

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

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم  
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

كلية علوم الطبيعة و الحياة  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie



قسم البيولوجيا

Département de Biologie

## MEMOIRE DE MAGISTER

THEME

# ÉTUDE SPATIALE ET TEMPORELLE DE LA SALINITE DANS LES SOLS DE LA PLAINE DE MINA (RELIZANE)

Présenté par

GACEM Farid

*Laboratoire Biodiversité et Conservation des Eaux et des Sols*

Composition du jury de soutenance :

NOM Prénoms	Grade	Qualité	Structure
SAIDI Djamel	Pr	Président	Université de Chlef
REGUIEG YSSAAD Houcine	Pr	Rapporteur	Université de Mostaganem
MEKHALDI Abdelkader	MCA	Examineur	Université de Mostaganem
ABBABOU Adda	MCA	Examineur	Université de Chlef

Année universitaire : 2014-2015

## 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 mon directeur de mémoire, Mr **REGUIEG**, professeur au **département de Biologie** de la **Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie (Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem)** pour avoir accepté de diriger ce travail tout le long de sa réalisation.*

*A Mr **SAIDI**, professeur à l'université de **Chlef**, qui a bien voulu présider mon jury. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.*

*A Mr **ABABOU**, docteur à l'université de **Chlef** pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*A Mr **MEKHALDI**, docteur au **département de Biologie** de la **Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie (Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem)** pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Enfin, mes vifs remerciements vont aussi à Mr **HABILA**, directeur général de l'**INSID** et à tous mes amis et collègues de travail de l'**INSID**, et tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.*

# DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la mémoire de ma défunte mère  
Baya, que dieu le tout puissant l'accueille dans  
son vaste paradis.*

*A mon père Mohammed, pour ses  
encouragements, sa patience et sa gentillesse.*

*A ma femme Badra,*

*Et à ma belle-mère Fatma, ma sœur Lila et mes  
frères Fatah, Krimou et Djamal.*

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b>	Clé de détermination de la Soil Taxonomy
<b>Tableau 2</b>	Relevés pluviométriques de la station de Relizane (1988 à 2006)
<b>Tableau 3</b>	Précipitations moyennes mensuelles et annuelles de la station de Relizane en (mm) pour la période (1988–2006)
<b>Tableau 4</b>	Précipitations mensuelles, en (mm), de l'année 2012 (station de l'INRA de H'madna, Relizane).
<b>Tableau 5</b>	Moyennes mensuelles des températures (°C) de la station de Relizane pour la période (1988 – 2006)
<b>Tableau 6</b>	Evapotranspiration potentielle moyenne en mm, établie selon la formule Penman (18 ans). (Station ONM de Relizane).
<b>Tableau 7</b>	Salinité de l'eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda (Relizane)
<b>Tableau 8</b>	Qualité de l'eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda(Relizane)
<b>Tableau 9</b>	Répartition des superficies irriguées entre les différentes spéculations pratiquées
<b>Tableau 10</b>	Répartition de l'occupation du sol dans le périmètre irrigué de la Mina, sur 6000 Ha.
<b>Tableau 11</b>	Classes d'intensité du coefficient de variabilité
<b>Tableau 12</b>	Résultats statistiques de la $CE_{ps}$ en dS/m (Juin 2012)
<b>Tableau 13</b>	Résultats statistiques de la $CE_{ps}$ en dS/m (Novembre 2012)
<b>Tableau 14</b>	Résultats statistiques de la $CE_{d_{1/5}}$ (Juin 2012)
<b>Tableau 15</b>	Résultats statistiques de la $CE_{d_{1/5}}$ (Novembre 2012)
<b>Tableau 16</b>	Résultats statistiques de l'humidité du sol en (%) (Juin 2012)
<b>Tableau 17</b>	Résultats statistiques de l'humidité du sol en (%) (Novembre 2012)
<b>Tableau 18</b>	Résultats statistiques de l'Argile (en %)
<b>Tableau 19</b>	Résultats statistiques des limons (en %)
<b>Tableau 20</b>	Résultats statistiques des sables (en %)
<b>Tableau 21</b>	Résultats statistiques de la matière organique (Juin 2012)
<b>Tableau 22</b>	Résultats statistiques de la matière organique (Novembre 2012)
<b>Tableau 23</b>	Résultats statistiques du pH (Juin 2012)
<b>Tableau 24</b>	Résultats statistiques du pH (Novembre 2012)
<b>Tableau 25</b>	Résultats statistiques du calcaire ( $CaCO_3$ en %)(Juin 2012)
<b>Tableau 26</b>	Résultats statistiques du calcaire ( $CaCO_3$ en %)(Novembre 2012)
<b>Tableau 27</b>	Distinction des différents profils salins
<b>Tableau.28</b>	Types de profils de salinité obtenus, pour les deux campagnes de mesure
<b>Tableau 29</b>	Relation entre la CEM et les propriétés du sol des deux campagnes de mesures
<b>Tableau 30</b>	Equations de régressions multiples obtenues pour le calcul de la $CE_{ps}$ des différents horizons du sol à partir des mesures des conductivités électromagnétiques verticales (CEMV), obtenues à différentes hauteurs,

