



DEPARTEMENT D'AGRONOMIE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

MAAMAR Mahmoud

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN AGRONOMIE

Spécialité

GESTION DURABLE DE L'ENVIRONNEMENT

THÈME

**CARTOGRAPHIE, DE SALINITÉ DANS UNE
PARCELLE CULTIVÉE DE LA PLAINE DE
LA MINA (RELIZANE)**

Soutenu publiquement le 05 /06 /2016

DEVANT LE JURY

NOM Prénoms	Grade	Qualité	Structure
BENKHELIFA Mohammed	Pr	Président	Université de Mostaganem
GACEM Farid	MC	Encadreur	Université de Mostaganem
KRADIA Laïd	MC	Examinateur	Université de Mostaganem

**Thème réalisé au laboratoire régional ouest des analyses des sols et de l'eau
(INSID)**

Remerciements

Le présent travail est le fruit d'une longue chaîne de sacrifices, de courages et de privations. Il n'aurait pas abouti sans le concours de nombreuses personnes qui de près ou de loin ont contribué à sa réalisation. C'est avec une profonde gratitude que je les remercie...

Mes remerciements, avant tout, à DIEU tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a données durant toutes ces longues années d'études afin que je puisse arriver à ce stade

Je n'arrive pas à trouver de mots suffisamment forts pour exprimer Mes remerciements que j'ai à l'égard du monsieur « GACEM Farid » qui m'a donné la chance de travailler, le soutien et les conseils qu'il m'a prodigué tout au long de ce parcours de recherche, ainsi que l'autonomie qu'il m'a laissé, m'ont permis de réaliser cette thèse dans des conditions intellectuelles favorables au questionnement et à l'approfondissement de la pensée. Travailler avec lui est une expérience passionnante

A monsieur « M. BENKHLIFA Mohammed » professeur à l'université de Mostaganem de l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury.

A monsieur « KRADIA Laid » chargé de cours à l'université de Mostaganem pour m'avoir accepté d'examiner mon travail.

Dédicace

Ce travail est dédié

A mon « adorable père »

Papa je ne saurais te remercier assez pour tout ce que tu as fait pour mon éducation, pour tes conseils, et pour ton amour que Dieu le tout puissant te garde en santé et t'accorde longue vie ;

A la lumière de ma vie « ma mère »

Qui m'a toujours aidé et soutenu par ses prières et sa tendresse, que dieu la garde et la protège ;

A «Kaltoume»

Vous êtes toujours présente dans mon coeur, votre absence restera parmi mes plus grandes peines, je vous dédie chacune de ces pages

A mes soeurs, mes frères de tout mon coeur ;

Vous êtes ma joie et mon soutien ;

A ma famille et

A mes amis

Mahmoud

Résumé

Mots clés : Salinité; Conductivité électrique; Conductivité électromagnétique; Krigeage; Mina.

Le contrôle de la salinité, par la connaissance de sa distribution spatiale, devient nécessaire en vue d'aboutir à des stratégies de développement agricole durable. La méthode conventionnelle de détermination de la salinité, par la mesure de la conductivité électrique d'un extrait de la pâte saturée du sol (CEps), reste difficile à cause de la grande variabilité spatiale des teneurs en sels d'un point à un autre, qui rend cette méthode laborieuse. Comme solution alternative, l'induction électromagnétique par l'appareil (EM38), a été développée par Geonics Ltd (Canada) et peut être utilisée pour faciliter les mesures rapides de la salinité des sols au champ. Elle est rapide et permet une forte densité de points de mesure. Le présent travail vise l'étude de l'évolution spatio-temporelle de la salinité des sols, par l'utilisation de cette méthode, sur une parcelle cultivée représentative de la plaine de Mina (Relizane). Un ensemble de 909 mesures de la conductivité électromagnétique (CEM) ont été réalisées sur une grille régulière de 10 x 10 m avec l'instrument EM38, alors que 64 échantillons ont été prélevés pour la détermination de la conductivité électrique de la pâte saturée (CEps). Des modèles de régression linéaire simple ont été utilisés pour convertir les valeurs de CEM en CEps. L'élaboration des cartes de salinité s'est fondée sur ces valeurs calculées à travers l'équation de régression. Les résultats ont mis en évidence des profils salins de type descendants. Les valeurs les plus élevées de la conductivité électrique ont été trouvées au nord de la parcelle et les valeurs les faibles au sud.

Abstract

Keywords: Salinity, Electric conductivity, Electromagnetic conductivity, Krigeage, Mina

The salinity control, by the knowledge of its spatial distribution, is necessary in order to achieve sustainable agricultural development strategies. The conventional method of determining the salinity, By measuring the electric conductivity of an extract of the saturated paste of the soil (CEps), remains difficult because of the high spatial variability of the levels of salts from one point to another, which makes this laborious method. As an alternative solution, Electromagnetic induction by the apparatus (EM38), was developed by Geonics Ltd (Canada) and can be used to facilitate rapid soil salinity field measurements. It is fast and allows a high density of measurement points. This work aims to study the spatial and

temporal evolution of soil salinity, by using this method, by using this method on a representative parcel cultivated the plain of Mina (Relizane). A set of 909 measurements of the conductivity electromagnetic (CEM) were carried out on a regular grid of 10 x 10 m with the instrument EM38, While 64 samples were taken for determining the electrical conductivity of the saturated paste (CEps). Simple linear regression models were used to convert the values of CEM CEps. The development of salinity maps relied on these values computed through the regression equation. The results showed saline profiles descendants' kind. The highest values of the electrical conductivity were found north of the plot and the low values in the south.

ملخص

الكلمات الدالة : الملوحة ، الموصلية الكهربائية ، الموصلية الكهرومغناطيسية ، كريغ، مينا .

ومكافحة الملوحة، من خلال معرفة التوزيع المكاني، هو ضروري من أجل التوصل إلى استراتيجيات التنمية الزراعية المستدامة. الطريقة التقليدية لتحديد نسبة الملوحة عن طريق قياس التوصيل الكهربائي لمستخلص عجينة التربة المشبعة (CEps)، من الصعب بسبب التغيرات المكانية عالية من مستويات الأملاح من نقطة واحدة إلى أخرى مما يجعل هذه الطريقة شاقة. كبديل، الجهاز الحث الكهرومغناطيسي (EM38)، تم تطويره من قبل Geonics المحدودة (كندا)، ويمكن استخدامها لتسهيل إجراءات سريعة لملوحة التربة في هذا المجال. فهو سريع ويسمح كثافة عالية من نقاط القياس. ويهدف هذا العمل إلى دراسة تطور المكاني والزمني للملوحة التربة، وذلك باستخدام هذا الأسلوب على طرد ممثل المزرعة سهل مينا (غليزان). نفذت مجموعة من 909 قياسات الكهرومغناطيسية الموصلية (CEM) من على الشبكة العادية من 10 × 10 م مع الصك EM38، في حين ان 64 عينات لتحديد التوصيل الكهربائي للعجينة المشبعة (CEPS). واستخدمت نماذج بسيطة الانحدار الخطي لتحويل قيم الأسهم EMC إلى CEps. وضع خرائط الملوحة تعتمد على هذه القيم المحسوبة من خلال معادلة الانحدار. ظهرت النتائج الشخصية أحفاد نوع المألحة. وقد وجدت أعلى قيم التوصيل الكهربائي شمال القطعة والقيم المنخفضة في الجنوب.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Relevés pluviométriques de la station de Relizane (Période de 1988).....	33
Tableau 2. Précipitations moyennes mensuelles et annuelles de la station de Relizane (2006).....	34
Tableau 3. Précipitations mensuelles, en (mm), de l'année 2012 de la station de l'INRAA de H'madna, Relizane. (mm) pour la période (1988 – 2006).....	34
Tableau 4. Moyennes mensuelles des températures (°C) de la station de Relizane.....	36
Tableau 5. Evapotranspiration potentielle moyenne en mm, établie selon la formule PENMAN (18 ans). (Station ONM de Relizane).....	36
Tableau 6. Salinité de l'eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda (Relizane).....	41
Tableau 7. Qualité de l'eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda(Relizane).....	41
Tableau 8. Répartition des superficies irriguées entre les différentes spéculations pratiquées.....	43
Tableau 9. Répartition de l'occupation du sol, dans le périmètre de la Mina, sur 6000 Ha.....	43
Tableau 10. Classes d'intensité du coefficient de variabilité (Nolin et al, 1997).....	55
Tableau 11. Résultats statistiques de la Ceps en dS.m-1.....	59
Tableau.12. Résultats statistiques de la Ced1/5 en dS.m ⁻¹	60
Tableau.13. Distinction des différents profils salins.....	65
Tableau.14 Type de profil de salinité obtenu.....	65
Tableau 15. Equations de régressions simples obtenues pour le calcul de la CEps du sol à partir des mesures des conductivités électromagnétiques horizontales et verticales.....	67
Tableau .16. Valeurs des conductivités électriques (CEps), mesurées et calculées.....	68
Tableau .17. Paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la CEps	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Superficie affectée par la salinité dans les différentes régions du monde (FAO, 2006)	13
Figure 2. Représentation schématique de la distribution de quelques domaines pédologiques dans le Nord de l'Algérie (Djili, 2000)	14
Figure 3. (A, B, C, D). Les différents types de profils salins (Servant, 1976)	18
Figure 4. Processus de dégradation de la qualité des sols suite à l'irrigation (Lahlou <i>et al</i> , 2002).	22
Figure 5. Principe de fonctionnement de l'EM38 (Iddir, 2006)	27
Figure 6. Conductivimètre électromagnétique EM-38 en mode vertical (V) et horizontal (H).....	28
Figure 7. Contribution relative d'une couche de sol au champ secondaire (Corwin <i>et Lesch.</i> , 2003).profondeur dans le sol : ϕ_v (CEMV) en mode vertical, ϕ_h (CEMH) en mode horizontal.	28
Figure 8. Carte de situation de la plaine de la Mina (Relizane).....	32
Figure 9. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles.....	34
Figure 10. Histogramme du régime saisonnier de la région d'étude.....	35
Figure 11. Diagramme Ombrothermique de la station de Relizane (1988-2007).....	37
Figure 12. Climagramme pluviométrique d'Emberger pour la station de Relizane (1988- 2006).....	38
Figure 13. Carte géologique 1/50000 de Relizane (Boualla, 2002).....	40
Figure 14. Carte de salinité des sols du périmètre irrigué de la Mina sur 6000 Ha (INSID, 2008).....	44
Figure 15. Carte d'occupation des sols du périmètre irrigué de la Mina sur 6000 Ha (INSID, 2008).....	45

Figure16. Situation géographique de la zone d'étude.....	47
Figure 17. Parcelle d'étude (Source : Google Earth)	48
Figure 18. Occupation du sol de la parcelle d'étude.....	49
Figure 19. Méthode de prélèvement des échantillons de sol.....	51
Figure 20 Plan d'échantillonnage.....	52
Figure 21. Schéma du protocole expérimental de la pâte saturée.....	54
Figure.22. Profil salin moyen des échantillons prélevés (CEps en dS.m⁻¹).....	59
Figure.23. Corrélation entre CEd1/5 et CEps (0 – 75cm).....	61
Figure.24. Corrélation entre CEd1/5 et CEps (0 – 100cm).....	61
Figure.25 Distribution horizontale de la CEps de l'horizon 0-25cm (sud-nord).....	62
Figure.26. Distribution horizontale de la CEps de l'horizon 25-50cm (nord-sud).....	62
Figure.27. Distribution horizontale de la CEps de l'horizon 50-75cm (sud-nord).....	63
Figure.28. Distribution horizontale de la CEps de l'horizon 75-100cm (sud-nord).....	63
Figure.29. Distribution verticale de la CEps (dS/m) par profils	64
Figure.30. Estimation de la CEps à partir de la CEM(H).....	66
Figure.31 . Estimation de la CEps à partir de la CEM(H).....	66
Figure.32 Carte de salinité de la couche (0-100cm).....	71
Figure. 33. Répartition des classes de salinité de la couche 0-100cm.....	71
Figure.34 Carte de salinité de la couche (0-100cm) (INSID, Mai 2012).....	72
Figure. 35. Répartition des classes de salinité de la couche (0-100cm) (INSID, Mai 2012).....	72

LISTE DES PHOTOS

Photo 1. Vue générale de la parcelle d'étude	48
Photo 2. Lectures verticales et horizontales de l'EM38	51
Photos 3(a et b). préparation de pate saturée	54

Photos 4 (c et d). Extraction des sels par Centrifugation et Filtration (Extrait saturé)..... 54

Photos .5 :Centrifugation et Filtration (Extrait saturé)54

Liste des abréviations

CE : Conductivité électrique du sol

CEd : Conductivité électrique de l'extrait dilué du sol (dS.m-1)

CEps : Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée (dS.m-1)

CEa : Conductivité électrique apparente du sol exprimée en mS.m-1

IEM : Induction électromagnétique

CEMH : Conductivité électromagnétique horizontale exprimée en mS.m-1

CEMV : Conductivité électromagnétique verticale exprimée en mS.m-1

AGID: Agence de Gestion de l'Irrigation et Drainage

ANRH: Agence Nationale des Ressources Hydriques

INSID: Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage

INRAA : Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie

ONID: Office National de l'Irrigation et du Drainage

ONM: Office National de Météorologie

CPCS: Commission de Pédologie et de Cartographie des sols

USDA: United States Department of Agriculture

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

Liste des symboles

g : Indique une présence de phénomène d'oxydo-réduction

n : Indique une accumulation du sodium échangeable

p : Indique que l'horizon de surface est labouré

y : Indique une accumulation de gypse

z : Indique une accumulation de sels plus solubles que le gypse

Introduction générale

Introduction générale

La salinité est l'un des plus grands problèmes, dans les environnements arides et semi-arides du monde (**Navarro et al, 2007**). Elle est considérée comme l'une des principales contraintes environnementales auxquelles l'agriculture moderne est confrontée. Elle est reconnue comme l'une des menaces principales à la durabilité des périmètres irrigués de notre siècle (**Dounia, 1999**).

En Algérie, les facteurs qui contribuent à l'extension du phénomène de salinisation des terres sont liés à l'aridité du climat qui porte sur plus de 95% du territoire, la qualité médiocre des eaux d'irrigation, le système de drainage souvent inexistant ou non fonctionnel, et la conduite empirique des irrigations (**Daoud et Halitim, 1994**). Selon **Saidi (2004)**, la production agricole, en Algérie est limitée par de faibles ressources hydrauliques, une mauvaise répartition des précipitations et par des teneurs élevées en sels solubles dans les sols et les eaux.

Le manque d'une cartographie précise des sols salés et d'un suivi de l'évolution temporelle de la salinité dans les zones irriguées ne permet pas de juger des risques, ni d'ailleurs des efforts entrepris de restauration des sols salés, et encore moins d'anticiper le phénomène avec l'extension « forcée » de l'irrigation(**Lahmaret Ruellan, 2007**).

Il paraît, aujourd'hui, important de caractériser et de suivre l'évolution des sols affectés, de façon à maîtriser les nouvelles distributions salines que pourront induire ces diverses interventions et préserver ces milieux, particulièrement sensibles, d'une éventuelle dégradation. A partir des mesures des niveaux et des distributions de la salinité des sols, dans la zone racinaire des parcelles cultivées, on peut déterminer si, oui ou non, la salinité est dans les limites acceptables pour les cultures végétales (**F.A.O, 1999**).

Cependant, les méthodes conventionnelles de mesure de la salinité, peuvent difficilement rendre compte d'un tel phénomène (**Boivin et al, 1988**). Ces méthodes impliquent, pour obtenir des informations sur les sols, l'utilisation des études intensives sur le terrain, des analyses de laboratoire coûteuses, un travail pénible et exigeant plus de temps, d'oùla nécessité de développer des méthodes plus rentables pour une caractérisation spatiale, efficace et rapide de la salinité.

Dans ce sens, de nombreux travaux de recherche antérieurs ont démontré l'intérêt grandissant pour l'utilisation des méthodes in situ, plus adaptées, en particulier la conductivimétrie électromagnétique, qui appréhende de façon sensible la salinité sur un grand volume de sol et permet de réaliser des mesures rapides et non destructives avec précision et à différentes profondeurs du sol (**Triantafiliset al, 2001**).

Cependant, il faut transformer la conductivité électromagnétique du volume (v) en conductivité électrique moyenne de l'extrait de la pâte saturé de sol (CEps). Cette manière de faire est la seule qui permette une interprétation pédologique des mesures, la conductivité de l'extrait saturé de sol (en $dS.m^{-1}$) étant la référence en la matière (**Job *et al*, 1997**).

L'objectif de ce travail est l'étude de la salinité, sur une parcelle cultivée, située au niveau de la plaine de la Mina (Relizane). Des approches complémentaires ont été mises en œuvre, dans cette étude, à savoir :

- la cartographie de la salinité à partir d'une méthode géophysique non destructive, par la technique d'induction électromagnétique, permettant de décrire l'extension spatiale de la salinité et de sa profondeur d'apparition ;

- le suivi de l'évolution temporelle de la salinité de sols,

L'organisation de ce travail s'est articulée comme suit :

- **une première partie** qui concerne la synthèse bibliographique qui elle est divisée en trois chapitres :

- ✓ le chapitre.I est consacrée à la salinisation des sols ;

- ✓ le chapitre.II est consacrée aux méthodes d'évaluation de la salinité ;

- "nous aborderons une présentation de la zone d'étude;**

- "nous présenterons la méthodologie adoptée et le matériel utilisé;**

- "nous présenterons les résultats obtenus ainsi qu'une synthèse générale;**

- nous terminerons ensuite par une conclusion générale.

PREMIERE PARTIE

Synthèse bibliographique

CHAPITRE I

La salinisation des sols

Première partie : Synthèse bibliographique**CHAPITRE I : La salinisation des sols****Introduction**

Le sujet sur la salinité des sols est large et varié. L'examen d'une bibliographie complète est donc difficile. Dans cette partie, la bibliographie se limite qu'aux sujets qui sont directement liés à la recherche menée dans cette thèse. Tout d'abord, la salinisation du sol est brièvement discutée dans le **Chapitre I** Les méthodes de mesure de la salinité du sol, en particulier, l'utilisation de l'induction électromagnétique (IEM), qui mesure la conductivité électrique apparente du sol (CEa), a révolutionné la façon dont ces informations peuvent être collectées et peut améliorer significativement l'interprétation de la salinité. Cette question est abordée dans le **Chapitre II**.

I.1. Définition

Le terme de salinité se rapporte à la présence des principaux solutés inorganiques dissous (essentiellement des ions Na⁺, Mg⁺⁺, Ca⁺⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄⁻⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻ et CO₃⁻⁻) dans des échantillons aqueux. La salinité est quantifiée en termes de la concentration totale de ces sels solubles, ou plus concrètement, en termes de conductivité électrique de la solution, parce que les deux sont étroitement liés (USSSL, 1954).

La salinisation est l'accumulation des sels solubles (plus solubles que le gypse) à la surface du sol et dans la zone racinaire (Mermoud, 2006). La conductivité, inverse d'une résistivité (en ohms), a longtemps été exprimée en mhos (en inversant l'ordre des lettres). Dans le système international on se réfère désormais au Siemens (S), et à ses subdivisions (milli = m et micro = μ), pour exprimer une conductivité électrique (FAO, 1988) :

- 1dS / m = 1mS/cm = 1mmhos / cm = 0.1 S/m = 1000 μS/cm.

- Conductivité en mmol (+) par litre: **mmol (+) / l = 10 × CE (CE en dS/m)** Pour l'eau d'irrigation et les extraits de sol dans la gamme 0,1-5 dS / m.

- Conductivité en pression osmotique en bars: **PO = 0,36 × CE (CE en dS / m)** Pour les extraits du sol dans la gamme de 3 à 30 dS / m.

- Conductivité en mg / l:

mg / l = 0,64 × CE x 103, ou (CE en dS / m)

mg / l = 640 × CE

Pour les eaux et extraits de sol ayant une conductivité jusqu' à 5 dS / m.

- mmol / l (analyse chimique) en mg / l:
- Multipliez mmol / l pour chaque ion par son poids moléculaire pour obtenir la somme.

I.2. la salinisation dans le monde

Selon les estimations les plus récentes de la FAO, la salinisation affecte déjà au moins 400 millions d'ha et en menace gravement une surface équivalente (**Legros, 2009**). La plupart de ces terres affectées par le sel sont situées dans les zones arides et semi-arides, en Afrique du Nord, en Asie orientale, en Asie centrale et du Sud de l'Asie (**FAO, 2006**). Les sols salés sont principalement situés dans les zones arides, et leur proportion est notablement élevée au proche (Egypte, Tunisie) et moyen orient (Iran, Pakistan, Bangladesh), en Asie centrale (Ouzbékistan), au nord de la Chine et en Argentine. Les sols sodiques sont particulièrement étendus en Australie, mais aussi dans certaines situations spécifiques, comme en Hongrie ou en Ouzbékistan. Par comparaison, le développement d'une salinité liée aux activités humaines ne concernerait que 77 millions d'hectares (**Marlet et Job, 2006**). Dans les pays du Maghreb, les dommages de la salinisation sont connus, à cause de la mauvaise gestion des eaux d'irrigation (**Djili K et al, 2003**).

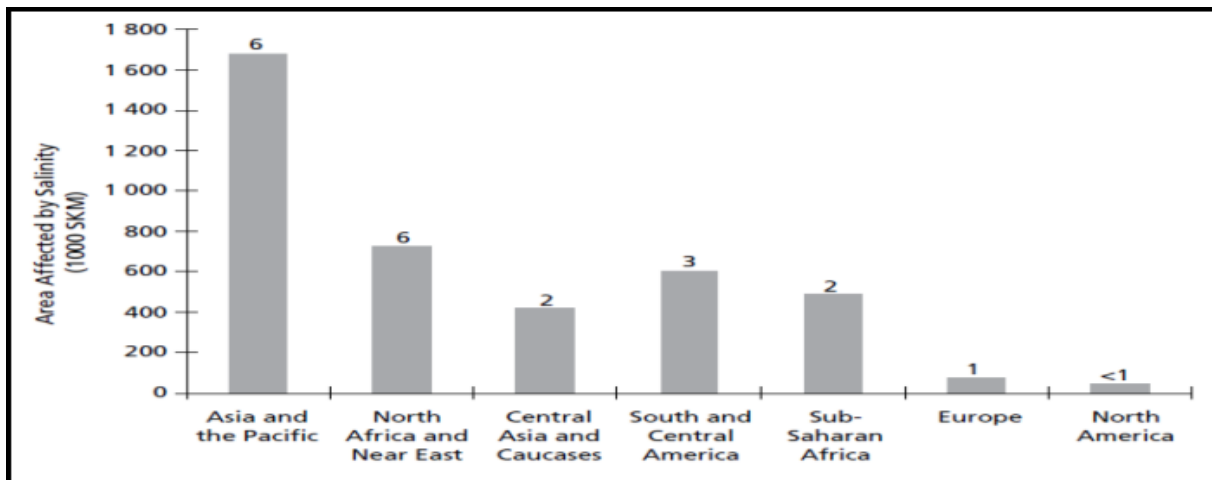


Figure 1. Superficie affectée par la salinité dans les différentes régions du monde (**FAO, 2006**)

I.3. La salinisation en Algérie

En Algérie, les sols salés occupent de grandes étendues (**Halitim, 1985**). Selon **Le Houerou (1993)**, les sols salés occupent de vastes superficies (3.2 millions d'hectares de la superficie totale). Près de 10-15 % de terres irriguées, sont concernées par ces problèmes. Bien que le problème d'alcalinisation, selon **Daoud et Halitim (1994)** ne se pose plus, on estime que les

terres salinisées seront difficilement récupérables. La plupart de ces sols sont situés, en région aride et semi-aride, mais aussi sous bioclimat subhumide (Halitim, 1973). Selon Djili (2000), les sols salés sont localisés au Nord qu'au Sud Algérien, et s'expriment mieux entre les isohyètes 450 mm qui semblent être la limite supérieure des sols fortement sodiques (Fig.3).

Selon l'INSID (2008), la salinité est observée dans les plaines et vallées de l'Ouest du pays (Mina, Cheliff, Habra Sig, Maghnia), dans les hautes plaines de l'Est (Constantine, Sétif, Bordj Bou Arreridj, Oum El Bouagui), aux abords des Chotts et de Sebkhass (Chott Chergui, Chott Gharbi, Chott Hodna, Chott Melghir, Sebkhass d'Oran, de Benziane, Zemmoul, Zahrez Gharbi et Chergui, etc..) et dans le grand Sud (dans les Oasis, le long des oueds, etc.) (Fig.2).

Les sels les plus fréquents, dans les régions arides et semi- arides, sont surtout les chlorures, les sulfates de sodium, les sulfates de magnésium et à un moindre degré les carbonates de sodium (Halitim, 1988).

Selon Aubert (1975), les sols salés d'Algérie sont caractérisés, en général, par une conductivité électrique supérieure à 7dS/m et un pourcentage de sodium échangeable (ESP) qui varie de 5 à 60 % de la CEC.

