

Université Abd el Hamid Ibn Badis

Mostaganem

Faculté des sciences de la

Nature et de la vie



جامعة عبد الحميد ابن باديس

مستغانم

كلية علوم الطبيعة والحياة

DEPARTEMENT D'AGRONOMIE

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de

### MASTER EN AGRONOMIE

Spécialité : Gestion Durable de l'Environnement

THEME

**Caractérisation de l'Etat actuel de la salinité. Perspectives d'amélioration de la gestion hydro agricole au niveau d'une parcelle située dans le périmètre irrigué de la Mina, Relizane.**

Présenté par

BENFATMA Khawla

DEVANT LES JURY :

Président: BENKHELIFA Mohamed

Pr. Université de Mostaganem

Encadreur: KRADIA Laid

CR. INSID, El Matmar, Relizane

Examineur : NEMMICHE Said

Dr. Université de Mostaganem

Thème réalisé au laboratoire de l'INSID OUEST El Matmar-Relizane

Année universitaire : 2016-2017

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

(وقل رب أدخلني مدخل صدق وأخرجني مخرج صدق  
وأجعل لي من لدنك سلطانا نصيرا) الإسراء 70

## Remerciements

**Je remercie avant tout ALLAH, le tout puissant, de m'avoir guidé et de m'avoir donné la volonté, la patience et le courage pour terminer ce travail.** Avant de présenter les résultats de ce modeste travail, qu'il me soit permis de remercier tous ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.

Mes remerciements vont d'abord à **Mr GACEM Farid**, responsable **du laboratoire d'analyses de sol, INSID, El Matmar, Relizane**, pour avoir accepté de diriger ce travail tout le long de sa réalisation. Je souhaite lui exprimer ma profonde gratitude, d'abord comme encadreur, à travers la rigueur scientifique et l'esprit critique qu'il a apporté à mon travail. Je tiens également à le remercier pour son soutien amical et sportif, tout au long de cette période de stage.

A Mr **BENKHELIFA. M**, professeur au département d'agronomie de la **Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie (Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem)**, qui a bien voulu présider mon jury. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

A Mr **KRADIA. L**, ingénieur principal au niveau **du laboratoire d'analyses de sol, INSID, El Matmar, Relizane**, pour ses conseils et encouragements.

Je remercie aussi **Dr NEMMICHE. S**, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem d'avoir accepté examinée se travail.

Mes vifs remerciements vont aussi à tous les enseignants de la faculté des sciences exacte et sciences de la nature et de la vie et tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, je tiens à remercier toute l'équipe de l'INSID de Relizane et toutes les personnes avec qui j'ai partagé des bons moments et qui ont rendu plus agréable mon séjour au sein de cette équipe. Je leur serai toujours reconnaissante pour leur aide et leurs conseils.

# *Dédicaces*

*À la mémoire de mes grands parents*

*Puisse dieu les accueille dans son infinie miséricorde*

*À celui qui a toujours garni mes chemins avec force et lumière .... Mon très cher père*

*À la plus belle perle du monde ....ma tendre mère*

*À mes sœurs (Imane, Houda, Marwa) et chers frères (Mihoube, Abd el nour, Zakaria et Younes) à mes neveux (rayan, louay) et ma nièce ranime*

*Je leur souhaite tout le succès ....Tout le bonheur*

*À toute ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé*

*À tous mes amis (Bent gourourou Mina et Guenez Nassira, Ferhani Ala din, Abd el nebi abd el Karim)*

*Pour une sincérité si merveilleuse ....Jamais oubliable, en leur souhaitant tout le succès  
...tout le bonheur*

*À toute personne*

*Qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie.*

*Aimablement*

Benfatma khawla

*Je dédie ce modeste travail....*

## Liste des abréviations

---

### Liste des abréviations

**CEi** : conductivité électrique moyenne de l'eau d'irrigation.

**Qi** : quantité d'eau d'irrigation.

**CEd** : conductivité électrique moyenne de l'eau de drainage.

**Qd** : quantité d'eau de drainage

**CE** : Conductivité électrique de l'extrait dilué du sol ( $\text{dS.m}^{-1}$ )

**CE<sub>ps</sub>** : Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée ( $\text{dS.m}^{-1}$ )

**CEa** : Conductivité électrique apparente du sol exprimée en  $\text{mS.m}^{-1}$

**CEM<sub>H</sub>** : Conductivité électromagnétique horizontale exprimée en  $\text{mS.m}^{-1}$

**CEM<sub>v</sub>** : Conductivité électromagnétique verticale exprimée en  $\text{mS.m}^{-1}$

**CEC** : Capacité d'échange cationique (meq/100g)

**SAR** : Sodium Absorption Ratio.

**ESP** : Exchangeable Sodium Pourcentage (en %).

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Tolérance des cultures à la salinité du sol CEe (FAO, Bulletin n° 29).....	12
<b>Tableau 2.</b> Relevés pluviométriques de la station de Relizane (Période de 1988 à 2006).....	21
<b>Tableau 3.</b> Précipitations moyennes mensuelles et annuelles de la station de Relizane en (mm) pour la période (1988 – 2006).....	21
<b>Tableau 4.</b> Précipitations mensuelles, en (mm), de l'année 2012 de la station de l'INRAA de H'madna, Relizane.....	21
<b>Tableau 5.</b> Moyennes mensuelles des températures (°C) de la station de Relizane pour la période (1988 – 2006).....	23
<b>Tableau 6.</b> Evapotranspiration potentielle moyenne en mm, établie selon la formule PENMAN (18 ans). (Station ONM de Relizane). ....	23
<b>Tableau 7.</b> Salinité de l'eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda (Relizane).....	28
<b>Tableau 8.</b> Qualité de l'eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda (Relizane).....	28
<b>Tableau 9.</b> Répartition des superficies irriguées entre les différentes spéculations pratiquées.....	29
<b>Tableau 10.</b> Répartition de l'occupation du sol, dans le périmètre de la Mina, sur 6000 Ha.....	30
<b>Tableau 11.</b> Classes d'intensité du coefficient de variabilité.....	42
<b>Tableau 12.</b> Résultats de l'humidité du sol en (%).....	47
<b>Tableau 13.</b> Résultats de l'Argile (en %).....	48
<b>Tableau 14.</b> Résultats des Limons grossiers (en %) .....	48
<b>Tableau 15.</b> Résultats des Limons fins (en %).....	48
<b>Tableau 16.</b> Résultats des Sables grossiers (en %) .....	48
<b>Tableau 17.</b> Résultats des Sables fins (en %).....	48
<b>Tableau 18.</b> Résultats de la matière organique .....	49
<b>Tableau 19.</b> Résultats du pH.....	49

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau 20.</b> Résultats du calcaire total (CaCO <sub>3</sub> en %)	49
<b>Tableau 21.</b> Résultats du calcaire actif ( en %)	50
<b>Tableau 22.</b> Les résultats de la CEps en dS/m	50
<b>Tableau 23.</b> Résultats statistiques de la CED <sub>1/5</sub> en dS.m <sup>-1</sup>	51
<b>Tableau 24.</b> Distinction des différents profils salins	54
<b>Tableau 25.</b> Types de profils de salinité obtenus	54
<b>Tableau 26.</b> Relation entre la CEM et les propriétés physique et physicochimique du sol	55
<b>Tableau 27.</b> Relation entre la CEM et la texture du sol	56
<b>Tableau 28.</b> Relation entre la CEM et les bases échangeables du sol	56
<b>Tableau 29.</b> Relation entre la CEM et les cations et anions de la solution du sol	56
<b>Tableau 30.</b> Valeurs des conductivités électriques (CEps), mesurées et calculées	57
<b>Tableau 31.</b> Paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la CEps	57
<b>Tableau 32.</b> Paramètres du modèle de variogramme de la couche (0-75 cm)	58
<b>Tableau 33.</b> Paramètres du modèle de variogramme	60
<b>Tableau 34.</b> Superficie des classes de salinité en hectares (Ha)	62
<b>Tableau 35.</b> Paramètres statistiques du complexe absorbant	63
<b>Tableau 36.</b> Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol	64

## Liste des figures

---

### Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Le mécanisme du phénomène de salinisation des sols.....	05
<b>Figure 2.</b> Classification des plantes selon leur niveau de tolérance à la salinité en fonction de la concentration en sel .....	10
<b>Figure 3.</b> La variabilité de niveau de production des cultures à l'augmentation de la salinité des sols.....	11
<b>Figure 4.</b> Structure en agrégats.....	13
<b>Figure 5.</b> Rétention de l'eau dans les sols .....	13
<b>Figure 6.</b> Variabilité de la disponibilité de l'eau en fonction de la nature du sol .....	14
<b>Figure 7.</b> Superficie affectée par la salinité dans les différentes régions du monde.....	15
<b>Figure 8.</b> Répartition des sols salins du Nord de l'Algérie .....	16
<b>Figure 9.</b> Représentation schématique de la distribution de quelques domaines pédologiques dans le Nord de l'Algérie.....	17
<b>Figure 10.</b> Carte de situation de la plaine de la Mina (Relizane) .....	20
<b>Figure 11.</b> Histogramme des précipitations moyennes mensuelles .....	22
<b>Figure 12.</b> Histogramme du régime saisonnier de la région d'étude.....	22
<b>Figure 13.</b> Diagramme ombrothermique de la station de Relizane .....	24
<b>Figure 14.</b> Climagramme pluviométrique d'Emberger pour la station de Relizane (1988-2006). .....	25
<b>Figure 15.</b> Carte géologique 1/50000 de Relizane.....	27
<b>Figure 16.</b> Carte de salinité des sols du périmètre irrigué de la Mina sur 6000 Ha.....	31
<b>Figure 17.</b> Carte d'occupation des sols du périmètre irrigué de la Mina sur 6000 Ha .....	32
<b>Figure 18.</b> Situation géographique de la zone d'étude .....	33
<b>Figure 19.</b> Parcelle d'étude (Source : Google Earth).....	33

## Liste des figures

---

<b>Figure 20.</b> Démarche méthodologique .....	34
<b>Figure 21.</b> Lectures verticales et horizontales de l'EM38.....	36
<b>Figure 22.</b> Méthode de prélèvement des échantillons de sol.....	37
<b>Figure 23.</b> Plan d'échantillonnage .....	37
<b>Figure 24.</b> Schéma du protocole expérimental de la pâte saturée .....	40
<b>Figure 25.</b> Semi-variogramme théorique (modèle sphérique) .....	44
<b>Figure 26.</b> Profil salin moyen des échantillons prélevés (CEps en dS.m-1) .....	51
<b>Figure 27.</b> Corrélation entre CEd (1/5) et CEps .....	52
<b>Figure 28.</b> Distribution de la CEps dans les horizons.....	53
<b>Figure 29.</b> Evolution de la CEps (dS/m) par profils .....	53
<b>Figure 30.</b> Modèle du variogramme de la couche (0-75cm) .....	59
<b>Figure 31.</b> Carte de salinité de la parcelle d'étude (couche 0-75cm).....	61
<b>Figure 32.</b> Superficie des classes de salinité.....	62
<b>Figure 33.</b> Composition cationique moyenne du complexe adsorbant.....	63
<b>Figure 34.</b> Répartition moyenne des cations dans la solution du sol.....	65
<b>Figure 35.</b> Répartition moyenne des anions dans la solution du sol.....	65
<b>Figure 36.</b> Carte d'aménagement hydro-agricole de la parcelle .....	67

# Sommaire

---

## Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
-----------------------------------	-----------

### **CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

1. La salinisation des sols.....	03
1.1. Définitions.....	03
1.2. Les caractères des sels.....	04
1.2.1. La solubilité des sels.....	04
1.2.2. Le mouvement des sels.....	04
1.3. La genèse d'un sol salin et/ou sodique.....	05
1.4. Description de l'origine de la salinité.....	06
1.5. Les Types de la salinité des sols.....	06
1.5.1. La salinité primaire (ou Naturelle).....	06
1.5.2. La salinité secondaire (ou d'origine humaine).....	07
2. La différence entre la salinisation et la sodisation des sols.....	08
3. La sensibilité des plantes au stress salin.....	10
3.1. Classification des plantes selon leur tolérance à la salinité.....	10
3.1.1 Les halophytes.....	10
3.1.2. Les glycophytes.....	11
3.2. Tolérance des cultures à la salinité du sol.....	11
4. La salinité et la texture des sols.....	12
4.1. Définition de la texture du sol.....	12
4.2. L'eau et la structure en agrégats.....	13
4.3. Rétention de l'eau dans les sols.....	13
4.4. Infiltration de l'eau en fonction de la nature du sol.....	14
4.5. La texture des sols et la mobilité des sels.....	14
5. Étude de La salinisation des sols.....	15

# Sommaire

---

5.1. Salinisation dans le monde.....	15
5.2. Salinisation en Algérie.....	16
6. Méthodes de mesure de la salinité des sols.....	17
6.1. Les méthodes de détection des sols.....	17
6.2. Méthodes de détection et de mesure de la salinité des sols.....	18
6.2.1. La méthode de laboratoire.....	18
6.2.2. Méthodes In situ.....	18
6.2.3. La méthode à distance.....	18
6.3. Les capteurs électromagnétiques et électriques.....	18
7. Conclusion.....	19

## **CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

1. Situation géographique.....	20
2. Synthèse climatique.....	20
2.1. Les précipitations.....	21
2.2. Les températures.....	22
2.3. L'évapotranspiration.....	23
2.4. Classification du climat.....	23
2.4.1. Diagramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls .....	23
2.4.2. Climagramme d'Emberger .....	24
2.5. Conclusion .....	25
3. Géologie .....	25
4. Géomorphologie.....	26
5. Réseau hydrographique et ressources en eaux.....	28
6. Les sols.....	29
7. Occupation du sol.....	29
8. Conclusion.....	30

# Sommaire

---

## CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES

1. Matériel.....	33
2. Méthodologie .....	34
2.1. Analyse des documents de base.....	35
2.2. Prospection de terrain.....	35
2.3. Utilisation de l'EM38 pour la prospection de la salinité.....	35
3. Analyses de laboratoire.....	38
3.1. Analyses physiques et chimiques du sol.....	38
3.2. Cas particulier : conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée.....	39
3.3. Estimation de l'ESP (pourcentage de sodium échangeable).....	41
4. Etude de la variabilité spatiale de la salinité.....	41
4.1. Le coefficient de variation.....	41
4.2. Régression linéaire et corrélation.....	42
4.3. Méthodes de prédiction spatiale ou Variographie.....	43
4.3.1. Le semi-variogramme.....	44
4.3.2. L'interpolation par le krigeage.....	45

## CHAPITRE IV : RESULTATS & DISCUSSION

1. Etude des paramètres physiques et physico-chimiques du sol.....	47
1.1. Analyse de l'humidité.....	47
1.2. Analyse de la texture.....	47
1.3. Analyses de la matière organique (M.O).....	48
1.4. Analyses du potentiel Hydrogène (pH).....	49
1.5. Analyses statistiques du calcaire (CaCO <sub>3</sub> ).....	49
1.6. Analyses statistiques du calcaire actif.....	49
2. Caractérisation de la salinité des sols.....	50
2.1. Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée (CEps).....	50

# Sommaire

---

2.2. Conductivité électrique de l'extrait dilué (CEd : 1/5).....	51
2.3. Distribution de la salinité dans les différents horizons.....	52
2.4. Distribution verticale de la salinité.....	53
3. Etude de la salinité par induction électromagnétique (EM38).....	54
3.1. Les lectures électromagnétiques de l'EM38 .....	54
3.2. Relation entre la CEM et les propriétés du sol.....	55
3.3. Analyse statistique des valeurs mesurées et calculées de la $CE_{ps}$ .....	56
4. Cartographie de la salinité.....	58
4.1. Variographie.....	58
4.2. Cartographie par krigeage ordinaire des conductivités électriques calculées.....	59
5. Distribution spatiale de la salinité.....	60
6. Composition du complexe adsorbant.....	62
<b>Discussion générale</b> .....	66
<b>Conclusion</b> .....	68
<b>Références bibliographiques</b> .....	70
<b>Annexes</b> .....	76

# Introduction générale

---

## Introduction générale

L'extension de l'agriculture en irriguée et l'utilisation intense des ressources en eau dans un pays soumis à un climat chaud et sec entraîne inévitablement l'apparition du problème de salinité des sols et des eaux. L'Algérie qui offre toutes les variantes du climat méditerranéen n'échappe pas à cette règle. Souvent, la perte des terres à haut potentiel, risque de compromettre les aptitudes et les capacités de production d'une région. Ce problème a été observé dans plusieurs régions du pays (Chellif, Relizane, Mohammadia, Sig, Aïn Temouchent, hautes plaines de Sétif et de Constantine....).

La situation grave dans laquelle se trouvent les grands périmètres irrigués de l'Ouest Algérien, au nombre de cinq, illustre parfaitement les dimensions du phénomène.

La superficie totale de ces périmètres est d'environ 120 000 ha, dont 30% (36000 ha) est affectée par une forte salinité ( $C_{e} > 8$  dS/m) (**INSID ; 2008**).

La superficie irriguée par des eaux d'assez bonne qualité ( $C_{e} < 2$  dS/m) est estimée à 10%. Les ressources en eau de faible qualité ( $C_{e} > 4$  dS/m) sont disponibles, mais leur utilisation nécessite un suivi permanent de l'évolution de la salure du sol.

La wilaya de Relizane compte deux périmètres irrigués sur les cinq (le Bas Cheliff et la Mina), dont le contrôle des sols à forte salinité a échappé aux agriculteurs (sols à l'abondons). L'ampleur du phénomène de la salinité des terres agricoles constitue indéniablement un danger permanent pour le patrimoine foncier et de ce fait des mesures strictes et urgentes doivent être prises pour éviter la désertification des espaces agricoles.

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**). Aussi, la salinité des sols cultivés doit pouvoir être évaluée avec suffisamment de précision pour éviter ses effets négatifs sur la production agricole (**Montoroi., 1997 in Kradia., 2010**).

Cependant, les méthodes conventionnelles de mesure de la salinité, sur petits échantillons, 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'où la nécessité de développer des méthodes plus rentables pour une caractérisation spatiale, efficace et rapide de la salinité.

## Introduction générale

---

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 (**Triantafilis et al, 2001**).

Cette technique est largement développée, en agriculture de précision, pour la caractérisation de la variabilité spatiale de la salinité (**Corwin, 2005 in Kradia, 2010**). La CEM est un intégrateur de plusieurs propriétés de sols comme la salinité (**Lesch et al, 1995**), la texture (**Williams et Hoey, 1987**), le taux de matière organique (**Banton et al, 1997**), la teneur en argile et la teneur en eau suivant la profondeur de matériaux de sol conductible (**Kitchen et al, 2005**). Actuellement, les appareils les plus couramment utilisés sont les Geonics EM31 et EM38 (6 m et 1,5 m d'investigation respectivement), ce dernier étant particulièrement adapté aux problèmes agricoles en raison de sa profondeur d'investigation qui correspond approximativement à la zone racinaire (**Corwin and Lesch, 2005**).

Cependant, quel que soit cet équipement, 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  $\text{dS.m}^{-1}$ ) étant la référence en la matière (**Job et al, 1997**).

L'objectif de ce travail est l'étude de la variabilité spatiale 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 ;
- et l'élaboration d'une carte d'aménagement hydro agricole en fonction des résultats obtenus.

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

- ✓ Un premier chapitre qui concerne la synthèse bibliographique ;
- ✓ Le Chapitre. II est consacré à la présentation de la zone d'étude ;
- ✓ Le Chapitre. III est consacré à la méthodologie adoptée et le matériel utilisé ;
- ✓ Le Chapitre. IV concerne les résultats obtenus ainsi qu'une synthèse générale.
- ✓ Nous terminerons ensuite par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Synthèse bibliographique**

## 1. La salinisation des sols

### 1.1. Définitions

La salinisation est défini par **Servant (1975)**, comme étant l'ensemble des mécanismes suivant lesquels le sol s'enrichit en sels solubles et acquiert, à un degré plus ou moins fort, le caractère salé. **Cherbuy (1991)** a ajouté qu'il s'agit d'un processus résultant de la migration des sels à travers le profil du sol et de leur accumulation, par précipitation en profondeur.

La salinisation est phénomène d'accumulation des sels solubles (en particulier le sodium) à la surface du sol et dans la zone racinaire, occasionne des effets nocifs sur les végétaux qui vont induire une diminution des rendements et une stérilisation du sol. **Mermoud (2001)**.

**Ramade (2008)** a actualisé la définition de la salinisation comme étant un phénomène par lequel un sol devient sur salé. La salinisation résulte le plus souvent de l'irrigation de sols mal drainés sous climat aride. La stagnation de l'eau dans les couches superficielles du sol par défaut de drainage se traduit par une accumulation de sels dans les horizons les plus superficiels, car les mouvements ascendants, liés à la forte évaporation due au climat chaud et aride, excèdent de beaucoup l'infiltration et donc le lessivage.

En revanche, La salinité découle de la présence des solutés minéraux majeurs dissouts dans les eaux ou dans les sols. C'est la mesure de la totalité des sels dissouts, (**Slama, 2004**).

Le terme de salinité se rapporte à la présence des principaux solutés inorganiques dissouts (essentiellement des ions Na<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>--</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et CO<sub>3</sub><sup>--</sup>) 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 (**USSL, 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**) :

-  $1\text{dS} / \text{m} = 1\text{mS}/\text{cm} = 1\text{mmhos} / \text{cm} = 0.1 \text{ S}/\text{m} = 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

- Conductivité en mmol (+) par litre :  $\text{mmol} (+) / \text{l} = 10 \times \text{CE} (\text{CE en dS}/\text{m})$

Pour l'eau d'irrigation et les extraits de sol dans la gamme 0,1-5 dS / m.

- Conductivité en pression osmotique en bars :  $\text{PO} = 0,36 \times \text{CE} (\text{CE en dS} / \text{m})$

Pour les extraits du sol dans la gamme de 3 à 30 dS / m.

- Conductivité en mg / l :

$\text{mg} / \text{l} = 0,64 \times \text{CE} \times 10^3$ , ou (CE en dS / m)

$\text{mg} / \text{l} = 640 \times \text{CE}$

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.

## 1.2. Les caractères des sels

### 1.2.1. La solubilité des sels

La composition de la solution, le pH et la température sont les paramètres influençant la solubilité des sels. Les sels se solubilisent par des formes différentes. En effet, les chlorures sont les plus solubles, les sulfates, les carbonates et les bicarbonates sont moyennement solubles. En revanche, lorsque les sulfates et les carbonates sont associés au calcium, ils deviennent presque insolubles.

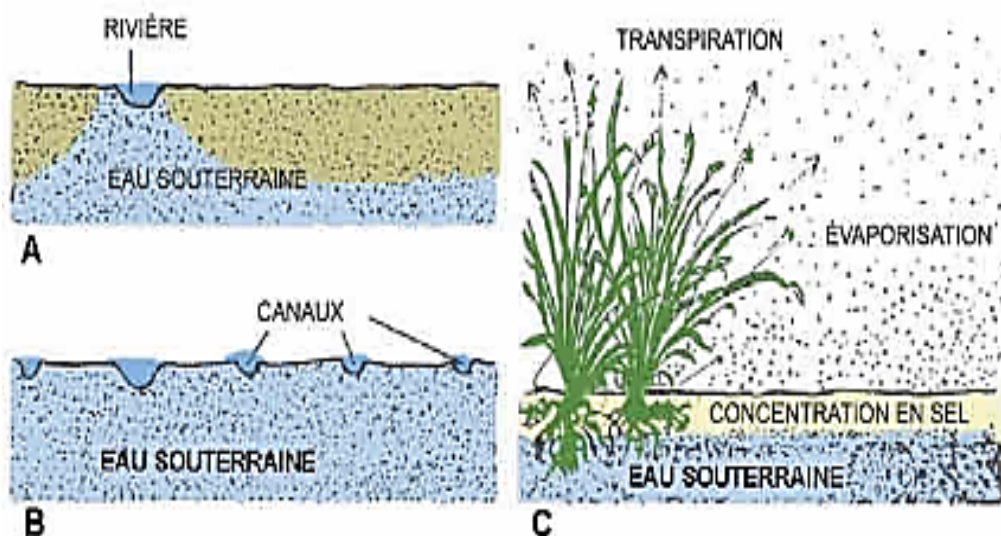
### 1.2.2. Le mouvement des sels

Les sels dans le sol peuvent se déplacer d'un horizon à un autre sous l'action de divers facteurs. Les sels les plus solubles sont généralement les plus mobiles. Le mouvement des sels dépend des états physiques de l'eau du sol, du gradient de température existant dans ce sol, et de la texture des sols etc.

### 1.3. La genèse d'un sol salin et/ou sodique

La formation d'un sol salin ou sodique résulte généralement de l'accumulation des sels dans les horizons de surface (**Essington, 2004**). Le régime hydrique du sol, la forme de sel, les conditions climatiques et la texture des sols sont les paramètres les plus importants qui manifestent la genèse d'un sol salin. Les sels les plus communs présents dans la solution du sol correspondent aux cations  $\text{Ca}_2^+$ ,  $\text{Mg}_2^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , et aux anions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ . Egalement le bore, l'arsenic et le molybdène (les éléments traces) sont considérés comme d'autres sels moins courants et plus toxiques à faibles concentrations (**Keren 2000, Essington 2004**). De façon analogue à la formation d'un sol salin, un sol devient sodique lorsque la proportion d'ions  $\text{Na}^+$  dépasse celle des autres électrolytes de plusieurs ordres de grandeur (**Sumner 1993, Levy 2000, Essington 2004**). Cela dépend de la source de sels mais aussi des conditions physico-chimiques du sol. Selon **Bolt et al (1978)**, la salinité se produit si :

$$\text{CEi} \times \text{Qi} > \text{CEd} \times \text{Qd}$$



**Figure 1** : Le mécanisme du phénomène de salinisation des sols.

La **figure 1** de **Ramade (2008)**, mettant en évidence le mécanisme du phénomène de salinisation des sols. L'irrigation (A) entraîne une stagnation de l'eau dans les sols (B) due au manque de drainage d'où résulte l'accumulation des sels en surface suite à l'évaporation (C).