par l'EM38 (Campagne de mesure Juin 2012).

<b>Tableau 31</b>	Equations de régressions multiples obtenues pour le calcul de la $CE_{ps}$ des différents horizons du sol à partir des mesures des conductivités électromagnétiques verticales (CEMV), obtenues à différentes hauteurs, par l'EM38 (Campagne de mesure Novembre 2012).
<b>Tableau 32</b>	Valeurs des conductivités électriques ( $CE_{ps}$ ), mesurées et calculées (Juin 2012)
<b>Tableau 33</b>	Paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la $CE_{ps}$ (Juin 2012).
<b>Tableau 34</b>	Valeurs des conductivités électriques ( $CE_{ps}$ ), mesurées et calculées (Novembre 2012)
<b>Tableau 35</b>	Paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la $CE_{ps}$ (Novembre 2012).
<b>Tableau 36</b>	Paramètres des statistiques descriptives de la conductivité électrique calculée
<b>Tableau 37</b>	Répartition dans le temps de la fréquence des horizons (en %), en fonction des classes de salinité ( $CE_{psc}$ en $dS.m^{-1}$ )
<b>Tableau 38</b>	Vérification de la loi de distribution de la $CE_{psc}$ par le de la campagne Juin 2012 (test de Kolmogorov-Smirnov)
<b>Tableau 39</b>	Vérification de la loi de distribution de la $CE_{psc}$ par le de la campagne Novembre 2012 (test de Kolmogorov-Smirnov)
<b>Tableau 40</b>	Paramètres du modèle de variogramme des différents horizons (Juin 2012)
<b>Tableau 41</b>	Paramètres du modèle de variogramme des différents horizons (Novembre 2012)
<b>Tableau 42</b>	Erreurs de prédiction des modèles de variogramme (Juin 2012)
<b>Tableau 43</b>	Erreurs de prédiction des modèles de variogramme (Novembre 2012)
<b>Tableau 44</b>	Superficie des classes de salinité en hectares (Ha) des deux campagnes de mesures.
<b>Tableau 45</b>	Répartition de l'occupation du sol en fonction des classes de salinité.
<b>Tableau 46</b>	Statistiques descriptives des propriétés physiques et physico-chimiques du profil A
<b>Tableau 47</b>	Paramètres statistiques du complexe adsorbant du profil A
<b>Tableau 48</b>	Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil A
<b>Tableau 49</b>	Critères diagnostiques du profil A
<b>Tableau 50</b>	Statistiques descriptives des paramètres du profil B
<b>Tableau 51</b>	Paramètres statistiques du complexe adsorbant du profil B
<b>Tableau 52</b>	Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil B
<b>Tableau 53</b>	Critères diagnostiques du profil B
<b>Tableau 54</b>	Statistiques descriptives des paramètres du profil C
<b>Tableau 55</b>	Paramètres statistiques du complexe adsorbant du profil C
<b>Tableau 56</b>	Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil C