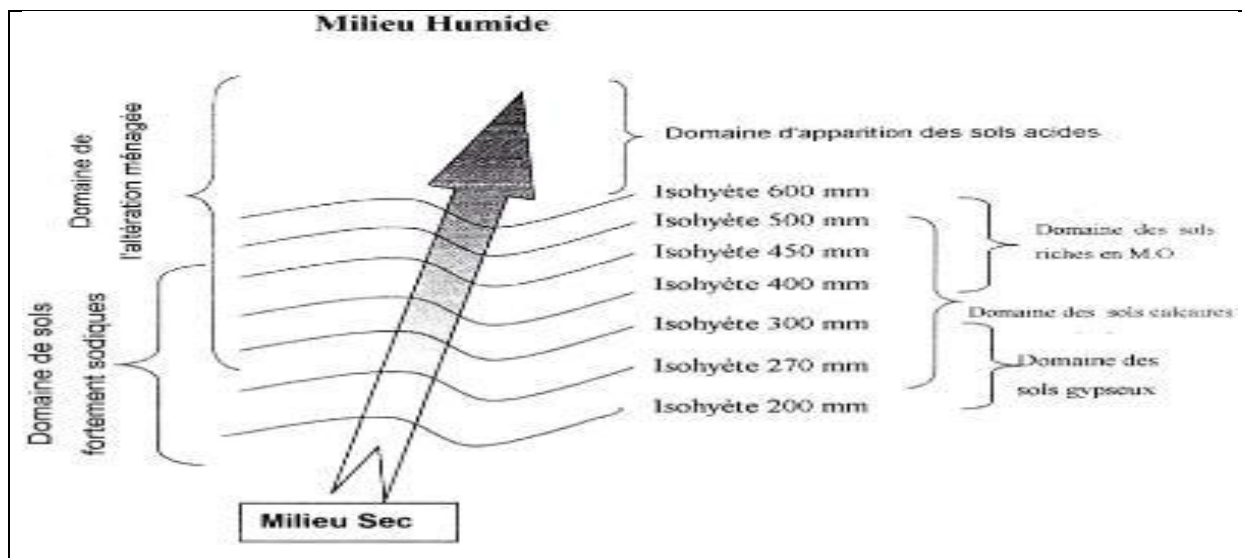


Figure 2. Représentation schématique de la distribution de quelques domaines pédologiques dans le Nord de l'Algérie (Djili, 2000)

I.4. Les mécanismes de la salinisation

Les sols salés sont formés à partir de trois processus physico-chimiques qui sont la salinisation, la sodisation et l'alcalinisation (Montoroi, 2005). Ces mécanismes peuvent s'associer différemment suivant les caractéristiques du milieu d'accumulation (Ilou, 1995).

I.4.1. La salinisation

Le mécanisme de la salinisation des sols se produit lorsque la minéralisation de la solution du sol dépasse un certain seuil sous l'influence d'un mécanisme physique (évaporation, drainage insuffisant, altération des minéraux et accumulation...). Au-delà de ce seuil, les végétaux subissent une sécheresse physiologique due à une pression osmotique très forte et à une toxicité en certains éléments (**Montoroi, 2005**).

La teneur d'une solution de sol en sels solubles est déterminée par sa conductivité électrique (CE), rapportée à une température standard (en général 25°C) et exprimée en dS.m-1. Celle-ci est d'autant plus élevée que la concentration ionique de l'électrolyte l'est aussi (**Montoroi, 2005**).

On définit en général deux types de salinisation, la salinisation primaire et la salinisation secondaire.

I.4.1.1. La salinisation primaire

Elle résulte de la présence initiale de sels dans le sol ou dans la nappe phréatique et peut affecter des milieux naturels sans qu'il y ait intervention directe de l'homme. L'altération des roches contenant des minéraux sodiques, potassiques ou magnésiques conduit à des sels souvent solubles, en particulier les chlorures, les sulfates, les carbonates, les bicarbonates et parfois les silicates de ces métaux (**Zahow et Amrhein, 1992**). Selon **Aubert (1975)** et de façon générale « les sols sodiques en Afrique du Nord proviennent principalement d'une action de la mer (pas actuelle) ou de la présence de dépôts lagunaires salés et gypseux répartis dans l'échelle stratigraphique depuis le Trias jusqu'au Quaternaire. En Algérie, les couches géologiques salifères, comme le gypse triasique; grès du Crétacé moyen; marnes sénoniennes dans le Sud-Constantinois; poudingues, grès et limons rougeâtres de l'Oligocène continental (Aquitainien) ; poudingues et grès cartésiens; argiles, grès et poudingues helvétiques; gypse, marnes et calcaires du Sahélien; grès du Pliocène continental (bassins fermés des Hautes Plaines); formations quaternaires des plaines littorales, des basses plaines oranaises et des dépressions fermées. (**Benchetrit, 1956**).

I.4.1.2. La salinisation secondaire

C'est un processus d'enrichissement d'un sol en sels solubles causé par l'approvisionnement en eau pour l'irrigation et qui aboutit à la formation d'un sol salin. L'irrigation altère le bilan hydrique du sol en générant un apport d'eau supplémentaire ; cet apport est toujours associé à

un apport de sels (**FAO, 2006**). Un excès d'eau entraîne la remontée d'une nappe phréatique salée, tandis qu'un manque d'eau provoque une lixiviation insuffisante des sels (**Boivin et al, 2002**). Les sols affectés par salinisation secondaire est de 20% à 50% des terres irriguées en Algérie (**Douaoui et Hartani, 2007**)

I.4.2. La sodisation

Le processus de sodisation se produit lorsque le complexe organo-minéral d'échange est progressivement saturé par l'ion Na⁺ (horizon sodique). Les agrégats deviennent instables à partir d'un certain seuil et la dégradation des propriétés physique du sol est potentielle (**Servant, 1978**).

On détermine la sodisation par le pourcentage de sodium échangeable **ESP** (**Exchangeable Sodium Percentage**) par rapport à la capacité d'échange des cations (CEC).

$$\text{ESP} = 100 * \text{Na échangeable (en meq/l)} / \text{CEC (en meq/l)}$$

Si cette valeur est supérieure à 15%, on parle d'un sol sodique. Ce pourcentage est en étroite relation avec un paramètre utilisé par l'école de Riverside, aux USA, qui est le **SAR** (**Sodium Absorption Ratio**) de l'extrait de la pâte saturée.

Le SAR est défini par l'expression :

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ / ((\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}) / 2)^{0.5}$$

Dans laquelle : Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ sont les teneurs en meq/l de la solution. La sodisation des sols est l'une des conséquences les plus dommageables et la plus répandue de l'irrigation, en zone aride. Elle influe sur la perméabilité en favorisant le gonflement et la dispersion des colloïdes du sol et entraîne des problèmes de toxicité des plantes (**Ilou, 1995**).

I.4.3. L'alcalinisation

Le processus d'alcalinisation intervient lorsqu'un sol à complexe saturé en sodium se transforme physiquement suite aux réactions d'échange entre l'ion Na⁺ et les protons au moment d'une humectation (**Montoroi, 2005**). L'alcalinisation se traduit par une augmentation du pH du sol suite à l'accumulation de bases faibles. Elle peut être d'origine naturelle ou due à une irrigation mal contrôlée. Les eaux d'irrigation faiblement minéralisées présentent une alcalinité résiduelle calcite positive, c'est à dire un excès de carbonates (bases faibles) par rapport au calcium. La concentration de ces eaux par évaporation au cours de l'irrigation entraîne la précipitation de la calcite. Au fur et à mesure que les processus de concentration et de précipitation de la calcite se poursuivent, la teneur en calcium décroît alors que les carbonates s'accumulent.

I.5. Dynamique de la salinité dans les sols

I.5.1. Dynamique des sels dans les sols irrigués

Selon **M. Lahlou *et al* (2002)**, un apport massif d'eau suite à une irrigation ou à une forte pluviométrie entraîne une dissolution des minéraux qui existent naturellement dans le sol, tel que la calcite ou le gypse, et leur percolation profonde jusqu'au nappes phréatiques (**Fig.4**). L'eau des nappes devient ainsi plus chargée. Lorsque la nappe s'approche de la surface et qu'elle devient facilement exploitable à des fins d'irrigation, les sels initialement dissous précipitent sous l'effet de l'évapotranspiration et entraînent une augmentation de la concentration saline dans les sols. En plus si la nappe est surexploitée à proximité de la mer, et que le niveau de la nappe descend en dessous du niveau de la mer, l'eau de cette dernière remonte pour équilibrer le niveau et entraîne l'augmentation de la concentration en sels dans la nappe.

L'irrigation ne fait qu'aggraver ce problème, en effet, les sels sont apportés dans le sol à chaque irrigation, la culture prélève dans le sol ses besoins en eau, en laissant sur le sol une solution très concentrée en sel. Cette concentration sera encore très importante par l'irrigation suivante.

I.5.2. Le processus de salinisation et d'alcalinisation des sols

L'abondance de l'ion sodium dans le sol confère à ce dernier des caractères particuliers. Mais cet ion peut exister sous deux formes distinctes :

- la forme saline (NaCl , Na_2SO_4) l'ion sodium reste sous forme neutre. - la forme alcalinisante (échangeable) liée au complexe absorbant. En présence de cette dernière forme les solutions du sol s'enrichissent en sels alcalins (carbonate ou bicarbonate de sodium) qui confère au sol un pH fortement élevé.

Servant (1975), en fonction de ces deux formes de l'ion sodium, proposa le terme de "sols salsodiques" pour désigner la classe des sols sujets. L'ion sodium peut provenir de différentes sources :

- présence d'une nappe salée dont les éléments saturant le complexe absorbant par échange avec les ions alcalinoterreux (Ca^{++} et Mg^{++}) on parle de saturation indirecte (**Duchauffour, 1977**) ;

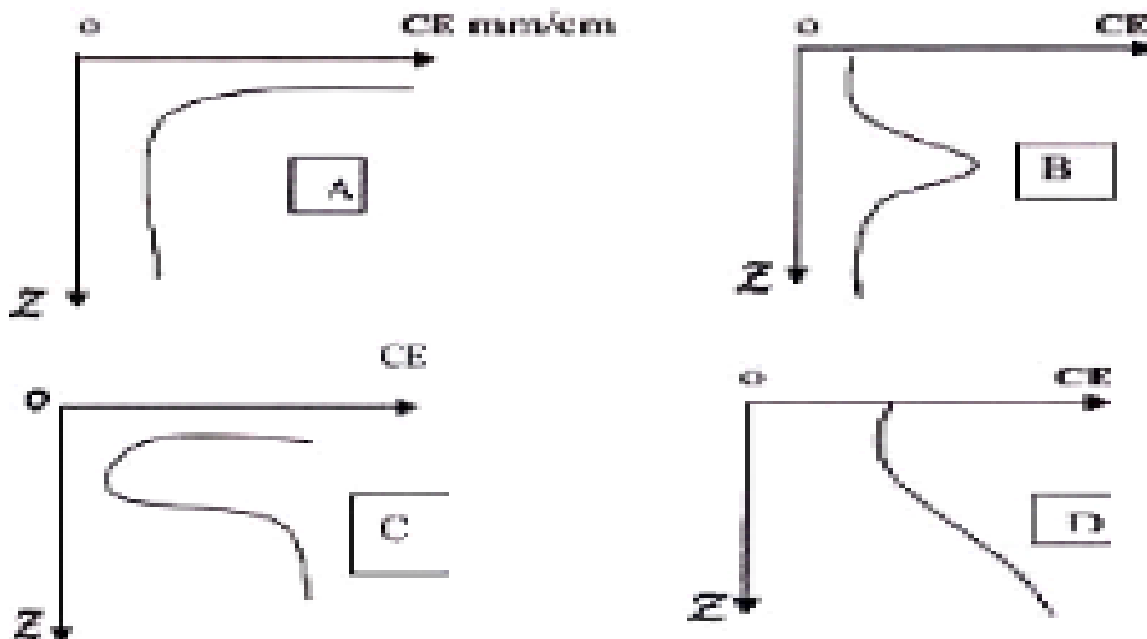
- Une saturation directe du complexe par altération des roches contenant des minéraux sodiques.

La nappe souterraine en traversant des couches d'alluvions sodiques, transporte des éléments alcalinisants dont elle s'est chargée. Selon **Duchaufour (1977)**, l'ion sodium ne peut subsister qu'en climat sec où le drainage naturel est empêché par la forte évaporation qui sévit. En climat humide, tous les sels de sodium étant très solubles, sont rapidement transportés du profil par les eaux de drainage. A cet effet, deux conditions sont nécessaires à la formation des sols salsodiques:

- . Une condition climatique (ces sols sont quasi inexistant dans les régions humides)
- . Une condition de station qui nécessite la présence d'une source de sodium.

Selon **Servant (1976)**, il est possible de distinguer quatre formes principales de salinisation (**Fig.3**) :

- La forme A** : est une salinisation.
- La forme B** : est une désalinisation temporaire.
- La forme D** : est une désalinisation permanente
- La forme C** : est une résalinisation



Z : profondeur en centimètres

CE : conductivité électrique en mmhos/cm

Figure 3. (A, B, C, D). Les différents types de profils salins (Servant, 1976)

Selon **Halitim (1988)**, dans la zone aride de l'Algérie, il existe trois types de profils salins, semblables aux profils salins décrits par **Servant (1975)** : les profils descendants, ascendants et convexes.

- Le profil descendant

Le maximum de salinité se situe dans la partie inférieure du profil. Ce type de distribution est observé dans les sols à croûtes et encroûtement calcaires et dans les sols à encroûtement gypseux de surface des parties amont et médiane de la séquence du Zahrez. Ce type de profil salin a été qualifié de descendant par **Servant (1975)**. Il indique que le profil a subi une phase de lixiviation des sels solubles.

- Le profil ascendant

Le maximum de salinité est observé dans la partie supérieure du profil. Les sols sont influencés par une nappe salée peu profonde et sont, généralement, localisés dans les zones basses et déprimées des séquences. Les horizons les plus salés se localisent alors au-dessus des horizons gypseux et calcaires quand ces derniers sont présents. C'est le profil salin ascendant ou type A (**Servant, 1975**). Quand la concentration en sels est très forte et que la texture est argileuse, une couche de pseudosables et des efflorescences salines se forment, à la surface du sol. Cette couche de pseudosables peut exister même s'il n'y a pas de nappe, à condition que les autres caractéristiques (une texture argileuse et une forte salinisation) soient présentes.

- Le profil convexe

La partie médiane du profil correspond à un maximum de salinité. Les profils concernés par ce mode de distribution des sels sont en général des sols dont la dynamique saline est caractérisée par une remontée capillaire et une lixiviation des sels. Ils correspondent au type B (**Servant, 1975**) et peuvent aussi caractériser une phase de désalinisation des profils du deuxième type.

I 5.2.1. Rôle du climat dans le processus de salinisation

La forte demande évaporatoire qui caractérise les zones arides et semi-arides entraîne une concentration des eaux en surface des sols. Il en résulte une précipitation des sels qui vont s'accumuler au fil du temps. De cette accumulation découlent des dégradations salines des sols qui peuvent se manifester au cours de la pédogenèse naturelle ou apparaître secondairement suite à l'irrigation (**Ilou, 1995**).

Même si les sels peuvent remonter en période sèche, les profils salins sont généralement du type D dès que la pluviométrie annuelle acquiert une certaine importance. En d'autres termes, la salinité s'accroît avec la profondeur en relation avec la lixiviation du sodium par les pluies. Le rapport entre les conductivités électriques du haut et du bas des profils est alors voisin de 1/5 (**Morizet et al, 1970**). C'est le même phénomène qui se produit dans la partie nord de l'Algérie (**Djili, 2000**). En revanche, dans les zones subdésertiques, les sels restent en surface.

I.5.2.2. Rôle de la nappe dans le processus de salinisation

Dans le cas d'une nappe salée, le processus d'accumulation des sels est d'autant plus marqué dans les sols des cas suivants :

- La nappe est proche de la surface,
- Elle est fortement minéralisée,
- Le bilan négatif (P-ETP) en faveur de l'évapotranspiration potentielle.

Si le terrain est très légèrement ondulé et la texture est fine, les sels s'accumulent dans les points hauts (**Franzén, 2005**). En revanche, dans les zones sableuses, les remontées capillaires sont limitées, et l'altitude au-dessus du niveau la nappe joue un rôle important dans ces remontées.

I.6. Relation entre la salinité, les sols et les plantes

I.6.1. Introduction

Les sols salés contiennent suffisamment des sels solubles dans leur solution (électrolytes) pour nuire à la croissance de la plupart des plantes. Ces sels solubles, sont principalement le sodium (Na^+), le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}) et de potassium (K^+) et aussi les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les carbonates (CO_3^{2-}).

Le développement d'une gestion efficace des pratiques de lutte contre la salinité nécessite une bonne compréhension des effets de la salinité sur les sols et sur les plantes.

I.6.2. Effets de la salinité sur les plantes

L'accumulation des sels dans les sols est un grave problème environnemental menaçant les processus physiologiques de la plante et la fertilité des sols. Les teneurs élevées en sels tendent à augmenter la pression osmotique de la solution du sol, ce qui diminue la capacité de la plante à utiliser l'eau dont elle a besoin, au risque de la soumettre à une sécheresse

conditionnée (**Halitim, 1988**). Les sels constituent aussi un obstacle physique à l'enracinement à cause de la diminution de la disponibilité en eau et de l'instabilité structurale du sol. Ils sont aussi à l'origine des déséquilibres nutritionnels observés chez les plantes. Seules les plantes tolérantes aux sels peuvent se développer. Dans certains cas, la salinité est tellement élevée que le sol devient stérile et dépourvu de toute végétation y compris de plantes halophytes. Dans ce cas, des problèmes de toxicité surviennent aussi ; outre le sodium et le chlore, d'autres éléments à l'état de traces tels que le bore peuvent aussi être toxiques pour les plantes (**Ayers et Westcot, 1988**).

I.6.3. Effets de la salinité sur les sols

Dans les sols salins, la présence excessive de sels solubles neutres floccule la fraction argileuse, mais les maintient stable, alors que dans les sols alcalins, un excès en sodium échangeable favorise la dispersion de l'argile et rend la structure du sol instable. Ces sols sont ainsi sensibles aux encroûtements de surface qui favorisent le ruissellement de surface (**Hassan, 2005**). Une prise en masse du sol peut également réduire fortement l'infiltration de l'eau dans le sol et conduire à une hydromorphie plus ou moins importante du sol selon sa texture et sa position topographique dans le paysage (**Douaoui et al, 2004**).

Un taux de sodium échangeable élevé a pour effet une dispersion des agrégats, ce qui conduit à une réduction de la perméabilité, de la porosité et un tassement des sols. Du point de vue agricole, cela se traduit d'une part par la prise en masse du sol qui devient très compact, dur, difficile à labourer, et d'autre part, par des difficultés de germination, et d'enracinement des plantes. Par ailleurs le sol devient totalement asphyxiant, ce qui s'accompagne d'une atrophie du système racinaire, de son développement de plus en plus superficiel, avec des conséquences défavorables sur la nutrition minérale des plantes, et la baisse considérable des rendements.

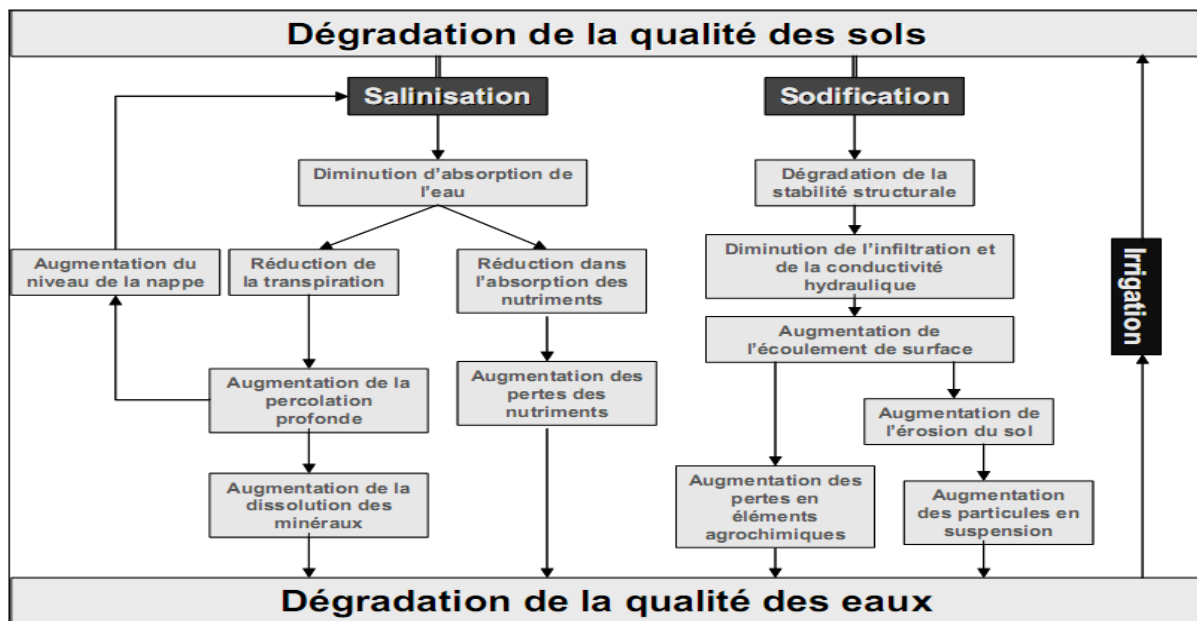


Figure 4. Processus de dégradation de la qualité des sols suite à l'irrigation (Lahlou *et al*, 2002).

I.7. Réhabilitation des sols salés

La gestion des sols salinisés exige une combinaison des pratiques agronomiques et des considérations socio-économiques. La réhabilitation des sols salins peut débuter par la mise en place d'un drainage efficace et l'utilisation d'une eau d'irrigation de bonne qualité pour abaisser les teneurs en sels solubles.

D'un point de vue strictement technique il est possible de régénérer des sols salins ou alcalins, mais ces méthodes sont généralement coûteuses (Middleton *et al*, 1997):

- **Certains sols salins** peuvent être récupérés par lessivage, c'est à dire par l'application de très fortes doses d'irrigation, accompagnées d'un drainage efficace. Le sel en excès est alors évacué avec les eaux de drainage. Pour que cette technique soit applicable il faut impérativement que les sols soient bien drainés; or c'est justement souvent la mauvaise capacité de drainage des sols qui est à l'origine de leur salinité. Il faut donc préalablement s'assurer qu'il existe un système efficace de drainage, de collecte et d'évacuation des eaux, ou mettre en place un tel système. Souvent, ceci impose une restructuration totale des périmètres irrigués ;
- **Certains sols alcalins** peuvent être récupérés grâce à l'application de gypse et d'autres amendements calcaires : le cation calcium s'adsorbe sur les particules argileuses, ce qui permet d'améliorer la structure des sols. L'apport en complément de matière organique

augmente les chances de réussite. Afin d'être efficaces, les apports doivent être de l'ordre de la tonne par hectare. L'amélioration de la structure du sol est temporaire et l'application des amendements doit généralement être répétée à quelques années d'intervalle ;

Une autre option possible en milieu carbonaté est la phyto-remédiation. Son principe est d'utiliser le CO₂ de la respiration racinaire et l'excrétion de protons par les racines pour acidifier le milieu et produire la libération du calcium. Dans des essais conduits au Moyen Orient la phyto-remédiation a prouvé qu'elle était une option efficace et peu coûteuse, dont les résultats sont comparables à ceux obtenus avec du gypse (**Badraoui et al, 2005**).

Chapitre II
Méthodes d'évaluation de la
salinité du sol

Chapitre. II. Méthodes d'évaluation de la salinité du sol

Introduction

La salinité du sol peut être évaluée, au laboratoire, par les méthodes conventionnelles qui consistent à prélever des échantillons de quelques centaines de grammes à différentes profondeurs. La quantité de sels est ensuite estimée dans des extraits à l'eau des échantillons, soit à saturation (**Richards, 1954**), soit en utilisant des rapports fixes sol/eau.

Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses nouvelles techniques comme dispositif de Wenner (**Rhoades et Ingvalson, 1971**), la sonde de conductivité électrique de Rhoades (**Rhoades, 1976**) et l'induction électromagnétique (**McNeil, 1980**), ont été développées pour mesurer la salinité des sols in-situ.

La technique de l'induction électromagnétique est plus pratique et plus rapide parce que ses mesures ne nécessitent pas d'échantillonnage des sols et leur préparation. Cette technique est maintenant utilisée dans le monde entier pour le suivi des sols affectés par les sels (**Sharma and Gupta, 2000**).

II.1. Méthodes d'évaluation de la salinité au laboratoire :

Au laboratoire, pour évaluer la quantité de sels contenue dans un échantillon de sol, il faut extraire ces sels de l'échantillon. Pour cela différentes méthodes sont utilisées :

II.1.1. Extrait de la pâte saturée

Cette méthode a été mise au point par les chercheurs américains de

1° U.S.Salinity Laboratory. Pour extraire les sels on amène le sol préalablement séché à saturation, c'est à dire à sa limite de liquidité d'Atterberg par malaxage avec de l'eau distillée. En opérant ainsi on cherche à se rapprocher au mieux de ce qui se passe dans le sol, tout en opérant dans des conditions standardisées. Cette façon de faire permet notamment de se rapprocher d'une réalité agronomique, l'humidité étant à proximité de la capacité de rétention, la plus efficace pour la plante (**Le Brusquet Loyer, 1982**)

II.1.2. Extrait non saturée

Dans cette méthode, une quantité d'échantillon de sol est mélangée avec une quantité d'eau suffisante pour obtenir de fortes dilutions. Le rapport poids sol/poids eau est en général de 1/5 ou 1/10.

Cette méthode est plus facile à réaliser et permet ainsi de faire un grand nombre d'échantillons qui est au contraire difficile, par la pâte saturée.

II.1.3. Evaluation de la salinité par l'induction électromagnétique

L'induction électromagnétique peut être utilisée pour mesurer la conductivité électrique apparente du sol (CEa) au champ. Elle est rapide et permet une forte densité de points de mesure. L'application de l'induction électromagnétique dans la caractérisation de la variabilité spatiale de la salinité est largement développée en agriculture de précision (**De Jong et al, 1979; Cameron et al, 1981; Job et al, 1987; Boivin et al, 1988; Hendricks et al, 1992; Leschet al, 1995; Hendricks et al, 2002**). Cette méthode permet de réaliser des mesures rapides et non destructives avec précision et à différentes profondeurs du sol (**Triantafiliset al, 2001**).

II.2. Le conductivimètre électromagnétique (EM38, Geonics LTD)

II.2.1. Principe de fonctionnement

L'EM38 a été conçu spécialement par la société Geonics pour la cartographie de la salinité des sols agricoles, et peut être utilisé pour surveiller rapidement de grandes surfaces sans contact avec le sol (**FAO, 1999**). L'EM38 est un appareil, léger et utilisable par simple lecture dès mise en contact avec le sol. Il en constitué de deux bobines à axes parallèles et coplanaires séparées d'un mètre. La bobine émettrice ou spire primaire SP parcourue par un courant électrique de fréquence f produit un champ magnétique primaire HP de même fréquence qui induit des courants dans le sol supposé homogène. Ces courants produisent à leur tour un champ secondaire HS proportionnel à la conductivité du sol. Ce champ est capté par la bobine réceptrice ou spire secondaire SS.