## 1.4. Description de l'origine de la salinité

La salinisation des sols est un processus anthropogénique, alors que la salinité du sol est un élément naturel et un facteur écologique constitué par la teneur en sel (NaCl : représente un facteur limitant de première importance car, au-delà d'environ 5 pour 1 000, il interdit le développement des plantes) des eaux ou des sols. C'est un facteur limitant de nombreux écosystèmes. L'excès de sel dans les sols empêche le développement d'une végétation normale, seules quelques plantes halophiles pouvant y croître. À l'opposé, la carence en sel des sols peut entraver le développement de certaines populations animales. On a ainsi pu mettre en évidence que la déficience en chlorure de sodium édaphique s'accompagnait de très faibles densités de population de campagnols dans les prairies naturelles. (**Ramade 2008**).

La salinisation est contrôlée par un ensemble de facteurs liés aux conditions environnementales (climat, hydrologie), l'approvisionnement en eau et aux systèmes de contrôle (irrigation, drainage), et aux pratiques culturales (type et la densité du couvert végétal et les caractéristiques d'enracinement). Ces facteurs influent sur l'équilibre en eau du sol et donc le mouvement et l'accumulation de sels dans le sol.

Les études d'**Abrol en 1988** sur La remontée des sels ont distingué que l'infiltration des eaux est plus fréquente le long des canaux d'irrigation, à proximité des réservoirs d'eau et les étangs de ferme, ce qui provoque la formation des croûtes de sel dans et autour des plantes. En collaboration avec l'excédent de l'eau d'irrigation appliquée au-dessus des besoins de cultures, et les mauvais entretiens des voies de drainage et les suintements contribuent à l'élévation de niveau de l'eau et qui peuvent former une nappe perchée.

## 1.5. Les Types de la salinité des sols

La salinisation des sols peut avoir une origine primaire ou une origine secondaire (**Aubert, 1975**).

### **1.5.1. La salinité primaire (ou Naturelle)**

Les sels solubles responsables de la salinisation primaire d'un sol ont diverses origines. Ainsi, l'altération des roches contenant des minéraux sodiques, potassiques ou magnésiques donne 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**). Lorsque la roche est gypso-salifère, c'est souvent des sulfates et des chlorures qui sont libérés.

Cette phase de salinisation correspond à la salinisation primaire (**Gaucher et Burdin, 1974**). En Algérie, il existe des couches géologiques salifères comme le Trias qui est formé d'argiles schistosées gypseuses et salées et qui constituent une source importante de sels solubles et de gypse dans les régions arides. Le rocher de sel au Nord de Djelfa en est un exemple typique à côté de nombreux petits massifs des séries jurassiques. Le Trias apparaît en diapir ou en injection dans les fractures au niveau des hautes plaines steppiques entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Il existe d'autres couches géologiques salifères comme l'Helvétien par exemple qui se localise dans la vallée du Cheliff. Ou encore le Pliocène continental, l'Albien, le Sénonien et d'autres couches qu'on rencontre dans d'autres endroits d'Algérie (**Gaucher, 1947**).

La salinisation peut être aussi provoquée par une invasion marine liée aux marais du territoire concerné. Dans ces conditions, la solution du sol présente une composition proche de celle de l'eau de mer, donc riche en NaCl et peut provoquer par des phénomènes d'échange cationique un enrichissement du complexe d'échange en sodium (**Cherbouy, 1991**).

### **1.5.2. La salinité secondaire (ou d'origine humaine)**

La salinisation secondaire est un processus ultérieur à la formation du sol et le caractère salin du sol est induit par plusieurs mécanismes. En effet, la salinisation peut être due à la remontée d'une nappe salée peu profonde, ou à la remonté capillaire et pendant les périodes sèches (**Durand, 1983**). L'halomorphie peut provenir aussi des eaux d'irrigation salines en milieu mal drainé (**Durand, 1983**). Dans le grand Sud de l'Algérie, la non maîtrise des techniques d'irrigation par pivot, et l'absence de systèmes de drainage (**Daoud et Halitim, 1994 ; Mouhouche, 2000 ; Djili et Daoud 2003**) sont souvent les causes qui provoquent la diminution de la productivité agricole. De même la salinisation secondaire se produit lorsque l'eau d'irrigation est distribuée en quantité trop faible pour qu'il y ait percolation ; le terrain retient alors toute l'eau distribuée qui y dépose ses sels (**Durand, 1974 in Noomene, 2011**).

Les superficies irriguées ont connu un accroissement très rapide depuis 1950 et, malgré un ralentissement observé depuis 1980, elles s'atteignent aujourd'hui près de 300 millions d'hectares dans le Monde. Les évaluations indiquent que, selon les situations, de 15 à 50% des terres aménagées et environ 50% des systèmes d'irrigation sont affectés par la salinité et plus particulièrement dans les zones arides (**Rhoades, 1997**).

Au-delà des risques spécifiques liés à la qualité des eaux d'irrigation, les mécanismes de

salinisation sont la résultante du fonctionnement hydrologique du milieu et des processus de concentration des sels apportés par l'irrigation, ou présents dans les nappes aquifères (**Gupta, 2000**). La répartition des sels qui en découle n'est pas homogène en raison des interactions complexes entre les propriétés variables des sols et des aquifères, et de l'existence de modalités et performances variables de la gestion de l'irrigation et du drainage aux différentes échelles dans les périmètres irrigués. Ces évolutions ne sont pas linéaires et sont soumises à d'incessantes modifications et adaptations dans la gestion hydraulique et agronomique des périmètres irrigués (**Marlet, 2004**).

Enfin, la salinisation secondaire peut être provoquée par une incursion de la mer vers les plaines littorales et mêmes en contact direct, cette salinisation affecte des sols dont la pédogénèse est déjà prononcée.

### 2. La différence entre la salinisation et la sodisation des sols

**Ramade (2008)** a défini la sodisation comme étant l'accroissement du taux de sodium échangeable d'un sol dû à diverses modifications physico- chimiques, dont résultent une défloculation des argiles et une obturation des pores qui entravent la circulation de l'eau. Le sol devient de ce fait imperméable et donc infertile.

En revanche, le sol sodique est le sol dont la structure pédologique est conditionnée par la teneur en sodium. Les principaux types de sols sodiques sont les solonetz, les solontchaks et les soloths (**Ramade, 2008**).

Le sodium ( $\text{Na}^+$ ) forme un taux d'accroissement élevé de tous les cations liés à des charges négatives sur les particules d'argile qui composent le complexe du sol. Les particules d'argile chargées négativement sont maintenues ensemble par des cations divalents. Lorsque les cations monovalents tels que  $\text{Na}^+$  déplacent les cations divalents sur le complexe du sol, et la concentration de sels solubles libres est faible, le complexe se gonfle et les particules d'argile se séparent.

On détermine la sodisation par le pourcentage de sodium échangeable **ESP** (**E**xchangeable **S**odium **P**ourcentage) 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** (**S**odium **A**bsorption **R**atio) 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 :  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  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**).

Si la concentration de sels solubles est suffisamment faible, l'altération des minéraux en argiles sodiques, entre autres par l'hydrolyse, aura lieu d'où la création d'un sol très alcalin. Les sols alcalins sont un type de sol sodique avec un pH élevé en raison de carbonate de sels, et sont définis comme ayant un PSE (Pourcentage de sodium échangeable) de 15 ou plus avec un pH de 8,5 à 10.

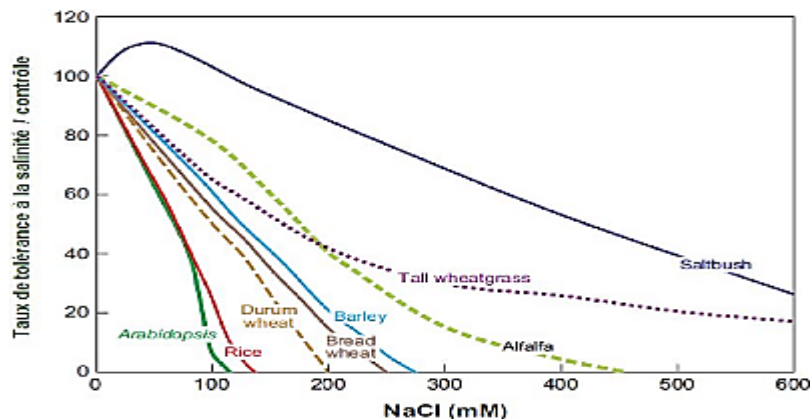
Le processus de sodicité est un phénomène complexe qui se produit sur une longue période de temps. Les sels s'accumulent dans le profil du sol par de dépôts atmosphériques ou par l'altération des minéraux. La fraction argileuse du sol peut causer la saturation de sodium. Le lessivage du profil, soit par l'eau de pluie sur des périodes prolongées ou par l'irrigation à l'eau douce, abaisse la concentration de l'électrolyte en disparaissant les particules d'argile. Le lessivage des particules d'argile plus profondément dans le profil bloquent les pores de l'infiltration de l'eau. En effet, le sol argileux empêche l'écoulement de l'eau, il s'engorge rapidement à cause du blocage des pores.

Dans les milieux semi-arides, les profils de sols sont couramment salins ou sodiques, où le sel s'est accumulé en raison de la faible perméabilité du sous-sol sodique. Les sols salins et les sols sodiques sont très répandus dans les zones arides et semi-arides du monde. Les sels provenant de précipitations ou de réactions d'altération s'accumulent dans les zones saturées dans le sous-sol pour qu'ils permettent l'infiltration d'eau d'une manière très lente. La salinité transitoire indique la variation saisonnière et spatiale de l'accumulation de sel dans la zone racinaire n'est pas influencée par les processus et les eaux souterraines de la nappe phréatique en hausse (**Rengasamy, 2002**). La salinité transitoire fluctue en profondeur en raison de la configuration des pluies saisonnières. Elle est dominée dans les différents paysages du monde. Probablement, les deux tiers de la superficie agricole de L'Australie à un potentiel de la salinité transitoire sont associés aux eaux souterraines (**Rengasamy, 2002**).

### 3. La sensibilité des plantes au stress salin

#### 3.1. Classification des plantes selon leur tolérance à la salinité

**Munns et Tester (2008)** ont établi les limites de tolérance à la salinité des espèces d'intérêt agronomique, leurs classifications est déterminé selon le taux de réduction du rendement sous l'effet du sel à divers concentration mesurer en (mM) **figure 2**.



**Figure 2** : Classification des plantes selon leur niveau de tolérance à la salinité en fonction de la concentration en sel (**Munns et Tester, 2008**).

#### **3.1.1 Les halophytes**

Les halophytes sont des plantes capables de se développer et de croître sous un régime salin de 300 mM de NaCl (**Tester et Davenport, 2008 in Chamekh, 2010**). Ces plantes sont capables d'accumulé le sodium dans leurs matières foliaires à des concentrations élevées. Le sodium est stocké dans les vacuoles (**Glenn et al. 1999 in Chamekh; 2010**), ainsi que ces plantes présentent une modification de leurs enzymes ce qui permettre une forte adaptation à la contrainte saline (**Flowers et Dalmond, 1992 in Chamekh, 2010**), ces plantes sont classées selon (**Levigneron et al. 1995**) en deux catégories :

##### **Les plantes de type inclusif (include) :**

La plante de type include capte le sel, qui parvient aux feuilles de la même façon que l'eau, par le mouvement ascendant de la sève dans les vaisseaux. A l'intérieur des cellules, le sel est alors stocké dans les vacuoles (qui sont des compartiments fermés au sein de la cellule) grâce à des systèmes de "pompes" moléculaires. Le sel est ainsi isolé. (**Levigneron et al., 1995 ; Levitt, 1980**).

### Les plantes de type exclusif (excluser) :

La plante de type excluser empêche le sel de remonter jusqu'aux feuilles. Une première barrière existe au niveau de l'endoderme, couche interne des cellules de la racine. Cependant, cette barrière peut être interrompue, en particulier lors de l'émergence et des ramifications de la racine. D'autres mécanismes limitent le passage de sel des racines vers les feuilles (Levigneron et al, 1995 ; Levitt, 1980).

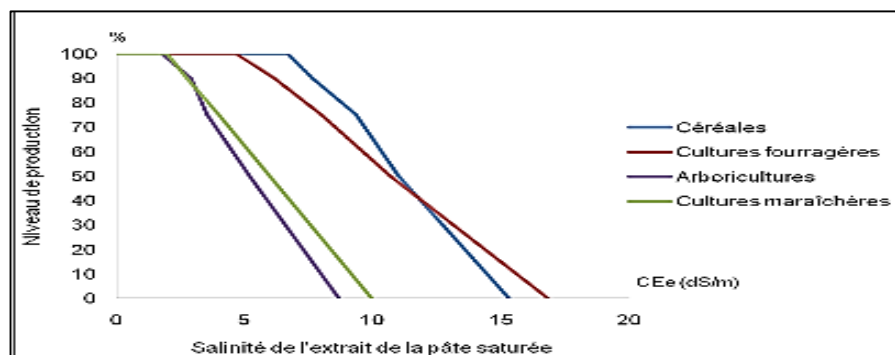
#### 3.1.2. Les glycophytes

Les glycophytes ne sont pas capables de survivre dans des conditions salines mais ils utilisent certaines stratégies des halophytes pour faire face au sel (Yokoi et al. 2002 in Chamekh ,2010). Les glycophytes ont des comportements soit inclusifs ou exclusifs selon les génotypes (Chinnusamy et al. 2004).

### 3.2. Tolérance des cultures à la salinité du sol

La sensibilité des cultures au stress salin se traduit par une réduction du rendement. Le seuil de tolérance à la concentration de sel dans la zone racinaire est propre à chaque culture. Le plus souvent le seuil de tolérance des cultures est exprimé par là CE de l'extrait de pâte saturée du sol (CEe).

Le graphique, ci-après, présente la variabilité de niveau de production des différentes cultures à l'augmentation de la conductivité électrique de la pâte saturée. Nous remarquons que les cultures maraîchères et arboricoles sont généralement les plus sensibles à la concentration de sel dans la zone racinaire, tandis que les céréales et les cultures fourragères supportent une concentration plus élevée sans perte significative de rendement.



**Figure 3** : La variabilité de niveau de production des cultures à l'augmentation de la salinité des sols (FAO 1988).

Le **tableau 1** montre aussi la relation entre la valeur de C<sub>Ee</sub> et le niveau de production : en règle générale, un doublement de la valeur de la C<sub>Ee</sub> entraînera une baisse de production de l'ordre de 50 %.

**Tableau 1 : Tolérance des cultures à la salinité du sol C<sub>Ee</sub> (FAO 1988).**

Niveau de production %		100	90	75	50	0
Cultures		Salinité de l'extrait de la pâte saturée C <sub>Ee</sub> (dS/m)				
Céréales	Blé	6	7	10	13	20
	Sorgho	7	8	9	10	13
	Maïs	7	8	9	10	13
Cultures industrielles	Betterave sucrière	7	9	11	15	24
Cultures fourragères	Bersim	2	3	6	10	19
	Luzerne	2	4	6	9	16
	Vesce avoine	4	6	8	12	20
	Orge	6	8	10	13	20
	Sorgho	7	8	9	10	13
	Maïs	7	8	9	10	13
Cultures maraîchères	Haricot	1	1,5	2,3	3,6	6,3
	Carotte	1	1,7	2,8	4,6	8,1
	Petit pois	1	1,5	2,3	3,6	6,3
	Oignon vert	1,2	1,8	2,8	4,3	7,4
	Ail	1,2	1,8	2,8	4,3	7,4
	Salade	1,3	2,1	3,2	5,1	9
	Piment	1,5	2,2	3,3	5,1	8,6
	Pomme de terre	1,5	2,2	3,3	5,1	8,6
	Fève	1,5	2,2	3,3	5,1	8,6
	Chou	1,8	2,8	4,4	7	12
	Tomate	2,5	3,5	5	7,6	13
	Artichaut	2,8	3,9	5,5	8,2	14
	Pastèque /courge	4,7	5,8	7,4	10	15
	Melon	4,7	5,8	7,4	10	15
	Arboricultures	Vigne de table	1,5	2,5	4,1	6,7
Agrumes		1,8	5,4	3,4	4,9	8
Pommier		1,8	2,4	3,4	4,9	8
Poirier		1,8	2,4	3,4	4,9	8
Prunier		1,8	2,4	3,4	4,9	8
Olivier		1,8	2,4	3,4	4,9	8
	Palmier dattier	4	6,8	11	18	32

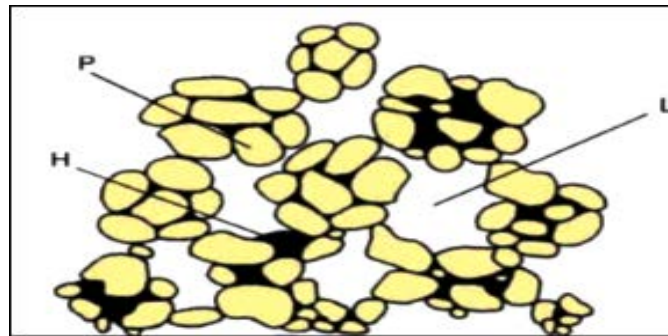
**4. La salinité et la texture des sols**

**4.1. Définition de la texture du sol**

La texture indique l'abondance relative, dans le sol, de particules de dimensions variées : sable, limon ou argile. De la texture dépend la facilité avec laquelle le sol pourra être travaillé, la quantité d'eau et d'air qu'il retient, et la vitesse à laquelle l'eau peut entrer et circuler dans le sol. (FAO, 2006).

**4.2. L'eau et la structure en agrégats**

La capacité de rétention de l'eau dans les sols dépend de leur porosité. Encore dénommée humidité (hygrométrie), elle se mesure en pourcentage de la quantité d'eau contenue dans un sol par rapport à son volume total. La capacité de rétention de l'eau par les lacunes des sols dépend de la teneur en limons et en argiles, car c'est un phénomène capillaire : l'adsorption est d'autant plus grande que la taille des particules est plus faible (**Ramade, 2008**).



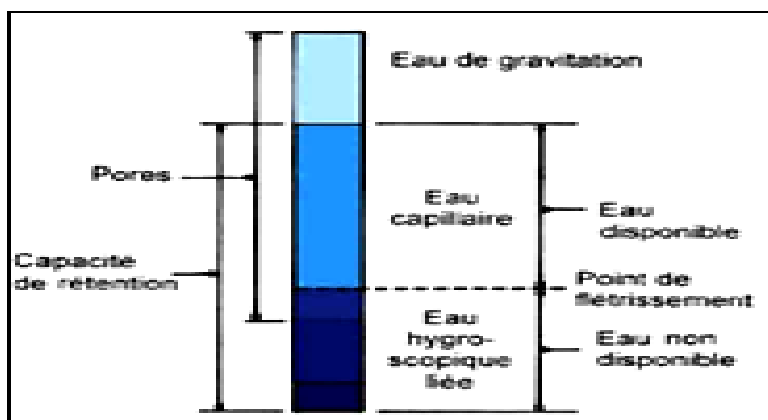
**Figure 4 :** Structure en agrégats.

**L** = espaces lacunaires correspondant aux pores du sol, **P** = particules minérales, **H** = ciment constitué par les colloïdes flocculés du complexe argilo-humique.

La **figure 4** mettant en évidence la porosité d'un sol due à la structure lacunaire qui délimite des pores permettant une circulation de l'eau et des gaz.

**4.3. Rétention de l'eau dans les sols**

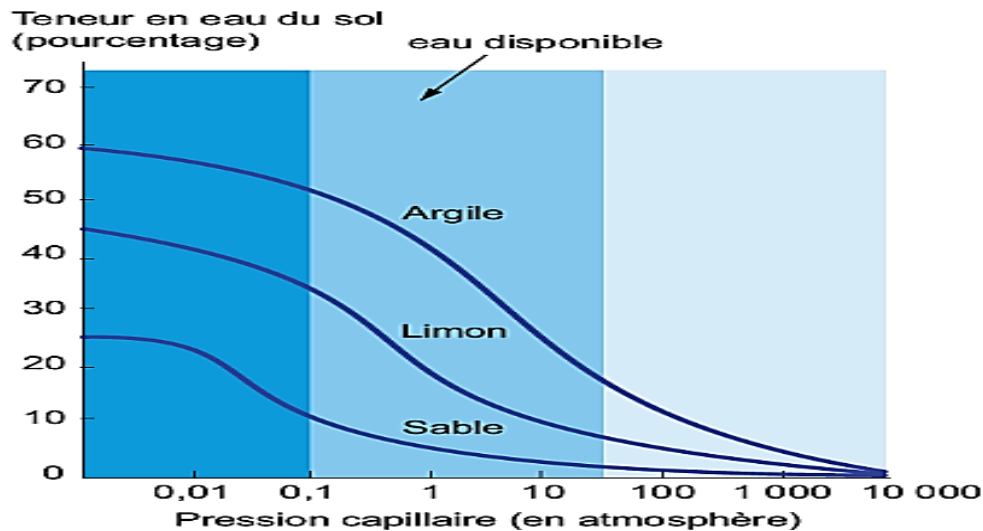
Toutefois, la disponibilité de l'eau pour les plantes ne dépend pas du seul volume total des cavités que referment les sols, mais aussi de la taille des pores qui conditionne la force de rétention capillaire à laquelle l'eau est soumise (**Ramade, 2008**).



**Figure 5 :** Rétention de l'eau dans les sols.

La **figure 5** représente les diverses formes d'eau contenues dans le sol en fonction de leur degré croissant de rétention.

#### 4.4. Infiltration de l'eau en fonction de la nature du sol



**Figure 6** : Variabilité de la disponibilité de l'eau en fonction de la nature du sol.

Après une pluie, le sol saturé d'eau présente sa capacité maximale de rétention. Une partie va s'en écouler spontanément vers le bas par drainage : c'est l'eau dite de gravitation qui alimente les nappes phréatiques (**Ramade, 2008**).

L'eau dont la pression capillaire excède au moins de 1/10 d'atmosphère représente la capacité de rétention du sol dite « au champ », dont une fraction importante constitue l'eau disponible, que les végétaux peuvent extraire par aspiration jusqu'à une quinzaine d'atmosphères (**Ramade, 2008**).

#### 4.5. La texture des sols et la mobilité des sels

**Ltifi (2008)** a montré que la texture et la structure du sol agissent bien évidemment sur le processus de la salinisation selon son pouvoir drainant. Ainsi, un sol à texture grossière, perméable et bien drainant est très peu affecté par la salinisation, on y rencontre les phénomènes de lixiviation et de migration des sels en profondeur. En revanche, les sols lourds, peu perméables et de texture fine présentent des problèmes d'hydromorphie et de salinisation.

Selon **Van hoorn (1994)**, les sols sableux montrent une vitesse élevée d'écoulement capillaire mais une hauteur limitée de remontée. Les sols argileux montrent une vitesse faible,

théoriquement une hauteur considérable de remontée, mais pratiquement assez réduite à cause de fissures qui se forment lors du dessèchement et coupent le système capillaire. Au contraire les sols limoneux, qui ne montrent pas de fissures lors de dessèchement, sont les plus dangereux de point de vue salinisation, puisqu'ils combinent une vitesse capillaire moyenne avec une hauteur élevée.

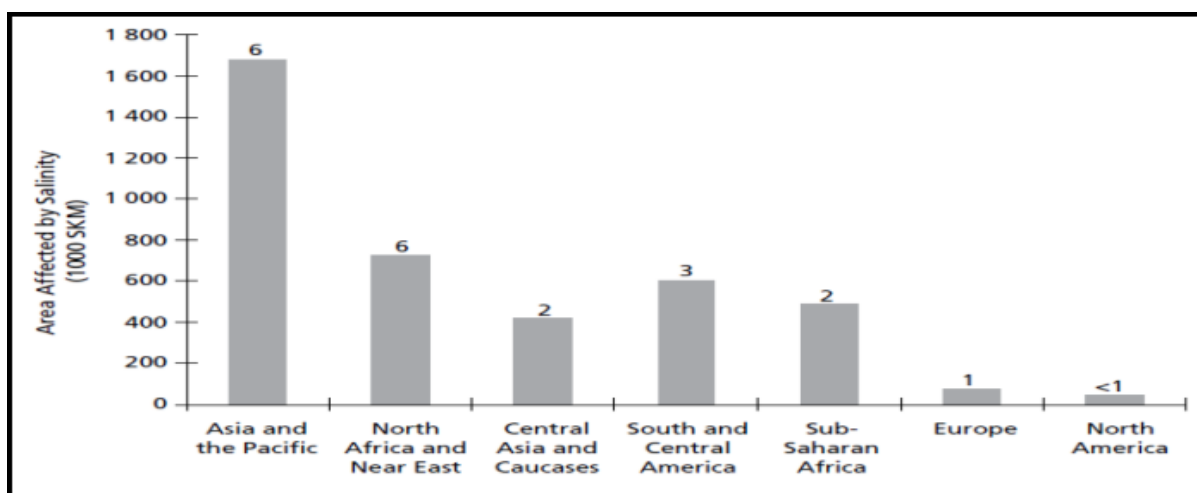
## 5. Étude de La salinisation des sols

### 5.1. Salinisation dans le monde

Selon les estimations 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 (Égypte, 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 (**Djilik et al, 2003**).