**Tableau 57** Critères diagnostiques du profil C

**Liste des figures**

- Figure 1** Superficie affectée par la salinité dans les différentes régions du monde
- Figure 2** Répartition des sols salins du Nord de l'Algérie
- Figure 3** Représentation schématique de la distribution de quelques domaines pédologiques dans le Nord de l'Algérie
- Figure 4** Le cycle des sels dans le sol
- Figure 5** Les différents types de profils salins
- Figure 6** Processus de dégradation de la qualité des sols suite à l'irrigation
- Figure 7** Principe de fonctionnement de la conductivimétrie électromagnétique
- Figure 8** Conductivimètre électromagnétique EM-38 selon le mode vertical (V) et horizontal (H)
- Figure 9** Contribution relative d'une couche de sol au champ secondaire suivant sa profondeur dans le sol :  $\phi_v$  (**CEM<sub>V</sub>**) en mode vertical,  $\phi_h$  (**CEM<sub>H</sub>**) en mode horizontal.
- Figure 10** Carte de situation de la plaine de la Mina (Relizane)
- Figure 11** Histogramme des précipitations moyennes mensuelles
- Figure 12** Histogramme du régime saisonnier de la région d'études
- Figure 13** Diagramme ombrothermique de la station de Relizane (1988-2007)
- Figure 14** Climagramme pluviométrique d'Emberger pour la Relizane (1988- 2006)
- Figure 15** Carte géologique 1/50 000 de Relizane
- Figure 16** Carte de salinité des sols du périmètre irrigué de la Mina sur 6000 Ha
- Figure 17** Carte d'occupation des sols du périmètre irrigué de la Mina sur 6000 Ha
- Figure 18** Situation géographique de la zone d'étude
- Figure 19** Parcelle d'étude
- Figure 20** Occupation du sol de la parcelle d'étude
- Figure 21** Démarche méthodologique
- Figure 22** Lectures verticales et horizontales de l'EM38 à différentes hauteurs
- Figure 23** Méthode de prélèvement des échantillons de sol
- Figure 24** Plan d'échantillonnage
- Figure 25** Schéma du protocole expérimental de la pâte saturée
- Figure 26** Semi-variogramme théorique (modèle sphérique)
- Figure 27** Profils salins moyens des échantillons prélevés (**CE<sub>ps</sub> en dS.m<sup>-1</sup>**)
- Figure 28** Corrélation entre  $Ced_{1/5}$  et  $CE_{ps}$  (**Juin 2012**)
- Figure 29** Corrélation entre  $Ced_{1/5}$  et  $CE_{ps}$  (**Novembre 2012**)
- Figure 30** Distribution de la  $CE_{ps}$  selon le transect 1. Sud-Nord (**Juin 2012**)