La conductivité globale apparente mesurée est proportionnelle à HS et HP selon la formule suivante: $\sigma a = (H_s \cdot H_p) \pi F \mu_0 S^2$

Avec :

σa = conductivité apparente du sol (mS/m : millisiemens par mètre)

μ_0 = permittivité de l'air

F = fréquence du courant primaire

S = distance interspire

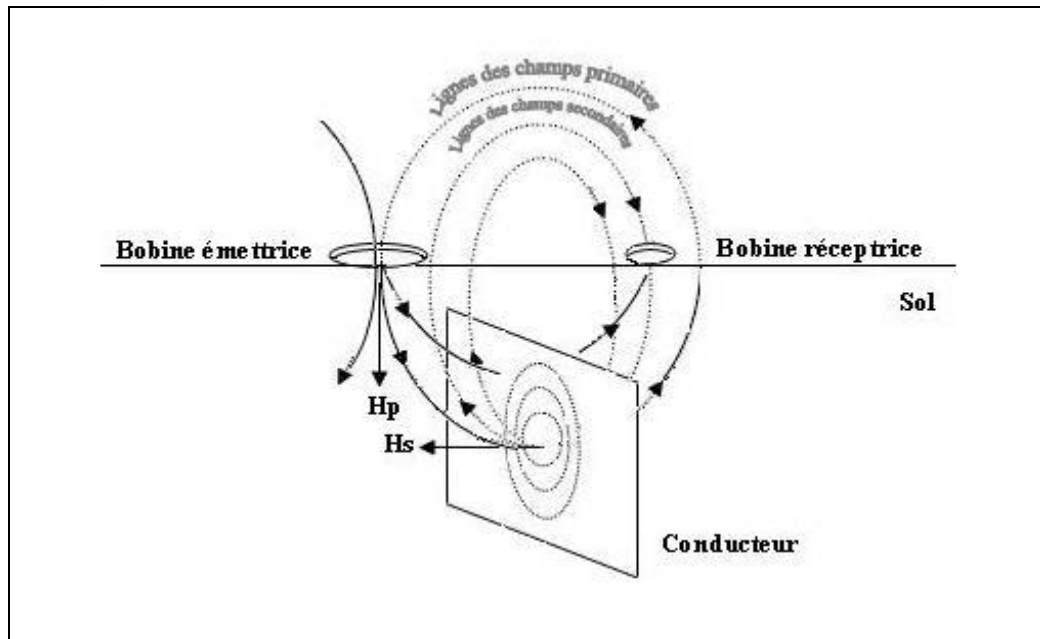


Figure 5. Principe de fonctionnement de l'EM38 (Iddir, 2006)

II.2.2. Mesures verticales et horizontales de l'EM38

L'EM38 peut être utilisé selon deux configurations (Fig.5) :

- **En mode vertical:** Les bobines d'induction sont horizontales et les dipôles magnétiques sont verticaux. La profondeur d'investigation est approximativement de 1,5 m.
- **En mode horizontal:** Les bobines sont verticales et les dipôles magnétiques sont horizontaux. La profondeur d'investigation est alors réduite à 0.75 m (McNeil, 1980).

Selon Job *et al* (1987), la contribution d'une couche élémentaire de sol de sol situé à une profondeur z au champ secondaire H_s est une fonction non linéaire de la profondeur. Elle peut se faire de deux manières selon l'orientation des grands axes des solénoïdes de départ, soit perpendiculaire à la surface du sol mesure noté $\Phi_v(z)$, soit parallèlement à celui-ci $\Phi_h(z)$, l'appareil étant alors horizontal (Fig.6)



Figure 6. Conductivimètre électromagnétique EM-38 en mode vertical (V) et horizontal (H)

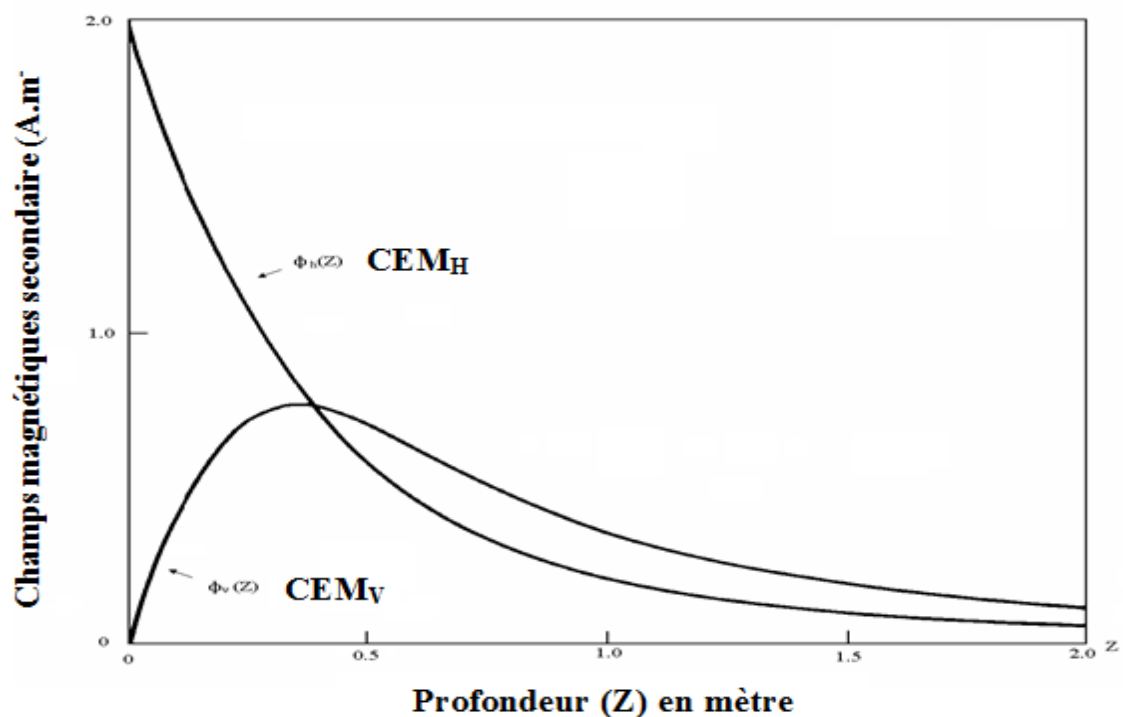


Figure 7. Contribution relative d'une couche de sol au champ secondaire suivant sa profondeur dans le sol : ϕ_v (CEM_V) en mode vertical, ϕ_h (CEM_H) en mode horizontal. (Corwin *et* Lesch., 2003).

II.2.3. Etalonnage du conductivimètre électromagnétique EM38

L'étalonnage est réalisé, par rapport à la conductivité de l'extrait saturé du sol sur quelques points de mesure représentatifs de la gamme rencontrée. D'autres méthodes d'étalonnage sont également proposées, notamment en étalonnant par rapport à une sonde quadripôle (Corwin *et* Rhoades, 1982).

Depuis les années quatre-vingt, la méthode d'induction électromagnétique par l'EM38 s'est axée autour de la mesure de la conductivité électromagnétique du sol comprise dans la zone racinaire de la plante. L'étalonnage des lectures données par l'appareil, par rapport à la norme de salinité de l'extrait saturé, telle que déterminée en laboratoire, a été l'objectif de nombreux chercheurs au Canada, USA, Australie et plus récemment en Afrique du Sud (**Willem et Vlotman, 2000**). Des analyses de régression linéaire et multiples, pour différents profils de sol, ont été déterminées. Les modèles d'étalonnage ont été développés dans les situations où la salinité du sol est le facteur dominant affectant la CEM (**Corwin et Rhoades, 1982; Wollenhaupt et al, 1986; McKenzie et al, 1989 ; Johnston et al, 1996**).

Dans les régions arides et semi-arides, l'étalonnage de la conductivité électromagnétique (CEM) repose sur l'hypothèse de l'uniformité de tous les facteurs du sol qui influencent sur les lectures, à l'exception de la salinité du sol (**Amakor, Xystus, 2013**).

Parce que la salinité est traditionnellement exprimée en termes de (CE), des efforts considérables ont été entrepris afin d'en déduire cette CE à partir de la CEM par un étalonnage de l'EM38 (**McKenzie et al 1989, Norman, 1990b, Johnston 1994, Heath et al 1999, Rhoades et al. 1999**). Ces différentes techniques d'étalonnage ont été soumises lors d'un atelier sur l'étalonnage de l'EM38, tenu à New Delhi, en Inde, en 2000. (**ILRI, 2000**).

Pour l'étude des variations verticales de la conductivité électrique apparente, à partir de mesures de l'EM38, au-dessus du sol, de nombreux chercheurs ont utilisé des relations empiriques (**Rhoades et Corwin, 1981; Corwin et Rhoades, 1982; Wollenhaupt et al, 1986; Rhoades et al, 1989 et Slavich, 1990**) ont utilisé la régression linéaire multiple pour corrélérer les lectures de l'EM38 avec celles des conductivités électriques mesurées à différentes profondeurs du sol.

Les coefficients obtenus pourraient être utilisés pour prédire la conductivité électrique sol dans les profils de sols, dans les endroits où des mesures directes n'étaient pas disponibles (**Hendrickx et al, 2002**). Selon ces mêmes auteurs, ces modèles de régression se sont révélés être spécifiques au site. Par conséquent, ces relations donnent des résultats raisonnables dans les lieux pour lesquels ils ont été développés ou dans des endroits présentant des caractéristiques similaires, mais ils ne peuvent pas être extrapolés à des sites ayant des caractéristiques différentes sans étalonnage.

II.2.3.1. La régression linéaire simple

Pour une même profondeur de sol, un calcul d'une corrélation entre les valeurs de conductivité électromagnétique et celle de conductivité électrique donne une équation de type (Willem F. Vlotman, 2000):

$$CEps (0-zcm) = \pm c \pm CEa (0-zcm)$$

Où :

- CEa (0-zcm) : la conductivité apparente moyenne du sol sur une profondeur de sol de 0 à z cm (dS / m) ;
- CEps (0-zcm) : Conductivité électrique (salinité) de l'extrait de pâte saturée d'un sol échantillonné à une profondeur de 0 à z cm (dS / m) ;
- a : pente de la relation ;
- c : constante

II.3. Avantages de la technique

L'utilisation de l'EM38 présente plusieurs avantages, par rapport aux méthodes traditionnelles :

- les mesures peuvent être prises aussi rapidement que l'on peut déplacer d'un point de mesure à un autre,
- un grand volume de sol peut être mesuré qui réduit la variabilité et relativement peu mesures donnent une estimation fiable de la propriété moyenne du sol,
- des mesures dans les sols relativement secs ou rocailleux sont possibles parce que le contact entre le sol et l'appareil n'est pas nécessaire comme dans de la sonde d'électrode,
- et l'EM38 permet une acquisition de données d'une façon non destructive, moins coûteuse et plus rapide que n'importe quelle autre technique (Triantafiliset *al.*, 2000).

II.4. Limites de la technique

Une limitation principale des mesures d'induction électromagnétique est bruit dans l'environnement. Les sources de bruit dans l'environnement peuvent inclure : les lignes électriques, l'énergie éolienne, gros objets métalliques, câbles enterrés, tuyaux, les émetteurs radio, bâtiments et clôtures métalliques.

DEUXIEME PARTIE EXPERIMENTATION

Chapitre III Présentation de la zone D'étude

Chapitre III: Présentation de la zone d'étude

III.1. Situation géographique

Le périmètre de la mina se trouve dans le bassin inférieur de l'Oued Chélif et couvre une superficie totale de 20000 Ha environs. Il fut créé en 1945 et il est considéré parmi les plus anciens périmètres irrigués de l'Algérie (ANRH, 2003).

La partie centrale du périmètre se trouve dans le Nord de l'Oued Mina, qui coule et se jette dans l'Oued Chélif. La partie Ouest s'étend à gauche et à droite de la route nationale N°4 et comprend le voisinage immédiat de la ville d'El Matmar. La partie Est s'étend à gauche et à droite de la RN°4 et comprend les environs de la ville de Oued Djemaa (Fig8)



Figure 8. Carte de situation de la plaine de la Mina (Relizane)

III.2. Synthèse climatique

Pour estimer rapidement l'influence des principaux éléments, divers systèmes sont proposés. Les plus utilisés en région méditerranéenne sont: le diagramme ombrothermique de **Bagnouls et Gausson** et le climagramme pluviométrique **d'Emberger**.

Ces deux systèmes résument le bioclimat d'une station donnée par trois éléments fondamentaux du climat: précipitations (mm) - températures maximales et minimales (°C)

Les données climatiques dans la présente étude proviennent de la station météorologique de Relizane et couvrent une période de 19 ans allant de 1988 à 2006.

Ces données recueillies concernent les températures maximales M (°C), les minimales m (°C) et les précipitations P (mm).

Concernant l'évapotranspiration potentielle, les valeurs sont celles de l'ANRH qui ont été calculées avec les données de Seltzer.

1) Les précipitations

D'après le **tableau.2**, on remarque que les valeurs des moyennes mensuelles de la pluviométrie indiquent un maximum de sécheresse durant le mois le plus chaud (Juillet) avec une pluviométrie de 01.5 mm, par contre le mois le plus humide est Novembre avec 39.4 mm. La répartition mensuelle des pluies laisse apparaître une répartition irrégulière de celles-ci. En effet, d'après la **figure.9**, 72.5 mm sont enregistrées, au cours de l'automne soit 28.6 % du total, 90.1 mm, en hiver soit 35.6% du total et 80.1 mm, pendant le printemps, soit 31.6 % du total.

Tableau 1. Relevés pluviométriques de la station de Relizane (**Période de 1988 à 2006**)

Station	Relizane (1982-2005)
Code	13505
Coordonnées : X (Lambert en km) Y	304.3 272.2
Altitude (m)	75
Pluie / Année (mm)	253,3

Tableau 2. Précipitations moyennes mensuelles et annuelles de la station de Relizane en (mm) pour la période (1988 – 2006)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	T
Pluie(mm)	11,9	21,2	39,4	28,4	30,4	31,2	28,8	27,2	24,2	5,3	1,5	3,82	53.3

Tableau 3. Précipitations mensuelles, en (mm), de l'année 2012 de la station de l'INRAA de H'madna, Relizane.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	T
Pluie(mm)	0,75	3,28	6,91	2,51	9,46	6,91	5,16	9,3	4,3	0,1	0,0	0,03	28.5

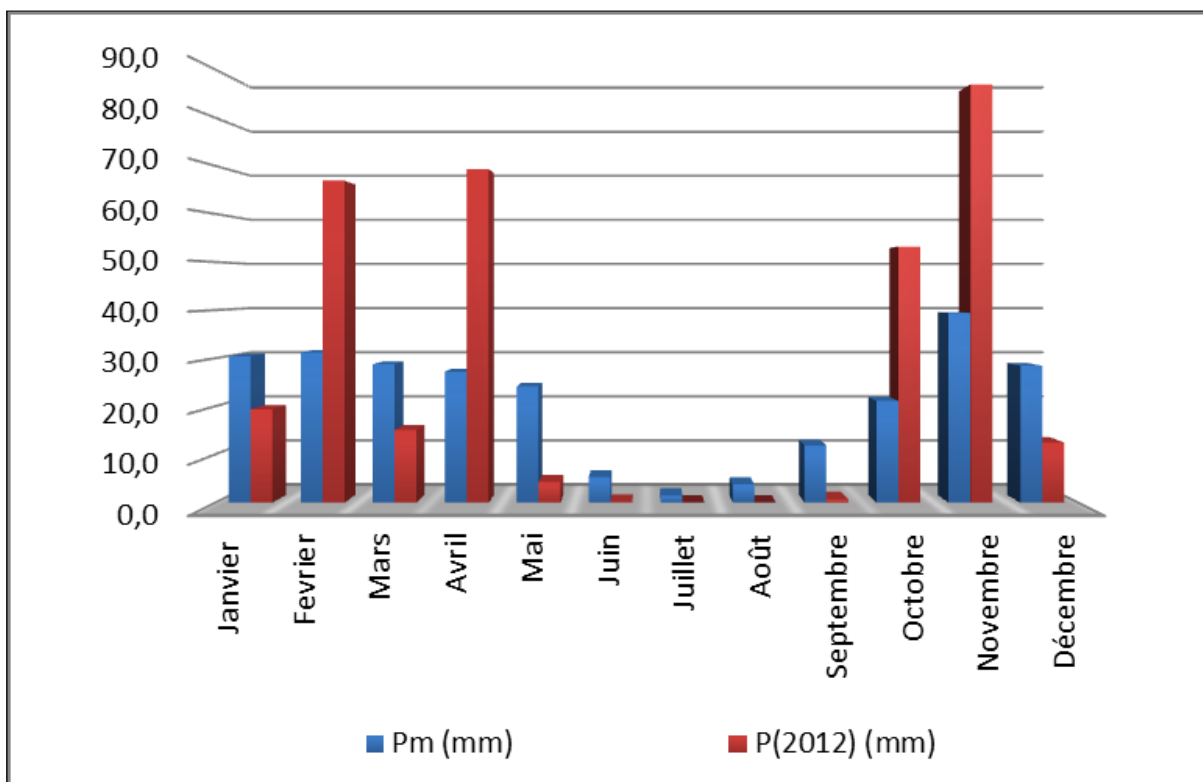


Figure 9. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles

- Pm : précipitations moyennes mensuelles (mm) (station de Relizane - 88/2006)
- P(2012) : précipitations moyennes mensuelles (mm) de l'année 2012 de la station de l'INRAA, H'madna, Relizane.

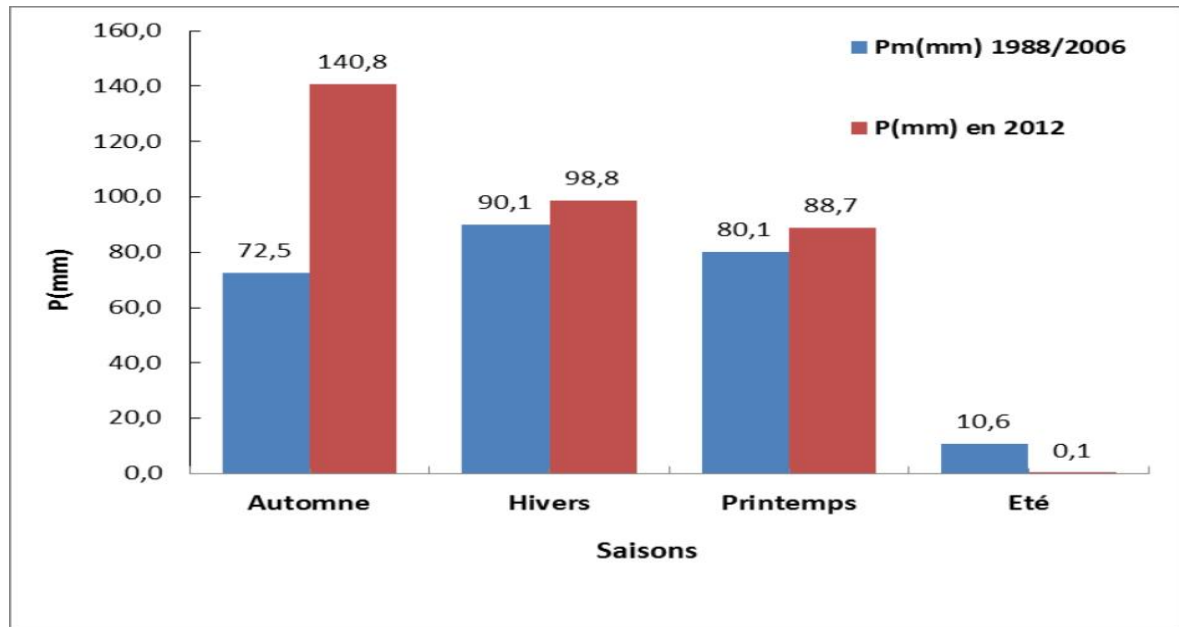


Figure 10. Histogramme du régime saisonnier de la région d'étude

2) Les températures

La caractéristique de la température en un lieu donné se fait généralement à partir de la connaissance d'au moins cinq variables importantes qui sont les moyennes des minimums et des maximums, la moyenne mensuelle, le minimum absolu et le maximum absolu ainsi que l'amplitude thermique.

Des fortes variations saisonnières sont enregistrées entre le mois le plus chaude 38.9 °C, en Juillet, et le mois le plus froid 6.1 °C, en Janvier, ou la moyenne annuelle est de 20 °C (**Tab.4**)

Tableau 4. Moyennes mensuelles des températures (°C) de la station de Relizane pour la période (1988 – 2006)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Moy	M-m
m °C	17	14,5	9	7,7	6,1	6,4	9,4	11,6	15	17	21,1	20,8	13,0	14.3
M °C	32,5	27,1	23,1	19,3	17,2	18,9	23	24,2	30,1	34,7	38,9	38,5	27,3	
Moy °C	24,2	20,8	15,9	13,6	11,6	12,8	16,1	18,5	22,7	25,8	29,6	29,3	20	

- M: moyenne mensuelle des maximums;
- m: moyenne mensuelle des minimums;
- Moy : Moyenne mensuelle.

3) L'évapotranspiration

L'évapotranspiration est très importante au mois d'Août avec 232 mm par contre elle est très faible au mois de Décembre avec 39 mm

Tableau 5. Evapotranspiration potentielle moyenne en mm, établie selon la formule PENMAN (18 ans). (Station ONM de Relizane).

Moi	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Année
ETP_(mm)	44	60	99	137	174	198	231	232	153	98	55	39	1523

3) Classification du climat

a) Diagramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls

Le diagramme Ombrothermique de **Gaussen et Bagnouls** est une méthode graphique qui permet de définir les périodes sèche et humide de l'année, où sont portés en abscisses les mois, et en ordonnées les précipitations (**P**) et les températures (**T**), avec **P=2T**.

La **figure.11** porte le Diagramme Ombrothermique de la région de Relizane établi à partir des données pluviométriques et thermiques moyennes mensuelles calculées sur une période de 19ans. D'après ce diagramme, la saison sèche s'étale sur une période de 07 mois, au cours de l'année. La figure.11 montre la courbe des pluies passant au-dessous de la courbe des températures.

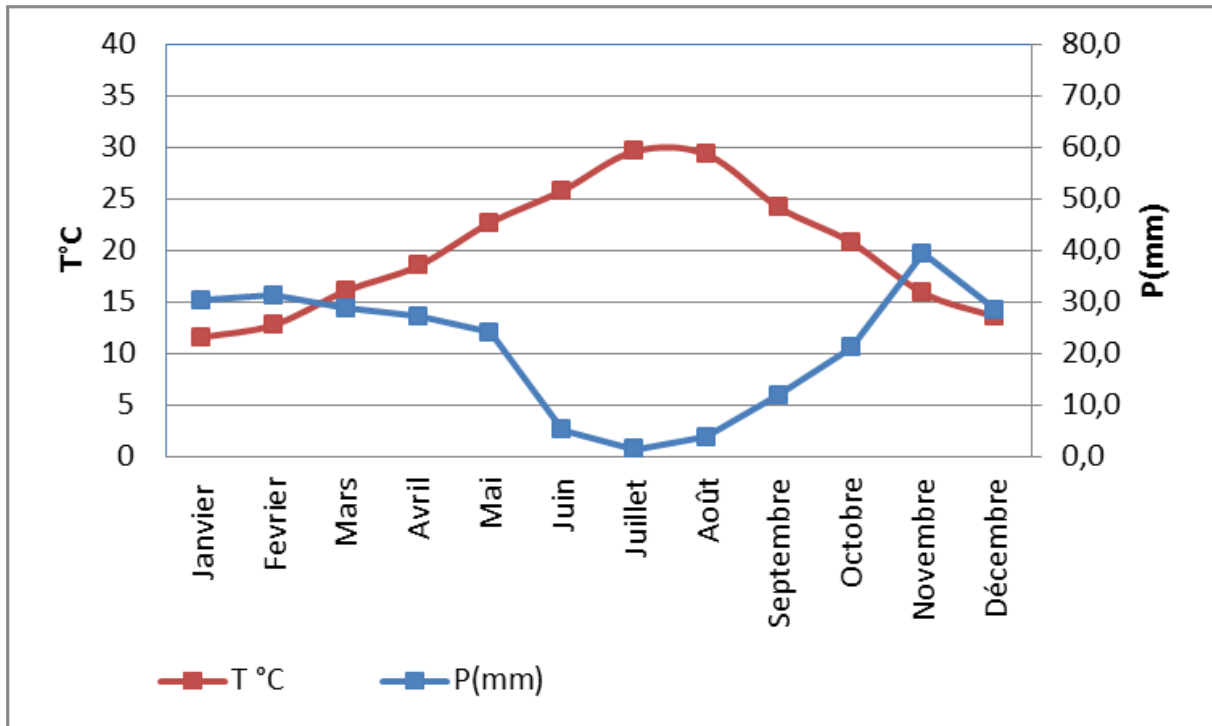


Figure 11. Diagramme Ombrothermique de la station de Relizane (1988-2007)

b) Climagramme d'Emberger

Ce climagramme permet, grâce au quotient pluviométrique de **Stewart (Q)** spécifique au climat méditerranéen, de situer une zone d'étude dans un étage bioclimatique.

Ce quotient tient compte des précipitations et des températures est déterminé comme suit :

$$Q = 3.43 \times \frac{P}{M-m}$$

- Q : le quotient pluviométrique d'Emberger ;
- P : Pluviométrie annuelle moyenne en mm = à 253.3 mm
- M : Moyenne maximale du mois le plus chaud = à 38.9°C
- m : Moyenne minimale du mois le plus froid = 6.1°C

Après application de la formule, nous obtenons la valeur de Q égale à 26,5, ce dernier situe Relizane dans l'étage Aride (**Fig.12**).