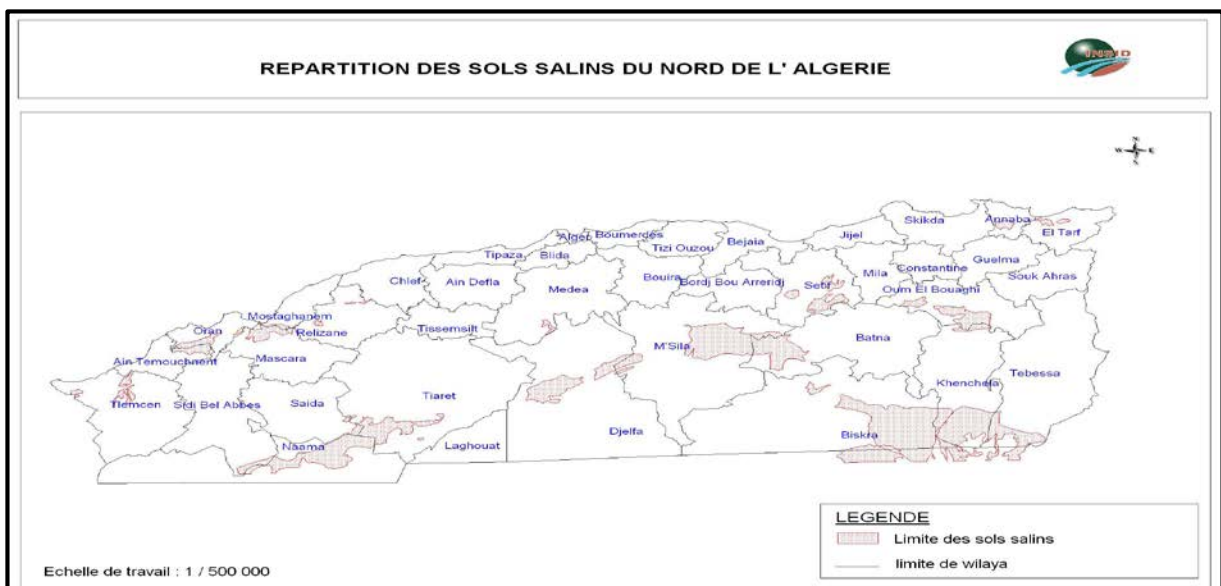


**Figure 7** : Superficie affectée par la salinité dans les différentes régions du monde (**FAO, 2006**).

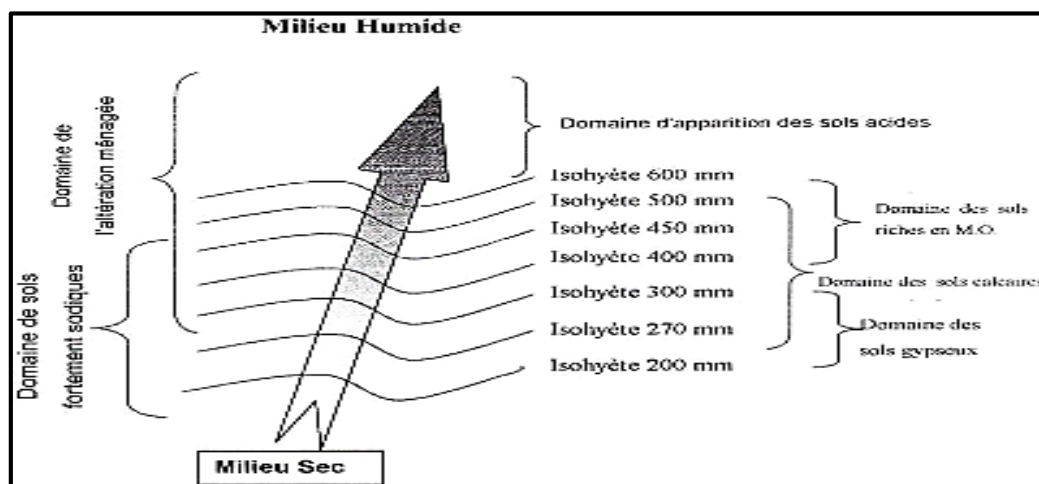
**5.2. Salinisation en Algérie**

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.9**). 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.8**). 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 8.** Répartition des sols salins du Nord de l’Algérie (**INSID, 2008**).



**Figure 9.** Représentation schématique de la distribution de quelques domaines pédologiques dans le Nord de l'Algérie (Djili, 2000).

## 6. Méthodes de mesure de la salinité des sols

### 6.1. Les méthodes de détection des sols

Il existe différents types de capteurs :

- Les capteurs électriques et électromagnétiques permettent les mesures de la capacité électrique de résistivité et de la conductivité électromagnétique des sols;
- Les capteurs optiques et radiométriques pour l'utilisation des ondes électromagnétiques pour détecter le niveau d'énergie absorbé et réfléchi par le sol ;
- Les capteurs mécaniques facilitent la mesure de la force des particules engagées du sol ;
- Les capteurs sonores qui permettent de quantifier le son produit par un outil en interaction avec le sol ;
- Les capteurs pneumatiques permettent l'évaluation de la capacité de la perméance de l'air dans le sol ;
- Les capteurs électrochimiques utilisent des éléments ioniques sélectifs produisant une tension de sortie en réponse à l'activité des ions sélectionnés (par exemple l'hydrogène, du potassium, du nitrate).

Les capteurs de sol sont des appareils de détection capables de repérer les éléments enfouis dans le sol.

**6.2. Méthodes de détection et de mesure de la salinité des sols**

Le choix d'une méthode d'évaluation de la salinité dépend de plusieurs facteurs tels que le but de la mesure, le nombre d'échantillons, le temps et les possibilités dont nous disposons pour effectuer notre travail. Il existe différentes méthodes pour la mesure de la salinité au niveau des périmètres irrigués :

**6.2.1. La méthode de laboratoire**

Elle consiste aux mesures de la conductivité électrique (ou électrochimique) de l'extrait de la pâte saturée ou des extraits aqueux (rapport sol/eau : 1/2, 1/5 et 1/10). C'est une méthode destructive (destruction des sols) lors d'un forage à tarière de plusieurs échantillons.

**6.2.2. Méthodes In situ**

Il s'agit de :

- La méthode électrique à l'aide d'un capteur de salinité constitué d'une paire d'électrodes incrustées dans un élément de céramique poreux.
- La méthode électromagnétique est utilisée dans notre travail.

Le prélèvement de la solution du sol in situ, est largement répandu lorsqu'on souhaite suivre des évolutions temporelles. Cette méthode non destructrice présente l'avantage d'être proche des conditions réelles du milieu.

**6.2.3. La méthode à distance**

Une méthode non destructive qui consiste à l'utilisation des ondes électromagnétiques des capteurs optiques et radiométriques. Elle est basée sur le développement et l'interprétation de données radiométriques et de la réponse spectrale des ondes réfléchies par le sol.

**6.3. Les capteurs électromagnétiques et électriques**

Les capteurs électriques et électromagnétiques sont utilisés pour mesurer la capacité des particules du sol à la conduite et / ou à l'accumulation de charge électrique. Le sol devient une partie de circuit électromagnétique formant une condition d'échange locale. Le signal enregistré sera affiché immédiatement par l'enregistreur de données. Les instruments les plus connus sont : Technologies Veris, (Salina, KS) et GEONICS Limited (Mississauga, Ontario,

Canada), Geocarta (Paris, France), Geometrics, (San Jose, CA), Dualem, (Milton, Ontario, Canada) et Crop Technology, (Bandera, TX).

Pour mesurer la salinité des sols dans notre parcelle d'étude, nous avons utilisé, parmi ces capteurs, le GEONICS Limited EM38 pour calculer la conductivité électrique du sol (ECa) par induction électromagnétique.

### 7. Conclusion

Le facteur naturel et anthropique intervient au déplacement des sels dans le sol. Le fait qu'il y a une accumulation des sels dans les horizons, en résultant une formation d'un sol salin ou sodique.

La solubilité et le mouvement des sels sont des caractères qui réagissent aussi pour la formation d'un sol salin. Le développement des végétations, en particulier la culture maraîchère, peut être menacée à cause de l'excès des sels dans le sol.

Le climat, l'hydrologie, l'irrigation, le drainage, le type du couvert ainsi que leur densité et leurs caractéristiques d'enracinement sont des facteurs qui contrôlent la salinisation des sols.

La production des cultures se change à l'évolution de la quantité des sels dans le sol. En effet, 6 dS/m au plus de conductivité électrique est une valeur convenable pour produire 100% de blé. Par contre si la valeur de conductivité électrique de la pâte saturée est supérieure ou égale à 20 dS/m, on ne peut pas apercevoir de produit de blé.

La plante de courge ne tolère pas la salinité des sols ; à une valeur de conductivité électrique qui ne dépasse pas 4,7 dS/m, le niveau de production peut atteindre 100%. En revanche, 15 dS/m est une valeur qui peut baisser le niveau de production vers 0%.

Pour mesurer et contrôler la gravité de la salinité des sols, il existe trois méthodes : la première méthode celle au laboratoire par la mesure de conductivité électrique de la pâte saturée ou la méthode In situ par la mesure de conductivité électromagnétique de sol ou aussi la méthode à distance celle de la télédétection.

## **Chapitre II**

# **Présentation de la zone d'étude**

### 1. Situation géographique

La parcelle d'étude est située au niveau du périmètre de la Mina qui se trouve dans le bassin inférieur de l'Oued Chélif et couvre une superficie totale de 20000 Ha environ. 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 (Fig.10).



Figure 10. Carte de situation de la plaine de la Mina (Relizane).

### 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 Gaussen** 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.

**2.1. 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.12**, 72.5 mm sont enregistré, 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 2.** Relevés pluviométriques de la station de Relizane (**Période de 1988 à 2006**)

<b>Station</b>	<b>Relizane (1988-2006)</b>
<b>Code</b>	13505
<b>Coordonnées : X (Lambert en km) Y</b>	304.3 272.2
<b>Altitude (m)</b>	75
<b>Pluie / Année (mm)</b>	253,3

**Tableau 3.** 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 (mm)
<b>Pluie (mm)</b>	11,9	21,2	39,4	28,4	30,4	31,2	28,8	27,2	24,2	5,3	1,5	3,8	<b>253.3</b>

**Tableau 4.** 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 (mm)
<b>Pluie (mm)</b>	07	53,2	86,9	12,5	19,4	66,9	15,1	69,3	4,3	01	0,0	0,0	<b>328.5</b>

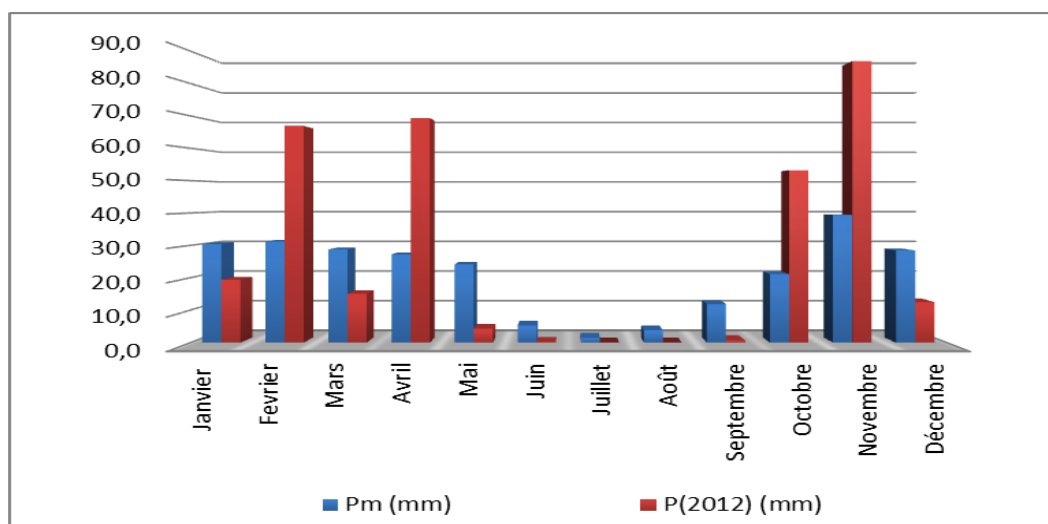


Figure 11. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles.

- 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.

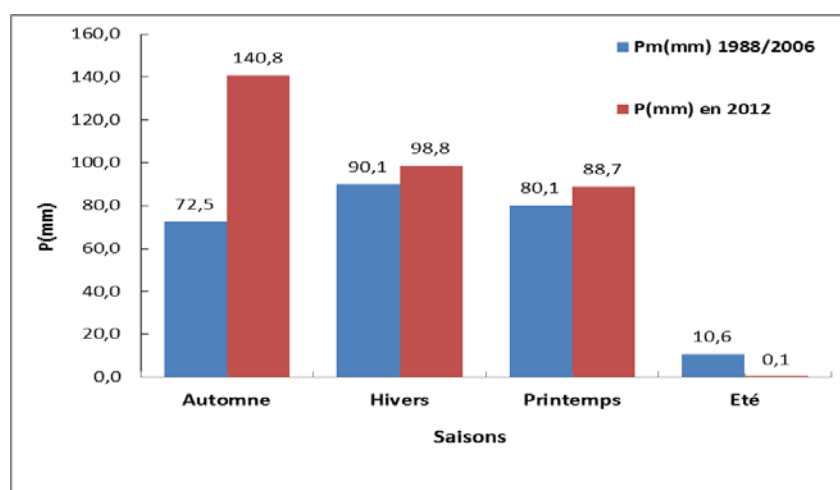


Figure 12. Histogramme du régime saisonnier de la région d'étude.

### 2.2. 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 chaud 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.5)

**Tableau 5.** 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.

### 2.3. 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 6.** Evapotranspiration potentielle moyenne en mm, établie selon la formule PENMAN (18 ans). (Station ONM de Relizane).

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

### 2.4. Classification du climat

#### **2.4.1. 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.13** 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.13** montre la courbe des pluies passant au-dessous de la courbe des températures.

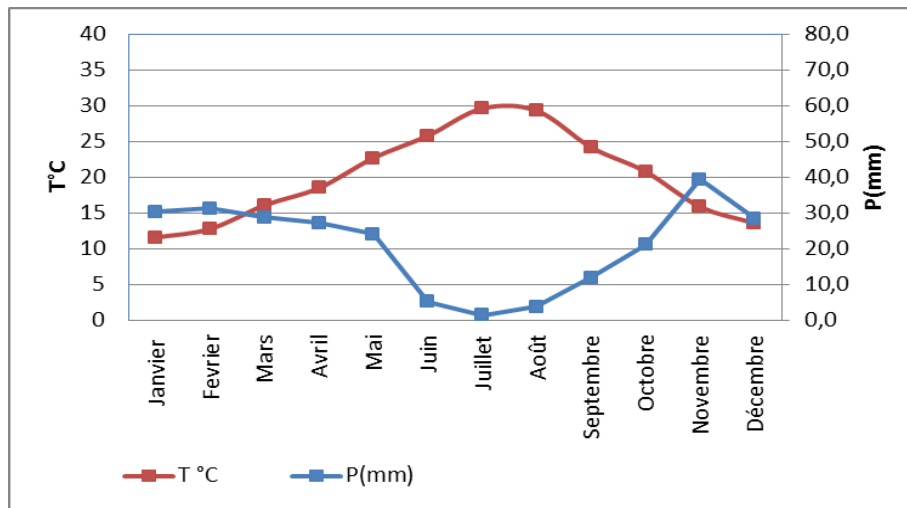


Figure 13. Diagramme ombrothermique de la station de Relizane (1988-2007)

### 2.4.2. 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.14**).

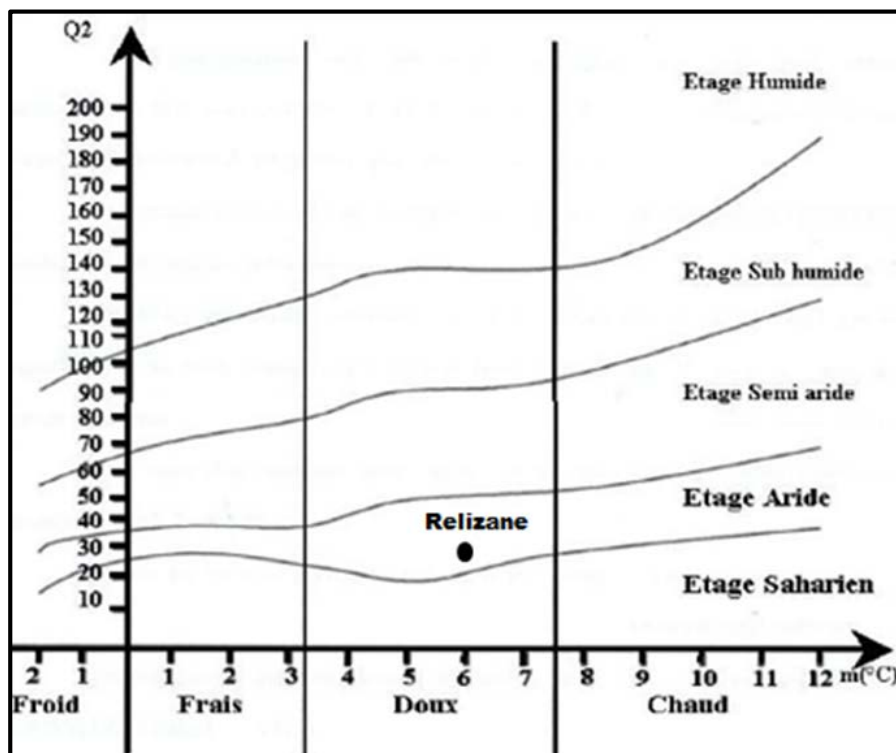


Figure 14. Climagramme pluviométrique d'Emberger pour la station de Relizane (1988- 2006).

**2.5. 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.

**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 (de l'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.

### 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 Khourara, 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 d'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 sables de désagrégation des grès pliocènes. La topographie est légèrement ondulée à uniforme. Ces dépôts sont localisés dans la plaine de Yellel au pied du massif de Belhacel.

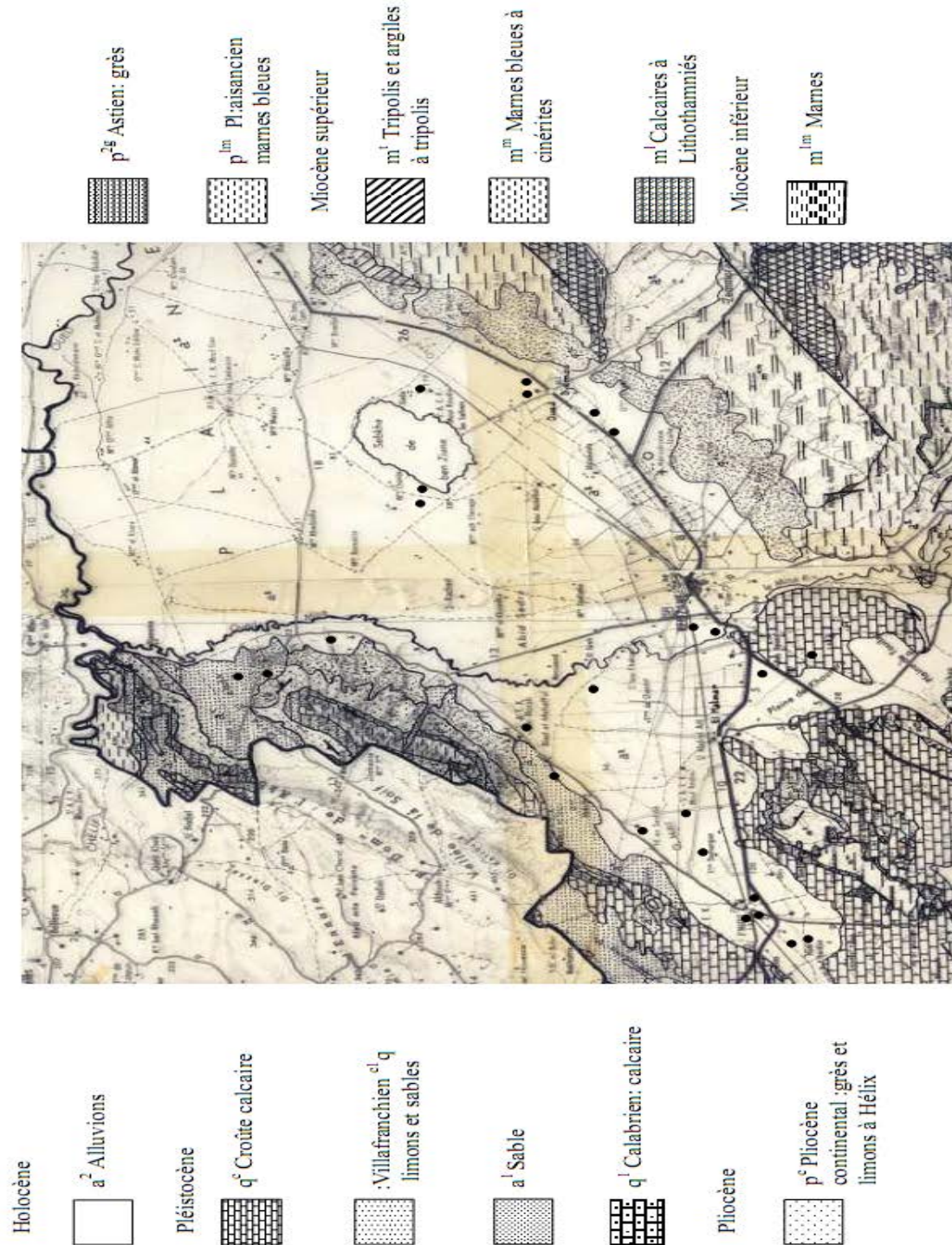


Figure 15. Carte géologique 1/50000 de Relizane (Boualla, 2002)

**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 Hm<sup>3</sup> 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.7 et 8** 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 7.** Salinité de l'eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda (Relizane)  
(ANRH, 2003)

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

**Tableau 8.** Qualité de l'eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda(Relizane)  
(INSID, 2008).

Analyses	CL <sup>-</sup> meq/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> meq/l	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> meq/l	HCO <sup>-</sup> meq/l	Ca <sup>++</sup> meq/l	Mg <sup>++</sup> meq/l	K <sup>+</sup> meq/l	Na <sup>+</sup> meq/l	SAR	CE dS/m	Classe
<b>Décembre 2005</b>	<b>7.6</b>	<b>7.65</b>	<b>0.24</b>	<b>2.2</b>	<b>4.72</b>	<b>6.09</b>	<b>0.19</b>	<b>6.39</b>	<b>2.74</b>	<b>1.71</b>	<b>C3S1</b>

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.

### 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<sup>-1</sup>, représentent 75 % de la superficie sur les 6000 hectares prospectés, au niveau du périmètre irrigué de la Mina (Fig.16).

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) .

### 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.9).

**Tableau 9.** Répartition des superficies irriguées entre les différentes spéculations pratiquées (INSID, 2008).

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

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.

Le **tableau.10** et la **figure.17** montrent la répartition de la superficie de l'occupation du sol, au niveau du périmètre, sur une superficie de 6000 Ha (INSID, 2008).