- Figure 31** Distribution de la  $CE_{ps}$  selon le transect 2. Sud-Nord (**Juin 2012**)
- Figure 32** Distribution de la  $CE_{ps}$  selon le transect 3. Sud-Nord (**Juin 2012**)
- Figure 33** Distribution de la  $CE_{ps}$  selon le transect 4. Sud-Nord (**Juin 2012**)
- Figure 34** Distribution de la  $CE_{ps}$  selon le transect 1. Sud-Nord (**Novembre 2012**)
- Figure 35** Distribution de la  $CE_{ps}$  selon le transect 2. Sud-Nord (**Novembre 2012**)
- Figure 36** Distribution de la  $CE_{ps}$  selon le transect 3. Sud-Nord (**Novembre 2012**)
- Figure 37** Distribution de la  $CE_{ps}$  selon le transect 4. Sud-Nord (**Novembre 2012**)
- Figure.38** Evolution de la  $CE_{ps}$  (dS/m) des différents sondages par profils (**Juin 2012**)
- Figure 39** Evolution de la  $CE_{ps}$  (dS/m) des différents sondages par horizons (**Novembre 2012**)
- Figure 40** Semi-variogramme de l'horizon de surface (0-25cm) (**Juin 2012**)
- Figure 41** Semi-variogramme de l'horizon de sub-surface (25-50cm) (**Juin 2012**)
- Figure 42** Semi-variogramme de l'horizon (50-75cm) (**Juin 2012**)
- Figure 43** Semi-variogramme de l'horizon de profondeur (75-100cm) (**Juin 2012**)
- Figure 44** Semi-variogramme de l'horizon de surface (0-25cm) (**Novembre 2012**)
- Figure 45** Semi-variogramme de l'horizon de sub-surface (25-50cm) (**Novembre 2012**)
- Figure 46** Semi-variogramme de l'horizon (50-75cm) (**Novembre 2012**)
- Figure 47** Semi-variogramme de l'horizon de profondeur (75-100cm) (**Novembre 2012**)
- Figure 48** Carte de salinité de l'horizon de surface (0-25cm) (**Juin 2012**)
- Figure 49** Carte de salinité de l'horizon de sub-surface (25-50cm) (**Juin 2012**)
- Figure 50** Carte de salinité de l'horizon (50-75cm) (**Juin 2012**)
- Figure 51** Carte de salinité de l'horizon de surface (75-100cm) (**Juin 2012**)
- Figure 52** Carte de salinité de l'horizon de surface (0-25cm) (**Novembre 2012**)
- Figure 53** Carte de salinité de l'horizon de sub-surface (25-50cm) (**Novembre 2012**)
- Figure 54** Carte de salinité de l'horizon (50-75cm) (**Novembre 2012**)
- Figure 55** Carte de salinité de l'horizon de profondeur (75-100cm) (**Novembre 2012**)
- Figure 56** Répartition en (Ha) des classes de salinité dans les horizons (**Juin 2012**)
- Figure 57** Répartition en (Ha) des classes de salinité dans les horizons (**Novembre 2012**)
- Figure 58** Coupe schématique du profil A
- Figure 59** Composition cationique moyenne du complexe adsorbant du profil A
- Figure 60** Répartition moyenne des cations dans la solution du sol du profil A
- Figure 61** Répartition moyenne des anions dans la solution du sol du profil A
- Figure 62** Coupe schématique du profil B

<b>Figure 63</b>	Composition cationique moyenne du complexe adsorbant du profil B
<b>Figure 64</b>	Répartition moyenne des cations dans la solution du sol du profil B
<b>Figure 65</b>	Répartition moyenne des anions dans la solution du sol du profil B
<b>Figure 66</b>	Coupe schématique du profil C
<b>Figure 67</b>	Composition cationique moyenne du complexe adsorbant du profil C
<b>Figure 68</b>	Répartition moyenne des cations dans la solution du sol du profil C
<b>Figure 69</b>	Répartition moyenne des anions dans la solution du sol du profil C
<b>Figure 70</b>	Mécanisme de la salinisation dans les sols de la parcelle (période pluvieuse)
<b>Figure 71</b>	Mécanisme de la salinisation dans les sols de la parcelle (période sèche)

### Liste des photos

<b>Photo 1</b>	Vue générale de la parcelle d'étude
<b>Photo 2</b>	Utilisation de l'EM38
<b>Photo 3</b>	Préparation de la pâte saturée
<b>Photo 4</b>	Extraction des sels par centrifugation (Extrait saturé)
<b>Photo 5</b>	Mesure de la CE de l'extrait obtenu
<b>Photo 6</b>	Profil A
<b>Photo 7</b>	Fentes de retrait
<b>Photo 8</b>	Accumulations gypseuses
<b>Photo 9</b>	Profil B
<b>Photo 10</b>	Accumulations salines
<b>Photo 11</b>	Profil C
<b>Photo 12</b>	Etat de surface (pseudosables)
<b>Photo 13</b>	Taches d'oxydo-réduction