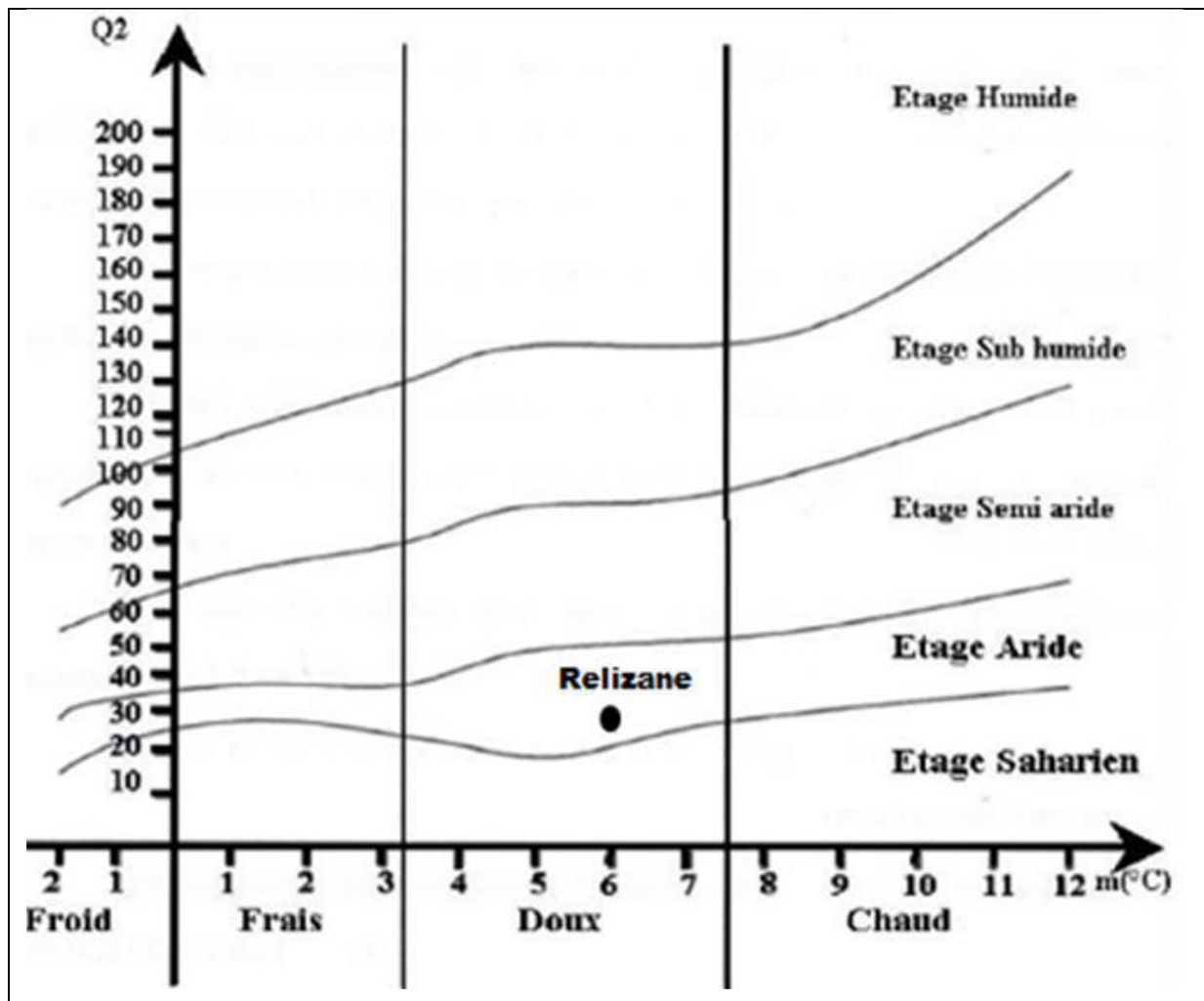


Figure 12. Climagramme pluviométrique d'Emberger pour la station de Relizane (1988-2006)

III.2.1. Conclusion

Selon l'analyse climatique, La plaine de la Mina est caractérisée par un climat contrasté, à hiver froid s'étalant de Novembre à Février. Ses caractéristiques essentielles sont : une faible pluviosité annuelle (328.42mm.), irrégulière d'une année à l'autre (du simple au double, 183mm en 1992, 365mm en 2000 et 272 en 2001), une sécheresse estivale de Mars à Octobre, et souffre d'un déficit pluviométrique de 1194.6 mm/an qui confère à l'irrigation un caractère obligatoire. Grâce au quotient pluviométrique d'Emberger ($Q=26.5$) la zone d'étude se situe dans un étage bioclimatique aride.

III.3. Géologie

La plaine de la Mina est une zone déprimée dominée au sud, à l'est et l'ouest par des massifs montagneux (ANRH, 2003) :

- **Région de Hillil (Yellel)** : Au nord-ouest, elle est entourée par les monts de Belhacel, qui sont formés de grès pliocène et de sables de désagrégation de ces grès. A l'ouest, on trouve un affleurement de grès recouvert d'une croûte calcaire sur le piedmont. Au sud, les monts de Gerbouça sont formés de grès et marne du pliocène.

- **Région de Touila-Khaourara** : A l'ouest les affleurements sont formés de grès pliocène et de marnes grises du miocène. A l'est, la plaine est séparée de la vallée de la mina par des collines formées de grès et de poudingues.

- **Vallée de la Mina** : Au sud et à l'est, la vallée est bordée de massifs érodés de marnes miocènes (du helvétien) à petits cristaux de gypse. A l'ouest la vallée est bordée par des collines de Relizane, formées de grès et de poudingue encroûtés.

- **Région d'Oued Djemâa** : La partie sud-ouest d'Oued Djemaa est bordée par des affleurements de marnes et d'argiles du miocène qui se raccordent à la plaine de Relizane par un glacis de piedmont ancien, recouvert d'une croûte calcaire.

III.4. Géomorphologie

Du point de vue géomorphologique, la plaine est caractérisée par quatre types de formations géomorphologiques (**Ghoul, 1974 ; Ghoul et Peter, 1974**) :

1) **Les glacis de piedmonts** : Ce sont des formations colluviales de piedmonts s'appuyant sur des versants, de topographie régulière ou peu ondulée, se raccordant, en aval à des formations colluviales ou à des alluvions. Elles sont recouvertes d'une croûte calcaire épaisse et durcie du quaternaire ancien.

2) **Les alluvions** : Ce sont des formations déposées par les oueds qui coulent dans la plaine (Hillil, Mina, Malah, Djemâa). Leur texture est variable et est sous la dépendance de la lithologie de l'arrière-pays drainé vers la plaine. Dans les parties basses la texture devient plus argileuse et vers le centre de la plaine, les sols de la rive gauche sont de texture moyenne et deviennent de texture fine et sont mal structurés dans la rive droite. Dans la limite Est, ces formations sont moyennement salées.

- Certains oueds ont raviné des formations géologiques salées (marnes à gypse miocène du bassin versant de la Mina, massif de gypse du trias du bassin versant de l'oued Malah) qui ont déposés dans certaines zones des alluvions salées ;

- Ces alluvions salées sont localisées dans la vallée de l'oued Malah, la plaine de Khaourara, la vallée de la Mina, et la partie sud de la sebkha de Benziane (action de la nappe phréatique

salée dans certaines zones et ravinement de la colline argileuse salée bordant la sebkha de Benziane) ;

3) **Les cônes de déjection des oueds** : Les bordures géologiques de la zone d'étude sont ravinées par des petits oueds qui déposent un cône de matériaux à l'aval de texture variable : dans la vallée de la mina et la plaine de oued djemaa, le cône de déjection comporte une texture lourde, alors que dans les zones de Khourara et Yellel, la texture est plus légère. Les couvertures sableuses sont caractérisées par des dépôts sableux épais (plus de 2m) d'origine éolienne qui proviennent des ables de désagrégation des grés pliocènes. La topographie est légèrement ondulée à uniforme. Ces dépôts sont localisés dans la plaine de Yellel au pied du massif de Belhacel.

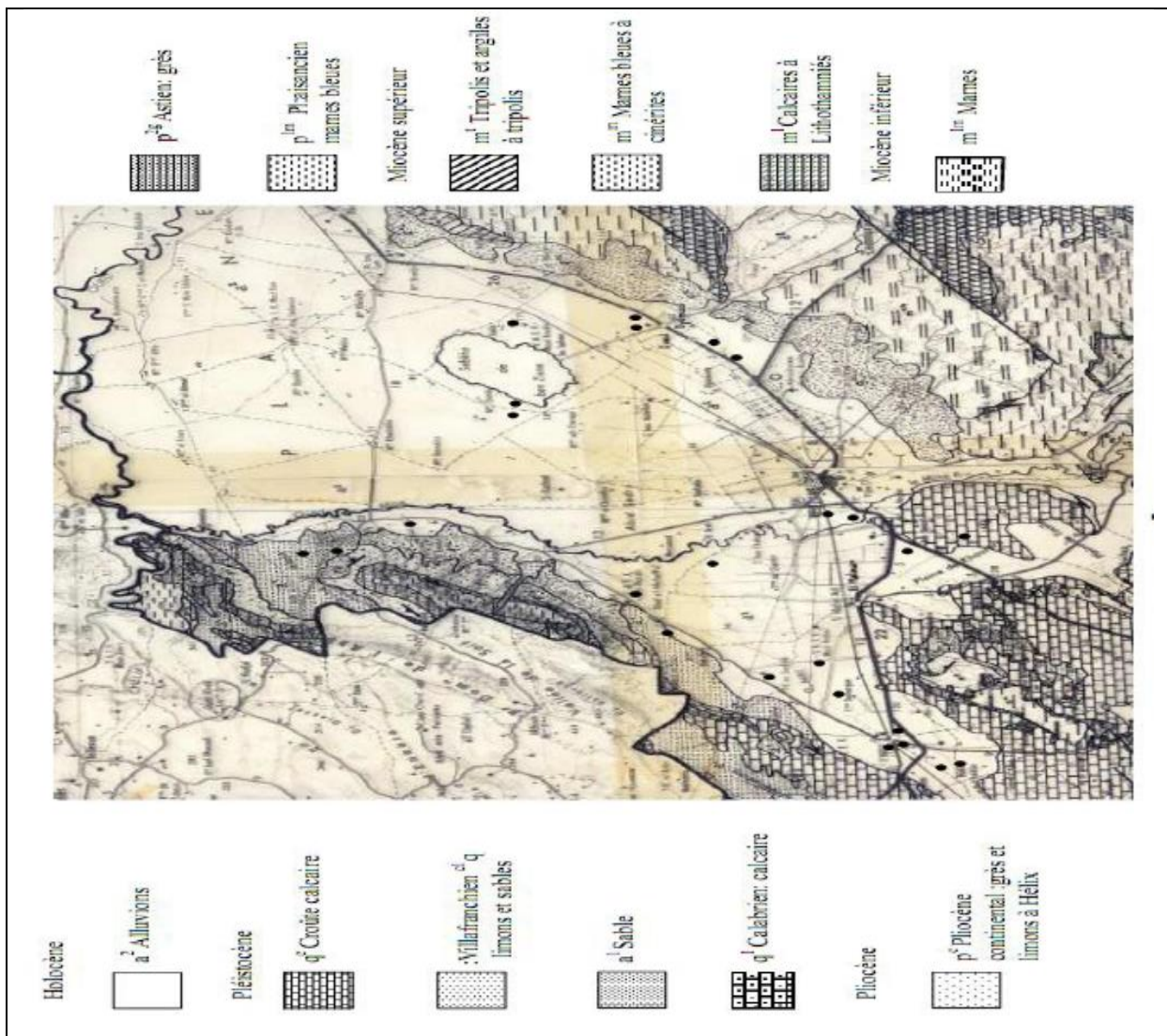


Figure 13. Carte géologique 1/50000 de Relizane (Boualla, 2002)

III.5. Réseau hydrographique et ressources en eaux

Il existe deux principaux oueds dans la plaine de la Mina : l'oued Yellel à l'est et l'oued Mina au centre qui reçoit un affluent salé au sud du périmètre : l'oued Malah.

Le réseau hydrographique est constitué par l'Oued Mina qui draine les reliefs de l'Ouarsenis et est considéré comme l'un des principaux affluents de l'Oued Cheliff.

La mise en eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda en 1978 avec une capacité de 225 Hm³ a permis l'exploitation du potentiel en eaux de surface de l'Oued Mina pour l'irrigation de la plaine de la Mina. Les **tableaux.6 et 7** montrent la salinité et la qualité de l'eau d'irrigation, au niveau de ce barrage, celle-ci se situe entre 1.28 et 2.02 dS/m (de 1990 à 2002) avec une moyenne générale de 1.47 dS/m (0.94g/l de sel).

Ainsi, l'irrigation avec cette eau présente un risque important de salinisation secondaire sur les sols lourds à drainage déficient.

Le tableau montre la qualité de l'eau d'irrigation au niveau du barrage ainsi que le bilan ionique.

Les résultats analytiques montrent que la qualité de l'eau pour l'irrigation est moyenne à médiocre, elle est à utiliser avec précaution et nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.

Tableau 6. Salinité de l'eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda (Relizane)

Année	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	2000	2001	2002
BSM	1.35	1.39	1.67	2.02	1.28	-	1.28	1.33	1.44	1.64	1.59	1.29	1.3

(Source.ANRH ,2003)

Tableau 7. Qualité de l'eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda(Relizane)

Analyses	CL ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	SAR	CE	Class
	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l		dS/m	
Décembre 2005	7.6	7.65	0.24	2.2	4.72	6.09	0.19	6.39	2.74	1.71	C3S1

(Source.INSID, Relizane ,2008)

Le réseau d'irrigation mis en place depuis 1938 est constitué par des canaux à ciel ouvert de différents types. Des moyens financiers importants ont été mobilisés par les pouvoirs publics pour la réalisation de travaux de réhabilitation du réseau d'irrigation et de son extension vers les zones les plus éloignées du périmètre.

Les ressources en eaux souterraines sont représentées par l'existence d'une nappe salée à faible profondeur qui a fait que l'orientation vers l'utilisation de cette ressource n'ayant pas été retenue.

III.6. Les sols

Du point de vue pédologique, la plaine de la Mina est constituée d'apports alluviaux caractérisés par des terres à structure fine, potentiellement salinisables. Ceux déjà irrigués sont effectivement affectés par la salinité (ANRH, 2003). Selon l'étude menée par l'INSID (2008), les sols affectés par une salinité supérieure à 2 dS.m⁻¹, représentent 75 % de la superficie sur les 6000 hectares prospectés, au niveau du périmètre irrigué de la Mina.

Les sols sont regroupés dans différentes classes pédologiques qui sont : les sols peu évolués, les sols halomorphes, les sols hydromorphes, les sols calcimagnésiques et les vertisols (Ghoul, 1974 ; Ghoul et Peter, 1974) :

III.7. Occupation du sol

L'agriculture dans le périmètre est très diversifiée. Les cultures pratiquées sont les céréales, les fourrages, le maraîchage, l'arboriculture (agrumes, olivier, grenadier et autres fruitiers).

Les superficies irriguées dans le périmètre se situent autour de 3856 Ha qui se répartissent entre les différentes spéculations pratiquées (Tab.7.).

Les sols très salés abandonnés sont couverts par une végétation halophyte dont la densité de recouvrement est très variable dans l'espace et dans le temps.

Tableau 8. Répartition des superficies irriguées entre les différentes spéculations pratiquées

Spéculations	Superficies (Ha)
Agrumes	2772
Oliviers	396
Arbres fruitiers	160
Fourrages verts	50
Pépinières	58
Maraîchages	100
Tomate industrielle	20
Artichaut	250
Pomme de terre	50
Total	3856

(l'INSID, 2008)

Le **tableau.9** et la **figure.14** montrent la répartition de la superficie de l'occupation du sol du sol, au niveau du périmètre, sur une superficie de 6000 Ha (INSID, 2008).

Tableau 9. Répartition de l'occupation du sol, dans le périmètre de la Mina, sur 6000 Ha

Occupation du sol	Superficie (%)
Agrumes et arbres fruitiers	33
Oliviers	8
Céréales / Jachère	46
Maraîchages	4
Pépinières	1
Végétation naturelle (halophyte)	7
Total	Sur 6000 Ha

(Source, INSID, 2008)

III.8. Conclusion

Le milieu physique doit son originalité à la combinaison d'un relief en cuvette, d'un climat à sécheresse saisonnière accentuée, d'eaux courantes peu abondantes, de terres parfois salées et d'une végétation d'halophytes couvrant certaines zones de la plaine.

Ces conditions naturelles défavorables à la mise en valeur agricole a conduit les pouvoirs publics à suppléer à l'insuffisance des précipitations par l'installation d'un réseau d'irrigation, alimenté à partir du barrage de Sidi M'Hamed Benaouda.

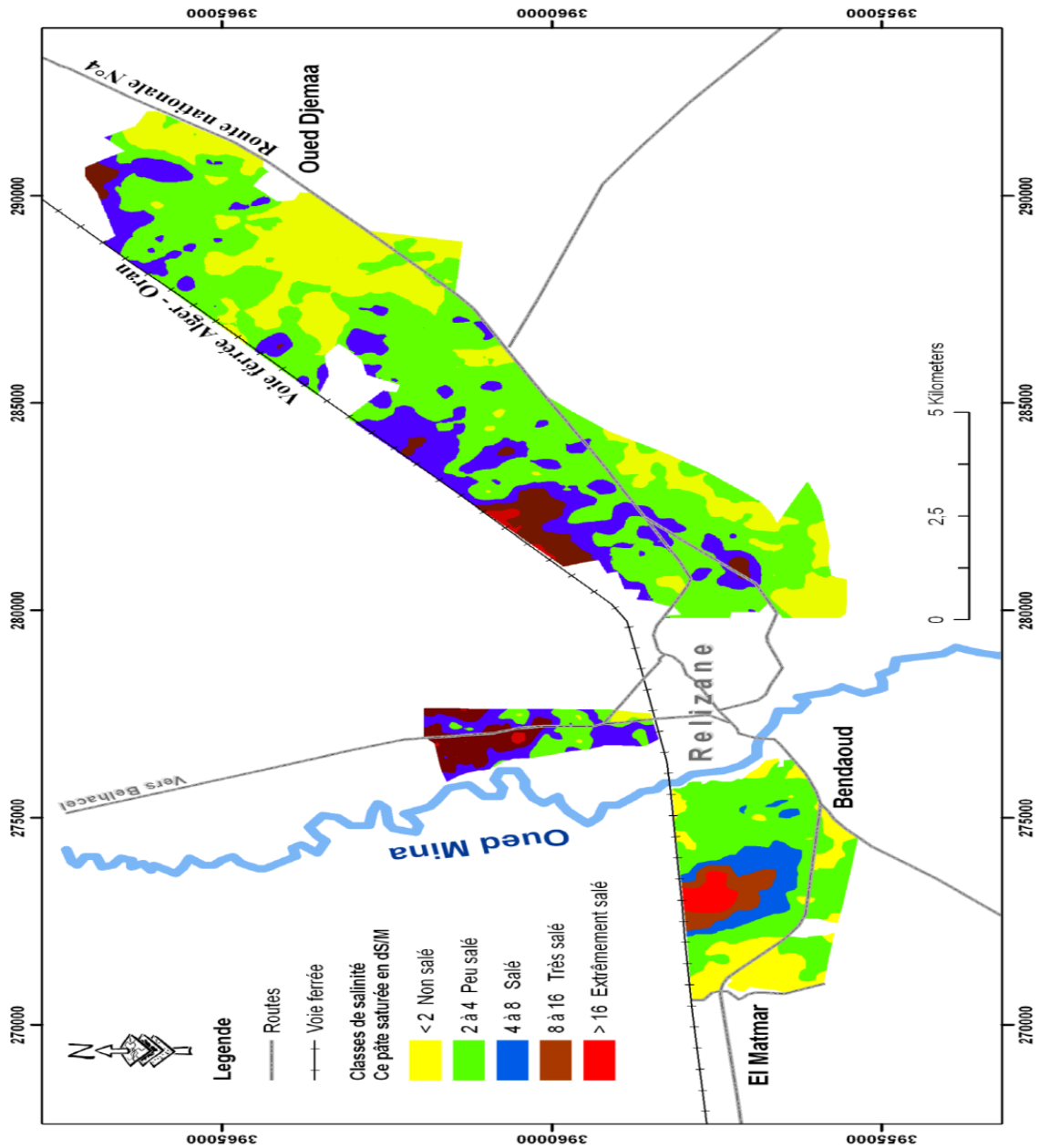


Figure 14. Carte de salinité des sols du périmètre irrigué de la Mina sur 6000 Ha (INSID, 2008)

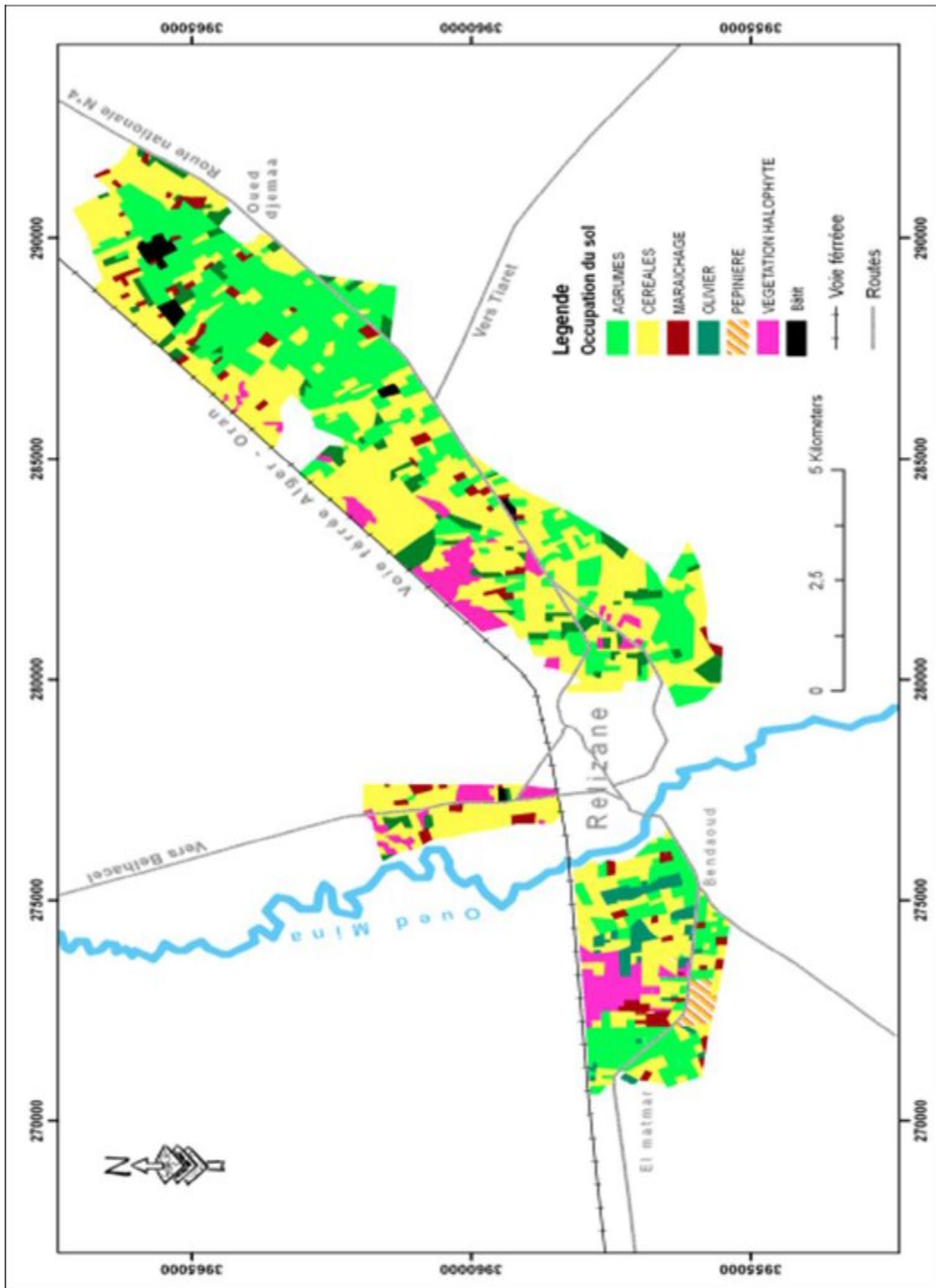


Figure 15. Carte d'occupation des sols du périmètre irrigué de la Mina sur 6000 Ha (INSID, 2008)

Chapitre V

Résultats & Discussion

Chapitre V : Résultats & Discussion

V.1. Caractérisation de la salinité des sols

Les résultats portent sur la conductivité électrique (extrait de la pâte saturée et extrait dilué) des 64 échantillons de sol prélevés, sur quatre niveaux de profondeur.

1) Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée (CEps)

Les valeurs moyennes de la CEps passent de 12.2 dS.m⁻¹ dans l'horizon de surface et augmentent progressivement vers la profondeur pour atteindre une valeur de 21.5 dS.m⁻¹.

La salinité moyenne de la couche (0-100cm) révèle que le profil salin moyen est de type descendant (**Fig.22**), elle se situe entre 12.2 dS.m⁻¹ en surface et 21.5 dS.m⁻¹ en profondeur, avec une moyenne de 18.1 dS.m⁻¹ (**tab.11**).

Les valeurs du coefficient de variation de la CEps sont supérieures à 35 %, au niveau de tous les horizons. Ces valeurs expriment une forte variabilité de la salinité en surface et en profondeur. Cette variabilité est cependant très élevée dans l'horizon de surface (0-25cm) qui enregistrent un coefficient de variation de l'ordre de 61.5 %. La couche (0-100cm) présente un coefficient de variabilité élevé de 36.4% (tab11.).

Tableau 11. Résultats statistiques de la Ceps en dS.m-1.