**Tableau 10.** Répartition de l'occupation du sol, dans le périmètre de la Mina, sur 6000 Ha (INSID, 2008).

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

### 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.

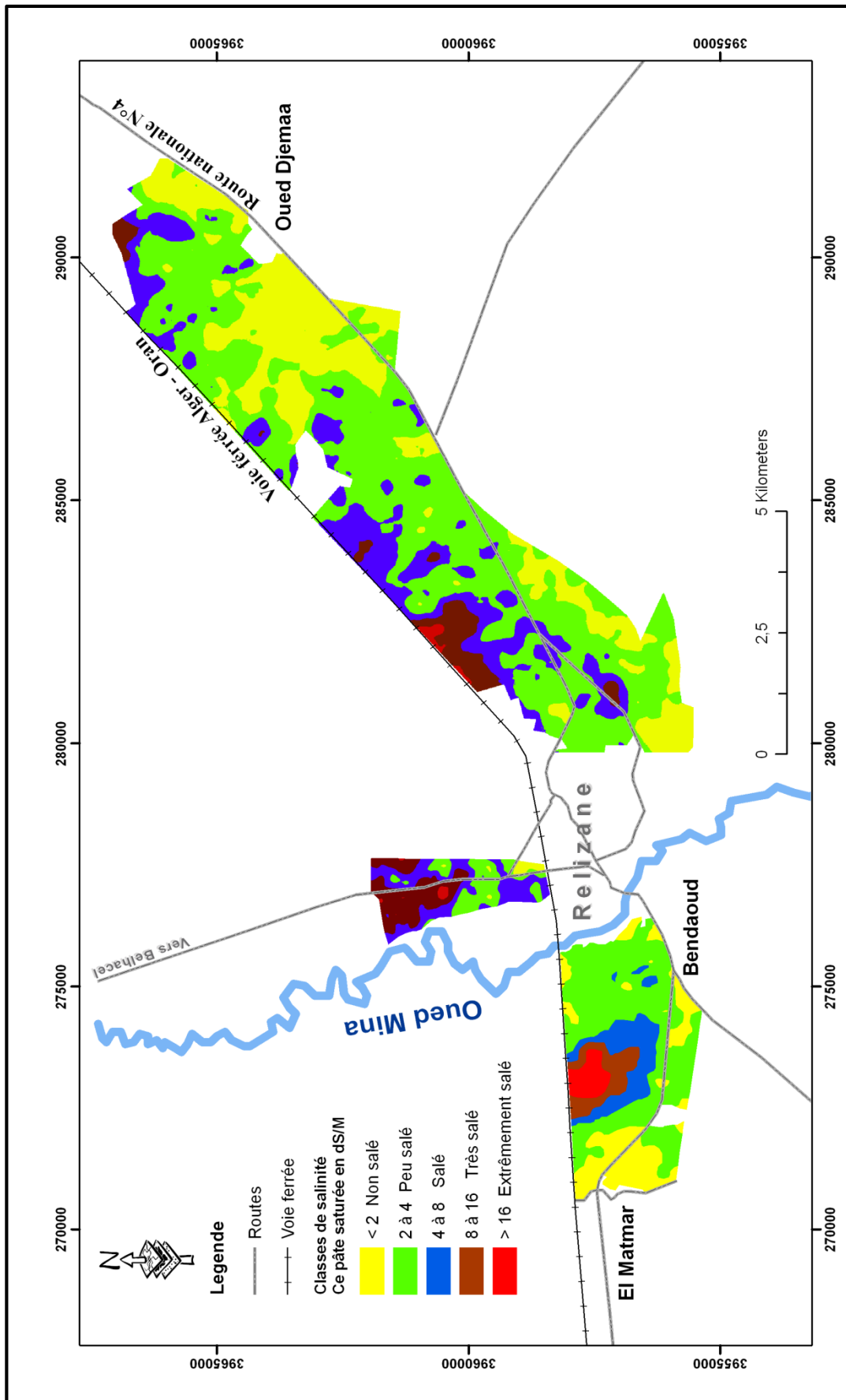


Figure 16. Carte de salinité des sols du périmètre irrigué de la Mina sur 6000 Ha (INSID, 2008)

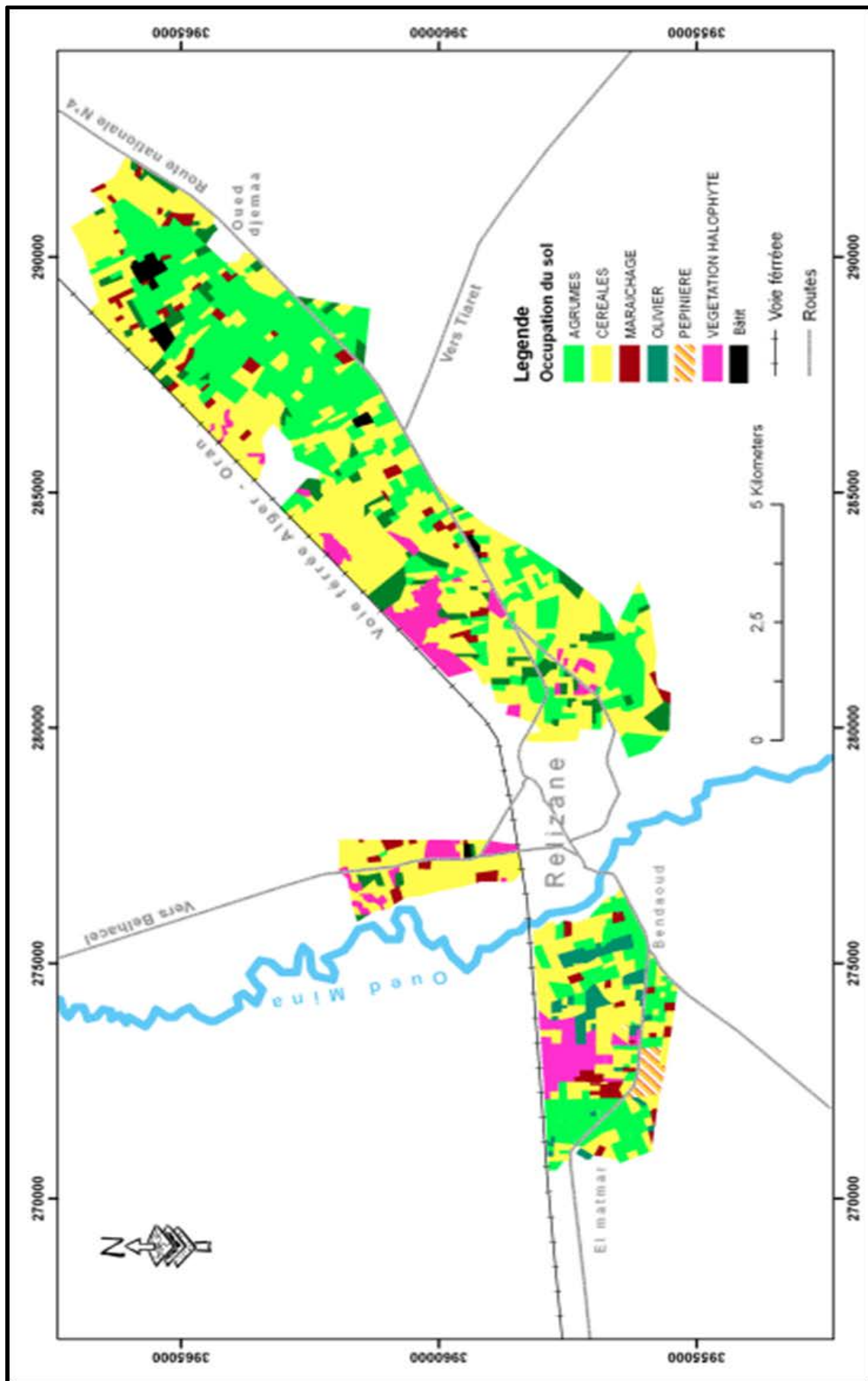


Figure 17. Carte d'occupation des sols du périmètre irrigué de la Mina sur 6000 Ha (INSID, 2008)

# **Chapitre III**

## **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.

### 1. Matériel

L'expérimentation s'est déroulée au niveau d'une parcelle cultivée, située dans la plaine de la Mina, Relizane, à environ 5 km à l'Ouest de la ville de Relizane et 4.5 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  $0^{\circ}29'48.8''$  et  $0^{\circ}30'5.3''$  et entre les latitudes  $35^{\circ}45'39.6''$  et  $35^{\circ}45'57''$  (Fig.18).

Cette parcelle présente une superficie de 15 ha, et elle est labourée au moment de l'échantillonnage (Fig.19).



Figure 18. Situation géographique de la zone d'étude.

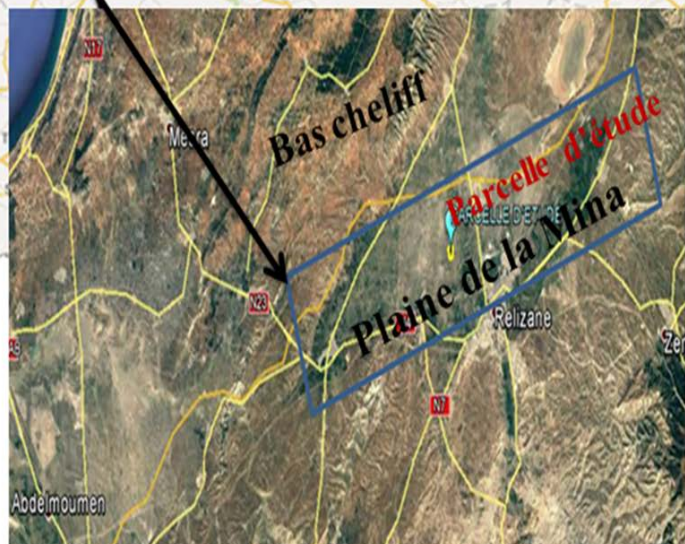


Figure 19. Parcelle d'étude (Source : Google Earth).



**Photo 1.** Vue générale de la parcelle d'étude

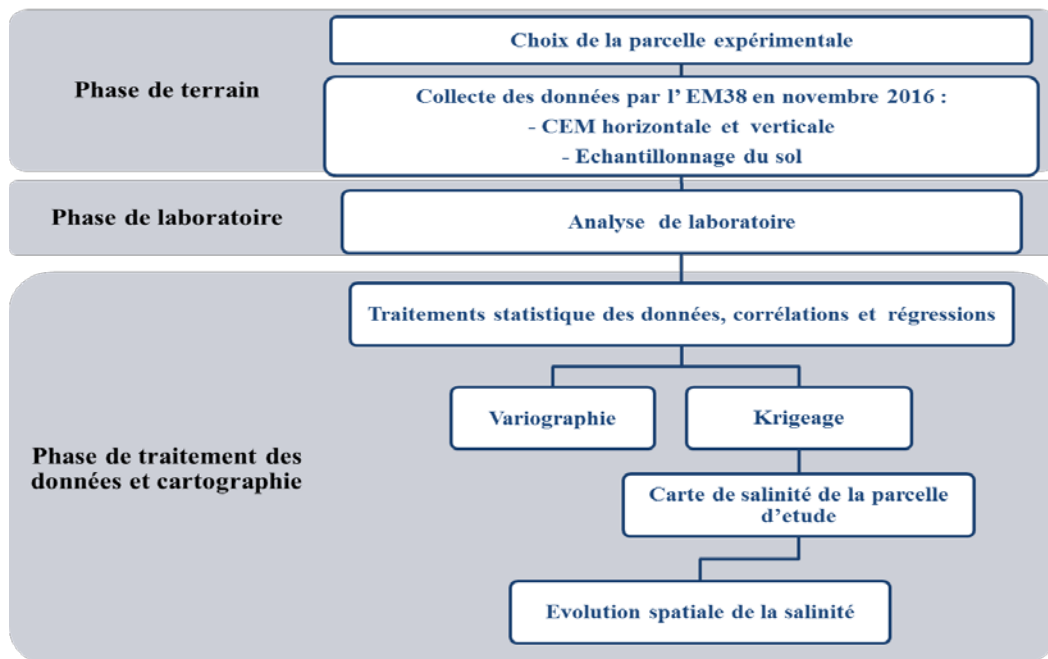


**Photo 2.** Occupation du sol de la parcelle d'étude (orge + melon)

**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.



**Figure 20.** Démarche méthodologique.

### 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 :

- La carte géologique (échelle 1/50.000),
- 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**).

### 2.2. Prospection de terrain

Une campagne de mesures, pour le suivi de l'évolution spatiale de la salinité a été réalisée durant le mois de Novembre 2016. La prospection sur terrain a nécessité l'utilisation du conductivimètre électromagnétique (EM38) et des prélèvements d'échantillons de sols. Au total 64 mesures électromagnétiques en mode vertical et horizontal ont été effectuées pour un pas d'échantillonnage de 50 m. Ainsi, dix-sept échantillons ont été prélevés sur sept points à trois profondeurs pour la corrélation. Les échantillons de sol prélevés ont été codés et mis dans des sachets en plastique bien fermés, et envoyés pour les analyses de laboratoire à l'Institut National des Sols, Irrigation et Drainage (INSID) d'El Matmar (Relizane).

### 2.3. Utilisation de l'EM38 pour la prospection 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 64 mesures sur une grille régulière de 50 m x 50 m visant à couvrir toute la parcelle d'étude. Les lectures verticales et horizontales de l'EM38 ont été obtenues en maintenant l'appareil sur la surface du sol, en position verticale et horizontale. (**Photo 3 ; figure 21**).
- **Le second, concerne, les données de calibrage**, et correspond à 7 points de mesure sélectionnés parmi les 64 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 75 cm par incréments de 25 cm pour déterminer la conductivité électrique de la pâte saturée ( $CE_{ps}$ ) au laboratoire (**Fig.22**).

Vue la profondeur d'investigation de l'EM38, en position horizontale (0.75cm), seules les lectures horizontales ont été prises en considération. Par ailleurs, la difficulté d'interprétation des mesures de la conductivité électromagnétique (CEM) réside dans l'influence de l'humidité du sol sur ces mesures (Job et al, 1990). La meilleure méthode consiste à intervenir après des pluies importantes qui homogénéisent les profils hydriques des sols (Job et al, 1990).

Au cours de la prospection de la salinité, pour la campagne de mesures, les lectures de l'EM38, ainsi que les prélèvements des échantillons de sols, ont été réalisées sur les mêmes points. A cet effet, un GPS (Global Positioning System) de type Garmin a été utilisé pour le géo-référencement.



Photo 3. Utilisation de l'EM38.

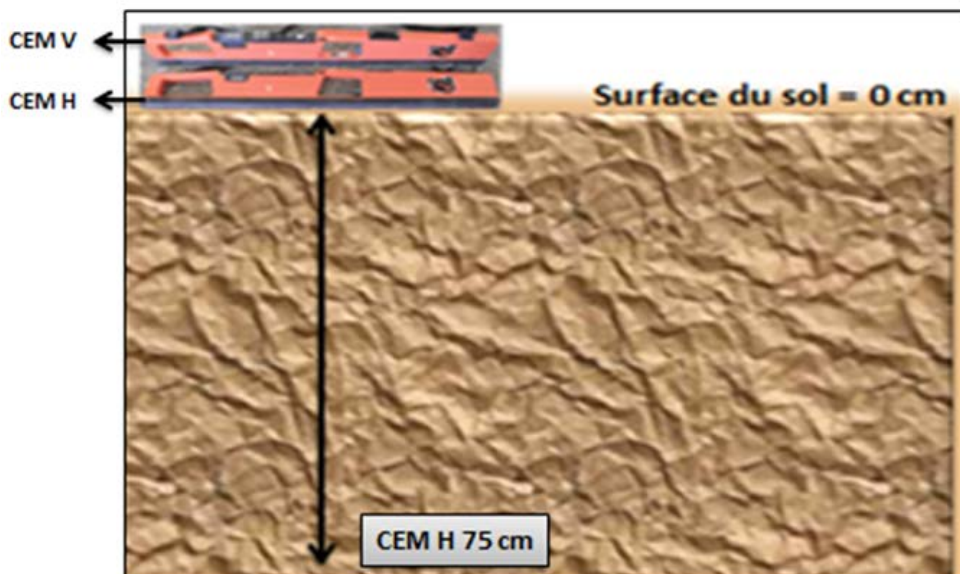


Figure 21. Lectures verticales et horizontales de l'EM38.

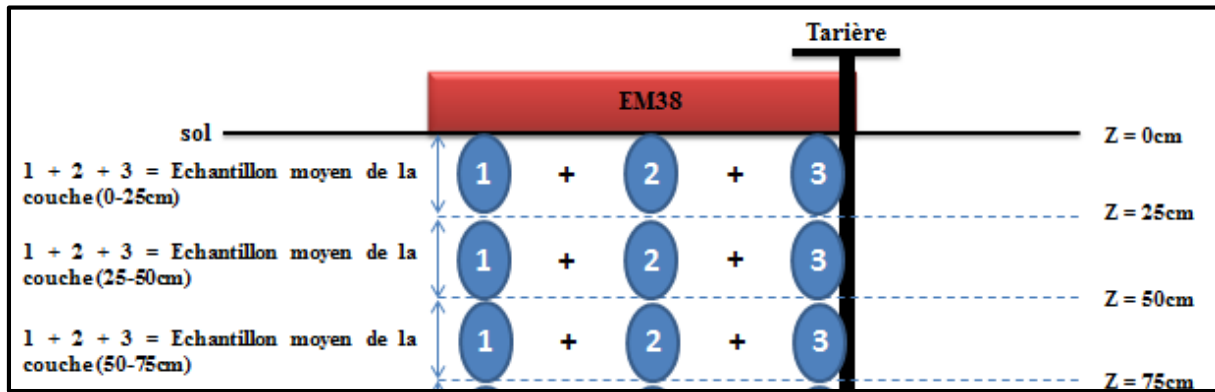


Figure 22. Méthode de prélèvement des échantillons de sol.

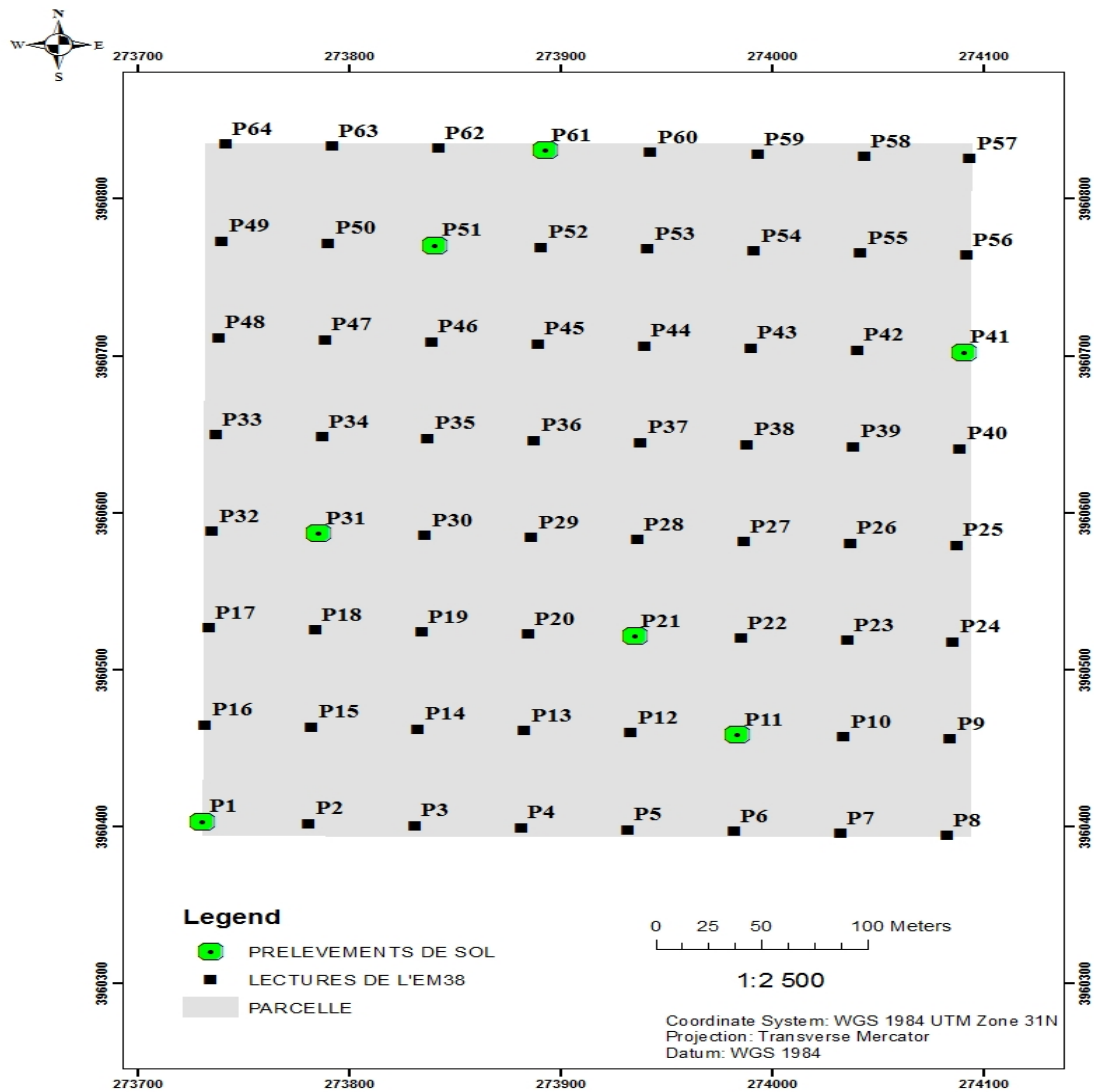


Figure 23. Plan d'échantillonnage.

### 3. 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 de la granulométrie, du pH, de la CE, du calcaire, du carbone, de la CEC, des cations échangeables et des sels solubles.

#### 3.1. Analyses physiques et chimiques du sol

Tout d'abord les échantillons de sol ont été séchés à l'étuve à 105°C, pendant une nuit. La différence entre le poids avant et après le séchage exprime la teneur en eau de l'échantillon initial ;

- L'analyse granulométrique a été réalisée par la méthode à la pipette de Robinson. Elle consiste tout d'abord à détruire la matière organique à l'eau oxygénée ( $H_2O_2$ ) et à disperser l'argile par l'héxamétaphosphate de sodium. La texture du sol est ensuite déterminée, en séparant les fractions granulométriques : les limons grossiers (20 à 50  $\mu m$ ) et fins (2 à 20  $\mu m$ ) ; les argiles (0 à 2  $\mu m$ ), les sables fins (50 -200 $\mu m$ ) et grossiers (200-2000 $\mu m$ ).
- La mesure du pH a été effectuée par un pH-mètre, avec un rapport sol – eau de 1/2.5. La valeur du pH eau (acidité effective) des échantillons de sols a été obtenue par la méthode électrométrique au pH-mètre avec une électrode en verre.
- La mesure de la conductivité électrique de l'extrait dilué au 1/5(CEd) exprimée en  $dS.m^{-1}$ , a été effectuée avec un conductimètre, avec un rapport sol-eau de 1/5;
- la mesure de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée ( $CE_{ps}$ ) exprimée en  $dS/m$  (**voir 3.2**) ;
- Le dosage du calcaire total (en %) a été réalisé par le calcimètre Bernard ;
- Le carbone organique (en  $g.kg^{-1}$ ) : dosage par la méthode Ane ;
- La matière organique : déterminé par dosage du carbone organique en appliquant la formule ( $M0\% = C * 1,72$ );
- Le dosage des anions solubles à partir de l'extrait de la pâte saturée du sol :
  - ✓ Les chlorures sont dosés par titrimétrie au nitrate d'argent ( $AgNO_3$  en  $meq.l^{-1}$ ) en présence de chromate de potassium ;
  - ✓ Les carbonates ( $CO_3^{-2}$  en  $meq.l^{-1}$ ) et les bicarbonates ( $HCO_3^-$  en  $meq.l^{-1}$ ) sont dosés par titrimétrie avec du  $H_2SO_4$  ;
  - ✓ Les sulfates ( $SO_4^{-2}$  en  $meq.l^{-1}$ ) sont dosés par la méthode gravimétrique par précipitation sous forme de sulfate de Baryum ( $BaSO_4$ ) ;

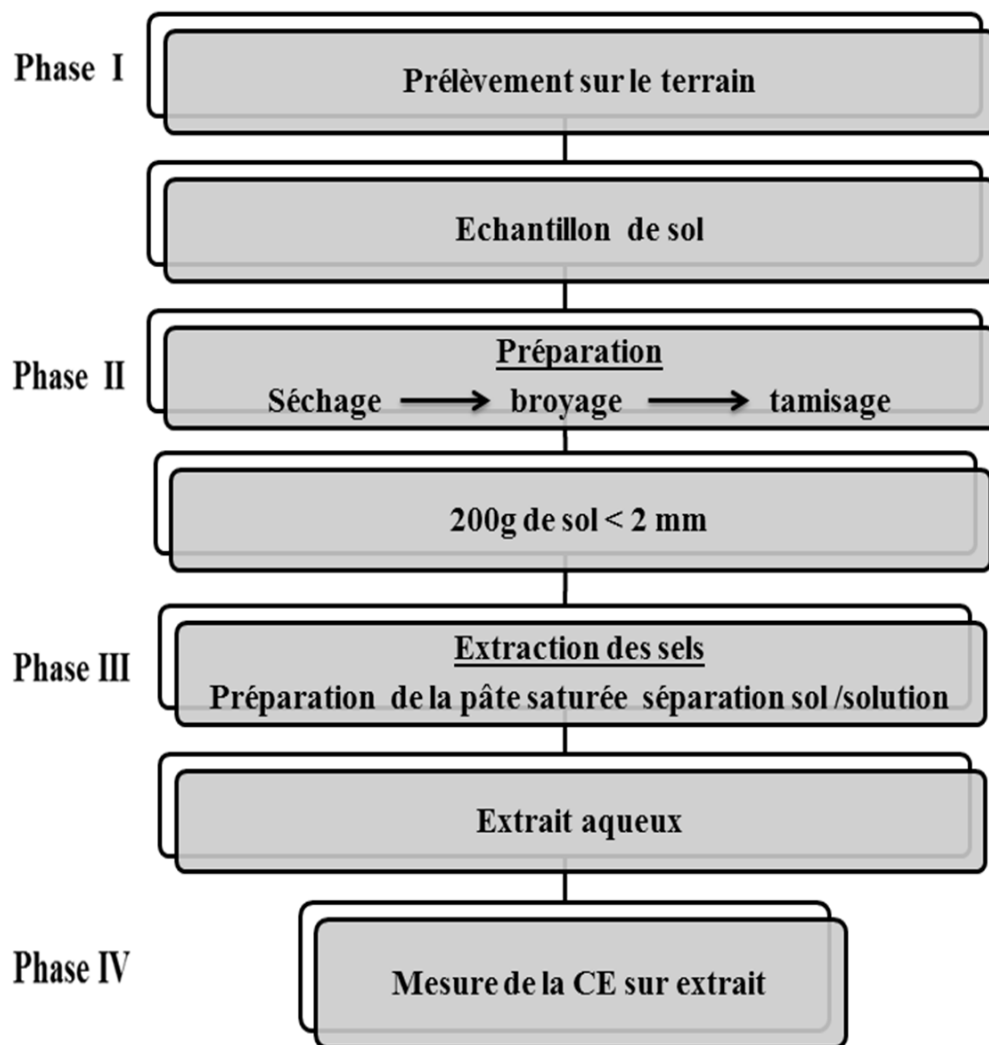
- Dosage des cations solubles à partir de l'extrait de la pâte saturée du sol ;
- ✓ Le calcium  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  (exprimés en meq/100g de sol) sont dosés, par l'absorption atomique ;
- La détermination des bases échangeables et la capacité d'échange par la méthode de Metson ;
- ✓ L'extraction des cations échangeables ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ) par l'Acétate d'ammonium à pH 8.2 ;

### 3.2. Cas particulier : 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 saturée ( $\text{CE}_{\text{ps}}$ ), estimée, au laboratoire par les méthodes habituelles (**US Salinity Laboratory, 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 ( **Khorsandi et Yazdi, 2011**).

