et de traitements obtenus ont permis d'aboutir pour chaque campagne aux relations linéaires multiples présentées dans les tableaux XLII, XLIII, XLIV et XLV.

Comme première lecture, il est observé que les différentes combinaisons présentées par niveau et par campagne d'étude définissent toutes **des relations statistiquement significatives** ($0,700 < R < 0,920$ à $p < 0,05$). En se référant au coefficient multiple ($t_{theo} > 0,554$), il est clair que toutes les équations de régression établies semblent être intéressantes et représentatives. Elles sont toutes très hautement significatives ($p < 0,001$).

Néanmoins, l'observation des résultats d'étalonnages de la *C.III* (tableau XLIV) indique que la mise en place de l'ajustement partiel des données (sur les deux types de formulations) ne présente aucune *forme de traitement exploitable*. Il est clair que les données utilisées à ce niveau s'identifient toutes par des paramètres d'*asymétrie* et d'*aplatissement supérieurs à +1*.

3.6.2. Choix de l'équation d'étalonnage à exploiter

Dans cette partie, il s'agit de choisir entre les différentes équations d'étalonnages identifiées, selon le principe de Rhoades et Corwin (1981), dans chaque point de mesure (par couche et par campagne). Pour choisir les équations spécifiques les plus significatives, nous avons effectué deux tests statistiques :

- *Le t-test de comparaison des moyennes.*
- *Le test de corrélation.*

3.6.2.1. Test de comparaison de moyennes

Ce calcul statistique est réalisé sur la base du t-test de « Student »¹¹ pour deux échantillons indépendants. Le traitement est réalisé à l'aide du logiciel XLSTAT.

Ce test permet de fournir les éléments nécessaires pour argumenter la validité des valeurs de EC_{es} par rapport aux valeurs de EC_e par couche et par campagne d'étude. Le principe d'exploitation repose sur l'identification de la combinaison qui présente l'absence de différence ou la plus faible différence.

¹¹ Le principe de ce test est de calculer une valeur « t » observée, et de rejeter l'hypothèse nulle lorsque cette valeur est trop élevée, c'est-à-dire lorsque $t_{obs} \geq t_{1-\alpha/2}$ pour un niveau de signification α et avec $n-2$ degrés de liberté.

Tableau XLII. Etalonnage des données de EC_a suivants les données de EC_e pour $C.I.$

Trait.	Et.	Ty.	Hz.	Equations d'étude	Equations de régression	ddl	|R| obs.	|R| théo	Sgn.
Sans ajustement	Et.1	Form.1	h1	$Y_1 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es1} = 0,232EC_{ah1} - 0,398EC_{ah2} + 0,055EC_{ah3} + 0,111EC_{ah4} + 0,021EC_{ah5} - 3,130$	31	0,810	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es2} = 0,102EC_{ah1} + 0,00136EC_{ah2} + 0,06EC_{ah3} - 0,199EC_{ah4} + 0,146EC_{ah5} - 2,195$	31	0,800		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es3} = 0,231EC_{ah1} - 0,111EC_{ah2} + 0,125EC_{ah3} - 0,193EC_{ah4} + 0,121EC_{ah5} + 0,184$	31	0,803		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es4} = 0,201EC_{ah1} - 0,09EC_{ah2} + 0,50 EC_{ah3} - 0,27EC_{ah4} - 0,003EC_{ah5} - 2,552$	31	0,800		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es5} = 0,215EC_{ah1} - 0,08EC_{ah2} + 0,344EC_{ah3} - 0,199EC_{ah4} + 0,009EC_{ah5} + 0,642$	31	0,800		***
	Et.2	Form.2	h1	$Y_1 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es1} = 1,66EC_{eh1} - 1,1 EC_{eh2} + 1,61 EC_{eh3} - 0,76EC_{eh4} + 1,423EC_{eh5} + 43,22$	31	0,830	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es2} = 2,29EC_{eh1} - 1,11EC_{eh2} + 1,81EC_{eh3} - 0,999EC_{eh4} + 2,02EC_{eh5} + 59,763$	31	0,810		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es3} = 3,992EC_{eh1} - 2,396 EC_{eh2} + 2,666EC_{eh3} - 1,063EC_{eh4} + 2,832EC_{eh5} + 72,099$	31	0,820		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es4} = 6,66EC_{eh1} - 4,055EC_{eh2} + 4,623 EC_{eh3} - 2,32EC_{eh4} + 4,345EC_{eh5} + 92,675$	31	0,820		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es5} = 7,2059EC_{eh1} - 3,2078EC_{eh2} + 8,014EC_{eh3} - 5,46EC_{eh4} + 6,29 EC_{eh5} + 122,926$	31	0,830		***
Ajustement Partiel (Asy. >1 et Apl. >1)	Et.2	Form.1	h1	$Y_1 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es1} = 0,00911EC_{ah1} - 0,00043EC_{ah2} - 1,611EC_{ah3} - 0,104EC_{ah4} + 1,199EC_{ah5} + 0,855$	31	0,740	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es2} = 0,00326EC_{ah1} + 0,0026EC_{ah2} - 1,721EC_{ah3} - 1,643EC_{ah4} + 2,718EC_{ah5} + 1,416$	31	0,760		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es3} = 0,0041EC_{ah1} - 0,00054EC_{ah2} - 0,853EC_{ah3} - 1,155EC_{ah4} + 2,078EC_{ah5} + 0,396$	31	0,770		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es4} = 0,0022EC_{ah1} - 0,0018EC_{ah2} + 1,75EC_{ah3} - 1,457EC_{ah4} + 0,701EC_{ah5} - 0,822$	31	0,750		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es5} = 0,002EC_{ah1} - 0,0015EC_{ah2} + 1,48EC_{ah3} - 1,26EC_{ah4} + 0,642EC_{ah5} - 0,55$	31	0,770		***
	Et.2	Form.2	h1	$Y_1 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es1} = 53,21EC_{eh1} - 15,85EC_{eh2} + 18,147EC_{eh3} + 1,834EC_{eh4} + 64,018EC_{eh5} - 43,110$	31	0,800	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es2} = 71,708EC_{eh1} - 10,78EC_{eh2} + 0,601EC_{eh3} + 14,795EC_{eh4} + 97,386EC_{eh5} - 66,478$	31	0,770		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es3} = 0,215EC_{eh1} - 0,055EC_{eh2} - 0,26EC_{eh3} + 0,316EC_{eh4} + 0,450EC_{eh5} + 1,392$	31	0,800		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es4} = 0,267EC_{eh1} - 0,115EC_{eh2} - 0,198EC_{eh3} + 0,301EC_{eh4} + 0,452EC_{eh5} + 1,491$	31	0,780		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es5} = 0,198EC_{eh1} - 0,012EC_{eh2} - 0,081EC_{eh3} + 0,145EC_{eh4} + 0,527EC_{eh5} + 1,531$	31	0,800		***
Ajustement Total (Harvey et Morgan, 2009; Donahoo et al., 2019)	Et.3	Form.1	h1	$Y_1 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es1} = 0,577EC_{ah1} - 0,428EC_{ah2} - 0,0039EC_{ah3} + 0,09EC_{ah4} + 0,922EC_{ah5} + 0,855$	31	0,700	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es2} = 0,278EC_{ah1} + 1,067EC_{ah2} - 1,199EC_{ah3} - 1,65EC_{ah4} + 1,927EC_{ah5} - 0,973$	31	0,710		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es3} = 0,690EC_{ah1} + 1,443EC_{ah2} - 1,233EC_{ah3} - 1,289EC_{ah4} + 1,406EC_{ah5} - 0,796$	31	0,760		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es4} = 0,339EC_{ah1} + 0,960EC_{ah2} - 1,004EC_{ah3} - 1,646EC_{ah4} + 0,437EC_{ah5} - 0,774$	31	0,700		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es5} = 0,294EC_{ah1} + 0,564EC_{ah2} + 0,995EC_{ah3} - 1,380EC_{ah4} + 0,437EC_{ah5} - 0,536$	31	0,780		***
	Et.3	Form.2	h1	$Y_1 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es1} = 0,174EC_{eh1} - 0,045EC_{eh2} - 0,076EC_{eh3} + 0,161EC_{eh4} + 0,395EC_{eh5} + 1,197$	31	0,800	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es2} = 0,168EC_{eh1} - 0,021EC_{eh2} - 0,145EC_{eh3} + 0,219EC_{eh4} + 0,400EC_{eh5} + 1,319$	31	0,780		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es3} = 0,215EC_{eh1} - 0,055EC_{eh2} - 0,259EC_{eh3} + 0,316EC_{eh4} + 0,450EC_{eh5} + 1,392$	31	0,780		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es4} = 0,267EC_{eh1} - 0,115EC_{eh2} - 0,198EC_{eh3} + 0,301EC_{eh4} + 0,452EC_{eh5} + 1,491$	31	0,770		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es5} = 0,198EC_{eh1} - 0,012EC_{eh2} - 0,081EC_{eh3} + 0,145EC_{eh4} + 0,527EC_{eh5} + 1,531$	31	0,780		***

Avec : $EC_{es1...i}$: Conductivité estimée par horizon
 $EC_{e1...i}$: Conductivité de pâte saturée par horizon
 $EC_{a1...i}$: Conductivité apparente par horizon
 $Et_{1...i}$: Etape du traitement
Form.1 : Formulation 1
Form.2 : Formulation 2
*** : très hautement significatif

Chapitre IV,
Utilisation de la conductivité électrique apparente (EC_a) par
Induction électromagnétique (LEM) dans la cartographie et
l'évaluation de la salinité des sols agricoles du Bas-Cheffif.
Cas du périmètre agricole d'El Hamadna.

Tableau XLIII. Etalonnage des données de EC_a suivants les données de EC_e pour $C.II$.

Trait.	Et.	Ty.	Hz.	Equations d'étude	Equations de régression	ddl	|R| obs.	|R| théo.	Sgn.
Sans ajustement	Et.1	Form.1	h1	$Y_1 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es1} = -0,750EC_{ah1} + 0,383EC_{ah2} - 0,252EC_{ah3} + 0,367EC_{ah4} - 0,062EC_{ah5} + 3,155$	31	0,900	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es2} = -0,249EC_{ah1} + 0,555EC_{ah2} - 0,093EC_{ah3} + 0,043EC_{ah4} - 0,054EC_{ah5} - 5,11$	31	0,800		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es3} = -0,335EC_{ah1} + 0,557EC_{ah2} - 0,0001EC_{ah3} - 0,035EC_{ah4} - 0,025EC_{ah5} - 2,997$	31	0,850		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es4} = -0,409EC_{ah1} + 0,582EC_{ah2} + 0,0562EC_{ah3} - 0,100EC_{ah4} + 0,0013EC_{ah5} - 0,661$	31	0,820		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es5} = -0,179EC_{ah1} + 0,476EC_{ah2} + 0,010EC_{ah3} - 0,092EC_{ah4} - 0,005EC_{ah5} + 1,0144$	31	0,780		***
	Form.2	h1	$Y_1 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es1} = 0,942EC_{eh1} - 0,066EC_{eh2} + 2,583EC_{eh3} - 0,69EC_{eh4} + 0,658EC_{eh5} + 30,232$	31	0,850	0,554	***	
		h2	$Y_2 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es2} = 1,664EC_{eh1} - 0,307EC_{eh2} + 3,633EC_{eh3} - 0,538EC_{eh4} + 0,604EC_{eh5} + 43,069$	31	0,870		***	
		h3	$Y_3 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es3} = 1,306EC_{eh1} - 1,119EC_{eh2} + 5,421EC_{eh3} + 0,799EC_{eh4} - 0,203EC_{eh5} + 52,168$	31	0,860		***	
		h4	$Y_4 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es4} = 4,966EC_{eh1} - 1,822EC_{eh2} + 8,121EC_{eh3} + 0,346EC_{eh4} + 0,146EC_{eh5} + 59,479$	31	0,870		***	
		h5	$Y_5 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es5} = 6,309EC_{eh1} - 2,870EC_{eh2} + 10,553EC_{eh3} + 2,487EC_{eh4} - 0,7123EC_{eh5} + 86,318$	31	0,850		***	
Ajustement Partiel (Asy. >1 et Apla. >1)	Et.2	Form.1	h1	$Y_1 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es1} = -5,025EC_{ah1} + 4,788EC_{ah2} - 1,101EC_{ah3} + 4,770EC_{ah4} - 2,577EC_{ah5} - 1,798$	31	0,660	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es2} = -39,364EC_{ah1} + 137,926EC_{ah2} + 18,478EC_{ah3} + 48,926EC_{ah4} - 107,702EC_{ah5} - 79,326$	31	0,800		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es3} = -43,749EC_{ah1} + 124,466EC_{ah2} + 28,462EC_{ah3} + 30,938EC_{ah4} - 82,039EC_{ah5} - 84,291$	31	0,840		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es4} = -0,212EC_{ah1} + 3,206EC_{ah2} - 0,251EC_{ah3} - 1,193EC_{ah4} - 0,081EC_{ah5} - 0,757$	31	0,800		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es5} = -27,157EC_{ah1} + 113,514EC_{ah2} + 32,620EC_{ah3} - 24,228EC_{ah4} - 40,604EC_{ah5} - 73,920$	31	0,790		***
	Form.2	h1	$Y_1 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es1} = -0,0587EC_{eh1} + 0,00056EC_{eh2} + 0,0066EC_{eh3} + 0,599EC_{eh4} - 0,0032EC_{eh5} + 1,109$	31	0,840	0,554	***	
		h2	$Y_2 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es2} = -0,0254EC_{eh1} - 0,0003EC_{eh2} + 0,0069EC_{eh3} + 0,584EC_{eh4} - 0,0033EC_{eh5} + 1,269$	31	0,850		***	
		h3	$Y_3 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es3} = -0,0355EC_{eh1} - 0,0018EC_{eh2} + 0,0102EC_{eh3} + 0,478EC_{eh4} - 0,0024EC_{eh5} + 1,494$	31	0,820		***	
		h4	$Y_4 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es4} = -0,0083EC_{eh1} - 0,002EC_{eh2} + 0,010EC_{eh3} + 0,522EC_{eh4} - 0,003EC_{eh5} + 1,554$	31	0,820		***	
		h5	$Y_5 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es5} = -0,011EC_{eh1} - 0,003EC_{eh2} + 0,011EC_{eh3} + 0,603EC_{eh4} - 0,004EC_{eh5} + 1,624$	31	0,800		***	
Ajustement Total (Harvey et Morgan, 2009; Donahoo et al., 2019)	Et.3	Form.1	h1	$Y_1 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es1} = -5,025EC_{ah1} + 4,788EC_{ah2} - 1,101EC_{ah3} + 4,77EC_{ah4} - 2,578EC_{ah5} - 1,798$	31	0,660	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es2} = 0,986EC_{ah1} + 3,797EC_{ah2} - 0,950EC_{ah3} - 0,068EC_{ah4} - 2,322EC_{ah5} - 0,864$	31	0,810		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es3} = 1,009EC_{ah1} + 2,554EC_{ah2} - 0,499EC_{ah3} - 0,489EC_{ah4} - 1,215EC_{ah5} - 0,690$	31	0,850		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es4} = -0,212EC_{ah1} + 3,206EC_{ah2} + 0,251EC_{ah3} - 1,926EC_{ah4} - 0,081EC_{ah5} - 0,757$	31	0,870		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es5} = 0,180EC_{ah1} + 2,665EC_{ah2} + 0,0385EC_{ah3} - 1,186EC_{ah4} + 0,126EC_{ah5} - 0,587$	31	0,800		***
	Form.2	h1	$Y_1 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es1} = 0,013EC_{eh1} - 0,289EC_{eh2} + 0,772EC_{eh3} + 0,046EC_{eh4} + 0,214EC_{eh5} + 0,934$	31	0,8500	0,554	***	
		h2	$Y_2 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es2} = 0,040EC_{eh1} - 0,280EC_{eh2} + 0,662EC_{eh3} + 0,170EC_{eh4} + 0,159EC_{eh5} + 1,105$	31	0,860		***	
		h3	$Y_3 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es3} = 0,055EC_{eh1} - 0,387EC_{eh2} + 0,684EC_{eh3} + 0,375EC_{eh4} + 0,066EC_{eh5} + 1,185$	31	0,830		***	
		h4	$Y_4 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es4} = 0,079EC_{eh1} - 0,395EC_{eh2} + 0,804EC_{eh3} + 0,198EC_{eh4} + 0,161EC_{eh5} + 1,264$	31	0,830		***	
		h5	$Y_5 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es5} = 0,069EC_{eh1} - 0,429EC_{eh2} + 0,752EC_{eh3} + 0,350EC_{eh4} + 0,123EC_{eh5} + 1,371$	31	0,800		***	

Tableau XLIV. Etalonnage des données de EC_a suivant les données de EC_e pour C.III.

Trait.	Et.	Ty.	Hz.	Equations d'étude	Equations de régression	ddl	|R| obs.	|R| théo.	Sgn.
Sans ajustement	Et ₁	Form.1	h1	$Y_1 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es1} = 0,474EC_{ah1} - 0,923EC_{ah2} + 0,170EC_{ah3} + 0,300EC_{ah4} - 0,0699EC_{ah5} - 3,930$	31	0,900	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es2} = -0,193EC_{ah1} - 0,054EC_{ah2} + 0,051EC_{ah3} + 0,188EC_{ah4} - 0,05EC_{ah5} + 3,15$	31	0,920		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es3} = -0,023EC_{ah1} - 0,056EC_{ah2} + 0,052EC_{ah3} + 0,098EC_{ah4} - 0,023EC_{ah5} + 2,502$	31	0,870		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es4} = 0,303EC_{ah1} - 0,242EC_{ah2} + 0,102EC_{ah3} - 0,076EC_{ah4} + 0,0596EC_{ah5} + 2,169$	31	0,840		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es5} = 0,206EC_{ah1} - 0,102EC_{ah2} + 0,091EC_{ah3} - 0,075EC_{ah4} + 0,038EC_{ah5} + 3,497$	31	0,800		***
		Form.2	h1	$Y_1 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es1} = 0,350EC_{eh1} + 1,524EC_{eh2} + 1,892EC_{eh3} + 0,417EC_{eh4} - 0,676EC_{eh5} + 39,777$	31	0,900	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es2} = 0,387EC_{eh1} + 2,410EC_{eh2} + 3,017EC_{eh3} + 0,145EC_{eh4} - 0,914EC_{eh5} + 45,713$	31	0,900		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es3} = 1,417EC_{eh1} + 3,803EC_{eh2} + 3,246EC_{eh3} + 0,685EC_{eh4} - 1,355EC_{eh5} + 67,142$	31	0,920		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es4} = 2,06EC_{eh1} + 5,980EC_{eh2} + 6,46EC_{eh3} + 0,531EC_{eh4} - 2,878EC_{eh5} + 69,542$	31	0,920		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es5} = 2,525EC_{eh1} + 8,999EC_{eh2} + 6,310EC_{eh3} + 5,524EC_{eh4} - 6,0870EC_{eh5} + 83,464$	31	0,910		***
Ajustement Partiel (Asy. >1 et Apl. >1)	Et ₂	Form.1	Pas de traitement possible						
		Form.2							
Ajustement Total (Harvey et Morgan, 2009; Donahoo et al., 2019)	Et ₃	Form.1	h1	$Y_1 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es1} = 3,966EC_{ah1} - 9,154EC_{ah2} + 0,961EC_{ah3} + 7,812EC_{ah4} - 2,549EC_{ah5} - 2,274$	31	0,780	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es2} = 0,114EC_{ah1} - 3,454EC_{ah2} + 0,203EC_{ah3} + 4,572EC_{ah4} - 0,784EC_{ah5} - 1,179$	31	0,900		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es3} = 1,370EC_{ah1} - 3,334EC_{ah2} + 0,192EC_{ah3} + 3,276EC_{ah4} - 0,641EC_{ah5} - 1,097$	31	0,870		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es4} = 2,084EC_{ah1} - 2,499EC_{ah2} + 0,595EC_{ah3} + 0,388EC_{ah4} + 0,374EC_{ah5} - 0,794$	31	0,87		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es5} = 1,676EC_{ah1} - 1,769EC_{ah2} + 0,467EC_{ah3} + 0,701EC_{ah4} - 0,176EC_{ah5} - 0,582$	31	0,840		***
		Form.2	h1	$Y_1 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es1} = -0,070EC_{eh1} + 0,262EC_{eh2} - 0,029EC_{eh3} + 0,724EC_{eh4} - 0,1098EC_{eh5} + 0,959$	31	0,870	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es2} = -0,082EC_{eh1} + 0,314EC_{eh2} - 0,024EC_{eh3} + 0,737EC_{eh4} - 0,1022EC_{eh5} + 0,991$	31	0,870		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es3} = -0,057EC_{eh1} + 0,331EC_{eh2} - 0,034EC_{eh3} + 0,694EC_{eh4} - 0,110EC_{eh5} + 1,193$	31	0,890		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es4} = -0,065EC_{eh1} + 0,391EC_{eh2} + 0,031EC_{eh3} + 0,69EC_{eh4} - 0,118EC_{eh5} + 1,1885$	31	0,890		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es5} = -0,092EC_{eh1} + 0,408EC_{eh2} - 0,006EC_{eh3} + 0,893EC_{eh4} - 0,227EC_{eh5} + 1,253$	31	0,880		***

Tableau XLV. Etalonnage des données de EC_a suivants les données de EC_e pour C.IV.

Trait	Et.	Ty.	Hz.	Equations d'étude	Equations de régression	ddl	|R| obs.	|R| théo.	Sgn.
Sans ajustement	Et ₁	Form.1	h1	$Y_1 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es1} = -0,0142EC_{ah1} + 0,0143EC_{ah2} - 0,0144EC_{ah3} + 0,073EC_{ah4} - 0,0096EC_{ah5} - 0,860$	31	0,810	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es2} = -0,077EC_{ah1} + 0,147EC_{ah2} - 0,009EC_{ah3} + 0,042EC_{ah4} - 0,0112EC_{ah5} + 0,571$	31	0,860		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es3} = -0,079EC_{ah1} + 0,177EC_{ah2} - 0,050EC_{ah3} + 0,055EC_{ah4} - 0,0057EC_{ah5} + 1,724$	31	0,900		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es4} = 0,093EC_{ah1} + 0,327EC_{ah2} - 0,092EC_{ah3} + 0,074EC_{ah4} - 0,042EC_{ah5} + 0,451$	31	0,860		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es5} = -0,017EC_{ah1} + 0,158EC_{ah2} - 0,0506EC_{ah3} + 0,043EC_{ah4} - 0,005EC_{ah5} + 3,856$	31	0,860		***
		Form.2	h1	$Y_1 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es1} = 2,600EC_{eh1} - 1,872EC_{eh2} + 2,867EC_{eh3} - 4,199EC_{eh4} + 4,983EC_{eh5} + 14,884$	31	0,880	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es2} = 2,386EC_{eh1} - 1,338EC_{eh2} + 3,421EC_{eh3} - 2,648EC_{eh4} + 4,0475EC_{eh5} + 21,439$	31	0,900		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es3} = 4,032EC_{eh1} - 2,162EC_{eh2} + 5,181EC_{eh3} - 4,525EC_{eh4} + 6,570EC_{eh5} + 14,986$	31	0,900		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es4} = 7,299EC_{eh1} - 5,376EC_{eh2} + 8,969EC_{eh3} - 6,637EC_{eh4} + 9,652EC_{eh5} + 3,078$	31	0,910		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es5} = 8,436EC_{eh1} - 6,964EC_{eh2} + 15,859EC_{eh3} - 13,57EC_{eh4} + 15,430EC_{eh5} - 9,094$	31	0,910		***
Ajustement Partiel (Asy. >1 et Apla. >1)	Et ₂	Form.1	h1	$Y_1 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es1} = 0,056EC_{ah1} + 1,866EC_{ah2} + 1,90EC_{ah3} + 0,277EC_{ah4} - 1,00EC_{ah5} - 1,584$	31	0,740	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es2} = -2,766EC_{ah1} + 81,564EC_{ah2} - 19,466EC_{ah3} + 55,031EC_{ah4} - 65,482EC_{ah5} - 69,731$	31	0,810		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es3} = -2,626EC_{ah1} + 68,642EC_{ah2} - 33,245EC_{ah3} + 74,691EC_{ah4} - 57,461EC_{ah5} - 76,383$	31	0,860		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es4} = -3,921EC_{ah1} + 97,125EC_{ah2} - 42,761EC_{ah3} + 97,177EC_{ah4} - 91,803EC_{ah5} - 77,991$	31	0,860		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es5} = 5,541EC_{ah1} + 57,632EC_{ah2} - 27,721EC_{ah3} + 74,576EC_{ah4} - 58,819EC_{ah5} - 75,244$	31	0,860		***
		Form.2	h1	$Y_1 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es1} = 0,293EC_{eh1} - 0,0106EC_{eh2} + 0,0162EC_{eh3} - 0,0277EC_{eh4} + 0,030EC_{eh5} + 1,413$	31	0,820	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es2} = 0,187EC_{eh1} - 0,0069EC_{eh2} + 0,0134EC_{eh3} - 0,009EC_{eh4} + 0,0143EC_{eh5} + 1,623$	31	0,880		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es3} = 0,199EC_{eh1} - 0,0102EC_{eh2} + 0,019EC_{eh3} - 0,013EC_{eh4} + 0,016EC_{eh5} + 1,1836$	31	0,885		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es4} = 0,199EC_{eh1} - 0,0102EC_{eh2} + 0,0199EC_{eh3} - 0,013EC_{eh4} + 0,016EC_{eh5} + 1,836$	31	0,890		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es5} = 0,228EC_{eh1} - 0,012EC_{eh2} + 0,024EC_{eh3} - 0,018EC_{eh4} + 0,019EC_{eh5} + 1,933$	31	0,880		***
Ajustement Total (Harvey et Morgan, 2009; Donahoo et al., 2019)	Et ₃	Form.1	h1	$Y_1 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es1} = 0,056EC_{ah1} + 1,866EC_{ah2} + 0,190EC_{ah3} + 0,277EC_{ah4} - 1,00EC_{ah5} - 1,584$	31	0,740	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es2} = -0,120EC_{ah1} + 4,002EC_{ah2} - 0,896EC_{ah3} + 0,318EC_{ah4} - 1,818EC_{ah5} - 1,136$	31	0,800		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es3} = -0,095EC_{ah1} + 3,099EC_{ah2} - 0,978EC_{ah3} + 0,641EC_{ah4} - 1,351EC_{ah5} - 0,986$	31	0,850		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es4} = -0,107EC_{ah1} + 3,368EC_{ah2} - 0,915EC_{ah3} + 1,076EC_{ah4} - 2,058EC_{ah5} - 0,892$	31	0,870		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{a1}, EC_{a2}, EC_{a3}, EC_{a4}, EC_{a5})$	$EC_{es5} = -0,056EC_{ah1} + 2,418EC_{ah2} - 0,640EC_{ah3} + 0,609EC_{ah4} - 1,237EC_{ah5} - 0,756$	31	0,880		***
		Form.2	h1	$Y_1 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es1} = 0,409EC_{eh1} - 0,724EC_{eh2} + 0,643EC_{eh3} - 0,891EC_{eh4} + 1,34EC_{eh5} + 0,960$	31	0,830	0,554	***
			h2	$Y_2 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es2} = 0,276EC_{eh1} - 0,482EC_{eh2} + 0,466EC_{eh3} - 0,282EC_{eh4} + 0,811EC_{eh5} + 1,088$	31	0,900		***
			h3	$Y_3 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es3} = -0,325EC_{eh1} - 0,560EC_{eh2} + 0,496EC_{eh3} - 0,308EC_{eh4} + 0,899EC_{eh5} + 1,150$	31	0,900		***
			h4	$Y_4 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es4} = -0,348EC_{eh1} - 0,670EC_{eh2} + 0,644EC_{eh3} - 0,389EC_{eh4} + 0,973EC_{eh5} + 1,217$	31	0,900		***
			h5	$Y_5 = f(EC_{e1}, EC_{e2}, EC_{e3}, EC_{e4}, EC_{e5})$	$EC_{es5} = -0,375EC_{eh1} - 0,769EC_{eh2} + 0,834EC_{eh3} - 0,608EC_{eh4} + 1,120EC_{eh5} + 1,290$	31	0,890		***

- **Pour les données de C.I :** Le traitement a été réalisé sur la base de 185 observations par paramètre. Les principaux résultats sont présentés dans le tableau XLVI.

L'idéal aurait été de prendre toutes les formulations identifiées (nbr.=6) lors de l'étape d'étalonnage. Malheureusement, ceci n'a pas été possible, puisque les formulations et leurs estimations ont été limitées de manières analytiques. Les données ainsi écartées ($EC_{es,I} Et.1 Form.2$, $EC_{es,I} Et.2 Form.2$, $EC_{es,I} Et.3 Form.1$) ont été considérées comme non conformes ou ne pouvant être rapportées à aucunes exigences pédologiques (Annexe VIII ; C.I).

Tableau XLVI. Comparaison des moyennes pour les données de traitements de C.I.

<i>Couples présentés</i>	<i>ddl</i>	<i>t calculé</i>	<i>P-value bila.</i>	<i>Niveau de proba.</i>
$EC_{e,I} - EC_{es,I} Et.1 Form.1$	365	-0,145	0,885	ns
$EC_{e,I} - EC_{es,I} Et.2 Form.1$	368	18,565	<0,001	*
$EC_{e,I} - EC_{es,I} Et.3 Form.2$	368	17,653	<0,001	*

Avec : $\alpha = 0,05$,

EC_{es} : Conductivité estimée, EC_e : Conductivité de pâte saturée, $Et.$: Etape du traitement, $Form.$: Formulation d'équation.

A la lecture de ce tableau, il ressort que la différence de moyenne au seuil de probabilité $\alpha = 0,05$ pour la combinaison $EC_{e,I}$ et $EC_{es,I} Et.1 Form.1$ ($t = -0,145$; $P = 0,885$) est non significative. Les autres différences de moyennes indiquent des combinaisons significatives ($1,5 < t < 18,6$; $P < 0,001$).

Ce résultat signifie que seule la méthode d'étalonnage de Rhoades et Corwin (1981) *sans ajustement ou transformation* ($Et.1 Form.1$) peut être utilisée pour l'évaluation de EC_{es} et des données de C.I.

- **Pour les données de C.II :** Le traitement a été réalisé sur la base de 185 observations par paramètre. Les principaux résultats sont présentés dans le tableau XLVII.

Tableau XLVII. Comparaison des moyennes pour les données de traitements de C.II.

<i>Couples présentés</i>	<i>ddl</i>	<i>t calculé</i>	<i>P-value bila.</i>	<i>Niveau de proba.</i>
$EC_{e,II} - EC_{es,II} Et.1 Form.1$	366	-0,285	0,776	ns
$EC_{e,II} - EC_{es,II} Et.2 Form.2$	368	18,679	<0,001	*
$EC_{e,II} - EC_{es,II} Et.3 Form.1$	368	19,477	<0,001	*
$EC_{e,II} - EC_{es,II} Et.3 Form.2$	368	18,707	<0,001	*

Ce tableau permet de noter que le test de comparaison des moyennes au seuil de probabilité $\alpha = 0,05$ a été exécuté par rapport à seulement quatre formulations d'étalonnages ($EC_{es,II} Et.1 Form.1$, $EC_{es,II} Et.2 Form.2$, $EC_{es,II} Et.3 Form.1$, $EC_{es,II} Et.3 Form.2$). Les données écartées dans ce traitement, également pour non conformités, sont aux nombres de deux ($EC_{es,II} Et.1 Form.2$ et $EC_{e,II} Et.2 Form.1$) (Annexe VIII ; C.II).

En se référant aux valeurs des différences de moyennes pour les combinaisons observées (tableau XLVII), il est clair qu'une combinaison notée ($EC_{e,II} - EC_{es,II} Et.1 Form.1$) des quatre formules proposées est *intéressante* (non significative) ($t = -0,285$; $P = 0,776$). Ceci signifie

que les autres formulations, caractéristiques des *étapes 2 et 3*, de l'évaluation multiple de $EC_{es.II}$ peuvent être rejetées.

- **Pour les données de C.III :** Les résultats présentés dans le tableau XLVIII sont obtenus sur la base de 185 observations par paramètre.

Tableau XLVIII. Comparaison des moyennes pour les données traitements de C.III.

<i>Couples présentés</i>	<i>ddl</i>	<i>t calculé</i>	<i>P-valeur bilat.</i>	<i>Niveau de proba.</i>
$EC_{es.III} - EC_{es.III} Et.1 Form.1$	368	-0,063	0,950	ns
$EC_{es.III} - EC_{es.III} Et.3 Form.1$	368	19,791	<0,001	*
$EC_{es.III} - EC_{es.III} Et.3 Form.2$	368	18,663	<0,001	*

Ce tableau montre que le test de comparaison des moyennes a été opéré par rapport à seulement trois formulations ($EC_{es.III} Et.1 Form.1$, $EC_{es.III} Et.3 Form.1$, $EC_{es.III} Et.3 Form.2$). Les données écartées dans ce traitement, aussi pour non conformités, sont aux nombres de deux ($EC_{es.III} - EC_{es.III} Et.3 Form.1$ et $EC_{es.III} - EC_{es.III} Et.3 Form.2$) (Annexe VIII ; C.III).

Les différences de moyennes (tableau XLVIII) révèlent que seule la combinaison $EC_{es.III} - EC_{es.III} Et.1 Form.1$ est conforme (non significative) ($t = -0,063$; $P = 0,950$).

- **Pour les données de C.IV :** Les résultats du traitement sont obtenus sur la base de 185 observations par paramètre. Ils sont mentionnés dans le tableau XLIX.

Tableau XLIX. Comparaison des moyennes pour les données traitements de C.IV.

<i>Couples présentés</i>	<i>ddl</i>	<i>t calculé</i>	<i>P-value bilat.</i>	<i>Niveau de proba.</i>
$EC_{es.IV} - EC_{es.IV} Et.1 Form.1$	368	-2,598	0,010	*
$EC_{es.IV} - EC_{es.IV} Et.2 Form.1$	368	1,362	0,174	ns
$EC_{es.IV} - EC_{es.IV} Et.2 Form.2$	368	21,182	<0,001	*
$EC_{es.IV} - EC_{es.IV} Et.3 Form.1$	368	22,308	<0,001	*
$EC_{es.IV} - EC_{es.IV} Et.3 Form.2$	368	20,600	<0,001	*

Ce tableau révèle que, pour cette partie, le test de comparaison des moyennes au seuil de probabilité $\alpha = 0,05$ a été effectué par rapport à cinq formulations ($EC_{es.IV} Et.1 Form.1$, $EC_{es.IV} Et.2 Form.1$, $EC_{es.IV} Et.2 Form.2$, $EC_{es.IV} Et.3 Form.1$, $EC_{es.IV} Et.3 Form.2$), la formulation $EC_{es.IV} Et.1 Form.2$, étant écartée pour non-conformité (Annexe VIII ; C.IV).

En s'appuyant, en retour, sur les données des différences de moyennes pour les combinaisons fixées (tableau XLIX), il ressort que seule la combinaison ($EC_{es.IV} - EC_{es.IV} Et.2 Form.1$) se caractérise par une relation non significative ($t = 1,362$; $P = 0,174$) et donc elle sera la seule à être retenue pour la suite de cette recherche.

3.6.2.2. Test de corrélation

Ce calcul statistique est réalisé sur la base de matrice de corrélation. Le logiciel utilisé est Statistica v8,1. Le principe de ce test permet de fournir les éléments nécessaires pour argumenter la validité des données de différences de moyennes des combinaisons de EC_{es} . Rhoades et Corwin (1981) précédentes et conforter le choix de la fonction la plus représentative.

- **Pour les données de la C.I :** Les corrélations entre $EC_{e.I}$ et les différentes formes de $EC_{es.I}$ choisies sont portées dans le tableau L.

Tableau L. Matrice de corrélation entre les différences de moyennes en C.I.

Var.	Proba.	$EC_{es.IEt.1Form.1}$	$EC_{es.IEt.2Form.1}$	$EC_{es.IEt.3Form.2}$
$EC_{e.I}$	<i>r</i>	0,808	0,662	0,754
	<i>P</i>	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Le tableau L montre que tous les coefficients de corrélations des différentes combinaisons sont très hautement significatifs ($p < 0,001$). Il révèle aussi que la corrélation entre $EC_{e.I}$ et $EC_{es.IEt.1Form.1}$ ($r = 0,808$) est plus forte que celle entre $EC_{e.I}$ et $EC_{es.IEt.2Form.1}$ ($r = 0,662$) et $EC_{e.I}$ et $EC_{es.IEt.3Form.2}$ ($r = 0,754$).

Ce résultat conforte ainsi les conclusions du *t-test* réalisé plus haut et permet de conclure que *la première formulation de l'étape 1* de l'équation d'étalonnage de Rhoades et Corwin (1981) est celle qui prédit le mieux les valeurs de $EC_{e.I}$ et que c'est elle qui doit être utilisée dans le contexte de cette recherche. Au final, les équations choisies par couche sont :

$$EC_{es1} = 0,232EC_{ah1} - 0,398EC_{ah2} + 0,055EC_{ah3} + 0,111EC_{ah4} + 0,021EC_{ah5} - 3,130$$

($n = 31 ; R = 0,810$)

$$EC_{es2} = 0,102EC_{ah1} + 0,00136EC_{ah2} + 0,06EC_{ah3} - 0,199EC_{ah4} + 0,146EC_{ah5} - 2,195$$

($n = 31 ; R = 0,800$)

$$EC_{es3} = 0,231EC_{ah1} - 0,111EC_{ah2} + 0,125EC_{ah3} - 0,193EC_{ah4} + 0,121EC_{ah5} + 0,184$$

($n = 31 ; R = 0,803$)

$$EC_{es4} = 0,201EC_{ah1} - 0,09EC_{ah2} + 0,50EC_{ah3} - 0,27EC_{ah4} - 0,003EC_{ah5} - 2,552$$

($n = 31 ; R = 0,800$)

$$EC_{es5} = 0,215EC_{ah1} - 0,08EC_{ah2} + 0,344EC_{ah3} - 0,199EC_{ah4} + 0,009EC_{ah5} + 0,642$$

($n = 31 ; R = 0,800$)

- **Pour les données de la C.II :** Les corrélations entre $EC_{e.II}$ et les différentes formes de $EC_{es.II}$ choisies sont portées dans le tableau LI.

Tableau LI. Matrice de corrélation entre les différences de moyennes en C.II.

Var.	Proba.	$EC_{es.II Et.1Form.1}$	$EC_{es.II Et.2Form.2}$	$EC_{es.II Et.3Form.1}$	$EC_{es.II Et.3Form.2}$
$EC_{e.II}$	<i>r</i>	0,864	0,794	0,426	0,782
	<i>P</i>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Ce tableau montre que les coefficients de corrélations obtenus entre les quatre combinaisons sont tous très hautement significatifs ($p < 0,001$). Il montre aussi que la corrélation entre $EC_{e,II}$ et $EC_{es,II} Et.1 Form.1$ ($r = 0,864$) est plus forte que celles entre $EC_{e,II}$ et $EC_{es,II} Et.2 Form.2$ ($r = 0,794$), $EC_{e,II}$ et $EC_{es,II} Et.3 Form.2$ ($r = 0,782$) et $EC_{e,II}$ et $EC_{es,II} Et.3 Form.1$ ($r = 0,426$).

Ce résultat conforte les résultats du *t-test* et permet donc de conclure que *la première formulation de la étape 1* de l'équation d'étalonnage de Rhoades et Corwin (1981) est celle qui prédit le mieux les valeurs de $EC_{e,II}$ et que c'est elle qui doit être utilisée dans le contexte de cette recherche. Ainsi, les équations choisies par couche sont :

$$\begin{aligned}
 EC_{es1} &= -0,750EC_{ah1} + 0,383EC_{ah2} - 0,252EC_{ah3} + 0,367EC_{ah4} - 0,062EC_{ah5} + 3,155 \\
 &\quad (n=31 ; R=0,900) \\
 EC_{es2} &= -0,249EC_{ah1} + 0,55EC_{ah2} - 0,093EC_{ah3} + 0,043EC_{ah4} - 0,054EC_{ah5} - 5,11 \\
 &\quad (n=31 ; R=0,800) \\
 EC_{es3} &= -0,335EC_{ah1} + 0,557EC_{ah2} - 0,0001EC_{ah3} - 0,035EC_{ah4} - 0,025EC_{ah5} - 2,997 \\
 &\quad (n=31 ; R=0,850) \\
 EC_{es4} &= -0,409EC_{ah1} + 0,582EC_{ah2} + 0,0562EC_{ah3} - 0,100EC_{ah4} + 0,0013EC_{ah5} - 0,661 \\
 &\quad (n=31 ; R=0,820) \\
 EC_{es5} &= -0,179EC_{ah1} + 0,476EC_{ah2} + 0,010EC_{ah3} - 0,092EC_{ah4} - 0,005EC_{ah5} + 1,0144 \\
 &\quad (n=31 ; R=0,780)
 \end{aligned}$$

- **Pour les données de la C.III :** Les corrélations entre $EC_{e,III}$ et les différentes formes de $EC_{es,III}$ choisies sont détaillées dans le tableau LII.

Tableau LII. Matrice de corrélation entre les différences de moyennes en C.III.

Var.	Proba.	$EC_{es,III} Et.1 Form.1$	$EC_{es,III} Et.3 Form.1$	$EC_{es,III} Et.3 Form.2$
$EC_{e,III}$	r	0,903	0,826	0,791
	P	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Le tableau LII révèle que les coefficients de corrélations obtenus entre les différentes combinaisons sont tous très hautement significatifs ($p < 0,001$). Il indique aussi que la corrélation entre $EC_{e,III}$ et $EC_{es,III} Et.1 Form.1$ ($r = 0,903$) est la plus forte par rapport à $EC_{e,III}$ et $EC_{es,III} Et.3 Form.1$ ($r = 0,826$) et $EC_{e,III}$ et $EC_{es,III} Et.3 Form.2$ ($r = 0,791$).

Ce résultat qui consolide les celui du *t-test* réalisé permet de conclure que *la première formulation de l'étape 1* de l'équation d'étalonnage de Rhoades et Corwin (1981) est celle qui prédit le mieux les valeurs de $EC_{e,III}$ et que c'est elle qui doit être utilisée dans le contexte de cette recherche. A partir de là, les équations choisies par couche sont :

$$\begin{aligned}
 EC_{es1} &= 0,474EC_{ah1} - 0,923EC_{ah2} + 0,170EC_{ah3} + 0,300EC_{ah4} - 0,0699EC_{ah5} - 3,930 \\
 &\quad (n=31 ; R=0,900) \\
 EC_{es2} &= -0,193EC_{ah1} - 0,054EC_{ah2} + 0,051EC_{ah3} + 0,188EC_{ah4} - 0,05EC_{ah5} + 3,15 \\
 &\quad (n=31 ; R=0,920) \\
 EC_{es3} &= -0,023EC_{ah1} - 0,056EC_{ah2} + 0,052EC_{ah3} + 0,098EC_{ah4} - 0,023EC_{ah5} + 2,502 \\
 &\quad (n=31 ; R=0,870)
 \end{aligned}$$

$$EC_{es4} = 0,303EC_{ah1} - 0,242EC_{ah2} + 0,102EC_{ah3} - 0,076EC_{ah4} + 0,0596EC_{ah5} + 2,169$$

(n=31 ; R=0,840)

$$EC_{es5} = 0,206EC_{ah1} - 0,102EC_{ah2} + 0,091EC_{ah3} - 0,075EC_{ah4} + 0,038EC_{ah5} + 3,497$$

(n=31 ; R=0,800)

- **Pour les données de la C.IV :** Les corrélations entre $EC_{e.IV}$ et les différentes formes de $EC_{es.IV}$ choisies sont explicitées dans le tableau LIII.

Tableau LIII. Matrice de corrélation entre les différences de moyennes en C.IV.

Var.	Proba.	$EC_{es.IV}$ Et.1Form.1	$EC_{es.IV}$ Et.2Form.1	$EC_{es.IV}$ Et.2Form.2	$EC_{es.IV}$ Et.3Form.1	$EC_{es.IV}$ Et.3Form.2
$EC_{e.IV}$	r	0,741	0,833	0,606	0,600	0,462
	P	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

D'après le tableau LIII, les coefficients de corrélations obtenus entre les cinq combinaisons sont tous très hautement significatifs ($p < 0,001$) et que la corrélation entre $EC_{e.IV}$ et $EC_{es.IV}$ Et.2Form.1 ($r = 0,833$) est plus forte que celles entre $EC_{e.IV}$ et $EC_{es.IV}$ Et.1Form.1 ($r = 0,741$), $EC_{e.IV}$ et $EC_{es.IV}$ Et.2Form.2 ($r = 0,606$), $EC_{e.IV}$ et $EC_{es.IV}$ Et.3Form.1 ($r = 0,600$) et $EC_{e.IV}$ et $EC_{es.IV}$ Et.3Form.2 ($r = 0,462$).