Paramètres	Profondeur (cm)					
	0- 25cm	25- 50cm	50- 75cm	75- 100cm	0 - 75cm	0 - 100cm
Moyenne	12,2	16,8	20,7	21,5	16,9	18,1
CV %	61,5	40,2	42,1	46,6	37,4	36,4

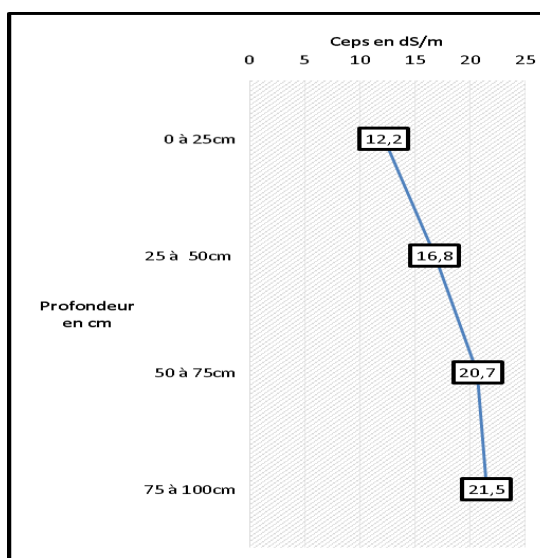


Figure.22. Profil salin moyen des échantillons prélevés (CEps en dS.m⁻¹)

2) Conductivité électrique de l'extrait dilué (CEd1/5)

Les valeurs moyennes de la CEd passent de 3.2 dS.m⁻¹ dans l'horizon de surface et augmentent progressivement vers la profondeur pour atteindre une valeur de 4.7 dS.m⁻¹.

Les résultats des **tableaux 12** révèlent que la conductivité électrique de l'extrait dilué (CEd1/5), pour l'ensemble des horizons se situe entre 1.1 et 8.9 dS.m⁻¹.

Les valeurs du coefficient de variation de la CEd1/5 sont supérieures à 35 %, pour les horizons (0-25cm, 25-50cm et 75-100cm). Elles expriment une forte variabilité de la salinité dans ces couches. Cette variabilité est, cependant, modérée, au niveau de l'horizon (50-75cm), qui enregistre un coefficient de variation de l'ordre de 32 %,

La valeur moyenne de la CEd1/5 du profil est de 3.9 dS.m⁻¹.

Tableau.12. Résultats statistiques de la CEd1/5 en dS.m⁻¹.

Paramètres	Profondeur (cm)					
	0- 25cm	25- 50cm	50- 75cm	75- 100cm	0 - 75cm	0 - 100cm
Moyenne	3,2	3,8	4,0	4,7	3,8	3,9
CV %	47,1	40,7	32,0	43,0	34,2	33,8

L'analyse corrélative entre les valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CEps) et celles de l'extrait dilué (CEd1/5), montre une bonne corrélation ($r^2 > 0.79$) qui est statistiquement hautement significative (**Fig.23**).

La relation entre les deux conductivités peut s'écrire de cette façon :

$$\text{CEps (0 - 75cm) en (dS.m-1)} = 4.31 * \text{CEd1/5} + 0.014 \quad (r^2=0.79)$$

$$\text{CEps (0 - 100cm) en (dS.m-1)} = 4.35 * \text{CEd1/5} + 0.81 \quad (r^2=0.82)$$

Avec :

CEps : conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée en dS.m⁻¹ à 25°C ;

CEd1/5 : conductivité électrique de l'extrait dilué 1/5 en dS.m⁻¹ à 25°C.

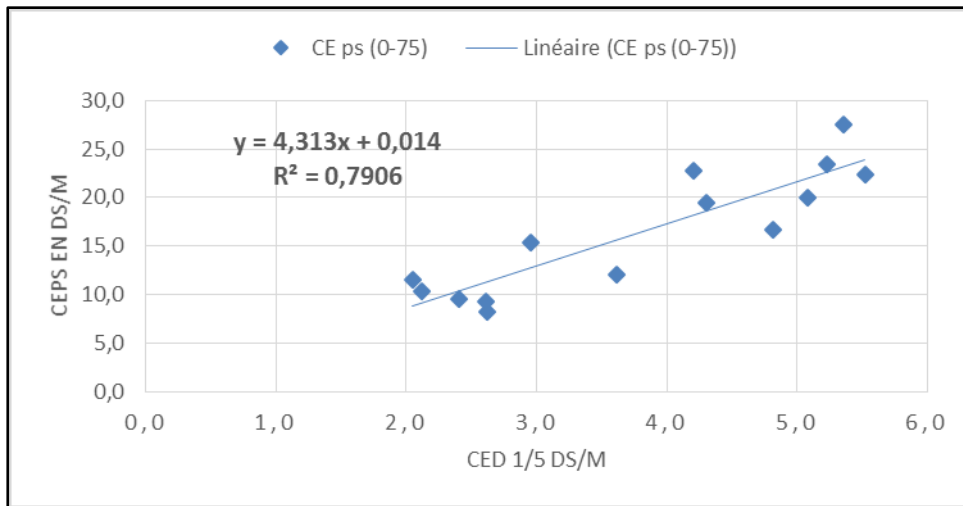


Figure.23. Corrélation entre CED_{1/5} et CEps (0 – 75cm)

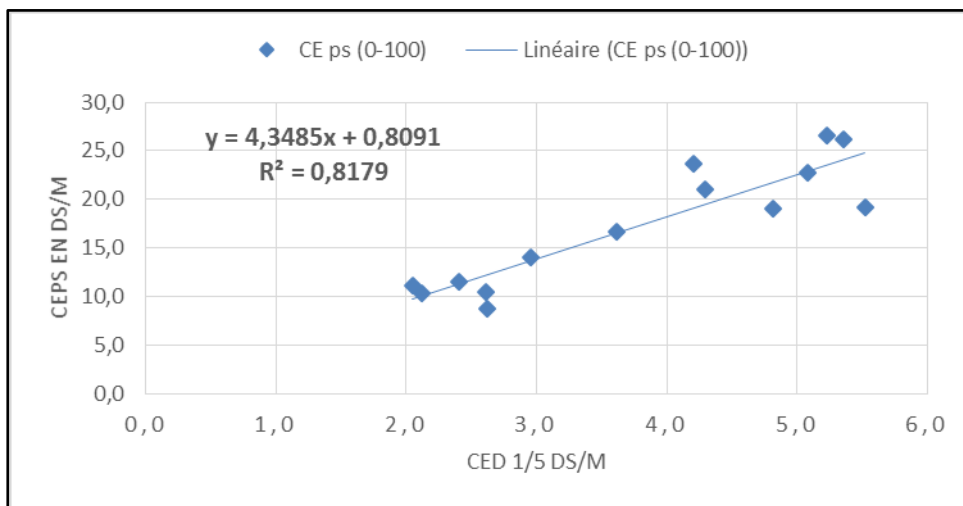


Figure.24. Corrélation entre CED_{1/5} et CEps (0 – 100cm)

3) Distribution horizontale de la salinité (Fig.23.)

a) Distribution de la salinité de l’horizon de surface (0-25cm)

Les valeurs minimales de la CEps de l’horizon de surface (0-25cm) sont observées dans la partie sud de la parcelle, avant le drain tertiaire, situé au centre, elles sont de l’ordre de 3.57 à 15.35 dS.m⁻¹. Par contre les valeurs maximales, situées au nord de la parcelle, varient de 6.13 à 35.1 dS.m⁻¹.

b) Distribution de la salinité de l'horizon de sub-surface (25-50cm)

Pour l'horizon de sub-surface (25-50cm), les valeurs minimales de la CEps sont de 6.02 à 26.4 dS.m⁻¹. Par contre les valeurs maximales, situées, dans le nord de la parcelle, varient de 15.95 à 28.5dS.m⁻¹.

c) Distribution de la salinité de l'horizon (50-75cm)

Pour l'horizon (50-75cm), les valeurs minimales de la CEps sont de 8.5 à 29.7 dS.m⁻¹. Les valeurs maximales sont de 12.14 à 38.3 dS.m⁻¹.

d) Distribution de la salinité de l'horizon de profondeur (75-100cm) Pour l'horizon de profondeur (75-100cm), les valeurs minimales de la CEps sont de 9.48 à 25.9dS.m⁻¹, dans les sud de la parcelle. Les valeurs maximales sont de 22.5 à 41.1 dS.m⁻¹, dans le nord.

A cet effet, nous pouvons conclure, que la salinité des quatre horizons augmente du sud vers le nord de la parcelle.

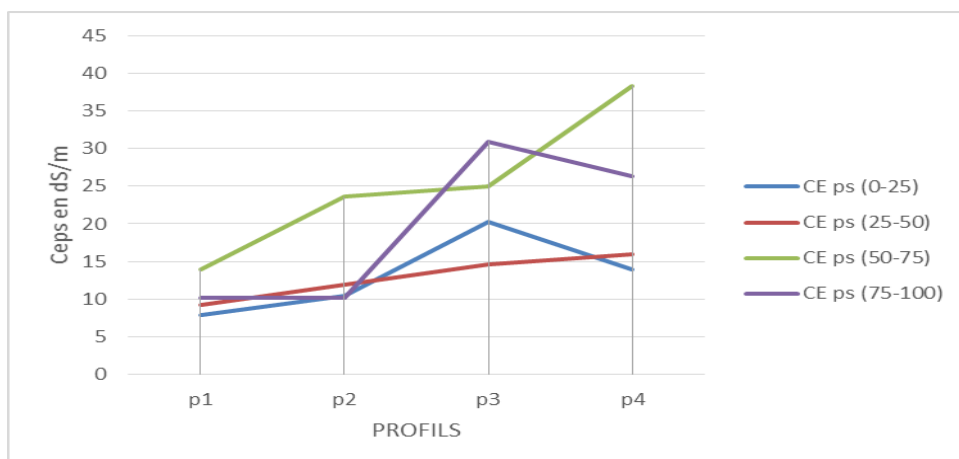


Figure.24. Distribution horizontale de la CEps de l'horizon 0-25cm (sud-nord)

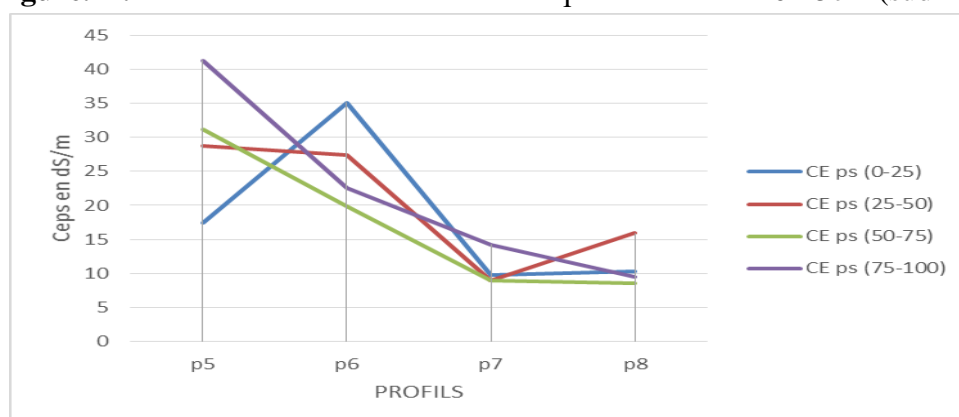


Figure.25. Distribution horizontale de la CEps de l'horizon 25-50cm (nord-sud)

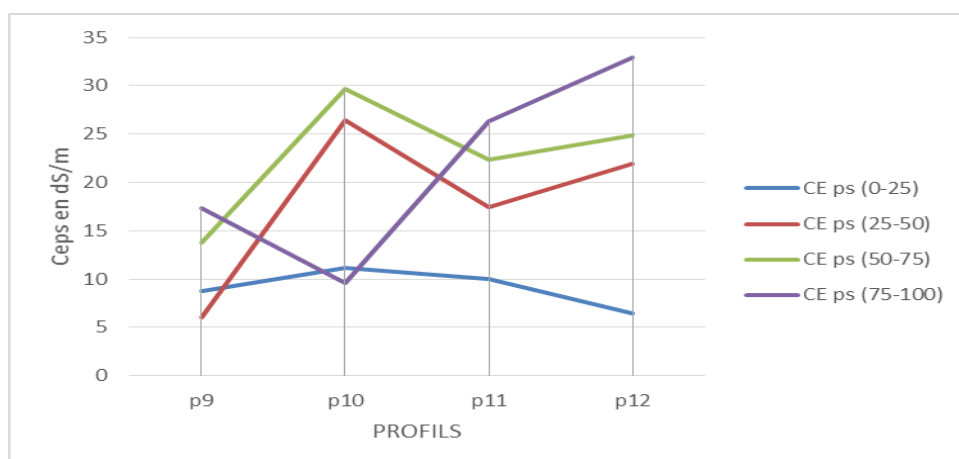


Figure.26. Distribution horizontale de la CEps de l'horizon 50-75cm (sud-nord)

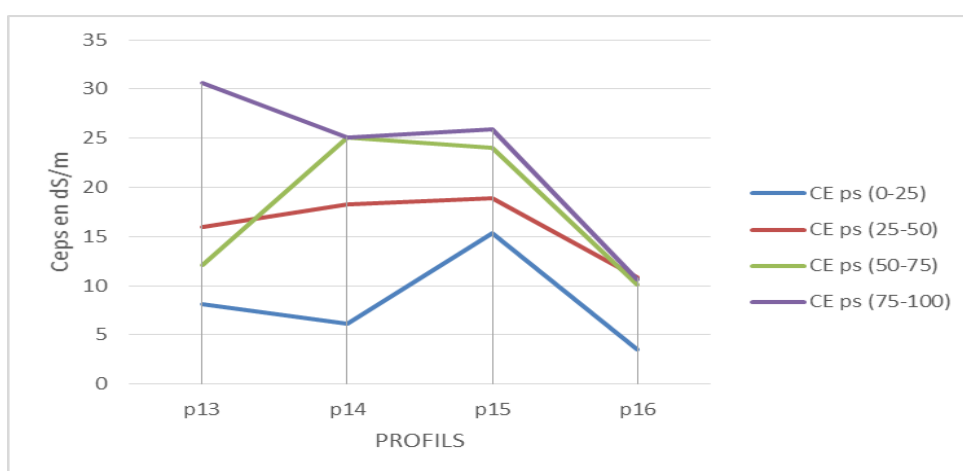


Figure.27. Distribution horizontale de la CEps de l'horizon 75-100cm (sud-nord)

4) Distribution verticale de la salinité

a) Profils de types convexes

Les **figures 28** montrent une grande variabilité verticale (intra-profil) et spatiale (inter-profils) de la salinité du sol. En effet, nous distinguons deux types de profils salins présentant troisallures différentes :

Les profils de type convexe (P1, P2, P4 et P10) avec un maximum de salinité dans l'horizon médian (50-75cm). Ce type de profil, caractérisé par un maximum de salinité, dans les horizons peu à moyennement profonds, serait le résultat d'une lixiviation des sels, due aux pluies d'hivers. (Servant, 1976).

b) Profils de types ascendants

Le profil P6, de type ascendant, est caractérisé par des maximums de salinité dans l'horizon de surface. Ce type de profil serait le résultat d'une remontée capillaire, due à la présence d'une nappe peu profonde.

c) Profils de types descendants

Le reste des profils de types descendants, sont caractérisés par des maximums de salinité dans les horizons profonds (50-75 et 75-100 cm). Ce type de profil serait le résultat d'une lixiviation des sels par les pluies hivernales, jusqu'à cette profondeur.

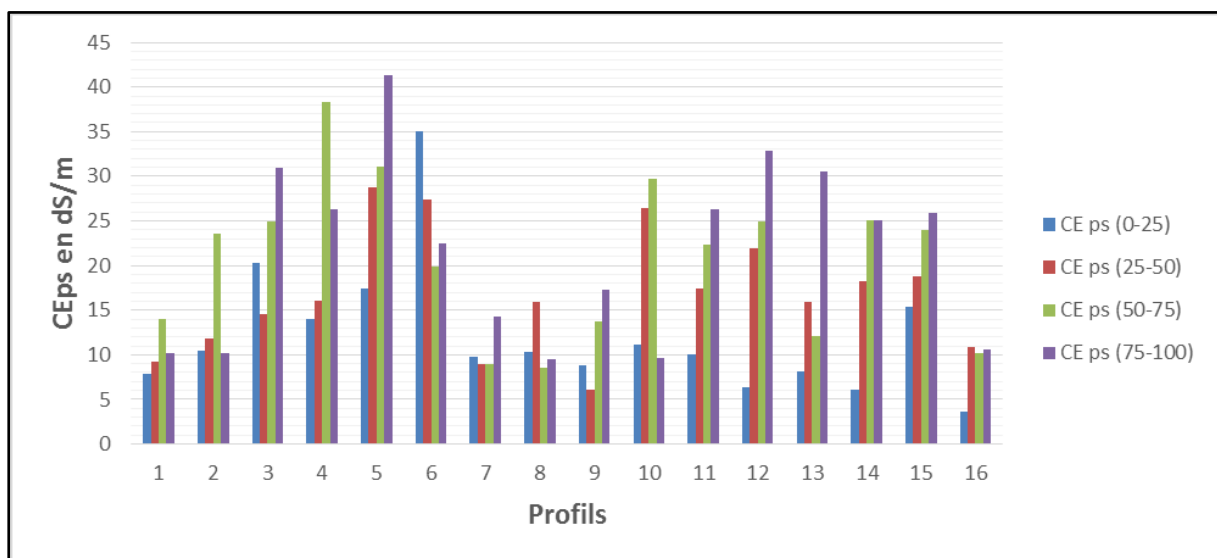


Figure.28. Distribution verticale de la CEps (dS/m) par profils

V.2. Etude de la salinité par induction électromagnétique (EM38)

Les lectures électromagnétiques, obtenues par l'appareil EM38, ont été étalonnées par rapport aux mesures de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée. Ceci nous permettra d'obtenir une caractérisation de la conductivité électrique de la parcelle d'étude.

V.2.1. Les lectures électromagnétiques de l'EM38

Le rapport entre les mesures électromagnétiques en mode horizontal et en mode vertical [CEMH / CEMV] permet la distinction entre les différents profils salins et de caractériser l'évolution de la salinité en profondeur (**Tab.13**) :

- Dans le cas où $CEMH > CEMV$ on se trouve au-dessus d'un profil salin décroissant avec la profondeur, situation indiquant une concentration des sels en surface ;

- Dans le cas contraire, lorsque $CEMV > CEMH$, il s'agit d'un profil salin croissant en profondeur, où les sels se sont accumulés.

La comparaison entre les lectures de l'CEMH et celles de l'CEMV est une première possibilité d'interprétation des résultats. Les résultats du rapport entre les lectures horizontales et les lectures verticales [$CEMH / CEMV$] est inférieur à 1.05 (**Tab.14**). Ceci indique une forte concentration de la salinité en profondeur (profil lessivé ou profil salin descendant).

Tableau.13. Distinction des différents profils salins

Type de profil	CEM(H) / CEM(V)	Auteurs
Profil inversé	$CEMH / CEMV > 1.05$	Corwin et Rhoades (1989 & 1990)
Profil lessivé	$CEMH / CEMV \leq 1.05$	
Profil inversé	$CEMH / CEMV > 1.05$	Norman (1990b, Heath et al. 1999)
Profil uniforme	$1 \leq CEMH / CEMV \leq 1.05$	
Profil lessivé	$CEMH / CEMV \leq 1$	Heath et al. $0.5 \leq CEMH/CEMV \leq 1$

Tableau.14 Type de profil de salinité obtenu

Type de profil	CEM(H) / CEM(V)
Profil lessivé	$CEMH / CEMV = 0.81 (\leq 1.05)$

V.2.2. Estimation de la CEps à partir des mesures électromagnétiques

L'approche de la régression simple a été utilisée dans cette étude pour l'étalonnage des mesures électromagnétiques par rapport aux conductivités électriques des extraits de pâtes saturées de sol. Le coefficient de corrélation (r) est utilisé dans chaque groupe d'analyse pour comparer les ajustements effectués avec les différents modèles. Ces coefficients des modèles obtenus sont présentés dans les tableaux.

a) Estimation de la CEps à partir de la CEM(H)

Ce type d'étalonnage se base sur l'utilisation de la régressions simple qui consiste à relier toutes les mesures électromagnétiques horizontales de l'EM-38 obtenues, à la moyenne des conductivités électriques de l'extrait de pâte saturée des horizons du sol (0-25cm ; 25-50cm et 50-75cm).

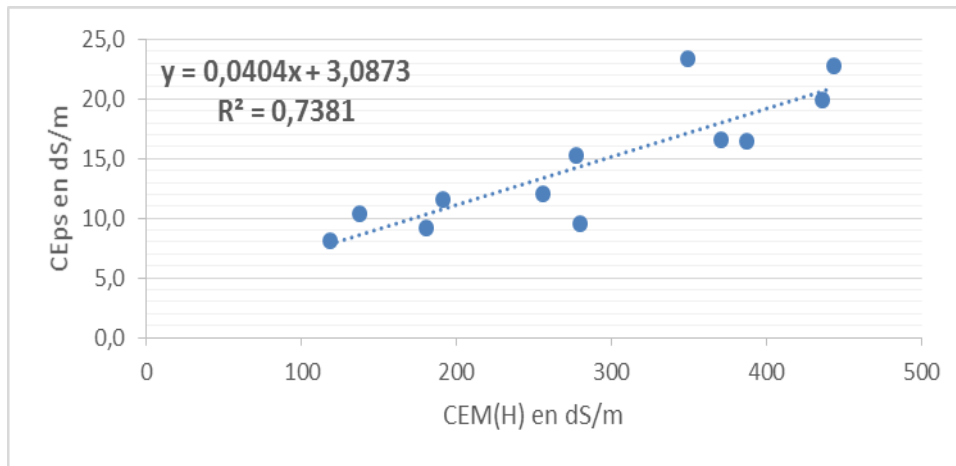


Figure.29. Estimation de la CEps à partir de la CEM(H)

b) Estimation de la CEps à partir de la CEM(V)

Ce type d'étalonnage se base sur l'utilisation de la régressions simple qui consiste à relier toutes les mesures électromagnétiques verticales de l'EM-38 obtenues, à la moyenne des conductivités électriques de l'extrait de pâte saturée des horizons du sol (0-25cm ; 25-50cm ; 50-75cm et 75-100cm).

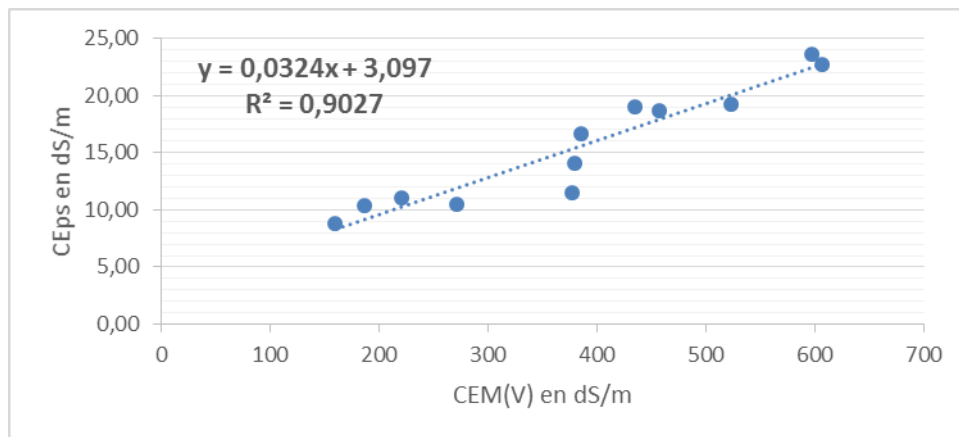


Figure.30 . Estimation de la CEps à partir de la CEM(H)

Les **tableaux.16** montrent que le coefficient de corrélation est supérieur à 0.84 d'où la relation est significative Cette relation est plus forte entre les valeurs de la CEM(V) et les valeurs de la Ceps de la couche (0-100cm), avec un coefficient de corrélation (r) de 0.94. Par contre le coefficient de corrélation, entre les valeurs de de la CEM(H) et les valeurs de la Ceps de la couche (0-75cm), est de l'ordre de 0.84. Des résultats similaires ont été trouvés par **Gacem. F (2014)** avec des coefficients de corrélation variant entre 0,83 et 0,94.

Tableau 15. Equations de régressions simples obtenues pour le calcul de la CEps du sol à partir des mesures des conductivités électromagnétiques horizontales et verticales.

Profondeur (cm)	Equations de régressions	n	r
0-75cm	$CEps(0-75cm) = 0.04 * CEM(H) + 3.09$	16	0.84
0-100cm	$CEps(0-100cm) = 0.032 * CEM(V) + 3.1$	16	0.94

V.2.3. Analyse statistique des valeurs mesurées et calculées de la CEps

Les tableaux .15. Montre la comparaison entre les paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la CEps de la couche (0-75cm) et (0-100cm).

1) Analyse statistique des valeurs de la CEps de la couche (0-75cm)

Les résultats montrent que les moyennes de la CEps mesurée et celles calculées présentent une différence de 15% et de 36% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 24%, et la différence entre la valeur minimale est de 4%.

2) Analyse statistique des valeurs de la CEps de l'horizon de profondeur (0-100cm)

Les résultats montrent que les moyennes de la CEps mesurée et celles calculées présentent une différence de 14.5% et de 35% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 24%, et la différence entre la valeur minimale est de 6.5%.

Tableau .16. Valeurs des conductivités électriques (CEps), mesurées et calculées

N	CE _{ps} (dS.m-1) mesurée au laboratoire		CE _{ps} (dS.m-1) calculée par les équations de régressions	
	(0-100cm)	(0-75cm)	(0-100cm)	(0-75cm)
P1	10,34	10,38	9,084	8,6221
P2	14,05	15,33	15,26	14,2781
P3	22,69	19,95	22,524	20,7017
P4	23,65	22,77	22,204	20,9845
P5	29,63	25,74	14,332	12,7833
P6	26,23	27,47	18,14	16,8233
P7	10,48	9,22	11,804	10,3593
P8	11,06	11,58	10,172	10,8037
P9	11,48	9,52	15,164	14,3993
P10	19,20	22,40	19,836	13,7933
P11	19,04	16,62	17,02	18,0757
P12	26,57	23,40	17,724	17,1869
P13	16,71	12,08	15,452	13,4297
P14	18,64	16,49	17,724	18,7221
P15	21,03	19,40	13,02	12,2581
P16	8,79	8,17	8,22	7,8545

Tableau .17. Paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la CEps

Prof (cm)	Corrélation		CEps (dS.m-1) Mesurée au laboratoire				CEps (dS.m-1) calculée par les équations de régressions			
	n	r	Ecart type	Moy	Min	Max	Ecart type	Moy	Min	Max
0-75cm	16	0.84	6.32	16.91	8.17	27.47	4.02	14.44	7.85	20.98
0-100cm	16	0.94	6.58	18.10	8.79	29.63	4.29	15.48	8.22	22.52

V.3. Cartographie de la salinité

Les données acquises à l'aide du conductimètre électromagnétique EM38 sont traitées numériquement par des méthodes géostatistiques, en particulier, des cartes sont tracées à partir d'une interpolation par krigeage. L'emploi de ces méthodes se trouve facilité par le développement de logiciels fonctionnant sur micro-ordinateurs et pouvant même être utilisés sur du matériel portable (Boivin, 1988).