- **Réalisation de l'extrait de pâte saturée** (Procédure opérationnelle PopS26d de l'US49, Analyses du CIRAD de Montpellier – France)
- 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, en 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  $\text{cm}^3$ . 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 15 minutes, à 2400 tours/minute, dans des supports de godets (de 250 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 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 24** Schéma du protocole expérimental de la pâte saturée



**Photos 4(a et b).** Préparation de la pâte saturée



**Photos 5 (c et d).** Extraction des sels par Centrifugation et Filtration (Extrait saturé)



**Photo 6.** Mesure de la CE de l'extrait obtenu.

### 3.3. Estimation de l'ESP (pourcentage de sodium échangeable)

L'USSL propose la relation suivante pour relier le SAR et ESP

$$\text{ESP} = \frac{100(-0.0126 + 0.01475 \text{ SAR})}{1 + (-0.0126 + 0.01475 \text{ SAR})}$$

Ce type de relations mathématiques entre le SAR et ESP a été adapté en fonction des sites d'étude. Par complexe d'échange à partir du seul paramètre SAR, mais ce paramètre est intéressant pour connaître la tendance évolutive du complexe d'échange pour qualifier la sodicité de la solution. Notons également que pour une bonne partie des concentrations rencontrées en nature (valeurs faible) les valeurs du SAR et ESP sont quasi équivalents.

### 4. 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.

#### 4.1. 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

#### 4.2. 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 ont (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 :  $0 \leq R^2 \leq 1$

Le  $R^2$  est calculé selon la formule :

$$R^2 = \frac{\text{SCEy estimés par l'équation de régression}}{\text{SCEtotale}}$$

$R^2$  = variabilité expliquée par la régression / variabilité totale

Pour l'évaluation de l'adéquation entre les valeurs calculées par les équations de régressions et les valeurs mesurées de la conductivité électrique de la pâte saturée du sol (CEps), le critère d'erreur suivant est utilisé :

$$\text{Erreur (\%)} = \frac{[(\text{Valeur calculée} - \text{Valeur mesurée})^2]^{1/2}}{[(\text{Valeur mesurée})^2]^{1/2}}$$

### 4.3. Méthodes de prédiction spatiale ou Variographie

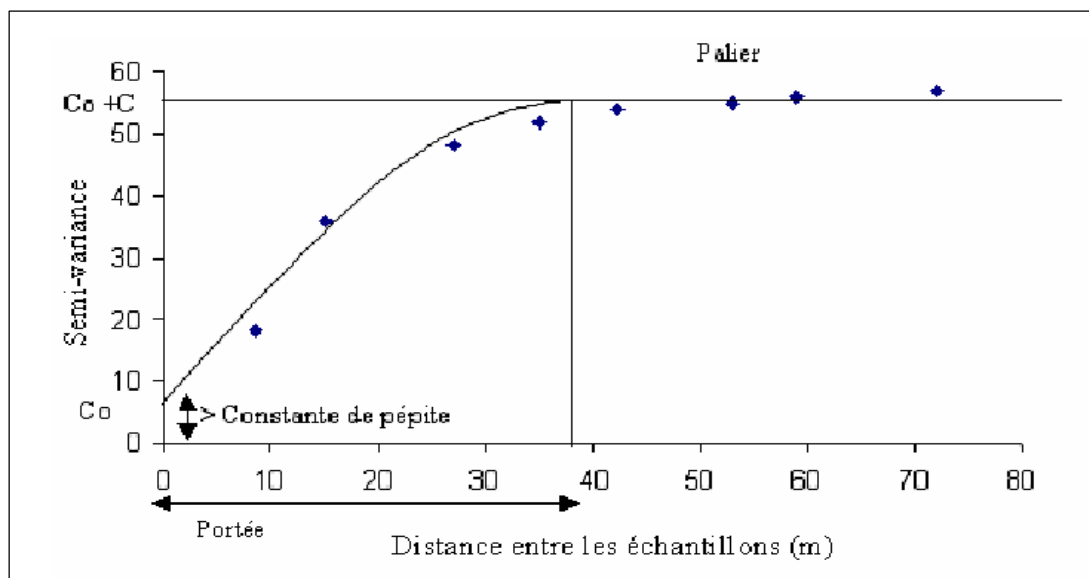
La géostatistique est un outil d'analyse de la structure de variation et d'organisation spatiale de l'information géographique. Elle regroupe un ensemble de techniques statistiques permettant aux pédologues et aux scientifiques du sol de mieux comprendre et de reproduire le modèle de la variabilité spatiale des sols (**Trangmar et al, 1985**). Ces techniques reposent sur l'analyse numérique de la dépendance des échantillons dans l'espace. Selon **Nolin (2000)**, plus les échantillons sont rapprochés dans l'espace, plus ils se ressemblent jusqu'à une certaine distance au-delà de laquelle ils deviennent indépendants les uns des autres.

Une méthode couramment utilisée pour étudier la dépendance spatiale des observations est d'analyser le semi-variogramme, un graphique qui présente la variation de la demi-variance  $\gamma(h)$  en fonction de la distance (h) entre les échantillons.

### 4.3.1. Le semi-variogramme

Le semi-variogramme, fonction qui exprime la variation de la demi-variance est couramment utilisé pour analyser la dépendance des observations spatiales (Nolin et al, 1997). Elle est à la base de la technique d'interpolation par krigeage. La **figure.25** présente un modèle théorique de semi-variogramme où la semi-variance  $\gamma(h)$  est fonction de l'intervalle d'échantillonnage ( $h$ ) et dont l'équation est donnée par :

$$\gamma(h) = 1/2 \text{ var} (Z(x) - Z(x+h))$$



**Figure 25.** Semi-variogramme théorique (modèle sphérique) (Source : M. Quenum, 2009 in Gacem .F, 2014).

Pour faire l'analyse spatiale d'une propriété, trois paramètres sont importants à considérer dans ce graphique. Ce sont la constante de pépité, le palier et la portée. La constante de pépité (Nugget) est la valeur de  $\gamma(h)$  quand  $h=0$ . Elle représente la composante aléatoire de la variation et correspond à l'erreur d'échantillonnage et à la variabilité présente à une distance inférieure à l'intervalle d'échantillonnage, donc non prise en considération par le dispositif d'échantillonnage. Le palier, si présent, est caractérisé par l'atteinte d'un plateau où  $\gamma(h)$  devient constant avec l'évolution de  $h$ . Si les échantillons sont reliés les uns aux autres, le semi-variogramme prend une allure linéaire dans sa phase initiale pour ensuite atteindre le palier (Nolin et al, 1997). La valeur de  $h$  pour laquelle  $\gamma(h)$  atteint le palier s'appelle la portée. Celle-ci s'avère très utile pour fixer l'intervalle optimal d'échantillonnage puisque les échantillons prélevés à une distance inférieure à la portée sont spatialement dépendants (Nolin et al, 1997). Le rapport  $C0/(C0+C)$  où  $C$  (variance structurale) représente la composante systématique de la variabilité, s'avère également un indice intéressant pour analyser la

structure spatiale d'une propriété ainsi que la stratégie d'échantillonnage utilisée. Plus la composante systématique est élevée relativement à la composante aléatoire (rapport  $C0/(C0+C)$  faible), plus la structure d'organisation spatiale de la propriété est développée, élément essentiel pour obtenir des interpolations spatiales fiables. Par contre, lorsque la composante aléatoire ( $C0$ ) est relativement élevée par rapport à la composante systématique (rapport  $C0/(C0+C)$  élevé), il convient d'utiliser un intervalle d'échantillonnage plus rapproché afin de mieux intégrer la micro-variabilité ou d'améliorer la méthode de mesure afin de diminuer l'erreur expérimentale (Nolin et al, 1997).

### 4.3.2. 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 carrées.

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). En d'autres termes, le krigeage associe une erreur d'estimation à chacune des cellules pour évaluer la précision et la fiabilité de la prédiction. La précision des estimations dépend d'un certain nombre de facteurs, soit :

- Le nombre d'échantillons et la qualité des données en chaque point ;
- La position des échantillons sur le site étudié, car les échantillons régulièrement espacés offrent une meilleure couverture et donnent ainsi davantage d'informations sur le site que des échantillons regroupés ;
- La distance entre les échantillons et le point dont on veut estimer la valeur ;
- La continuité spatiale de la variable étudiée : il est plus facile d'estimer la valeur d'une variable assez régulière que celle d'une variable qui varie de façon aléatoire.

Parmi les différentes techniques de krigeage, la méthode du Krigeage ordinaire (KO) a été utilisée dans la présente étude, en raison de sa simplicité et de la précision de la prédiction par rapport aux autres méthodes de krigeage (Isaaks, J.D., and R.M. Srivastava. 1989). Il consiste en une opération qui est répétée en chaque nœud  $X_0$  d'une grille régulière recouvrant le domaine étudié.

Soit  $X_\alpha$ , le nombre de point échantillonnés d'une propriété donnée. On considère estimer une valeur  $Z^*$  en un point  $X_0$ . La nouvelle valeur  $Z^*$  est estimée par une moyenne pondérée de données  $Z(X_\alpha)$  :

$$Z^*(X_0) = \sum_n \gamma_\alpha Z(X_\alpha)$$

Les  $n$  pondérateurs  $\gamma_\alpha$  sont calculés de façon à assurer que l'estimation  $Z^*(X_0)$  soit sans biais et que la variance de l'erreur d'estimation soit minimale.

Dans cette étude, les modèles de semi-variogrammes ont été testés pour la couche du sol (0-75 cm) et les performances de prédiction de la salinité sont représentées dans des tableaux.

Pour qu'un modèle fournit des prédictions précises, il faut que :

- la moyenne standardisée (EM) doit être proche de 0 ;
- la racine carrée de la moyenne de l'erreur standard (RMS) et l'erreur standard de la moyenne (ASE) doivent être aussi faibles que possibles ;
- et la racine carrée de l'écart quadratique moyen (RMSE) doit être proche de 1 (Johnston K., et al, 2001).

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

# **Chapitre IV**

## **Résultats & Discussion**

### 1. Etude des paramètres physiques et physico-chimiques du sol

Les résultats portent sur les paramètres physiques et physico-chimiques des 17 échantillons de sol prélevés durant le mois de novembre 2016, sur trois niveaux de profondeur.

#### 1.1. Analyse de l'humidité

Le **tableau 12** montre que l'humidité pondérable moyenne du sol est de 15.29 %.

Les teneurs en eau de l'horizon de surface et celui de (25-50 cm) sont moins variables dans l'espace ( $CV < 10\%$ ) que celle de la troisième couche ( $CV > 10\%$ ).

**Tableau 12.** Résultats de l'humidité du sol en (%)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Moyenne	19,48	12,29	14,11
C.V. %	8,29	9,00	13,87

#### 1.2. Analyse de la texture

D'après les **Tableaux 13, 14, 15, 16 et 17** nous remarquons que les fractions granulométriques prédominantes sont les fractions argileuses et limoneuses. Dans l'horizon de surface, les argiles et les limons ont respectivement des taux moyens de 37.73% et de 50.68 %. Pour les horizons de sub-surface et profond, la fraction limoneuse (limon fin et grossier) prédomine toujours avec respectivement une teneur moyenne de 47.75 % et 53.77 %. La fraction sableuse est peu représentée avec une moyenne qui varie entre 0.68 et 1.15% pour le sable grossier et entre 10.44 et 15.31% pour les sables fins dans tout le profil.

Nous remarquons que le coefficient de variabilité pour l'argile est modéré ( $10.01\% < CV < 23.64\%$ ) (**Tableau 13**). Pour les limons fins ce sont les couches (25-50cm et 50-75cm) qui présentent des coefficients de variabilité modérés ( $29,41\% < CV < 30,93\%$ ) (**Tableau 15**), alors que pour l'horizon de surface, la variabilité est faible ( $CV < 9,07\%$ ) (**Tableau 15**). Pour les Limons grossiers, les coefficients de variabilité sont modérés dans tous les horizons ( $18,07\% < CV < 28,73\%$ ) (**Tableau 14**).

Pour les sables grossiers, le coefficient de variabilité est élevé pour l'horizon (25-50 cm) avec un CV de 37,02% et modéré pour les deux autres couches avec des Cv de 21,46% et 26.27 %. (**Tableau 16**). Les coefficients de variabilité sont modérés dans

les horizons de surface et sub-surface pour le sable fin avec des CV de 29,75 et 34,65 % et élevé en profondeur avec un CV de 49,07 % (**Tableau 17**).

**Tableau 13.** Résultats de l'Argile (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Moyenne	37,73	37,89	30,24
C.V. %	10,01	10,28	23,64

**Tableau 14.** Résultats des Limons grossiers (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Moyenne	20,65	23,91	27,21
C.V. %	18,07	28,73	26,74

**Tableau 15.** Résultats des Limons fins (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Moyenne	30,03	23,84	26,56
C.V. %	9,07	30,93	29,41

**Tableau 16.** Résultats des Sables grossiers (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Moyenne	1,15	1,25	0,68
C.V. %	21,46	37,02	26,27

**Tableau 17.** Résultats des Sables fins (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Moyenne	10,44	13,11	15,31
C.V. %	29,75	34,65	49,07

### **1.3. Analyses de la matière organique (M.O)**

Le **tableau 18** montre que les taux de matière organique sont faibles dans tous les horizons avec des valeurs moyennes qui varient de 1,33% à 1,79% (Tableau 18). Le coefficient de variabilité est modéré dans l'horizon de surface avec un CV de 21.80 % et élevé pour les deux autres couches (CV > 35 %).

Tableau 18. Résultats de la matière organique

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Moyenne	1,60	1,79	1,33
C .V. %	21,80	38,79	49,33

#### 1.4. Analyses du potentiel Hydrogène (pH)

Le **tableau 19** indique que le pH est supérieur à 8 avec une moyenne de 8.10 à 8.14 et un coefficient de variation faible ( $CV < 15\%$ ). Ces valeurs correspondent à une réaction du sol relativement alcaline, caractéristique principale des sols calcaires et des sols salés.

Tableau 19. Résultats du pH

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Moyenne	8,14	8,10	8,13
C .V. %	1,32	0,93	0,81

#### 1.5. Analyses statistiques du calcaire (CaCO<sub>3</sub>)

Les résultats d'analyses (**tableau 20**) montrent que les teneurs en calcaire sont homogènes au niveau du profil, la moyenne varie de 18,50 à 19,35%, avec un faible coefficient de variabilité ( $CV < 15\%$ )

Tableau 20. Résultats du calcaire total (CaCO<sub>3</sub> en %)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Moyenne	18,50	18,58	19,35
C .V. %	3,80	2,19	4,27

#### 1.6. Analyses statistiques du calcaire actif

Le **tableau 21** montre que les teneurs en calcaire actif sont faibles au niveau du profil, avec une moyenne de 5,44%. Le coefficient de variabilité est faible ( $CV < 15\%$ ).

Tableau 21. Résultats du calcaire actif (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Moyenne	5,27	5,44	5,62
C .V. %	10,46	12,30	11,89

## 2. Caractérisation de la salinité des sols

Les résultats portent sur la conductivité électrique (extrait de la pâte saturée et extrait dilué) des 17 échantillons de sol prélevés, sur trois niveaux de profondeur.

### 2.1. Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée (CEps)

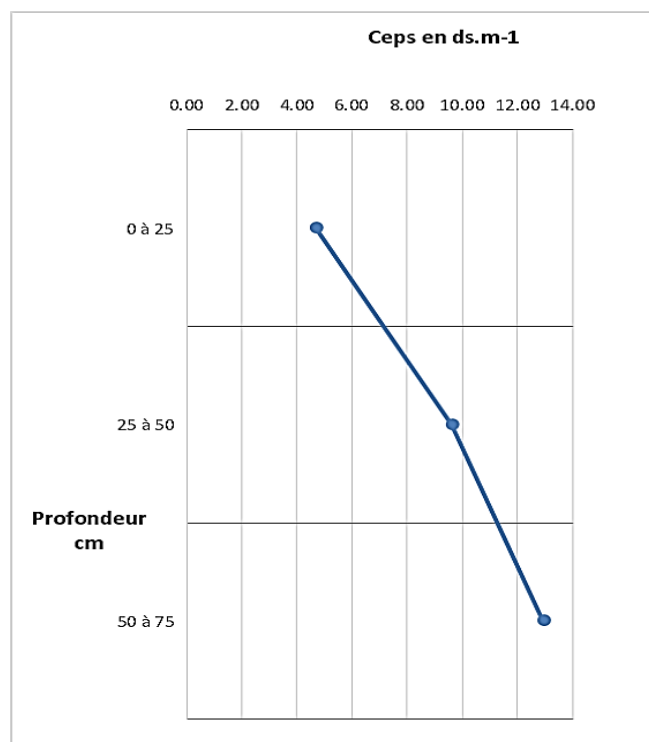
Les valeurs moyennes de la CEps passent de 4,68 dS.m-1 dans l'horizon de surface et augmentent progressivement vers la profondeur pour atteindre une valeur de 12,96 dS.m-1 (**tableau 22**).

La salinité moyenne de la couche (0-75cm) révèle que le profil salin moyen est de type descendant (**Figure 26**), elle se situe entre 4,68 dS.m-1 en surface et 12,96 dS.m-1 en profondeur.

Le coefficient de variation de la CEps est de 53.30 % (CV > à 35 %), au niveau de l'horizon de surface (0-25cm), Cette valeur exprime une forte variabilité de la salinité en surface. Les couches profondes présentent des coefficients de variabilité modérés de 24.11% et 17.53%.

Tableau 22. Les résultats de la CE<sub>ps</sub> en dS/m

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Moyenne	4,68	9,62	12,96
C .V. %	53,30	24,11	17,53



**Figure 26.** Profil salin moyen des échantillons prélevés (CEps en dS.m-1).

### **2.2. Conductivité électrique de l'extrait dilué (CEd : 1/5)**

Les valeurs moyennes de la CEd passent de 0.57 dS.m-1 dans l'horizon de surface et augmentent progressivement vers la profondeur pour atteindre une valeur de 1.40 dS.m-1 (**tableau 23**).

La valeur du coefficient de variation de la CEd : 1/5 est supérieure à 35 %, pour l'horizon (0-25cm). Elle exprime une forte variabilité de la salinité dans cette couche. Les horizons (25-50cm et 50-75cm) enregistrent des coefficients de variation modérés, de l'ordre de 26,67% et 30,72%. La valeur moyenne de la CEd1/5 du profil est de 1 dS.m-1.

**Tableau 23.** Résultats statistiques de la CEd<sub>1/5</sub> en dS.m<sup>-1</sup>

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Moyenne	0,57	1,04	1,40
C .V. %	52,98	26,67	30,72

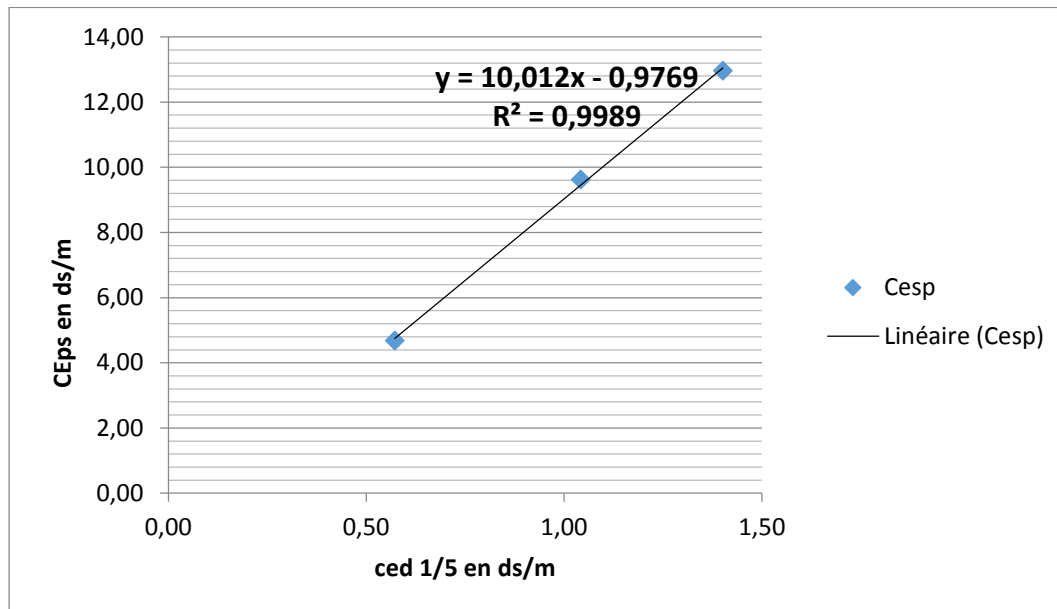
L'analyse corrélative entre les valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CEps) et celles de l'extrait dilué (Ced : 1/5), montre une bonne corrélation ( $r^2 > 0.9$ ) qui est statistiquement hautement significative (**Figure 27**).

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

$$CEps \text{ (dS.m-1)} = 10.012 * CE_{d1/5} - 0.9769 \text{ (} r^2=0.99 \text{) Avec :}$$

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

CE<sub>d1/5</sub> : conductivité électrique de l'extrait dilué 1/5 en dS.m-1 à 25°C.



**Figure 27.** Corrélation entre CE<sub>d</sub> (1/5) et CEps.

### 2.3. Distribution de la salinité dans les différents horizons (figure 28)

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

La valeur minimale de la CEps de l'horizon de surface (0-25cm) est de l'ordre de 1.26 dS.m-1. Par contre la valeur maximale est de l'ordre de 9.11 dS.m-1.

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

Pour l'horizon de sub-surface (25-50cm), la valeur minimale de la CEps est 3.09 dS.m-1. Par contre la valeur maximale est de l'ordre de 15.1 dS.m-1

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

Pour l'horizon (50-75cm), la valeur minimale de la CEps est 9.55 dS.m-1. Par contre la valeur maximale est de l'ordre de 15.9 dS.m-1

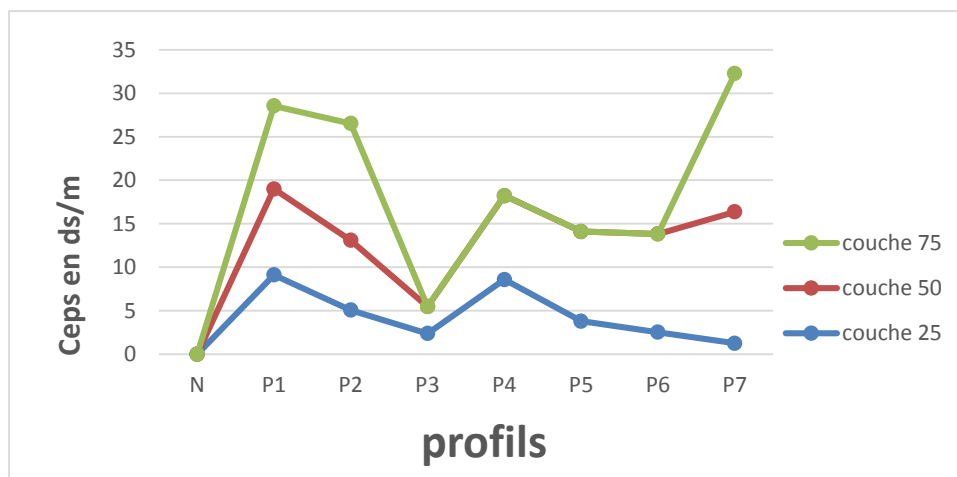


Figure 28. Distribution de la CEps dans les horizons

**2.4. Distribution verticale de la salinité**

**Profils de types descendants**

- ✓ La **figure 29** montre une variabilité verticale (intra-profil) et spatiale (inter-profils) de la salinité du sol. En effet, nous distinguons deux types de profils salins présentant deux allures différentes :
- ✓ Les profils (2, 3, 4, 5, 6 et 7) sont de type descendant (lessivés) avec un maximum de salinité dans l'horizon (50-75 cm). Ce type de profil serait le résultat d'un lessivage des sels après les pluies d'automne (65 mm).
- ✓ Le profil 1 est de type moyen avec un maximum de salinité dans l'horizon médian (25-50cm). Ce type de profil serait le résultat d'une remontée capillaire des sels, pendant la période sèche.