Ce résultat rejoint celui du *t-test* et permet de conclure que *la première formulation de l'étape 2* de l'équation d'étalonnage de Rhoades et Corwin (1981) est celle qui prédit le mieux les valeurs de $EC_{e.IV}$ et que c'est elle qui sera utilisée dans le contexte de cette recherche. Au final, les équations choisies par horizon sont :

$$EC_{es1} = 0,056EC_{ah1} + 1,866EC_{ah2} + 1,90EC_{ah3} + 0,277EC_{ah4} - 1,00EC_{ah5} - 1,584$$

(n=31; R=0,740)

$$EC_{es2} = -2,766EC_{ah1} + 81,564EC_{ah2} - 19,466EC_{ah3} + 55,031EC_{ah4} - 65,482EC_{ah5} - 69,731$$

(n=31; R=0,810)

$$EC_{es3} = -2,626EC_{ah1} + 68,642EC_{ah2} - 33,245EC_{ah3} + 74,691EC_{ah4} - 57,461EC_{ah5} - 76,383$$

(n=31; R=0,860)

$$EC_{es4} = -3,921EC_{ah1} + 97,125EC_{ah2} - 42,761EC_{ah3} + 97,177EC_{ah4} - 91,803EC_{ah5} - 77,991$$

(n=31; R=0,860)

$$EC_{es5} = 5,541EC_{ah1} + 57,632EC_{ah2} - 27,721EC_{ah3} + 74,576EC_{ah4} - 58,819EC_{ah5} - 75,244$$

(n=31; R=0,860)

3.7. Application des équations obtenues par campagne

Dans cette étape, nous présentons les résultats de l'étalonnage et de la transformation des données des 317 points de EC_a pour chaque campagne de mesures et par couche. Le traitement a été effectué selon les formulations spécifiques de Rhoades et Corwin (1981) obtenues sur la base des deux tests de validation précédents. Les résultats de EC_{es} sont synthétisés dans le tableau LIV.

Il est utile d'indiquer que pour une meilleure valorisation et représentation des données nous avons rejeté les valeurs négatives de EC_{es} . (cas de trois campagnes (I, II, III)). Ainsi, 19 valeurs négatives situées toutes en *h1* ont été éliminées, ce qui a donné lieu respectivement à 303, 313, 316 données actives au lieu de 317.

Tableau LIV. Résultats statistiques de EC_{es} . (dS/m) par campagne d'étude

<i>Camp.</i>	<i>Hz.</i>	<i>N Act.</i>	<i>Moy.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Var.</i>	<i>C.V.</i>
<i>EC_{es}.C.I</i>	<i>h1</i>	303	11,4	0,2	46,8	58,8	67
	<i>h2</i>	317	19,6	2,8	56,9	86,4	48
	<i>h3</i>	317	23,6	5,6	61,9	92,0	41
	<i>h4</i>	317	25,0	0,9	58,2	77,4	35
	<i>h5</i>	317	25,0	6,8	55,7	64,3	32
<i>EC_{es}.C.II</i>	<i>h1</i>	313	8,5	0,2	44,4	37,8	73
	<i>h2</i>	317	17,4	4	84,2	70,0	48
	<i>h3</i>	317	20,4	6,0	86,6	67,9	40
	<i>h4</i>	317	22,7	7,5	90,5	64,7	35
	<i>h5</i>	317	22,7	9,5	81,2	53,9	32
<i>EC_{es}.C.III</i>	<i>h1</i>	316	8,2	0,6	70,6	68,3	101
	<i>h2</i>	317	17,6	2,9	59,8	71,3	48
	<i>h3</i>	317	20,5	6,6	59,4	65,5	39
	<i>h4</i>	317	22,8	10,8	66,4	60,9	34
	<i>h5</i>	317	23,0	11,8	62,3	48,8	30
<i>EC_{es}.C.IV</i>	<i>h1</i>	317	10,1	3,1	30,8	30,5	55
	<i>h2</i>	317	17,5	1,0	37,2	39,8	36
	<i>h3</i>	317	19,8	1,6	40,7	47,3	35
	<i>h4</i>	317	21,5	0,5	45,1	53,7	34
	<i>h5</i>	317	22,5	4	43,8	49,1	31

Les données de EC_{es} . pour l'ensemble des 6321 valeurs se situent entre 0,2 et 90,5 dS/m. La minimale 0,2 dS/m marque la présence de couches non salés. La maximale 90,5 dS/m indique la présence de couches très salés à hyper-salés. Ce résultat dénote l'existence d'une grande hétérogénéité du paramètre de salinité sur fond de très fortes amplitudes entre les valeurs extrêmes spécifiques (figure 77).

La prise en compte du détail descriptif (tableau LIV) fait apparaître que :

- 50% des données estimées (≈ 3160) représentent, en réalité, des couches d'étude *salés à hyper-salés*.
- Les valeurs moyennes oscillant de l'intervalle [8,2 - 11,4 dS/m] en *surface* vers l'intervalle [21,5 - 25,13 dS/m] *en profondeur* identifient de manière marquée :
 - d'une part, l'emprise des teneurs salées et très salées sur la masse de données estimée de l'ensemble des profils,
 - d'autre part, la mise en place d'un profil salin moyen descendant pour les quatre campagnes de mesures (figure 78).

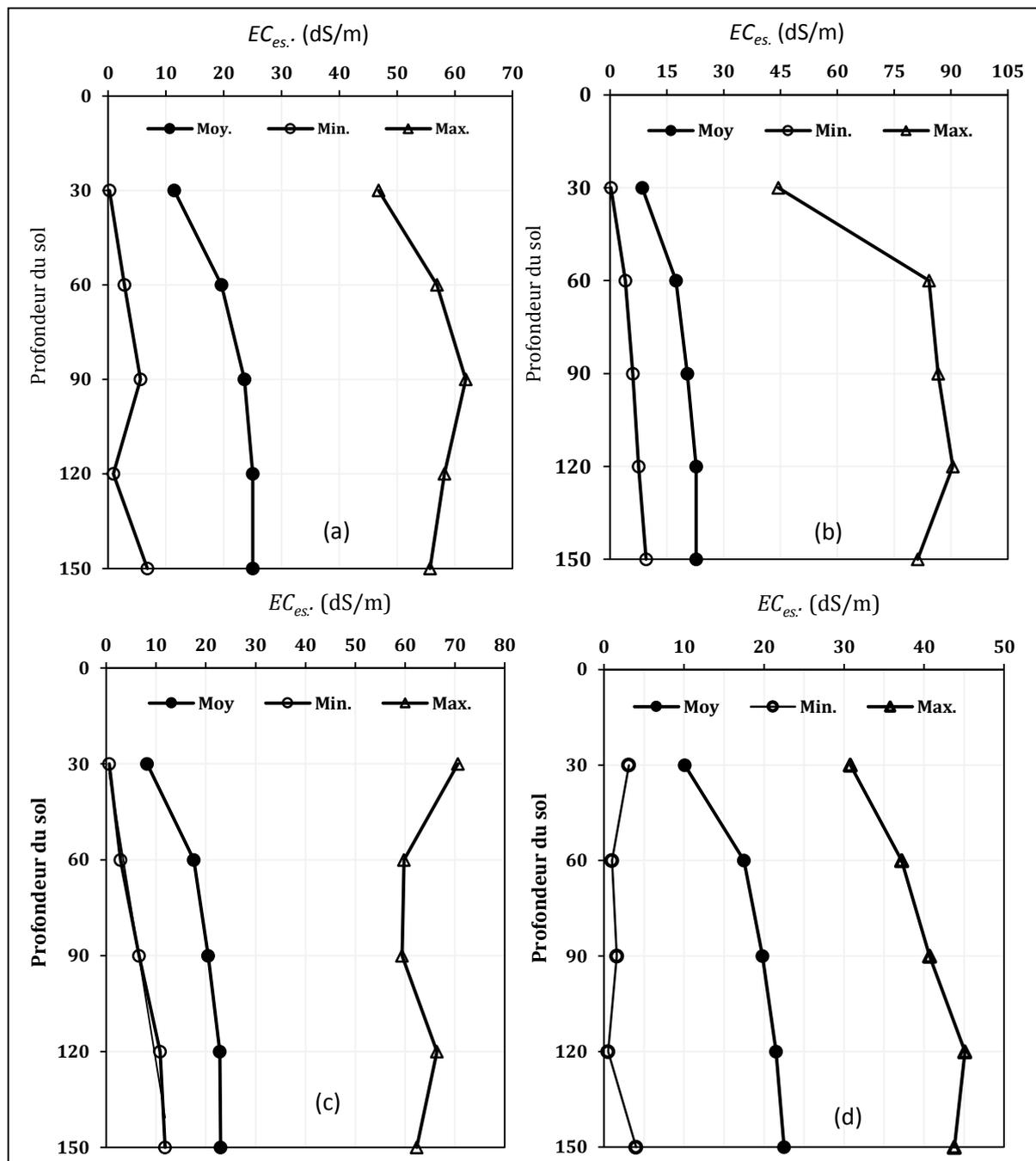


Figure 77. Profils des EC_{es} par campagne.
 "Les valeurs extrêmes et les moyennes" :
 (a) C.I, (b) C.II, (c) C.III, (d) C.IV

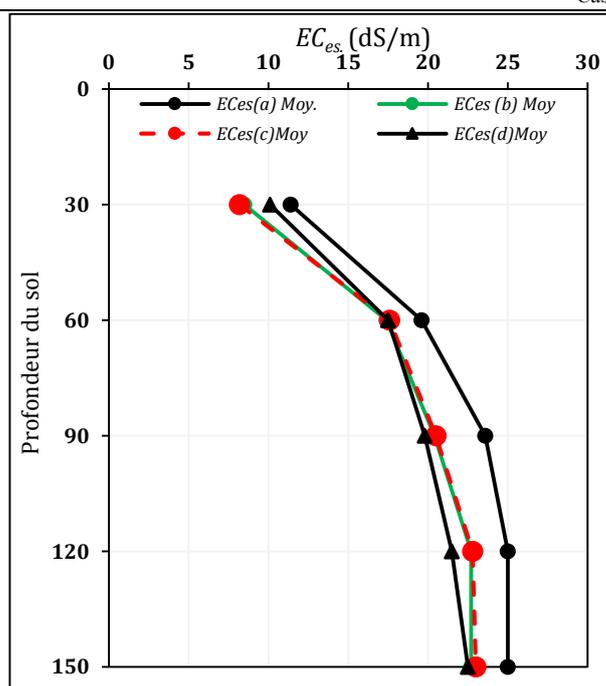


Figure 78. Profils moyens de EC_{es} (dS/m) des quatre campagnes.

- Les valeurs de la *variance* et du *C.V.* de EC_{es} sont beaucoup plus faibles que celles de la EC mesurée, les proportions atteintes sont respectivement de 55 à 70 % et de 20 à 50%.

Ceci démontre la qualité des équations de prédiction et d'estimation. Les données obtenues expriment toujours une variabilité de la salinité qui est beaucoup plus marquée *en profondeur*.

Une vue d'ensemble et comparative des résultats de traitements « $EC_e - EC_{es}$ », par rapport aux 37 sondages de calibration des quatre campagnes d'étude, révèle que les profils moyens suivent la même allure (figure 79). Ils sont très proches l'un de l'autre, voire superposables, et que la différence maximale observée entre eux ne dépasse guère les ∓ 1 dS/m.

Ce résultat confirme la très bonne estimation des taux de salinité et donc la bonne qualité des équations multiples choisies.

3.8. Cartographie et visualisation des classes de salinité

Cette partie a pour objet de présenter les résultats de la cartographie et de l'évaluation spatiale des niveaux de EC_{es} par l'application de l'interpolation par les modèles d'estimation du *réseau irrégulier triangulaire (TIN)*, selon les critères de "*Delaunay*".

La *TIN* a été appliquée aux matrices caractéristiques de chaque campagne (*Une par horizon*). Les valeurs de EC_{es} utilisées sont représentées par la structure des 317 données d'estimation.

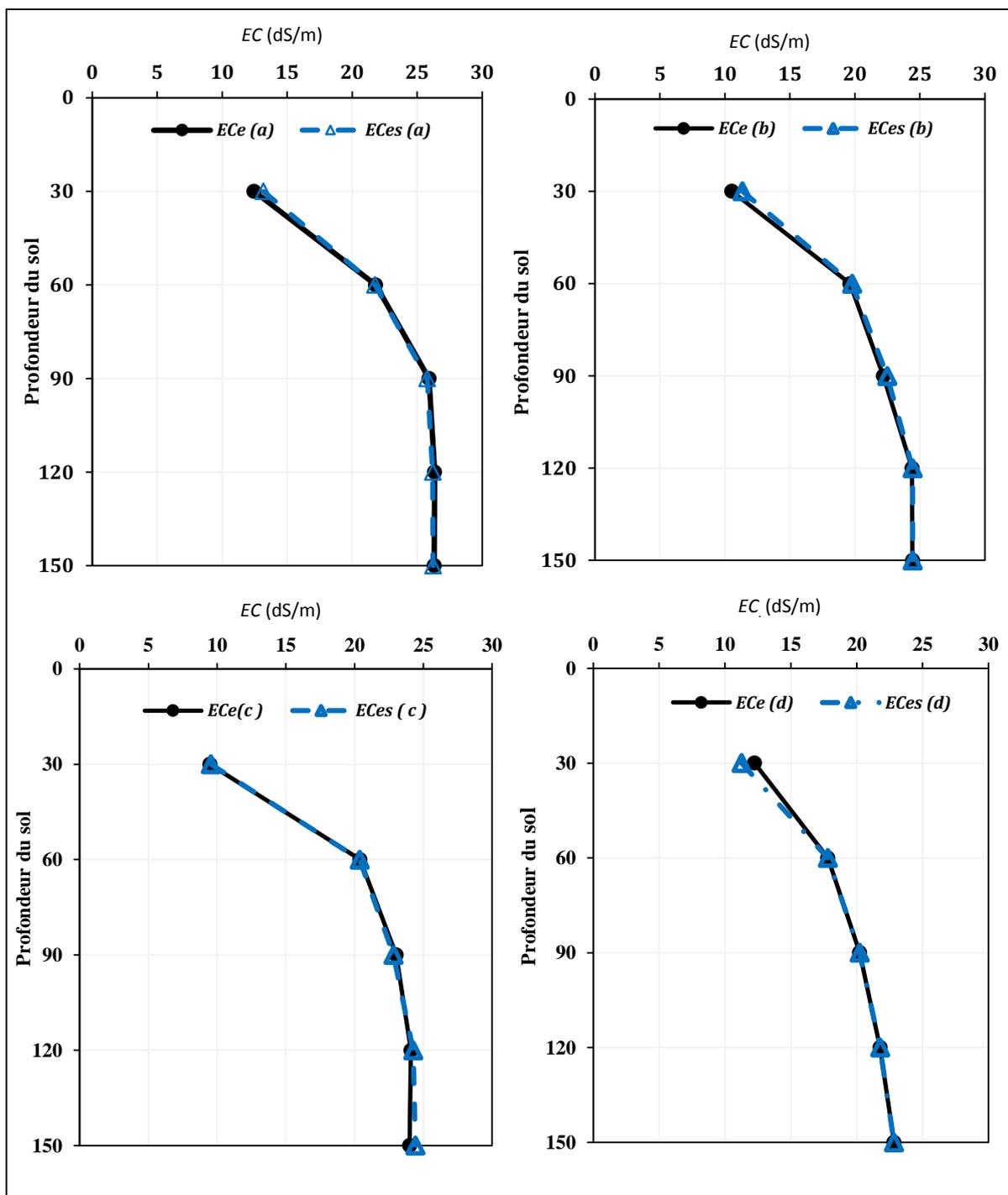


Figure 79. Comparaison entre profils moyens de EC_e et EC_{es} . :
 (a) C.I, (b) C.II, (c) C.III, (d) C.IV

L'exploitation et la valorisation de ces dernières ont nécessité trois étapes principales :

- Une *mise en place spécifique* sous forme de grilles de points et de couches d'informations.
- Un *ajustement et conversion en Grid* de points de variations de taux.
- Une valorisation (par rapprochement) des données exploitables en tout point de la zone.

Les différents traitements et les différentes étapes d'évaluation ont été réalisés à l'aide du logiciel *ArcView GIS* et de ses modules d'analyses et de modélisations spécialisés.

3.8.1. Visualisation et évaluation de la répartition spatiale des taux de EC_{es} .

Au début, il est proposé la visualisation des variations des taux de EC_{es} . par campagne et par couches d'observations considérées sous forme de cartogrammes thématiques (figure 80). La lecture de cette figure se fait du haut vers le bas (*h1 à h5*) pour la distribution et l'évolution des taux de salinité dans les points d'observation et de gauche à droite (*C.I à C.IV*) pour la distribution et l'évolution de la salinité en fonction du temps.

Pour ce qui est de l'étape d'estimation de la répartition spatiale des classes de EC_{es} , l'exercice effectué a permis l'obtention du descriptif proportionnel des superficies en hectares et en pourcentages des différentes classes de salinité retenues par l'USSSL (1954). Les données caractéristiques de chaque campagne sont présentées dans le tableau LV.

Tableau LV. Superficies et pourcentages des différentes classes de salinité.

Camp.	Hrz.	C1(<2dS/m)		C2(2-4 dS/m)		C3(4-8 dS/m)		C4(8-16 dS/m)		C5(>16dS/m)	
		ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
C.I	h1	12	4	26	8,7	70	23,3	142	47,3	50	16,7
	h2	0	0	0	0	10	3,3	120	40	170	56,7
	h3	0	0	0	0	0	0	80	26,7	220	73,3
	h4	0	0	0	0	0	0	40	13,3	260	86,7
	h5	0	0	0	0	0	0	20	6,7	280	93,3
C.II	h1	5	1,7	30	10	130	43,3	115	38,3	20	6,7
	h2	0	0	0	0	10	3,3	120	40	170	56,7
	h3	0	0	0	0	4	1,3	76	25,3	220	73,3
	h4	0	0	0	0	0	0	30	10	270	90
	h5	0	0	0	0	0	0	25	8,3	275	91,7
C.III	h1	12	4	57	19	120	40	80	26,6	31	10,3
	h2	0	0	1	0,3	5	1,7	134	44,7	160	53,3
	h3	0	0	0	0	1	0,3	79	26,3	220	73,3
	h4	0	0	0	0	0	0	40	13,3	260	86,7
	h5	0	0	0	0	0	0	10	3,3	290	96,7
C.IV	h1	0	0	1	0,3	90	30	189	63	20	6,7
	h2	0	0	1	0,3	9	3	110	36,7	180	60
	h3	0	0	1	0,3	5	1,7	71	23,7	223	74,3
	h4	0	0	1	0,3	2	0,7	50	16,7	247	82,3
	h5	0	0	0	0	1	0,3	39	13	260	86,7

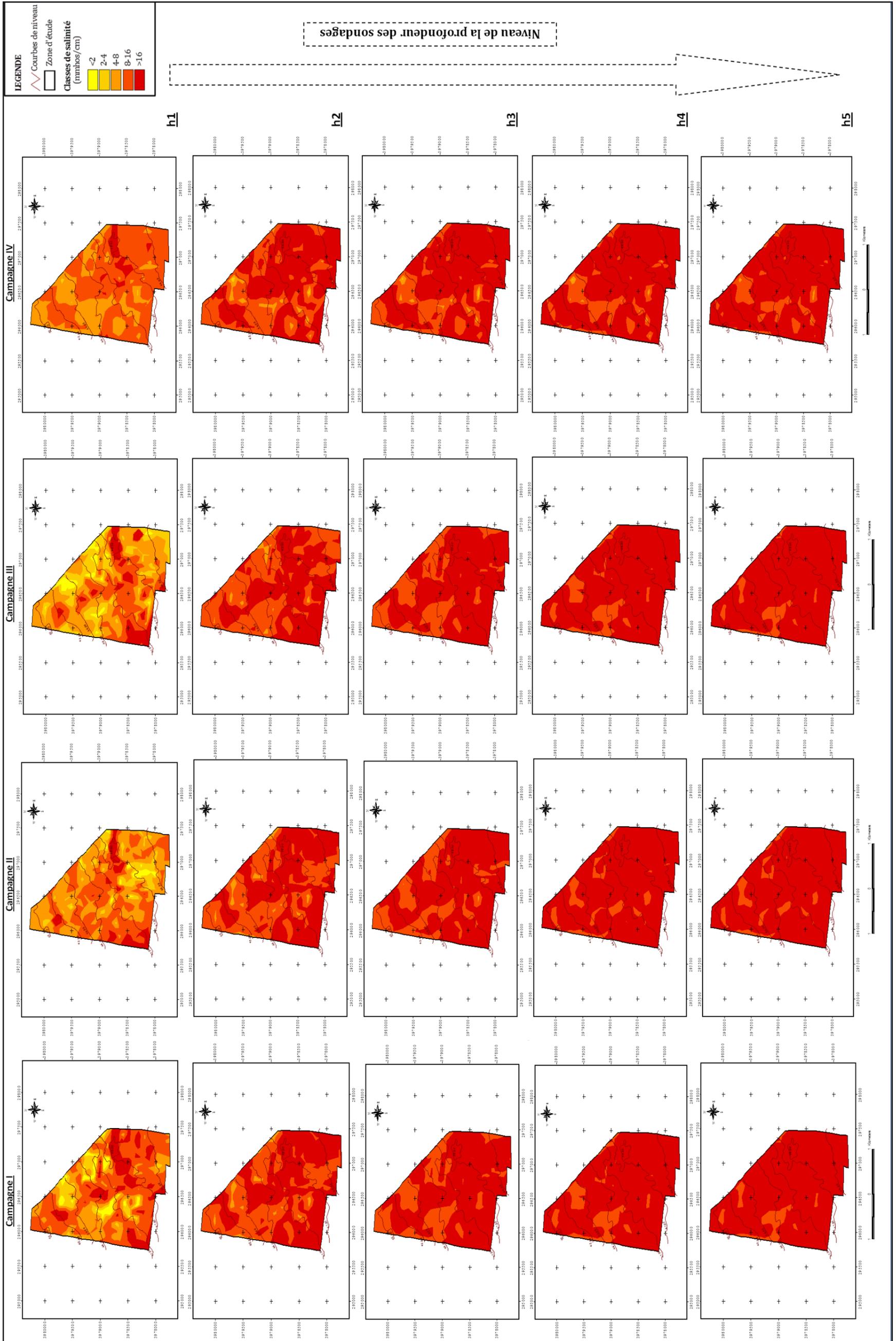


Figure 80. Spatialisation des niveaux de salinité par "EC_{ca}" par horizon et par campagne d'étude.

L'analyse de ce tableau et l'examen des différents cartogrammes thématiques révèlent une variation de la salinité d'une couche à une autre et d'une campagne à une autre. De façon plus précise, il ressort les différences notables suivantes :

- Pour les données de C.I :

- la couche *h1* englobe toutes les classes de salinité des sols (*C1*, *C2*, *C3*, *C4*, *C5*). La *C4* est prédominante avec un taux de recouvrement de 47,3 % (142 ha), elle est suivie par *C3* avec 23,3% (70 ha), puis la *C5* avec 16,7% (50 ha) et enfin la *C2* avec 8,7% (26 ha). Pour ce qui est de la classe *C1*, il ressort qu'elle est la moins représentée dans la zone. Son taux de recouvrement est de 4% (15 ha),
- en *h2*, la variabilité de la salinité est faible par rapport à la première couche. En effet, elle est caractérisée par la présence de trois classes, la classe *C5* avec 56,7%(170 ha), puis la classe *C4* avec 40%(120 ha) et en dernier la classe *C3* avec 3,3%(10 ha),
- les couches restantes, c.-à-d. *h3*, *h4*, et *h5*, présentent une salinité plus homogène que les deux autres couches. Elle est limitée aux classes *C4* et *C5*. La *C5* est tout de même prédominante avec un taux de recouvrement de 73,3%(220 ha) en *h3*, 86,7%(260 ha) en *h4*, et 93,3%(280 ha) en *h5*.

Les séries structurantes représentatives des niveaux de salinité pour la *CI* sont :

- en *h1* : $C4 > C3 > C5 > C2 > C1$,
- en *h2* : $C5 > C4 > C3$,
- en *h3* : $C5 > C4$,
- en *h4* : $C5 > C4$ et,
- en *h5* : $C5 > C4$.

- Pour les données de C.II :

- *idem* que pour la campagne précédente, la couche *h1* englobe toutes les classes de salinité (*C1*, *C2*, *C3*, *C4*, *C5*). Néanmoins, c'est la classe *des sols moyennement salés* (*C3*) qui est la plus importante avec un taux de recouvrement de 43,3%(130 ha), elle est suivie par la classe *des sols salés* (*C4*) avec 38,3% (115 ha), puis la classe *des sols peu salés* (*C2*) avec 10% (30 ha) et enfin la classe *très salés à hyper-salés* (*C5*) avec 6,7% (20 ha). La classe *des sols non salés* (*C1*) reste la moins représentée dans cette couche d'étude. Son taux de recouvrement est de 1,7% (5 ha),
- en *h2* et *h3*, la variabilité de la salinité est faible par rapport à la couche de surface. Elle s'identifie par la mise en place de trois classes seulement, il est fait référence : à la classe

des sols salés à hyper-salés (C5) avec 55 à 75% de la superficie (170 à 220 ha), puis à la classe des sols salés (C4) avec 25 à 40 % (76 à 120 ha) et en dernier à la classe des sols moyennement salés (C3) avec moins de 3,3 % (4 à 10 ha),

- les couches *h4* et *h5* sont plus homogènes que les couches supérieures. Les niveaux de salinité observés se situent entre la classe *des sols salés (C4)* et la classe *des sols très salés à hyper-salés (C5)*. Cette dernière classe reste tout de même prédominante avec un taux de recouvrement > 90% (>270 ha) pour les deux couches.

Les séries structurantes représentatives des niveaux de salinité pour la *C.II* sont :

- en *h1* : $C3 > C4 > C2 > C5 > C1$,
- en *h2* : $C5 > C4 > C3$,
- en *h3* : $C5 > C4 > C3$,
- en *h4* : $C5 > C4$ et,
- en *h5* : $C5 > C4$.

- Pour les données de *C.III* :

- *idem* que pour les deux campagnes précédentes, la couche *h1* englobe toute les classes de salinité (*C1, C2, C3, C4, C5*). Nonobstant, c'est la classe *des sols moyennement salés (C3)* qui prédomine avec 40%(120 ha), elle est suivie par la classe *des sols salés (C4)* avec 26,6%(80 ha), puis la classe *des sols peu salés (C2)* avec 19%(57 ha) et enfin la classe *des sols très salés à hyper-salés (C5)* avec 10,3%(31 ha). La classe *des sols non salés (C1)* reste la moins représentée dans cette couche de surface avec un taux de recouvrement de 4% (12 ha),
- en *h2 et h3*, la variabilité de la salinité est faible par rapport à la couche précédente. Elle s'identifie par l'apparition de trois classes seulement, il est cité : la classe *des sols salés à hyper-salés (C5)* avec 53 à 75% de la superficie (160 à 220 ha), la classe *des sols salés (C4)* avec 26 à 45 % (79 à 134 ha) et en dernier la classe *des sols moyennement salés (C3)* avec moins de 1,7 % (1 à 5 ha),
- les couches *h4* et *h5* sont plus homogènes que les couches *de surface, de sub-surface et de moyen profil*. Les taux de salinité notés varient entre la classe *des sols salés (C4)* et la classe *des sols très salés à hyper-salés (C5)*. Reste que c'est cette dernière (*C5*) qui est prédominante avec un taux de recouvrement >86% en *h4* (260 ha) et >96% en *h5* (290 ha).

Les séries structurantes représentatives des niveaux de salinité pour la *C.III* sont :

- en h1 : $C3 > C4 > C2 > C5 > C1$,
- en h2 : $C5 > C4 > C3 > C2$,
- en h3 : $C5 > C4 > C3$,
- en h4 : $C5 > C4$ et,
- en h5 : $C5 > C4$.

- Pour les données de C.IV :

Contrairement aux autres campagnes d'étude, la variabilité de la salinité pour cette période repose, dans la majorité des couches, sur les spécificités de recouvrement associées à quatre classes de salinité (C2, C3, C4, C5). L'information obtenue suggère ce qui suit :

- pour h1 : C'est la classe *des sols salés* (C4) qui prédomine avec un taux de recouvrement égale à 63 % (189 ha), elle est suivie par la classe *des sols moyennement salés* (C3) avec 30% (90 ha), et enfin la classe *des sols très salés à hyper-salés* (C5) avec 6,7% (20 ha). Pour ce qui est des classes restantes, *peu salés* (C2) et *non salés* (C1), il est possible de dire qu'elles sont très peu représentées (0,3%) à non observées (0%),
- pour h2 : C'est la classe *des sols très salés à hyper-salés* (C5) qui domine avec 60 % (180Ha), elle est suivie par la classe *des sols salés* (C4) avec 36,7% (110 ha) et en dernier la classe *des sols moyennement salés* (C3) avec 3% (9 ha). Comme pour la couche précédente, il ressort que les classes *des sols peu salés* (C2) et *des sols non salés* (C1) sont très peu représentées (0,3%) à non observées (0%),
- les couches h3 et h4, qui sont marquées par des niveaux de salinité assez proche, s'associent par les taux de recouvrement suivants : La classe *des sols très salés à hyper-salés* (C5) qui prévaut avec la gamme de taux allant de 74 à 85% (223 à 247 ha), elle est suivie la classe *des sols salés* (C4) avec la gamme de taux allant de $\approx 17\%$ à 24% (50 à 71 ha) et enfin les classes des sols *moyennement salés* (C3) et *des sols peu salés*, très peu représentées, avec des taux de recouvrement $< 1,7\%$ (1 à 5 ha),
- la couche h5 se trouve être la plus homogène dans le profil considéré. Les taux de recouvrement s'identifient par la contribution de la classe *des sols très salés à hyper-salés* (C5), de la classe *des sols salés* (C4) et un degré moindre celle *des sols moyennement salés* (C3). Toutefois, c'est la classe C5 qui prédomine "largement" avec un taux de recouvrement de plus de 85% (260 ha).

Les séries structurantes représentatives des niveaux de salinité pour la C.IV sont :

- en h1 : $C4 > C3 > C5 > C2$,
- en h2 : $C5 > C4 > C3 > C2$,

- en h3 : $C5 > C4 > C3$,
- en h4 : $C5 > C4 > C3$ et,
- en h5 : $C5 > C4 > C3$.

Globalement, hormis l'effet de $C3$ (23 à 45%) observé en surface ($h1$), le reste des couches des différentes périodes se caractérise par une nette suprématie de la $C5$ et à un degré moindre la $C4$. Un schéma d'évolution extrême qui s'accroît clairement avec les couches de profondeur du sol. Les caractéristiques notées sont :

- La domination de $C5$ sur les autres classes de salinité, particulièrement à partir de $h2$. Les proportions de $C5$ varient de $\approx 53\%$ à $\approx 97\%$.
- Une diminution progressive vers la profondeur des taux de représentativité de $C4$, particulièrement à partir de $h2$. Les proportions observées varient de $\approx 45\%$ à $\approx 4\%$.
- Une chute brutale des taux de recouvrement avec les profondeurs, dans la majorité des campagnes, pour les classes $C3$, $C2$ et $C1$. Les proportions observées donnent lieu à des valeurs nulles (0%).

Ces résultats confirment la variabilité de EC_e et de EC_{es} , qui est beaucoup plus marquée en surface qu'en profondeur. Elles confirment également les profils moyens de EC_e et de EC_{es} , qui sont descendants avec la profondeur.

3.8.2. Qualité de l'estimation

Pour évaluer la qualité des différentes cartes d'isovaleurs de la salinité, nous avons effectué deux types de tests :

- Le premier test (test 1) consiste à calculer les erreurs moyennes de prédiction. Il s'agit de calculer la différence moyenne entre les valeurs de EC_e et les valeurs de EC_{es} , pour chaque couche d'étude, en valeurs réelles et en valeurs absolues.
- Le deuxième test (test 2) consiste à calculer le pourcentage des EC_e et EC_{es} , qui se situent dans leurs propres plages au sein des cartes d'isovaleurs de la salinité. Les jeux de données choisis constituent chacun 10% des données d'ensemble.

Pour ce faire, le premier test est effectué grâce aux données de référence (mesures) des points de EC_e (figure 51), alors que le deuxième test proposé repose sur deux étapes (Annexe IX):

- dans un premier temps, nous reconstituons spatialement le jeu de données des 37 relatifs aux valeurs de EC_e , et,

- dans un second temps, nous exploitons spatialement un autre jeu de données de 37 points pour les valeurs de EC_{es} . Ce jeu est aléatoirement choisi sur la base des différentes classes de salinité. Pour plus de précision, nous avons tenu compte des nœuds de la maille de 317 points de prospection (figure 49-phase 3).

3.8.2.1. Test 1

Le tableau LVI révèle que les erreurs moyennes réelles ($EC_e - EC_{es}$) sont extrêmement faibles, elles sont toutes cernées entre 1 et -0,8 dS/m. Ce résultat signifie que l'évaluation moyenne des valeurs estimées est très bonne et confirme donc ce qui a été obtenu précédemment.

Tableau LVI. Erreurs moyennes réelles et absolues.

Camp.	Hrz.	Erreur moyenne réelle ($EC_e - EC_{es}$) (dS/m)	Erreur moyenne absolue $|EC_e - EC_{es}|$ (dS/m)
C.I	h1	-0,72	0,35
	h2	0,05	0,05
	h3	0,15	0,15
	h4	0,14	0,00
	h5	0,09	0,00
C.II	h1	-0,80	0,19
	h2	-0,15	0,16
	h3	-0,30	0,30
	h4	-0,05	0,05
	h5	0,00	0,00
C.III	h1	-0,07	0,07
	h2	0,03	0,03
	h3	0,20	0,20
	h4	-0,16	0,16
	h5	-0,42	0,42
C.IV	h1	1,00	1,00
	h2	0,00	0,00
	h3	0,00	0,00
	h4	0,00	0,00
	h5	0,00	0,00

Toutefois, lors de ce calcul, la surestimation des valeurs de EC estimée pourrait être compensée par leur sous-estimation. Dans ce sens, un test d'évaluation de la qualité et de la véracité de l'écart moyen réel entre EC_e et EC_{es} est réalisé. Ce test est effectué par rapport aux valeurs absolues des erreurs de prédiction.

Les résultats exposés dans la colonne de droite (tableau LVI) ont conforté les observations faites sur le calcul des données de " $EC_e - EC_{es}$ ". Il ressort que les erreurs moyennes absolues ainsi obtenues sont très faibles et se rapprochent sensiblement de ceux des erreurs moyennes réelles.

3.8.2.2. Test 2

Les résultats caractéristiques du *test 2* sont compilés dans le tableau LVII. Il convient de noter que le processus de reconstitution cartographiques des données a été fait par étape en respectant les spécificités cartographiques présentées précédemment (et en Annexes IX).

A travers les résultats des deux approches, il importe de noter qu'hormis le fait de détecter, simultanément, quelques anomalies¹² dans la représentativité des points mesurés et estimés pour quelques couches de *C.I.* les calculs indiquent clairement une bonne performance de la méthode d'interpolation pour la prédiction, ainsi que l'exactitude et la précision de l'information produite.

Dans l'ensemble, les pourcentages de représentativité des points se situent entre ≈ 76 et 100%.

Tableau LVII. Nombre et pourcentage des points mesurés et estimés dans les cartes.

Camp.	Hrz.	EC_e (37)		EC_{es} (37)	
		Total des points		Total des points	
		nombre	(%)	nombre	(%)
C.I	h1	33/37	89,2	35/37	94,5
	h2	28/37	75,7	29/37	78,4
	h3	31/37	83,8	33/37	89,2
	h4	36/37	99,3	35/37	94,5
	h5	36/37	99,3	35/37	94,5
C.II	h1	35/37	94,6	35/37	94,6
	h2	37/37	100	36/37	97,3
	h3	37/37	100	37/37	100
	h4	36/37	97,3	37/37	100
	h5	37/37	100	37/37	100
C.III	h1	35/37	94,6	36/37	97,3
	h2	37/37	100	37/37	100
	h3	37/37	100	37/37	100
	h4	36/37	97,3	37/37	100
	h5	37/37	100	37/37	100
C.IV	h1	35/37	94,6	37/37	100
	h2	36/37	97,3	35/37	94,6
	h3	36/37	97,3	37/37	100
	h4	36/37	97,3	36/37	97,3
	h5	37/37	100	37/37	100

En s'appuyant, en premier lieu sur la cohérence analytique entre la structuration des scores d'estimation ci-dessus et les recommandations issues du travail réalisé par Saoud (2014), en second lieu sur les synthèses d'observations de Malherbe et Rouil (2003) et Laqrichi (2015) visant l'importance de l'évaluation des sources d'incertitude associée, il est évident que les

¹² Il s'agit dans le cadre de la mise en place d'un réseau (maille) de nœuds, soit de tous objets atypiques détectés, qu'on appelle aussi, selon le contexte d'application, *exceptions*, *surprises* ou *outliers* (Aggarwal, 2017), ou bien d'une déviation à une norme précisée au préalable (Chouchane, 2018).

erreurs d'estimation observées, particulièrement pour *C.I*, peuvent être associées :

- Soit à l'incertitude de mesure et d'échantillonnage (par rapport au phénomène d'intérêt et les conditions du milieu) lors des phases d'étude.
- Et/ou à l'incertitude de regroupement en classes de salinité (choix des limites des classes).

En combinant tout ensemble, il est possible de dire que la validité de la méthode adoptée et de la cartographie de fond a été vérifiée. Ainsi mises en évidence, il ressort :

- En premier lieu, le traitement a été mené correctement.
- En second lieu, la valeur ajoutée de l'approche d'ajustement et de correction est indéniable comparativement aux taux obtenus par Saoud(2014) (tableau LVIII) ; après la *mise en place et choix des équations d'étalonnage par sélection*.
- En dernier lieu, l'intégration rigoureuse de technique d'analyse spatiale spécifique et la représentation cartographique obtenue sont plus qu'intéressantes. En effet, il est noté que :
 - les estimations des erreurs moyennes sont similaires, voire presque identiques, se rapprochant nettement de zéro et,
 - la reconstitution et la représentation sont excellentes ; dans l'estimation des niveaux de salinité relatives aux sondages de mesures dans la zone.

Tableau LVIII. Nombre et pourcentage des points mesurés et estimés dans les cartes (Saoud, 2014).

Camp.	Hrz.	EC_e		EC_{es}	
		Total des points (37)		Total des points (50)	
		Nombre	(%)	Nombre	(%)
<i>C.I</i>	h1	14	38	38	76
	h2	20	54	42	84
	h3	27	73	44	88
	h4	32	86	44	88
	h5	31	84	45	90

Conclusion

Nous avons réalisé dans ce chapitre l'évaluation et le suivi de l'état de la salinité actuelle des sols de la région d'El Hamadna, sur la base d'une approche de cartographie non invasive en référence à l'induction électromagnétique à l'aide de l'EM38 (*Geonics Ltd.*).

La réalisation des mesures de l'EM38 (EC_a) à été renouvelée sur quatre campagnes d'étude (*C.I, C.II, C.III, C.IV*), en respectant les conditions favorables de milieu (état hydrique et température). Les différentes étapes de mesures et les traitements d'évaluations spécifiques ont

été réalisés à chaque fois sur la base d'une grille régulière de 317 points d'étude et la caractérisation physico-chimique "associative" de trente-sept (37) sondages pour les besoins de calibrations et d'étalonnages, Pour cet ensemble, le principe de collecte de données adopté repose sur le suivi de l'évolution du phénomène selon cinq (05) couches de profondeurs en position verticale, et de trois (03) niveaux de profondeur en position horizontale.

Néanmoins, dans le cadre de cette évaluation nous nous sommes intéressés qu'aux mesures de EC_a en mode verticale. A partir de la, les niveaux de profondeur concernés sont les couches [0 à 30 cm], [30 à 60 cm], [60 à 90 cm], [90 à 120 cm] et [120 à 150 cm].

Suite à ces considérations méthodologiques, nous avons retenu cinq étapes majeures de traitements :

- Un traitement des données reposant sur les statistiques descriptives de EC_a et de EC_e des quatre campagnes d'étude. Toutefois, pour EC_e l'évaluation l'information a été exprimée selon deux niveaux d'approche, une approche globale et une approche par couches.
- Une évaluation des paramètres pédologiques analysés et calculés issus des échantillons de calibration et relatifs uniquement à la première campagne (C.I).
- Une évaluation des relations susceptibles d'exister EC_e et certaines variables pédologiques.
- Un traitement de calibration et d'étalonnage des valeurs de EC_a pour les quatre campagnes sur la base des principes des régressions multiples.
- L'élaboration et la mise en avant de cartes d'isovaleurs des classes de salinité estimés pour les quatre (04) campagnes de mesures.

Il est utile d'indiquer que l'aspect expérimental proprement dit a couvert une superficie réelle de 300 hectares.

Les principaux résultats obtenus montrent que les valeurs de EC_a pour les quatre campagnes augmentent excessivement selon la profondeur. Les valeurs électromagnétiques varient de l'intervalle 23 - 256 dans la couche de surface vers l'intervalle 54 - 1160 dans la couche de profondeur. Les mesures des taux de la salinité dans les sondages de calibration ont confirmé ces résultats et ont révélé une accumulation de sels en profondeur. En effet, les valeurs de EC_e évoluent dans des gammes allant de 1 dS/m et 8,5 dS/m dans la couche de surface vers des gammes de 45dS/m et 80 dS/m dans la couche de profondeur. Ainsi, les sols étudiés sont tous très salés à hyper-salés en profondeur. Les profils salins de EC_a et de EC_e sont par conséquent **descendants**.

Le calcul des fréquences de distribution des taux de EC_e réalisé pour l'ensemble des données montre que les classes de sols salés et très salés à hyper-salés ($C4$, $C5$) sont les plus répandus. Elles représentent plus de 80% des données de traitement. Les pourcentages restants représentent les proportions de variation de gammes allant des sols non salés à moyennement salés ($C1$ à $C3$).

Ce même traitement réalisé selon une répartition de l'information par couches ($h1$, $h2$, $h3$, $h4$, $h5$), s'appuyant sur une approche graphique en forme d'histogrammes de fréquences, nous a permis de confirmer cet aspect global de mise en place. De plus, il a été utile pour mieux distinguer et mieux structurer cette partition des classes de salinité. A ce propos, nous pouvons affirmer que le schéma observé est, d'une part, marqué par le déroulement de :

- "L'aspect fluctuant spécifique" des fréquences de distribution de certaines classes de salinité, particulièrement pour les classes $C1$ (sols non salés) et $C2$ (sols peu salés) observées seulement dans les horizons de la partie supérieure des profils ($h1$, $h2$, et $h3$).
- La tendance et la localisation préférentielles des classes $C5$, $C4$, et $C3$ dans l'ensemble des profils. Ici, il convient de souligner que pour la $C5$ il y a une augmentation du haut vers le bas du profil ; avec une concentration en moyen et bas-profil, alors que pour la $C3$ et à un degré moindre la $C4$ la localisation est légèrement inverse avec une diminution des taux de représentativité du haut vers le bas-profil.

D'autre part, qu'il exprime et véhicule dans l'espace et dans le temps une même structuration décroissante des proportions de classes de salinité : $C5 > C4 > C3 > C2 > C1$.

L'analyse, au niveau le plus fin, de la caractérisation des autres paramètres pédologiques, au nombre de sept, indique que :

- Les taux d'humidité sur l'ensemble des campagnes sont assez variables. Une tendance qui s'avère correspondre à des combinaisons spécifiques entre la morphologie des profils et les conditions de milieu qui ont prévalu avant et pendant l'échantillonnage d'étude. Néanmoins, ces taux d'humidité reproduisent dans l'ensemble un schéma d'humidification qui s'accroît en fonction de la profondeur.
- La composition granulométrique de nos sols repose sur des différences assez marquées d'intercalation (en proportion) de fraction argileuse, de fraction limoneuse et de fraction sableuse, Toutefois, c'est la composante de la première citée qui reste dominante dans les profils. Les taux observés sont dans la plus part des cas supérieurs à 40%. Explicitement, la

mise en relief des résultats du diagramme textural de Soil Survey Staff, indique que les sols de la zone d'étude sont caractérisée par une texture à prédominance *argileuse à argilo-limoneuse*, avec une localisation du caractère argileux dans les horizons superficiels (*h1, h2, h3*) au détriment des horizons profonds.

- Les valeurs du pH_e s'identifient par une évolution très rapprochée en fonction de la profondeur du sol et du temps. Les valeurs observées varient dans la gamme *neutres à très alcalines* (7,00-8,9), sur la base d'écart qui sont plus grands en surface qu'en profondeur.
- En dernier, les taux de calcaire total et de gypse, qui sont deux éléments associatifs (de dépôts) dans les séquences évaporitiques du phénomène de salinisation (Chaboureau, 2012 ; Bour, 2013), laissent apparaître une large concordance avec les données de la bibliographie sur les sols de la région. Il se trouve que la majorité des échantillons sont faiblement à moyennement pourvus (<18%) pour le premier cité et très faiblement pourvus (<5%) pour le second cité. Néanmoins, dans les deux cas de figure, il a été observé une distribution et une répartition dans le profil d'aspect homogène.

L'étude des interactions susceptibles d'exister entre les taux de EC_e et certains paramètres pédologiques choisis, sur l'ensemble du descriptif méthodologique, a mis en évidence seulement de faibles relations statistiques avec le pH_e et le gypse (%). Néanmoins, les résultats décrits nous ont permis d'associer cette mise en place à une forme de pédogenèse active et spécifique, même si celle-ci est parfois temporelle et localisée dans des couches particulières des profils. Une forme d'évolution qui tire sa force des interactions qui existent (*de manière directe ou indirecte*) entre la mécanique du processus de salinisation et l'association "**Echelles d'organisation du sol – Conditions de milieu favorables**".