V.4. Distribution spatiale de la salinité

Les cartes krigées, issues de l'analyse géostatistique des conductivités électriques estimées aux 909 emplacements de mesures de la conductivité électromagnétique, sont présentées dans les figures (31). Les couleurs ont été choisies pour correspondre aux seuils d'interprétation habituels de la salinité de l'USDA. Les calculs des superficies ont été établis automatiquement, par le module Géostatistical Analyst du logiciel ARCGIS 9.3, avec lesquelles cartes de salinité ont été générées. Le tableau représente la répartition des superficies en hectares (Ha) en fonction des classes de salinité.

Cela montre que sur la parcelle d'étude, le gradient de salinité est moyen, depuis des sols salés jusqu'à des sols considérés comme extrêmement salés.

1) Distribution spatiale de la salinité dans la couche (0-100cm)

La figure.31. montre une faible hétérogénéité de la répartition des différentes classes de la salinité au niveau de la parcelle. Aussi, les plus fortes concentrations de la salinité (>16 dS/cm) sont situées dans la partie nord de la parcelle et les plus faibles concentrations (<16 dS/cm) sont situées dans la partie sud.

- Les sols non salins ($CEps < 2$ dS.m-1) et les sols légèrement salins (2 dS.m-1 $< CEps < 4$ dS.m-1) sont inexistantes;
- Les sols salins (4 dS.m-1 $< CEps < 8$ dS.m-1) occupent une superficie de 0.04 ha, soit 0.39% et sont localisée sous forme d'une plage, dans le sud de la parcelle;
- Les sols très salins (8 dS.m-1 $< CEps < 16$ dS.m-1) occupent environ la moitié de la parcelle soit 5.6 ha, soit 48.17%. Ils sont concentrés au sud de la parcelle avec quelques plages dans la partie centrale et le nord de la parcelle;

- Les sols extrêmement salins ($>16 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent 5.9 ha, soit 51.44%, et sont situés au nord et au centre de la parcelle.

2) Distribution spatiale de la salinité dans la couche (0-100cm) (INSID, Mai 2012)

La figure.33. montre une faible hétérogénéité de la répartition des différentes classes de la salinité au niveau de la parcelle. Aussi, les plus fortes concentrations de la salinité ($>16 \text{ dS/cm}$) sont situées dans la partie nord de la parcelle et les plus faibles concentrations ($<16 \text{ dS/cm}$) sont situées dans la partie sud.

- Les sols non salins ($\text{CEps} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$), les sols légèrement salins ($2 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CEps} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) et les sols salins ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CEps} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistant;

- Les sols très salins ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CEps} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent environ la moitié de la parcelle soit 4.8 ha, soit 42 %. Ils sont concentrés au sud de la parcelle avec quelques plages dans la partie centrale et le nord de la parcelle;

- Les sols extrêmement salins ($>16 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent 6.7 ha, soit 58 %, et sont situés au nord et au centre de la parcelle.

3) Evolution spatiale et temporelle de la salinité

La répartition spatiale de la salinité, de la couche (0-100cm) et la carte de salinité de la même, obtenue par l'INSID en Mai 2012, montre une structure spatiale analogue. En effet, les plus fortes concentrations ($> 16 \text{ dS.m}^{-1}$) sont observées dans le nord et les plus faibles concentrations ($< 16 \text{ dS.m}^{-1}$) dans le sud de la parcelle, pour les deux campagnes de mesures.

La comparaison entre la carte de salinité obtenue de la couche (0-100cm) et la carte de salinité de la même, obtenue par l'INSID en Mai 2012, montre une légère augmentation de la classe de salinité ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CEps} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) de l'ordre de 06.17% et une légère diminution de la classe de salinité ($> 16 \text{ dS.m}^{-1}$) de l'ordre de 06.66%.

Concernant les classes de salinité inférieures à 8 dS.m^{-1} , nous remarquons une absence de ces classes dans la carte obtenue par rapport à celle obtenue par l'INSID.

Cette différence pourrait être due au lessivage par les pluies hivernales.

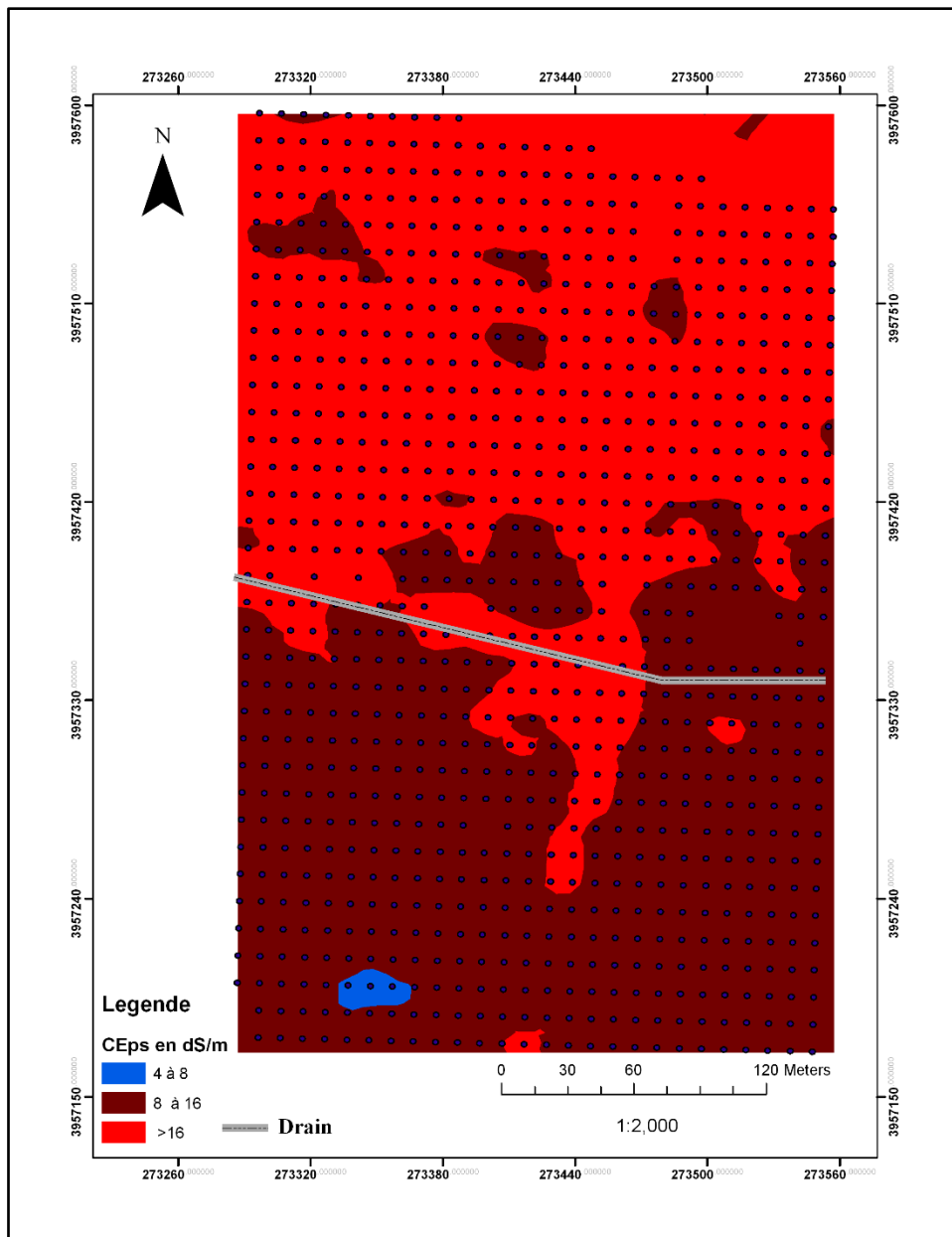


Figure.31. Carte de salinité de la couche (0-100cm)

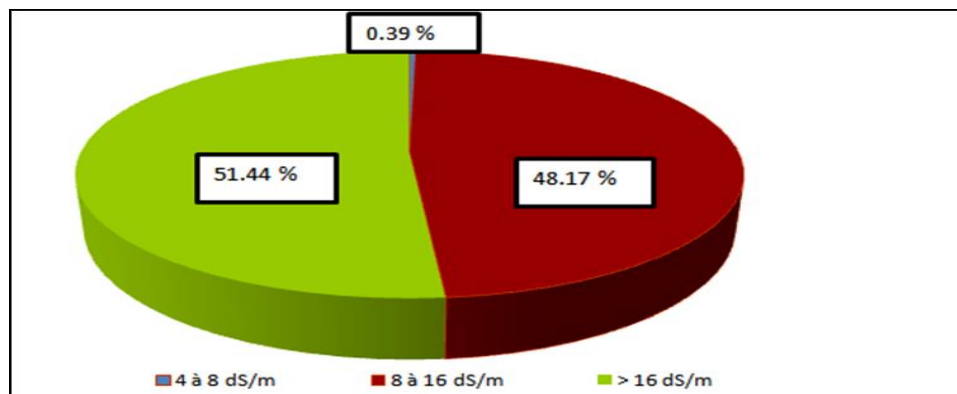


Figure. 32. Répartition des classes de salinité de la couche 0-100cm

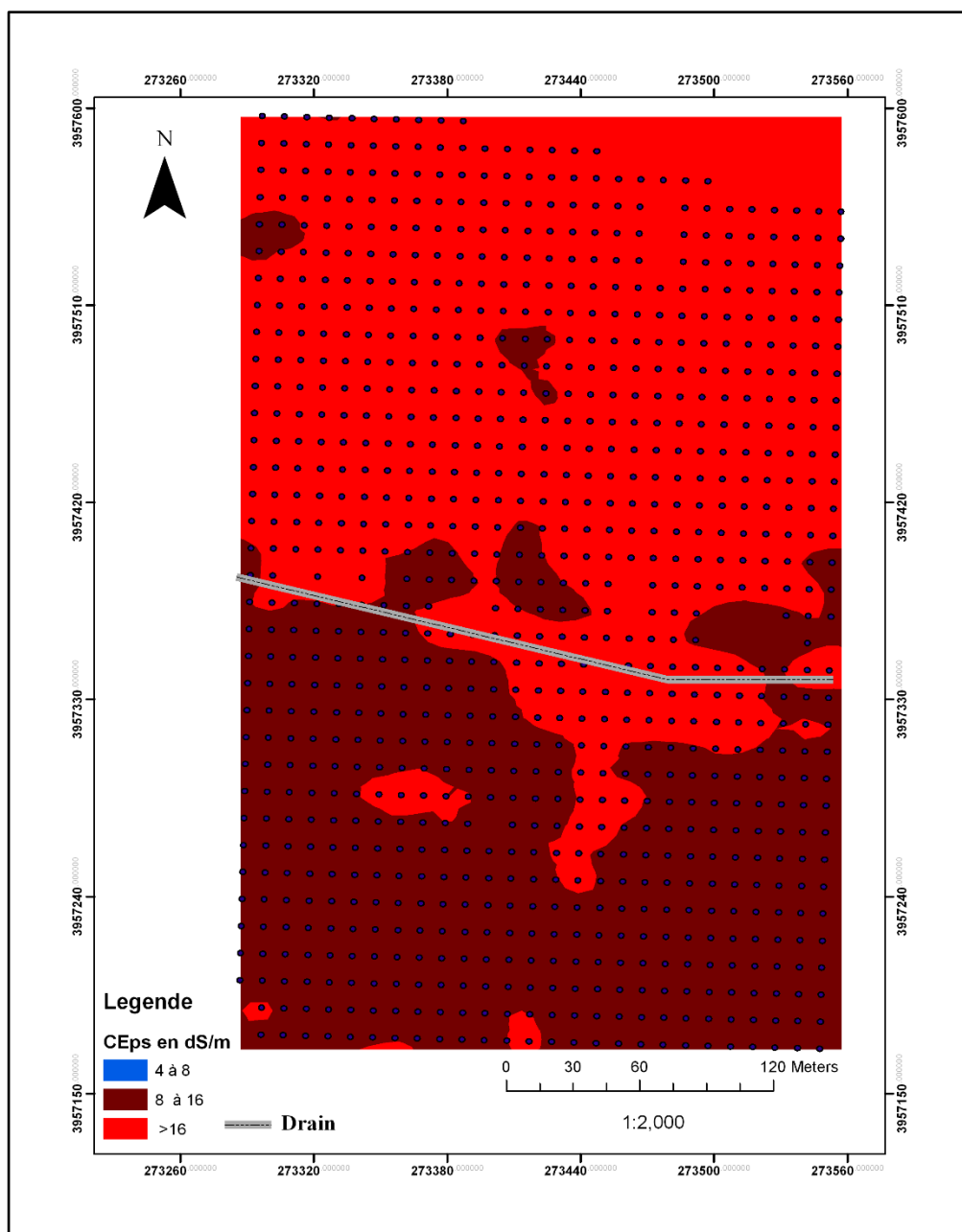


Figure.33. Carte de salinité de la couche (0-100cm) (INSID, Mai 2012)

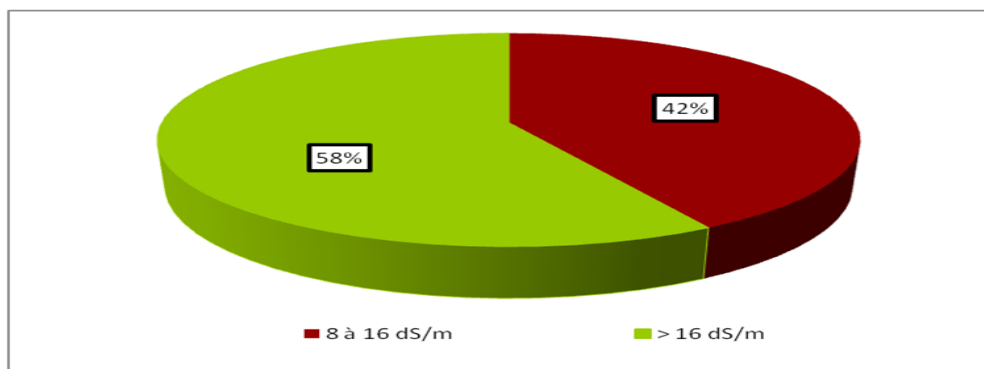


Figure. 34. Répartition des classes de salinité de la couche (0-100cm) (INSID, Mai 2012)

Discussion générale

Les résultats d'analyses de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CEps) montrent un profil salin descendant. D'après ces résultats, la moyenne de la CEps du profil salin, est de 18.1 dS/m avec une variabilité élevée de la salinité au sein de la parcelle d'étude (CV = 36.4%).

Concernant la répartition verticale de la salinité, nous distinguons trois types de profils salins : les profils salins de type convexe, sont concentrés, surtout dans le sud-ouest, et les profils salins descendants dans le reste de la parcelle. Un profil salin de type ascendant a été trouvé (P6) qui est probablement le résultat de la présence d'une micro-dépression dans laquelle les sels se sont concentrés, en surface, par la remontée de la nappe phréatique.

Les résultats des rapports entre les lectures électromagnétiques verticales et horizontales, des deux campagnes de mesures, indiquent une forte concentration de la salinité en profondeur (Profil salin descendant).

L'analyse de la corrélation entre la CEps et la CED1/5, dans les couches (0-75cm et 0-100cm) montre un coefficient de corrélation élevé ($r > 0.80$).

L'utilisation des régressions simple pour relier toutes les mesures de la CEM(V) à celles des conductivités électriques de l'extrait de pâte saturée des quatre horizons du sol (0-25cm ; 25cm-50cm ; 50cm-75cm ; 75cm-100cm) a montré une corrélation significative avec un coefficient de corrélation (r^2) supérieur à 0.84. L'analyse statistique des valeurs ainsi obtenues de la CEps calculée montrent que les valeurs minimales de la CE psont observées dans la partie sud de la parcelle, avant le drain tertiaire, elles sont de 3.57 à 29.7 dS/m, alors que les valeurs maximales sont observées dans le nord de la parcelle et elles sont de 6.13 à 41.3 dS/m. De ce fait, l'évolution de la salinité augmente du sud vers le nord de la parcelle.

L'analyse des cartes de salinité a permis de dégager les principaux résultats, à savoir :

- La cartographie, en premier lieu, l'absence des classes de salinité (CEps < 4 dS/m);
- Les cartes krigées présentent des conductivités électriques plus fortes en profondeur et atteignent des valeurs de 41.31 dS/m, observées, au nord de la parcelle. Cette zone correspond à une micro-dépression, située avant la limite nord de la parcelle;

Dans les pays arides et en régime naturel, les profils salins verticaux sont en ascendants, c'est-à-dire que les sels se concentrent à la surface des sols sous l'effet conjugué des remontées

capillaires et de l'évaporation. Sous irrigation, au contraire, les sels sont drainés vers le bas du profil. Entre ces deux extrêmes, toutes les situations intermédiaires peuvent exister. Elles sont caractéristiques d'une situation pédologique ou d'un itinéraire technique donné (**Job et al, 1990**)

Selon **Servant (1975)**, **Guéro (2000)** et **Franzén (2005)**, le rôle des saisons est bien connu et joue un rôle important sur l'évolution de la salinité. En effet, le processus dominant est relié à l'état hydrique des sols : lorsque les sols sont secs, les sels remontent en surface par capillarité où s'accumulent par concentration dans la matrice du sol ; s'ils sont humides sous l'effet de la pluie ou de l'irrigation, les sels sont lixiviés en profondeur.

De telles fluctuations sont observées, dans les sols de la parcelle d'étude, au cours de la campagne que nous effectuée, et celle effectuée par l'INSID en Mai 2012, avec des redistributions verticales des sels qui modifient le profil de salinité en amplifiant ou en réduisant les différences de salinité entre les profondeurs.

Chapitre IV

Matériel & Méthodes

Chapitre IV : Matériel & Méthodes

Cette partie est consacrée à la description de la parcelle expérimentale, de la méthodologie utilisée, des techniques analytiques et des différentes méthodes de traitement des données.

IV.1. Matériel

L'expérimentation s'est déroulée au niveau d'une parcelle cultivée, située dans une zone salée de la plaine de Relizane, à environ 05 km à l'Ouest de la ville de Relizane et 2.5 Km à l'Est de la ville d'El Matmar. Les coordonnées de la parcelle, en longitude /Latitude (**WGS 1984**) se situent entre les longitudes $0^{\circ} 29' 35'$ et $0^{\circ} 29' 46'$ et entre les latitudes $35^{\circ} 43' 56'$ et $35^{\circ} 44' 9'$ (**Fig.18**).

Cette parcelle présente une superficie de 11,60 ha, et elle est occupée par une culture d'Oliviers et une culture d'Avoine (**Fig.19**)

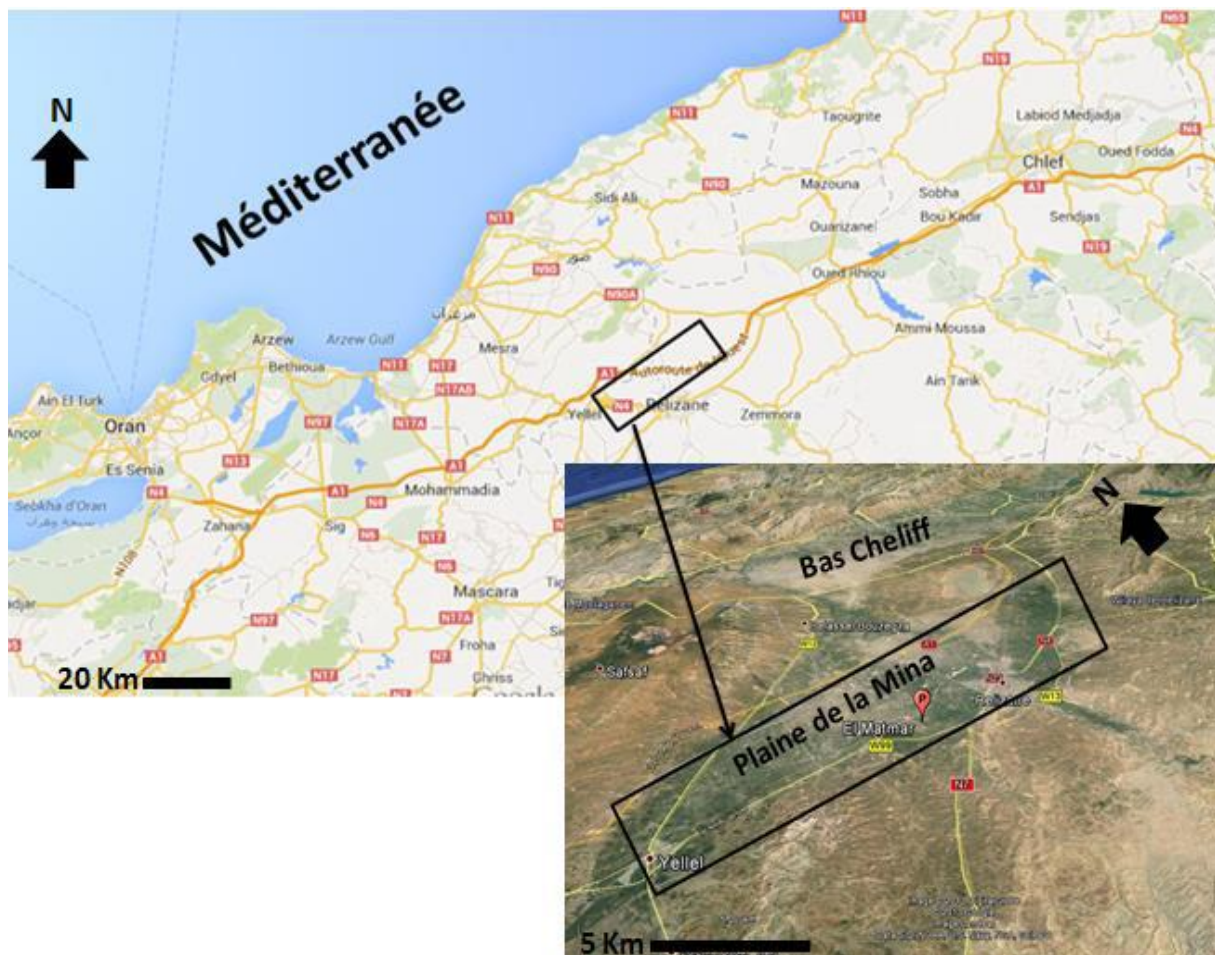


Figure18. Situation géographique de la zone d'étude



Figure 19. Parcelle d'étude (Source : Google Earth)



Photo 1. Vue générale de la parcelle d'étude

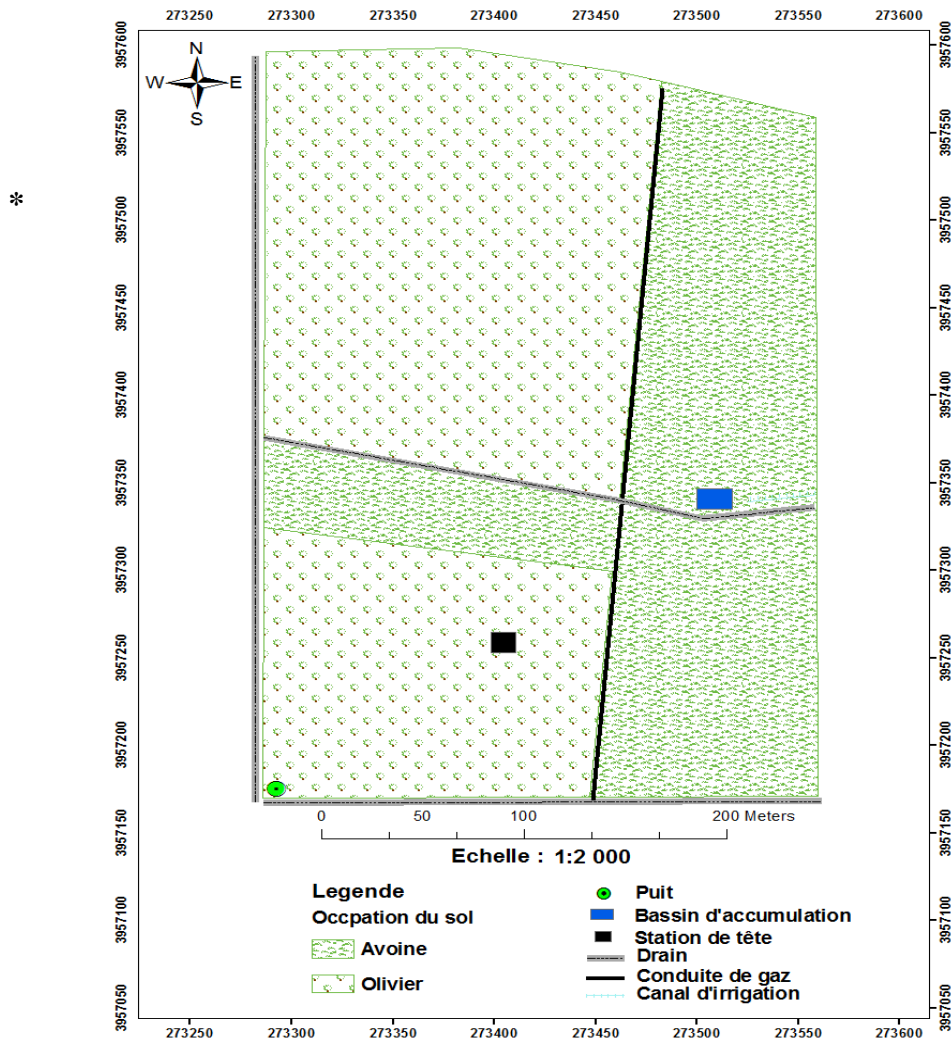


Figure 20. Occupation du sol de la parcelle d'étude

IV.2. Méthodologie

Dans le cadre de cette étude, la démarche utilisée comporte quatre étapes importantes :

- Analyse des documents de base
- La prospection de terrain ;
- Les analyses de laboratoire ;
- Et le traitement des données et cartographie.