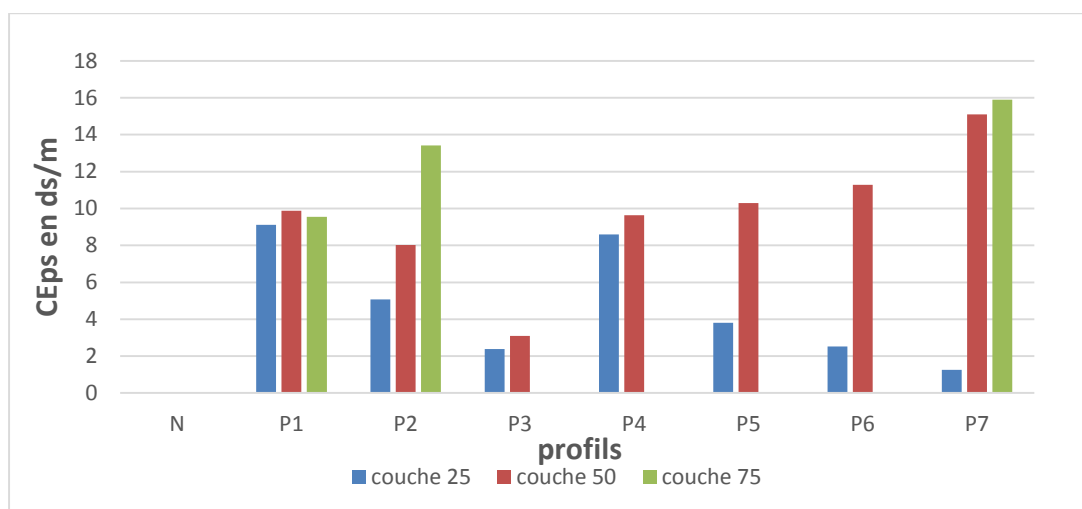


Figure 29. Evolution de la CEps (ds/m) par profils

**3. Etude de la salinité par induction électromagnétique (EM38)**

Les mesures obtenues par induction électromagnétique 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 calculée (CEpsc) de la parcelle d'étude.

**3.1. 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 (**Tableau 24**) :

- Lorsque 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 CEMH et celles de 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 (**Tableau 25**).

**Tableau 24.** Distinction des différents profils salins

Type de profil	CEM <sub>(H)</sub> / CEM <sub>(V)</sub>	Auteurs
Profil inversé	CEM <sub>H</sub> / CEM <sub>V</sub> > 1.05	Corwin et Rhoades (1989 & 1990)
Profil lessivé	CEM <sub>H</sub> / CEM <sub>V</sub> ≤ 1.05	
Profil inversé	CEM <sub>H</sub> / CEM <sub>V</sub> > 1.05	Norman (1990b, Heath et al. 1999)
Profil uniforme	1 ≤ CEM <sub>H</sub> / CEM <sub>V</sub> ≤ 1.05	
Profil lessivé	CEM <sub>H</sub> / CEM <sub>V</sub> ≤ 1	Heath et al. 0.5 ≤ CEM <sub>H</sub> /CEM <sub>V</sub> ≤ 1

**Tableau 25.** Types de profils de salinité obtenus

Type de profil	CEM <sub>(H)</sub> / CEM <sub>(V)</sub>	Auteurs
Profil lessivé	CEM <sub>H</sub> / CEM <sub>V</sub> = 0.76 (≤ 1.05)	Corwin et Rhoades (1989 & 1990) Heath et al. 0.5 ≤ CEM <sub>H</sub> /CEM <sub>V</sub> ≤ 1

### 3.2. Relation entre la CEM et les propriétés du sol

Les coefficients de corrélation entre les lectures verticales et horizontales de l'EM38 et les propriétés physiques et physico-chimiques du sol sont présentés dans les **tableaux 26, 27,28 et 29**.

La corrélation entre la CEM<sub>V</sub> et la CEM<sub>H</sub> est très élevée (coefficient de corrélation  $r > 0.90$ ). Les résultats ont montré une corrélation positive de la CEM avec les propriétés du sol, à l'exception de la teneur en argile, limon, sable et le calcaire.

La corrélation la plus importantes a été trouvée entre la CEM et la CE<sub>ps</sub> ( $0.91 < r < 1$ ), suivie par Humidité ( $0.6 < r < 0.7$ ). De nombreuses études ont montré qu'une forte relation existe entre la teneur en eau du sol et la teneur en argile et la CEM ((**Draps et Hendrickx, 1995 ; Nehmdahl et Greve, 2001 in Gacem ,2014**) (**Bronson et al, 2005**).

Pour la matière organique, la corrélation avec la CEM est significative ( $-0.52 < r < -0.698$ ). Dans leur étude (**Nolin et al, 2002**) ont aussi rapporté des corrélations significatives entre la CE, la texture du sol et la matière organique. Suivie par le Mg<sup>++</sup> soluble ( $0.6 < r < 0.7$ ). Cependant, on n'a pas trouvé de corrélation entre la CEM et certains paramètres comme montré dans **les tableaux 26 et 29**.

Ainsi, on peut constater que de nombreux chercheurs ont trouvé des corrélations utiles entre les lectures de l'EM38 et un certain nombre de propriétés agronomiques importantes du sol. Cependant, en raison de l'interaction de divers facteurs, toute corrélation trouvée est spécifique au site étudié (**Kati, 2005 in Noomene , 2011**).

**Tableau 26.** Relation entre la CEM et les propriétés physique et physicochimique du sol

Variables	CEMH	CEMV
<b>CEMH mS.m-1</b>	1	
<b>CEMV mS.m-1</b>	0,589	1
<b>Ceps dS.m-1</b>	<b>0,999</b>	0,59
<b>pH</b>	-0,065	0,53
<b>Humidité %</b>	<b>-0,710</b>	-0,01
<b>CaCO3 T %</b>	0,587	0,07
<b>CaCO3 A %</b>	0,302	0,12
<b>MO %</b>	<b>-0,698</b>	0,06

En gras, valeurs significatives au seuil alpha=0,1 et seuil alpha= 0.02 (test bilatéral).

Tableau 27. Relation entre la CEM et la texture du sol

Variables	CEMH	CEMV
A %	-0,56	-0,61
LG %	0,42	0,61
LF %	-0,03	-0,31
SG %	-0,56	-0,22
SF %	0,24	0,34

Tableau 28. Relation entre la CEM et les bases échangeables du sol

Variables	CEMH	CEMV
CEC	-0,44	-0,23
Na+	0,25	0,40
K+	-0,38	-0,012
Ca++	0,17	0,08
Mg++	-0,13	0,12

Tableau 29. Relation entre la CEM et les cations et anions de la solution du sol

Variables	CEMH	CEMV
Na+ (soluble)	0,56	0,58
k+ (soluble)	0,52	0,53
Ca++ (soluble)	0,61	0,09
Mg++ (soluble)	<b>0,67</b>	0,45
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	0,40	0,06
cl-	0,62	0,56
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,22	0,57
Na+ (soluble)	0,56	0,58

En gras, valeurs significatives au seuil  $\alpha=0,1$  (test bilatéral).

### 3.3. Analyse statistique des valeurs mesurées et calculées de la $CE_{ps}$

Les **tableaux 30** et **31** montrent la comparaison entre les paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la  $CE_{ps}$ , des différents horizons.

#### 1) Analyse statistique des valeurs de la $CE_{ps}$ de l'horizon de surface (0-25cm)

Les résultats montrent que les moyennes de la  $CE_{ps}$  mesurée et celles calculées sont identiques 9%, avec une différence de 22% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 0.1%, et la différence entre la valeur minimale est de 3%.

**2) Analyse statistique des valeurs de la  $CE_{ps}$  de l'horizon de sub-surface (25-50cm)**

Les résultats montrent des différences de 10% dans la moyenne et 3.4 % dans l'écart type sont observées. La différence entre la valeur maximale est de 0.1%, et la différence entre la valeur minimale est de 61%.

**3) Analyse statistique des valeurs de la  $CE_{ps}$  de l'horizon (50-75cm)**

Les résultats montrent que les moyennes de la  $CE_{ps}$  mesurée et celles calculées sont identiques 0.7% et une différence de 29.06 % entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 0.1 % et la différence entre la valeur minimale est de 0.5%.

**Tableau 30.** Valeurs des conductivités électriques ( $CE_{ps}$ ), mesurées et calculées

N°	$CE_{ps}$ ( $dS.m^{-1}$ ) calculée par les équations de régressions	$CE_{ps}$ ( $dS.m^{-1}$ ) mesurée au laboratoire
1	9,7	9,5
2	6,9	8,8
3	6,6	2,7
4	8,6	9,1
5	6,7	7,1
6	7,1	6,9
7	8,3	10,8

**Tableau 31.** Paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la  $CE_{ps}$

Profondeur (cm)	Corrélation		$CE_{ps}$ ( $dS.m^{-1}$ ) calculée par les équations de régressions				$CE_{ps}$ ( $dS.m^{-1}$ ) mesurée au laboratoire			
	n	r	Ecart type	Moy	Min	Max	Ecart type	Moy	Min	Max
0-25cm	7	0.75	3.2	5.1	1.3	9.1	2.49	4.68	1.26	9.11
25-50cm	7	0.75	2.4	10.7	8	15.1	2.32	9.62	3.09	15.1
50-75cm	7	0.75	3.2	13	9.6	15.9	2.27	12.9	9.55	15.9

#### 4. 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'étude des variogrammes peut également fournir des renseignements sur la variabilité spatiale de la mesure, susceptibles d'orienter les modes d'échantillonnage futurs. 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).

##### 4.1. Variographie

Le but principal de cette analyse est la recherche pour chaque horizon d'un modèle structural théorique du variogramme utilisable lors des procédures d'interpolation par krigeage.

##### **Analyse variographique des résultats**

###### **Structure du semi-variogramme de la couche (0-75cm)**

Le semi-variogramme de la **figure 30** s'ajuste mieux à un modèle Rational exponentiel avec un rapport d'anisotropie égal à 1 selon la direction  $174^\circ$  (**Tableau 32**). Ce résultat signifie que la CEpsc évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépité est de  $2.28 \text{ dS.m}^{-1}$  indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier ( $1.58 \text{ dS.m}^{-1}$ ) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de  $36.27 \text{ m}$ , selon la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEpsc deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

**Tableau 32.** Paramètres du modèle de variogramme de la couche (0-75 cm)

Profondeur du sol (cm)	Modèle	Pépité ( $\text{dS/m}^2$ )	Pallier ( $\text{dS/m}^2$ )	Portée (m)	Anisotropie	Direction
0-75cm	Exponentiel	2.28	9.28	94.64	1.61	273.7

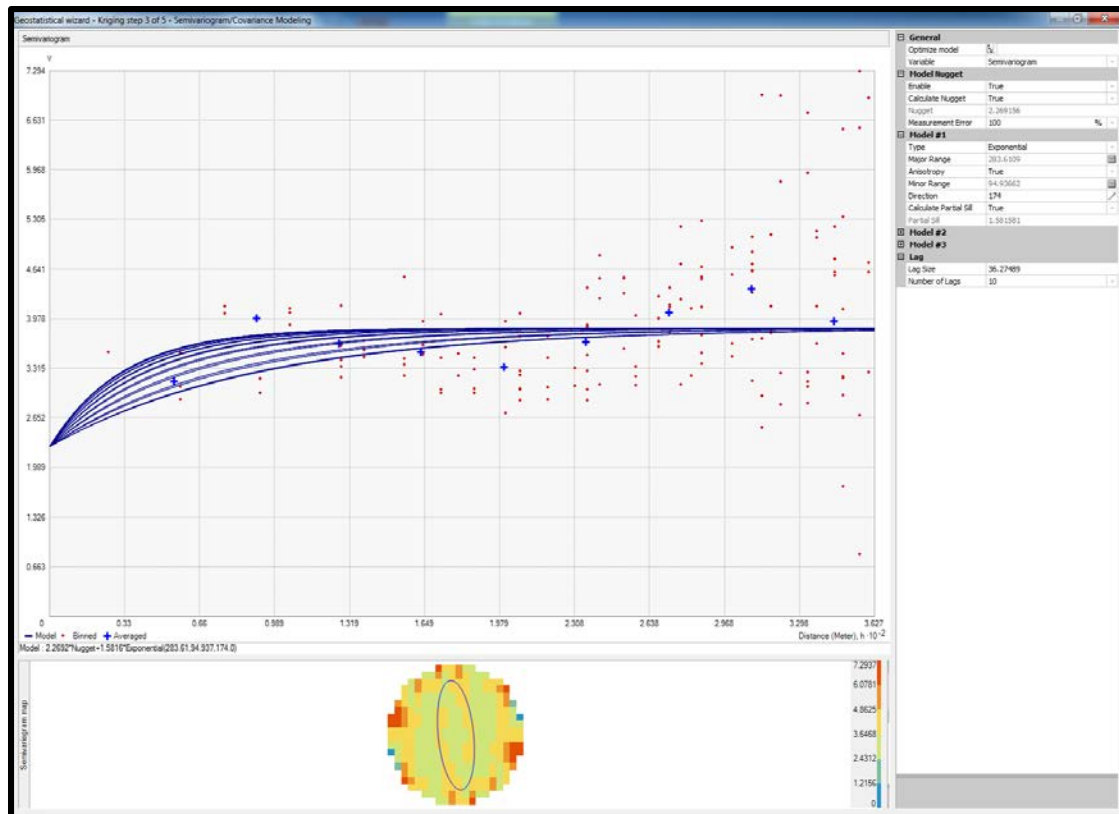


Figure 30. Modèle du variogramme de la couche (0-75cm).

#### 4.2. Cartographie par krigeage ordinaire des conductivités électriques calculées

Parmi les différentes techniques de krigeage, la méthode du Krigeage ordinaire (KO) a été utilisée dans la présente étude, en raison de sa simplicité et de la précision de la prédiction par rapport aux autres méthodes de krigeage (Isaaks., Srivastava., 1989).

Dans cette étude, le modèle du semi-variogramme a été testé pour la couche (0-75cm) et les performances de prédiction de la salinité sont représentées dans le **tableau 33**.

Pour qu'un modèle fournisse des prédictions précises, il faut que :

- La moyenne standardisée (**EM**) doit être proche de 0 ;
- La racine carrée de la moyenne de l'erreur standard (**RMS**) et l'erreur standard de la moyenne (**ASE**) doivent être aussi faibles que possibles ;
- La racine carrée de l'écart quadratique moyen (**RMSE**) doit être proche de 1 (Johnston and al, 2001).

Dans le **tableau 33**, les résultats montrent que la valeur de EM est de -0.03, la valeur de RMS et de l'ASE sont respectivement de 1.92 et 1.90. Les valeurs de la RMSE est de 1.01.

**Tableau 33.** Paramètres du modèle de variogramme.

Profondeur du sol (cm)	Modèle	Erreurs de prédiction			
		Root Mean Square (RMS)(dS.m <sup>-1</sup> )	Average Standard Error (ASE) (dS.m <sup>-1</sup> )	Erreur moyenne (EM) (dS.m <sup>-1</sup> )	RMSE (dS.m <sup>-1</sup> )
0-75cm	Exponentiel	1.92	1.90	-0.03	1.01

### 5. Distribution spatiale de la salinité

La carte krigée, issue de l'analyse géostatistique des conductivités électriques estimées aux 64 emplacements de mesures de la conductivité électromagnétique, sont présentées dans la **figure 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 10, avec lequel la carte de salinité a été générée. Le **tableau 34** 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 très important, depuis des sols salés jusqu'à des sols considérés comme très salés.

#### ➤ **Distribution de la salinité dans la couche (0-75cm)**

La **figure 32** montre la répartition de deux classes de la salinité au niveau de la parcelle. Aussi, les plus fortes concentrations de la salinité sont situées dans la partie sud et nord-est (sols très salins), tandis que le reste de la parcelle est caractérisé par des concentrations plus faibles (sols salins). Les sols non salés sont inexistantes.

- **Les sols salins** ( $4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent une superficie de 10.18 ha, soit 68 % et sont situés dans la partie centrale et le nord-ouest de la parcelle ;
- **Les sols très salins** ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent environ 4.82 ha, soit 32 %. Ils sont concentrés au sud et au nord-est de la parcelle.

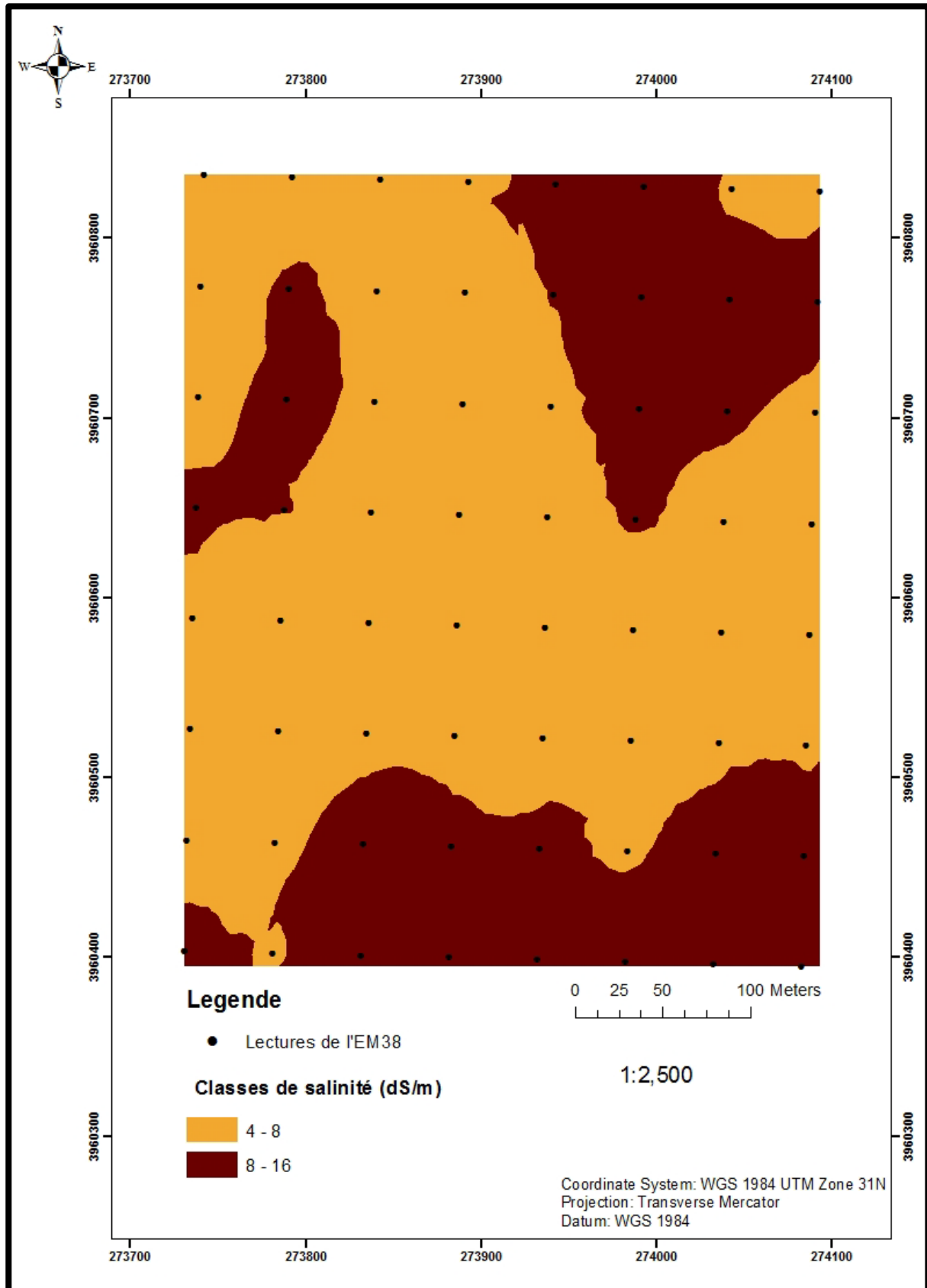


Figure 31. Carte de salinité de la parcelle d'étude (couche 0-75cm).

Tableau 34. Superficie des classes de salinité en hectares (Ha)

Profondeur en cm	Superficies en ha	
	Salins (4 < Ceps < 8 dS/m)	Très Salins (8 < Ceps < 16 dS/m)
0-75cm	10,18	4,82

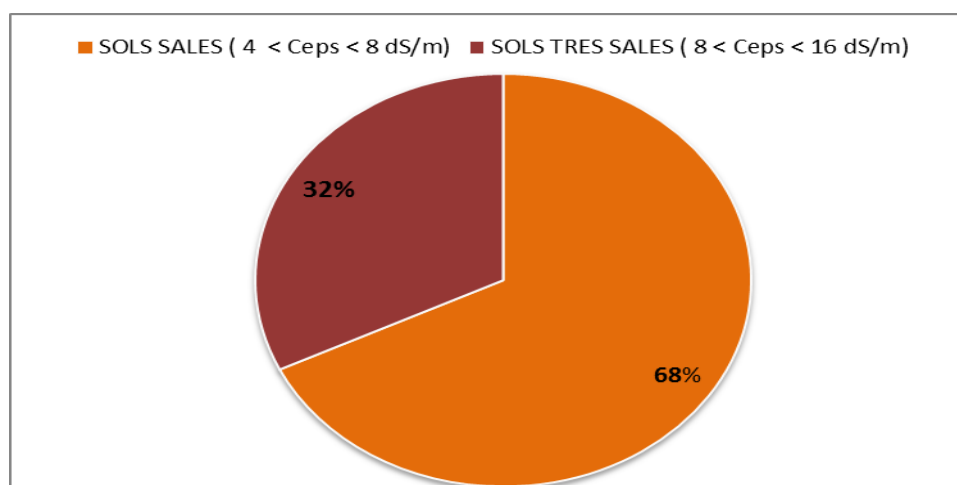


Figure 32. Superficie des classes de salinité

### 6. Composition du complexe adsorbant

Les résultats statistiques du complexe adsorbant sont présentés dans le **tableau 35**

#### ➤ La capacité d'échange cationique (CEC)

Les valeurs de la capacité d'échange cationique sont comprises entre 15 et 24.38 meq/100g de terre. La moyenne de la CEC est de 19.11 (meq/100g) et le coefficient de variation est faible (12.26%).

#### ➤ Les bases échangeables

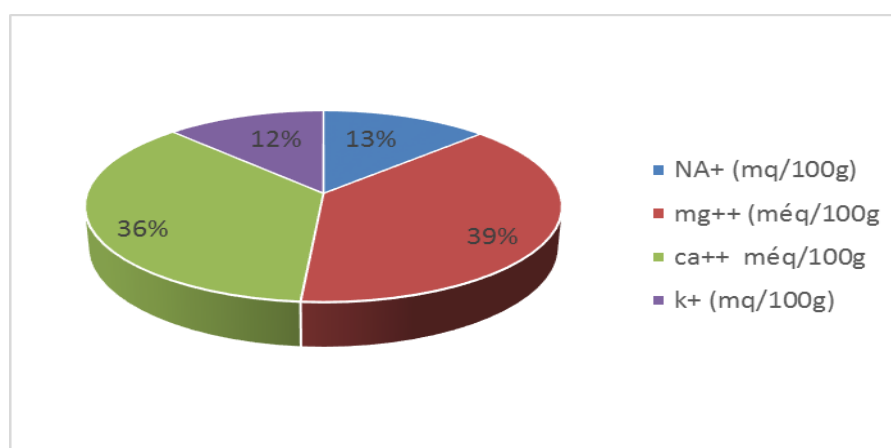
La garniture cationique du complexe adsorbant (**Tableau 35 ; Figure 33.**) révèle que le magnésium échangeable constitue l'essentiel du complexe adsorbant avec un taux moyen de 39 % de la CEC, ensuite vient le calcium (36%), le sodium (13%), et le potassium (12%).

La moyenne du calcium échangeable dans la parcelle est de 6,41meq/100g et le coefficient de variation est faible (12,28%). Le magnésium présente des teneurs appréciables de la capacité d'échange cationique (39%) avec une moyenne de 6,78 meq/100g et un coefficient de variation faible de 2,75 %, alors que les teneurs du potassium sont (12 %) pour une moyenne de 2,17 meq/100g et un coefficient de variation modéré de 25,87%.

Pour le sodium, il présente des teneurs de 13 % avec une moyenne de 1,48 meq/100g, avec un coefficient de variation modéré de 17,85%.

**Tableau 35.** Paramètres statistiques du complexe adsorbant

Paramètres	Complexe Absorbant (meq/100g)				CEC (meq/100g)
	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup>	Ca <sup>++</sup>	
<b>Min</b>	1,61	2,27	6,54	4,63	<b>15</b>
<b>Max</b>	2,96	2,66	7,01	6,77	<b>24,38</b>
<b>Moy</b>	2,17	1,48	6,78	6,41	<b>19,11</b>
<b>CV %</b>	25,87	17,85	2,75	12,28	<b>12,26</b>



**Figure 33.** Composition cationique moyenne du complexe adsorbant.

#### ➤ Composition de la solution du sol

Les résultats analytiques et statistiques des différents paramètres de la solution du sol sont indiqués dans le **tableau 36**.

#### - Le SAR

La sodicité (SAR) décrit la quantité de sodium en excès par rapport aux cations calcium et magnésium. Les valeurs du SAR varient de 10,45 meq/l pour les horizons de surface à 20,79 meq/l pour les horizons de profondeur (**tableau 36**). Le risque d'alcanisation est élevé en profondeur (SAR > **18**). Ceci est dû, probablement, aux valeurs de la CE, qui sont aussi élevées en profondeur suite au lessivage des sels après les pluies d'automne.

#### - Pourcentage de sodium échangeable (ESP)

Les valeurs de l'ESP (**tableau 36**) au niveau de la parcelle varient de 12,39 à 22,70 avec une moyenne de 17,41% et un coefficient de variation modéré (17,46 %). D'après l'USSS(1954), un sol est dit sodique lorsque son ESP est supérieure à 15%.

Cette valeur est souvent critiquée par les chercheurs qui montrent que la structure du sol se dégrade pour des valeurs de 5-6 % (Sumner 1993 ; Shainberg et Singer , 1990 ) in Gacem ,2014).