Dans l'approche d'étalonnage et de calibration des valeurs de EC_a suivant les valeurs de EC_e de références, notre choix s'est porté sur le concept de modélisation développé par Rhoades et Corwin (1981). Un choix rendu possible suite à l'exploitation des recommandations d'une pré-évaluation analytique et cartographique réalisée par une forme de "*traitement test*" (Saaoud, 2014) où "seules" les données de la C.I. ont été fixées et utilisées comme base d'information. Les formulations correspondantes sont :

$$(22) Y_{1,2,\dots,i} = x_1 EC_{a1} + x_2 EC_{a2} + x_3 EC_{a3} + x_4 EC_{a4} + x_5 EC_{a5} + e_i \text{ (Form.1)}$$

$$(23) Y_{1,2,\dots,i} = x_1 EC_{e1} + x_2 EC_{e2} + x_3 EC_{e3} + x_4 EC_{e4} + x_5 EC_{e5} + e_i \text{ (Form.2)}$$

A titre complémentaire, il est possible d'avancer que les (quelques) faibles interactions développées entre EC_e et certains paramètres pédologiques semblent conforter un peu plus le choix de cette approche de modélisation. En effet, ce mode de construction des modèles permet d'annuler l'apport de ces paramètres (par homogénéisation de l'information à la verticale du profil) en les intégrant comme bruit de fond négligeable.

Il existe donc, pour notre contexte d'étude, un effet prédominant de la conductivité électrique à l'extrait de pâte saturée sur les données d'IEM.

Pour les étapes d'application, et comme traitement supplémentaire, le concept de Rhoades et Corwin (1981) a été valorisée pour chaque campagne d'étude par le choix d'une formulation multiple (*Form1* ou *Form2*) la plus représentative : *originelle (Et.1) ou après ajustement statistique partiel ou total (Et.2 ou Et.3)*.

L'exercice adopté est fondé sur une stratégie sélective à deux niveaux. Il s'agit du choix des modèles les plus hautement significatives ($ddl=31$, $R_{obs.} > R_{théo.} = 0,554$) et de la phase des tests de validation par *les tests de comparaison des moyennes et de corrélation*.

Au final, les modèles et les formulations sélectionnés par campagne sont les suivants :

- $EC_{es.I} Et.1 Form.1$, $EC_{es.II} Et.1 Form.1$, $EC_{es.III} Et.1 Form.1$, $EC_{es.IV} Et.2 Form.1$

La cartographie de la salinité ($EC_{es.}$) en courbes d'isovaleurs par couche a aboutit à la réalisation de 5 cartes pour chaque campagne, d'où ressort une forme d'homogénéisation des niveaux de salinité "élevés" avec les couches de profondeurs et des taux de recouvrement assez proches.

- Pour C.I :

- dans la couche de surface (0 – 30 cm) : $EC_{es.}$ varie entre 0,2 dS/m et 46,8 dS/m. Ce qui indique une hétérogénéité de la salinité au sein de cette couche. Il ressort que 4 % de la superficie appartient à la classe "non salé", 8,7 % à la classe "peu salé", 23,3% à la classe "moyennement salé", 47,3 % à la classe "salé" et enfin 16,7% à la classe "très salé-hyper-salé",
- dans la couche deux (30 – 60 cm) : $EC_{es.}$ varie entre 2,8 dS/m et 56,9dS/m. La salinité au sein de cette couche est moins hétérogène par rapport à la première couche. En effet, elle présente 3,3 % de la classe "moyennement salé", 40 % de la classe "salé", et plus de 55% de la variation "très salé à hyper-salé",

- dans la couche trois (60 – 90 cm) : EC_{es} . varie entre 23,6 dS/m et 61,9 dS/m et les valeurs sont plus homogènes avec une salinité qui se situe entre la classe "salé" (26,7%) et "très salé à hyper-salé" (61,9 %),
- dans la couche quatre (90 – 120 cm) : EC_{es} . varie entre 25 dS/m et 58,2 dS/m. Elle présente les mêmes classes de salinité trouvées dans la couche trois avec 13,3 % pour la classe "salé", et 86,7 % pour la classe "très salé à hyper-salé",
- enfin, dans la dernière couche (120 – 150 cm) : EC_{es} . varie entre 25 dS/m et 55,7 dS/m. Elle présente les mêmes classes de salinité trouvées dans les deux couches précédentes, avec une grande similitude sur les gammes de salinité caractéristiques. Ces dernières se situent entre 6,7 % pour la classe "salé" et 93,3% pour la classe "très salé à hyper-salé".

-Pour C.II :

- dans la couche de surface (0 – 30 cm) : EC_{es} . varie entre 8,5 dS/m et 44,4 dS/m. De ce fait, les résultats indiquent une grande hétérogénéité de la salinité au sein de cette couche. Il est noté que 1,7 % de la superficie appartient à la classe "non salé", 10 % à la classe "peu salé", 43,3 % à la classe "moyennement salé", 38,3% à la classe "salé", et enfin 6,7% à la variation de la classe "très salé à hyper-salé",
- dans la couche deux (30 – 60 cm) : EC_{es} . varie entre 17,4 dS/m et 84,29dS/m. La salinité au sein de cette couche est moins hétérogène par rapport à la première couche. Effectivement, elle présente 3,3 % de la classe "moyennement salé", 40 % de la classe "salé", et plus de 55% de la variation "très salé à hyper-salé",
- dans la couche trois (60 – 90 cm) : EC_{es} . varie entre 20,4 dS/m et 86,6 dS/m et les valeurs semblent identifier une certaine continuité avec la couche précédente. Ainsi, la salinité se situe entre la classe "moyennement salé"(1,3%), la classe "salé"(25,3%) et plus de 73% de la superficie est caractérisée par la variation "très salé à hyper-salé",
- dans la couche quatre (90 – 120 cm) : EC_{es} . varie entre 22,7 dS/m et 90,5 dS/m. La salinité au sein de cette couche est plus homogène par rapport aux trois couches précédentes. Elle varie entre la classe "salé" avec 10% et la variation de la gamme "très salé à hyper-salé" avec 90%,
- dans la dernière couche (120 – 150 cm) : EC_{es} . varie entre 22,7 dS/m et 81,2 dS/m. Elle présente les mêmes classes de salinité trouvées dans la couche précédente. La salinité se situe entre 8,3% pour la classe "salé" et 91,37% pour la variation "très salé à hyper-salé".

-Pour C.III :

- dans la couche de surface (0 – 30 cm) : EC_{es} . varie entre 8,2 dS/m et 70,6 dS/m. Dans ce sens, les résultats indiquent une grande hétérogénéité de la salinité au sein de cette couche. Il ressort que 4 % de la superficie appartient à la classe "non salé", 19 % à la classe "peu salé", 40 % à la classe "moyennement salé", 26,6% à la classe "salé", et enfin 10,3% à la variation de la classe "très salé à hyper-salé",
- dans la couche deux (30 – 60 cm) : EC_{es} . varie entre 17,6 dS/m et 59,8dS/m. La salinité au sein de cette couche est moins hétérogène que la couche de surface. En effet, elle présente moins de 0,5% de la classe "peu salé", 1,7 % de la classe "moyennement salé", 44,7% de la classe "salé", et enfin 53,3% de la variation "très salé à hyper-salé",
- dans la couche trois (60 – 90 cm) : EC_{es} . varie entre 20,5 dS/m et 59,4 dS/m et les valeurs sont plus homogènes que les deux couches précédentes. La salinité se situe entre la classe "moyennement salé" avec 0,3%, la classe "salé" avec 26,3% et en fin la variation "très salé à hyper-salé avec plus de 70%,
- dans la couche quatre (90 – 120 cm) : EC_{es} . varie entre 22,8 dS/m et 66,4 dS/m sur fond de valeurs plus homogènes. La salinité se situe entre la classe "salé" (13,3%) et la variation "très salé à hyper-salé (86,7 %),
- dans la couche cinq (120 – 150 cm) : EC_{es} . varie entre 23 dS/m et 62,3 dS/m. Elle présente les mêmes classes de salinité trouvées dans la couche précédente, avec une grande analogie sur les gammes de salinité. Ces dernières se situent entre 3,3 % pour la classe "salé", et plus de 95% pour la variation "très salé à hyper-salé".

-Pour C.IV

- dans la couche de surface (0 – 30 cm) : EC_{es} . varie entre 3,1 dS/m et 30,8 dS/m. Cependant, les résultats indiquent une certaine hétérogénéité de la salinité au sein de cette couche. Ainsi, 0,3% appartiennent à la classe "peu salé", 30% à la classe "moyennement salé", 63% à la classe "salé", et enfin 6,7% à la variation de la classe "très salé à hyper-salé",
- dans la couche deux (30 – 60 cm) : EC_{es} . varie entre 17,5 dS/m et 37,2dS/m. La salinité au sein de cette couche semble s'inscrire sur une certaine continuité morphologique avec la première couche. En effet, elle présente 0,3 % de la classe "peu salé", 3 % de la classe "moyennement salé", 36,7% à la classe "salé", et en dernier 60% de la variation "très salé à hyper-salé",

- dans la couche trois (60 – 90 cm) : EC_{es} varie entre 19,8 dS/m et 40,7 dS/m. La salinité présente les mêmes classes d'effet trouvées dans les couches $h1$ et $h2$. Elle se situe entre la classe "*peu salé*" (0,3%), 1,7 % de la classe "*moyennement salé*", 23,7% à la classe "*salé*", et 74,3% de la variation "*très salé à hyper-salé*",
- dans la couche quatre (90 – 120 cm) : EC_{es} varie entre 21,5 dS/m et 45,1 dS/m. Elle s'identifie par les mêmes classes de salinité trouvées dans les trois couches supérieures du profil. La salinité varie entre la classe "*peu salé*" (0,3%), 0,7 % de la classe "*moyennement salé*", 16,7% à la classe "*salé*", et 82,3% de la variation "*très salé à hyper-salé*",
- dans la dernière couche, la couche cinq (120 – 150 cm) : EC_{es} varie entre 22,5 dS/m et 43,8 dS/m. Selon les résultats obtenus, les valeurs sont plus homogènes par rapport aux différentes couches présentées ci-dessus. La salinité se situe entre 0,3 % pour la classe "*moyennement salé*", 13% pour la classe "*salé*", et enfin 86,7% pour la variation "*très salé à hyper-salé*".

En fin, l'exercice d'évaluation de la qualité de ces cartes d'isovaleurs nous a permis de démontrer l'exactitude et la précision de l'information *estimée* et *produite*. Les taux de représentativité obtenus varient entre :

- 75,7% à 99,3% sur la base de EC_e et de 78,4 % à 94,5% sur la base de EC_e estimée pour *C.I*,
- 94,6% à 100% sur la base de EC_e et de 94,6% à 100% sur la base de EC_e estimée pour *C.II*,
- 94,6% à 100% sur la base de EC_e et de 97,3% à 100% sur la base de EC_e estimée pour *C.III*,
- et enfin, 94,6% à 100% sur la base de EC_e et de 94,6% à 100% sur la base de EC_e estimée pour *C.IV*,

A partir de ces résultats, il est possible de dire que les différentes cartes réalisés sont précises et très fiables, en particulier celles des couches de profondeur.

Globalement, il est clair que la démarche cartographique adoptée a permis de réaliser *une très bonne estimation* de l'état actuel de la salinité des sols dans la région d'El Hamadna, avec *un risque d'erreur excellent* dans le contexte pédologique et environnemental spécifique à cette

étude. Néanmoins, il serait intéressant à l'avenir de développer et d'affiner un peu plus les modèles mathématiques de prédiction en y associant certains paramètres du milieu environnant (*Exp. modèle s.c.o.r.p.a.n..*) et de les tester et de les généraliser à un contexte plus large.

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.*

*« Il est bien difficile de croire que tant de merveilles, tant d'ingéniosité dans
le monde soient l'effet du hasard et de la chimie seulement »*

*Paul Valéry
(1871-1945).*

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

L'interprétation des équilibres chimiques des solutions salines nécessite une prise en compte des processus géochimiques (Keller et *al.*, 1987 ; Morse et Arvidson 2002). La composition de la phase liquide résulte en grande partie des interactions entre l'eau, les phases minérales et organiques solides, et l'atmosphère (Andersson et *al.*, 2007). En effet, la dissolution et la précipitation des phases solides y jouent un rôle décisif, particulièrement pour la régulation des éléments chimiques comme le calcium et les carbonates (Valles et *al.*, 1989 ; Cross et *al.*, 2013). L'étude de la solubilité des minéraux correspondants aux phases solides prédominantes du système considéré doit permettre de définir les équilibres entre les différentes phases (Valles et *al.*, 1989).

Si une solution initiale sous saturée par rapport à la calcite est concentrée par évaporation, tant que l'équilibre avec le minéral n'est pas atteint, le calcium et l'alcalinité se comportent comme des traceurs de l'état de concentration de la solution (Ribolzi et *al.*, 1993).

Le concept d'alcalinité résiduelle (*AR*) dérive de la notion de carbonates résiduels proposée par Eaton (1950). Dans les milieux où la calcite précipite, Van Beek et Van Breemen (1973) ont défini la notion d' $AR_{calcite}$ par la différence entre l'alcalinité et la concentration totale des cations divalents présents dans la solution du sol, exprimée en $meq\ l^{-1}$.

L'*AR* est un outil intéressant pour prévoir le sens d'évolution des concentrations de différents éléments dissous et par voie de conséquence du faciès chimique des solutions (Valles et *al.*, 1989).

Dans les solutions du sol, la capacité d'échange cationique contient une réserve de cation souvent supérieure à la quantité dissoute, notamment lorsque la solution du sol est peu concentrée. Les échanges ioniques peuvent alors altérer le caractère conservatif de l'*AR* (Ribolzi et *al.*, 1993).

L'objectif principal du présent travail est d'évaluer les caractéristiques géochimiques des eaux de drainage des sols salés carbonatés des plaines du Cheliff (Algérie) et de tester le caractère

conservatif de l' $AR_{calcite}$ dans ces solutions diversement minéralisées.

1. Matériel et méthodes

1.1. Matériel d'étude

Les échantillons d'eau étudiés sont prélevés dans des drains à ciel ouvert. La première phase du prélèvement a ciblé les drains de l'ancien périmètre de la station expérimentale d'étude des sols salés d'El Hamadna (1942 à 1961). Le prélèvement a permis l'obtention de sept échantillons d'eau (R1 à R7).

La seconde phase de l'échantillonnage a couvert les drains d'une partie de l'ancien périmètre d'étude de la station de recherche agronomique d'El-khemis et des terrains agricoles dans la région de Khemis Miliana. Le prélèvement a permis l'obtention de six échantillons d'eau (K1 à K6).

Ces deux sites d'étude sont localisés dans les plaines irriguées et semi-arides à arides d'Oued-Cheliff qui sont situées à l'Ouest d'Alger (figure 81). Les échantillons prélevés couvrent une large gamme de salinité. Les sols sont salés, carbonatés et argileux (Boulaine 1957 ; Daoud 1993 ; Hadj-miloud 2010).

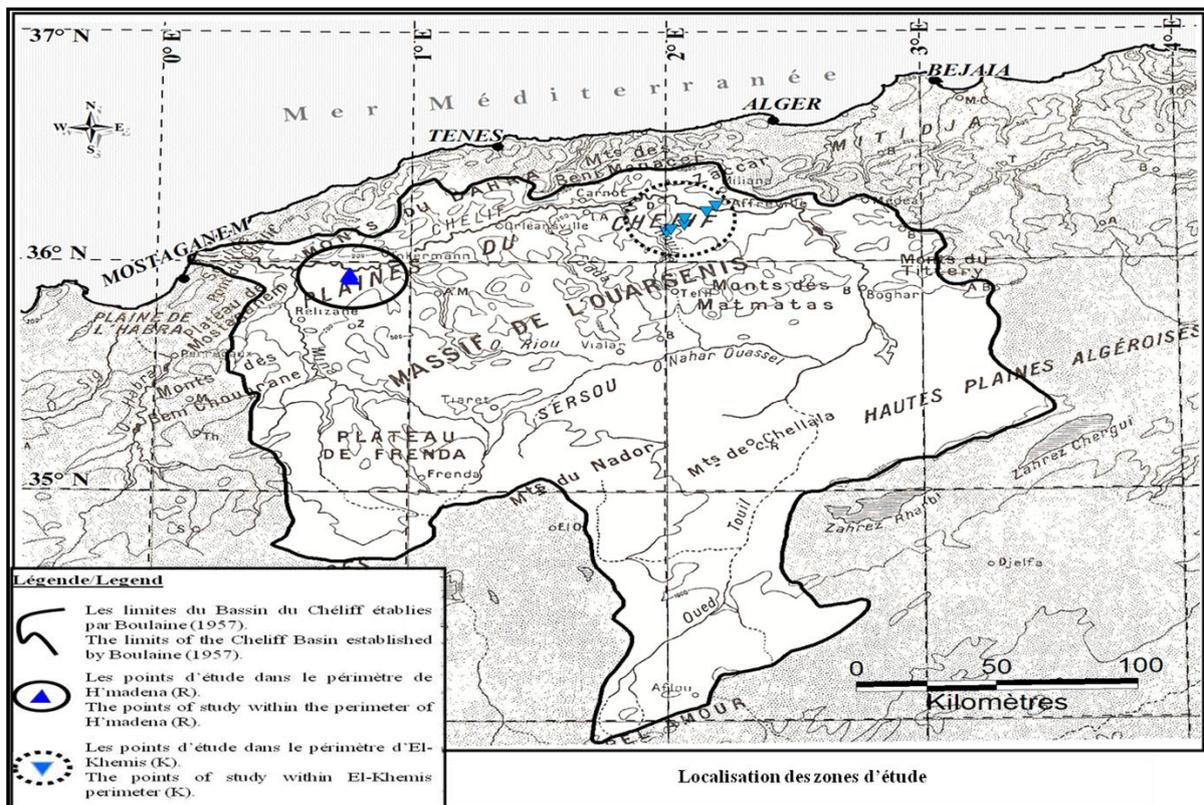


Figure 81. Localisation géographique des deux sites :
Périmètre El Hamadna et Périmètre El Khémis

1.2. Méthodes d'étude

Les échantillons d'eau prélevés sont filtrés et conservés à 4°C. Les méthodes d'analyse utilisées sont celles décrites pour les solutions des sols salés par l'USSL (1954). Les paramètres, *pH* et la température ont été mesurés sur le terrain par un appareil de type multimètre (*MM40+*) à multicateur *5059P*.

La détermination de l'alcalinité est réalisée en utilisant une titration de 10 ml de chaque échantillon d'eau par *HCl 0,01 N*. Les calculs sont réalisés par l'application de la fonction ou de la méthode de Gran (1952)¹³.

Le calcul de la distribution des espèces en solution et des activités ioniques est réalisé par le logiciel ACTIVE (Montroi et Rieu, 1987). Le calcul des activités de CO_3^{--} est réalisé par le logiciel à partir des valeurs du *pH* et des activités de HCO_3^- . L'état de saturation des eaux vis-à-vis de la calcite est calculé sur la base d'un produit de solubilité de $10^{-8,37}$ (Helgeson, 1969).

Le facteur de concentration est calculé en divisant la concentration en chlore de l'eau par la concentration la plus faible qui est obtenue pour l'échantillon *KI* et qui est de $0,01251 \text{ mole l}^{-1}$. L' AR_{calcite} est obtenue ainsi :

$$(31) \quad AR_{\text{calcite}} (\text{meq l}^{-1}) = [(\text{Alcalinité}) - 2 (\text{Ca}^{++})]$$

2. Résultats

2.1. Caractérisation chimique des eaux de drainage

Les résultats de la caractérisation chimique des eaux de drainage prélevées dans les deux zones d'étude sont présentés dans le tableau LIX.

¹³- La méthode de Gran (aussi graphe de Gran et titrage de Gran) est un moyen usuel d'étalonner un titrate ou un titrant en estimant le volume d'équivalence pendant *un titrage d'acides et bases, aux précipitations ioniques, à la formation de complexes d'oxydimétrie*.. Elle peut aussi servir à estimer le contenu en *carbonate* d'une solution aqueuse, ainsi que les constantes d'acidité K_a d'acides ou bases faibles à partir de données de titrage (Gran, 1950 ; Butler, 1998).

Principe : Elle met en oeuvre des approximations linéaires de relations a priori non-linéaires entre la quantité mesurée, le *pH* ou le potentiel électromoteur (*f.e.m.*), et le volume de titrant ajouté.

Tableau LIX. Caractérisation chimique des eaux de drainage.

Var.	Ave.	Med.	Min.	Max.	Var.
I ($mole\ l^{-1}$)	0,230846	0,155000	0,025000	0,739000	0,04898
pH	7,243846	7,140000	7,040000	7,630000	0,04821
Ca^{++} ($mole\ l^{-1}$)	0,002647	0,001120	0,000650	0,008110	0,00001
Mg^{++} ($mole\ l^{-1}$)	0,004743	0,003800	0,001040	0,011300	0,00001
Na^+ ($mole\ l^{-1}$)	0,080840	0,048230	0,011500	0,259000	0,00574
K^+ ($mole\ l^{-1}$)	0,000377	0,000320	0,000037	0,000860	0,00000
Cl^- ($mole\ l^{-1}$)	0,112535	0,061230	0,012510	0,385000	0,01308
SO_4^{--} ($mole\ l^{-1}$)	0,002941	0,002450	0,001510	0,005960	0,00000
CO_3^{--} ($mole\ l^{-1}$)	0,000009	0,000007	0,000003	0,000021	0,00000
Alkalinity ($meq\ l^{-1}$)	0,036050	0,035600	0,015240	0,056800	0,00025
$Q_{(CaCO_3)}$	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,00000
$Q/Kps_{(Calcite)}$	4,492769	1,783000	1,061000	14,269000	21,32892
$RA_{calcite}$ ($meq\ l^{-1}$)	0,000769	0,003000	-0,012000	0,007000	0,00003
Concentration factor (CF)	8,995615	4,894000	1,000000	30,775000	83,58127

Une première évaluation des données permet de noter qu'elles présentent une force ionique comprise entre $0,025\ mole\ l^{-1}$ et $0,739\ mole\ l^{-1}$, avec un pH qui varie entre 7,04 et 7,63 (figure 82).

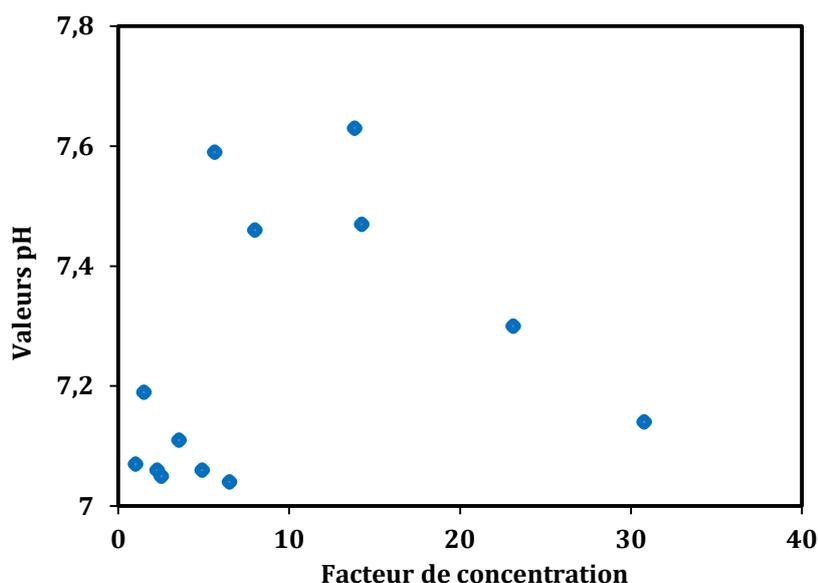


Figure 82. Evolution du pH en fonction du facteur de concentration

L'évolution de la composition des eaux lors de leur concentration montre que l'activité ionique du sodium augmente de façon proportionnelle au facteur de concentration ($R^2 = 0,96$), l'activité du calcium augmente également avec le facteur de concentration selon une moindre intensité que le sodium ($R^2 = 0,87$). L'activité du magnésium évolue de façon polynomiale avec le facteur de concentration ($R^2 = 0,85$). L'activité du potassium évolue de façon relativement indépendante par rapport au facteur de concentration. L'activité des sulfates semblent évoluer de façon relativement indépendante par rapport au facteur de concentration (figure 83).

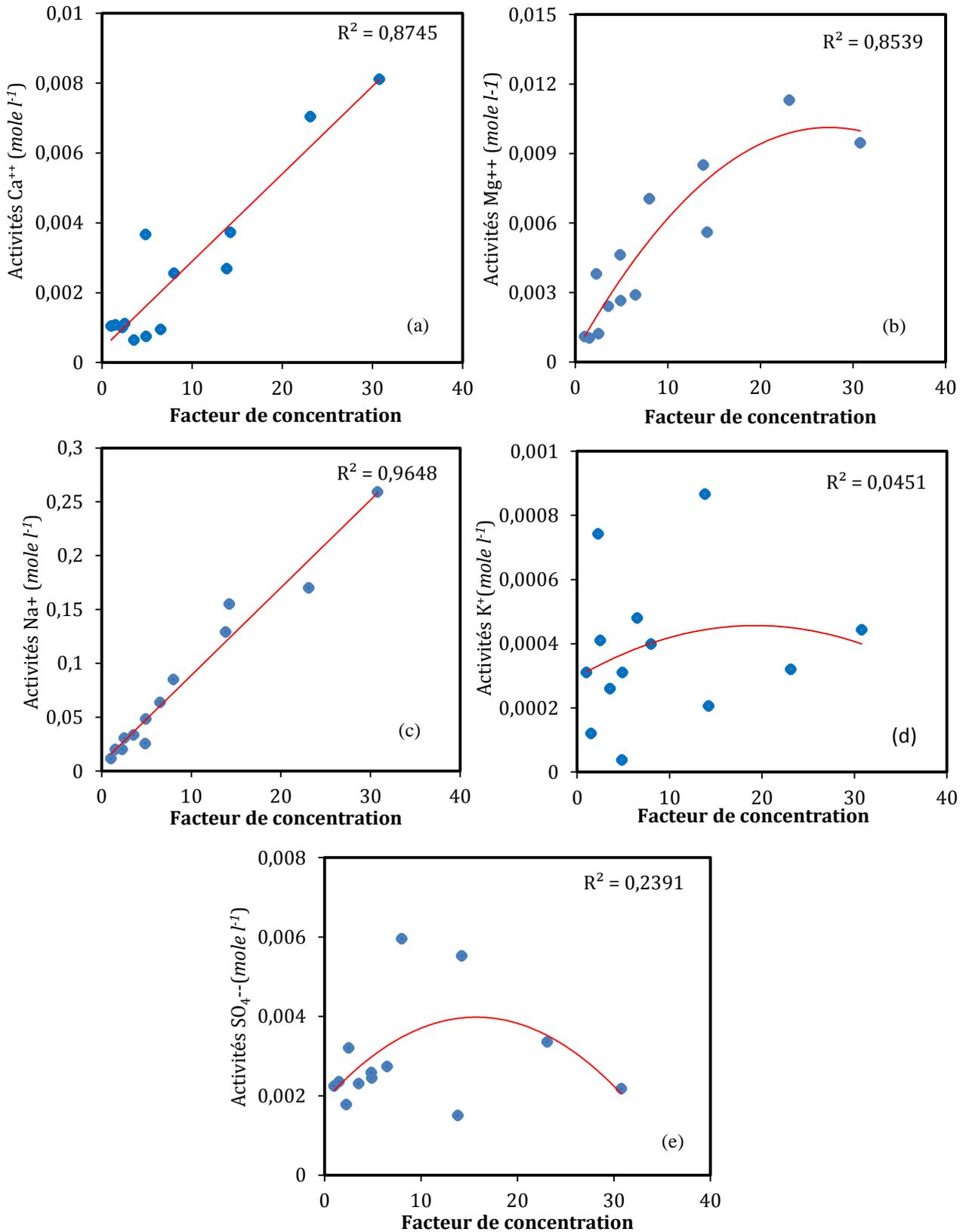


Figure 83. . Evolution des activités ioniques de certains éléments en fonction du facteur de concentration.

(a) Activités du Ca⁺⁺ (mole l⁻¹), (b) Activités du Mg⁺⁺ (mole l⁻¹), (c) Activités du Na⁺ (mole l⁻¹), (d) Activités K⁺ (mole l⁻¹), (e) Activités du SO₄⁻⁻ (mole l⁻¹).

2.2. Le faciès chimique des eaux et l'état de saturation vis-à-vis de la calcite

Toutes les eaux présentent un faciès chimique anionique de type chloruré et un faciès chimique cationique de type sodique (figure 84).

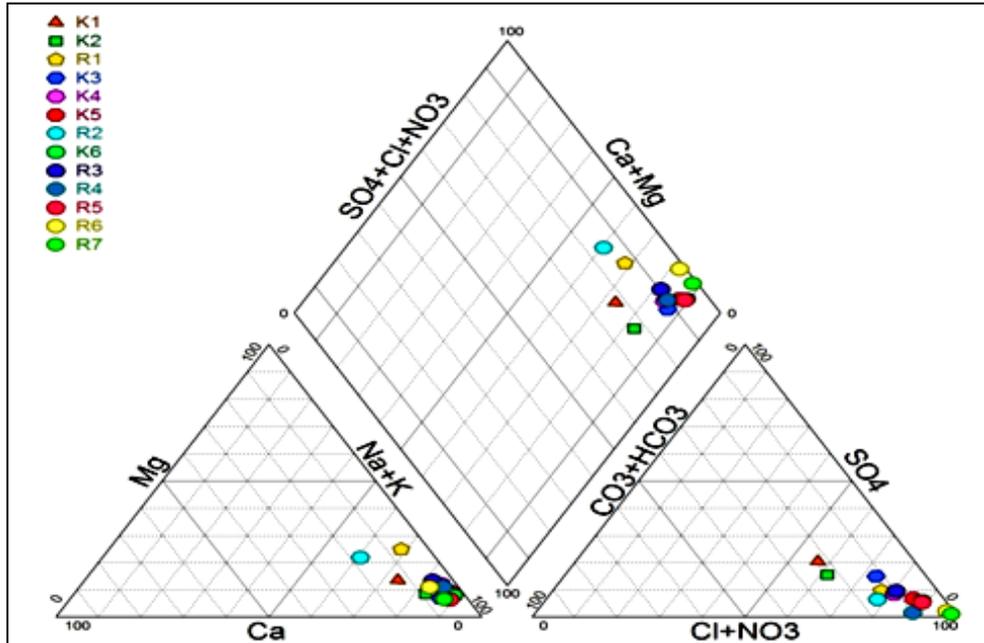


Figure 84. Le faciès chimique des eaux représenté sur le diagramme de Piper

Toutes les eaux présentent un indice de saturation Q/Kps vis-à-vis de la calcite supérieur à 1 (Figure 85). Elles sont donc sursaturées vis-à-vis de ce sel. Les valeurs de l'indice de saturation Q/Kps sont très dispersées, elles sont comprises entre 1,06 et 14,27.

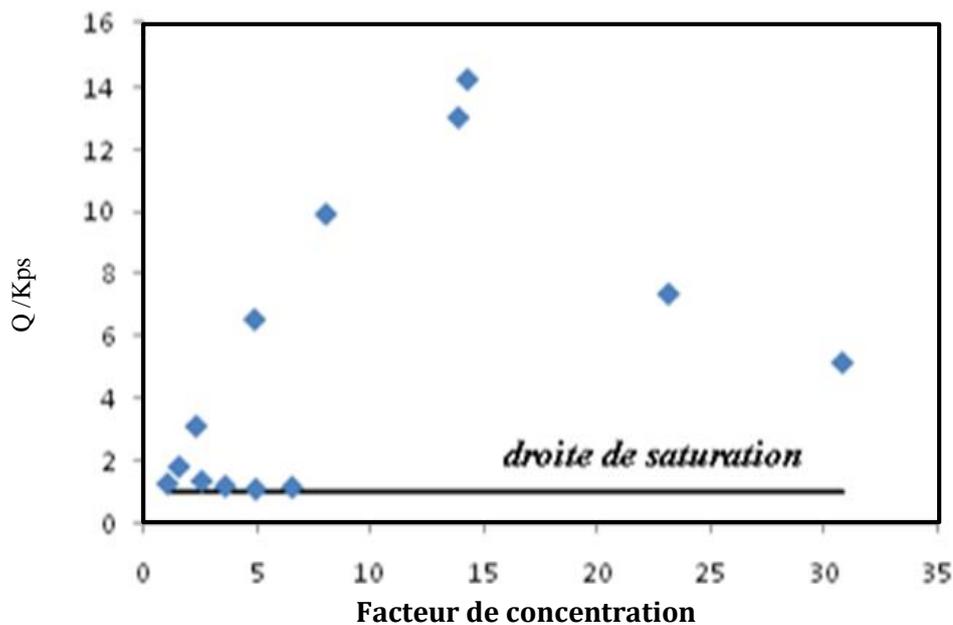


Figure 85. Etat de saturation des eaux par rapport à la calcite

2.3. L'alcalinité des eaux

Elle est déterminée en application de la fonction de Gran (1952). Les différentes étapes de la démarche utilisée sont présentées dans la figure 86. Dans ce type de climat (aride) et pour la gamme des valeurs du pH observées (7,04 à 7,63), l'alcalinité totale (AT) correspond à l'alcalinité carbonatée (Valles et al., 1989).

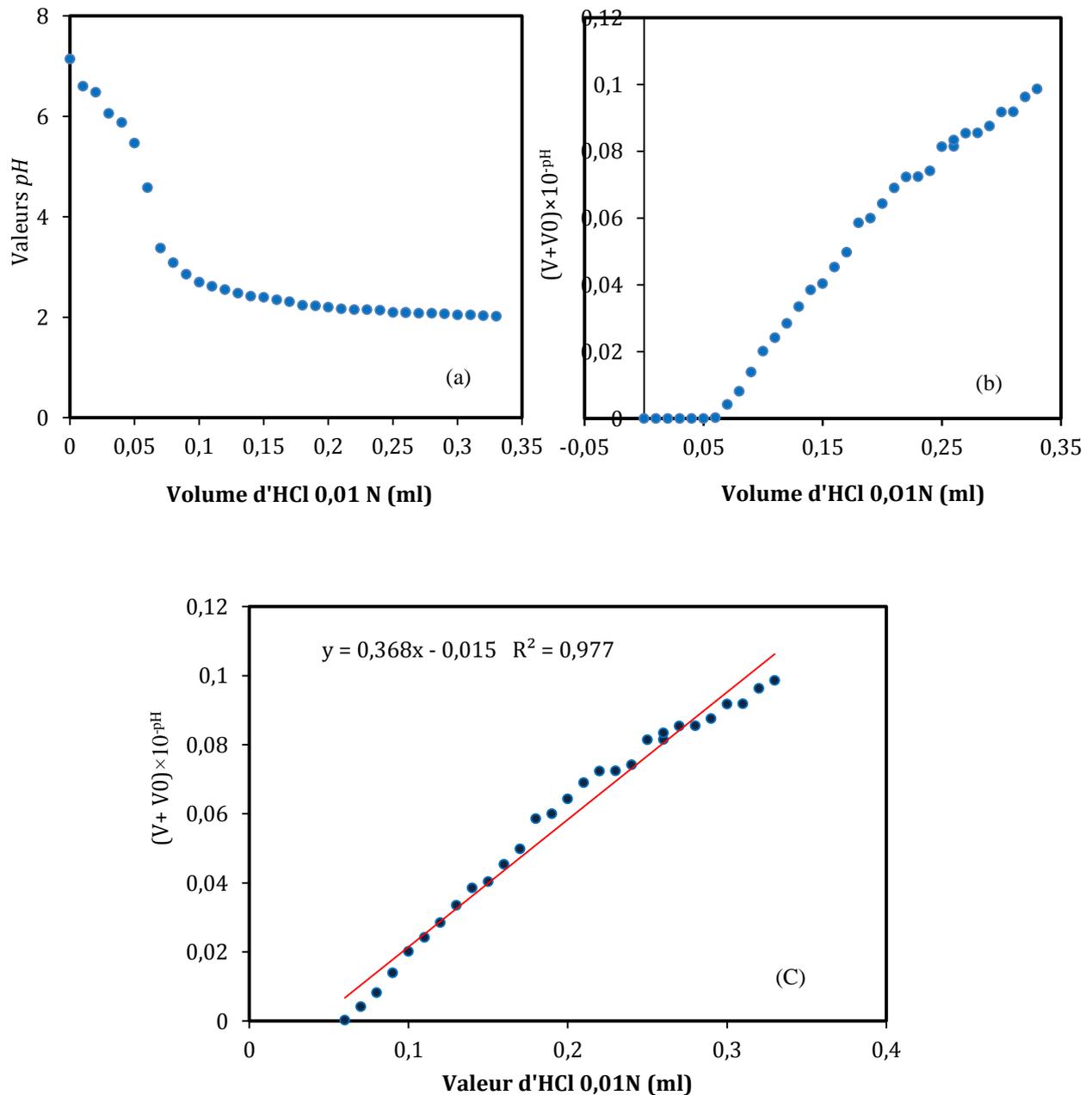


Figure 86 Les étapes de la détermination de l'alcalinité totale (AT) des eaux.
 (a) Courbe de titration de l'eau à l'aide l'acide chlorhydrique 0,01N.
 (b) Application de la fonction de Gran (1952),
 (c) Ajustement de la partie linéaire de la fonction de Gran (1952).

A partir des résultats indiqués dans les Figures 86(a),(b),(c), il est à noter ce qui suit

$$(32) \quad AT \text{ (meq l}^{-1}\text{)} = \frac{10^3 \times V_{\text{éq}} \times C}{V_0} = \frac{10^3 \times 0,041 \times 0,01}{10} = 0,041$$

Où AT est l'alcalinité totale en meq l^{-1} , C est la concentration du titran en meq l^{-1} , V_0 représente le volume de l'échantillon en ml, et $V_{\text{éq}}$ (volume équivalent) est le volume d'acide correspondant au point équivalent en ml ($-b/a = 0,015/0,368 = 0,041$). Intuitivement, a et b représentent les nombres réels obtenus à partir de l'ajustement linéaire de la fonction de Gran (Figure 86c) identifié par la fonction $y = 0,3687x - 0,0154$.

Les résultats obtenus montrent que l'alcalinité augmente avec le facteur de concentration, elle atteint un maximum, et ensuite elle décroît (Figure 87). La dispersion de l'alcalinité pour des facteurs de concentration assez voisins provient principalement de la variabilité spatiale de la $p\text{CO}_2$ et des échanges avec le complexe argilo-humique (Ribolzi et al., 1993).

Le caractère non conservatif de l'alcalinité dans ces eaux de drainage serait du à des phénomènes de dissolution-précipitation du carbonate de calcium (Cross et al., 2013).

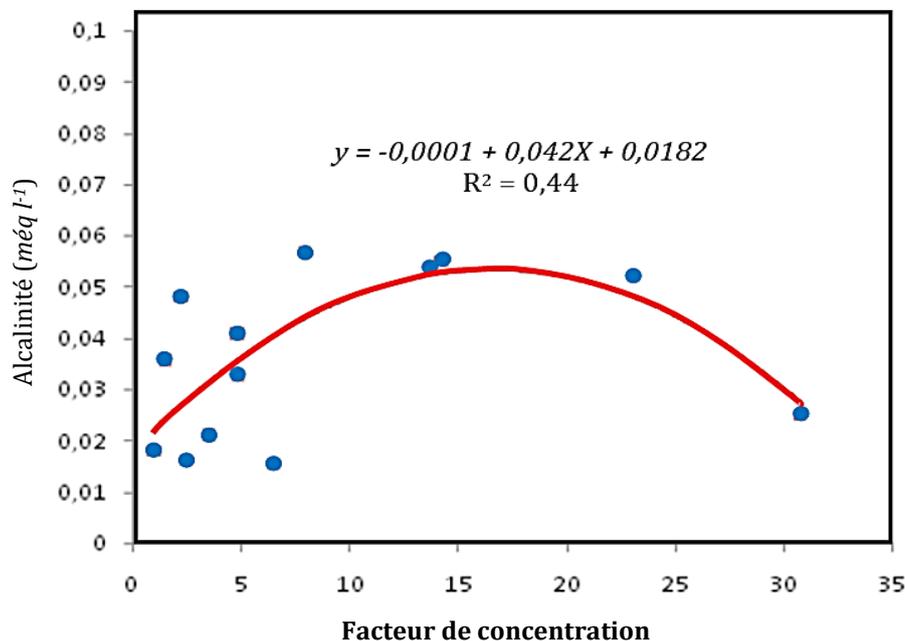


Figure 87. Evolution de l'alcalinité totale (AT) en fonction du facteur de concentration.

L' AR_{calcite} est calculée pour toutes les eaux puisqu'elles sont toutes saturées vis-à-vis de la calcite (Figure 85). Il ressort que les valeurs de l' AR_{calcite} diminuent de façon proportionnelle par rapport au facteur de concentration ($R^2 = 0,87$) tandis que les activités ioniques du calcium

augmentent de façon proportionnelle par rapport au facteur de concentration ($R^2 = 0,87$) (figure 88).

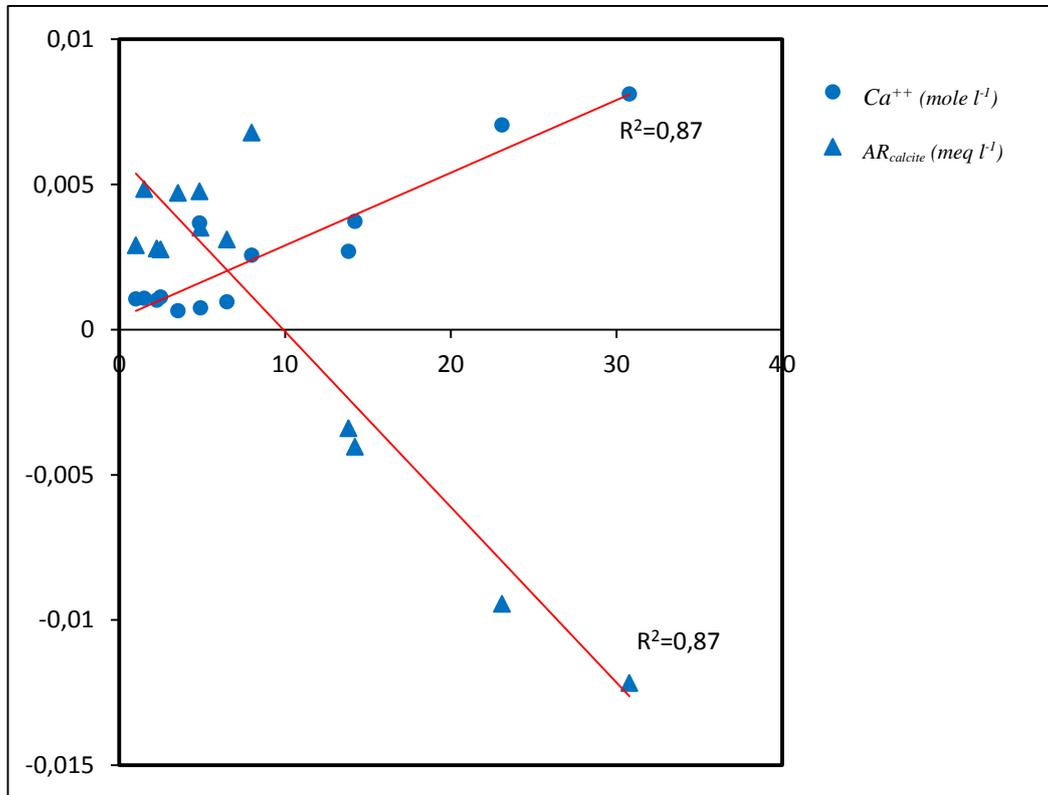


Figure 88. Evolution de l' $AR_{calcite}$ et du calcium en fonction du facteur de concentration des eaux.

L' $AR_{calcite}$ a donc un caractère conservatif dans ces milieux salés. Le phénomène d'échange ionique ne semble pas suffisamment important pour affecter le caractère conservatif de l' $AR_{calcite}$ le complexe adsorbant est probablement proche de l'équilibre avec les solutions qui sont à son contact (Ribolzi et al., 1993).

3. Discussion des résultats

Les eaux de drainage analysées présentent une force ionique comprise entre $0,025 \text{ mole } l^{-1}$ et $0,739 \text{ mole } l^{-1}$ et un pH compris entre 7,04 et 7,63. Les eaux sont donc diversement minéralisées et ont une réaction proche de la neutralité à sensiblement alcaline.

L'évolution de la composition des eaux lors de leur concentration montre que les activités ioniques du sodium et du calcium augmentent de façon proportionnelle au facteur de concentration, l'activité du magnésium évolue de façon polynomiale avec le facteur de

concentration, les activités ioniques du potassium et des sulfates évoluent de façon relativement indépendante par rapport au facteur de concentration.