IV.2.1. Analyse des documents de base

Cette étape concerne l'examen des documents disponibles ainsi que les études réalisées dans la zone d'étude. Elle concerne :

- L'étude sur la caractérisation de l'état actuel de la salinité dans le périmètre irrigué de la Mina sur 6000 Ha (INSID, 2008);
- L'étude sur le suivi et modélisation de la salinité des sols dans le périmètre irrigué de la Mina (ANRH, 2003) ;

- Et l'étude agro-pédologique des extensions du périmètre de la Mina (**Ghoul, DEMRH, 1973**).

V.2.2. Prospection de terrain

Les principaux objectifs de notre travail consistent à démontrer la présence de sels dans les sols et à définir le degré de la salinisation des sols. Afin de répondre à ces objectifs, il était nécessaire de localiser une parcelle se trouvant sur une zone salée. A cet effet, nous avons procédé à la localisation de la zone d'étude sur la carte de salinité du sol établie par l'INSID en 2008. Nous avons réalisé une sortie, sur terrain, pour une récolte de données existantes. Le propriétaire de la parcelle était notre principale source d'information. En effet, nous avons reçu des informations qui concernent la superficie, les limites, le travail du sol, les cultures pratiquées et la conduite de l'irrigation au niveau de la parcelle.

Après la délimitation de la parcelle, par le biais d'un GPS de navigation de type GARMIN, nous avons établi un plan de cette parcelle, par l'utilisation du logiciel ARC-GIS, sur lequel nous avons définis un plan d'échantillonnage selon une grille régulière de 10 m x 10 m, afin de positionner 909 points de mesures de l'EM38 et 16 points de prélèvements des échantillons de sol. Ainsi, nous avons créé une base de données numérique que nous avons intégrée dans un système d'information géographique.

La prospection sur terrain a nécessité, l'utilisation du conductivimètre électromagnétique (EM38) pour la cartographie de la salinité et une tarière pédologique pour le prélèvement des échantillons de sol. Nous avons réalisé une campagne de mesure par l'EM38, dans la parcelle (en Avril 2016), afin d'étudier la salinité.

IV.2.3. Utilisation de l'EM38 pour la cartographie de la salinité

Deux types de données ont été collectés sur le terrain. :

- **Le premier, concerne les données à calibrer** et comporte les mesures au champ de la conductivité électromagnétique (CEM) du sol par l'appareil de mesure EM38 de Geonics, en 909 points de mesures sur une grille régulière de 10 m x 10 m visant à couvrir toute la parcelle d'étude. Les lectures verticales et horizontales de l'EM38 ont été obtenues en maintenant l'appareil au-dessus de la surface du sol(**Photo.em**)
- **Le second, concerne, les données de calibrage**, et correspond à 16 points de mesure sélectionnés parmi les 909 points de mesure mentionnés ci-dessus de façon à représenter spatialement toute la zone d'étude et, implicitement, à couvrir la gamme de conductivité électrique apparente du sol(**Fig.24**). Des échantillons de sol ont été prélevés jusqu'à une profondeur de 100 cm par incréments de 25 cm pour déterminer la conductivité électrique de la pâte saturée (CEps) au laboratoire (**Fig.23**)

Afin de comparer l'évolution spatio-temporelle de la salinité, la prospection de la salinité, sur terrain s'est déroulée, en avril 2016 (après la période pluvieuse) qui correspondant à un maximum de pluviométrie, pendant cette période. Cette carte nous permettra de comparer l'évolution de la salinité avec la carte obtenue par l'INSID en 2012, pendant la même période.



Photo 2. Lectures verticales et horizontales de l'EM38

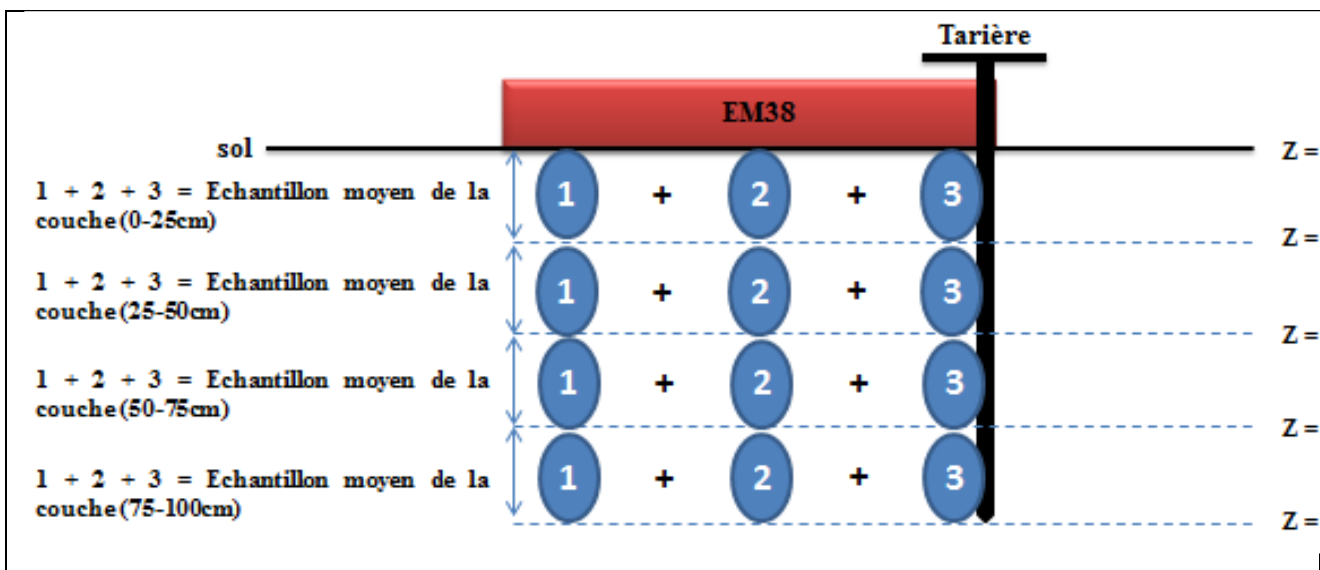


Figure 23. Méthode de prélèvement des échantillons de sol

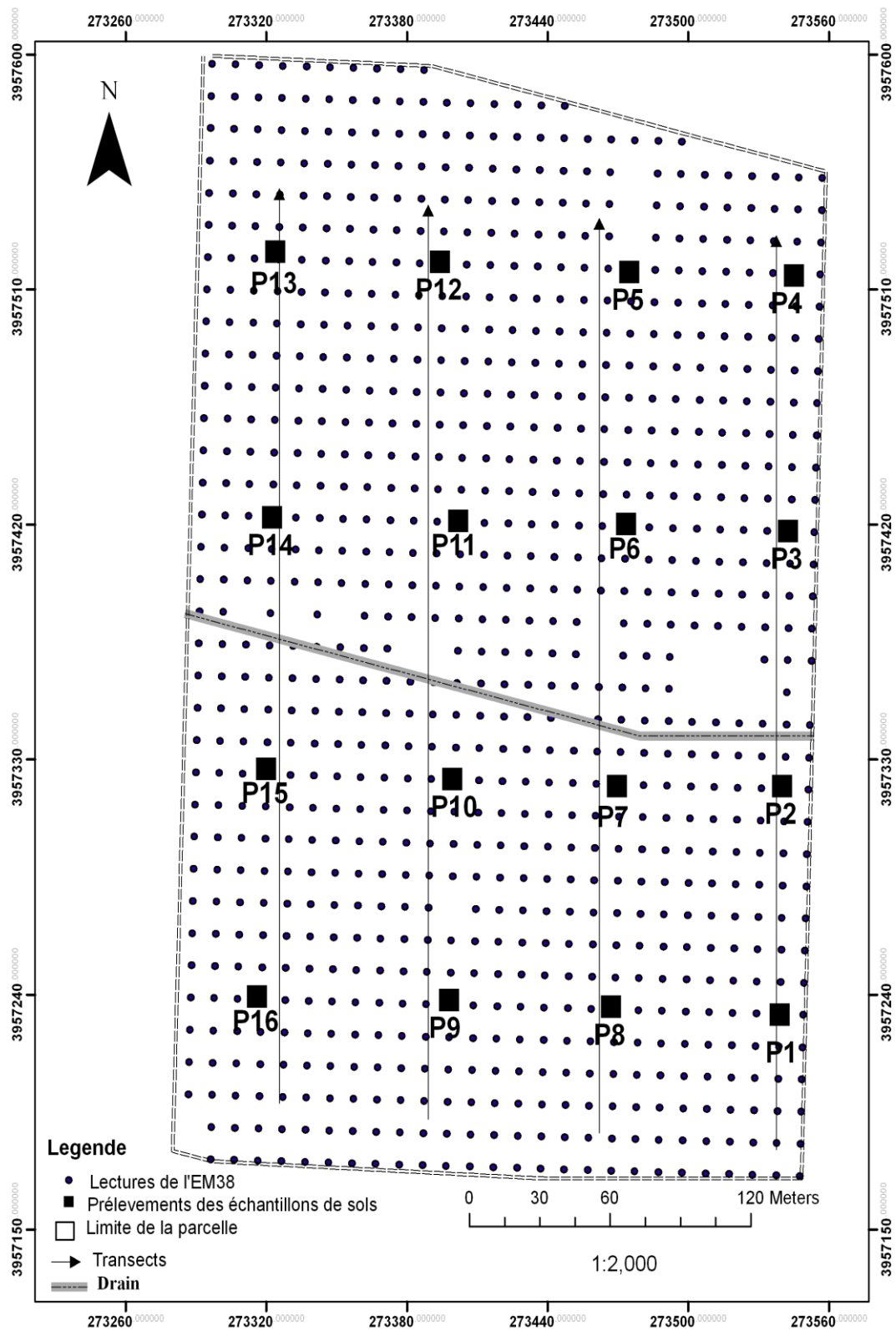


Figure 24. Plan d'échantillonnage

IV.2.5. Analyses de laboratoire

Une fois les échantillons de sol séchés, broyés et passés sur des tamis à maille carrée de 2mm, nous avons procédé aux mesures du pH, de la Ceps et DLE

2) Mesure de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée

Afin de suivre l'évolution de la salinité, les lectures de la CEM doivent être calibrées avec la conductivité électrique de l'extrait de pâte de saturation (CEps), estimée, au laboratoire par les méthodes habituelles (USSL, 1954). Cette méthode permet d'approcher la solution du sol d'une façon plus réaliste et de mieux évaluer les effets de la salinité sur la croissance des plantes (Richards, 1954, Rhoades *et al*, 1999; Khorsandiet Yazdi, 2011).

➤ Réalisation de l'extrait de pâte saturée

- Dans une capsule de porcelaine on pèse 200g de sol. Ensuite, à l'aide d'une éprouvette graduée remplie d'eau distillée, on humecte le sol et on le mélange à l'aide d'une spatule, on ajoutant avec précaution de l'eau jusqu'à l'obtention d'une pâte satisfaisant les conditions suivantes :

- ✓ Elle doit couler lentement, lorsqu'on incline la capsule ;
- ✓ Sa surface doit être brillante ;
- ✓ Elle doit se détacher librement de la spatule.

- On note le volume d'eau versé.

- On rassemble cette boue au fond de la capsule en ménageant un trou de 2 à 3 cm³. Après une heure, si de l'eau s'est rassemblée dans le creux, le point de saturation a été dépassé, il convient d'ajouter de la terre (on notant le poids) et de renouveler les trois tests précédents.

- On laisse reposer pendant 4 heures en couvrant d'un papier filtre humide ou d'un film plastique fin pour éviter l'évaporation.

- On procède ensuite à la centrifugation de la pâte saturée, pendant 10 minutes, à 3000 tours/minute, dans des supports de godets (de 250 à 500 ml) préalablement tapissés de film plastique pour éviter les pollutions.

- Après séparation par centrifugation, on récupère l'aliquote et on mesure, ensuite, la conductivité électrique à l'aide d'un conductivimètre de paillasse

- On procède, ensuite à une filtration de l'aliquote, sur papier filtre sans cendre, afin d'éliminer les es fragments de matière organique. La solution doit être parfaitement limpide.

- Les volumes récupérés sont généralement faibles mais les solutions sont concentrées. A cet effet, on effectue des dilutions (1/50 ou 1/100) après avoir mesuré la conductivité électrique. Cette solution est destinée aux analyses du bilan ionique (cations et anions solubles).

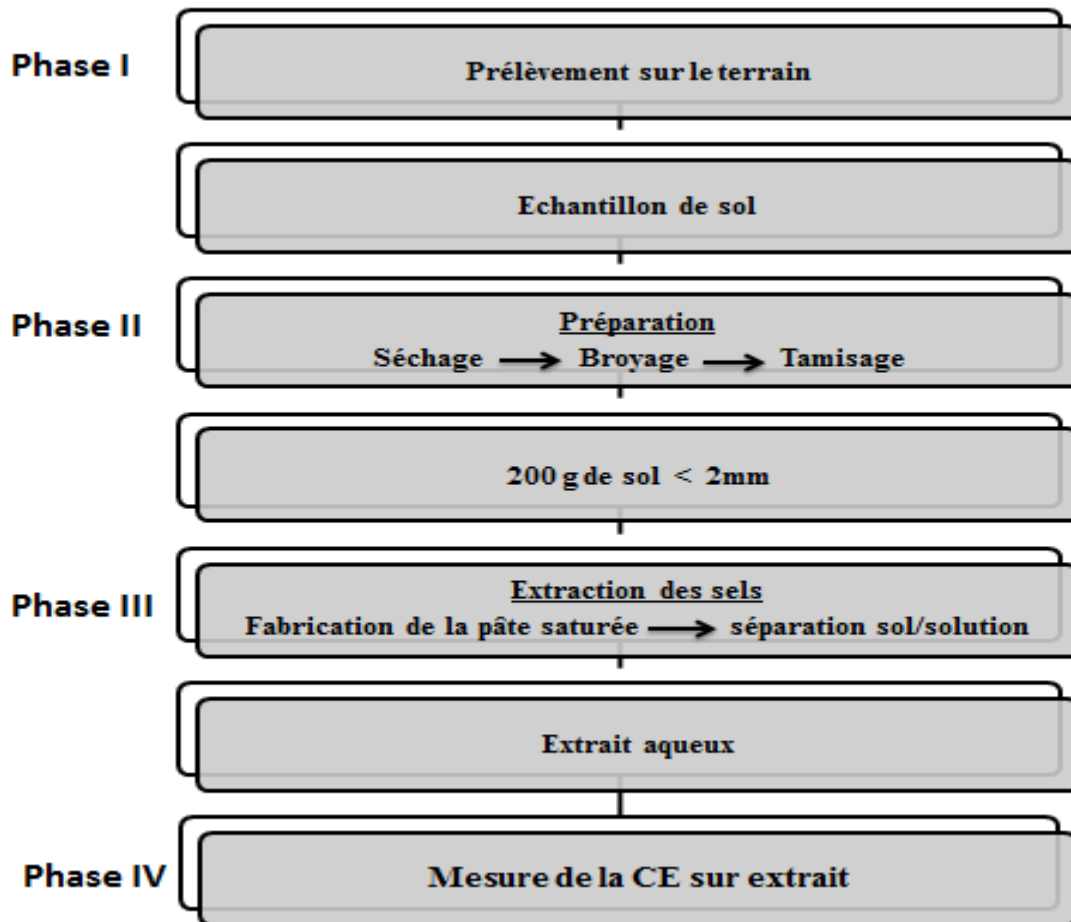


Figure 25. Schéma du protocole expérimental de la pâte saturée



Photos 3(a et b).préparation de pate saturée



Photos 4 (c et d). Extraction des sels par Centrifugation et Filtration (Extrait saturé)

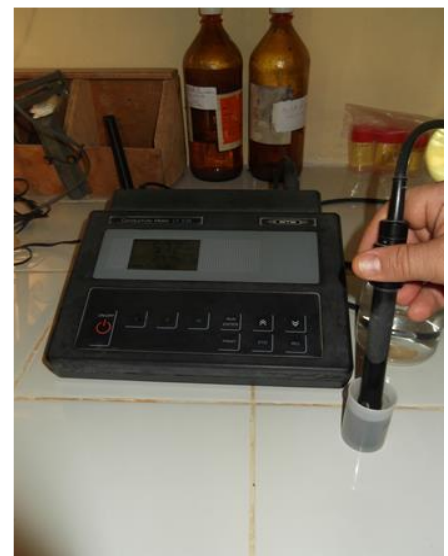


Photo 5 mesure de extraction du sals

IV.2.6. Etude de la variabilité spatiale de la salinité

Les statistiques descriptives ont été utilisées pour appuyer l'interprétation des variables en tenant compte de la corrélation et de la localisation des échantillons. Par la suite, nous avons utilisé les régressions linéaires qui ont servies à réaliser un étalonnage des mesures électromagnétiques et répondre ainsi à notre objectif.

1) Le coefficient de variation

En analyse statistique classique, le coefficient de variation est souvent utilisé pour décrire et étudier la variabilité des propriétés physico-chimiques des sols. Il ne rend toutefois pas compte de la nature de la loi de distribution dont la connaissance est essentielle pour traiter des données en termes de valeurs moyennes ou de probabilité d'avoir une valeur inférieure à une certaine limite (**Vauclin, 1982**). L'approche géostatistique fournit un outil moderne pour comprendre le modèle de variabilité spatiale des sols en analysant la dépendance spatiale ou temporelle des échantillons (**Trangmar et al, 1985**).

Lorsque l'on obtient un C.V. faible, il est inutile d'augmenter le nombre d'observations pour mieux définir la loi de distribution car l'erreur commise est faible. En revanche, pour un C.V. élevé, la détermination de la loi de distribution est impérative puisque que l'on ne peut a priori assimiler mode et moyenne (**Vauclin, 1982**).

Cinq classes, basées sur la valeur du CV, sont proposées par **Nolin et al (1997)** pour qualifier l'intensité de la variabilité des sols (**Tab.11**).

Tableau 11. Classes d'intensité du coefficient de variabilité (**Nolin et al, 1997**).

Intensité de la variabilité	Coefficient de variabilité (%)
Faible	<15
Modérée	15-35
Élevée	35-50
Très élevée	50-100
Extrêmement élevée	>100

2) Régression linéaire et corrélation

Si une relation suffisamment importante se confirme entre X et Y, on peut poursuivre l'analyse en effectuant une régression.

Une régression est l'estimation de l'équation de la relation existant entre les variables X et Y. Cette relation peut être linéaire ou non. Dans le cas du modèle linéaire l'équation de la régression est:

Modèle linéaire: $Y = a + bX$

Les paramètres a (ordonnée à l'origine) et b (pente) peuvent être déterminés selon deux méthodes, la méthode des moindres carrés, ou celle des moindres rectangles, qui seront choisies en fonction du type de relation existant entre X et Y.

Lors de l'établissement d'une équation de régression, le coefficient de détermination (R^2) détermine à quel point l'équation de régression est adaptée pour décrire la distribution des points.

Si le R^2 est nul, cela signifie que l'équation de la droite de régression détermine 0% de la distribution des points. Cela signifie que le modèle mathématique utilisé n'explique absolument pas la distribution des points.

Si le R^2 vaut 1, cela signifie que l'équation de la droite de régression est capable de déterminer 100% de la distribution des points. Cela signifie que le modèle mathématique utilisé, ainsi que les paramètres a et b calculés sont ceux qui déterminent la distribution des points.

Plus le coefficient de détermination se rapproche de 0, plus le nuage de points est diffus autour de la droite de régression. Au contraire, plus le R^2 tend vers 1, plus le nuage de points se rapproche de la droite de régression. Quand les points sont exactement alignés sur la droite de régression, $R^2 = 1$.

Donc: $0 \leq R^2 \leq 1$

b) L'interpolation par le krigeage

L'exploitation de la base de données par des analyses thématiques s'achève toujours par une représentation de la distribution spatiale des variables comme pour le cas de la salinité, afin de former une image pertinente de la dynamique spatiale et une signification subjective des observations.

La cartographie automatique a pour objectif de reconstituer la répartition spatiale sous forme d'une surface ou de quelques contours d'une variable mesurée à partir de points de coordonnées connues. Pour cela, on utilise généralement les méthodes d'interpolation telles que la cartographie par triangulation, l'interpolation polynomiale ou encore les méthodes des moindres carrés.

L'échantillonnage fournit des informations exactes sur le sol aux points d'où proviennent les données. Cependant, ceci ne dit pas ce qui se passe entre ces points. Il faut donc une méthode précise pour estimer les valeurs aux points intermédiaires ou les moyennes sur un ensemble. Le krigeage est une méthode d'estimation qui tient compte d'un certain nombre de facteurs. Il fournit la moyenne pondérée des valeurs des échantillons qui conduit à l'erreur d'estimation de la variance minimale (**Armstrong et Carignan, 1997**).

Le module utilisé pour l'analyse géostatistique est Géostatistical Analyst du logiciel ARC-GIS 9.3.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif d'étudier la salinité des sols d'une parcelle cultivée dans la plaine de Mina(Relizane), tout en mettant en relation les méthodes qui permettent d'identifier cette salinité. Des approches complémentaires ont été pour cela mises en oeuvre, à savoir, la cartographie de la salinité, à partir de méthodes géophysiques non destructives, permettant de décrire l'extension spatiale de la salinité.

L'utilisation conjointe de mesures ponctuelles de la conductivité électrique des sols et d'un plus grand nombre de mesures électromagnétiques, a permis de décrire finement la variabilité spatiale de la salinité et de délimiter de manière très rapide des unités de sols salés et suivre l'évolution des sels dans l'espace et dans le temps.

Le périmètre irrigué de la Mina est doté d'un système hydro-agricole très important et représente un levier pour le développement socio-économique de cette région. Cette activité contribue à la sécurisation alimentaire des exploitants. Cependant, les performances de ce périmètre sont limitées du fait de la dégradation de ses sols par la salinisation pouvant intervenir sur leurs potentialités agronomiques qui sont souvent néfastes aux cultures.

Les résultats de ce travail contribueront, certainement à une meilleure connaissance des conséquences de la salinité sur l'agriculture et l'environnement dans la région d'étude.

Il s'avère donc nécessaire de poursuivre les recherches, pour que les différents résultats puissent servir pour l'élaboration de méthodes applicables, et de contribuer, ainsi, au développement économique du pays.

Références bibliographiques

- Amakor Xystus N., 2013.** “Using Electromagnetic Induction Sensing to Understand the Dynamics and Interacting Factors Controlling Soil Salinity”. All Graduate Theses and Dissertations. Paper 1723. <http://digitalcommons.usu.edu/etd/1723>
- ANRH, 2003.** Suivi et modelisation de la salinité des sols dans le périmètre irrigué de la Mina. 43 p.
- Armstrong, M. et Carignan, J., 1997.** Géostatistique linéaire. Application au domaine minier. Les presses de l'École des mines. Paris. 115 p.
- Aubert G., 1975.** Les sols sodiques en Afrique du Nord. Annales de l'INA Alger, n°6, 185-195.
- Aubert G., 1983.** Observation sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodiques. Cah. ORSTOM. Ser. ped. Vol xxx n°1, pp = 73-78.
- Ayers R.S. et Westcot D.W., 1988.** La qualité de l'eau en agriculture. Bul. FAO d'Irrig. Et de Drain. 29 Rev. 1, Rome, 180 p
- Badraoui M, Poss R, Belghiti M, Soudi B, Bellouti A, Grünberger O et Hammecker C, 2005.** Gestion de l'eau dans les périmètres irrigués : maintien d'une production durable et réhabilitation des sols salés. Académie d'Agriculture de France, 19 mai 2005.
- Banton, O., Seguin, M.K. et Cimon, M.A. 1997.** Mapping field-scale physical properties of soil with electrical resistivity. Soil. Sci. Soc. Amer. J., 61: 1010-1017.
- Benchetrit Maurice, .1956-** Les sols d'Algérie. In: Revue de géographie alpine. 1956.
- Boivin P., Brunet D., Job J.O., 1988.** Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés : une méthode rapide et fiable. Cah. Orstom, sér. Pédol., 24 (1), 39-48
- Boivin P., Favre F., Hammecker C., Maeght J.L., Delarivière J., Poussin J.C., Wopereis M.C.S., 2002.** Processes driving soil solution chemistry in a flooded rice-cropped vertisol: analysis of long-time monitoring data. Geoderma 110. pp 87–107.
- Boualla N., 2002.** Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de la plaine de la Mina. Thèse de magister. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.
- Bridget R. Scanlon et al, 1999.** Evaluation of Electromagnetic Induction as a Reconnaissance Technique to Characterize Unsaturated Flow in an Arid Setting. Vol. 37, N°2- GROUND WATER – March – April 1999.
- Bronson K., F. Booker. J. D., Officer S. J., Lascano R. J., Maas S. J., Searcy S.W., 2005.** Apparent Electrical Conductivity, Soil Properties and Spatial Covariance in the U.S. Southern High Plains. Precision Agriculture, 6, 297-311.

C.P.C.S., 1967. Classifications des sols. Commission de pédologie et de cartographie des sols. Doc multi. INRAA Grignon, 96p.

Cameron D.R., De Jong E., Read D.W.L., Oosterveld M., 1981. Mapping salinity using resistivity and electromagnetic inductive techniques. *Can. J. Soil Sci.*; 61(1):67-78.

Carroll, Z., & Oliver, M., 2005. Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity. *Geoderma*, 128, 354-374.

Cherbuy B., 1991: Les sols salés et leur réhabilitation étude bibliographique. CEMAGREF, école. Nat. Renne, 170p.