**- Les cations de la solution du sol**

La **figure 34** montre que le cation Na<sup>+</sup> est le plus représenté avec un taux moyen de 61% et une concentration qui varie entre 32,44 meq/l et 110,86 meq/l. Le Mg<sup>++</sup> vient en deuxième position avec un taux de 20 % avec des teneurs qui varient entre 5,56 meq/l et 55,29 meq/l. Le Ca<sup>++</sup> se situe en troisième position avec un taux de 18% et des concentrations qui varient entre 11,98 meq/l et 35,58 meq/l, alors que le K<sup>+</sup> vient en dernière position avec un taux de 1%, et des teneurs qui varient entre 1,01meq/l et 2,38 meq/l.

De ce fait, le classement des cations est de type : **Na<sup>+</sup> > Mg<sup>++</sup> > Ca<sup>++</sup> > K<sup>+</sup>**

**- Les anions de la solution du sol**

Selon la **figure 35** l'anion Cl<sup>-</sup> est le plus représenté avec un taux moyen de 49% et une concentration qui varie entre 23,0 meq/l et 81,3 meq/l. Le SO<sub>4</sub><sup>--</sup> vient en deuxième position avec un taux de 39 % et des teneurs qui varient entre 23,03 meq/l et 65,48 meq/l. Le HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> vient en dernière position avec un taux de 12 % et des teneurs qui varient entre 9,9 meq/l et 29,7meq/l.

**Tableau 36.** Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol

Paramètres	pH	CEps dS.m <sup>-1</sup>	Cations (meq.l <sup>-1</sup> )				Anions (meq.l <sup>-1</sup> )			SAR	ESP
			Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>		
<b>Min</b>	8,02	2,74	32,44	11,98	5,56	1,01	23,0	9,9	23,03	<b>10,45</b>	<b>12,39</b>
<b>Max</b>	8,22	10,75	110,86	35,58	55,29	2,38	81,3	29,7	65,48	<b>20,79</b>	<b>22,72</b>
<b>Moy</b>	8,13	7,85	82,74	25,20	26,97	1,49	63,0	15,3	50,54	<b>15,37</b>	<b>17,41</b>
<b>CV%</b>	0,88	24,90	30,52	29,85	64,55	35,07	32,02	45,03	28,12	<b>19,76</b>	<b>17,46</b>

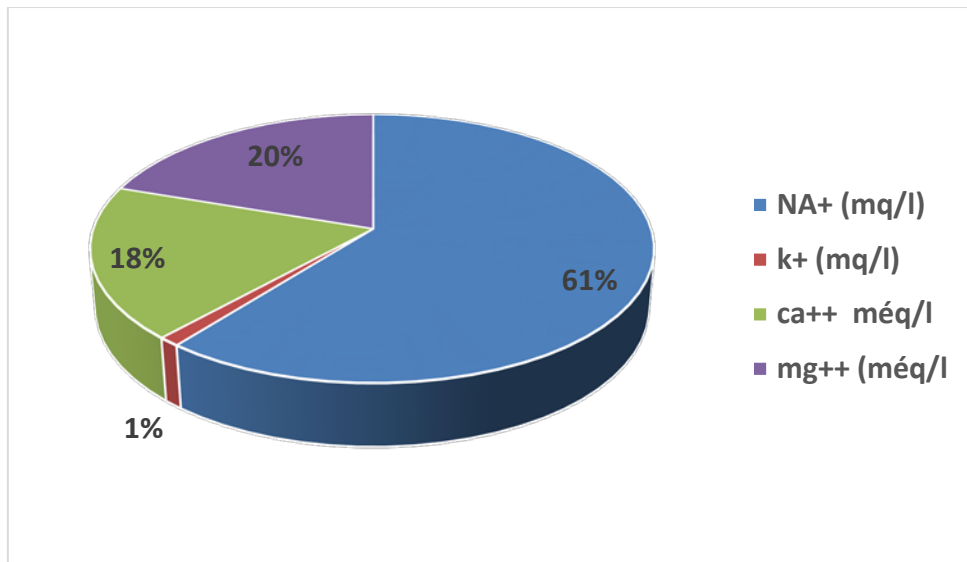


Figure 34. Répartition moyenne des cations dans la solution du sol

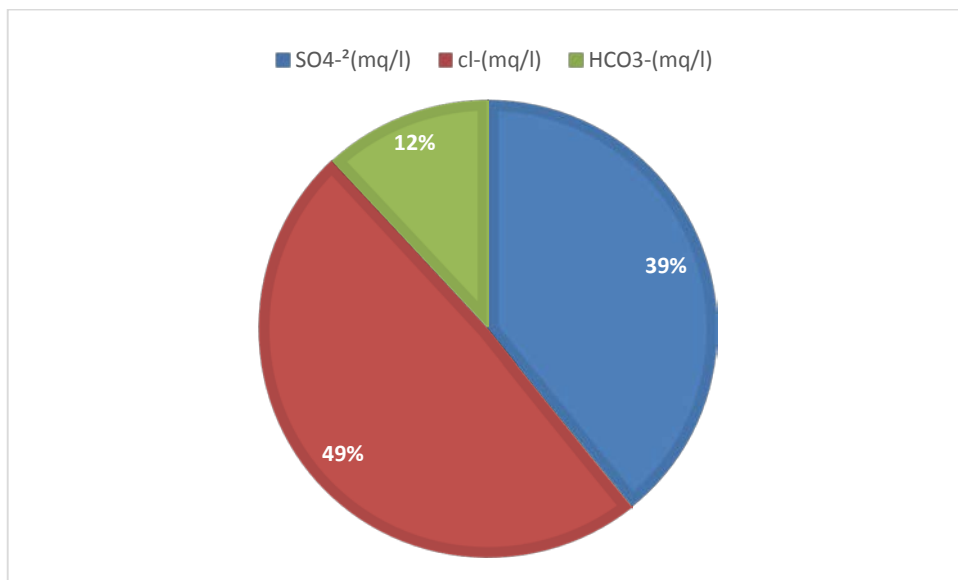


Figure 35. Répartition moyenne des anions dans la solution du sol

### Discussion générale

Les résultats d'analyses de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée ( $CE_{ps}$ ) montrent que les sols de la parcelle d'étude présentent deux niveaux de salinité :

- **Les sols salins** ( $4 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$ ) qui occupent une superficie de 10.18 ha, soit 68 % et sont situés dans la partie centrale et le nord-ouest de la parcelle ;
- **Les sols très salins** ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupant environ 4.82 ha, soit 32 %. Ils sont concentrés au sud et au nord-est de la parcelle.

Concernant la répartition verticale de la salinité, nous distinguons deux types de profils salins : les profils salins de type moyen, sont concentrés dans le sud-ouest, et les profils salins descendants (lessivés) dans le reste 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**).

L'analyse de la corrélation entre la CEM et les propriétés du sol est positive entre la CEM et la  $CE_{ps}$  ( $0.91 < r < 1$ ), suivie par l'Humidité ( $0.6 < r < 0.7$ ).

Dans cette étude, nous avons aussi trouvé une relation positive entre la CEM et la teneur en matière organique ( $-0.52 < r < -0.698$ ). Cependant, on n'a pas trouvé de corrélation entre la CEM et les autres paramètres analysés dans ce travail.

En fonction des teneurs en sels solubles et en sodium échangeable des divers horizons des profils étudiés au niveau de la parcelle, nous avons trouvé un SAR important en profondeur (**SAR** > 18 meq/l) et un pourcentage de sodium échangeable fort (ESP > 15%). Avec ces valeurs, le risque d'alcanisation est élevé d'après l'USSS (1954).

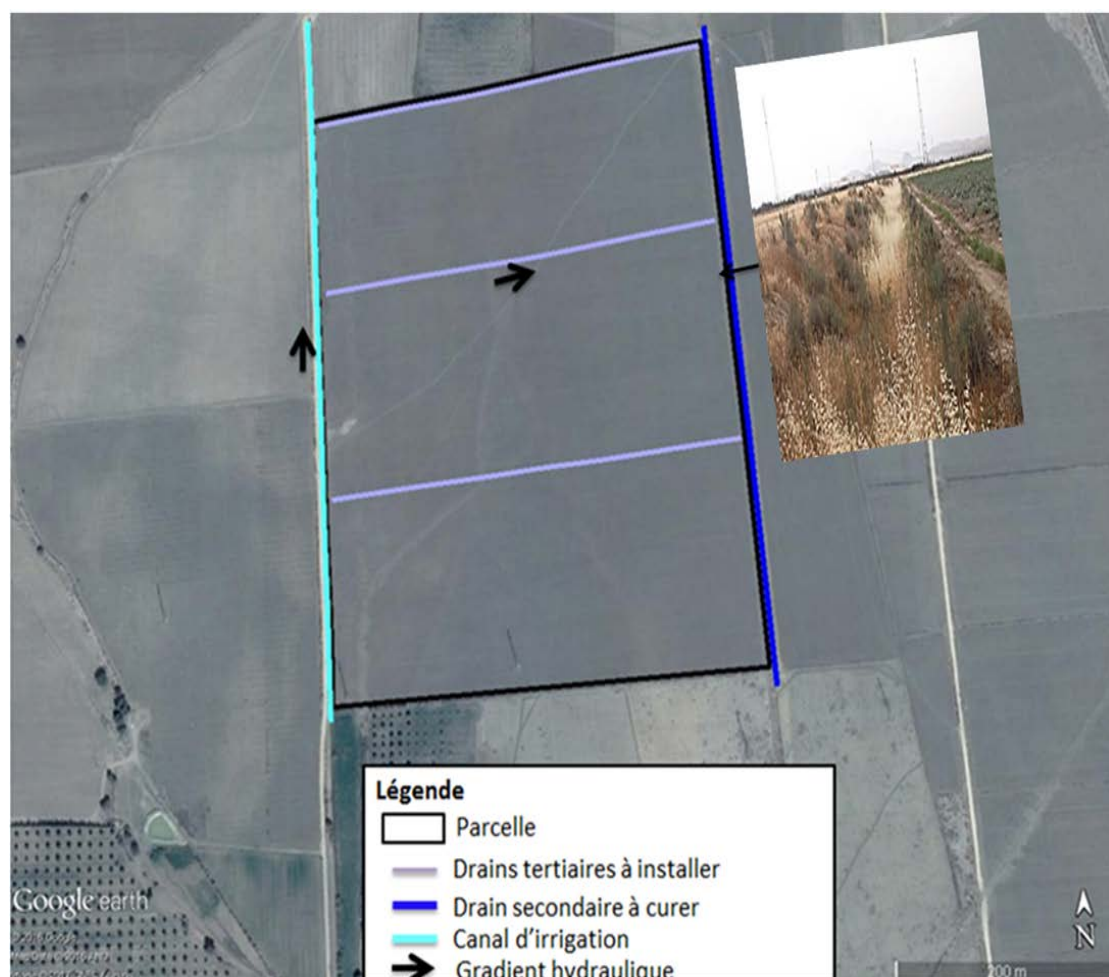
Le cation  $Na^+$  et l'anion  $Cl^-$  sont les plus présents dans la solution du sol avec respectivement des taux moyens de 61% et de 49 %.

A la lumière des éléments d'appréciations donnés ci-dessus et selon la tolérance des cultures à la salinité (**annexe 7**), il paraît que les cultures d'olivier et grenadier sont les mieux adaptées à la partie salée de la parcelle (4 - 8d S/m) et les cultures d'orge et

d'artichaut pour la zone très salé (8 – 16 d S/m). Il peut être avancé que l'engagement des travaux d'aménagement et de mise en valeur de cette parcelle ne sont envisageables que si la ressource en eau est disponible le tout nécessitant, bien entendu, d'importants investissements planifiés à moyen et long termes.

Ainsi, dans un premier temps, nous proposons un schéma d'aménagement hydro agricole (**figure 36**) pour le lessivage des sels de la zone racinaire et un suivi permanent de l'évolution de la salinité du sol pour une éventuelle densification du réseau tertiaire.

Il est à signaler que l'alimentation en eau potable de la wilaya de Relizane sera assuré par les eaux de dessalement de la mer dans les prochaines semaines et l'eau du barrage de Sidi M'hamed sera destiné exclusivement à l'irrigation du périmètre irrigué de la Mina d'une superficie équipée de 17 000 hectares.



**Figure 36** : Carte d'aménagement hydro-agricole de la parcelle.

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Au terme de cette étude, il paraît que l'utilisation des terres salines et des eaux de faible qualité pour la production agricole est possible, au prix d'une réduction de la productivité de l'exploitation. Ainsi, la mise en culture des terres inexploitées contribue à préserver certaines zones favorables d'une dégradation avancée et irréversible.

L'utilisation conjointe de mesures ponctuelles de la conductivité électrique des sols et d'un plus grand nombre de mesures électromagnétiques, nous a permis de décrire la variabilité spatiale de la salinité et de délimiter de manière très rapide des unités de sols salés et qui permet par la suite de suivre l'évolution des sels dans le temps au niveau de la parcelle. On a aussi pu déterminer l'allure du profil salin.

L'analyse de la répartition spatiale de la conductivité électrique a mis en évidence une dynamique spatiale de la salinité, en relation avec le climat (semi-aride), l'activité anthropique, le mauvais drainage et la topographie (pente faible).

Aussi, l'étude a montré que les sols de cette parcelle présentent un pH supérieur à 8, avec un pourcentage de sodium échangeable élevé (ESP >15%) et un SAR important (> 18).

Avec ces valeurs, le risque d'alcanisation est élevé d'après l'USSL (1954).

Le cation Na<sup>+</sup> et l'anion Cl<sup>-</sup> sont les plus présents dans la solution du sol avec respectivement des taux moyens de 61% et de 49 %.

A travers cette étude, il s'avère que le problème de la salinité se pose sous deux aspects pour l'agriculture de la plaine de la Mina, **une contrainte**, parce que les accumulations des sels sont importantes et que la salinité a atteint un niveau alarmant, pour affecter les rendements agricoles ; et un **risque potentiel** parce que le taux de sodium élevé, dans les sols, pourrait affecter les propriétés physiques du sol à long terme.

Les résultats de ce travail contribueront, certainement à une meilleure connaissance des conséquences de la salinité sur l'agriculture et l'environnement pour une utilisation durable des ressources naturelles dans la région d'étude. Pour que cette utilisation soit durable, il paraît important de renforcer le rôle du drainage et du contrôle de la salinité dans les périmètres irrigués et de promouvoir le développement de l'expertise pour ces questions. Ce besoin d'expertise s'explique par la nécessité de développer et d'évaluer des méthodes adaptées au contexte agro climatique local.

## Conclusion générale

---

Il faut en particulier revoir la vision statique de la salinité en développant une nouvelle approche qui doit percevoir d'abord ce phénomène comme un risque devant être géré par les agriculteurs même au prix d'une réduction de la productivité des périmètres.

Sur les moyens à mettre en œuvre pour ce renforcement, il convient de promouvoir un fonctionnement en réseau et de mettre en place une animation sous forme de séminaire, de formations continues et d'échanges de documentation.

Il faut aussi structurer un programme d'acquisition de références apte à proposer les solutions idéales attendues pour « lutter » contre ce type de fléau qui il faut le rappeler est souvent le résultat d'une mauvaise gestion d'un espace et des ressources naturelles dont l'eau et le sol.

## Références bibliographiques

---

### Références bibliographiques

**Abrol. I.P. et AL., (1988)**, Salt-affected soils and their management. FAO Soils. Bulletin 39, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

**ANRH., 2003.** Suivi et modélisation 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'I.N.A. Alger, N° 6, pp. 185-195.

**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.

**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.

**Bolt H.M. et AL., (1978)**, International Archive on Occupational Environmental Health, 60 (3), 141-4.

**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.

**Brady. N.C et Weil R.R., (2002).** *The nature and properties of soils*. 13th edn. Prentice Hall, Upper saddle river, NJ, USA.

**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.

**Chamekh Zoubeir., 2010.** Institut national agronomique de Tunisie - Master en agronomie et biotechnologie végétale. Mémoire Online : Analyse de la réponse de quelques géotypes de blé dur à la contrainte saline dans trois Gouvernorats du centre de la Tunisie.

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

**Chinnusamy V., Schumaker K. and Zhu J. K ., 2004.** Molecular genetics perspectives on cross-talk and specificity in abiotic stress signalling in plants. J of Experimental Botany. 55: 225-236.

## Références bibliographiques

---

- Churchman G.J., Skjemstad J.O. et Oades J.M., (1993).** Influence of clay minerals and different water regimes. *Tree physiology* 24: 65-73.
- 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., 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.
- Djili K., 2000.** Contribution à la connaissance des sols du Nord de l'Algérie : Création d'une banque de données informatises 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-aride climat. 2-3 octobre. El-Oued, 9 p.
- Durand J.H., 1983.** Les sols irrigables, Agence de coopération culturelle et technique. P.U. France, 190 p.
- Essington.M.E., (2004),** *Soil and water chemistry, an integrative approach.* CRC Press, USA
- FAO., 1988.** Bulletin d'irrigation et drainage n° 29 Rév.1. La qualité de l'eau en agriculture.
- 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.
- François. R., (2008).** Dictionnaire encyclopédique des sciences de la nature et de la biodiversité, Edition DUNOD, Paris, 1152 pages.
- Gacem. F, 2014.** Etude spatiale et temporelle de la salinité dans les sols de la plaine de Mina (Relizane). Mémoire de magister. Université de Mostaganem.
- Gaucher. G., Burdin., 1974.** Géologie et géomorphologie et hydrologie des terrains salés. Ed Presses universitaires de France, Paris. 230 p.

## Références bibliographiques

---

- Gaucher.G., 1947.** Méthodes actuelles d'étude des terrains salés en Afrique du Nord. Conférence de pédologie Méditerranéenne, Bull. AFES, Paris.
- 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.
- Gupta. I. C., 2000.** Assessment of quality of irrigation waters and industrial effluents discharged on land for irrigation. Industrial waste waters and environmental pollution .I.C.
- Gupta. D.C; Joshiand. D; Kumar .Jodhpur. India Scientific Publishers (India): 131-151.**
- 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 genèse 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.
- Ihou. A., 1995.** Evolution des sols irrigués de la moyenne vallée du Fleuve du 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.
- Isaaks. E.H., Srivastava R.M., 1989.** An Introduction to Applied Geostatistics, New York: Oxford Univ. Press.
- 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.
- 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.
- Keren. R. (2000).** Salinity In: Sumner M.E. (Ed). Handbook of Soil Science. CRC Press, NY,USA, pp G3-G25.
- 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.

## Références bibliographiques

---

- 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.
- Kradia. L., 2010.** Utilisation durable des terres salines et eaux saumâtres pour la production agricole. Projet de coopération technique avec L'AIEA.
- 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. Kluwer academ, pp: 403- 422.
- 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.
- Levy. G.J., (2000),** Sodcity. In: Sumner M.E. (Ed). *Handbook of Soil Science*. CRC Press, NY, USA, pp G27-G62.
- Levigneron. A., Félice. L., Gérard. V., Pierre B., Pierre. F and Francine. C.D., 1995.** Les plantes face au stress salin. *Cahiers Agricultures* 1995 ; 4: 263-73.
- Levitt. J. (1980),** *Response of plants to environmental stresses*. Volume II. Water, radiation, salt and other stresses. 2nd edn. Academic Press, London, UK.
- LTIFI. W., (2008).** Bilan d'eau et des sels dans les périmètres irriguées KALAAT L'ANDALOUS, laboratoire du centre de gestion du ressource en eau, (CGRE) de L'INAT, mémoire de master, 120p.
- MARLET. S., 2004.** Hommes, terre et eaux (130, sp): pp 32-38. Séminaire sur la modernisation de l'agriculture irriguée, 2004-04-19/2004-04-23, Rabat, Maroc.
- Mermoud. A., (2001).** Cours de physique du sol : Maitrise de la salinité du sol. Version provisoire : 14 p. Ecole Fédérale de Lausanne.
- Mermoud. A., 2006.** Maitrise de la salinité des sols. Cours de physique du sol. Ecole polytechnique de Lausanne. p.1-14.
- Mouhouche. B., 2000.** L'avenir de l'agriculture saharienne dépend de la maîtrise de la salinisation des sols et de la valorisation de l'eau d'irrigation. Actes du premier Symposium International sur la filière blé – Enjeux et Stratégie. (Blé 2000, Alger), (O.A.I.C.). ALGER 7 – 9 février 2000, pp. 213-220.

## Références bibliographiques

---

- Munns. R., Tester., 2008.** Sodium excluding genes from durum wheat and sea barleygrass improve sodium exclusion of bread wheat. 2nd International Salinity Forum Salinity, water and society-global issues, local action.
- Naidu. R et Rengasamy. P., (1993),** Ion interactions and constraints to plant nutrition in Australian sodic soils. Australian Journal of Soil Research 31: 801-819.
- 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.
- Noomene. H., 2011.** Faculté des lettres, des arts et des humanités Manouba - Master de recherche environnement, aménagement et risque. Mémoire Online. Etude de la salinité des sols par la méthode de détection électromagnétique dans le périmètre irrigué de Kalaat Landelous en Tunisie : cas d'une parcelle de courage.
- Norman. C.P., 1990 b.** 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.
- Rengasamy. P., (2002),** *Transient salinity and subsoil constraints to dry land farming in Australian sodic soils: an overview.* Aust. J. Exp. Agric. 42, 351-361.
- Rhoades. J.D., 1997.** Sustainability of irrigation: an overview of salinity problems and control strategies, Riverside, CA, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS.
- 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.
- Richards. L.A., 1954.** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agric. Handb. N° 60 vol 1. Us.
- 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.
- Slama. F., (2004).** La salinité et la production végétale. Centre de publication universitaire. Tunis : 151p.
- Sumner. M.E., (1993),** Sodic soils: New perspectives. Australian Journal of Soil Research 31: 683-750.

## Références bibliographiques

---

- 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.
- U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954.** Diagnostic and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A Handbook, n°60, 160 p.
- 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.
- Vauclin. M., 1982.** Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. *Colloque INRA*, n° 15, pp.9-43.
- Van Hoorn. J.W., (1994).** Salt movement leaching requirement. *Agric. Water Manag.* 4, 409-428.
- 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 1

#### 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 Inphase 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 (Zero 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 Zero** 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.