Toutes les eaux présentent un faciès chimique anionique de type chloruré et un faciès chimique cationique de type sodique, et elles sont saturées vis-à-vis de la calcite.

Les valeurs de l'alcalinité obtenues par la méthode de Gran (1952) sont comprises entre 0,0152 $meq\ l^{-1}$ et 0,0568 $meq\ l^{-1}$, elles évoluent de façon polynomiale avec le facteur de concentration et elles confèrent un caractère non conservatif à l'alcalinité. Les valeurs de l' $AR_{calcite}$ sont comprises entre 0,003 $meq\ l^{-1}$ et 0,007 $meq\ l^{-1}$ pour les valeurs positives et elles sont comprises entre -0,012 $meq\ l^{-1}$ et -0,003 $meq\ l^{-1}$ pour les valeurs négatives.

Ces eaux sont en équilibre avec pCO_2 de l'atmosphère (360 μatm .) CO_{2aq} , HCO_3^- et CO_3^{--} sont en équilibre instantané et permanent. Les équilibres carbonatés qui existent dans les eaux de drainage sont régis par les équations suivantes (Morse et Arvidson, 2002)

$$(33) \quad CO_{2aq} = K_0 pCO_2 \quad K_0 = 2,839 \times 10^{-2} \text{ mole } kg^{-1} \text{ atm}^{-1}$$

$$(34) \quad CO_{2aq} + H_2O \leftrightarrow HCO_3^- + H^+ \quad K_1 = \frac{(HCO_3^-)(H^+)}{(CO_{2aq})} = 1,422 \times 10^{-6} \text{ mole } kg^{-1}$$

$$(35) \quad HCO_3^- \leftrightarrow CO_3^{--} + H^+ \quad K_2 = \frac{(CO_3^{--})(H^+)}{(HCO_3^-)} = 1,081 \times 10^{-9} \text{ mole } kg^{-1}$$

Dans les conditions naturelles, les variations d'alcalinité sont principalement dues à la dissolution ou la précipitation du carbonate de calcium (Kim et al., 2010 ; Cross et al., 2013). Dans la gamme des pH des eaux analysées (7,04 – 7,63) l'ion HCO_3^- prédomine largement sur l'ion CO_3^{--} et sur CO_{2aq} (Garrels et Christ 1967).

La diminution de l' $AR_{calcite}$ lorsque le facteur de concentration augmente et son signe négatif pour des facteurs de concentration $\geq 13,83$ explique la nature du mécanisme de salinisation des sols de ces plaines (Barbiero et al., 2001). En effet, les travaux de Daoud (1993) et Hadj-miloud (2010) ont montré que la voie de salinisation observée dans les sols de ces plaines est de type saline neutre. Cette voie saline neutre est moins contraignante pour la mise en valeur agricole de ce type de paysage (Cheverry, 1974 ; Cheverry et Robert, 1998 ; Houha et al., 2008).

Conclusion

L'évolution de l'alcalinité résiduelle calcite ($AR_{calcite}$) est proportionnelle à celle des ions chlorures. Elle est donc conservative contrairement à l'alcalinité totale (AT). L' $AR_{calcite}$ ne semble pas être affectée par les interactions avec les constituants des sols.

Conformément au concept d'alcalinité résiduelle (AR) appliqué à la précipitation de la calcite, une fois la saturation atteinte, on observe une augmentation des teneurs en calcium et une diminution de l' AR . A partir de là, il est possible de dire que la règle de l' $AR_{calcite}$, qui permet une prévision qualitative du comportement du calcium et de l'alcalinité carbonatée, est donc vérifiée.

La diminution de l' $AR_{calcite}$, en fonction du niveau de salinité, exprimée par le facteur de concentration montre que la précipitation de la calcite dans ces paysages, sous climat méditerranéens arides et salés, empêche l'évolution des sols vers la voie alcaline et facilite leur mise en valeur agricole par irrigation et drainage.

Chapitre VI.
Synthèse et conclusion générale

« Aucun discours ne peut donner la certitude, tout repose sur l'expérience »
Roger Bacon, *Opus majus* (1266), VI, p. 201
Doctor mirabilis
(1214-1294).

Chapitre VI. Synthèse et conclusion générale

Dans ce qui suit, nous synthétisons les principaux résultats obtenus et nous présentons les différentes hypothèses émises dans le cadre de la problématique de cette étude.

Nous rappelons que ce travail a été structuré autour de cinq axes méthodologiques :

- Analyse détaillée des *spécificités biogéographiques* de la zone d'étude.
- Traitement pédométrique (quantitatif et qualitatif) comparatif sur des données d'étude de plus de cinquante ans (1956-2012).
- Adaptation et application d'une approche CNS en vue de préserver et de valoriser un héritage cartographique et pédologique.
- Utilisation d'une approche de cartographie pédologique non invasive combinée à une modélisation prédictive pour le suivi de la salinité.
- L'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.

Les principaux résultats acquis

1. Les conditions extrêmes du climat

Il est bien connu que les conditions climatiques imposent au milieu des contraintes d'aridité qui se manifestent essentiellement par une faible disponibilité en eau et des températures élevées (Aubert, 1960 ; Halitim, 1985 ; 1988 ; Delhoum, 1997). Celles-ci engendrent des situations "réactionnelles" (remontées de nappes, précipitation et accumulation de sels, etc...) qui, par leur impact, aboutissent à la formation des systèmes *éco-pédologiques* très particuliers.

Dans ce sens, les plaines du Cheliff ne dérogent pas à cette règle. Elles sont très peu arrosées et sont soumises à un déficit hydrique très intense de durées variables. Les données climatiques révèlent un gradient d'aridité "croissant", allant de la région du *Haut-Cheliff* située à l'est vers la région du *Bas-Cheliff* à l'ouest.

Ce genre de représentation descriptive a permis d'observer que la mise en place de la salinité et son évolution dans les sols des plaines sont sous la dépendance de la dynamique de l'eau et des sels, et par conséquent sous l'effet de trois facteurs principaux :

- Les processus sédimentaires et la nature du matériau déposé.
- La morphologie structurante de la plaine.
- Les conditions extrêmes du climat et l'impact du bilan de l'eau.

2. Caractéristiques et organisation des paramètres de salinisation entre E1 et E2

La comparaison de deux matrices de données a permis d'observer et d'évaluer la progression du phénomène de salinisation dans les sols du périmètre agricole d'El Hamadna. La première matrice est relative à des données cartographiques et analytiques actualisées de E1. La seconde matrice a été construite avec des données de caractérisation et d'évaluation d'échantillons de sols de E2 sur les mêmes sites que E1.

Cette approche, organisée autour de quatre grandes étapes, s'est basée sur la sélection, le traitement et l'analyse des paramètres physico-chimiques liés à la contrainte salinité et son évolution dans les profils et dans le temps.

Dans un premier temps, l'exploitation des données du sol fait apparaître les faits suivants :

- Pour la représentation d'ensemble :

- les valeurs de EC_e de chaque période de mesures montrent que les taux de salinité sont très variables. Ils varient dans les classes de sols *moyennement salés* ($EC_e = 4-8$ dS/m) à *très salés-hyper-salés* ($EC_e >16$ dS/m) pour E1 et *de sols non salés* ($EC_e <2$ dS/m) à *très salés - hyper-salés* ($EC_e >16$ dS/m) pour l'étude E2.

La comparaison de ces deux matrices a révélé des changements significatifs, avec comme conséquence une évolution du phénomène sur fond d'élargissement de classes de salinité. Ainsi, nous avons mis en évidence un *effet "Salinisation et/ou Désalinisation" très prononcé*, à différents endroits de la zone d'étude en E2 par rapport à E1,

- la détermination aussi bien des taux de ESP_{eq} et du SAR que celui des cations (Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} et K^+) et des anions (Cl^- , SO_4^{--} , CO_3^{--} et HCO_3^-) des solutions de sol s'est révélée importante dans l'étude de la dynamique saline des sols de la région. L'évaluation de l'évolution de la concentration des ions a été opérée selon deux cheminements caractéristiques (Servant, 1976 ; Hammi et al., 2001 ; Girard et al., 2011 ; Grûnberger, 2015) : Il s'agit en fait de *l'identification, la description et la variation* des proportions ioniques en tenant compte des aspects de la cinétique de constitution « *mouvement-transfert* » et des processus de formulations des séquences salines d'abord,

et de la prise en compte du concept d'*association et d'évolution* des concentrations ioniques en fonction de EC_e ensuite.

Cette démarche a permis de conforter l'idée que l'évolution de la salinité des sols des plaines du Cheliff est "considérable" et qu'elle est dominée par la présence de fortes quantités de sels plus solubles que le gypse, mais sur fond d'*effets caractéristiques* de la forme d'association de l'élément sodium. Ces résultats rejoignent ceux obtenus par différents auteurs (Boulaine, 1957 ; Aubert, 1976 ; Daoud, 1993 ; Touaf, 2002 ; Saidi, 2005 ; Saidi et al., 2008 ; Hadj Miloud, 2010).

Le mode de représentation adopté a permis d'émettre (aussi) des hypothèses associées à l'aspect *mouvement* de distribution verticale et latérale des solutés dans le sol (*effets des conditions spécifiques du milieu*) et à l'aspect relations entre solutions du sol et les sels précipités (*avec effets des processus de différenciation des profils salins et les mécanismes qui les régulent*).

- Les représentations de EC_e et de ESP_{eq} par horizons caractéristiques et par période ont conforté nos observations et la cohérence de nos constatations d'ensemble. En effet, les taux de EC_e et ESP_{eq} varient fortement dans les profils et dans le temps.

Ainsi, les résultats ont mis en évidence un schéma d'évolution général correspondant à une forme de désalinisation en *surface* ($h1$) et *sub-surface* ($h2$), et à une forme d'accumulation de sels en moyen ($h3$ à $h4$) et *bas-profil* ($h4$ à $h5$).

Dans un second temps, les différentes représentations descriptives établies révèlent, dans l'ensemble, la correspondance de nos données d'étude à trois types de profils salins (profils de formes non apparentées, profils de *type B* et profils de *type D* (figure 89).

Il y a lieu de préciser qu'il s'agit de profils pédologiques dont la genèse s'explique par le développement d'un gradient de salinité descendant, où seule la localisation du niveau de salinité maximum diffère.

En tenant compte de l'aspect de la "*dynamique saline*" et de ses facteurs par rapport à l'épisode temporel (Heurteaux et Servant, 1979 ; Grunberger, 2015), il ressort que ces différentes représentations traduisent une évolution sur fond de *successions fonctionnelles* en trois états. Les résultats des données montrent qu'il s'agit d'états de profils d'évolution (profils non apparentés vers des profils de *type B* ou de *type D*, et profils de *type B* vers des profils de *type*

D) et d'états de profils en stabilisation (*Maintien dans le temps de la forme de type B ou de type D*) comme indiqué par la figure 89.

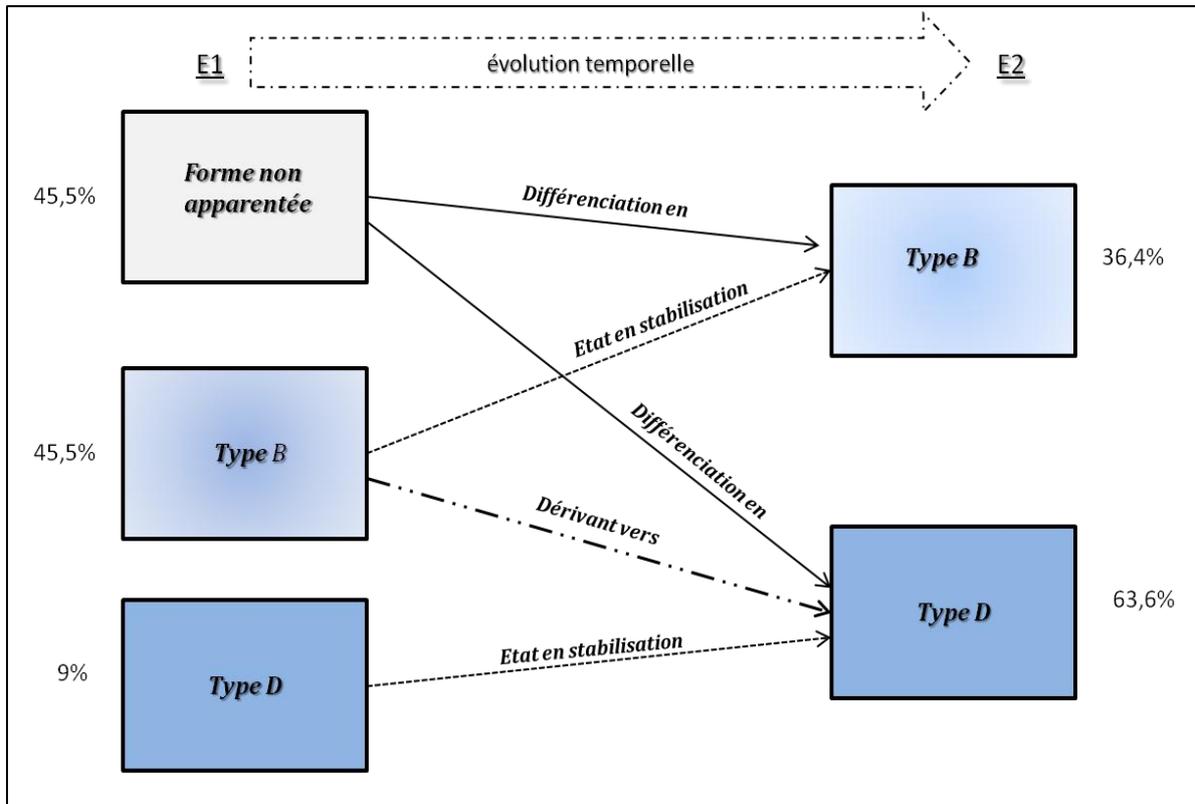


Figure 89. Synthèse des changements observés dans la mise en place des profils salins étudiés

Il convient de faire part à long terme de l'emprise des profils de *type D* (avec environ 64%) dans le fonctionnement et la différenciation des sols du périmètre agricole d'El Hamadna.

D'une façon générale, il est admis que toutes ces appréciations sur l'évolution des niveaux de salinité dans le milieu d'étude peuvent être expliquées par la forte variabilité des paramètres endogènes et /ou exogènes du milieu d'appartenance, comme souligné par de nombreuses recherches (Durand, 1956 ; Boulaine, 1957 ; Pouget, 1968 ; Servant, 1976 ; Heurteaux et Servant, 1979 ; Girard et *al.*, 2011).

Dans un troisième temps, l'évaluation et la comparaison de la composition chimique des extraits de solution du sol ont été effectuées sur la base de la représentation sur diagramme de Piper. Les résultats obtenus ont montré que, globalement, les faciès chimiques sont très variables et que la composition chimique des différentes solutions est essentiellement contrôlée par le sodium et les chlorures. Ils révèlent aussi une forme d'organisation chimique évolutive dans les profils et dans le temps (chronoséquences) qui se traduit par une dynamique allant de cinq types

de faciès chimiques en *E1* à trois types de faciès chimiques en *E2*. Ce phénomène est dû au fait qu'une part des solutions a évolué vers le faciès chloruré sodique qui est passé d'environ 67% en *E1* à plus de 92% en *E2*. Les résultats ont montré également que le niveau de salinité est lié au type de faciès chimique. Par exemple, le faciès chloruré sodique caractérise principalement les solutions de sols qui ont une EC_e élevée ([4 - 51,7 dS/m]).

En se référant aux conclusions de Dosso (1980) et Marlet et Job(2006), il est possible de conclure que les sols de la région d'étude évoluent selon la voie saline neutre à dominante chlorurée.

Dans un quatrième et dernier temps, nous avons étudié l'évolution temporelle de la salinité des sols salés d'El Hamadna sur un épisode de plus de cinquante ans (*E1-E2*). Cette étude a été établie sur fond de relation entre les observations (graphiques) des séquences descriptives des profils salins spécifiques et les données calculées par rapport à la tendance d'évolution (effet gradient) du phénomène et de son intensité par profil et par couche.

Cette démarche, qui s'est avérée concluante, a permis dans une première étape de confirmer les hypothèses émises précédemment. Cette étape a fait ressortir trois types de situations :

- Une salinisation accrue sur *tout le profil*.
- Une salinisation en diminution en surface et accrue dans la partie *bas-profil*.
- Une salinisation en diminution sur *tout le profil*.

Dans une seconde étape, elle a permis de cerner et d'identifier, sur la base de profils spécifiques, la cinétique caractéristique de mise en place de la salinité (verticale/horizontale). Ainsi établis, et en y associant les spécificités *morpho-pédologiques* de chaque horizon et les conditions contraignantes dans le périmètre (*Exp. Le fonctionnement hydrologique du milieu*), cette étape a permis de regrouper les profils du périmètre en deux catégories selon le type d'évolution saline :

- Des profils qui accusent une tendance de désalinisation des horizons de *bas-profil*.
- Des profils qui accusent une tendance de salinisation des horizons de *bas-profil*.

3. Mise en œuvre de la CNS pour préserver et valoriser les données cartographiques et pédologiques de *E1*

Sur la base du principe de préservation, de conservation et de gestion des informations sources, l'idée recherchée s'inscrit dans la logique de traitement d'un héritage de données de sols. Il

s'agit en fait d'une actualisation des limites des unités de la carte des sols de *EI* en utilisant la géostatistique et la technique d'interpolation par krigeage ordinaire (KO).

Les résultats obtenus ont permis de représenter et de décrire les tendances spatiales de la salinité dans le périmètre d'El Hamadna sur 5 niveaux de profondeurs, avec une précision des indicateurs "ME, RMSE, ASE, RMSSE" satisfaisante. Ils ont également permis d'établir un nouveau jeu de données représentatif de "la photographie" initiale du périmètre au début des opérations de mise en valeur (1954-1956) des sols salés et de réaliser un schéma d'observation spatiale des données de mesures de densité importante. En fin, ils ont abouti à une correction de la superficie réelle de la station expérimentale d'étude des sols salés d'El Hamadna (1942 à 1961).

4. Suivi de la variabilité spatio-temporelle de la salinité des sols du périmètre d'El Hamadna par utilisation de l'induction électromagnétique

Ce suivi qui a été effectué sur quatre campagnes de mesures a été accompli à l'aide de la technique de l'Induction Electromagnétique (IEM) via l'EM38. Il s'agit d'évaluer la salinité des sols et de prédire sa répartition dans le profil, dans l'espace et dans le temps. Les données obtenues ont été valorisées en mode cartographique par l'application de la technique d'interpolation par les modèles d'estimation du réseau irrégulier triangulaire (*TIN*).

L'originalité de de cette approche méthodologique s'identifie par les trois traitements spécifiques suivants :

- Réalisation d'une grille de mesures élaborée et mise en application en y associant la maille de prospection systématique établie en *EI*.
- Normalisation de l'ensemble des données de EC_a à la température de référence de 25°C par exploitation de la température prélevée au sol.
- Affinement et optimisation de la réponse statistique des traitements et des différents modèles de calculs obtenus par la mise en avant de l'ajustement à une distribution de loi normale.

Cette approche a permis d'évaluer et de suivre la variabilité spatio-temporelle de la salinité dans la région d'El Hamadna durant deux années sur 5 niveaux de profondeurs. A partir des données de EC_a et de EC_e , associées caractéristiques aux traitements de modélisation et de cartographie caractéristiques, il a été possible d'affirmer que la salinité varie dans l'espace et dans le temps avec une hétérogénéité assez importante. Les résultats ont montré également que la salinité se caractérise par des taux excessivement croissants selon la profondeur des sols. Cette forme

d'organisation analytique s'avère dépendante des conditions spécifiques de milieu. Dans ce sens, tous les profils salins observés sont descendants et *très salés* à *hyper-salés* en profondeur. Les résultats obtenus ont montré que la démarche méthodologique appliquée a permis de réaliser, selon les couches, une estimation correcte et une bonne représentation ($\approx 76-100\%$) de l'état actuel de la salinité des sols (Chap.IV, § 3.8.2.2).

5. Evaluation du risque d'alcalinisation des sols salés irrigués des plaines du Cheliff et conséquences sur leur devenir

Une salinisation trop importante des sols s'accompagne parfois d'une alcalinisation de leur complexe adsorbant. Les conséquences agronomiques auxquelles peut conduire la dégradation de ces sols par ces deux processus sont parfois contraignantes (Massoumi, 1968 ; Bertrand et *al.*, 1993 ; Schiess, 1995 ; Girard et *al.*, 2011).

Comme suite logique à notre évaluation d'ensemble, et en perspective d'une réhabilitation et d'une gestion réfléchie des sols salés carbonatés de la région agricole d'El Hamadna, il est clair que l'étude des principaux mécanismes géochimiques caractérisant la possible évolution alcaline de ces sols est plus qu'inévitable.

Pour ce faire, notre choix s'est porté sur l'outil d'alcalinité résiduelle (AR) et plus précisément sur l'observation du caractère conservatif de l'alcalinité résiduelle calcite ($AR_{calcite}$) dans des solutions diversement minéralisées.

Les résultats ont montré que toutes les solutions étudiées portent la même signature chimique. En effet, elles ont toutes un faciès chloruré sodique et elles sont toutes saturées en calcite. Aussi, il a été noté que l'activité des ions majeurs ne semble pas suffisamment importante pour affecter de manière significative l'évolution de la concentration des solutions.

La mise en application de la règle de $1'AR_{calcite}$, a permis une prévision qualitative du comportement des activités des ions calcium et de l'alcalinité carbonatée. C'est cette relation dont la validité a été vérifiée qui suggère que l' $AR_{calcite}$ présente un caractère conservatif dans les solutions étudiées.

L'absence de risque d'alcalinisation des sols des plaines est donc démontrée. La prédiction de l'évolution géochimique des différentes solutions étudiées explique donc l'évolution de la salinisation de nos sols vers la voie saline neutre. De plus, certains facteurs, tels le gypse et l'anhydrite, présent dans le sol (Saaoud, 2014 ; Ait-Mechedal, 2014 ; 2021), permettront, le cas échéant, d'interpréter un retard dans le processus.

Au vu des données scientifiques acquises, ce travail pourrait constituer le point de départ d'une démarche plus réfléchie et plus intelligente du mode d'aménagement et de réhabilitation (dans le sens remédiation) des sols salés agricoles de cette région à fort potentiel.

A première vue, il est clair que les sols salés du périmètre ont subi un tel état de transformation (direct ou indirect) qu'ils ne peuvent plus avoir conservé les aptitudes de réponse et de tendance réactionnel, représentatives des sols de même nature (Morel, 1989), face aux circonstances et conditions liées à la nature du milieu.

Dans cette optique, la reprise et la mise en avant des résultats sous une forme facile à appréhender, en référence à une synthèse cartographique des entités pédologiques observées et spécifiées sur près de 60 ans (figure 90), permettra :

- D'un côté, la formulation et la mise en œuvre de techniques théoriquement satisfaisantes pour répondre aux contraintes engendrées par les couches de subsurface et de profondeur des sols du périmètre :

- *extension spatiale et emprise de la classe de salinité très salée à hyper salée (C5) :*
 - pour *h2-h3*, le taux de recouvrement est passé de 33ha (11%) à plus de 160ha (53,33%),
 - pour *h4*, le taux de recouvrement est passé de 213ha (71%) à plus de 250 (83,33%) et,
 - pour *h5*, le taux de recouvrement est passé de 28ha (9,33%) à plus de 261ha (87%).
- *effet de nappe salée peu profonde à superficielle* et son cycle hydrologique qui conditionnent le milieu.

- D'un autre côté, de réinitialiser le fonctionnement de l'écosystème ou du milieu garant de la pérennité de la requalification du périmètre.

En se plaçant dans le cas général d'une intervention locale, les principales et les plus urgentes actions à entreprendre sont les suivantes :

- Eliminer l'effet négatif du dysfonctionnement du système de drainage adopté. En effet, dans certains endroits la nappe est à moins 60 cm.
- Faire face à l'état d'abandon du canal (exutoire) principal d'évacuation et des drains (à ciel ouvert) régulateurs internes et externes des parcelles.
- Réaliser l'assainissement total des sols du périmètre.
- Faire face aux situations d'engorgement et d'inondation répétitives (*Exp. Effets crues*).

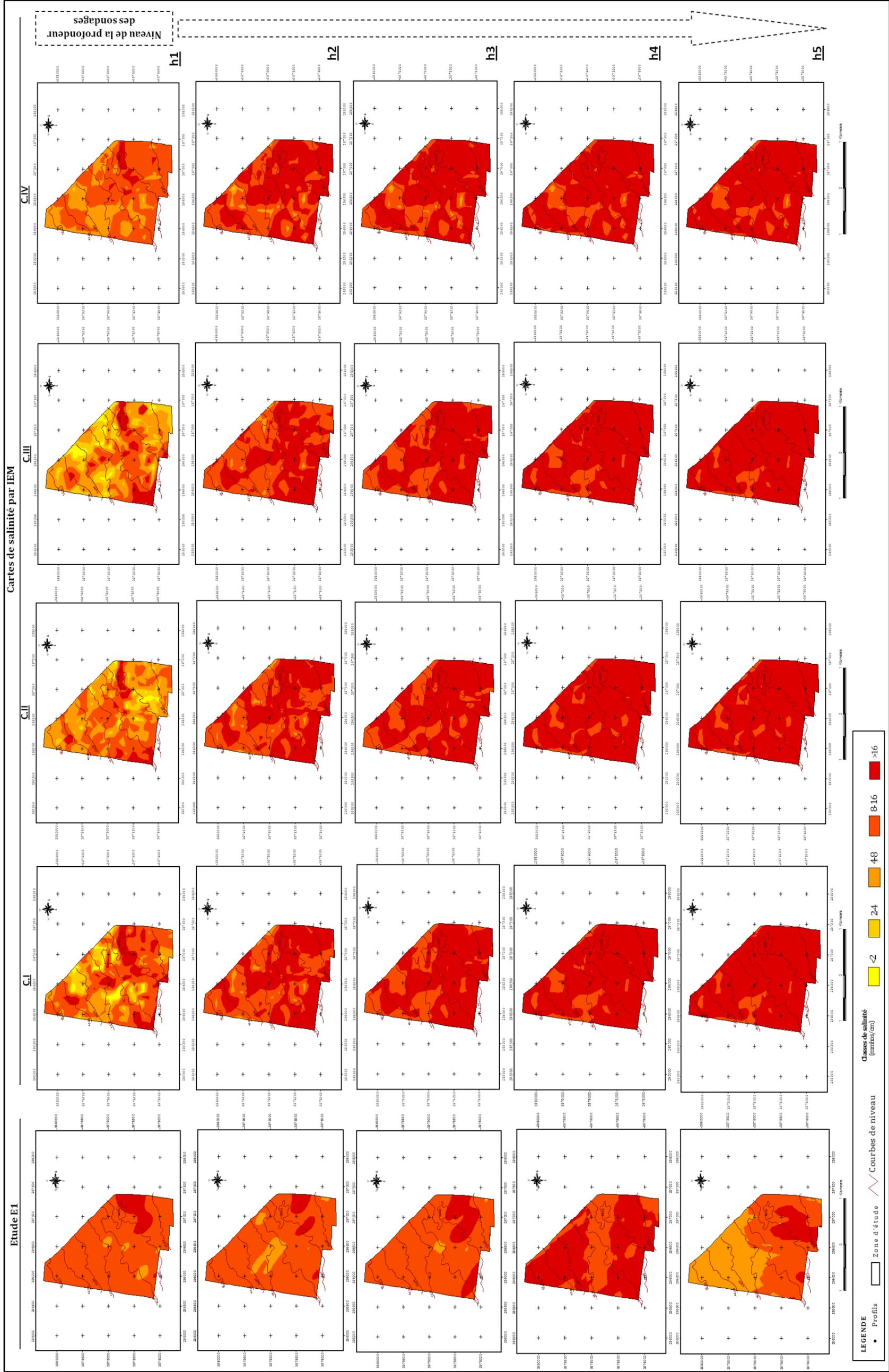


Figure 90. Spatialisation des niveaux de salinité pour une approche comparative entre les données de visualisation de "ECa"

Par comparaison à n'importe quelle période d'évaluation par IEM, il est utile de remarquer que les travaux d'aménagement et la mise en fonction du réseau durant *EI* avaient donné de bons résultats (Durand, 1956 ; Simonneau, 1956 ; Dubuis et Simonneau, 1956 ; 1957 ; 1959; Quezel et Simonneau, 1960). Ces différentes études font généralement référence à :

- L'effet rabattement et évacuation de la nappe: voir niveau de localisation bien identifié de la classe de salinité *très salée à hyper-salée* à plus de 1,20m.
- La réussite de la valorisation de certaines parties du périmètre (*Exp. Application pour le lessivage des sels*) en système de rizière.

Pour cela, et pour permettre une bonne entame de réhabilitation de ces sols, il y a lieu de revoir méthodiquement le schéma d'exploitation du réseau de drainage en place:

- Enlever et éradiquer le réseau de drains enfouis, installé en 2004, et ses composantes: *Exp. Les produits utilisés n'étaient pas adaptés à la nature argileuse des sols.*
- Réaménager (reprofilage) et valoriser le canal principal d'évacuation (exutoire) : *Exp. La création d'un second en parallèle, et plus profond, peut jouer le rôle de stabilisateur.*
- Réaménager et adapter le canal principal aux spécificités du milieu à l'amont du périmètre.
- Extirper le périmètre des réflexes d'usages et de pratiques agraires anciennes sur le temps long (voir Mietton, 2008) : Identification utilisée l'anthroposystèmes (dans notre cas système de rizière).
- Mettre en place une structuration des parcelles plus adaptée à la mécanisation (de plus grande surface) *ce qui aura pour conséquences une meilleure valorisation de l'espace, une réduction du temps de travail, une économie de gasoil et une moindre usure du matériel agricole.*
- Adapter le matériel agricole à la nature argileuse des sols et aux conditions d'aridité extrêmes.
- Adapter les techniques de travail du sol pour créer une pente artificielle (vers l'exutoire ou les exutoires).
- Dissocier entre le réseau de drainage du périmètre et le réseau d'évacuation des eaux usées des agglomérations avoisinantes.
- Redimensionner et réintégrer le périmètre dans un plus grand espace d'exploitation agricole et une autre dimension de mise en valeur.

Au terme de cette recherche sur les sols salés des plaines du Cheliff, nous concluons que les différents développements méthodologiques posés à une problématique ayant déjà fait l'objet de nombreuses études par le passé, vont indéniablement contribuer :

- A faire comprendre que la nature du sol est une donnée essentielle, sinon déterminante, dans la valorisation agricole du périmètre d'El Hamadna ou tout autre zone d'étude.
- A améliorer significativement la compréhension et la quantification du niveau de dégradation auquel font face les sols de ce périmètre.
- A mettre en évidence la complexité et la difficulté d'une quelconque opération d'aménagement et de réhabilitation des sols salés, tant sur le plan environnemental, institutionnel qu'humain.

A ce niveau, il est généralement fait référence à la nécessité d'avoir une bonne connaissance, au préalable :

- des processus naturels ou influencés par les pratiques des agriculteurs qui prédominent,
- des opérations de mise en place et de maintenance des réseaux de drainage réalisées et,
- des pratiques de l'irrigation appliquées ou à appliquer.

Néanmoins, la limitation principale de ce travail est certainement l'absence de correspondance géostatistique entre les niveaux de salinité associés aux conditions extrêmes du système complexe observés et les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe saline. La modélisation hydrodynamique de cette dernière serait un point de méthodologie très utile dans la cartographie des sols salés, ce qui pourraient permettre de confirmer et d'étayer les hypothèses formulées en amont de ce travail.

Par ailleurs, cette recherche ouvre aussi des perspectives en matière de recherches concernant la compréhension des méthodes de gestion du périmètre mais aussi pour des techniques de remédiation susceptibles d'assurer à long terme la sauvegarde du milieu et une bonne production agricole. Les principales perspectives se résument comme suit:

- Retour méthodologique sur les bases des techniques d'assainissement des périmètres à risque.
- Etude pour la création de zones de captage des eaux de drainage et autres.
- Etude sur la valorisation de la chaux vive (CaO), de la silice et de la pouzzolane en milieu salé.
- Etude sur l'utilisation de la phytodésalinisation et la bio-phytodésalinisation dans la récupération des sols salés.
- Etude sur la réutilisation des eaux collectées et des eaux salées après traitement.
- Etude sur les types d'organisation agricole pour l'exploitation et la gestion des périmètres irrigués.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

A

Abboua A., 2014. Apport de la télédétection radar dans la connaissance des états de surface des sols du périmètre de Hamadna (humidité, salinité et rugosité). Thèse de Magister, Université Hassiba Ben bouali-Chlef -Faculté des sciences. Département de Biologie, 104p.

Abdelkrim N., Hartani T., Visconti F., De Paz J. M. and Douaoui A.; 2021. Irrigation Recommendation for Water Saving and Salinity Control in Horticulture in the Semi-arid Lower Cheliff Plain (Algeria). [Asian Journal of Water, Environment and Pollution](#), vol. 18, no. 2, pp. 45-57, 2021.

Abdelhafid Y., 2010. Cartographie de la salinité des sols par induction électromagnétique. Cas de la zone et du périmètre irrigué de la Mina. Thèse de Magister en sciences agronomiques, ENSA d'El Harrach (Alger). Département de sciences du sol, 124p.

Abdu H., Robison D.A. and Jones S.B., 2007. Comparing bulk soil electrical conductivity determination using the dualem-1s and em38-dd electromagnetic induction instruments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*71: 189-196. <http://doi.org/10.2136/sssaj2005.0394>.

Achite M. et Meddi M., 2004. Estimation des crues en zone semi-aride : *cas du bassin versant de l'oued sly (chlef)*. Colloque International « TERRE et EAU » Annaba, 21, 22 & 23 Novembre 2004. In- Revue annuelle CRSTRA-ISSN 1112-3273, numéro spécial 2006, Journal Algérien des zones arides, pp : 22-30

Achour F., Bouzelboudjen M. and Pieyns S.A., 1998. Variabilité spatio-temporelle des ressources en eau en région semi-aride : application au bassin du Chélif, Algérie. *Water Resources Variability in Africa during the 20th Century* (Proceedings of the Abidjan'98 Conference held at Abidjan, Coted'Ivoire, November 1998). IAHS Publ. no. 252.1998, pp : 225-234.

Adamchuk V., 2018. Des nouveaux capteurs aux tracteurs intelligents. CRAAQ-Colloque agriculture numérique et robotique agricole. Université de McGill, Département de génie des bioressources. 14th international conference on precision agriculture (ISPA)., 25p. www.ispaorg/icpa.

Agence de Bassin Hydrographique Cheliff Zahrez. (ABH-CZ.), 2004. Atlas du Cheliff. Document d'étude sur les infrastructures hydrauliques dans le bassin hydrographique Cheliff Zahrez/Agence de Bassin Hydrographique Cheliff Zahrez_ Chlef, 41p. ill;30cm+ann[11]cartes+[04]fig.en annexe.

Aggarwal C., 2017. Outlier Detection in Graphs and Networks. In *Outlier analysis* 369- 397. Springer.

AGID., 2004. Etude de l'Aménagement Hydro-Agricole du Périmètre d'El Hamadna (Bas-Cheliff). Agence Nationale de Réalisation et de Gestion des infrastructures Hydrauliques pour l'Irrigation et le Drainage (Alger), Période 2001-2004, 02 rapp,ill;30cm+ann[02]plans+[01]carte en annexe

Agoumé V. and Birang AM., 2009. Impact of land-use systems on some physical and chemical soil properties of an oxisol in the humid forest zone of southern Cameroon. *Tropicultura*, 27(1), pp. 15-20.

Aimé S., 1991. Etude écologique de la transition entre les bioclimats sub-humide, semiaride et aride dans l'étage thermoméditerranéen du tell oranais (Algérie nord-occidentale). Thèse Doc. Etat: Université Aix- Marseille3. 190 p. + annexes.

Aissaoui A. et Messaoudi N., 2015. Caractéristique temporelle de régime pluviométrique de la plaine du Moyen Cheliff . Diplôme de Master en Sciences de la Nature et de la Vie, Université Djillali BOUNAAMA de Khemis Miliana, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre, 54p.

Ait Mechedad M., 2011. Caractérisation du statut potassique des sols du Bas-Cheliff. Mémoire d'ingénieur, Département de Sciences du sol, ENSA, El Harrach (Alger), 45p.

Ait Mechedad M., 2014. Evolution temporelle de la salinité des sols du Bas-Chélif. Thèse de Magister. Département de Sciences du sol, ENSA, EL Harrach (Alger), 79p. <http://hdl.handle.net/123456789/2208>.

Ait-Mechedal M., Ouamer-ali K., Daoud Y. and Djili K., 2017. Evaluation du statut potassique des sols salés du Bas-Cheliff . Revue « Nature & Technologie». C- Sciences de l'Environnement, n° 16/ Janvier 2017, pp : 08 à 13

Ait Mechedad M., 2021. Détermination de la teneur totale du sélénium dans les sols salés Bas-Cheliff. Thèse de Doctorat, Département de Sciences du sol, ENSA, EL Harrach (Alger), 85p.

Akbarzadeh A. and Taghizadeh-Mehrjardi R. 2010. Spatial distribution of some soil properties, using geostatistical methods in Khezrabad Region (Yazd) of Iran. *Pro Environment*, 3: 100-109. <https://scialert.net/eboardlivedna.php?issn=1816-4897&id=98.4507>.

Al-Busaidi A-S. and Cookson P., 2003. Salinity–pH Relationships in Calcareous Soils. *Agricultural and Marine Sciences*, 8(1): 41-46 (2003). Sultan Qaboos University : <https://www.researchgate.net/publication/252930253>.

Al Droubi A., 1976. Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. PhD Thesis, University of Strasbourg.

Al Droubi A., Fritz B., Gac J.-Y. and Tardy Y., 1980. Generalized residual alkalinity concept; application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. *American Journal of Science* 280, 560–572

Amezketta E., 2007. Soil salinity assessment using directed soil sampling from a geophysical survey with electromagnetic technology: a case study. *Spanish journal of agricultural research*, 5(1), pp 91-101.

Amichi H., 2009. Evolution des systèmes agraires collectifs : de la décollectivisation aux nouveaux arrangements. Cas du bas Cheliff, Algérie. *Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb* (Cirad, Montpellier, France, colloques cédérom). Actes du quatrième atelier régional du projet Sirma, Mostaganem, Algérie, 26-28 mai 2008. 12p.

Amichi H., 2013. Quand tenanciers et attributaires s'arrangent pour exploiter les terres publiques irriguées : du déni à l'émergence d'une configuration de tenure inversée. Cas de la commune d'Ouarizane dans le Bas-Chélif, Algérie. Thèse de Doctorat, Paris-Tech, Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (Agros paris tech), 426p.

Ammari T.G., Tahhan R., Abubaker S., Al-Zu'Bi Y., Tahboub A., Ta'Any S., Abu-Romman S., Al Manaseer N. and Stietiya H.M., 2013. Soil Salinity changes in the Jordan Valley potentiall Threaten sustainable irrigated agriculture. *Pedosphere* 23(3): 376-384.

Anderson R.V., 1936. Geology in the coastal Atlas of Western Algeria. *Mém.Géol.Soc.América.*, 450p. + 19pl., Copie Bibliothèque des Sciences de la Terre , Rue Claude Debussy.

Anderson-Cook C.M., Alley M., Roygard J., Khosla R., Noble R. and Doolittle J., 2002. Differentiating soil types using electromagnetic conductivity and crop yield maps. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 1562–1570.

Andersson A.J., Bates N.R. and Mackenzie F.T., 2007 Dissolution of carbonate sediments under rising pCO₂ and ocean acidification: observations from Devil's Hole, Bermuda. *Aquat. Geochem.* 13, 237–264.

Arétouyap Z., Njandjock Nouck P., Nouayou R., Ghomsy Kemgang F.E., Piépi Toko A.D. and Asfahani J., 2016. Lessening the adverse effect of the semivariogram model selection on an interpolative survey using kriging technique. *Arétouyap et al. SpringerPlus* (2016) 5:549. <http://doi.org/10.1186/s40064-016-2142-4>.

Arrouays D., Lagacherie Ph. and Hartemink A.E., 2017. Digital soil mapping across the globe. *Geoderma Regional* 9 (2017) 1–4. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.03.002>.

Arshad M.A., 2008. Soil Salinity and Salinization: Encyclopedia of soil science. Ed. Springer Dordrecht, Berlin, 860p.

Aşkin T., Kızılkaya R., Yılmaz R., Olekhov V., Mudrykh N. and Samofalova I., 2012. Soil exchangeable cations : A geostatistical study from Russia. *Eurasian Journal of Soil Science* 1 (2012) 34 – 39.

Aubert G., 1976. Les sols sodiques en Afrique du Nord. *Ann. I.N.A.*, Alger, 6 (1), pp. 185-195.

Auber G., 1960. Les sols de la zone aride. Etude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation. Document de distribution limitée, UNESCO/ NS/AZ/514. Colloque de Paris 11-18 Mai, communication n°5, 30p.

Aubert G., 1983. Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou Salsodique. XIIe Congrès de l'Association internationale de science du sol, New Delhi, février 1982. *Cah. O.R.X.T.O.LW., sér. Pédol., ml. XX, no 1, 1983: 73-78.*

Augusto L., Badeau V., Arrouays D., Trichet P., Flot J.L., Jolivet C. et Merzeau D., 2006. Caractérisation physico-chimique des sols à l'échelle d'une région naturelle à partir d'une compilation de données Exemple des sols du massif forestier landais. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 13, 1, 2006 – p.07 à 22.

B

Baccini A., 2010. Introduction générale à la statistique. Publications de l'Institut de Mathématiques de Toulouse — UMR CNRS 5219: <https://www.math.univ-toulouse.fr/~baccini/zpedago/asde>, 40p.

Badraoui M., Soudi B. et Farhat A., 1998. Variation de la qualité des sols : Une base pour évaluer la durabilité de la mise en valeur agricole sous irrigations par Pivot au Maroc. *Etude et Gestion des sols*, 5, 4, 1998, pp : 227-234.

Bagnouls F. et Gaussen H., 1953. Saison sèche et indice xérothermique ; Documents pour les cartes des productions de végétaux. Série génér., t.III, Toulouse, Fac. des sciences, 1953. 47p.

Balkovič J., Rampašková Z., Hutár V., Sobočká J. and Rskalský A., 2018. Digital soil mapping from conventional field soil observations. *Soil & Water Res.*, 8, 2013 (1): 13–25: <https://www.researchgate.net/publication/323115857>.

Barbiero L., Vallès V. et Régeard A., 1995. Précipitation de la fluorine et Contrôle géochimique du calcium dans des sols alcalins du Niger : conséquences pour une estimation quantitative de l'évolution géochimique des sols. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série IIa, Sciences de la terre et des planètes*, Elsevier, 12p.

Barbiéro L., Vallès V., Regeard A. and Cheverry C., 2001. Residual alkalinity as a tracer to estimate the changes induced by forage cultivation in a non-saline irrigated sodic soil. *Agricultural water management* 50, 229-241.

Barzanji A.F., 1973. Gypsiferous soils of Iraq. Ph. D. Thesis. Univ. Gent, 199p.

Beghin C., 2019. Étude de l'effet de la salinité du sol sur la valeur nutritionnelle des feuilles d'*Amaranthus cruentus*. Université Catholique de Louvain, Faculté des Bioingénieurs, Agro-louvain, Thèse master, 121p. WWW.UClouvain.be/AGRO.

Belhadji A., Belkebir L., Saint Martin J.-P., Mansour B., Bessedik M. and Conesa G. 2008. Apports des foraminifères planctoniques à la biostratigraphie du Miocène supérieur et du Pliocène de Djebel Diss (bassin du Chélif, Algérie). *Geodiversitas* 30 (1) pp: 79-96.

Benchetrit M., 1956. Les sols d'Algérie. In: *Revue de géographie alpine*, tome 44, n°4, 1956. pp. 749-761. <https://doi.org/10.3406/rga.1956.1790>.