Corwin D. L., Lesch S. M., 2003. Using the Dual-Pathway Parallel Conductance Model to Determine How Different Soil Properties Influence Conductivity Survey Data. *Agronomy Journal* 95:365-379

Corwin D.L., 2005. Mapping, Monitoring, and Assessment of salinity Using Apparent Soil Electrical Conductivity. Proceedings of the International Salinity Forum, Managing Saline Soils and Water: Science, Technology, and Soil Issues. April 25- 27. Riverside, CA pp: 125-128.

Corwin D.L., Rhoades J.D., 1982. An improved technique for determining soil electrical conductivity. Depth relations from above-ground electromagnetic measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 810 - 812.

Corwin, D.L. (ed.). 2005. Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 46:1–10.

Corwin, D.L., and S.M. Lesch. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 46:11–43.

Daoud Y et Halitim A., 1994. Irrigation et Salinisation au Sahara Algérien. *Sécheresse*. 3 (5), pp : 151- 160.

Daoud Y., 1993. Contribution à l'étude des sols des plaines de Cheliff, le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux. Thèses doctorat d'état. INA. Alger, 193 p.

Daoud Y., Cheverry C., et Robert M., 1993. Rôle physico-chimique du magnésium dans les sols salés des plaines du Cheliff. *SCIENCE DU SOL* - 1993 -Vol. 31,4, 281-29.

De Jong E., Ballantyne A.K., Cameron D.R., Read D.W.L., 1979. Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid salinity surveys. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43(6):810-812.

Djili K., 2000. Contribution à la connaissance des sols du Nord de l'Algérie : Création d'une banque de données informatisées et l'utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et la vectorisations des données pédologique. Thèse doc. INA. Alger. 384p.

- Djili K., Daoud Y., Touaf L., 2003.** La salinisation et la sodisation des sols d'Algérie. Congrès scientifique sur l'apport de la recherche scientifique et des nouvelles technologies dans le développement et la mise en valeur des régions arides et semi-arides climat. 2-3 octobre. El-Oued, 9 p.
- Dogar M.A., 1980.** Méthodes d'analyses des sols sales-alcalins. Cours photocopié, I.N.A., Alger, 35.
- 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. 4-7 juin 2007, Nabeul, Tunisie.
- Duchaufour Ph. Souchier B., 1977.** Pédologie1, Pédogenèse et classification. Masson. Paris.
- Duchaufour Ph., 1976.** Principes d'une classification écologique des sols. *Agrochimica*, XX, 4-5, pp : 313 – 323.
- Duchaufour Ph., 1988.** Abrèges de pédologie. 2eme édition. Masson. Paris. Milan. Barcelone. Mexico, 224 p
- Dunia H. Tabet., 1999.** Intérêt d'une approche spatiale pour le suivi de la salinité des sols dans les systèmes irrigués. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Montpellier, 435p.
- Durand J.H., 1983.** Les sols irrigables, Agence de coopération culturelle et technique. P.U. France, 190 p.
- FAO, 1988.** Soils Bulletin 39. Salt-Affected Soils and their Management. Food And Agriculture Organization of the United Nations Rome.
- FAO, 2005.** Utilisation des engrais par culture en Algérie. Rome, 61 p.
- FAO, 1999.** Soil Salinity assessment. Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. Irrigation and Drainage paper. N°57, Rome, 1999. 150 p.
- FAO., 2006.** Conférence électronique sur la salinisation. Extension de la salinisation et stratégies de réhabilitation. Organisée et coordonnée par Programme International pour la Technologie et la Recherche en Irrigation et Drainage, du 6 février au 6 Mars 2006. 12p.
- Franzen D., 2005.** Managing Saline Soils in North Dakota. (www.ext.nodak.edu)
- Geonics, 1992.** EM38 operating manual. Geonics: Ontario. p. 29.
- Ghoul A., Peter G., 1974.** Etude agro-pédologique du périmètre de la Mina.
- Ghoul A., 1974.** Etude agro-pédologique des extensions du périmètre de la Mina. Echelle 1/20000. ANRH.

Guéro, Y., 2000. Contribution à l'étude des mécanismes de dégradation physico-chimique des sols sous climat sahélien. Exemple pris dans la vallée du moyen Niger. Thèse de Doctorat de l'Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger), 109p.

Hadj Miloud S., 2010. Morphologie et propriétés des Solontchaks Références de la Mina. Thèse de Magistère. Ecole Doctorale : Sciences du Sol. INA d'El Harrach (Alger). 110 pages.

Halitim A., 1973. Etude expérimentale de l'amélioration des sols sodiques d'Algérie en vue de leur mise en culture. Thèse de 3eme cycle. Univ de Renne, 176 p.

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 génèse et le comportement des sols. Thèse Doct. d'Etat, Université de Rennes, 383 p.

Halitim A., 1988. Sols des régions arides d'Algérie. OPU, Alger, 384 p

Hassan G, Persaud N, Reneau R.B., 2005. Utility of hydrus-2D in modeling profile soil moisture and salinity dynamics under saline water irrigation of soybean. Soil sciences, 170, 1, 28–37.

Heath, J., Challis, P., Norman, C., 1999. Manual for Calibration of EM38. Agriculture Victoria- Natural Resources & Environment. Institute of Sustainable Irrigated Agriculture. 1-9.

Hendrickx J.M.H., Baerends B., Raza Z.I., Sadig M., Akram Chaudhry M., 1992. Soil salinity assessment by electromagnetic induction of irrigated land. Soil Sci. Soc. Am. J. 56(6):1933–1941.

Hendrickx, J.M.H., Kachanoski R.G., 2002. Indirect measurement of solute concentration: Non-intrusive electromagnetic induction. p. 1297–1306. In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.

Iddir M.E.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 Magistère. Option Pédosphère. INA d'El Harrach (Alger). 113 pages.

Ihou A. 1995. Evolution des sols irrigués de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal. Mémoire d'ingénieur IST de l'UCAD, no d'ordre 055/IST/95.

INSID., 2008. Caractérisation de l'état actuel de la salinité dans le périmètre irrigué de la Mina.

International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI., 2000. EM38 Workshop Proceedings, New Delhi, India. Feb. 4. 2000. 94 pp

Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989. An Introduction to Applied Geostatistics, New York: Oxford Univ. Press,.

- Jaynes, D.B., J.M. Novak, T.B. Moorman, and C.A. Cambardella. 1995.** Estimating herbicide partition coefficients from electromagnetic induction measurements. *J. Environ. Qual.* 24:36- 41.
- Job J.O, Bellier G, Gaaloul N, Montoroi J.P, Zante P., 1997.** Interprétation pédologique des données électromagnétiques et électriques. Application au bassin versant d'El Gouazine. Colloque GEOFCAN, Bondy, France, 17-22 p.
- Job J.O., Hachicha M., Loyer J.Y., 1990.** Conductivimétrie électromagnétique et cartographie de la salinité des sols. ORSTOM. Fonds documentaire. N° 31.297 ex1, cote: B. 33p.
- Job J.O., Loyer J.Y., Ailoul M., 1987.** Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* v.23, n°2, pp.123-131.
- Johnston K., Hoef J.M.V., Krivoruchko K., Lucas N., 2001.** Using ARCGIS Geostatistical Analyst. ESRI. 380 New York Street. Redlands, CA 92373-8100, USA. 300p.
- Johnston MA, Meyer JH, Savage MJ, and Van Antwerpen R., 1994.** Electromagnetic induction as a technique for diagnosing and mapping soil salinity. *Proceedings of the South African Sugar Technologists Association.*
- Johnston, M. A., M. J. Savage, J. H. Moolman, and H. M. du Plessis. 1996.** Calibration models for interpretation of soil salinity measurements using an electromagnetic induction technique. *S. Afr. J. Plant Soil.* 13: 110-114.
- Johnston, M.A. 1994.** An Evaluation of the Four-Electrode and Electromagnetic Induction Techniques of Soil Salinity Measurement. *Water Research Commission Report No. 26911194, South Africa, 191 pp.*
- Khorsandi, F., and F. A. Yazdi. 2011.** Estimation of saturated paste extracts' electrical conductivity from 1:5 soil/water suspension and gypsum. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 42:315-321.
- Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Myers, D.B., Drummond, S.T. et Hong, S.Y. 2005.** Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Comp. Electron. Agric.,* 46: 285-308.
- Le Houerou H.N., 1993:** Salt – tolerant plants for the arid region of the Mediterranean isoclimatique zone In: H. Leith et A Al Massoom (edits): towards the rational use of high salinity tolerant plants. Vol 1. Kluver academ, pp: 403- 422.
- Lahlou M, 2002.** Élaboration et validation de deux modèles de simulation du mouvement des sels dans les sols irrigués. Thèse de doctorat, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc.

- Lahlou M., Badraoui M., Souidi B., Goumari A., Tessier D., 2002.** Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols. Actes de l'atelier du PCSI, Montpellier, France, 28-29 mai 2002. 19p.
- Lahmar R et Ruellan A., 2007.** Dégradation des sols et stratégies coopératives en Méditerranée : la pression sur les ressources naturelles et les stratégies de développement durable. Cahiers Agricultures vol. 16, n° 4, juillet-août 2007, pp. 318-323.
- Le Brusq J. Y., Loyer J. Y., 1982.** Relations entre les mesures de conductivité sur des extraits de sols de rapport sol/solution variables, dans la vallée du Fleuve Sénégal. Cah. ORSTOM.Sér. Pédo., Vol XIX, no 3 pp. 293-301.
- Legros J.P., 1996.** Cartographie des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Presses polytechniques et universitaires romandes, 574 p.
- Legros J.P., 2007.** Les grands sols du Monde. Presses polytechniques et universitaires romandes, 574 p.
- Legros J.P., 2009.** La salinisation des terres dans le monde. Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, 2009, <http://academie.biu-montpellier.fr/>, conférence n°4069, Bull. n°40, p. 257-269.
- Lesch, S.M., Strauss, D.J. et Rhoades, J.D., 1995.** Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques: I. Statistical predictions models: a comparison of multiple linear regression and co-kriging. Water Resour. Res., 31: 373-386.
- Loyer J.Y., 1990.** Solums salsodiques - Salisol et sodisols. Référentiel pédologique. Techniques et pratiques. pp. 241-249. INRA, Paris.
- Marlet S., 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.
- McKenzie, R. C., W. Chomistek, and N. F. Clark., 1989.** Conversion of electromagnetic inductance readings to saturated paste extract values in soils for different temperature, texture and moisture conditions. Can. J. Soil Sci. 69: 25-32.
- McNeill, J.D., 1980.** Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Geonics Tech. Note TN-6. Geonics Limited, Mississauga, ON, Canada. P14
- Mermoud A., 2006.** Maitrise de la salinité des sols. Cours de physique du sol. Ecole polytechnique de Lausanne. p.1-14.
- Middleton, Nick (ed.)/Thomas, David (ed.), 1997.** UNEP-World Atlas of Desertification-2nd – London – Arnold --182p.
- Montoroi J. P., 1997.** Conductivité électrique de la solution du sol et d'extraits aqueux de sol. Application à un sol sulfaté acide salé de Basse-Casamance (Sénégal). Étude et Gestion des Sols, 4, 4, pages : 279-298.

Montoroi, J. P., 2005. Sols salés et environnement. Sols et Environnement. Chapitre 27, 608-627p. Dunod, Paris. 816p.

Morizet J., Dejou J., Guyot J., 1970. Principales caractéristiques physico- chimiques des sols de type vertique et sodique dans le Marais rochefortais. Bull. de l'AFES, n° 5, pp. 11-24.

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.

Nolin, M.C., 2000. Variabilité et structure d'organisation spatiale des sols. Pages 143-169 dans CRAAQ. 1er Colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision. 23-24 Juillet 2000. Ste-Hyacinthe (Québec, Canada).

Nolin, M.C., Cambouris, A.N. et Simard, R.R., 1997. La variabilité des sols: son origine et sa gestion. Pages 35-77 dans Éditeur (ed.). Actes du Colloque : Nouvelle technologie en agriculture, Campus du fort St-Jean.

Nolin, M.C., Gagnon, B., Leclerc, M-L., Cambouris, A.N., Bélanger, G. et Simard, R.R., 2002. Influence of pedodiversity and land uses on the within-field spatial variability of selected soil land forage quality indicators. In precision Agriculture, proceedings of the 6 Th international Conférence, P.C. Robert et al. (Eds.). ASA-CSSA-SSSA. Minneapolis, MN

Norman, C.P., 1990b. Training Manual on the Use of the EM38 for Soil Salinity Appraisal. Technical Report Series No. 181, Apr 1990. Department of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Sustainable Irrigated Agriculture, Tature, Vic. Australia. 32 pp.

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.

Rashidi, M. And M. Seilsepour., 2008. Sodium adsorption ratio pedotransfer function for calcareous soils of varamin region. Int. J. Agri. Biol., 10: 715–8

Rhoades, J.D. 1976. Measuring, mapping and monitoring field salinity and water depths with soil resistance measurements. FAO Soils Bulletin, 31: 69-1 09.

Rhoades, J. D., F. Chanduvi, and S. Lesch., 1999. Soil salinity assessment - Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. In: FAO irrigation and drainage paper no. 57, FAO Rome (Italy), Land and Water Development Div., 166 pp.

Rhoades, J.D. and D.L. Corwin., 1981. Determining soil Electrical Conductivity-depth Relations Using an Inductive Electromagnetic Soil Conductivity Meter. Soil Science society of America journal, 1981. 45: p. 255-260.

Rhoades, J.D., Chanduvi, F. and Lesch, S. (Eds.), 1999. Soil Salinity Assessment. Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements. Irrigation and Drainage Paper No 57. FAO, Rome, Italy. 153 pp.

Rhoades, J.D. and Ingvalson, R.D. 1971. Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. Soil Science Society of America Proceedings, 35: 54-60.

Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Shouse, P.J., and Alves, W.J. 1989b. Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibration. Soil Sci. Soc. Am. Journal 53: 433-439.

Rhoades, J.D., P.A. Raats, and R.J. Prather., 1976. Effects of liquid- phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J. 40: 651–655.

Richards L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agric. Handb. N° 60 vol 1. Us.

Saidi D., 2004. Influence de la phase saline sur les propriétés physiques des matériaux argileux du Bas Cheliff. Thèse de Doctorat d'Etat Es Sciences en Sciences Agronomiques. Spécialité science du sol. Institut National Agronomique, El Harrach, Alger.181p.

Servant J., 1976. Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. Thèse de doctorat d'état, Université du Languedoc, 194p

Servant J.M., 1970. Etude expérimentale de l'influence des conditions salines sur la perméabilité des sols sales de la région méditerranéenne Française. Ann de l'I.N.A., El-Harrach, Vol. VI, pp. 225-245.

Servant J.M., 1976. Sur quelques aspects de la pédogénèse en milieu halomorphe : l'exemple des sols salés de la région méditerranéenne Française. Ann. de l'INRA. Vol. VI. n° 1, pp : 225-245.

Servant J.M., 1978. La salinité dans le sol et les eaux caractérisation et problèmes d'irrigation drainage. Bull. B.R.G.M. Sect. III. N ° 2, pp 123- 142.

Servant, J., 1975. Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du sud et du sud-ouest de la France. Thèse de Doct Sc nat, ENSA, France, 194p.

Sharma D.P. and Gupta S.K, 2000. Application of em38 for soil salinity appraisal: an Indian experience. EM38 Workshop, New Delhi, India, Feb. 4, 2000, pp 23-35.

Slavich, P.G., 1990. Determining EC, Depth Profiles from Electromagnétique Induction Measurements. Aust. J. Soil Res. 28: 443 - 452.

Trangmar, B.B., Yost, R.S., Uehara, G., 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy 38, 45–94.

- Triantafilis, J., I.O.A. Odeh, and A.B. McBratney., 2001.** Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton. *Soil Science Society of America Journal* 65, no. 3: 869–878.
- Triantafilis J., Laslett G.M., McBratney A.B., 2000.** Calibrating an electromagnetic Induction Instrument to Measure Salinity in Soil under Irrigated Cotton. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64(6):1009-1017.
- U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954.** Diagnostic and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A Handbook, n°60, 160p.
- United States Department of Agriculture (USDA), 1999.** Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agriculture handbook, Number 36. Second Edition. Washington(DC): USDA, Natural Resources Conservation Service; 869 p
- United States Department of Agriculture (USDA), 2010.** Keys to Soil Taxonomy. By Soil Survey Staff. Natural Resources Conservation Service. Eleventh Edition. 338p
- Vauclin M., 1982.** Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. Colloques INRA, n° 15, pp.9-43.
- Willem F. Vlotman, 2000.** Calibrating the EM38. EM38 Workshop, New Delhi, India, Feb. 4, 2000, pp 1-21.
- Williams, B. G., and Hoey, D. 1987.** The use of electrical induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils. *Aust. J. Soil Res.* 25:21-27.
- Wittler J.M., Cardon G.E., and Cooper C.A., 2004.** Regional Calibration of the EM-38 for Salinity Assessment in the Arkansas Valley. (6349).
- Wollenhaupt, N. C., J. L. Richardson, J. E. Foss, and E. C. Doll., 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.
- Zahow M.F., Amrhein C., 1992.** Reclamation of a saline sodic soil using synthetic polymers and gypsum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, pp. 1257-1260.

ANNEXE

Instructions d'utilisation de l'appareil EM-38

Certaines procédures sont nécessaires pour une bonne utilisation de l'appareil:

a) Examen de la batterie : Le contrôle de la batterie est effectué chaque fois qu'on suspecte une baisse du voltage (sur n'importe quel calibre).

b) Ajustement du déphasage (Initial In phase Nulling) : Cette opération est effectuée au début de la journée à la première station à prospector. Il est conseillé d'éloigner tout objet métallique (montre, pièces de monnaies etc..). La sensibilité aux objets métalliques est plus grande près des bobines qu'aux autres endroits de l'appareil.

Procédure:

- mettre le bouton de sélection de calibre sur 1000 mS/m ;
- lever l'appareil à 1.5 m en position horizontale ;
- ajuster à zéro en mode I/P par le réglage grossier ;
- répéter l'opération pour les calibres 300, 100 et 30 mS/m ;
- réajuster le contrôle du zéro, autant de fois qu'il faut par le contrôle fin, pour ces échelles successivement plus sensibles.

c) Le zéro de l'appareil (Zéro Instrument) : I

Cet ajustement est réalisé au début de chaque journée, à la première station à prospector. Il peut être vérifié plusieurs fois au cours de la journée, surtout quand les mesures sont effectuées sur un sol de faible conductivité. L'ajustement est effectué pour avoir le zéro exact de l'appareil.

Procédure :

- élever l'appareil à 1.5 m en mode horizontal, en position **Q/P**,
- mettre le bouton de sélection du calibre sur 30 mS/m,
- ajuster le bouton **Q/P Zéro** jusqu'à obtention d'une lecture
- faire une lecture en mode vertical: **CEV**
- **Si** $CEV = 2 * CEH$ le réglage est correct,
- calculer **C = CEV - 2*CEH**
- ajouter à **CEH** la valeur algébrique de **C** par le bouton **Q/P**.
(Soit: Si $C > 0$ on augmente **CEH**, si $C < 0$, on diminue **CEH**).
- vérifier de nouveau que $CEV = 2 * CEH$ et recommencer si besoin.

document] 2

Exemple 1 :

L'EM38 est placé à 1.5 m du sol : CEH = 12 et CEV = 35 mS/m.

C = CEV-2CEH = +11 mS/m. On augmente CEH de 11 mS/m (bouton Q/P Zero), on obtient:

CEH' = 12+11= 23 mS/m. En mode vertical, CEV doit être plus ou moins égale à 46 mS/m (le double de 23), seule la valeur de 35 a augmenté de 11 mS/m. Le zéro est bien positionné.

Exemple 2 :

CEH =15 et CEV = 17 mS/m.

C = 17-2*15 = -13 mS/m, donc on abaisse CEH de 13 mS/m, on obtient CEH' = 2 mS/m.

CEV' doit alors être égale 4 mS/m

En effet: Soit CEH, CEV et CEH', CEV' les lectures avant et après l'ajustement. Si la correction C affecte d'une manière identique CEH et CEV, on doit avoir:

$$CEV' = CEV + C \text{ et } CEH' = CEH + C$$

$$CEV' = 2 * CEH',$$

$$D'où : (CEV'/CEH') = ((CEV+C) / (CEH+C)) = 2$$

Tableau 11. Résultats statistiques de la Ceps en dS.m-1.

Paramètres	Profondeur (cm)					
	0- 25cm	25- 50cm	50- 75cm	75- 100cm	0 - 75cm	0 - 100cm
Moyenne	12,2	16,8	20,7	21,5	16,9	18,1
CV %	61,5	40,2	42,1	46,6	37,4	36,4

Tableau.12. Résultats statistiques de la Ced1/5 en dS.m⁻¹.

Paramètres	Profondeur (cm)					
	0- 25cm	25- 50cm	50- 75cm	75- 100cm	0 - 75cm	0 - 100cm
Moyenne	3,2	3,8	4,0	4,7	3,8	3,9
CV %	47,1	40,7	32,0	43,0	34,2	33,8

Tableau.13. Distinction des différents profils salins

Type de profil	CEM(H) / CEM(V)	Auteurs
Profil inversé	$CEMH / CEMV > 1.05$	Corwin et Rhoades (1989 & 1990)
Profil lessivé	$CEMH / CEMV \leq 1.05$	
Profil inversé	$CEMH / CEMV > 1.05$	Norman (1990b, Heath et al. 1999)
Profil uniforme	$1 \leq CEMH / CEMV \leq 1.05$	
Profil lessivé	$CEMH / CEMV \leq 1$	Heath et al. $0.5 \leq CEMH/CEMV \leq 1$

Tableau.14 Type de profil de salinité obtenu

Type de profil	CEM(H) / CEM(V)
Profil lessivé	$CEMH / CEMV = 0.81 (\leq 1.05)$

Tableau 15. Equations de régressions simples obtenues pour le calcul de la CEps du sol à partir des mesures des conductivités électromagnétiques horizontales et verticales.

Profondeur (cm)	Equations de régressions	n	r
0-75cm	$CEps (0-75cm) = 0.04 * CEM(H) + 3.09$	16	0.84
0-100cm	$CEps (0-100cm) = 0.032 * CEM(V) + 3.1$	16	0.94

Tableau .16. Valeurs des conductivités électriques (CEps), mesurées et calculées

N	CE _{ps} (dS.m ⁻¹) mesurée au laboratoire		CE _{ps} (dS.m ⁻¹) calculée par les équations de régressions	
	(0-100cm)	(0-75cm)	(0-100cm)	(0-75cm)
P1	10,34	10,38	9,084	8,6221
P2	14,05	15,33	15,26	14,2781
P3	22,69	19,95	22,524	20,7017
P4	23,65	22,77	22,204	20,9845
P5	29,63	25,74	14,332	12,7833
P6	26,23	27,47	18,14	16,8233
P7	10,48	9,22	11,804	10,3593
P8	11,06	11,58	10,172	10,8037
P9	11,48	9,52	15,164	14,3993
P10	19,20	22,40	19,836	13,7933
P11	19,04	16,62	17,02	18,0757
P12	26,57	23,40	17,724	17,1869
P13	16,71	12,08	15,452	13,4297
P14	18,64	16,49	17,724	18,7221
P15	21,03	19,40	13,02	12,2581
P16	8,79	8,17	8,22	7,8545

Tableau .17. Paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la CEps

Prof (cm)	Corrélation		CEps (dS.m-1) Mesurée au laboratoire				CEps (dS.m-1) calculée par les équations de régressions			
	n	r	Ecart type	Moy	Min	Max	Ecart type	Moy	Min	Max
0-75cm	16	0.84	6.32	16.91	8.17	27.47	4.02	14.44	7.85	20.98
0-100cm	16	0.94	6.58	18.10	8.79	29.63	4.29	15.48	8.22	22.52

Tableau .18. Valeurs des conductivités électriques (CEps), mesurées et calculées

Points	CE ps (0-25)	CE ps (25-50)	CE ps (50-75)	CE ps (75-100)	CE ps (0-75)	CE ps (0-100)
p1	7,91	9,23	13,99	10,22	10,38	10,34
p2	10,5	11,88	23,6	10,22	15,33	14,05
p3	20,3	14,56	25	30,9	19,95	22,69
p4	14	16,01	38,3	26,3	22,77	23,65
p5	17,43	28,7	31,1	41,3	25,74	29,63
p6	35,1	27,4	19,91	22,5	27,47	26,23
p7	9,76	8,99	8,9	14,25	9,22	10,48
p8	10,35	15,9	8,5	9,48	11,58	11,06
p9	8,75	6,02	13,78	17,35	9,52	11,48
p10	11,11	26,4	29,7	9,6	22,40	19,20
p11	10	17,47	22,4	26,3	16,62	19,04
p12	6,42	21,9	24,9	32,9	23,40	26,57
p13	8,14	15,95	12,14	30,6	12,08	16,71
p14	6,13	18,23	25,1	25,1	16,49	18,64
p15	15,35	18,85	24	25,9	19,40	21,03
p16	3,57	10,82	10,12	10,64	8,17	8,79

Tableau 19. Valeurs de la conductivité électromagnétique (CEM) verticales et horizontales

Points	X	Y	EMv	EMh
p1	0, 29, 45.6	35, 43, 58.6	187	137
p2	0, 29, 45.6	35, 44, 1.8	380	277
p3	0, 29, 45.6	35, 44, 5.4	607	436
p4	0, 29, 45.6	35, 44, 8.2	597	443
p5	0, 29, 42.8	35, 44, 8.2	351	240
p6	0, 29, 42.8	35, 44, 5	470	340
p7	0, 29, 42.8	35, 44, 1.8	272	180
p8	0, 29, 42.8	35, 43, 58.6	221	191
p9	0, 29, 40	35, 43, 58.6	377	280
p10	0, 29, 40	35, 44, 1.8	523	265
p11	0, 29, 40	35, 44, 5	435	371
p12	0, 29, 40	35, 44, 8.2	457	349
p13	0, 29, 37.2	35, 44, 8.6	386	256
p14	0, 29, 37.2	35, 44, 5.8	457	387
p15	0, 29, 37.2	35, 44, 1.8	310	227
p16	0, 29, 37.2	35, 43, 58.6	160	118