## Annexes

### 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:

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

$$\text{CEV}' = 2 * \text{CEH}',$$

$$\text{D'où : } (\text{CEV}'/\text{CEH}') = ((\text{CEV}+\text{C}) / (\text{CEH}+\text{C})) = 2$$

**Tableau 1.** Maillage recommandé pour la prospection de la salinité par l'EM38

Source : (JOB J. O., et al, 1990)

Parcelles cultivées (Ha)	Maillage
0 à 100 m <sup>2</sup>	1x1m minimum ou 2x2 mètres
100 à 10000 m <sup>2</sup>	5x5 ou 10x10
1 à 10 ha	10x10 ou 20x20
5 à 20 ha	25x25 ou 50x50
20 à 100 ha	100x100

## Annexes

### Annexe 2

Tableau 2. Les résultats statistiques de l'humidité du sol en (%)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Minimum	15,99	10,59	12,07
Maximum	21,99	13,62	17,05

Tableau 3. Les résultats statistiques de l'Argile (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Minimum	30,66	33,18	22,53
Maximum	49,34	49,85	40,96

Tableau 4. Les résultats statistiques Limons grossies (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Minimum	11,58	9,66	16,30
Maximum	25,92	35,51	36,91

Tableau 5. Les résultats statistiques des Limons fin (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Minimum	25,10	11,77	17,47
Maximum	33,99	36,41	38,28

Tableau 6. Les résultats statistiques de Sables grossie (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Minimum	0,84	0,76	0,41
Maximum	1,68	2,18	0,87

Tableau 7. Les résultats statistiques de Sables fin (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Minimum	4,02	3,19	4,04
Maximum	16,64	23,58	22,22

Tableau 8. Les résultats statistiques de la matière organique (%)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Minimum	0,95	0,84	0,63
Maximum	2,11	3,91	2,32

## Annexes

Tableau 9. Les résultats statistiques du pH

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Minimum	7,95	7,98	8,03
Maximum	8,38	8,25	8,23

Tableau 10. Les résultats statistiques du calcaire total ( $\text{CaCO}_3$  en %)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Minimum	17,41	17,83	18,26
Maximum	19,53	19,31	20,59

Tableau 11. Les résultats statistiques du calcaire actif ( $\text{CaCO}_3$  en %)

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Minimum	3,87	4,25	4,62
Maximum	6,00	6,25	6,25

Tableau 12. Les résultats statistiques de la CEps en dS/m

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Minimum	1,26	3,09	9,55
Maximum	9,11	15,10	15,90

Tableau 13. Les résultats statistiques de la  $\text{Ced}_{1/5}$  en dS/m

Paramètres	Profondeur (cm)		
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm
Minimum	0,17	0,31	0,76
Maximum	1,08	1,47	2,05

## Annexes

### Annexe 3

**Tableau 14.** Valeurs des conductivités électriques (CEps), calculées

<b>N</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>ECH</b>	<b>ECV</b>	<b>CEPSc</b>
<b>P1</b>	0,29,50	35,45,42	120	123	9,7235
<b>P2</b>	0,29,52	35,45,42	82	103	6,9267
<b>P3</b>	0,29,54	35,45,42	121	162	9,7971
<b>P4</b>	0,29,56	35,45,42	90	160	7,5155
<b>P5</b>	0,29,58	35,45,42	131	143	10,5331
<b>P6</b>	0,30,0	35,45,42	110	114	8,9875
<b>P7</b>	0,30,02	35,45,42	100	124	8,2515
<b>P8</b>	0,30,04	35,45,42	150	170	11,9315
<b>P9</b>	0,30,04	35,45,44	99	143	8,1779
<b>P10</b>	0,30,02	35,45,44	124	153	10,0179
<b>P11</b>	0,30,0	35,45,44	81	120	6,8531
<b>P12</b>	0,29,58	35,45,44	109	151	8,9139
<b>P13</b>	0,29,56	35,45,44	97	166	8,0307
<b>P14</b>	0,29,54	35,45,44	184	237	14,4339
<b>P15</b>	0,29,52	35,45,44	65	108	5,6755
<b>P16</b>	0,29,50	35,45,44	84	80	7,0739
<b>P17</b>	0,29,50	35,45,46	76	64	6,4851
<b>P18</b>	0,29,52	35,45,46	73	105	6,2643
<b>P19</b>	0,29,54	35,45,46	72	84	6,1907
<b>P20</b>	0,29,56	35,45,46	78	130	6,6323
<b>P21</b>	0,29,58	35,45,46	77	110	6,5587
<b>P22</b>	0,30,00	35,45,46	75	104	6,4115
<b>P23</b>	0,30,02	35,45,46	88	153	7,3683
<b>P24</b>	0,30,04	35,45,48	91	110	7,5891
<b>P25</b>	0,30,04	35,45,48	80	96	6,7795
<b>P26</b>	0,30,02	35,45,48	115	167	9,3555
<b>P27</b>	0,30,00	35,45,48	93	143	7,7363
<b>P28</b>	0,29,58	35,45,48	89	137	7,4419
<b>P29</b>	0,29,56	35,45,48	83	88	7,0003
<b>P30</b>	0,29,54	35,45,48	98	134	8,1043
<b>P31</b>	0,29,52	35,45,48	105	167	8,6195
<b>P32</b>	0,29,50	35,45,48	71	94	6,1171
<b>P33</b>	0,29,50	35,45,50	118	175	9,5763
<b>P34</b>	0,29,52	35,45,50	103	153	8,4723
<b>P35</b>	0,29,54	35,45,50	73	129	6,2643
<b>P36</b>	0,29,56	35,45,50	53	66	4,7923
<b>P37</b>	0,29,58	35,45,50	90	133	7,5155

## Annexes

<b>P38</b>	0,30,0	35,45,50	106	126	8,6931
<b>P39</b>	0,30,02	35,45,50	79	102	6,7059
<b>P40</b>	0,30,04	35,45,50	51	88	4,6451
<b>P41</b>	0,30,04	35,45,52	79	79	6,7059
<b>P42</b>	0,30,02	35,45,52	105	158	8,6195
<b>P43</b>	0,30,0	35,45,52	110	145	8,9875
<b>P44</b>	0,29,58	35,45,52	93	146	7,7363
<b>P45</b>	0,29,56	35,45,52	53	112	4,7923
<b>P46</b>	0,29,54	35,45,52	93	126	7,7363
<b>P47</b>	0,29,52	35,45,52	145	146	11,5635
<b>P48</b>	0,29,50	35,45,52	59	107	5,2339
<b>P49</b>	0,29,50	35,45,54	50	59	4,5715
<b>P50</b>	0,29,52	35,45,54	133	146	10,6803
<b>P51</b>	0,29,54	35,45,54	85	117	7,1475
<b>P52</b>	0,29,56	35,45,54	70	96	6,0435
<b>P53</b>	0,29,58	35,45,54	98	135	8,1043
<b>P54</b>	0,30,0	35,45,54	133	170	10,6803
<b>P55</b>	0,30,02	35,45,54	114	158	9,2819
<b>P56</b>	0,30,04	35,45,54	134	123	10,7539
<b>P57</b>	0,30,04	35,45,56	65	100	5,6755
<b>P58</b>	0,30,02	35,45,56	84	110	7,0739
<b>P59</b>	0,30,0	35,45,56	119	138	9,6499
<b>P60</b>	0,29,58	35,45,56	120	136	9,7235
<b>P61</b>	0,29,56	35,45,56	100	152	8,2515
<b>P62</b>	0,29,54	35,45,56	70	87	6,0435
<b>P63</b>	0,29,52	35,45,56	74	103	6,3379
<b>P64</b>	0,29,50	35,45,56	38	38	3,6883

## Annexes

### Annexe 4

**Tableau 15.** Les résultats statistiques des cations et ions de la solution ds la couche (0-25 cm)

HORIZON1 (0-25cm)									
N	Ca++	Mg++	Na+	K+	SAR	ESP	HCO3-	CL-	SO4--
P1	38,75	28,77	87,38	0,80	<b>15,04</b>	<b>17,30</b>	7,80	78,00	61,63
P2	23,52	17,93	50,23	1,79	<b>11,03</b>	<b>13,06</b>	14,20	50,00	41,94
P3	9,87	5,56	27,04	1,02	<b>9,74</b>	<b>11,58</b>	15,60	18,00	4,96
P4	25,91	32,96	108,58	2,65	<b>20,01</b>	<b>22,03</b>	42,80	73,00	53,07
P5	13,84	9,95	50,72	0,84	<b>14,70</b>	<b>16,96</b>	16,10	29,00	43,66
P6	10,23	6,04	29,30	0,83	<b>10,27</b>	<b>12,20</b>	18,90	24,00	5,99
P7	4,78	16,07	22,11	0,55	<b>6,85</b>	<b>8,12</b>	19,40	14,00	6,16
Min	<b>4,78</b>	<b>5,56</b>	<b>22,11</b>	<b>0,55</b>			<b>7,80</b>	<b>14,00</b>	<b>4,96</b>
Max	<b>38,75</b>	<b>32,96</b>	<b>108,58</b>	<b>2,65</b>			<b>42,80</b>	<b>78,00</b>	<b>61,63</b>
Moy	<b>18,13</b>	<b>16,75</b>	<b>53,62</b>	<b>1,21</b>			<b>19,26</b>	<b>40,86</b>	<b>31,06</b>
ET	<b>9,66</b>	<b>8,40</b>	<b>25,35</b>	<b>0,58</b>			<b>6,77</b>	<b>22,41</b>	<b>21,73</b>
CV%	<b>53,27</b>	<b>50,13</b>	<b>47,27</b>	<b>47,51</b>			<b>35,14</b>	<b>54,85</b>	<b>69,97</b>

**Tableau 16.** Les résultats statistiques des cations et ions de la solution ds la couche (25-50cm)

HORIZON2 (25-50cm)									
N	Ca++	Mg++	Na+	K+	SAR	ESP	HCO3-	CL-	SO4--
P1	35,94	41,11	83,89	2,51	<b>13,52</b>	<b>15,74</b>	16,00	74,00	63,34
P2	25,61	25,14	97,04	2,03	<b>19,26</b>	<b>21,35</b>	19,80	69,00	38,52
P3	14,09	8,91	37,83	1,01	<b>11,15</b>	<b>13,19</b>	21,20	28,00	41,09
P4	23,29	31,77	113,14	2,10	<b>21,56</b>	<b>23,40</b>	16,50	73,00	55,64
P5	40,37	46,05	110,73	1,55	<b>16,84</b>	<b>19,08</b>	4,50	75,00	87,31
P6	29,93	38,89	119,58	1,35	<b>20,39</b>	<b>22,37</b>	4,90	100,00	76,18
P7	39,00	66,83	133,54	1,35	<b>18,36</b>	<b>20,52</b>	5,40	112,00	91,59
Min	<b>14,09</b>	<b>8,91</b>	<b>37,83</b>	<b>1,01</b>			<b>4,50</b>	<b>28,00</b>	<b>38,52</b>
Max	<b>40,37</b>	<b>66,83</b>	<b>133,54</b>	<b>2,51</b>			<b>21,20</b>	<b>112,00</b>	<b>91,59</b>
Moy	<b>29,75</b>	<b>36,96</b>	<b>99,39</b>	<b>1,70</b>			<b>12,61</b>	<b>75,86</b>	<b>64,81</b>
ET	<b>7,50</b>	<b>12,87</b>	<b>22,69</b>	<b>0,44</b>			<b>6,58</b>	<b>17,22</b>	<b>17,33</b>
CV%	<b>25,21</b>	<b>34,83</b>	<b>22,83</b>	<b>25,98</b>			<b>52,19</b>	<b>22,71</b>	<b>26,74</b>

**Tableau 17.** Les résultats statistiques des cations et ions de la solution ds la couche (50-75cm)

HORIZON2 (50-75cm)									
N	Ca++	Mg++	Na+	K+	SAR	ESP	HCO3-	CL-	SO4--
P1	32,04	43,79	93,01	2,10	15,11	17,37	16,70	73,0	47,08
P2	41,12	64,40	128,98	1,76	17,76	19,96	7,20	106,0	79,61
P7	37,13	82,96	145,88	1,42	18,83	20,95	5,00	118,0	79,61
Min	<b>32,04</b>	<b>43,79</b>	<b>93,01</b>	<b>1,42</b>			<b>5,00</b>	<b>73,00</b>	<b>47,08</b>
Max	<b>41,12</b>	<b>82,96</b>	<b>145,88</b>	<b>2,10</b>			<b>16,70</b>	<b>118,00</b>	<b>79,61</b>
Moy	<b>36,77</b>	<b>63,72</b>	<b>122,62</b>	<b>1,76</b>			<b>9,63</b>	<b>99,00</b>	<b>68,77</b>
ET	<b>3,15</b>	<b>13,29</b>	<b>19,74</b>	<b>0,23</b>			<b>4,71</b>	<b>17,33</b>	<b>14,46</b>
CV%	<b>8,56</b>	<b>20,85</b>	<b>16,10</b>	<b>12,98</b>			<b>48,90</b>	<b>17,51</b>	<b>21,02</b>

## Annexes

### Annexe 5

**Tableau 18.** Les résultats statistiques des bases échangeables ds la couche (0-25 cm)

<b>HORIZON1 (0-25cm)</b>				
<b>N</b>	<b>Ca++</b>	<b>Mg++</b>	<b>Na+</b>	<b>K+</b>
<b>P1</b>	6,82	7,02	2,15	1,75
<b>P2</b>	6,89	6,79	1,86	2,18
<b>P3</b>	6,78	6,50	1,40	2,22
<b>P4</b>	6,66	7,14	2,71	3,70
<b>P5</b>	6,80	6,81	2,17	1,75
<b>P6</b>	6,70	6,50	1,62	1,89
<b>P7</b>	6,68	6,60	1,32	1,32
<b>Min</b>	<b>6,66</b>	<b>6,50</b>	<b>1,32</b>	<b>1,32</b>
<b>Max</b>	<b>6,89</b>	<b>7,14</b>	<b>2,71</b>	<b>3,70</b>
<b>Moy</b>	<b>6,76</b>	<b>6,77</b>	<b>1,89</b>	<b>2,12</b>
<b>ET</b>	<b>0,07</b>	<b>0,20</b>	<b>0,39</b>	<b>0,50</b>
<b>CV%</b>	<b>1,02</b>	<b>2,97</b>	<b>20,57</b>	<b>23,70</b>

**Tableau 19.** Les résultats statistiques des bases échangeables ds la couche (25-50 cm)

<b>HORIZON1 (25-50cm)</b>				
<b>N</b>	<b>Ca++</b>	<b>Mg++</b>	<b>Na+</b>	<b>K+</b>
<b>P1</b>	6,66	6,38	2,08	2,26
<b>P2</b>	6,77	6,74	2,38	5,35
<b>P3</b>	6,71	6,62	1,55	2,18
<b>P4</b>	6,63	6,80	2,61	1,75
<b>P5</b>	6,60	7,22	2,76	3,09
<b>P6</b>	2,55	7,04	3,09	1,34
<b>P7</b>	6,70	6,88	3,00	1,85
<b>Min</b>	<b>2,55</b>	<b>6,38</b>	<b>1,55</b>	<b>1,34</b>
<b>Max</b>	<b>6,77</b>	<b>7,22</b>	<b>3,09</b>	<b>5,35</b>
<b>Moy</b>	<b>6,09</b>	<b>6,81</b>	<b>2,50</b>	<b>2,55</b>
<b>ET</b>	<b>1,01</b>	<b>0,20</b>	<b>0,42</b>	<b>0,95</b>
<b>CV%</b>	<b>16,59</b>	<b>2,94</b>	<b>16,90</b>	<b>37,51</b>

**Tableau 20.** Les résultats statistiques des bases échangeables ds la couche (50-75 cm)

<b>HORIZON1 (50-75cm)</b>				
<b>N</b>	<b>Ca++</b>	<b>Mg++</b>	<b>Na+</b>	<b>K+</b>
<b>P1</b>	6,61	6,23	1,91	0,82
<b>P2</b>	6,65	6,68	2,65	1,34
<b>P7</b>	6,72	7,15	3,49	1,75
<b>Min</b>	<b>6,61</b>	<b>6,23</b>	<b>1,91</b>	<b>0,82</b>
<b>Max</b>	<b>6,72</b>	<b>7,15</b>	<b>3,49</b>	<b>1,75</b>
<b>Moy</b>	<b>6,66</b>	<b>6,69</b>	<b>2,68</b>	<b>1,30</b>
<b>ET</b>	<b>0,04</b>	<b>0,31</b>	<b>0,54</b>	<b>0,32</b>
<b>CV%</b>	<b>0,58</b>	<b>4,62</b>	<b>19,96</b>	<b>24,52</b>

## Annexes

### Annexe 6

**Tableau 21.** Coefficient de corrélation linéaire (Table r de Bravais Pearson)

v / $\alpha$	0.10	0.05	0.02	v / $\alpha$	0.10	0.05	0.02
1	0.9877	0.9969	0.9995	16	0.4000	0.4683	0.5425
2	0.9000	0.9500	0.980	17	0.3887	0.4555	0.5285
3	0.8054	0.8783	0.9343	18	0.3783	0.4438	0.5155
4	0.7293	0.8114	0.8822	19	0.3687	0.4329	0.5034
5	0.6694	0.7545	0.8329	20	0.3598	0.4227	0.4921
6	0.6215	0.7067	0.7887	25	0.3233	0.3809	0.4451
7	0.5822	0.6664	0.7498	30	0.2960	0.3494	0.4093
8	0.5494	0.6319	0.7155	35	0.2746	0.3246	0.3810
9	0.5214	0.6021	0.6851	40	0.2573	0.3044	0.3578
10	0.4973	0.5750	0.6581	45	0.2428	0.2875	0.3384
11	0.4762	0.5529	0.6339	50	0.2306	0.2732	0.3218
12	0.4575	0.5324	0.6120	60	0.2108	0.2500	0.2948
13	0.4409	0.5139	0.5923	70	0.1954	0.2319	0.2737
14	0.4259	0.4973	0.5742	80	0.1829	0.2172	0.2565
15	0.4124	0.4821	0.5577	90	0.1726	0.2050	0.2422
				100	0.1638	0.1946	0.2301

v: le degré de liberté.  $v = n - p - 1$  avec n: le nombre d'observations,  
 p: le nombre de variables explicatives.  $\alpha$ : le risque d'erreur.

La table indique le seuil inférieur de signification du coefficient de corrélation linéaire. Elle exprime la limite supérieure qui peut être imputée au hasard. Pour que la relation soit significative avec un risque d'erreur  $\alpha$ , il faut que r calculé dépasse la valeur de la table au seuil  $\alpha$  et au degré de liberté égal à  $v = n - p - 1$  (n: le nombre d'observations, p: le nombre de relations considérées ou de variables explicatives). Dans le cas d'une corrélation simple on a  $p = 1$  d'où on tire :  $v = n - 2$

## Annexes

### Annexe 7

**Tableau 22 :** Tolérance et rendement potentiel des cultures en fonction de la salinité de l'eau (ECw) ou du sol (ECe) - Rendement potentiel -

CULTURES DE PLEIN CHAMP	100%		90%		75%		50%		0% maximum	
	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw
Orge	8.0	5.3	10	6.7	13	8.7	18	12	28	19
Coton	7.7	5.1	9.6	6.4	13	8.4	17	12	27	18
Betterave à sucre	7.0	4.7	8.7	5.8	11	7.5	15	10	24	16
Sorgho	6.8	4.5	7.4	5.0	8.4	5.6	9.9	6.7	13	8.7
Blé	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.3	13	8.7	20	13
Blé	5.7	3.8	7.5	5.0	10	6.9	15	10	24	16
Carthame	5.3	3.5	6.2	4.1	7.6	5.0	9.9	6.6	15	-
Soja	5.0	3.3	5.5	3.7	6.3	4.2	7.5	5.0	10	6.7
Dolique	4.9	3.3	5.7	3.8	7.0	4.7	9.1	6.0	13	8.8
Sorgho	4.0	2.7	5.1	3.4	7.2	4.8	11.0	7.2	18	-
Arachide	3.2	2.1	3.5	2.4	4.1	2.7	4.9	3.3	6.6	4.4
Riz	3.0	2.0	3.8	2.6	5.1	3.4	7.2	4.8	11	7.6
Sebania	2.3	1.5	3.7	2.5	5.9	3.9	9.4	6.3	17	-
Canne à sucre	1.7	1.1	3.4	2.3	5.9	4.0	10	6.8	19	12
Maïs	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Lin	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Gros fève	1.5	1.1	2.6	1.8	4.2	2.0	6.8	4.5	12	8.0
Haricot, Féverole, Fève	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2
<b>CULTURES MARAICHERS</b>										
Citrouille	4.7	3.1	5.8	3.8	7.4	4.9	10	6.7	15	10
Betterave rouge	4.0	2.7	5.1	3.4	6.8	4.5	9.6	6.4	15	10
Giraumon	3.2	2.1	3.8	2.6	4.8	3.2	6.3	4.2	9.4	6.3
Brocoli	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	14	9.1
Tomate	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	13	8.4
Cantaloup	2.5	1.7	3.3	2.2	4.4	2.9	6.3	4.2	10	6.8
Epinard	2.0	1.3	3.3	2.2	5.3	3.5	8.6	5.7	15	10
Caleri	1.8	1.2	3.4	2.3	5.8	3.9	9.9	6.6	18	12
Chou	1.8	1.2	2.8	1.9	4.4	2.9	7.0	4.6	12	8.1
Pomme de terre	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Maïs sucré	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Patate douce	1.5	1.0	2.4	1.6	3.8	2.5	6.0	4.0	11	7.1
Poivron	1.5	1.0	2.2	1.5	3.3	2.2	5.1	3.4	8.6	5.8
Laitue	1.3	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.1	3.4	9.0	6.0
Radis	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.0	3.4	8.9	5.9
Oignon	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	2.9	7.4	5.0
Carotte	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.0	8.1	5.4
Haricot	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2
Navette	0.9	0.6	2.0	1.3	3.7	2.5	6.5	4.3	12	8.0

## Annexes

CULTURE FOURRAGERES										
Chiendent allonge	7.5	5.0	9.9	6.6	13	9.0	19	13	31	21
Chiendent à crête	7.5	5.0	9.0	6.0	11	7.4	15	9.8	22	15
Gros chiendent	6.9	4.6	8.5	5.6	11	7.2	15	9.8	23	15
Orge fourrage	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.4	13	8.7	20	13
Ray gras anglais	5.6	3.7	6.9	4.6	8.9	5.9	12	8.1	19	13
Lotier, lotier cornicule	5.0	3.3	6.0	4.0	7.5	5.0	10	6.7	15	10
Alpiste bulbeux	4.6	3.1	5.9	3.9	7.9	5.3	11	7.4	18	12
Fétuque élevée	3.9	2.6	5.5	3.6	7.8	5.2	12	7.8	20	13
Agropyre	3.5	2.3	6.0	4.0	9.8	6.5	16	11	28	19
Vesce commune	3.0	2.0	3.9	2.6	5.3	3.5	7.6	5.0	12	8.1
Sudan grass	2.8	1.9	5.1	3.4	8.6	5.7	14	9.6	26	17
Seize sauvage, sans barbe	2.7	1.8	4.4	2.9	8.6	4.6	11	7.4	19	13
Dolique	2.5	1.7	3.4	2.3	4.8	3.2	7.1	4.8	12	7.8
Lotus des maïs	2.3	1.5	2.8	1.9	3.6	2.4	4.9	3.3	7.6	5.0
Sesbanie	2.3	1.5	3.7	2.5	5.9	3.9	9.4	6.3	17	11
Sphaerophysa	2.2	1.5	3.6	2.4	5.8	3.8	9.3	6.2	16	11
Luzerne	2.0	1.3	3.4	2.2	5.4	3.6	8.8	5.9	16	10
Eragrotis	2.0	1.3	3.2	2.1	5.0	3.3	8.0	5.3	14	9.3
Maïs fourrager	1.8	1.2	3.2	2.1	5.2	3.5	8.6	5.7	15	10
Trèfle bersim	1.5	1.0	3.2	2.2	5.9	3.9	10	6.8	19	13
Dactyle pelotonné	1.5	1.0	3.1	2.1	5.5	3.7	9.6	6.4	18	12
Vulpin des prés	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12	7.9
Trèfle des prés	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
Trèfle hybride	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
Trèfle blanc	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
Trèfle fraise	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
CULTURES FRUITIERES										
Palmier dattier	4.0	2.7	6.8	4.5	11	7.3	18	12	32	21
Olivier, Figuier et Grenadier	2.7	1.8	3.8	2.6	5.5	3.7	8.4	5.6	14	-
Pamplemoussier	1.8	1.2	2.4	1.6	3.4	2.2	4.9	3.3	8.0	5.4
Oranger, Citronnier	1.7	1.1	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8.0	5.3
Pêcher	1.7	1.1	2.2	1.5	2.9	1.9	4.1	2.7	6.5	4.3
Pommier, Poirier	1.7	1.0	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8.0	-
Abricotier	1.6	1.1	2.0	1.3	2.6	1.8	3.7	2.5	5.8	3.8
Vigne	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12	7.9
Amandier	1.5	1.0	2.0	1.4	2.8	1.9	4.1	2.8	6.8	4.5
Prunier	1.5	1.0	2.1	1.4	2.9	1.9	4.3	2.9	7.1	4.7
Mûre	1.5	1.0	2.0	1.3	2.6	1.8	3.8	2.5	6.0	4.0
Baies	1.5	1.0	2.0	1.3	2.6	1.8	3.8	2.5	6.0	4.0
Avocatier	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	3.7	2.4	6.0	-
Fraisier	1.0	0.7	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	4	2.7

**Source:** Maas et Hoffman (1977) et Maas (1984) : La qualité de l'eau en agriculture. Bulletin d'irrigation et de drainage N°29 FAO, Rome (1988).

## ملخص

دراسة التباين المكاني لملوحة التربة بأخذ عينات ترابية، ثم إجراء التحاليل المخبرية صعبة جدا بسبب التغير المكاني الكبير من مستويات الأملاح من نقطة إلى أخرى. تبقى الطريقة التقليدية لتحديد نسبة الملوحة عن طريق قياس الموصلية الكهربائية لمستخلص عجينة التربة المشبعة (CEPS) صعبة بسبب التغير المكاني كبير من مستويات الأملاح من نقطة إلى أخرى مما يجعل هذه الطريقة شاقة. وكبديل لذلك، تم تطوير جهاز الحث الكهرومغناطيسي (EM38) لتسهيل إجراءات قراءات سريعة لملوحة التربة في الموقع. فهو سريع ويسمح بقياس كثافة عالية من نقاط. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو إنشاء خريطة لملوحة التربة، باستخدام تقنية الحث الكهرومغناطيسي على قطعة ارض مزروعة في سهل مينا (غليزان). أجريت 64 عملية قياس للموصلية الكهرومغناطيسية (ECM) على شكل شبكة 50 \* 50 م بواسطة EM38، في حين أخذت 17 عينة لتحديد الموصلية الكهرومغناطيسية لمستخرج العجينة المشبعة (CEPS). واستخدمت نماذج الانحدار الخطي لتحويل قيم ECM إلى CEps. وقد استخدمت Krigeage لاستقراء الأماكن التي لم تأخذ منها العينات. واستند تطوير خريطة الملوحة على هذه القيم المتوقعة. أظهرت النتائج مستويين من الملوحة (مالحة ومالحة جدا). أظهرت نتائج التحاليل أن الملوحة من الأعلى إلى الأسفل.

## Résumé

L'étude de la variabilité spatiale de la salinité dans les sols par prélèvements d'échantillons suivis d'analyse de laboratoire est difficile à cause de la grande variabilité des teneurs en sels d'un point à l'autre. 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), L'objectif principal de cette étude est 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 ; et l'élaboration d'une carte d'aménagement hydro agricole en fonction des résultats obtenus.

## Summary

Knowledge of the spatial distribution of soil salinity and its evolution over time becomes necessary in order to arrive at strategie for sustainable agricultural development. The conventional method of determining salinity by measuring the electrical conductivity of an extract of soil saturated (CEps) remains difficult because of the great spatial variability of the salt contents from one point to another, which makes this method laborious. As an alternative solution, electromagnetic induction (EM38) can be used to facilitate rapid measurement of soil salinity in situ. It is fast and allows a high density of measurement points. This spatial evolution of soil salinity by using this method on a representative plot of the Mina (Relizane) plains. A set of 64 measurement of electromagnetic conductivity (CEM) was performed on a regular 50\*50 m grid with the EM38 instrument, while 17 samples were taken for CEps determination. Linear regression models were used to convert CEM values to CEps. kriging was used to extrapolate to non-sampled locations. The elaboration of the salinity map was based on these predicted values. The results showed two levels of soil salinity (saline and very saline). The saline profiles are descending. The statistical analysis of the results allowed us to establish regression equations because of significant correlations between the CEM of the studied soils on the one hand the CEps, the humidity and the organic matter on the other hand.