Ben Hassine H., 2004. Effets de la nappe phréatique sur la salinisation des sols de cinq périmètres irrigués en Tunisie. *Étude et Gestion des Sols*, Volume 12, 4, 2005 – pages 281 à 300

- Berkal I., 2006.** Contribution à la connaissance des sols du Sahara d'Algérie de la base de données à la valorisation des périmètres pédologiques. Thèse Mag. Science du sol, I.N.A. , El-Harrach, 171p.
- Bergeron O., 2016.** Guide d'utilisation-*Grilles climatiques quotidiennes du Programme de surveillance du climat du Québec, version 1.2*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN (PDF), 33 p
- Bernier S., Duthoit S., Ladet S. et Baudet D., 2014.** Les concepts de base des Systèmes d'Information Géographique (SIG) : les données et les fonctions générales. (2014) Cahier des Techniques de l'INRA (N° Spécial). pp. 19-27. ISSN 0762-7339. <http://www.rodinra.inra.fr/record/279678>.
- Bertrand R., Keïta B. et N'Diaye M.K., 1993.** La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées Sub-Sahariennes (Cas de l'office du Niger au Mali). Cahiers d'Agricultures 1193, 2, pp : 318-329.
- Bessaoud O., Pellissier J.-P., Rolland J.-P. and Khechimi W., 2019** Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie. [Rapport de recherche] CIHEAM-IAMM., pp.82. fihal-02137632
- Betier et Divers, 1941.** Feuille Oran-Nord de la carte géologique au 1/1/500.000 de l'Algérie (2^{ème} Ed.). Publ.Serv.Carte géol.d'Algérie.
- Bettahar N., Benamara A., Kettab A. et Douaoui A., 2009.** Risque de pollution nitrée des zones semi-arides : cas de la vallée du moyen Cheliff occidental (Nord Algérien). *Revue des sciences de l'eau*, 22(1), 69–78. <http://doi.org/10.7202/019824ar>.
- Bhunias G. S., Shitb P. K. and Chattopadhyay R., 2018.** Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical approach of lateritic soil (West Bengal, India). *Annals of Agrarian Science* 16 (2018), pp: 436–443. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2018.06.003>.
- Bilgili A.V., 2013.** Spatial assessment of soil salinity in the Harran Plain using multiple kriging techniques. *Environ Monit Assess.* 2013 Jan;185(1):777-95 : doi: 10.1007/s10661-012-2591-3. Epub2012Mar15.https://www.researchgate.net/publication/221893764.Spatial_assessment_of_soil_salinity_in_the_Harran_Plain_using_multiple_kriging_techniques.
- Bjørn Møller A., Kogant T., Beucher A., Iversen Bo V. and Greve M. H., 2021.** Downscaling digital soil maps using electromagnetic induction and aerial imagery. *Geoderma* 385, 114852 : <https://www.researchgate.net/publication/339747055>.
- BNEDER, 2009.** Plan national de développement forestier (PNDF). Bureau National d'Étude pour le Développement Rural (BNEDER)- Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. Rapport de synthèse national: 87P.
- Bockheim J. G. and Hartemink A. E. , 2013.** Salic Horizons in Soils of the USA. *Pedosphere*, ISSN 1002-0160/CN 32-1315/P, 23(5): 600–608.
- Bocum M., 2004.** Méthodes d'analyses des sols. Document de travail. Institut National de Pédologie, Dakar-Sénégal. 55p.
- Boettinger J.L., Howell D.W., Moore A.C., Hartemink A.E. and Kienast-Brown S., 2010.** Digital Soil Mapping. Bridging Research, Environmental Application, and Operation. ISBN 978-90-481-862-8 .e-ISBN 978-90-481-8863-5, London New York, 439p. Springer Dordrecht Heidelberg. <http://doi.org/10.1007/978-90-481-8863-5>.
- Bottner P., 1982.** Evolutions des sols et conditions bioclimatiques méditerranéennes. Définition et localisation des écosystèmes méditerranéens terrestres / Definition and localization of terrestrial Mediterranean biota. Saint-Maximin (France) 16-20/11/81. pp. 115-134. <http://doi.org/10.3406/ecmed.1982.1938>.
- Boualla N., Benziane A. and Derrich Z., 2012.** Origine de la salinisation des sols de la plaine de M'léta (bordure sud du bassin sebkha Oran). *Journal of Applied Biosciences*, vol. 53, pp 3787-3796.

- Boualla N., 2018.** Interaction eau - sol en milieu salin (cas du bassin de la Grande Sebkha d'Oran). Thèse de Doctorat, Université de Mohamed Boudiaf d'Oran, Faculté d'Architecture et de Génie Civil. Département de Génie Civil, 133p.+ 17p.annexes.
- Bouchenouk I., 2013.** Processus d'enrichissement en nitrates des eaux souterraines en zones semi-arides, cas de la plaine de Boukadir (Nord-Ouest Algérien). Thèse de Magister en Géologie, Université d'Oran, Faculté des sciences de la terre, de Géographie et d'Aménagement du territoire, 94p.
- Boudries A. et Mezghache H., 2019.** Géostatistique et répartition spatiale des différents types de marbre dans le gisement de Filfila – Skikda – Algérie Nord Orientale. African Journal Online (AJOL). Vol. 25 No. 1 (2019). <http://www.ajol.info/index.php/srst/article/view/186909>.
- Boukli F. H, Kasbadji N M. et Loukarfi L., 2007.** Atlas Eolien de la Vallée du Cheliff. ICRE'07, Bejaia, Algérie, Novembre 2007.
- Boukli F.H., Kasbadji N.M., Tahar Abba M., Loukarfi L. et Abdelbaki C., 2010.** Méthode de développement du relief numérique pour l'étude des potentialités éoliennes de la zone de Ténès Chlef – Algérie. Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza (2010), pp : 81 – 86
- Boulaine J-L-G., 1956.** Cartes des sols des plaines du Chéiff au 1/50.000ème, feuilles 1 à 5. Inspection générale de l'Agriculture du Gouvernement Général de l'Algérie.
- Boulaine J-L-G., 1957.** Etudes des sols des plaines du Chéiff. Thèse d'état de l'Université d'Alger, 582p.
- Boulaine J-L-G., 1961.** Sur le rôle de la végétation dans la formation des carbonates calcaires méditerranéens. C.R. Acad, Sci, Paris, t. 253, n° 22, pp. 2568-2570.
- Boulaine J-L-G., 1979.** Acmé et Climax. Pedosystème et Écosystème. Essai de définition. C.R. Ac. d'Agriculture de France, 25 avril 1979, Paris.
- Bour I., 2013. Les évaporites : Environnement et cristallisation de la Halite.** Exemple de salins-les-Bains (Jura). Document Laboratoire Biogéosciences-Université de Bourgogne.<https://ivanbour.files.wordpress.com/2013/07/les-evaporites-2.pdf>.
- Bourennane H. and King D., 2003.** Using multiple external drifts to estimate a soil variable. Geoderma 114(1-2) : 1-18.
- Bourgault G., Journel .A. G., Rhoades J. D., Corwin D. L. and Lesch S. M., 1997.** Geostatistical analysis of a soil Salinity data set. Advances in Agronomy, Volume 58, pp : 241-292.. Copyright 6 1997 by Academic Press, Inc. All rights of reproduction in any form reserved.
- Bourguine B., 1996.** Potentiel d'application de la géostatistique en géo-ingénierie (France). Rap. BRGM R39049, 70p. 26 Fig, 1ann.
- Bourrié G., 2018.** Les sols au cœur de la zone critique 4: Qualité de l'eau (Vol. 4). Collection Système Terre –Environnement. Série Les sols. ISTE Group., ISBN 978-1-78405-441-0, 207 pages.
- Boussoussa Y., 2012.** Evaluation du statut potassique des sols salés du Bas-Cheliff. Thèse de Magister. Département de Sciences du Sol, ENSA, 66p. <http://hdl.handle.net/123456789/2204>.
- Bouteyer G. et Loyer J. Y., 1992.** Sols salés, eaux saumâtres, des régions arides tropicales et méditerranéennes : " Principaux faciès, conséquences pour l'agriculture ". In L'aridité : Une contrainte au développement. ORSTOM. Edition, ouvrage collectif, pp : 68-78.
- Bouzada N., 2013.** Caractérisation géochimiques des eaux souterraines utilisées dans l'irrigation dans les plaines du Chéiff. Thèse de Magister, Université de Hassiba Ben Bouali, Institut des Sciences Agronomiques, 91p.
- Bradaï A., Douaoui A. et Marlet S., 2008.** Qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols dans la plaine du Bas-Cheliff, Algérie. In *Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb*, 7p, Document Cirad.

- Bradai Abd., Douaoui A. and Hartani T., 2012.** Some problems of Irrigation Water Management in Lower Cheliff Plain (Algeria), *Journal of Environmental Science and Engineering A*, pp: 271 -278
- Bradaï Abd. et 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. *Revue « Nature & Technologie »*. C- Sciences de l'Environnement, n° 08/Janvier 2013. Pages 27 à 32
- Bradai Abd., 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 Chélif. Thèse de Doctorat Es- sciences, UHBC, Faculté de Génie Civil et d'Architecture –Département d'Hydraulique, 114p.
- Braun-Blanquet J., Roussine N. et Nègre R., 1952.** Les groupements végétaux de la France méditerranéenne. CNRS, Paris, 297 p.
- Bresler E., McNeal B.L. and Carter D.L., 1982.** Saline and sodic soils: principles-dynamics-modeling. *Advanced Series in Agricultural Sciences 10*. Springer-Verlag, Berlin.
- Brisson G. et Magné J., 1955.** Extension du miocène supérieur du N. du Bassin du Chélif (Algérie occidentale). *C.R. Somm.Soc.géol. Fr.*, 143p.
- Brives A., 1897.** Les Terrains Miocènes du Bassin du Chélif et du Dahra. Matériaux de la carte géologique de l'Algérie. 2ème SÉRIE Stratigraphique – Description Régionales. Thèse de Doctorat Es-sciences, Université de Paris, Laboratoire de Géologie, 101p.
- Bruand A. et Coquet Y., 2005.** Les sols et le cycle de l'eau. *Science du Sol et Environnement*, Dunod, pp.345-363,
- Brunhes J., 1902.** L'irrigation, ses conditions géographiques, ses modes et son organisation dans la péninsule Ibérique et dans l'Afrique du Nord. Ed. Paris.
- Bruning B., Cleveland K., Ramirez N., Huizer T., Streef A. and de Vos A., 2021.** Quick Scan Salinity in the Metropolitan and Valparaiso, Region, Chile, Challenges and opportunities. *The Salt Doctors*, 50p. <https://www.agroberichtenbuitenland.nl>.
- Bui E. N., Loughhead A. and Corner R., 1999.** Extracting soil-landscape rules from previous soil surveys. *Australian Journal of Soil Research* 37: 495–508.
- Burrough P.A. and McDonnell R.A., 1998.** Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, Oxford, 333 pp.
- Busselen T., 2018.** Cartographie de la conductivité électrique de la zone racinaire du sol par géoradar aéroporté opérant à basses fréquences. Thèse d'Ingénieur, Université Catholique de Louvain, Faculté des Bio-ingénieurs, 94p.
- Butler J. N. 1998.** Ionic Equilibrium: Solubility and pH Calculations. Wiley-Interscience. Chap. 3.

C

- Caire A., Glangeaud L. et Mattauer M., 1951.** L'évolution structurale de la région de Miliana (Algérie) et le style amygdalaire des chaînes liminaires. Document Bibliothèque des Sciences de la Terre, Rue Claude Debussy.
- Calembert L. (BI.4), 1937.** Contribution à l'étude géologique du Massif culminant de l'Ouarsenis (Algérie). *C.R.Ac. Sc.*, Paris, t.205, 147p.
- Calembert C., 1952.** Etude géologique du massif culminant de l'Ouarsenis. *Bull.Serv.Cart.Géol. Algérie*, 2^{ème} série, n°23
- Cambardella C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F. and Konopka, A. E., 1994.** Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1501– 1511
- Cambardella C. A. and Karlen D. K., 1999.** Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agric.* 1, 5-14.

- Campbell J. B.**, 1978. Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineations of two soil mapping units. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42 : 460-464.
- Capolini J., Pisyns S. et Ramana R.**, 1969. Etude des caractères physiographiques et prévision des apports annuels, des crues et des transports solides dans les bassins du *Riou - Sly - Fodda Deurdeur - Zeddine - Ebdia*. Trav. Sect. Pédologie et agrologie. Etude SES, n°13-12 / DH2
- Carpentier B., Gely J., Huc A. et Blanc-Valleron M.-M.**, 1992. Simulation de la sédimentation dans un bassin évaporitique à niveau d'eau sous influence eustatique. Application au bassin paléogène de Mulhouse (Alsace, France). In *Oil & Gas Science and Technology*-revue de l'Institut Français du Pétrole - OIL GAS SCI TECHNOL. <http://doi.org/10.2516/ogst.1992040>.
- Carré F. and Boettinger J.L.**, 2008. Chapter 35 : Synthesis and Priorities for FutureWork, pp : 399-436. In Ahrens, R. J. (2008). *Digital soil mapping with limited data*. Springer Science & Business Media,
- Carré F. and Jacobson M.**, 2009. Numerical classification of soil profile data using distance metrics. *Geoderma* 148 (2009) 336–345
- Cetin M., Ibriki H., Kirda C., Kaman H., Karnez E., Ryan J., Topcu S., Eren Oztekin M., Dingil M. and Sesveren S.**, 2012. Using an electromagnetic sensor combined with geographic information systems to monitor soil salinity in an area of southern Turkey irrigated with drainage water. *Fresenius Environmental Bulletin* 21, 1133–1145.
- Chaboureau A.-C.**, 2012. Impact du climat et de la tectonique sur la dynamique des systèmes sédimentaires pendant l'ouverture de l'Atlantique Sud. Stratigraphie. Thèse de Doctorat /Université de Rennes 1/Université Européenne de Bretagne, 269p. Français (<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00830475/document>).
- Chang C., Sommerfeld D.T. and Entz T.**, 1988. Soil salinity and Sand content variability determined by two statistical methods in an irrigated saline soil. *Can. J. Soil. Sci.*, 68, pp: 209-221
- Chedded M.A.**, 2015. Analyse de l'impact des investissements agricoles réalisés dans le cadre du Plan National de Développement Agricole (PNDA) sur l'évolution des techniques de productions laitières, céréalières et oléicoles en Algérie : étude de cas dans la wilaya de Tizi-Ouzou. Thèse de Doctorat Es-sciences, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, 153p.
- Chen Z. T. and Guevara J. A.** 1987. Systematic selection of very important points (VIP) from digital terrain model for constructing triangular irregular networks. In *Auto-carto*. Vol. 8, pp. 50-56.
- Chen Q. M., Wang X. Y., Liu M. X., Chu F. F. and Shi J. H.** 2012. Water and salt transport in soil under salt water drip irrigation. *J. NE. Forest. Univ.* (in Chinese), 40: 92- 95.
- Cherlet M., Hutchinson C., Reynolds J., Hill J., Sommer S., von Maltitz G.**, 2018. World Atlas of Desertification. Publication Office of the European Union, Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/9205>.
- Cheverry 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. Thèse Doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg, 175 p.
- Cheverry C. et Bourrie G.**, 1998. La salinisation des sols. Dans : *Sol, interface fragile*, STENGEL P. et GELIN I. [Éditeurs], INRA Edition, 109-123.
- Cheverry C. et Robert M.** 1998. La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau : Une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la méditerranée. *Etude et Gestion des Sols* 5(4), 217-226.
- Cheyland G., Magne J. et Mattauer M.**, 1955. Observation nouvelles sur le « Flysch » au pied du grand pic de l'Ouarsenis (Algérie). *C.R.Ac.Sc.*, paris, t421, pp : 1961-1963.
- Chhipa V.**, 2018 Comparison of deterministic and stochastic interpolation methods by assessing spatial variability in soil properties in a hilly terrain. Thesis submitted to the Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente in partial fulfilment of the requirements for

the degree of Master of Science in Geo-Information Science and Earth Observation. Specialization: Geoinformatics. 49p.

Chien Y.J., Lee D.Y, Guo H.Y. and Houg K.H., 1997. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. *Soil Sci.* 162, 291– 298.

Chouchane A., 2018. Une nouvelle approche de détection des anomalies dans les réseaux multidimensionnels. Université du Québec à Montréal. Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en informatique, 73p.

Cissé B., 2012. « Les eaux de drainage des périmètres irrigués du delta du fleuve Sénégal : systèmes d'évacuation et qualité des eaux ». *Physio-Géo* [En ligne], Volume 6 | 2012, mis en ligne le 04 septembre 2012. URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/2614>. doi : <https://doi.org/10.4000/physio-geo.2614>.

Climate-Data.org., 2019. Based on data from the OpenStreetMap project. An open data, licensed under the Open Data Commons Open Database License (ODbL). <http://fr.climate-data.org/info/sources/>.

Corwin D.L. and Lesch S.M., 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles and guidelines. *Agronomy Journal* 95, pp 455-471.

Corwin D. L. and Lesch S. M., 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1–3 Spec Iss.), 11–43.

Corwin D. L. and Lesch, S. M., 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: Part II. Case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1–3 Spec. Iss.), 135–152.

Corwin D. L., Lesch S. M., Oster J. D. and Kaffka S. R., 2006. Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma*, 131(3–4), 369–387.

Corwin D.L., 2008. Past, present, and future trends in soil electrical conductivity measurements using geophysical methods. In: Allred BJ, Daniels JJ, Ehsani MR, editors. *Handbook of Agricultural Geophysics*. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida; 2008. pp. 17–44.

Corwin D. and Scudiero E., 2019 "Review of soil salinity assessment for agriculture across multiple scales using proximal and/or remote sensors" (2019). Publications from USDA-ARS/UNL Faculty. 2148. <http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/2148>.

Coussine C., 2012. Procédés de fabrication des eaux-mères et des sels à valeur ajoutée : application aux eaux minérales naturelles chlorurées sodiques fortes Modélisation thermodynamique et étude expérimentale. Thèse de Doctorat, Université de Pau et des pays de l'adour, EDSEA, 219p.

CPCS, 1967. Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols : Travaux CPCS 1963-1967. Classification des sols. Institut national de la recherche agronomique (INRA), Paris: *Laboratoire de Géologie-Pédologie de l'ENSA*, 100 p. Numérisé par l'Association Française pour l'Etude du Sol (www.afes.fr - 2011) pour mise à disposition de la communauté (avec corrections de Denis Baize).

Croft H., Anderson K., Brazier R.E. and Kuhn N. J., 2013. Modeling fine-scale soil surface structure using geostatistics. *Water Resources Research*, Vol.49, pp :1858–1870. <http://doi.org/10.1002/wrcr.20172>.

Cross J.N., Mathis, J.T., Bates, R.N. and Byrne H.R. 2013 Conservative and non-conservative variations of total alkalinity on the southeastern Bering Sea shelf. *Marine Chemistry* 154, 100–112. <http://doi.org/10.1016/j.marchem.2013.05.012>.

Curt C., Royet P., Wittner C., Cherqui F., Ahmadi M., Tacnet J. M. et Legat, Y., 2016. Collecter, formaliser, qualifier et stocker les données pour gérer les patrimoines. *Sciences Eaux & Territoires*, (20), 80-85.

- Dabin B., 1968.** Problème de la fixation du sodium sur le complexe adsorbant des sols. ORSTOM., Réunion annuelle des pédologues. S.S.C., Bondy, 26p.
- Dabin B., 1985.** Les sols tropicaux acides. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* vol. XXI (1), pp. 7-19.
- Dalalyan A., 2011.** Statistique Numérique et Analyse des Données. Ed. Ecoles des Ponts, ParisTech., 87p.
- Dalloni M. (Bl. 51), 1935.** Etude géologique du Massif de l'Ouarsenis. Bull. Soc.Géol.Algérie. Document Bibliothèque des Sciences de la Terre, Rue Claude Debussy.
- Dalloni M., 1939.** Géologie appliquée de l'Algérie. Métallogénie, Hydrogéologie et agrogéologie. Masson éd., Paris, + Notice explicative carte géologique 1/500.000ème : Alger Nord et Alger Sud. Service Carte Géologique. Alger.
- Dalloni M., 1940.** Note sur la classification de Pliocène supérieur et du Quaternaire de l'Algérie. Bull. Soc. Géogr. Archéol. Alger.
- Dalloni M., 1952.** Carte Géologique détaillée de la région de Fortassa « Zemmoura ». au 1/50.000ème. Service Carte Géologique. Alger.
- Dalloni M., 1955.** La Géologie de la région d'Orléansville et les séismes récents. Service Carte Géologique Algérie, nouvelle série, Bull., n°5, Travaux des Collab., 1954, pp : 419-475, Alger, 1955.
- Daniil M., Tsioukas V., Papadopoulos K. and Livieratos E., 2003.** Scanning options and choices in digitizing historic maps. WG 4 - Digital Image Processing, 5p.<https://www.researchgate.net/publication/233426155>.
- Daoud Y., 1993.** Contribution à l'étude de la dynamique des sels dans un sol irrigué du périmètre de Haut Cheliff (Algérie). Thèse doc. ING., RENNE, 194p
- Daoud Y., Cheverry C. et Robert M., 1993.** Rôle physico-chimique du magnésium dans les sols sales des plaines du Cheliff (Algérie). *Sci. Sol.* Vol – 31, n 4, pp. 151 – 160. pp. 151 – 160.
- Daumas P., Quezel P. et Santa S., 1952.** Contribution à l'étude des groupements végétaux rupicoles-d'Oranie. *Bull. Soc. Hist. nat. Afr. du N.*, **43**, pp. 186–202.
- Delbari M., Afrasiab P. and Loiskandl W., 2011.** Geostatistical Analysis of Soil Texture Fractionson the Field Scale. *Soil & Water Res.*, **6**, 2011 (4): 173–189.
- Delhoum J-P., 1997.** Fonctionnement hydro-pédologique d'une toposéquence de sols en milieu aride. Réserve de la biosphère de Mapimi, Nord-Mexique. Thèse de Doctorat, ORSTOM éditions, Paris, TDM n° 164, 310p.
- Delmotte C., 1966.** Contribution à l'étude Micropaléontologique et stratigraphique du Miocène du Bassin du Chélif. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Paris, SN REPAL, 211p.
- Derder M.E.M., Henry B., Amenna M., Bayou B., Maouche S., Besse J., Abtout A., Boukerbout H., Bessedik M., Bourouis S. and Ayache M., 2011.** Tectonic Evolution of the Active "Chelif" Basin (Northern Algeria) from Paleomagnetic and Magnetic Fabric Investigations, *New Frontiers in Tectonic Research - At the Midst of Plate Convergence*, Dr. Uri Schattner (Ed.), ISBN: 978-953-307-594-5, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/new-frontiers-in-tectonic-research-at-the-midst-of-plateconvergence/tectonic-evolution-of-the-active-chelif-basin-northern-algeria-from-paleomagnetic-and-magneticfabri>.
- Despaigne W., 2006.** Méthodes géostatistique pour l'interpolation et la modélisation en 2D/3D des données spatiales. Thèse Master 2, Université de Bretagne Sud Institut Universitaire Professionnalisé Informatique et Statistique, Rue Yves Mainguy 56000 Vannes, 68p.
- Despois J. et Raynal R., 1975.** Géographie de l'Afrique du nord-ouest. Ed Bussière, Saint-Amand, France, 570p.
- Diggle P. J., Menezes R. and Su T-li., 2010.** Geostatistical inference under preferential sampling. *Appl. Statist.* (2010) **59**, Part 2, pp. 191–232.

- Diouf O., 2020.** Les « territoires sales » de l'eau du delta du Sénégal : Cartographie et pratiques de gestion de la salinité dans le *Gorom-lampsar*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans- Ecole Doctorale, Sciences de la société : Territoires, Economie, Droit (SSTED), Centre d'Etudes pour le Développement des Territoires et L'Environnement (CEDETE), 219p + 75p. Annexes, Référé., LF et Autres.
- Djamai R., Daoud Y., Ouardi J., Valles V., Fadel D., Laïfa A. and Benslama M., 2006.** Alkalinity and contribution of the geochemistry. Case of the soils of the lake fetzara (Algerian North-East). *Phys. Chem. News* 32 (2006) 137-143.
- Djamai R., 2007.** Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du système endoréique du Lac Fetzara (Nord-Est Algérien). Approche géochimique et évolution spatio-temporelles des phénomènes. Thèse de Doctorat en Es-sciences, ENSA. Département de Sciences du sol, 132p. + 45p. annexes.
- Djili K., 2000.** Contribution à la connaissance des sols du Nord d'Algérie. Création d'une banque de données informatisées et utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et la valorisation des données pédologiques. Thèse d'état en sciences agronomiques. INA, El- Harrach, 227p.
- Dobos E., Carré F., Hengl T., Reuter H.I. and Tóth G., 2006.** Digital Soil Mapping as a support to production of functional maps. EUR 22123 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg. 68 pp.
- Donahoo M., Ouamer-ali K., Daoud Y., Djili K. and Harvey O.R., 2019.** Depth-Specific Modeling of Landscape-Scale Soil Dynamics Using Bulk Electrical Conductivity Measurements. *Goldschmidt Barcelona Abstracts*, GSEAG, 2019 833. <https://goldschmidtabstracts.info/abstracts/abstractView?id=2019005261>.
- Donahoo M., Ouamer-ali K., Daoud Y., Djili K. and Harvey O.R., 2020.** "Depth-specific geophysical modelling for understanding geochemical dynamics in soils". Abstract Séminaire : South-Central Section - 54th Annual Meeting – 2020 ,Texas, Fort Worth, Etat-Unis. Thematique Geological Sciences, TX 76129, Categories: Soils Environmental Geoscience'. Primary Selection: T24.
- Doolittle J. A. and Brevik E. C., 2014.** The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*, 223–225(1), 33–45.
- Dosso M., 1980.** Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation. Aménagement de la Basse vallée de l'Euphrate en Syrie. Thèse de Docteur-Ingénieur, Science des sols. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1980, 167p. + 5p. tabl. Fig.
- Douaïk A., 2005.** Evaluation of the space-time variability of soil salinity by statistical, geostatistical and Bayesian maximum entropy methods. PhD thesis, Ghent University, Ghent, Belgium.
- Douaïk A., Meirvenne M.V. and Toth T. 2007.** Statistical methods for evaluating soil salinity spatial and temporal variability *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 1629-1635.
- Douaïk A., Van Meirvenne M. and Toth T., 2011.** Statistical Methods for the Analysis of Soil Spatial and Temporal Variability. In book: Principles, Application and Assessment in Soil Science, pp : 279-308. <https://www.researchgate.net/publication/221921476>. [Statistical Methods for the Analysis of Soil Spatial and Temporal Variability](#).
- Douaoui A., Walter Ch., Gaouar A. and Hammoudi S., 2001.** Assessment of the topsoil structural degradation of the Lower Cheliff Valley (Algeria) -Application of multivariate Analysis. 4th conference of the Working Group on Pedometrics (WG-PM), Ghent, pp. 19-21 September.
- Douaoui A. et Walter Ch., 2002.** Dégradation de la qualité des sols de la plaine du Bas Chélif, Salinité-Sodicité-Stabilité Structurale. Forum sur la qualité des sols, Ministère de l'Environnement, Paris, 15 et 16 mai.
- Douaoui A., Gascuel-Odoux C. and Walter Ch., 2004** : Infiltrabilité et érodibilité de sols salinisés de la plaine du Bas Chélif (Algérie). Mesures au laboratoire sous simulation de pluie. Etude et Gestion des Sols, Volume 11, N°4, pp : 379-39.

- Douaoui A., 2005.** Variabilité Spatiale de la salinité et sa relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chélif. Apport de la géostatistique et de La télédétection, Thèse Doctorat d'état, INA d'Alger, 234p.
- Douaoui A., Hartani T. et Lakehal M., 2006a.** La salinisation dans la plaine du Bas-Cheliff : acquis et perspectives. Economies d'eau en Systèmes IRrigués au Maghreb. Deuxième atelier régional du projet Sirma, 2006, Marrakech, Maroc. ffcirad-00271021f
- Douaoui A., Hervé, N. and Walter Ch., 2006b,** Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data. GEODERMA, 134, 1-2 : 217-230, 2006.
- Douaoui A. et Hartani. T., 2007.** Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Actes de l'atelier régional SIRMA. Tunis, Juin 2007.
- do Rosário C.E.A., 2015.** Estimation de l'infiltration efficace dans la plaine alluviale du Bas Chélif par analyse multicritères (entre Cheliff -Relizane). Thèse de Master, Université Djilali Bounaama de Khemis-Miliana, Faculté des sciences de la vie et des sciences de la terre et l'univers-Département des sciences de la terre, 64p.
- Drever J.I., 1997.** The Geochemistry of Natural Water: Surface and Groundwater Environments. 3rd Edition, Prentice Hall, New Jersey.
- Droubi A., Fritz B., Gac J.Y. and Tardy Y., 1980.** Prediction of the chemical evolution of natural waters wring evaporation. Doc. Orstom, 10p.
- Dubreuil P., 1969.** *Rapport de la mission française d'étude du Wabi Shebelli (Ethiopie) de janvier 1969.* Paris : ORSTOM, 14 p. multigr.
- Dubuis A. et Simonneau P. ,1956.** La végétation des rizières en ORANIE – Publication du S.C.H.
- Dubuis A. et Simonneau P., 1957.** Les Unités phytosociologiques des terrains sales de l'Ouest Algérien. Trav. Sect. Pédologie et agrologie. SES. D.H.E.R., 3, p.23
- Dubuis A. et Simonneau P., 1959.** Catalogue des végétaux observés sur la station d'étude des sols salins des Hamadéna. Trav. Sect. Pédologie et agrologie. SES. D.H.E.R., 5, 22p.
- Duchaufour P., 1995.** Référentiel pédologique. Techniques et pratiques. INRA Ed. , ISSN: 1150-3912, 335p.
- Duchaufour P., 1988.** Abrégé de pédologie. 2^{ème} éd. Masson, Paris, 224p.
- Durand J.H., 1954.** Les sols d'Algérie. Service des études scientifiques. Pédologie, N°2. Nouvelle édition, 140p.
- Durand J-H., 1956.** Les sols de la station d'étude des sols salins des Hamadéna. Quelques aspects de la station d'étude des sols salins des Hamadéna et de ses activités. Trav. Sect. Pédologie et agrologie. Service des études scientifiques appliquées à l'hydraulique. Extrait du n°28 de la revue terres et eaux 2^o et 3^e trimestres 1956, 31p
- Durand J-H., 1959.** Les sols d'Algérie. Extrait du Bulletin Technique d'Information des Ingénieurs des Services Agricoles N° 142 Juillet - Août 1959, Section de pédologie-Hydraulique et Equipement Rural, 10p.
- Durand J-H., 1961.** Contribution à l'étude des Sols irrigués. Le besoin en eau des plantes, aspect pédologique. Trav. Sect. Pédologie et agrologie. SES. D.H.E.R., 7, p.22.

E

- Eaton F., 1950.** Significance of carbonates in irrigation waters, Soil Sci.,69, pp : 123-133.
- Ecker M.D., 2003.** Environmetrics - Geostatistics: *Past, Present and Future.* Encyclopedia of Life Support Systems(EOLSS), 13p.
- Ek C- M.,1973.** La dissolution du carbonate de calcium Essai de mise au point. Bulletin de la Société géographique de Liège, N° 9, 9^o année, décembre 1973, pp. 55-87.

- Emberck M. et Joly B., 2008.** Numérisation d'études pédologiques à moyennes échelles : méthodologie et estimation des coûts. *Etude et Gestion des Sols*. Volume15, numéro 1. pp. 51-68.
- ELD Initiative et UNEP, 2015.** L'économie de la dégradation des terres en Afrique: les bénéfices de l'action l'emportent sur ses frais; disponible sur www.eld-initiative.org.
- El-Meddahi Y., 2009.** Contribution à l'étude hydrogéologique des réservoirs aquifères du bassin du Moyen Chelif. Thèse de Magister, UHBC, Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur-Département d'Hydraulique, 137p.
- Emadi M., Baghernejad M., Emadi M. and Maftoun M., 2008,** Assessment of some soil properties by spatial variability in saline and sodic soils in Arsanjan plain, southern Iran. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11 (2), 238-243
- Emerit M., 1957.** La colonisation des plaines du Chélif. In: *Annales. Economies, sociétés, civilisations*. 12^e année, N.3, pp : 486-491. <https://doi.org/10.3406/ahess.1957.2666>.
- Escudier J.-L., Gillery B., Ojeda H. et Etchebarne F., 2019.** Maitrise de la salinité des eaux d'irrigation pour la viticulture. Managing irrigation water salinity in viticulture BIO Web of Conferences 12,01010(2019),41st World Congress of Vine and Wine. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191201010>.
- ESRI 2008.** ArcGIS Geostatistical Analyst Tutorial. "ArcGIS® 9, Document technique 49p. http://downloads2.esri.com/support/documentation/ao_/Using_ArcGIS_Geostatistical_Analyst.pdf).

F

- Fallot P., 1942.** Observations sur le Trias d'Algérie. *Bull.Soc. géol. Fr.*, 5^{ème} sér., t.XII, fasc. 1-2-3, 57p. Service Carte Géologique d'Algérie.
- FAO, 1984.** Prognosis of salinity and alkalinity. *FAO SOILS Bulletin* 31, 268p.
- FAO, 1990.** Management of Gypsiferous soils. *FAO soils Bulletin* n° 62, F.A.O, Rome.
- FAO, 1999.** Soil salinity Assessment. Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. *FAO irrigation and drainage paper*. N°57, 165p.
- FAO, 2001.** Benchmarking Performance In The Irrigation And Drainage Sector. IPTRID Secretariat Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 2001, 50p.
- FAO, 2002.** Capacity Building for Drainage in North Africa. Land and Water Development Division, International Program for Technology and Research in Irrigation and Drainage (IPTRID). Proceedings of a workshop Cairo, Egypt 10-14 March 2001, 221p.
- FAO, 2005.** Management of tropical sandy soils for sustainable agriculture. *Proceedings*. Thailand.
- FAO, 2006.** World Reference Base for Soil Resources. FAO, ISRIC and ISSS, Rome.
- FAO, 2012.** Etat actuel des ressources génétiques forestières en Algérie. Source DGF, rapport national, 58p. <https://www.fao.org/3/i3825e/i3825e0.pdf>.
- FAO, 2020.** Country Guidelines and Specifications for mapping salt-affected soils. Rome.
- FAO. 2021.** *Global map of salt-affected soils. GSASmap v.1.0*. Rome. <https://www.fao.org/3/cb7247en/cb7247en.pdf>.
- FAO-ITPS- GSP., 2015.** Status of the World's Soil Resources : Main report. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy
- Feigenbaum S., 1987.** The volcanic centre, organisation de recherche agronomique, bet dagan/Israël, Institut International de Potasse, 2 sujet 1, sujet 1, (1987).
- Feizizadeh B., Omarzadeh D., Alajujeh K. M., Blaschke T. and Makki M., 2022.** Impacts of the Urmia Lake Drought on Soil Salinity and Degradation Risk: An Integrated Geoinformatics. Analysis and Monitoring Approach. *Remote Sens*. 2022, 14, 3407. <https://doi.org/10.3390/rs14143407>.

Felgueiras C. and Goodchild M.F., 1995. Two Papers on Triangulated Surface Modeling. UC Santa Barbara NCGIA Technical Reports 95-2, 48p. <https://escholarship.org/uc/item/3882w3zp>

Foucart T., 2006. Colinéarité et régression linéaire. *Math. & Sci.hum.*, Mathématiques and Social Sciences, 44^e année, n° 173, 2006 (1), pp: 5-25. Printemps 2006, mis en ligne le 22 mai 2006. URL: <http://journals.openedition.org/msh/2963>; <https://doi.org/10.4000/msh.2963>.

Fourati, H. T., Bouaziz, M., Benzina, M. and Bouaziz, S., 2017. Detection of terrain indices related to soil salinity and mapping salt-affected soils using remote sensing and geostatistical techniques. *Environmental monitoring and assessment*, 189(4), 177.

Freeze R. A. 1974. Streamflow generation. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 12. pp. 627–647.

G

Gajem Y.M., Warrick A.W. and Myers, D.E., 1981. Spatial dependence of physical properties of a Typic Torrifluent soil. *Soil Sci. , Soc. Am. J.*, 45 : 709-715.

Garrels, R.M. et Christ, C.L. 1967 *Equilibres des minéraux et de leurs solutions aqueuses*. Guauthier-Villars, 335 p. **Gascuel-Oudoux Ch., Grimaldi M. et Veillon L.**, 1991. Apport de la géostatistique à l'analyse morphologique du sol : Cas d'un transect représentatif de la plaine côtière guyanaise. *Science du sol - 1991 Vol. 29,3*, 189-209.

Gavaud M., 1977. Essai sur la classification génétique des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XV, no 1, 1977: 63-87.*

Genot V., Renneson M., Colinet G., Goffaux M-J., Cugnon T., Toussaint B. Buffet D. et Oger R., 2012. Base de données Sols de REQUASUD. Rapport de 3^{ème} synthèse. Edité et distribué par: ASBL REQUASUD rue de Liroux, 9 B – 5030 Gembloux Belgique. www.tobenotobe.be (*Filigrane group*), 36p.

Ghénim A.M., Megnounif A. et Djelloul Smir S.M., 2011. Tendence de la pluviométrie à l'extrême Nord-Ouest de l'Algérie. *Algérie Equipement n°48, Hydrologie*, 7p.

Gherina S.A., Douaoui A., Hartani T. et Vincent B., 2008. Application de la télédétection dans la connaissance de la salinité des sols de la plaine du Bas-Chélif. In *Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb* (pp. 8-p), Document Cirad.

Girard M-C, Walter C, Berthelin J. et Rémy J-C., 2011. Sols et environnement. Collection: Sciences sup (Éditeur : Dunod), 2^{ème} édition. Un cours complet, des exercices, des suppléments en ligne - Master, écoles d'ingénieurs, Capes/Agreg., 881p.

Gis Sol, 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.

GIZ., 2014. Protection et Réhabilitation des sols pour améliorer la sécurité alimentaire. Programme Protection et Réhabilitation des sols pour améliorer la sécurité alimentaire. Commettant : Ministère fédéral allemand de la Coopération économique et du Développement (BMZ). Pays : Suprarégional : Bénin, Burkina Faso, Éthiopie, Inde, Kenya. **Organisme de tutelle** : Diffère selon le pays ; le plus souvent le ministère de l'Agriculture-**Durée totale** : de 2014 à 2017

Glangeaud L.(BI.18), 1932. Etude géologique de la région littorale de la Province d'Alger B.S. Carte géologique Algérie, 2^{ème} série, n°8.

Glangeaud L., 1952. Histoire Géologique de la province d'Alger. XIX^e Congrès Géologique International, Alger, Monographie Régionales- 1^{ère} série : Algérie-n°25, 137p. + 3 planches H.T.

Gonzalez Barrios J.L., 1992. *Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine : exemple de la "Comarca Lagunera"*. Montpellier : Université de Montpellier 2, 316 p. multigr. Th. : Bases de la production végétale : *Physiol. et Biol. des Organismes et des Populations*, Montpellier 2. 1992/11/26.

Goovaerts P., 1998. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biology and Fertility of Soils*, 27: 315–334.

- Goovaerts P., 1999.** Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89, p.1-45.
- Gorji T., Sertel E. and Tanik A., 2017.** Interpolation Approaches for Characterizing Spatial Variability of Soil Properties in Tuz Lake Basin of Turkey. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* **95** (2017) 062010. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/95/6/062010>.
- Gorrab A., 2016.** *Développement et validation de méthodologies pour le suivi des états de surface des sols agricoles nus par télédétection radar (bande X)* (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier). Gonzalez-Barrios, 1992),
- Gran G., 1950.** Determination of the equivalence point in potentiometric titrages. *Acta Chem. Scand.*, 4, 559-577.
- Gran G., 1952.** Determination of the equivalence point potentiometric titrations. Part II. *Analyst* (London) 77, 661-71.
- Grandet Cl., 1958.** La riziculture dans les terrains salés d'Oranie, d'après P. Simonneau. In: Cahiers d'outre-mer. N° 41 - 11^e année, Janvier-mars 1958. pp. 87-90. doi : <https://doi.org/10.3406/caoum.1958.2065>.
- Grattan S.R. and Grieve C.M. 1999.** Mineral nutrient acquisition and response by plants grown in saline environments. p. 203-229. In: Pessaraki, M. Handbook of plant and crop stress. Marcel Dekker, New York, NY, USA.
- Grünberger O., 2015.** Dynamiques salines des sols des milieux arides et semi-arides. Thèse HDR. Univ. Montpellier (France). 131p.
- Grunwald S., 2006.** Environmental Soil-Landscape Modeling — Geographic Information Technologies and Pedometrics. CRC Press, Ed., New York.
- Grunwald S., Thompson J.A. and Boettinger J.L., 2011.** Digital soil mapping and modelling at continental scales: Finding solutions for global issues. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:1201–1213. <http://doi:10.2136/sssaj2011.0025>.
- Guagliardi I., Cicchella D. and de Rosa R. , 2012.** A Geostatistical Approach to Assess Concentration and Spatial Distribution of Heavy Metals in Urban Soils. *Water Air Soil Pollut.* (2012) 223:5983–5998. <http://doi:10.1007/s11270-012-1333-z>.
- Guinochet M., 1954.** Réflexions sur l'état actuel de nos connaissances phytosociologiques en Afrique du Nord. *Vegetatio Acta Geobot* **5**, 18–22(1954). <http://doi.org/10.1007/BF00299547>.

H

- Habibi I., 2018.** Exploration de l'indicateur standardisé de précipitation à l'aide d'une statistique régionale. Cas du Bassin du Cheliff-Zahrez .Thèse de Doctorat Es Sciences, Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, Faculté de Génie Civil et d'Architecture- Département d'Hydraulique, 136p. + 21 annexes.
- Hachicha M., 2007.** Les sols salés et leur mise en valeur en Tunisie. *Sécheresse* 18, 45-50pp.
- Hadj-miloud S., 2010.** Morphologie et propriétés des Solonchaks références de la Mina. Thèse de Magister, Ecole nationale supérieure Agronomique d'El-Harrach (ENSA) –Alger, 110p. <http://hdl.handle.net/123456789/2033>.
- Hadj-miloud S., 2019.** Contribution de la logique floue à la classification des solonchaks du nord de l'Algérie. Apport du système d'inférence de Mamdani. Thèse de Doctorat Es-Sciences Agronomiques, Ecole nationale supérieure Agronomique d'El-Harrach (ENSA) –Alger, 169p.
- Halimi S., Zeghdani Z. et Allaoui A., 2018.** Aptitude des eaux épurées de la Step de Khenchela à l'irrigation. *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement* N°3 – 2018, 12p. Source : <https://www.researchgate.net/publication/333389099>.

- Halitim A., Robert M., Tessier D. et Prost R., 1984.** Influence des cations échangeables (Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++}) et de la concentration saline sur le comportement physique (rétention en eau et conductivité hydraulique) de la montmorillonite. *Agronomie*, 4, pp. 451 - 459.
- Halitim A., 1985.** Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes Plaines Steppiques d'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Rennes, 383 p.
- Halitim A., 1988.** Sols des régions arides d'Algérie. OPU, Alger, 384 p.
- Hammi H., M'nif A. et Rokbani R., 2001.** Étude de l'évaporation d'une saumure naturelle. Corrélation conductivité-concentrations ioniques (Na^+ , K^+ , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^{--}). *J. Phys. IV France* 11 (2001) (Article published online by EDP Sciences and available at <http://dx.doi.org/10.1051/jp4:20011008>).
- Hamrouni L., Hanana M., Abdelly C. et Ghorbel A., 2011.** Exclusion du chlorure et inclusion du sodium : deux mécanismes concomitants de tolérance à la salinité chez la vigne sauvage *Vitis vinifera* subsp. *sylvestris* (var. 'Séjnéne'). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2011, 15(3), 387-400.
- Hartani T., Douaoui A., Kuper M. et Hassani F., 2007.** Stratégies de gestion individuelle de la salinité dans le périmètre irrigué du Bas Cheliff cas du périmètre de Ouarizane. Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb. Actes du troisième atelier régional du projet Sirma, Nabeul, Tunisie, 4-7 juin 2007. Cirad, Montpellier, France, colloques-cédérom, pp : 1-16.
- Hartani T., Bradaï A. and Douaoui A., 2012.** Exploring Salinity Perception in Lower Cheliff Plain (Algeria). Earlier title: *Journal of Agricultural Science and Technology*, ISSN 1939-1250. *Journal of Agricultural Science and Technology A* 2 (2012) 1253-1259.
- Hartemink Alfred E., Krasilnikov P. and Bockheim J.G., 2013.** Soil maps of the world. *Geoderma* 207-208 (2013) 256-267
- Harter B. et Motis T., 2016.** Comprendre les sols affectés par le sel. ECHO Document, Note technique 84, 18p. Copyright © ECHO 201717391, Durrance Road, North Fort Myers, Florida 33917, USA. ECHOcommunity.org
- Harvey O.R. and Morgan. C.L. S., 2009.** Predicting regional-scale soil variability using a single calibrated apparent soil electrical conductivity model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 164-169. <http://doi:10.2136/sssaj2008.0074>.
- Heil K. and Schmidhalter U., 2017.** The application of EM38: Determination of soil parameters, selection of soil sampling points and use in agriculture and archaeology. *Sensors (Basel)* 17(11). 562. <http://dx.doi.org/10.3390/s17112540>.
- Helgeson H.C., 1969.** Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. *Amer. J. Sci.*, 267,724-804.
- Hellec F., Brives H., Blanchart E., Deverre C., Garnier P., Payet V., Peigné J, Recous S. and Hengl T., 2009.** A Practical Guide to Geostatistical Mapping, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 270 p.
- Hellec F., Brives H., Blanchart E., Deverre C., Garnier P., Payet V., Peigné J, Recous S., de Tourdonnet S. et Vian J.F., 2015.** L'évolution des sciences du sol face à l'émergence de la notion de service Ecosystémique. Résultats d'une étude lexicométrique. *Etude et Gestion des Sols, Volume 22, 2015 - pages 101 à 115.*
- Hempel J.W., MacBratney A.B., McKenzie A.E., McMillan R., Lagacherie P. et Arrouays D., 2013.** Vers une cartographie numérique des propriétés des sols du monde. Le programme GlobalSoilMap. *Etude et Gestion des Sols, Volume 20, 1, pp :07 à 14.*
- Henin S., Gras R. et Monnier G., 1969.** - Le profil cultural, Masson, Paris.
- Herbert E., 2017.** Analyse géostatistique quasi-3D des propriétés hydrauliques d'un noyau de barrage en remblai. Maîtrise en génie civil Maître ès sciences (M.Sc.), Université Laval, Québec Canada, 99p.

Hernández E.I., Melendez-Pastor I., Navarro-Pedreño J. and Gómez I., 2014. Spectral indices for the detection of salinity effects in melon plants. Section of melon nutrition Sci. Agric. v.71, n.4, p.324-330, July/August 2014

Herrero J., Ba, A. A. and Aragiüés R. 2003. Soil salinity and its distribution determined by soil sampling and electromagnetic techniques. Soil Use and Management, 19(2), 119–126.

Heurteaux P. et Servant J., 1979. Transferts et stockage de l'eau et des sels dans le profil pédologique des sols halomorphes camarguais. Terre Vie, Reu. Eco. 41p., Suppl. 2, 1979.

Hongye B., 2009. Digitization of ancient maps based on GIS technology: The yu ji tu map. World library and information congress: 75th IFLA general conference and council August 2009, Milan, Italy. <http://www.ifla.org/annual-conference/ifla75/index.htm>.

Hossain S. Md., 2019. Present Scenario of Global Salt Affected Soils, its Management and Importance of Salinity Research. International Research Journal of Biological Sciences Perspective, Vol. 1, N°1, pp: 1-3, 2019, pISSN: 2663-5968, eISSN: 2663-5976.

Houha B., Kherici N., Kachi S. and Valles V. 2008 Hydrochemical Differentiation of Salinisation Process of the Water in Endoreic Semi-Arid Basin: Case of Rémila Basin, Algeria. American Journal of Applied Sciences 5 (7), 891-895.

Hu K., Li B., Lu Y. and Zhang F., 2004. Comparison of various spatial interpolation methods for non-stationary regional soil mercury content. Environmental Science, 25(3): 132-137.

HWSD., 2009. Harmonized World Soil Database. Document Version 1.1., 43p. Coordination : **Nachtergaele F, Van Velthuizen H., Verelst L.** 2008-2009 Copyright FAO, IIASA, ISRIC, ISSCAS, JRC. The most recent updates of the HWSD can be found at the HWSD Website:

Hydrotechnique corp.,1976. Algérie occidentale, Chélif- Cote Dahra, Volume II, Ressources en Terres Irrigables. Etude des aménagements hydrauliques. Rapport régional, Hydrotechnic corporation, ingénieurs conseil New-York, USA – Madrid Espagne. 3 Sections techniques , 41p.+ Plans +annexes .

I

Iddir M. A., 2006. Evaluation de la salinité par induction électromagnétique : Exemple d'une parcelle cultivée de la plaine de la Macta (Wilaya de Mascara). Thèse de Magister, INA, Alger, 96p.

Iddir M. A., 2021. Cartographie et prédiction de la salinité des sols par induction électromagnétique. Application aux sols sableux de la région de R'Mel (Hodna-Algérie). Thèse de Doctorat *Es Sciences en Science Agronomiques*, Spécialité Science du sol-Département de Science du sol (ENSA), 190p.<http://localhost8080/xmlui/handle/123456789/2487>.

Ikechukwu, M.N., Ebinne, E., Idorenyin, U. and Raphael, N.I., 2017. Accuracy Assessment and Comparative Analysis of IDW, Spline and Kriging in Spatial Interpolation of Landform (Topography): An Experimental Study. Journal of Geographic Information System, 9, 354- 371. <https://doi.org/10.4236/jgis.2017.93022>.

INSID., 1996. Projet pilote d'étude et de suivi de la salinité. Caractérisation de l'état de la salinité actuel du sol « cas du Bas-Cheliff ». Institut National des sols de l'Irrigation et du Drainage, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Rapport n°1 : Note méthodologique, 60p.

INSID, 1998. Etude de caractérisation de l'état actuel de la salinité et d'évaluation de l'état physique du réseau de drainage au niveau du périmètre irrigué d'Abdala (Wilaya de Bechar). Alger. 22 p.

INSID., 2008. Les sols Salins en Algérie. Rapport de Synthèse, Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage, MADR., 7p.

Isaaks E. and Srivastava R., 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press.

Isla R., Aragiüés R. and Royo A., 2003. Spatial variability of salt-affected soils in the middle Ebro Valley (Spain) and implications in plant breeding for increased productivity. *Euphytica* 134: 325–334, 2003. © 2003 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.

Ismaili S., Douaik A. and Moughli Lh., 2014. Soil Fertility Mapping: Comparison of Three Spatial Interpolation Techniques. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN: 2278-0181(www.ijert.org). Vol. 3 Issue 11, November-2014.

Ivushkina K., Bartholomeus H., Bregt A.K., Pulatov A. Kempen B. and de Sousa L., 2019. Global mapping of soil salinity change. Remote Sensing of Environment 231 (2019) 111260. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111260>.

J

Jalali M., 2008. Effect of sodium and magnesium on kinetics of potassium release in some calcareous soils of western Iran. *Geoderma* 145 (2008), pp : 207–215.

Jeloudar Z.J., Shabanzadeh S., Kavian A. and Shokri M., 2014. Spatial variability of soil features affected by landuse type using geostatistics. ECOPERSIA, Vol.2(3), 667-679. https://ecopersia.modares.ac.ir/files/ecopersia/user_files_749497/archive_global-A-24-1000-277-e648349pdf.

Jiang Y., Zhang Y. and Liang W., 2008. Field-scale variability of soil exchangeable cations in a Chinese Ecological Research Network (CERN) Site. Agricultural Journal 3, 208-215.

Job J.O., Loyer J.Y. et Ailoul M., 1987. Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. Cahiers ORSTOM, ser. Pédol., vol. XXIII, no 2, pp 123-131.

Jobst M., 2009. Neo-cartographic interlacement as barrier for Cartographic Heritage. *e-Perimetron*, 4(4), 212-220.

Jobst M., 2011 . CO-265 Preservation in digital cartography Vienna University of technology, vienna, austria abstract, 7p. Extrait : Jobst, M. (Ed.). (2010). Preservation in digital cartography: *archiving aspects*. Springer Science & Business Media. https://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2011/Oral.

Johnston I., Meyer J.H., Savage I.M. and Van Antwerpen R., 1994. Electromagnetic induction as a technique for diagnosing and mapping soil salinity. Proceedings of the south african sugar technologists' association - June 1994, pp : 65-69.

Juan P., Mateu J., Jordan M.M., Mataix-Solera J., Melendez-Pastor J. and Navarro-Pedreno J., 2011. Geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil salinity. Journal of Geochemical Exploration, vol. 108, pp 62-72.

K

Kaabeche M., 2000. Conservation de la biodiversité et gestion durable des ressources naturelles. Guide des habitats aride et saharien. : Typologie phytosociologique de la végétation d'Algérie. Université Ferhat Abbas de Sétif, Laboratoire de biodiversité et des ressources phylogénétiques, Publication du Projet Alg/00/G35, 59p.

Kalivas D P., Triantakostas D. P. and Kollias V. J. 2002. Spatial prediction of two soil properties using topographic information. Global Nest: the Int. J. Vol 4, No 1, pp 41-49, 2002.

Karlen D.L., Tomer, M.D., Neppel, J. and Cambardella C.A., 2008. A preliminary watershed scale soil quality assessment in north central Iowa, USA. *Soil Tillage Res.* 2008, 99, pp: 291–299.

Kartoubi M., Hartani T. and Hallouz F., 2017. Impact de changement climatique sur les ressources en eau dans la plaine de Khemis Miliana (Bassin versant du Haut Cheliff). Revue SAGREN Systèmes Agricoles et Environnement, Centre universitaire de Tipaza, EISSN: 2661-7730, Vol 01, No 1, mai 2017, pp :40-48.

Karydas Ch.G., Gitas I.Z., Koutsogiannaki E., Lydakis-Simantiris N. and Silleos G.V., 2009. Evaluation of spatial interpolation techniques for mapping agricultural topsoil properties in crete. EARS eProceedings 8, PP/ 16-39, 1/2009

Kavianpoor H., Esmali Ouri A., Jafarian Jeloudar Z. and Kavian A., 2012. Spatial Variability of Some Chemical and Physical Soil Properties in Nesho Mountainous Rangelands. American Journal of

Environmental Engineering 2012, 2(1): 34-44. <http://doi:10.5923/j.ajee.20120201.06>.

Kayser B., 1959. La science du sol. Pédologie et géomorphologie des plaines du Chéelif. In : Annales de Géographie, t. 68, n°367, 1959. pp. 245-247. https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1959_num_68_367_16313.

Kazi Tani Ch., Le Bourgeois T. and Munoz F. 2010. Aspects floristiques des adventices du domaine phytogéographique oranais (Nord-Ouest algérien) et persistance d'espèces rares et endémiques. Fl. Medit. 20: 29-46. ISSN 1120-4052.

Keller C., Bourrie G. and Vedy, J.C. 1987. Formes de l'alcalinité dans les eaux gravitaires. Influence des métaux lourds contenus dans des composts. Science du Sol 25(1), 17-29.

Kerry R. and Oliver M. A. ,2007. Determining the effect of asymmetric data on the semi-variogram. I. Underlying asymmetry, Comput. Geosci., 33, 1212–1232.

Khalfaoui S., 2010. Évaluation géostatistique de tassement des différents sols du Nord-Est algérien. Afrique SCIENCE 06(3) (2010) 75 – 86. ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.info>.

Kim K., Kim S.H., Parka S.M., Kim J. and Choib, M. 2010. Processes controlling the variations of pH, alkalinity, and CO₂ partial pressure in the porewater of coalash disposal site. Journal of hazardous materials 181,74–81. <http://doi:10.1016/j.jhazmat.2010.04.089>.

King D. 1984, Analyse de quelques concepts en cartographie des sols basée sur une automatisation des cartes thématiques dérivées. Agronomie, EDP Sciences, , 4 (5), pp.461-472.

King D. et Girard M.C., 1988. Réflexions sur la classification des profils de la couverture pédologique. Proposition d'un algorithme : VLADIMIR. Science du Sol 26, 239–254.

King C., Baghdadi N., Lecomte V. and Cerdan O., 2005. The application of remote-sensing data to monitoring and modelling of soil erosion. Catena 62 (2005) 79–93.

Kireche O. 1977. Etude géologique et structurale des massifs à schistosites du Cheliff (Doui, Rouina, Tamoulga). Doctorat 3ème cycle, Faculté des Sciences d'Alger. Cope ASGA, Bibliothèque des Sciences de la terre, Alger, Rue Claude Debussy.

Koch A., McBratney A., Adams M., Field D., Hill R., Crawford J. and Zimmermann M., 2013. Soil Security: Solving the Global Soil Crisis. Global Policy, 4(4), 434–441. <https://doi:10.1111/1758-5899.12096>.

Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., and Rubel F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 15, No. 3, 259-263. <http://doi:10.1127/0941-2948/2006/0130>.

Kouassi M. A., Ahoussi E. K., Koffi B.Y., Ake Y.A. et Biemi J., 2012. Caractérisation hydrogéochimique des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(1), 504-518.

Koulibaly B., 2011. Caractérisation de l'acidification des sols et gestion de la fertilité des agrosystèmes cotonniers au Burkina. Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou, Laboratoire de Biologie et Ecologie Végétales, 140p.+ 43p. annexes.

Kumke T., Schoonderwaldt A. and Kienel U., 2005. Spatial variability of sedimentological properties in a large Siberian lake. *Aquatic sciences*, 67(1), 86-96.

Kuper M., 1997. Irrigation management strategies for improved salinity and sodicity control. Earth Sciences. Wageningen University and Research Centre, 1997. PhD Thesis, Agricultural University Wageningen, The Netherlands. Thesis Landbouwniversiteit ageningen, 224p. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00422363>.

Kyriakidis Ph. C., 2004. A Geostatistical Framework for Area-to-Point Spatial Interpolation. Geographical Analysis, Vol. 36, No. 3 (July 2004) The Ohio State University

Kyriazi E., Soulakellis N., Tataris G. and Lappas S., 2010. Use of Geoinformatics for the Digitization and Visualization of Cartographic Heritage: The Case of an Early 1920s Mytilene Town Map. M. Ioannides (Ed.): EuroMed 2010, LNCS 6436, pp. 193–205, 2010. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.

L

Lachhab I., Louahlia S., Laamarti M. et Hammani K., 2013. Effet d'un stress salin sur la germination et l'activité enzymatique chez deux géotypes de *Medicago sativa*. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 3(2), 511-516.

Ladjadj Y., 2009. Etude structurale du bassin du bas Chellif à partir des données Gravimétriques, magnétiques et sismiques. Thèse de Magister, Université Ferhat Abbas – Sétif, Faculté des Sciences-Département de physique, 67p.

Lafitte R., 1950. Sur la constitution géologique du versant NW du massif du Dahra (Algérie). C.R.Ac.Sc. Paris, t.230, n°1, 104p.

Lagacherie P. and Voltz M., 2000. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data : a conditional probability approach. *Geoderma* 97 (3-4), pp. 187-208

Lagacherie P., 2002. Cartographies des sols et de leurs propriétés à un niveau sub-regional. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches, Université Montpellier 2, 49p.

Lagacherie P., 2008. Digital soil mapping: a state of the art. In: **Hartemink, A.E., McBratney, A.B., Mendonça Santos M.D.L.** (Eds.), *Digital Soil Mapping With Limited Data*. Springer Science + Business Media B.V., pp. 3–14

Lagacherie Ph., Arrouays D. et Walter C., 2013. Cartographie numérique des sols : principe, mise en œuvre et potentialités. *Etude et Gestion des Sols*, Association Française pour l'Etude des Sols, 2013, 20 (1), pp.83-98. fahal-01209244.

Lahlou M., Badraoui M., Soudi B. Goumari A. et Tessier D., 2002. Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols. Actes de l'atelier du PCSI, 28-29 mai 2002, Montpellier, France. CEMAGREF, CIRAD, IRD

Lallemand-Barrès A., 1980. Aménagement des sols salés. Irrigation avec des eaux salées. Etude documentaire, Bureau de recherches géologiques et minières-Département EAU, S.G.N., Réf. 80 SGN 922 EAU, 34 p. +8 Annexes. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/80-SGN-922-EAU>.

Lamond R. and Whitney D.A., 1992. Management of saline and Sodic soils. Kansas State University, Department of Agronomy MF-1022.

Laoufi H., 2010. Les processus géochimiques de la salinisation des sols du Bas-Chéelif. Mémoire de magister, ENSA, El Harrach-Alger, 99pp. <http://hdl.handle.net/123456789/2034>.

Laqrichi S., 2015. Approche pour la construction de modèles d'estimation réaliste de l'effort/coût de projet dans un environnement incertain : application au domaine du développement logiciel. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse et Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, 2015. Français, 120p..

Laribi A. et Alzubaidi A. H., 2007. Etat du Magnesium Dans Quelques Sols Sales du Sud et du Centre de L'Irak. *Agronomie Africaine*, 19(2), 187-195.

Lark R. M., 2012. Towards soil geostatistics. *Spatial Statistics*, 1, 92-99.

Laroche B., Arrouays D., Oliver D. et Lecerf N., 2011. Essai de cartographie numérique des pédopaysages à 1/250 000 dans les départements de l'Aube de la Marne. Enseignement, limites et perspectives. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 18, 1, 2011, pages : 17-31.

Le brusq J-Y. et loyer J-Y., 1982. Evolution de la salinité des sols et des eaux en relation avec la riziculture submergée dans le Delta du Fleuve Sénégal. Résultats de la campagne 80/81 - Centre ORSTOM de Dakar.

- Leenaers H., Okx J.R and Burrough P.A. 1990.** Comparison of spatial prediction methods For mapping floodplain soil pollution. CATENA Vol. 17, p. 535-550
- Leenhardt D., Voltz M., Bornand M. and Webster R., 1994.** Evaluating soil maps for prediction of soil water properties. Eur. J. Soil Sci. 45:293–301.
- Legrain X., Renneson M., Genot V., Demarcin P., Liénard A., Bock L. et Colinet G. , 2011.** Méthodologie de constitution d'une collection d'échantillons de sols en relation avec les principaux matériaux parentaux en Wallonie (Belgique méridionale). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 15(S2), 683-697.
- Legros J.P., 2007.** Les grands sols du Monde. Presses polytechniques et universitaires romandes, 574p.
- Legros J. P., 2009.** La salinisation des terres dans le monde. Académie des Sciences et Lettres de Montpellier conférence n° 4069, Bull. n° 40, pp. 257-269
- Lehmann S., Bégon J.C., Eimberck M., Daroussin J., Wynns R. et Arrouays D., 2007.** Utilisation du Logiciel CLAPAS pour l'aide à la délimitation de pédopaysages. Un test sur la carte des sols de Mirande (Gers, France). *Etude et Gestion des sols*, 14(2) : 135-151.
- Lehmann S., Eimberck M., Martin M.P. et Arrouays D., 2013.** Cartographie numérique d'une carte pédologique au 1/50.000ème dans le Doubs, France. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 20, 1, pp : 27 à 46.
- Le houero H.N., Claudin J. et Haywood M., 1977.** Etude bioclimatique des steppes algérienne (cartes 1/1.000.000). Bull. Soc. Hist. Nat. D'Afr. n°68.
- Le houero H.N., 1979.** La désertification des régions arides. *La recherche*, n°99, Vol.10, pp : 336-344.
- Le houero H.N., 1995.** Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du nord de l'Afrique ; diversité biologique, développement durable et désertisation. *Options médit. série B*, 10 : 1-396.
- Lemercier B., Lacoste M., Loum M. and Walter C., 2012.** Extrapolation at regional scale of local soil knowledge using boosted classification trees. A two approach. *Geoderma*, 171, pp : 75-84.
- Lepvrier C., Magne, J. et Sigal, J., 1970.** Données stratigraphiques et structurales sur les formations telliennes d'une partie du Tell Septentrional (secteur compris entre Cherchell, Miliana. El Asnam et Ténès. Algérie). *Bull. Soc. Geol. de France* 7, 794-804.
- Lesch S.M., Strauss D.J. and Rhoades J.D., 1995a.** Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques. 1. Statistical prediction models: a comparison of multiple linear regression and cokriging. *Water Resour. Res.* 31, 373–386.
- Lesch S.M., Strauss D.J and Rhoades J.D., 1995b.** Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques. 2. An efficient spatial sampling algorithm suitable for multiple linear regression model identification and estimation. *Water Resour. Res.* 31, 387–398.
- Lesch S.M., Herrero J. and Rhoades J.D., 1998.** Monitoring for temporal changes in soil salinity using electromagnetic induction techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 232–242..
- Lesch S. and Suarez D.L., 2009.** A short note on calculating the adjusted SAR index. *Transactions of the ASABE* Vol. 52(2): 493-496 2009. American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001-2351. Submitted for review in January 2009 as manuscript number SW 7877; approved for publication by the Soil & Water Division of ASABE in March 2009
- Lesch S.M., 2012.** Statistical models for the prediction of field-scale and spatial salinity patterns from soil conductivity survey data. In *Agricultural Salinity Assessment and Management*; Wallender, W.W., Tanji, K.K., Eds.; ASCE: Reston, VA, USA,
- Levy G.J., 2012.** Sodicity. In: Huang, P.M., Li, Y., Sumner, M.E. (Eds.), *Handbook of Soil Sciences. Resource Management and Environmental Impact*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL (Chapter 18).

- Li J. and Heap A.D., 2008.** A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. Geoscience Australia, Record 2008/23, 137 pp. Geoscience Australia, GPO Box 378, Canberra, ACT 2601, Australia.
- Li J. and Heap A. D., 2014.** Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software* 53 (2014) 173e189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>.
- Li J., Pu L., Zhu M., Zhang J., Li P., Dai X., Xu Y. and Liu L., 2014.** Evolution of soil properties following reclamation in coastal areas: A review. *Geoderma* 226-227, 130-139.
- Li Y., Shi Z, Li F. and Li H.Y., 2007.** Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. *Computers and Electronics in Agriculture* 2007; 56(2):174–186.
- Li Z., Zhu Q. and Gold C., 2004.** *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*. CRC Press.
- Lisan B., 2008.** Planter en milieux arides et salins. *Anticiper le réchauffement climatique*. Amazon éditions. Collection terre préservée, 412p. http://www.doc-developpement-urable.org/livres/planter_en_conditions_arides_et_salines.pdf.
- Liu H. and Wu C., 2019.** Developing a Scene-Based Triangulated Irregular Network (TIN) Technique for Individual Tree Crown Reconstruction with LiDAR Data. *Forests* 2020, 11, 28. <http://doi:10.3390/fl1010028>. www.mdpi.com/journal/forests.
- Liu J., Pattey E., Nolin M.C., Miller J.R. and Ka O., 2008.** Mapping within-field soil drainage using remote sensing, DEM and apparent soil electrical conductivity. *Geoderma* 143, 261–272.
- Livieratos E., 2008.** On the cartography of Rigas Charta. *e-Perimetron*, Vol. 3, No. 3, 2008 [120-145]. ISSN 1790-3769. <http://www.e-perimetron.org>.
- Livieratos E., 2009.** On the cartography of Rigas Charta. *e-Perimetron* (ISSN 1790-3769), Vol. 3, No. 3, 2008, pp :120-145. <http://www.e-perimetron.org>.
- Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D.J. and Rhind D. W., 2005.** *Geographical Information Systems and Science* 2nd Edition. John Wiley & Sons Ltd, , 537p.
- Lovett G.M., Likens G.E., Buso D.C., Driscoll C.T. and Bailey S.W., 2005.** The biogeochemistry of chlorine at Hubbard Brook, New Hampshire, USA. *Biogeochemistry*. 72, 191-232.
- Loyer J.Y. et Zogbi R., 1983 ;** Mesure en continu de la teneur en sodium des eaux de drainage au moyen d'un dispositif d'enregistrement automatique et d'une électrode spécifique. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pddol.*, vol. XX, no 2, 1983: 109-117
- Loyer J Y., Gonzalez Barrios J.L. et Job J.O., 1989.** Les principaux faciès salins et leur expression dans les sols des régions chaudes. *Actes Sémin.Mapimi.Mexique.*, 16p.
- Loyer J.Y., 1991.** Salinité des eaux d'irrigation problèmes et solutions. Conférence IAM. BARI, Italie, 25-26 juillet 1991, 11p.
- Loyer, J.-Y., Gonzalez Barrios, J.L. et Job, J.O., 1992.** Les principaux faciès salins et leur expression dans les sols des régions chaudes, in: Delhoume, J.-P., Maury, M.E., Séminaire Mapimi, Durango (MEX), 1989/10/23-29 (Eds.), Etude des relations eau-sol-végétation dans une zone aride du Nord du Mexique orientée vers l'utilisation rationnelle de ces ressources pour l'élevage bovin extensif. Instituto de Ecologia, Xalapa, pp. 347–362Lozet et Mathieu 1990
- Lozet J. and Mathieu C., 1990.** *Dictionary of soil science* (No. Ed 2). Technique et Documentation-Lavoisier.

M

- Mahmoodifard Z., Hosein Nazemi A., Sadraddini S.-Ali and Shahbazi F., 2014,** Assessment of Spatial and Temporal Distribution of Groundwater Salinity and Alkalinity Using Ordinary Kriging ; (Case Study: Ardabil Plain Aquifer). *Agriculture Science Developments* Vol(3), No (7), July, 2014.

- Malherbe L. et Rouil L., 2003.** Méthodes de représentation de la qualité de l'air. Guide d'utilisation des méthodes de la géostatistique linéaire. Document Convention 115/03. MEDD, DPPR, *Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, Unité Modélisation et Analyse Economique pour la gestion des Risques (MECO) et Direction des Risques Chroniques (DRC)*, 70p.
- Marlet S. et Job J. O., 2006.** Processus et gestion de la salinité des sols, In Tiercelin, J,R, *Traité d'irrigation*, seconde édition, Tec & Doc Lavoisier, p, 797-822
- Marlet S., Bouksila F., Mekki I. et Benaissa I.,2007.** Fonctionnement et salinité de la nappe de l'oasis de Fatnassa : arguments géochimiques. Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb. Actes du troisième atelier régional du projet Sirma, Nabeul, Tunisie, 4-7 juin 2007. Cirad, Montpellier, France, colloques-cédérom, 14p.
- Maroju S., 2007.** "Evaluation of Five GIS Based Interpolation Techniques for Estimating the Radon Concentration for Unmeasured Zip Codes in the State of Ohio," A thesis submitted as partial fulfilment of the requirements for the masters of Science degree in Civil Engineering University of Toledo, 2007.
- Martin S., 1993.** L'observatoire de la qualité des sols, un outil de gestion pour l'agriculture , un instrument d'observation de la biosphère. *Chambre d'agriculture, Suppl. N°897*, pp : 8-10.
- Massoumi A.M., 1968.** Caractérisation et amélioration des sols Salés et a alcalis. Paris : O.R.S.T.O.M., 34 p. : tabl., fig. + 5p. annexes.
- M.A.T.E., 2003.** Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement. Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement. Expertise ONEDD-GTZ, 463p.
- M.A.T.E.T, 2009.** Quatrième rapport national sur la mise en œuvre de la convention sur la diversité biologique au niveau national. Projet MATET-FEM-PNUD, 121p.
- M.A.T.E.T, 2014.** Présentation du Cinquième Rapport National sur la mise en œuvre de la convention sur la diversité biologique au niveau national. Projet MATET – FEM - PNUD, 128p. <https://www.cbd.int/doc/world/dz/dz-nr-05-fr>.
- M.A.T.E, 2015.** Etude diagnostique sur la Biodiversité et les changements climatiques en Algérie. Projet MATE-PNUD-FEM :« Planification nationale sur la diversité biologique et mise en œuvre en Algérie du plan stratégique de la convention sur la diversité biologique 2011-2020 et des objectifs d'Aichi », rapport final, 135p.
- Matheron G., 1963.** Principles of Geostatistics. *Economic Geology* **58**, 1246-1266.
- Mattauer M., 1951.** Structure oblique de l'Atlas tellien au Sud de Miliana (Algérie). *C.R.Ac.Sc. Paris*, 19 déc.1951,t.233, n°25.
- Mattauer M., 1958.** Etude géologique de l'Ouarsenis oriental (Algérie) - publication du service de la carte géologique de l'Algérie (Extrait thèse Es-Sciences). *Bulletin N°17, Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Alger*, 533p.
- McBratney, A.B. and Webster, R., 1981.** Spatial dependence and classification of the soil along a transect in northeast Scotland. *Geoderma* **26**, 63–82.
- McBratney, A. and Webster, R., 1986.** Choosing Functions for Semivariograms of Soil Properties and Fitting them to Sampling Estimates. *Journal of Soil Science* **37**, 617-639.
- McBratney A.B., Mendonça Santos M.L. and Minasny, B., 2003.** On digital soil mapping. *Geoderma* **117**, 3–52.
- McBride M.B. 1994.** *Environmental chemistry of soils*. Oxford University Press, Inc., New York.
- Mc donald M., W.S. Atkins, B.N.E.D.E.R. et A.G.I.D. 1990.** Étude de l'avant-projet détaillé des extensions de Guerouaou et de Sebkhath Benziane et du réaménagement du Bas-Cheliff. Analyse des ressources en sol, rapport nr I-B. *Bureau National d'Étude pour le Développement Rural (BNEDER)-Ministry of Agriculture, Rural Development and fishing-Algeria. National Algeria.. *Agency of Realization and management Hydraulic Infrastructures for Irrigation and Drainage (AGID)- Ministry of Hydraulics, National Algeria.

- McKenzie R. C., Chomistek W. and Clark N. F., 1989.** Conversion of electromagnetic inductance readings to saturated paste extract values in soils for different temperature, texture, and moisture conditions. *Canadian Journal of Soil Science*, 69(1), 25-32.
- McKenzie R.C., George R.J., Woods S.A., Cannon M.E. and Bennett D.L., 1997.** Use of the electromagnetic-induction meter (EM38) as a tool in managing salinization. *Hydrogeol. J.* 5, 37–50.
- McNeill J.D.** 1980. Electrical conductivity of soils and Rocks. Tech. note TN-6, Geonics Ltd., Ontario, CanadaMcKenzie et al., 1989 ;
- Meddi H. et Meddi M., 2004;** Sécheresse et spatialisation des précipitations dans le nord-ouest de l'Algérie. Colloque International « TERRE et EAU » Annaba, 21, 22 & 23 Novembre 2004. In- Revue annuelle CRSTRA-ISSN 1112-3273, numéro spécial 2006, Journal Algérien des zones arides, pp : 31-34
- Meddi H. et Meddi M., 2009;** Etude de la persistance de la sécheresse au niveau de sept plaines Algériennes par utilisation des chaînes de Markov (1930-2003). Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, Courrier du savoir – n°09, mars 2009, pp.39-48.
- Meddi M., Talia A. et Martin C., 2009.** Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie). *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement Journal*, Vol 3, p. 61-84. <http://doi.org/10.4000/physio-geo.686>.
- Medejerab A. et Henia L., 2011.** Variations Spatio-temporelles de la Sécheresse Climatique en Algérie Nord-Occidentale. Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, Courrier du Savoir – N°11, Mars 2011, pp.71-79.
- Mediouni K., 1997.** Organisation et potentialités de la diversité biologique algérienne. Min. Envi., Tome II, Projet Alg. / 97/ G31/ FEM/PNUD.
- Meghraoui M., 1982.** Étude néotectonique de la région nord-ouest d'El-Asnam: relation avec le séisme du 10 octobre 1980 » Thèse de Doctorat, 3e cycle, Université de Paris VII, France, 210 p.
- Meghraoui, M., Cisternas A. and Philip, H., 1986.** Seismotectonics of the lower Cheliff basin: Structural background of the El-Asnam (Algeria) earthquake, *Tectonics*, 5, 6, 809- 836.
- Meghraoui M., 1988.** Géologie des zones sismiques du Nord de l'Algérie. Paléosismologie, Tectonique active et synthèse sismotectonique » Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Paris-Sud, centre d'Orsay, France.
- Meghraoui M., Morel J.L., Andrieux J. et Dahmani M., 1996.** Tectonique plio-quadernaire de la chaîne tello-rifaine et de la mer d'Alboran. Une zone complexe de convergence continent-continent. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 167, 1, 141-157.
- Meguenni K. et Remini B., 2008.** Evaluation du débit solide dans le bassin versant de Harreza (Algerie). *Larhyss journal*, ISSN 1112-3680, n° 07, Juin 2008, pp. 7-19
- Mehaiguene M., 2005.** Bilan hydrologique et ressource en eau superficielle du bassin Cheliff Zahrez. Thèse de Magister, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef. 143p.
- Mehaiguene M., 2013.** Etude des étiages et des débits de base au Nord-Ouest de l'Algérie. Thèse de Doctorat Es-Sciences, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique, 228p.
- Mei G, Xu L. and Xu N. 2017.** Accelerating adaptive inverse distance weighting interpolation algorithm on a graphics processing Unit. *R. Soc. open sci.* 4: 170436. <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.170436>.
- Meilianda E., Huhn K., Alfian D. and Bartholomae A., 2012.** Application of Multivariate Geostatistics to Investigate the Surface Sediment Distribution of the High-Energy and Shallow Sandy Spiekeroog Shelf at the German Bight, Southern North Sea. *Open Journal of Marine Science*, 2012, 2, 103-118. <http://dx.doi.org/10.4236/ojms.2012.24014>.

- Meirvenne M.V. and Meklit T., 2010.** Geostatistical Simulation for the Assessment of Regional Soil Pollution. *Geographical Analysis* **42** (2010) 121–135. ISSN 0016-7363, The Ohio State University
- Mermoud A., 2006.** Maitrise de la salinité du sol. École polytechnique de Lausanne, 46p.
- Meshalkina Yu. L., 2007.** A Brief Review of Geostatistical Methods Applied in Modern Soil Science. ISSN 0147-6874, *Moscow University Soil Science Bulletin*, 2007, Vol. 62, No. 2, pp. 93–95. © Allerton Press, Inc., 2007. Original Russian Text © Yu.L. Meshalkina, 2007, published in *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Pochvovedenie*, 2007, No. 2, pp. 40–42.
- Mhiri A., Tahouni J., Hachicha M. et Lebdi F., 1998.** Approche systématique des risques de salinisation par endoréisation anthropique. *Etude et Gestion des sols*, 5, 4, 1998-pp :257-268.
- Mhiri A., 2002.** Le potassium dans les sols de Tunisie. *Atelier sur la gestion de la fertilisation potassique, acquis et perspectives de la recherche*. INA Editions, Tunisie.
- Michot D., Walter C., Adam I. and Guéro Y., 2013.** Digital assessment of soil-salinity dynamics after a major flood in the Niger River valley. *Geoderma* 207–208 (2013) 193–204
- Mietton M., 2008.** « La mémoire des sols » de Simon Pomel », *Les Cahiers d'Outre-Mer* [En ligne], 243 |2008, mis en ligne le 01 juillet 2011, consulté le 21 septembre 2020. URL:<http://journals.openedition.org/com/5378>. DOI : <https://doi.org/10.4000/com.5378>.
- Miletic-Drder M., 2008.** Third International Workshop. Digital Approaches to Cartographic Cultural Heritage. Report Conferences and Exhibitions, Barcelona 26-27 juin, 2008. [Kartografija i geoinformacije](http://kartografija.i.geoinformacije), Vol. 7 No. 10. <https://hrcak.srce.hr/33354>.
- Minasny B. and McBratney A.B., 2008.** Chapter 34 : Methodologies for Global Soil Mapping. pp : 429-436. In Boettinger, J. L., Howell, D. W., Moore, A. C., Hartemink, A. E., & Kienast-Brown, S. (Eds.). (2010). *Digital soil mapping: Bridging research, environmental application, and operation*. Springer Science & Business Media,
- Minasny B. and McBratney A.B., 2010.** Chapter 34 : Methodologies for Global Soil Mapping. In : J.L. Boettinger et al. (eds.), *Digital Soil Mapping*, Progress in Soil Science 2. C_Springer+Science +Business Media B.V. 2010. http://doi.10.1007/978-90-481-8863-5_34.
- Minasny B. and McBratney AB., 2016.** Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma* 2016; 264: 301–311
- Mitas L. and Mitasova, H., 2005.** Spatial Interpolation. In: Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J. and Rhind, D.W., Eds., *Geographic Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*, 2nd Edition, Vol. 1, Part 2, Chapter 34. www.geos.ed.ac.uk/~gisteac/gis_book_abridged/.
- Mneneroux Y., 2019.** Introduction à la Géostatistique. Variographie, krigeage, interpolation et simulation. Laboratoire en Sciences et Technologies de l'Information Géographique (LaSTIG) et Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), (<http://cours-fad-public.ensg.eu/>), 189p.
- Montoroï J.P. et Rieu, M. 1987** Calcul des activités ioniques dans une solution aqueuse: programme ACTIVE pour IBM-PC et compatibles. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 1987. 23(2): 133-150.
- Montoroï J.P., 1993.** Cours sur les sols salés. D.E.S.S. Gestion des systèmes agro-sylvo pastoraux en zones tropicales, Université de PARISXII.IRD, Département Eaux Continentales de l'ORSTOM, 55p. <https://www.researchgate.net/publication/299561871>.
- Montoroï J.P., 2017.** **La salinisation des écosystèmes. De la dégradation insidieuse à la remédiation continue par les hommes.** La revue Liaison Énergie-Francophonie, l'Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD), Québec (Québec) G1K 4A1 ; Canada ; NUMÉRO 105 — 2e trimestre 2017.
- Moran C.J. and Bui E.N., 2002.** Spatial data mining for enhanced soil map modelling. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 16 (6), 533–549. <http://dx.doi.org/10.1080/13658810210138715>.
- Moreau R., 1989.** Démarche et perspectives en pédologie pour une utilisation agricole rationnelle des sols. *SOLTROP* 89, pp : 214- 241.

- Morel R., 1989.** Les sols cultivés. Ed. Lavoisier / Tec et Doc, 2ème édition (12/1996), Paris, 384p.
- Morse J.W. and Arvidson R.S., 2002** The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate. *Minerals EarthSci. Rev.* 58, 51–84.
- Mtimet A. et Hachicha M., 1998.** Gestion durable de l'eau et du sol dans les oasis tunisiennes. In: 16th ISSS world congress, August 1998, Montpellier, France.
- Munns R., 2002.** Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Environment*, Vol.25, n°2, pp.239-250.
- Musy A. et Soutter M., 1991.** Physique des sols. 23e éd. [Lausanne, Press Polytechnic. UNIV. ROM., 1991, 350 P., 250 FIG.](#) Collection gérer l'environnement, 6p.

N

- National SUDS Working Group " N.S.W.G.", 2004.** Interim Code of Practice for Sustainable Drainage Systems. Published by the National SUDS Working Group: www.ciria.org/suds/icop.htm. July 2004. ISBN 0-86017-904-4. 58p.
- Navarro-Pedreno J., Jordan M. M., Melendez-Pastor I., Gomez I., Juan P. and Mateu J., 2007.** Estimation of soil salinity in semi-arid land using a geostatistical model. *Land Degradation & Development*, 18: 339–353.
- N'Diaye M.K. et Guindo D., 1998.** Evolution des sols irrigués de la Vallée du Niger (Mali). Sodisation et alcalinisation sous riziculture. *Etude et Gestion des sols*, 5, 4, 1998- pp :269-276.
- Nettleton W.D.; Bushue L.; Doolittle J.A.; Endres T.J. and Indorante S.J. 1994,** Sodium-Affected Soil Identification in South-Central Illinois by Electromagnetic Induction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1190–1193. [CrossRef].
- Neurdin-Trescartes J., 1992.** Etude du remplissage sédimentaire du bassin Néogène du Chéelif, modèle de référence de bassin intra-montagneux. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Pau et des Pays de l'Adour UPPA, France.
- Neurdin-Trescartes J., 1995.** Paléogéographie du Bassin du Chéelif (Algérie) au Miocène. Causes et conséquences. In: *Géologie Méditerranéenne*. Tome 22, numéro 2, 1995. pp. 61-71 : <https://doi.org/10.3406/geolm.1995.1569>.
- Nedjraoui D., 2001.** Ressources pastorales en Algérie. Profil Fourrager. Rapport d'étude F.A.O.-Organisation/ AG/AGP/AGPC.,33p.
- Nezli i.E., Achour S. et 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 Mya (Ouargla). *Larhyss/Journal*, no 06, pp. 121-134.
- Nijimbere S., 2014.** Physico-chimie de sols rizicultivés affectés par la salinité dans la basse vallée de la Rusizi au Burundi. Prom. : Dufey, Joseph ; Ruyikiri, Gervais. <http://hdl.handle.net/2078.1/151616>.
- Nogués, J., Robinson, D. A. and Herrero, J.,2006.** Incorporating electromagnetic induction methods into regional soil salinity survey of irrigation districts. *Soil Science Society of America Journal*, 70(6), 2075–2085.

O

- Obi J.C. and Udoh B.T., 2011.** Identification of Soil Management Factors from Spatially Variable Soil Properties of Coastal Plain Sands in Southeastern Nigeria. *Open Journal of Soil Science*, 2011, 1, 25-39 doi:10.4236/ojss.2011.12004 Published Online September 2011. <http://www.SciRP.org/journal/ojss>.
- Odeh I.O.A., McBratney A.B. and Chittleborough D.J., 1995.** Further results on prediction from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. *Geoderma* 67, 215–236.

Olender H.A., 1980. Analysis of a triangulated irregular network (tin) terrain model for military applications. Final report, 90p. Naval analysis program Office of naval research Arlington, Virginia 22217. 333 Ravenswood Avenue Menlo park, California 94025 U.S.A.

Osswald A., 2016. Étude du chlore organique dans les sols et de sa formation en conditions biotiques et abiotiques. Sciences de la Terre. Université de Lorraine, 2016. Français. 246p.

Ouamer-ali K., 2009. Contribution a l'étude des sols gypseux d'Algérie. Valorisation d'une banque de données et détermination des profils références. Thèse de Magister, ENSA, 155p. + 7 annexes. <http://hdl.handle.net/123456789/1341>.

Ouamer-ali K., Djili K. and Daoud Y., 2018. Assessment and Evaluation of the Conservative Character of the Calcite Residual Alkalinity in Drain Waters – A Case of Saline Soils Under an Arid Mediterranean Climate. Nat. Env. & Poll. Tech., Vol. 17 No. 4 pp. 1175-1182. **Website:** www.neptjournal.com.

Oulhaci D., 2016. Ruissellement interannuel en Algérie septentrionale (relation entre, ruissellement pluie et évaporation). Thèse de Doctorat en aménagement et construction hydrauliques, Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des sciences appliquées- département d'hydraulique et de génie civil, 154p. + 5 Annexes.

P

Pajarola R., Antonijuan M. and Lario R., 2002. QuadTIN: Quadtree based Triangulated Irregular Networks. In Proceedings IEEE Visualization 2002, pages 395–402. IEEE Computer Society Press, 2002. <https://www.ifi.uzh.ch/vmml/publications/quad-tin/QuadTIN>.

Pang S., Li T. X., Zhang X. F., Wang Y. D. and Yu H. Y., 2011. Spatial variability of cropland lead and its influencing factors: A case study in Shuangliu county, Sichuan province, China. *Geoderma*, 162(3-4), 223-230.

Paquet H., Bocquier G. et Millot G., 1966. Néof ormation et dégradation des minéraux argileux dans certains solonetz solodisés et vertisols du Tchad. In: Bulletin du Service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine : <https://doi.org/10.3406/sgeol.1966.1313>. Tome 19, n°3-4, 1966. Sédimentologie et géochimie de la surface. pp. 295-321;

PazGonzales A., Vieira S.R. and Castro T., 2000. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon, *Geoderma*, 97,273-292.

Pernes-Debuysse A. et Tessier D., 2002. Influence du pH sur les propriétés des sols : l'essai de longue durée des 42 parcelles à Versailles pH effect on soils properties: long time experiment of 42 plots in Versailles. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 15, 27–39. <http://doi.org/10.7202/705484ar>.

Perrodon A., 1957. Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie nord-occidentale, Publi. Servi. Carte. Géol. Alger., 12, 343 pp.,96 Fig.+ 8 pl photos+ 4 pl.ht.

Perrodon A., 1971. Essai de classification des bassins sédimentaires. Sciences de la Terre, XVI, 2 :195-227.

Peucker T. K., Fowler R., Little J.] and Mark D. M., 1976. Digital Representation of Three-Dimensional Surfaces by Triangulated Irregular Networks (TIN), Technical Report No. 10, Office of Naval Research, U.S.A.

Peters J. et Gould S.A.,1972. Etude agropédologique du périmètre irrigué de la Mina. ANRH (Ex., INRH), Alger

Piikki K., Söderström M. and Stadig H., 2017. Local adaptation of a national digital soil map for use in precision agriculture. *Advances in Animal Biosciences: Precision Agriculture (ECPA)*. 8:2, pp 430–432 © The Animal Consortium 2017. <http://doi:10.1017/S2040470017000966>.

Pimentel Gomes, F. and Garcia, C.H., 2002. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 309p.

Polvèche J., 1960. Contribution à l'étude géologique de l'Ouarsenis Oranais» Bultin 2 vol., 577 p., 169 fig., 20 pl.photos h.-t., 1 carte géologique en couleurs à 1/200 000.

Pomel A., 1892 Sur la classification des terrains miocènes de l'Algérie et réponses aux critiques de M. Peron. *Bulletin de la Société géologique de France*, série 3, 20: 166-174.

Pouget M., 1968. Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le sud tunisien. Cah. ORSTOM. Ser. Pédologie, VI, 103, 4,309 – 336.

Pouget M., 1980. Les relations sol-végétation dans les steppes Sud Algéroises. Trav. Doc.ORSTOM.116, 555P.

Pourcher Ch., 1900. La Plaine du Chéelif. Description physique, climat, le Cheliff, irrigations, conditions générales de la culture, notices sur les produits agricoles, vigne, bétail. Document Imprimerie orientale, P Fontana et C°, Rue d'Orléans, 29, 45p.

Programme des Nations Unies pour le Développement, PNUD, 2009. Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie. Rapport national, 19 p.

Q

Quenum M., 2009. Cartographie à l'échelle de la parcelle agricole de variables indicatrices de la capacité des sols à fixer le phosphore à l'aide de la télédétection et des nouvelles technologies. Thèse de Doctorat. Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement. Université du Québec. 206 pp.

Quezel P. et Santas S., 1962. Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. Paris : CNRS, 1962. 1170 p.

Quezel P. et Simonneau P., 1960. Quelques aspects des plaines sublittorales de l'Oranie orientale. Trav. Sect. Pédologie et agrologie. D.H.E.R., 6, 1-27

Quezel P. et Simmoneau P., 1963. Contribution à l'étude phytosociologique du Sahara occidental. L'action des irrigations sur la végétation spontanée. *Ann. Agron.* 13: 221-253, Alger.

R

Rajaonarison L. M., 2015. Application de la géostatistique dans l'estimation des réserves du gisement de graphite d'Antsirakambo. Master en Ingénierie Minière, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, Département des Mines, 68p.+ 32 f.+ 9 ph.

Rata M., 2010. Variabilité spatio-temporelle de la salinité dans la plaine du Bas-Chéelif. Etablissement d'une base de données. Thèse Magister, UHBC, 142p.

Raunet M., 1979. Recherche et caractérisation pédologique d'un périmètre d'irrigation dans la plaine côtière de Djibouti. Document technique, Projet AVATAR, I.R.A.T., 56p.

Replin M.J., 1895. Etude Géologique des environs d'Orléansville. Thèse de Doctorat Es Sciences. Naturelles. Faculté des Sciences de Paris, 202p.

Rezak S., 2014. Hydrologie Algérienne : Synthèse des apports de crues sur Sig. Thèse de Doctorat Es-Sciences, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Faculté d'Architecture et de Génie Civil- Département d'Hydraulique, 154p

Rhoades, J.D. and Corwin D.L., 1981. Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:255-260.

Rhoades J. D., 1993. Electrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity. *Advances in agronomy*, 49, 201-251.

Rhoades J. D., Chanduvi F. and Lesch S., 1999. Soil salinity assessment. Methods and interpretation of electrical conductivity measurements (FAO Irrigation and Drainage Paper 57). Rome, Italy: Food and Agricultural Organization of the United Nations.

- Ribolzi O., Valles V. et Barbiero L., 1993.** Contrôle géochimique des eaux par la formation de calcite en milieu méditerranéen et en milieu tropical. Arguments d'équilibre et argument de bilan. *Science du sol* 31(1/2), 77-95.
- Richard L.A., 1954.** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Department of agriculture Handbook 60, 107p. Disponible sur: <http://www.usssl.ars.usda.gov>.
- Rivas-Martinez S., 1981.** Les étages bioclimatiques de la végétation de la péninsule ibérique. *Actas III Congr. Óptima. Anales Jard. Bot.. Madrid* 37 (2): 251-268.
- Rondeux J., 1993.** La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Ed. Les Presses Agronomiques. Gembloux Belgique, 541 p. + ill.
- Rozema J. and Flowers T., 2008.** Crops for a salinized world. *Science*, 1478-1480.
- R.P.F., 2008.** Référentiel Pédologique Français. Référentiel pédologique 2008 : Association française pour l'étude du sol (Afes). Éditions Quæ, ISBN: 978-2-7592-0186-0 ISSN: 1952-1251.435p
- Ruan C.-J., Silva J.A.T. da, Mopper S., Qin P. and Lutts S., 2010.** Halophyte Improvement for a Salinized World. *Critical Reviews in Plant Sciences* 29, 329–359.

S

- Saaoud M., 2014.** Evolution spatiale de la salinité des sols du Bas-Chélif. Thèse de Magister, ENSA, Département de Sciences du sol, 82p.+ 8p. annexes
- Saidi D., 1985.** Etude agropédologique de la plaine de la Mina (Relizane) et évaluation des propriétés physiques des sols. Thèse Ingénieur, INA., Alger 80 p.
- Saidi D., 2005.** Influence de la phase saline sur les propriétés physiques des matériaux argileux du Bas Cheliff, Thèse de Doctorat d'Etat, INA, Alger, Algérie, 200 p.
- Saidi D., 2012.** Relationship between cation exchange capacity and the saline phase of Cheliff soil. *Agricultural Sciences*, Vol.3, No.3, 434-443. <http://doi.org/10.4236/as.2012.33051>.
- Saidi D., Douaoui A., Le Bissonnais Y. et Walter C., 1999 -** Sensibilité des couches de surface des plaines du Chélif (Algérie) à la dégradation structurale. *Etude et Gestion des Sols*, 6 (1) : pp. 15-25
- Saidi D., Le Bissonnais Y., Duval O., Daoud Y. et Halitim A., 2004.** Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés physiques des sols de la plaine du Cheliff (Algérie). *Etude et Gestion des Sols*, pp. 137- 148.
- Saidi D., Le Bissonnais Y., Duval O., Daoud Y. et Tessier D., 2004.** Estimation et signification de la capacité d'échange cationique des sols salés du Cheliff (Algérie). *Etude et Gestion des Sols*, Volume 15, 4, 2008 – pp :241 à 253.
- Saidi D., Le Bissonnais Y., Duval O., Daoud Y. et Tessier D., 2008.** Estimation et signification de la capacité d'échange cationique des sols salés du Cheliff (Algérie). *étude et Gestion des Sols*, Volume 15, 4, 2008 - pages 241 à 253
- Saldi G., 2009.** Les cinétiques de dissolution et de précipitation de la magnésite aux conditions hydrothermales. Thèse de Doctorat, Géologie appliquée. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009. Français, 212p. + 30p.annexes
- Salim S. et Tessier D., 1998 -** Evolution des propriétés physiques et physico-chimiques de sols salés de la basse vallée de l'Euphrate (Syrie). *Etude et gestion des sols*. 5. 4, pp. 277-288
- Santa S., 1949.** Catalogue des plantes de l'Algérie occidentale et du Maroc oriental. *Bull. de la Soc. De Géo. Et d'Arch. De la Province d'Oran. Tome 72 Fascicule 226*, 7-128.
- Sarmadian F., Keshavarzi A., Odagiu A., Zahedi Gh. and Javadikia H., 2014.** Mapping of Spatial Variability of Soil Organic Carbon Based on Radial Basis Functions method. *ProEnvironment* 7(2014) 3 – 9. <http://journals.usamvcluj.ro/index.php/promediu>.
- Schiess S., 1995.** Alcalinisation des sols irrigués dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal: diagnostique

par évaluation du stock de carbonates. Travail pratique de diplôme EPFL/ORTOM, Département de Génie Rural IATE-Pédologie, document 35p+5annexes.

Scholtus N., 2003. Altération pédogénétique des argilites du Callovo-Oxfordien soumises à la végétation, 169p.

Sculla P., Franklina J., Chadwick O.A. and McArthur D., 2003. Predictive soil mapping: a review. *Progress in Physical Geography* 27,2 (2003) pp. 171–197.

Séguret S.A. et Emery X., 2019. Géostatistique de gisements de cuivre chiliens - 35 années de recherche appliquée. *Presses des Mines*, 264 p., 2019, Sciences de la terre et de l'environnement, 9782356715623. **Seilsepour M., Rashidi M. and Ghareei Khabbaz B., 2009.** Prediction of soil exchangeable sodium percentage based on soil sodium adsorption ratio. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 5 (1): 01-04, 2009.

Seltzer P., 1946. Le climat de l'Algérie. Inst. Météo. Et de Phys. Du globe. Univ. Alger, 219 p.

Semar A., Hartani T. and 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*. <http://doi.org/10.1007/s41207-019-0130-0>.

Sene J.H.B., Matty F. et Diatta M., 2014. Caractérisation des sols de la vallée rizicole de Tamra dans l'île de Mar, Centre-Ouest du Sénégal. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 8(2): 794-810, April 2014. ISSN 1997-342X (Online), ISSN 1991-8631 (Print). <http://ajol.info/index.php/ijbcs>.

Servant J.M., 1976. Sur quelques aspects de la pédogénèse en milieu halomorphe : l'exemple des sols salés de la région méditerranéenne française. *Annales de l'Institut National Agronomique*, Vol. 6, n°1, pp. 225-245.

Servant J., 1978. La salinité dans le sol et les eaux : caractéristiques et problèmes d'irrigation- drainage *Bull. B.R.G.M., section III (2) : pp. 123 -142*

Setianto A. and Triandini T., 2013. Comparison of Kriging and Inverse Distance Weighted (IDW) Interpolation Methods in lineament Extraction and analysis. *J. SE Asian Appl. Geol.*, Jan–Jun 2013, Vol. 5(1), pp. 21–29.

Sheets K.R.; Taylor, J.P. and Hendrickx J.M.H., 1994. Rapid Salinity Mapping by Electromagnetic Induction for Determining Riparian Restoration Potential. *Restor. Ecol.* 2, 242–246. [CrossRef]

Sheets K.R. and Hendricks. J.M.H. 1995. Non-invasive soil water content measurement using electromagnetic induction. *Water Resour.Res.*31:2401-2409.

Sheng J., Yang Y., Chen B. and Wu H., 2005. Spatial variability of soil total salt, pH and total alkalinity, *Soils* 37 (2005) 69–73.

Shi Z., Li Y., Wang R. C. and Makeshine F., 2005. Assessment of temporal and spatial variability of soil salinity in a coastal saline field. *Environ Geol* (2005) 48: 171–178. <http://doi.or/10.1007/s00254-005-1285-3>.

Shi J., Wang H., Xu J., Wu J., Liu X., Zhu H. and Yu C., 2007. Spatial distribution of heavy metals in soils: a case study of Changxing, China. *Environmental Geology*, 52, pp :1–10.

Simler R., 2012. Manuel pour DIAGRAMMES. 40p.

Simonneau P., 1953. Note préliminaire sur la végétation des sols salés d'Oranie. *Ann. Inst. nat. Rech. Agr.*, pp. 411–432.

Simonneau P., 1956. La Riziculture Dans Les Terrains Sales d'Oranie. Travaux des sections Pédologie et Agrologie. Bulletin n°2, 1956. Gouvernement général de l'Algérie. Direction de l'Hydraulique et de l'Équipement rural, S.E.S, Clairbois - Birmandreïs, Alger, 1957.

Slama F., 2004. La salinité et la production végétale. Ed. Centre de publication universitaire, Tunis, 163p.

Slavich P.G. and Petterson G.H., 1990. Estimating solution extract salinity from soil paste electrical conductivity. An evaluation of procedures. *Austr.J. Soil. Res.*28 : 517-522.

Slimane Ait-Saada E-D., 2007. Géographie, Imaginaire, Fiction : *La plaine du Chéelif à travers les textes*. Thèse de Doctorat de Lettres nouveau régime-Tome 1. Université de Cergy-Pontoise, UFR lettres et sciences humaines, Centre de recherche textes et francophonies, 116p.

S.N.R.E.P.A.L., 1952. Le bassin néogène du Chéelif. Publications du XIX^{ème} Congrès international de Géologie, Alger, Monographies régionales, série 1, 16: 56 p.

Soil Survey Staff, 1999. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, 2nd edition. Agricultural Handbook 436, Natural Resources Conservation Service, USDA, Washington DC, USA, pp. 869.

Solar R., 2016. Map Libraries - Challenges for the Future. *e-Perimtron*, Vol. 11, No.2, 2016, pp :90-98. <http://www.e-perimtron.org>. ISSN 1790-3769.

Sonon L. S., Saha U. and Kisse D.E., 2015. Soil Salinity Testing, Data Interpretation and Recommendations Visual Diagnosis of Salt-Affected Soils, UGA Cooperative Extension Circular 1019, The University of Georgia, Fort Valley State University, the U.S. Department of Agriculture and counties of the state cooperating. UGA Extension offers educational programs, 6p.

Stavi I., Thevs N. and Priori S., 2021. Soil Salinity and Sodicity in Drylands: A Review of Causes, Effects, Monitoring, and Restoration Measures. *Front. Environ. Sci.* 9:712831. <https://doi:10.3389/fenvs.2021.712831>.

Steichen P., 2013. Terres, sols et sécurité alimentaire. *Revue juridique de l'environnement*. Volume38-2013/4, pp 595-612. https://www.persee.fr/doc/rjenv_0397-0299_2013_num_38_4_6111.

Stumm W. and Morgan J. J., 1981. Aquatic Chemistry : *chemical equilibria and rates in natural waters*. John Wiley and Sons., 2nd ed. *New York, USA*.

Sudduth K. A., Drummond S. T. and Kitchen N. R., 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 31, pp 239-264.

Sudduth K.A., Brenton Myers D., Kitchen N.R. and Drummond S.T., 2013. Modeling soil electrical conductivity–depth relationships with data from proximal and penetrating ECa sensors. *Geoderma* 199 (2013) 12–21.

Sumner M. E., 1993. Sodic soils : New Perspectives. *Aust. J. Soils Res.*, 31, pp. 683-750.

Sumner M.E., Rengasamy, P. and Naidu, R. 1998. Sodic soils: a reappraisal. In Sumner, M.E. and Naidu, R. (eds) `Sodic Soils- Distribution, Properties, Management and Environmental Consequences'. Oxford University Press, New York, 3-1.

Sun W., Whelan B.M., Minasny B., McBratney A.B. and Whelan B., 2012. Evaluation of a local regression kriging approach for mapping apparent electrical conductivity of soil (ECa) at high resolution. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 175, 212–220.

Sun Y., Cheng Q., Lin J., Schellberg J. and Schulze Lammers P., 2013. Investigating soil physical properties and yield response in a grassland field using a dual-sensor penetrometer and EM38. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 176, 209–216.

Szypula B., 2016. Geomorphometric comparison of DEMs built by different interpolation methods. *Landform Analysis* 32: 45–58. <http://doi.org/10.12657/landfana.032.004>.

T

Taghizadeh-Mehrjardi, R., Minasny, B., Sarmadian, F. and Malone, B. P., 2013. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*, 213, 15–28.

- Taghizadeh-Mehrjardi R., Sarmadian F., Minasny B., Triantafilis J. and Omid M., 2014.** Digital Mapping of Soil Classes Using Decision Tree and Auxiliary Data in the Ardakan Region, Iran. *Arid Land Research and Management*, 28:147–168, 2014. <http://doi.org/10.1080/15324982.2013.828801>.
- Tamazouzt Z., 2013.** Relation entre la conductivité électrique de l'extrait de pate saturée et la conductivité électrique des différents extraits dilués (1/1, 1/2,5, 1/5/, 1/10) des sols du Bas-Chéiff « station de Hmadna ». master 2 Académique, Université de Saâd Dahlab, Blida, 36 p.
- Tanasa I. C., Niculita M., Rosca B. and Pirnau R., 2010.** Pedometric Techniques in Spatialisation of Soil Properties for Agricultural Land Evaluation. *Bulletin UASVM Agriculture*, 67(1). Print ISSN 1843-5246; Electronic ISSN 1843-5386, pp : 274-278.
- Tassin C., 2012.** Paysages végétaux du domaine méditerranéen. Bassin méditerranéen, Californie, Chili central, Afrique du sud, Australie méridionale. IRD Éditions : Institut de recherche pour le développement, ISBN: 978-2-7099-1731-5, 414p.
- Thiglit F.A., 1990.** L'effondrement de Boukadir (Bas-Cheliff Oriental). Causes Géologiques et risque lié à ce phénomène. Thèse d'ingénieur en géologie appliquée, USTHB., 89p.
- Thomas G., 1985.** Géodynamique d'un bassin intra montagneux : le bassin du bas Cheliff occidental (Algérie) durant le Moi-Plio-Quaternaire» Thèse de Doctorat d'Etat, Université Pau et des Pays de l'Adour UPPA, France, 594 p., 162 fig., 32 tabl.3 pl.h.t.
- Thomas D.R., 2003.** A general inductive approach for qualitative data analysis. School of Population Health, University of Auckland, August 2003, 11p.
- Touaf L., 2002.** Evaluation du niveau de salinité des sols du nord de l'Algérie. Thèse Magister, Département de Sciences du Sol, I.N.A., El-Harrach, 71p.
- Touhari F., 2015.** Etude de la Qualité des Eaux de la vallée du Haut Cheliff. Thèse de Doctorat Es-Sciences, ENSH, 179p.
- Toumi S., Meddi M., Mahé G. et Brou Y.T., 2013.** Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. *Hydrological Sciences Journal* 58 (7), 1–17.
- Tourdonnet S. et Vian J.F., 2015.** L'évolution des sciences du sol face à l'émergence de la notion de service écosystémique. Résultats d'une étude lexicométrique. Etude et Gestion des Sols, Volume 22, 2015 - pages 101 à 115.
- Tousmalani R., 2010.** Application of geophysical methods in agriculture. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 4 (12), 6433–6439.
- Triantafilis J., Laslett G.M. and Mcbratney A.B., 2000.** Calibrating an electromagnetic induction instrument to measure salinity in soil under irrigated cotton. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1009–1017.
- Triantafilis J., Lesch S.M., La Lau K. and Buchanan S.M., 2009.** Field level digital mapping of cation exchange capacity using electromagnetic induction and a hierarchical spatial regression model. *Australian Journal of Soil Research* 2009; 47(7): 651–663 Tsai, 1993).
- Tripathi R., Nayak A. K., Shahid M., Raja R., Panda B. B., Mohanty S. and Sahoo R. N., 2015.** Characterizing spatial variability of soil properties in salt affected coastal India using geostatistics and kriging. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(12), 10693-10703.
- Tsai V.J.D., 1993.** 'Delaunay triangulations in TIN creation: an overview and a linear-time algorithm', *International Journal of Geographical. Information Science*, 7:6, 501 – 524. [http : //doi.org/10.1080/02693799308901979](http://doi.org/10.1080/02693799308901979).
- Tsioukas V., Daniil M. and Livieratos E., 2006.** Possibilities and problems in close range non-contact 1:1 digitization of antique maps. *e-Perimtron*, Vol.1, No. 3, ISSN1790-3769., pp : 230-238. In e-perimtron, Thessaloniki Greece: http://www.eperimtron.Org/Vol_1_3/Tsioukas_Daniil_Livieratos.
- Tucci G.; Bonora V., Nobile A. and Bucalossi L., 2010.** Urban Heritage: the role of recording, documentation and information systems /. *ELETTRONICO*, pp. 22-25.

U.S. Salinity Laboratorie Staffe, 1954. Diagnostic and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A. Hardbook, n 60, 160p.

U.S. Salinity Laboratorie Staffe., 1996. Soil survey laboratory methods manual. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation, Service National Soil Survey Center Soil survey investigations report no. 42, Version 3.0, January 1996, 716p.

Valgma I., 2002. Using Mapinfo Vertical Mapper Interpolation Techniques For Estonian Oil Shale Reserve Calculations. study is financed by EstSF Grant No. 4870 Oil Shale Resource, 7p. References and additional information on Estonian oil shale can be found on page <http://www.ttu.ee/maeinst/mgis>.

Vallès V., Vallès A. M. et Dosso M.,1983. Irrigation des sols salés et doses de lessivage. *Cah. ORSTOM. Série Pédologie. XX, 2*, 119-127.

Vallès V., Bertrand R., Bourgeat F. et M. N'Diaye. 1989. Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques. *L'Agronomie Tropicale*, vol. 44, no. 3: 157-163.

Vallès V., Gholami M. et Lambert R. 1990 Chimie des eaux et alimentation du bassin versant de Djajerud (Iran). *Hydrol. cont.* 5(1), 61-69.

Van Beek C.G.E.M. and Van Breemen N. 1973 The alkalinity of alkali soils. *J. Soil Sci.* 24(1), 129-136.

Van Meirvenne M. and Mehlit T., 2010. Geostatistical Simulation for the Assessment of Regional Soil Pollution. *Geographical Analysis* 42 (2010) 121–135 r 2010 The Ohio State University

Vaughan P. J., Shouse P.J., Suarez D.L., Van Genuchten M.Th. and Ayars J.E., 2005. Analysis of field-scale salinization: A comparison of different modeling approaches. *J. Hydrol. Hydromech.*, 53, 2005, 2, 73–90.

Vaysse K., 2015. Application et développement de méthodes de cartographie numérique des propriétés des sols à l'échelle régionale : cas du Languedoc-Roussillon. Thèse de Doctorat, Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques Montpellier SupAgro, 190p.

Vaysse K. and Lagacherie P., 2015. Evaluating Digital Soil Mapping approaches for mapping GlobalSoilMap soil properties from legacy data in Languedoc-Roussillon (France). *Geoderma Regional.* 4:20-30.

Vengosh, V., 2003. Salinization and Saline Environments. *Treatise Geochem.* 2003, 9, 612

Venteris E., Basta N., Bigham J. and Rea R., 2014. Modeling spatial patterns in soil arsenic to estimate natural baseline concentrations, *J. Environ. Qual.* 43 (3) 936–946

Vergnolle C., 1985. Géométrie du remplissage sédimentaire des bassins de Sarria et Monforte (Galice, Espagne) et évolution géomorphologique Régionale. In: *Mélanges de la Casa de Velázquez*, tome 21, 1985. pp. 331-346; doi : <https://doi.org/10.3406/casa.1985.2449>.

Vincent K., 2007. Uncertainty in adaptive capacity and the importance of scale. *Global Environ. Change*, 17, 12–24, 2007.

Vicente-Serrano S.M., Saz-Sánchez M.A. and Cuadrat J.M., 2003. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate Research*, 24: 161-180.

Virgilio ND., Monti A. and Venturi G., 2007. Spatial variability of switchgrass (*Panicumvirgatum* L.) yield as related to soil parameters in a small field. *Field Crop. Res.*, 101: 232-239.

Visconti F. and de Paz J.M., 2016. Electrical Conductivity Measurements in Agriculture: The Assessment of Soil Salinity. World's largest Science, Technology & Medicine Open Access book publisher. **Chapter 5** from the book *New Trends and Developments in Metrology*: <http://doi.org/10.5772/62741>, pp : 2-29.

Vlotman W.F., 2000. Calibrating the EM38.M38 Workshop : Proceedings. New Delhi, India. Feb. 4. 2000: <https://edepot.wur.nl/80648>; pp : 1-21. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ ILRI, 106p.

Voltz M., Lagacherie P. and Louchart X., 1997. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area. *European Journal of Soil Science*, 48(1), 19-30.

W

Walter C., McBratney A.B., Douaoui A. and Minasny B., 2001. Spatial prediction of topsoil salinity in the Cheliff Valley, Algeria, using local ordinary kriging with local variograms versus whole-area variogram. *Australian Journal of Soil Research* 39, 259–272.

Walter C., 2002. Analyse spatiale des sols en vue de leur gestion précise et de leur surveillance. Diplôme d'habilitation à diriger des recherches, Université d'Henri Poincaré de Nancy, association ENSAR et INRA, 94p.

Walter C., Lagacherie P. and Follain S., 2006. Integrating pedological knowledge into digital soil mapping. In: Lagacherie, P., McBratney, A.B., Voltz, M. (Eds.), *Developments in Soil Science*. Elsevier, pp. 281–300.

Wang H.J., Ren S.T., Hao Z.X., Leng L., Wei W and Jing C. 2016 Quantitative evaluation and uncertainty assessment on geostatistical simulation of soil salinity using electromagnetic induction technique. *Journal of Environmental Protection*, 2016,7, 844-854: <http://dx.doi.org/104236/jep.2016.76077>.

Wang J., Sun Q., Shang J., Zhang J., Wu F., Zhou G. and Dai Q., 2020. A New Approach for Estimating Soil Salinity Using A Low-Cost Soil Sensor In Situ: A Case Study in Saline Regions of China's East Coast . *Remote Sens.* 2020, 12, 239. <https://doi.org/10.3390/rs12020239>.

Waskom R., Bauder T. and Sternlieb F., 2012. Advancing agricultural water conservation in Colorado. *Irrigated Agriculture Responds to Water Use Challenges—Strategies for Success*, 101.

Webster R. and Burrough P. A., 1972 .*Journal of Soil Sci.* 23, 210.

Webster R. and Oliver M. A., 2007. *Geostatistics for Environmental Scientists*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley.

Wicke B., Smeets E., Dornburg V., Vashev B., Gaiser T. Turkenburg W. and Faaij A., 2011. The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils. *Energy Environ. Sci.*, 2011, 4, 2669–2681 | 2669. <https://doi:10.1039/c1ee01029h>.

Wollenhaupt N. C., Richardson J. L., Foss J. E. and Doll E.C., 1986. A rapid method for estimating weighted soil salinity from apparent soil electrical conductivity measured with an above ground electromagnetic induction meter. *Can. J. Soil Sci.* 66: 315-321.

WRB, 2014: World Reference Base for soil resources 2014 (mise à jour 2015). International soil classification system for naming soils and creating legends for soils maps. World Soil Resources Reports nr 106. FAO, Rome, Italy.

Y

Yacono X. 1955. Colonisation des plaines du Chéiff (de Lavigerie au confluent de la Mina) : Tome 1 et Tome 2, Alger, Imprimerie Imbert.

Yahi N. et Djellouli Y., 2010. Groupements forestiers et pré-forestiers à *Cedrus atlantica* Manetti d'Algérie : état des connaissances et dynamique des syntaxons. *Rev. For. Fr.* LXII - 3-4 : 309-316.

Yahiaoui I., 2011. Evaluation de la dynamique spatiale de l'occupation du sol dans la plaine du Bas – Cheliff (Algérie) Apport de la Télédétection. Thèse de Magister en sciences de la nature, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Faculté des Sciences Biologiques, 70p.

Yang F., Zhang G., Yin X. and Liu Z., 2011. Field-Scale Spatial Variation of Saline-Sodic Soil and Its Relation with Environmental Factors in Western Songnen Plain of China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2011, 8, 374-387; <http://doi:10.3390/ijerph8020374>.

Yao R.J.; Yang J.S. and Liu G.M. 2007. Calibration of soil electromagnetic conductivity in inverted salinity profiles with an integration method. *Pedosphere* 17, 246–256.

Yao R. and Yang J., 2010. Quantitative evaluation of soil salinity and its spatial distribution using electromagnetic induction method. *Agricultural Water Management* 97 (2010) 1961–1970.

Yao R., Yang J., Wu D., Xie W., Gao P. and Jin W., 2016. Digital Mapping of Soil Salinity and Crop Yield across a Coastal Agricultural Landscape Using Repeated Electromagnetic Induction (EMI) Surveys. *PLoS ONE* 11(5): e0153377. <http://doi:10.1371/journal.pone.0153377>.

Yu J., Li Y., Han G., Zhou D., Fu Y., Guan B. and Wang J., 2014. The spatial distribution characteristics of soil salinity in coastal zone of the Yellow River Delta. *Environmental Earth Sciences*, 72(2), 589-599.

Z

Zaman M., Shahid S.A. and Heng L., 2018. Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques. FAO/IAEA Open Access book. ISBN 978-3-319-96189-7 ISBN 978-3-319-96190-3 (eBook), 164p. Library of Congress Control Number: 2018949626. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3>.

Zandi S., Ghobakhlou A. and Sallis P., 2011. Evaluation of spatial interpolation techniques for mapping soil pH, International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 12–16 December, 2011, pp. 1153–1159.

Zante P., 1984. Caractérisation et évolution des propriétés hydriques des sols alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal. *Périmètre irrigué de Tilene (région du fleuve)*. ORSTOM, Centre de Dakar-Hann, 81 p. multigr.

Zante P. et Dieye K., 1985. Caractéristiques hydriques des sols de trois types de parcours du Ferla sableux. *ORSTOM, Centre de Dakar-Hann*, 55p. multigr.

Zare M., Ordookhani K., Emadi A. and Azarpanah A., 2014. Relationship Between Soil Exchangeable Sodium Percentage and Soil Sodium Adsorption Ratio in Marvdasht Plain, Iran. *Int. J. Adv. Biol. Biom. Res.* 2014; 2 (12), 2934-2939

Zawadzki J., Magiera T., Fabijańczyk P. and Kusza G., 2011. Geostatistical 3-dimensional integration of measurements of soil magnetic susceptibility. *Environ Monit Assess.* <http://doi.org/10.1007/s10661-011-2187-3>.

Zhang T.T., Zeng S.L., Gao Y., Ouyang Z.T., Li B., Fang C.M. and Zhao B., 2011. Using hyperspectral vegetation indices as a proxy to monitor soil salinity. *Ecol. Indic.* 11, 1552–1562.

Zhang W.-T., Wu H-Q., Gui H.-B., Feng G.-L., Wang Z. and Sheng J.-D., 2014. Variability of Soil Salinity at Multiple Spatio-Temporal Scales and the Related Driving Factors in the Oasis Areas of Xinjiang, China. *Pedosphere* 24(6): 753{762, 2014. ISSN 1002-0160/CN 32-1315/P.

Zhang G.L., Liu F. and Song X.-D., 2017. Recent progress and future prospect of digital soil mapping: A review. *Journal of Integrative Agriculture* 2017, 16(12): 2871–2885. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

Zheng Z., Zhang F., Ma F., Chai X., Zhu Z., Shi J. and Zhang S., 2009. Spatiotemporal changes in soil salinity in a drip-irrigated field. *Geoderma* 149, 243-248

Zhu A.X., 1999. A personal construct-based knowledge acquisition process for natural resource mapping using GIS. *International Journal of Geographic Information Science* 13, 119–141.

Zhu A. X., Yang L., Li B., Qin Ch., English E., Burt J.E. and Zhou Ch., 2007. Chapter 20 : Purposive Sampling for Digital Soil Mapping for Areas with Limited Data. *In : A.E. Hartemink and al. (eds.), Digital Soil Mapping with Limited Data*, Springer Science + Business Media B.V., 245p.

Ziane A., Douaoui A. et Larid M., 2017. Estimation de la salinisation des sols de la plaine du Bas Cheliff par couplage entre la télédétection et le Modèle Numérique de Terrain. *Systèmes Agraires et Environnement*, 1(1), 09-20.

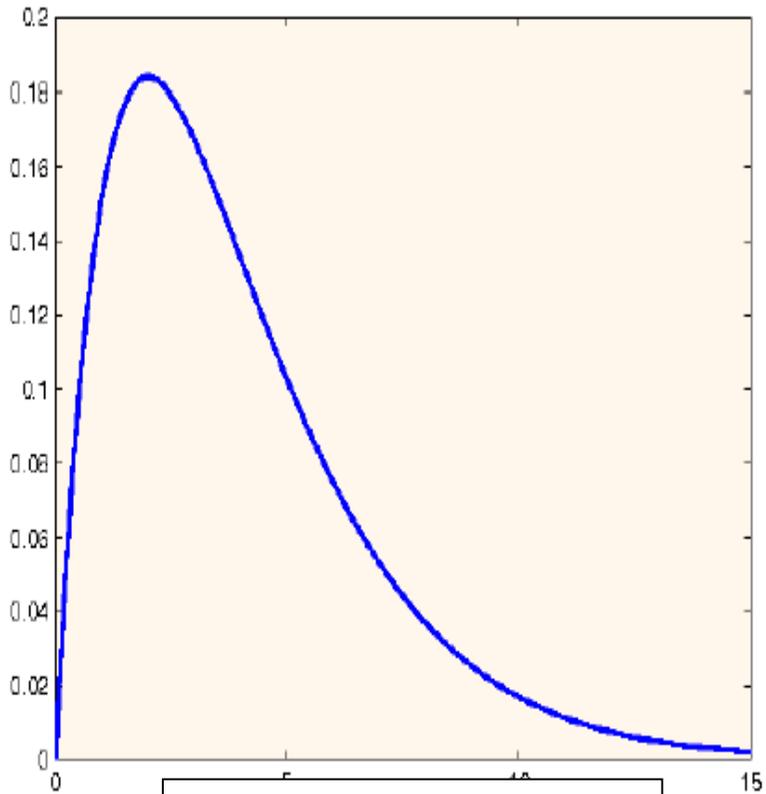
Ziane A., Douaoui A., Yahiaoui I., Pulido M., Larid M., Gulakhmadov A. and Chen, X., 2021. Upgrading the Salinity Index Estimation and Mapping Quality of Soil Salinity Using Artificial Neural Networks in the Lower-Cheliff Plain of Algeria in North Africa: Amélioration de l'estimation de l'indice de salinité et de la qualité de la cartographie de la salinité des sols en utilisant les réseaux de neurones artificiels dans la plaine du Bas Cheliff au Nord de l'Algérie. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1-15.

Annexe I.
Appréciation des gammes de *pH* (Bocoum, 2004)

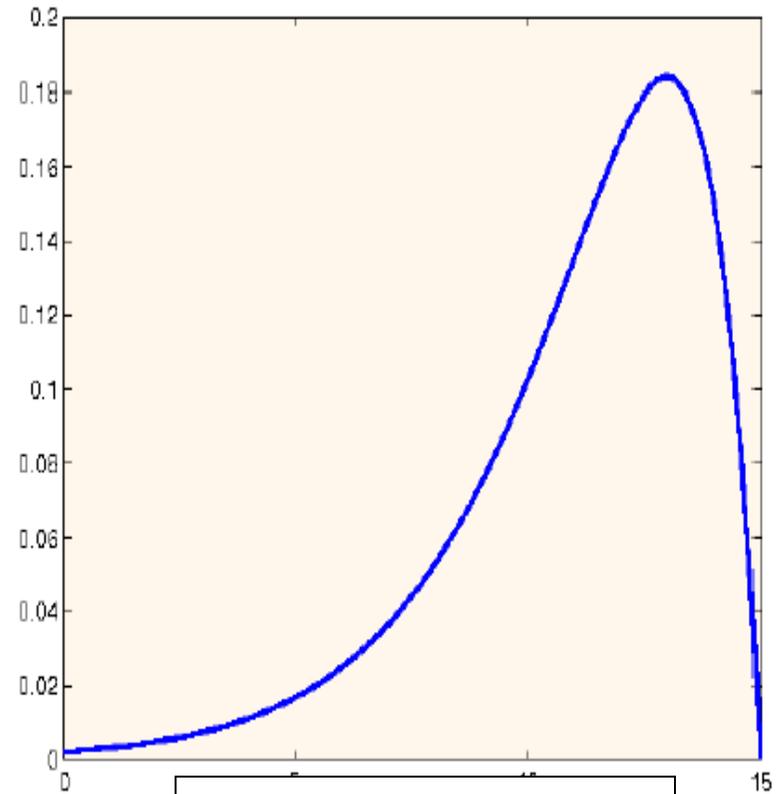
Classe de pH	Gammes d'identification
< 4,5	Extrêmement acide
4,6 - 5,2	Très acide
5,3 - 5,5	Acide
5,6 - 6,0	Modérément acide
6,1 - 6,6	Légèrement acide
6,7 - 7,2	Neutre
7,3 - 7,9	Légèrement alcalin
8,0 - 8,5	Alcalin
> 8,6	Très alcalin

Annexe II

Exemples des formes de répartitions asymétriques
(Dalalyan, 2011)



Asymétrie positive/
Dissymétrie à gauche



Asymétrie négative/
Dissymétrie à droite

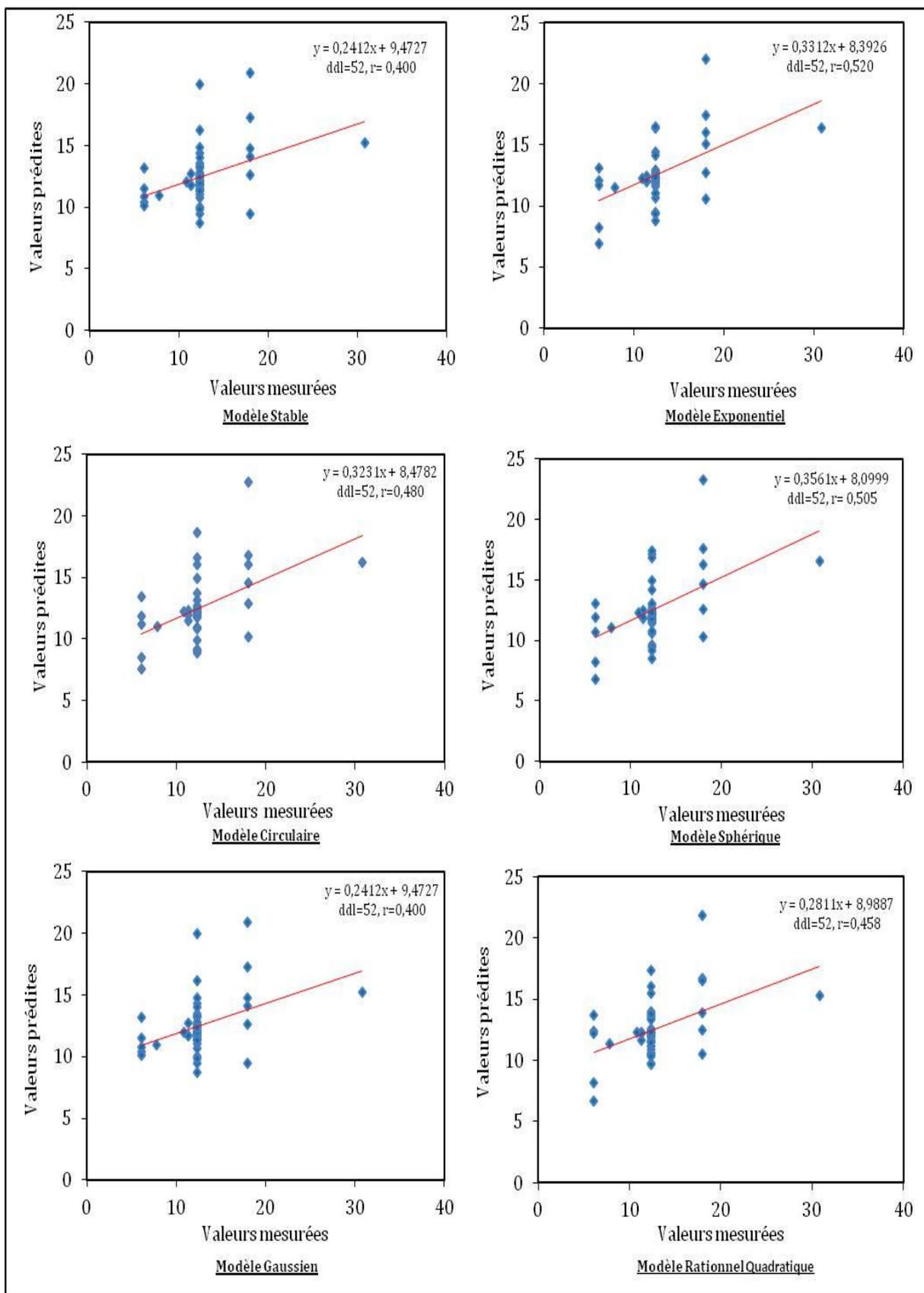
« Le coefficient d'asymétrie est positive pour la distribution à gauche et négative pour celle de droite »

Annexe III
Les valeurs critiques de r pour $\alpha = 0,05$; $0,01$; $0,001$
 (table de FISHER ajustée)

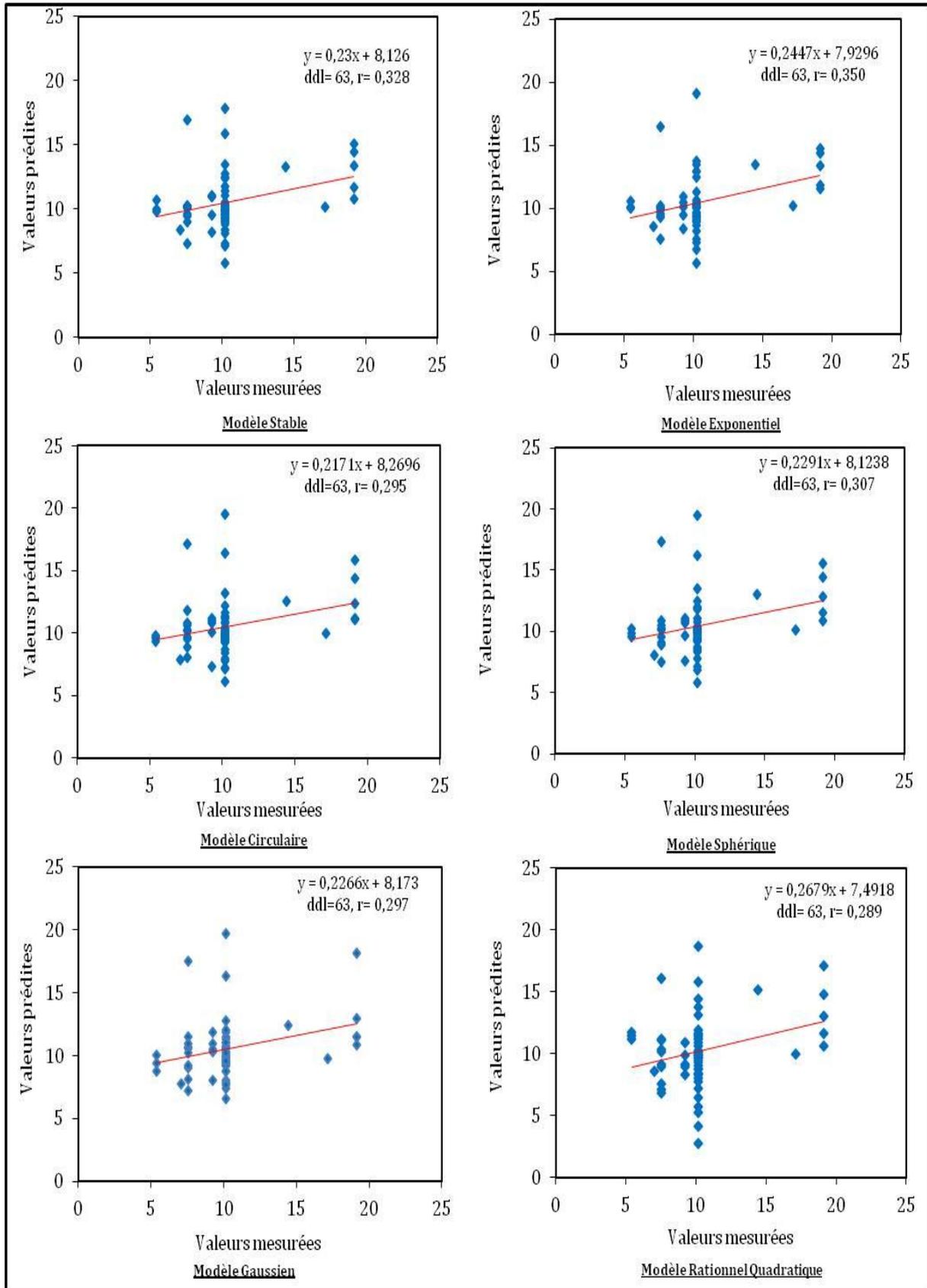
α k	0,05	0,01	0,001	
1	0,99692	0,999871	0,9999988	
2	0,95000	0,990000	0,99900	
3	0,8783	0,95873	0,99116	
4	0,8114	0,91720	0,97406	
5	0,7545	0,8745	0,95074	
6	0,7067	0,8343	0,92493	
7	0,6664	0,7977	0,8982	
8	0,6319	0,7646	0,8721	
9	0,6024	0,7348	0,8471	
10	0,5760	0,7079	0,8233	
11	0,5529	0,6835	0,8010	
12	0,5324	0,6614	0,7800	
13	0,5139	0,6444	0,7603	
14	0,4973	0,6226	0,7426	
15	0,4824	0,6055	0,7246	
16	0,4683	0,5897	0,7084	
17	0,4555	0,5751	0,6932	
18	0,4438	0,5614	0,6787	
19	0,4329	0,5487	0,6652	
20	0,4227	0,5368	0,6524	
25	0,3809	0,4869	0,5974	
30	0,3494	0,4487	0,5541	
35	0,3246	0,4182	0,5189	
40	0,3044	0,3932	0,4896	
45	0,2875	0,3721	0,4648	
50	0,2732	0,3541	0,4433	
60	0,2500	0,3248	0,4078	
70	0,2319	0,3017	0,3799	
80	0,2172	0,2830	0,3568	
90	0,2050	0,2673	0,3375	
100	0,1946	0,2540	0,3211	
/	/	/	/	
/	/	/	/	
/	/	/	/	
/	/	/	/	
Valeurs calculées {	200	0,1381	0,18088	0,22978
	500	0,0875	0,11488	0,1464

Annexe IV
Régression (simple) linéaire d'évaluation
entre les valeurs mesurées et prédites de $EC_{aff.}$ (dS/m)

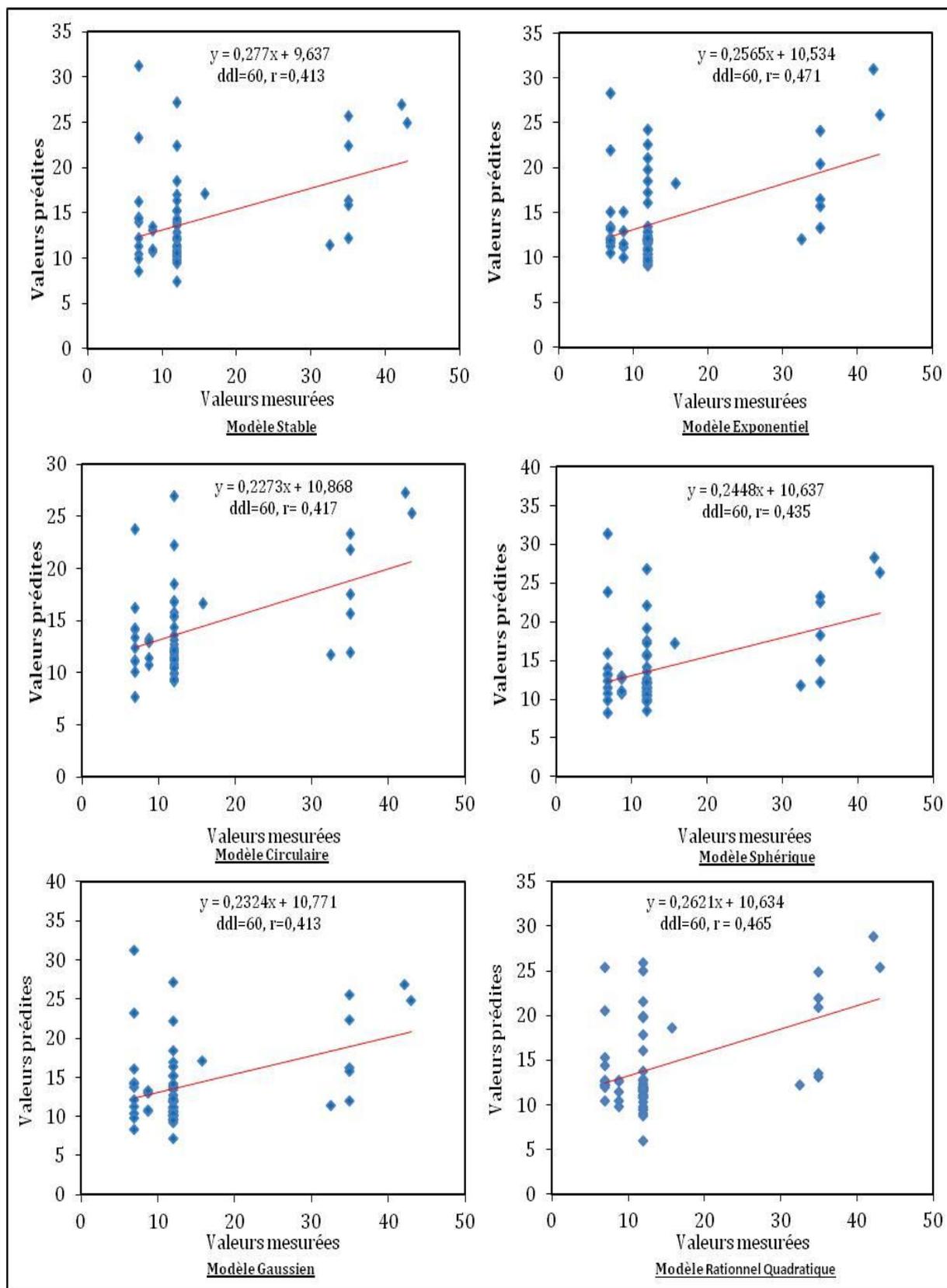
Visualisation de $h1$



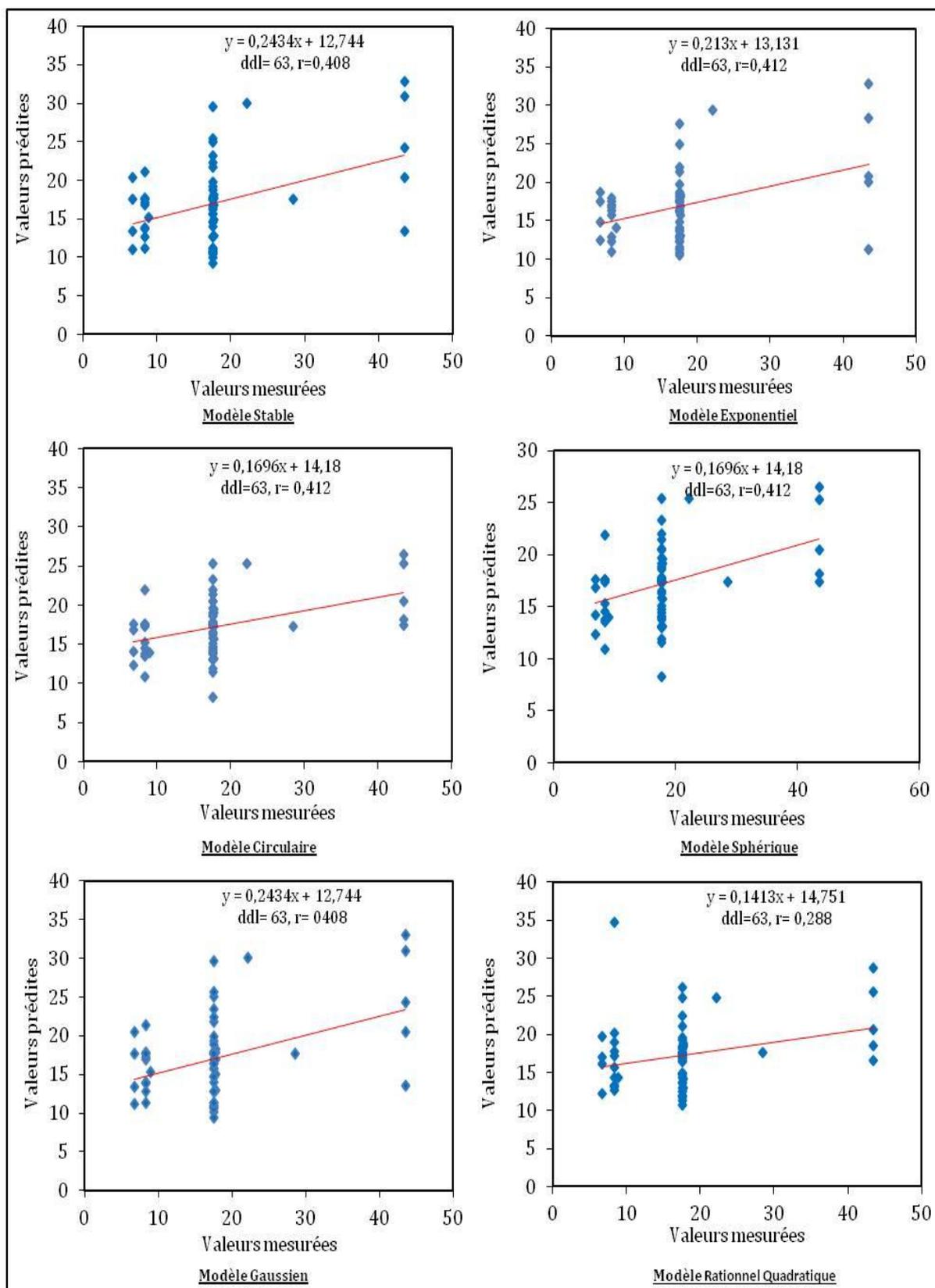
Visualisation de h_2



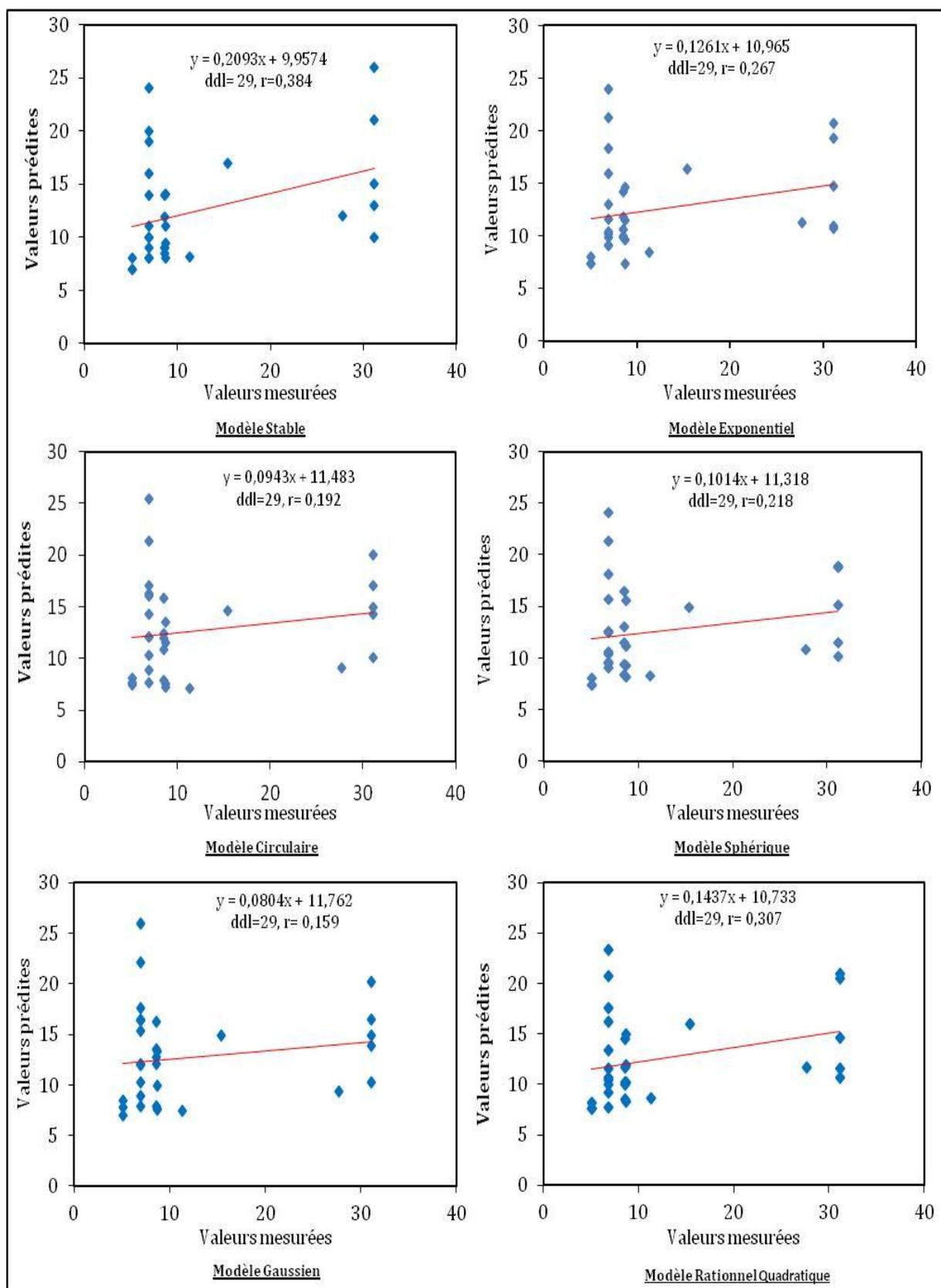
Visualisation de h_3



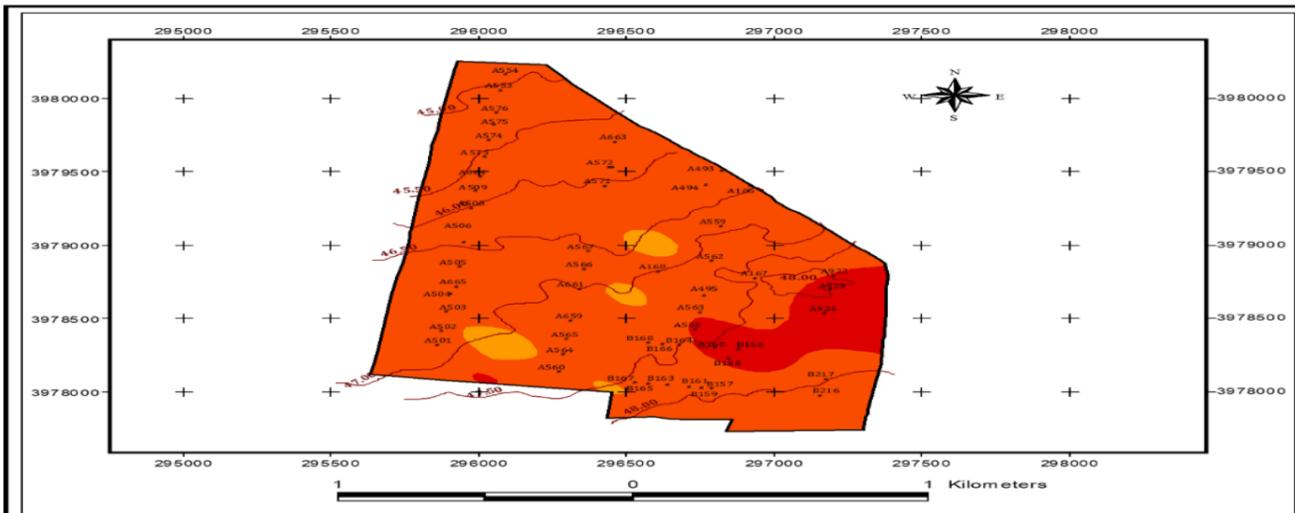
Visualisation de h_4



Visualisation de h5



Annexe V
Evaluation de la qualité des différents cartes de salinité de 1956
« Points d'étude »
Approche par horizon

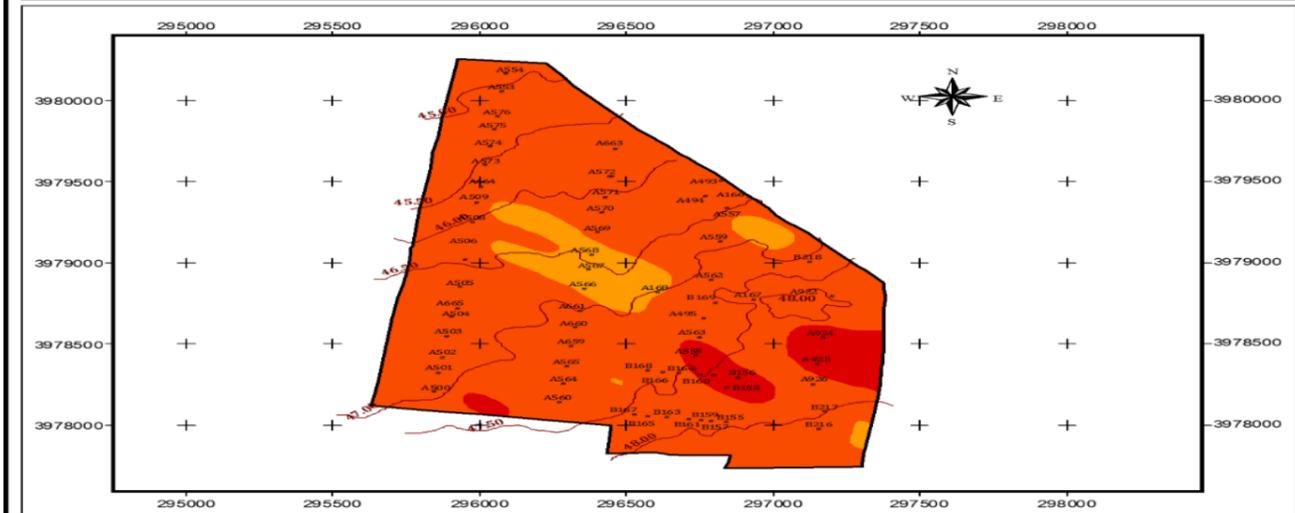


LEGENDE

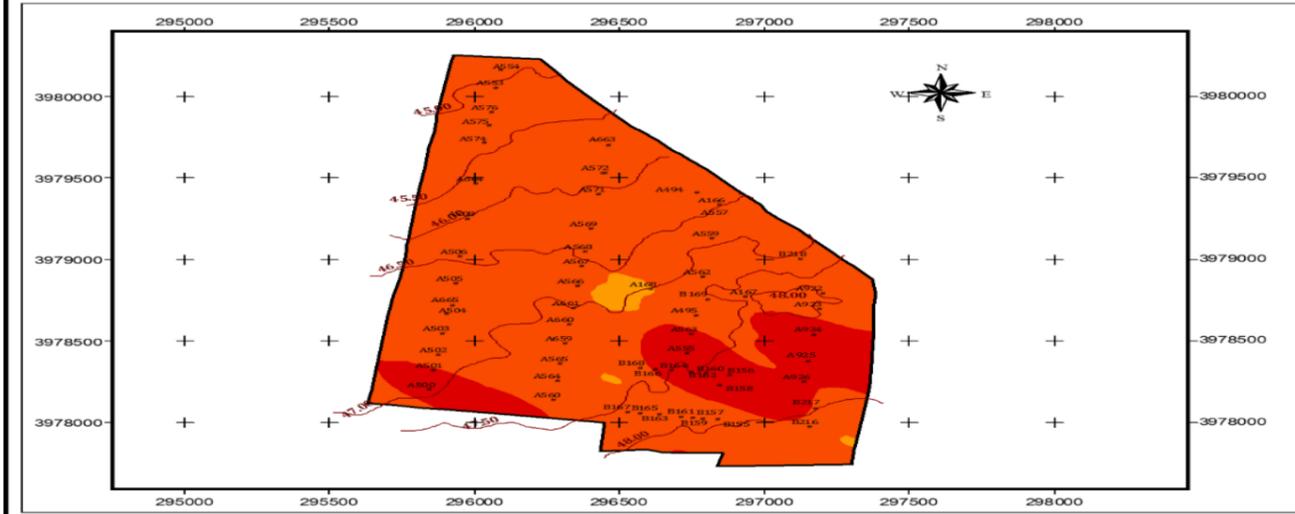
Profils
 Courbes de niveau
 Zone d'étude

Classes de salinité (mmhos/cm)

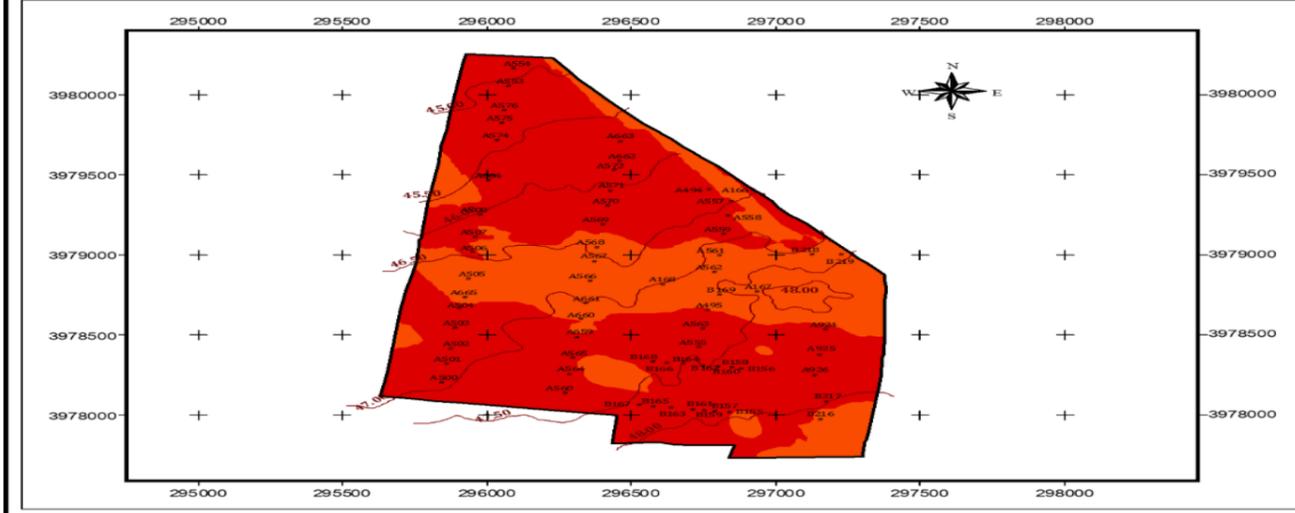
Yellow	< 2
Light Orange	2-4
Orange	4-8
Dark Orange	8-16
Red	> 16



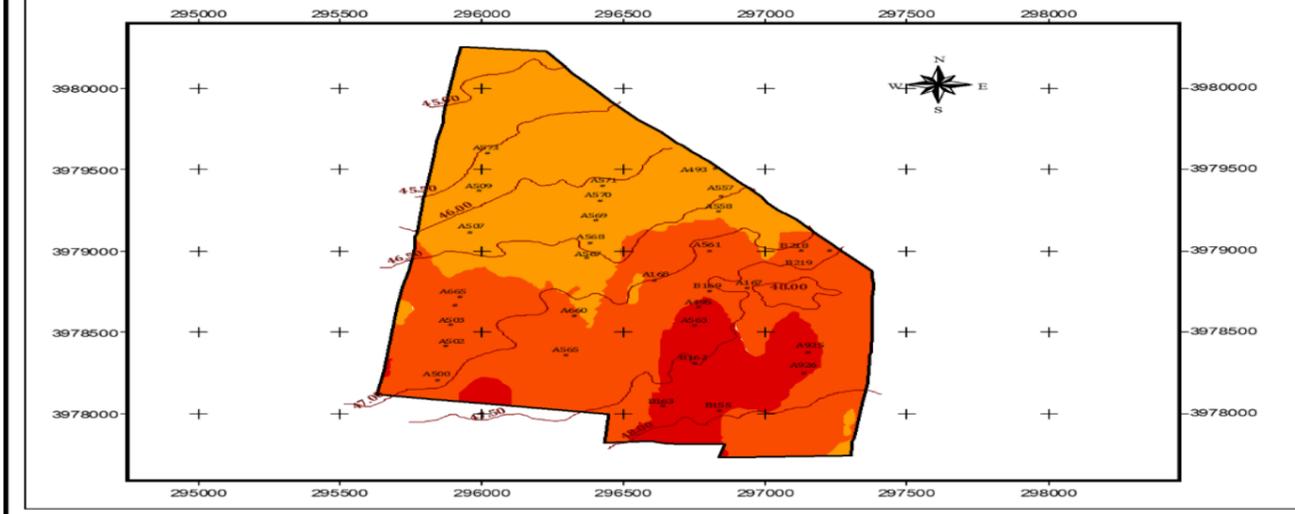
h1



h2



h3



h4

h5

Niveau de profondeur



Annexe VI
Appréciation des teneurs en Calc.tot. (%).
(Lozet et Mathieu, 1990 ; Djili, 2000)

Classe de Calc.tot	Gammes d'identification.
<2%	très faibles teneurs
2-10%	faibles teneurs
10-25%	teneurs moyennes
25-50%	fortes teneurs
>50%	très fortes teneurs

Annexe VII
Appréciation des teneurs en gypse (%).
(Barzanji, 1973 ; F.A.O, 1990)

Taux de gypse (%)	Classe caractéristique
<0,3	sol non gypsifère
0,3-10	sol faiblement gypsifère
10-15	sol modérément gypsifère
15-25	sol fortement gypsifère
25-50	sol extrêmement gypsifère

Annexe VIII
**Données non conformes aux normes d'applications pédologiques
par campagne de lecture EM38**

Campagne I

Partie 1

Formulation 2: $Y_{1,2...5} = EC_{a1,...a5} dS/m = EC_{e1} + EC_{e2} + EC_{e3} + EC_{e4} + EC_{e5} = EC_{es1.....es5}$

Tableau II. Matrice d'estimation de EC_c (dS/m)

C1	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150
Code point	EC_{es1}	EC_{es2}	EC_{es3}	EC_{es4}	EC_{es5}
A159	12,372	113,163	145,527	200,544	300,313
A500	10,106	153,713	207,788	292,522	421,128
A501	31,919	134,145	183,230	246,178	328,454
A505	12,425	157,026	214,068	301,633	428,278
A506	24,694	184,160	259,468	379,087	521,029
A554	25,598	99,075	128,611	175,580	248,233
A555	-55,534	143,956	176,944	251,022	446,849
A560	20,684	110,601	141,575	190,821	280,456
A566	-3,475	139,957	181,883	241,988	365,483
A570	29,677	88,414	109,941	146,381	213,245
A922	16,558	294,688	429,057	649,305	897,300
A924	8,839	135,772	180,781	249,279	360,670
B	26,256	116,920	155,806	210,813	289,586
E	32,990	97,746	129,667	177,422	238,514
P1	27,916	212,631	299,117	436,635	601,856
P119	45,591	84,042	108,720	149,471	199,298
P132	17,987	78,785	93,039	120,566	191,429
P140	-34,559	256,989	354,776	502,811	742,285
P150	33,139	120,826	160,915	223,197	308,318
P151	31,902	109,888	146,106	198,937	271,016
P173"	12,258	132,332	177,082	250,542	361,458
P187	-21,477	259,926	362,767	542,044	798,672
P193	8,088	226,877	318,446	466,081	660,912
P2	-5,474	149,277	197,763	280,488	423,660
P22	22,752	114,525	152,067	206,107	286,410
P238	10,084	157,637	216,316	308,333	437,622
P253	15,778	126,831	169,686	238,872	341,759
P283	36,005	73,470	88,870	116,443	168,435
P288	38,096	96,797	127,740	175,388	235,610
P52	22,111	110,688	143,896	197,857	284,613
P54	-0,971	129,026	173,324	243,866	355,980
P56	13,879	180,219	251,348	361,904	504,427
P62	30,488	97,215	128,770	175,218	236,592
P64	11,015	110,564	140,345	190,890	289,599
P70	18,995	106,512	139,516	188,858	268,232
P82	25,476	91,251	117,109	150,950	210,469
P83	39,042	103,256	138,713	188,877	247,197

Partie 2

Formulation 2 : $Y_{1,2...5} = EC_{\alpha_1, \dots, \alpha_5} dS/m = EC_{e_1} + EC_{e_2} + EC_{e_3} + EC_{e_4} + EC_{e_5} = EC_{es1, \dots, es5}$

Tableau II. Matrice d'estimation de EC_c (dS/m)

C1	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150
Code point	$EC_{es\ 1}$	$EC_{es\ 2}$	$EC_{es\ 3}$	$EC_{es\ 4}$	$EC_{es\ 5}$
B159	90,625	125,812	2,142	2,274	2,439
A500	124,325	174,163	2,338	2,486	2,644
A501	120,713	171,540	2,374	2,515	2,650
A505	125,831	176,290	2,353	2,501	2,656
A506	137,277	191,028	2,386	2,547	2,693
A554	65,910	90,432	2,039	2,162	2,311
A555	109,480	149,371	2,160	2,302	2,516
A560	93,824	133,173	2,204	2,330	2,486
A566	116,439	165,384	2,338	2,470	2,647
A570	57,844	82,841	2,016	2,124	2,278
A922	166,569	231,758	2,503	2,679	2,839
A924	107,296	150,448	2,270	2,407	2,571
B	84,789	119,917	2,198	2,321	2,473
E	54,661	72,520	2,009	2,136	2,258
P1	148,802	209,507	2,480	2,639	2,794
P119	51,227	71,318	1,934	2,060	2,147
P132	37,589	51,862	1,855	1,954	2,138
P140	164,451	232,080	2,567	2,726	2,910
P150	98,660	139,587	2,244	2,378	2,515
P151	88,122	123,898	2,192	2,323	2,455
P173"	102,373	140,965	2,203	2,346	2,505
P187	159,663	222,040	2,470	2,638	2,823
P193	154,449	216,517	2,480	2,643	2,807
P2	116,634	161,806	2,268	2,413	2,589
P22	82,925	116,426	2,172	2,296	2,450
P238	124,356	172,780	2,324	2,476	2,630
P253	101,042	139,194	2,195	2,339	2,490
P283	35,400	50,075	1,837	1,944	2,065
P288	71,455	98,297	2,080	2,214	2,322
P52	77,298	108,084	2,115	2,237	2,401
P54	94,149	127,774	2,150	2,292	2,455
P56	134,521	187,526	2,391	2,548	2,701
P62	47,239	62,769	1,979	2,097	2,234
P64	84,652	118,624	2,133	2,256	2,432
P70	76,125	105,655	2,109	2,233	2,389
P82	70,702	99,804	2,101	2,219	2,359
P83	74,397	102,931	2,140	2,273	2,380

Partie 3

Formulation 1: $Y_{1,2...5} = EC_{e1,...,5} dS/m = EC_{a1} + EC_{a2} + EC_{a3} + EC_{a4} + EC_{a5} = EC_{es1,...,es5}$

Tableau I. Matrice d'estimation de EC_{es} (dS/m)

C1	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150
Code point	EC_{es1}	EC_{es2}	EC_{es3}	EC_{es4}	EC_{es5}
B159	3,570	0,077	1,331	-3,083	1,207
A500	3,739	0,159	1,495	-3,202	1,317
A501	3,559	0,105	1,318	-3,056	1,163
A505	3,638	0,085	1,336	-3,158	1,212
A506	3,459	0,035	1,191	-2,995	1,076
A554	3,575	0,161	1,359	-2,988	1,184
A555	3,696	0,514	1,702	-2,825	1,220
A560	3,680	0,138	1,391	-3,181	1,235
A566	3,514	0,298	1,447	-2,830	1,273
A570	3,757	0,171	1,477	-3,228	1,300
A922	4,103	0,200	1,650	-3,595	1,509
A924	3,665	0,049	1,324	-3,210	1,217
B	3,797	0,149	1,485	-3,294	1,340
E	3,154	-0,054	1,057	-2,728	0,990
P1	3,846	0,178	1,524	-3,289	1,339
P119	3,206	-0,089	0,987	-2,819	0,973
P132	2,953	-0,095	0,909	-2,535	0,834
P140	3,943	0,169	1,560	-3,437	1,433
P150	3,562	0,067	1,292	-3,101	1,211
P151	3,787	0,115	1,442	-3,331	1,341
P173"	3,318	0,009	1,157	-2,910	1,061
P187	4,114	0,246	1,688	-3,594	1,521
P193	4,048	0,224	1,648	-3,505	1,486
P2	3,880	0,198	1,481	-3,383	1,283
P22	3,648	0,084	1,335	-3,180	1,227
P238	3,871	0,141	1,504	-3,374	1,371
P253	3,619	0,087	1,330	-3,129	1,196
P283	3,016	-0,189	0,856	-2,647	0,870
P288	3,263	-0,098	1,042	-2,856	1,009
P52	3,365	0,048	1,157	-2,812	1,062
P54	3,749	0,154	1,440	-3,205	1,286
P56	3,856	0,152	1,483	-3,315	1,351
P62	3,188	-0,078	0,992	-2,766	0,944
P64	3,269	-0,036	1,075	-2,834	1,013
P70	3,290	-0,039	1,133	-2,837	1,068
P82	3,574	0,069	1,292	-3,105	1,189
P83	3,680	0,069	1,346	-3,220	1,244

Campagne II

Partie 1

Formulation 2 : $Y_{1,2,\dots,5} = EC_{\alpha} dS/m = EC_{e1} + EC_{e2} + EC_{e3} + EC_{e4} + EC_{e5} = EC_{es1,\dots,es5}$

Tableau II. Matrice d'estimation de la EC_{es} (dS/m) de la CII

C2	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150
Code point	EC_{es1}	EC_{es2}	EC_{es3}	EC_{es4}	EC_{es5}
B159	513,482	724,530	914,111	1537,311	2087,226
A500	839,677	1186,875	1544,199	2548,694	3514,251
A501	812,954	1152,848	1506,943	2487,725	3435,801
A505	582,376	816,558	1025,813	1713,106	2346,501
A506	459,482	646,399	819,908	1359,575	1852,783
A554	517,752	726,802	926,097	1530,980	2088,526
A555	531,090	744,416	942,646	1568,154	2112,483
A560	645,762	908,943	1154,649	1927,603	2644,595
A566	423,937	597,004	755,675	1257,444	1701,331
A570	765,984	1081,425	1387,872	2315,676	3167,222
A922	1562,197	2201,105	2883,793	4734,786	6544,757
A924	609,853	856,566	1079,826	1808,864	2460,175
B	799,437	1119,693	1410,801	2364,941	3213,890
E	278,557	391,027	476,060	799,727	1089,652
P1	858,764	1198,832	1528,703	2522,974	3453,423
P119	283,649	396,407	506,934	813,588	1103,275
P132	228,220	327,615	425,613	695,621	963,068
P140	1090,925	1533,838	1992,601	3278,497	4499,528
P150	640,103	902,886	1162,513	1924,686	2645,608
P151	596,713	837,709	1071,161	1770,473	2405,679
P173"	514,185	721,983	928,254	1521,128	2079,369
P187	1597,856	2233,274	2869,723	4744,226	6489,372
P193	1222,610	1742,097	2335,025	3812,002	5293,629
P2	894,329	1253,626	1616,006	2656,127	3653,176
P22	495,763	700,591	910,247	1491,215	2041,804
P238	1061,845	1485,551	1877,055	3146,300	4277,947
P253	581,824	819,467	1039,825	1737,775	2371,496
P283	302,334	423,074	537,649	871,901	1181,459
P288	363,058	511,185	662,569	1072,259	1467,889
P52	491,307	688,466	880,087	1444,532	1966,143
P54	702,885	983,253	1255,782	2071,355	2813,892
P56	877,879	1214,537	1505,403	2519,485	3377,902
P62	290,595	411,520	531,109	859,051	1186,240
P64	364,900	513,083	645,471	1071,160	1453,003
P70	457,044	643,314	808,251	1352,449	1842,807
P82	732,694	1033,664	1340,415	2211,103	3031,782
P83	820,569	1147,968	1458,673	2426,035	3290,747

Partie 2

Formulation 1 $Y_{1,2...5} = EC_{e1,...,5} dS/m = EC_{a1} + EC_{a2} + EC_{a3} + EC_{a4} + EC_{a5} = EC_{es1,...,es5}$

Tableau I. Matrice d'estimation de EC_{es} (dS/m)

C2	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150
Code point	EC_{es1}	EC_{es2}	EC_{es3}	EC_{es4}	EC_{es5}
B159	0,621	18,438	20,073	1,940	23,521
A500	1,110	29,069	31,246	2,141	31,840
A501	1,108	30,208	31,993	2,145	32,316
A505	0,990	20,283	22,368	2,007	24,473
A506	0,780	16,167	18,066	1,861	20,968
A554	0,701	11,513	14,532	1,776	17,750
A555	0,468	12,573	15,693	1,823	20,442
A560	0,905	20,368	22,651	1,997	24,696
A566	0,544	14,106	15,961	1,814	20,011
A570	0,895	26,429	28,515	2,112	30,367
A922	1,415	41,697	44,556	2,461	43,870
A924	0,797	20,616	22,813	2,012	25,753
B	0,905	25,445	28,062	2,149	30,681
E	0,749	10,022	10,508	1,768	14,125
P1	1,038	21,298	25,016	2,039	26,924
P119	0,549	-2,751	0,843	1,379	5,457
P132	0,430	2,615	2,698	1,394	5,024
P140	1,197	33,207	36,082	2,261	36,719
P150	0,872	18,609	21,175	1,923	23,061
P151	0,793	19,094	21,774	1,936	24,701
P173"	0,825	13,394	16,354	1,784	18,955
P187	1,260	37,640	41,313	2,431	42,084
P193	1,370	42,428	44,086	2,371	42,599
P2	1,190	26,791	29,884	2,127	30,782
P22	0,823	17,531	19,597	1,828	21,651
P238	0,970	29,526	32,601	2,263	34,885
P253	0,774	19,059	21,184	1,957	23,902
P283	0,534	0,673	3,764	1,480	8,381
P288	0,723	6,392	9,135	1,563	11,979
P52	0,734	11,285	14,445	1,752	17,730
P54	0,919	21,787	24,888	2,016	27,503
P56	0,789	20,645	24,858	2,109	29,179
P62	1,061	15,749	16,102	1,718	17,044
P64	0,591	10,633	12,429	1,739	16,413
P70	0,761	16,895	18,449	1,902	21,463
P82	0,939	23,787	26,315	2,022	27,894
P83	0,844	23,017	26,287	2,080	29,207

Campagne III**Partie 1**

Formulation 2 : $Y_{1,2...5} = EC_{a1,...a5}dS/m = EC_{e1} + EC_{e2} + EC_{e3} + EC_{e4} + EC_{e5} = EC_{es1.....es5}$

Tableau II. Matrice d'estimation de EC_{es} (dS/m)

C3	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150
Code point	EC_{es1}	EC_{es2}	EC_{es3}	EC_{es4}	EC_{es5}
B159	99,892	134,429	191,259	268,042	361,556
A500	140,651	193,189	282,910	411,223	572,235
A501	143,211	196,407	285,731	410,577	575,426
A505	116,376	155,931	228,792	321,456	440,663
A506	95,626	126,172	183,700	246,868	349,939
A554	64,521	81,244	117,258	142,853	186,655
A555	129,964	178,004	254,309	368,524	513,790
A560	108,980	148,255	210,420	296,272	410,103
A566	87,200	110,526	158,968	204,658	284,543
A570	132,613	179,711	256,287	363,446	517,707
A922	234,891	328,451	507,873	768,021	1065,005
A924	104,876	140,147	200,212	277,965	389,530
B	98,016	128,694	184,748	250,108	359,733
E	128,364	174,247	249,924	357,185	510,073
P1	148,848	199,998	299,725	427,075	625,036
P119	52,249	62,052	94,635	105,718	149,467
P132	79,469	104,234	151,184	204,432	278,823
P140	219,024	302,117	440,657	649,839	937,703
P150	78,781	99,991	144,047	182,824	263,769
P151	94,560	125,126	180,277	239,040	323,418
P173"	77,035	98,472	141,928	184,850	249,530
P187	201,496	281,951	405,501	607,242	849,855
P193	208,987	294,808	431,543	652,076	900,773
P2	132,028	182,565	258,488	376,417	509,390
P22	79,084	102,304	147,006	191,354	265,196
P238	126,489	171,149	246,804	352,708	499,050
P253	80,837	102,872	146,109	187,808	270,860
P283	59,967	74,204	110,432	133,824	184,788
P288	72,700	92,041	134,014	172,322	240,470
P52	67,607	85,457	121,476	154,264	208,412
P54	102,445	136,670	197,881	275,292	387,455
P56	114,180	152,845	218,571	304,843	437,336
P62	88,120	116,666	169,408	230,173	309,545
P64	97,427	130,456	184,946	256,260	339,052
P70	86,788	115,095	164,943	224,835	306,552
P82	83,279	108,549	154,328	205,376	278,037
P83	91,282	118,651	167,074	223,052	307,414

Campagne IV**Partie 1**

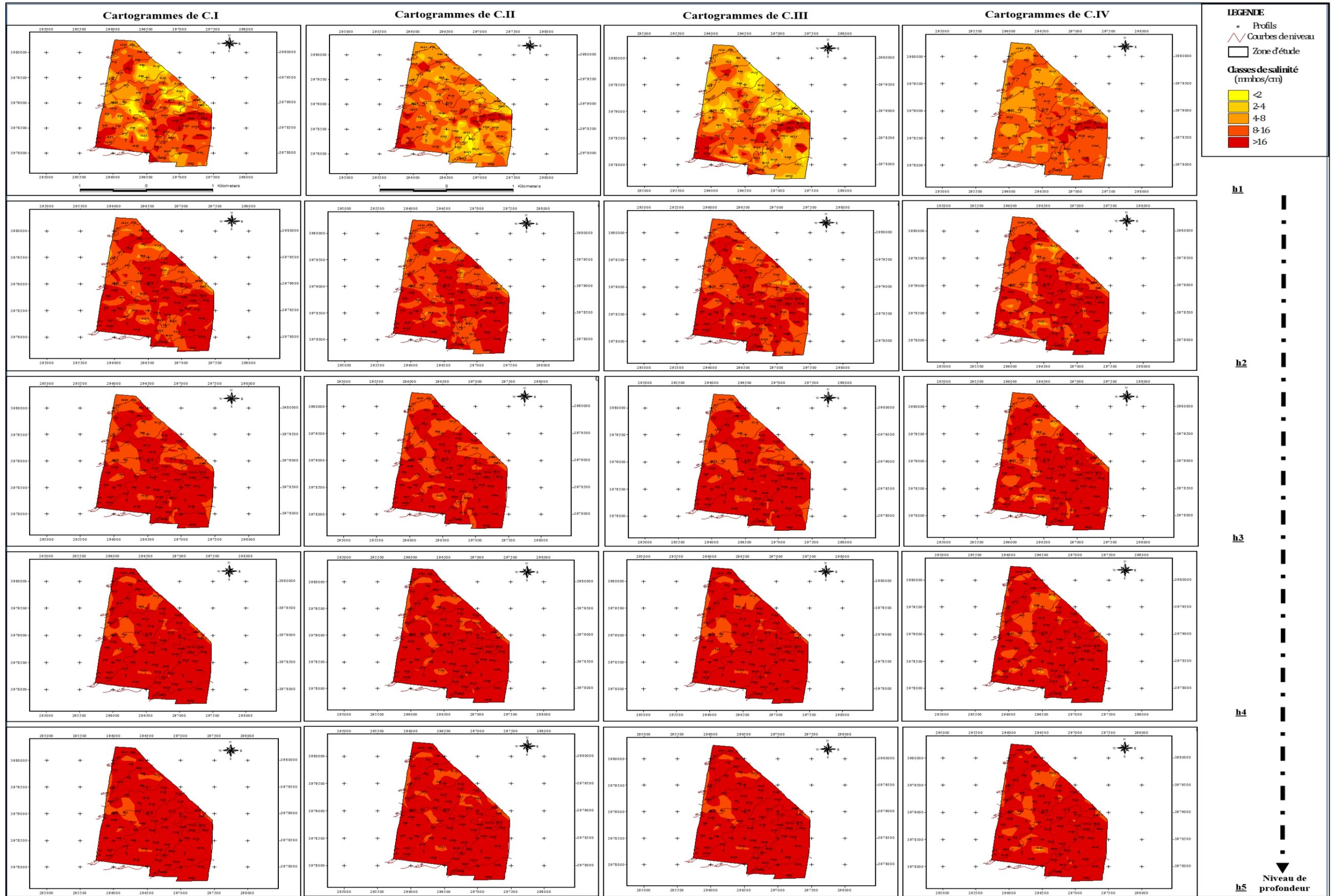
Formulation 2 : $Y_{1,2...5} = EC_{a1,...a5}dS/m = EC_{e1} + EC_{e2} + EC_{e3} + EC_{e4} + EC_{e5} = EC_{es1.....es5}$

Tableau II. Matrice d'estimation de EC_{es} (dS/m)

C4	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150
Code point	EC_{es1}	EC_{es2}	EC_{es3}	EC_{es4}	EC_{es5}
A159	1247,734	1398,620	2160,384	3243,620	4682,794
A500	1183,870	1403,555	2153,700	3226,966	4614,597
A501	1184,105	1427,185	2181,357	3315,209	4777,760
A505	979,141	1256,649	1890,772	2756,798	4060,356
A506	827,350	969,250	1484,908	2220,404	3183,850
A554	781,741	937,847	1431,842	2144,707	3030,257
A555	1777,878	2104,491	3235,547	4884,612	6911,989
A560	762,496	920,264	1405,249	2107,632	2991,293
A566	700,743	854,911	1301,234	1941,414	2750,230
A570	1521,719	1781,594	2739,654	4120,955	5866,031
A922	2707,778	3285,620	5040,432	7666,732	10695,253
A924	1041,543	1246,528	1908,895	2885,435	4102,755
B	1247,521	1505,318	2306,399	3475,768	4933,013
E	998,742	1198,364	1832,287	2746,844	3885,415
P1	1577,045	1809,653	2787,365	4145,771	5872,324
P119	444,147	538,597	814,004	1214,035	1708,598
P132	343,403	426,234	640,349	948,990	1322,514
P140	2354,161	2777,495	4273,344	6447,638	9132,834
P150	1314,331	1539,436	2365,362	3560,327	5089,757
P151	1099,147	1301,556	1996,637	2997,425	4257,699
P173"	841,067	1027,334	1566,637	2350,880	3306,658
P187	3281,949	3631,755	5639,839	8487,859	12424,579
P193	2720,922	3273,737	5028,488	7603,149	10703,711
P2	1618,045	1821,167	2813,220	4207,735	6072,867
P22	1007,766	1215,932	1859,877	2800,056	3957,396
P238	1837,476	2200,240	3379,175	5109,879	7261,458
P253	939,969	1123,135	1718,442	2590,491	3673,573
P283	505,668	620,120	938,560	1400,901	1969,424
P288	702,978	850,084	1292,452	1929,579	2753,932
P52	641,367	774,233	1178,212	1760,744	2489,312
P54	1204,436	1431,722	2195,145	3305,042	4687,046
P56	1726,260	2034,041	3128,253	4704,310	6670,819
P62	446,924	563,314	847,561	1256,495	1780,416
P64	518,788	660,550	996,796	1494,889	2093,098
P70	582,098	726,787	1102,275	1642,022	2310,954
P82	869,427	1050,400	1604,401	2407,021	3403,946
P83	1019,854	1214,824	1859,957	2785,962	3968,959

Annexe IX

**Evaluation de la qualité des différents cartogrammes de salinité
« Points de tests 1 et 2 »
Présentation et localisation par approche "Campagne et horizon d'étude"**



Dressée en 1955 par J. BOULAIN, Pédologue au Service de la Colonisation et de l'Hydraulique d'après des levés pédologiques effectués de 1950 à 1955.

Publiée en 1956 par l'Inspection Générale de l'Agriculture du Gouvernement Général de l'Algérie, MM. M. BARBUT étant Inspecteur Général de l'Agriculture, G. DROUHIN, Directeur du Service de la Colonisation et de l'Hydraulique, J. H. DURAND, Chef de la Section Pédologie du S. C. H.

Maquette exécutée et réalisation graphique assurée par R. JASEIX-BELLON, Cartographe.

Plaine d'Affreville

PLAINES DU CHELIF

Plaine de Carnot

Dressée en 1955 par J. BOULAIN, Pédologue au Service de la Colonisation et de l'Hydraulique, d'après des levés pédologiques effectués de 1951 à 1955.

Publiée en 1956 par l'Inspection Générale de l'Agriculture du Gouvernement Général de l'Algérie, MM. M. BARBUT étant Inspecteur Général de l'Agriculture, G. DROUHIN, Directeur du Service de la Colonisation et de l'Hydraulique, J. H. DURAND, Chef de la Section Pédologie du S. C. H.

Maquette exécutée et réalisation graphique assurée par R. JASEIX-BELLON, Cartographe.

Plaine d'Orléansville

Dressée en 1955 par J. BOULAIN, Pédologue au Service de la Colonisation et de l'Hydraulique, d'après des levés pédologiques effectués par G. AUBERT de 1938 à 1945 et par J. BOULAIN de 1950 à 1955.

Publiée en 1956 par l'Inspection Générale de l'Agriculture du Gouvernement Général de l'Algérie, MM. M. BARBUT étant Inspecteur Général de l'Agriculture, G. DROUHIN, Directeur du Service de la Colonisation et de l'Hydraulique, J. H. DURAND, Chef de la Section pédologie du S.C.H.

Maquette exécutée et réalisation graphique assurée par R. JASEIX-BELLON, Cartographe.