### ANNEXES

<b>Annexe.1</b>	Instructions d'utilisation de l'appareil EM-38
<b>Annexe.2 (tab.1)</b>	Maillage recommandé pour la prospection de la salinité par l'EM38
<b>Annexe.3 (tab.2)</b>	Les résultats statistiques de l'humidité du sol en (%) (Juin 2012)
<b>Annexe.3 (tab.3)</b>	Les résultats statistiques de l'humidité du sol en (%) (Nov. 2012)
<b>Annexe.3 (tab.4)</b>	Les résultats statistiques de l'Argile (%)
<b>Annexe.3 (tab.5)</b>	Les résultats statistiques des Limons (%)
<b>Annexe.3 (tab.6)</b>	Les résultats statistiques des Sables (%)

<b>Annexe 3 (tab.7)</b>	Les résultats statistiques de la matière organique (%) (Juin 2012)
<b>Annexe 3 (tab.8)</b>	Les résultats statistiques de la matière organique (%) (Novembre 2012)
<b>Annexe 4(tab.9)</b>	Les résultats statistiques du pH (Juin 2012)
<b>Annexe 4(tab.10)</b>	Les résultats statistiques du pH (Novembre 2012)
<b>Annexe 4(tab.11)</b>	Les résultats statistiques du calcaire (CaCO <sub>3</sub> en %)(Juin 2012)
<b>Annexe 4(tab.12)</b>	Les résultats statistiques du calcaire (CaCO <sub>3</sub> en %)(Novembre 2012)
<b>Annexe 5(tab.13)</b>	Les résultats statistiques de la CEps en dS/m (Juin2012)
<b>Annexe 5(tab.14)</b>	Les résultats statistiques de la CEps en dS/m (Novembre 2012)
<b>Annexe 5(tab.15)</b>	Les résultats statistiques de la Ced1/5 en dS/m (Juin 2012)
<b>Annexe 5(tab.16)</b>	Les résultats statistiques de la Ced1/5 en dS/m (Novembre 2012)
<b>Annexe 6(tab.17)</b>	Valeurs de la conductivité électromagnétique (CEM) verticales et horizontales, obtenues en Juin 2012 et utilisées pour le calcul de la CEps de chaque horizon par les régressions multiples.
<b>Annexe 7(tab.18)</b>	Valeurs des conductivités électriques (CEps), mesurées et calculées (Juin 2012)
<b>Annexe 8(tab.19)</b>	Valeurs de la conductivité électromagnétique (CEM) verticales et horizontales, obtenues en Novembre 2012 et utilisées pour le calcul de la CEps de chaque horizon par les régressions multiples.
<b>Annexe 9(tab.20)</b>	Valeurs des conductivités électriques (CEps), mesurées et calculées (Novembre 2012)
<b>Annexe 10(tab.21)</b>	Propriétés physiques et physico-chimiques du profil A
<b>Annexe 10(tab.22)</b>	Complexe adsorbant du profil A
<b>Annexe 10(tab.23)</b>	Caractéristiques analytiques de la solution du sol du profil A
<b>Annexe 11(tab.24)</b>	Propriétés physiques et physico-chimiques du profil B
<b>Annexe 11(tab.25)</b>	Complexe adsorbant du profil B
<b>Annexe 11(tab.26)</b>	Caractéristiques analytiques de la solution du sol du profil B
<b>Annexe 12(tab.27)</b>	Propriétés physiques et physico-chimiques du profil C
<b>Annexe 12(tab.28)</b>	Complexe adsorbant du profil C
<b>Annexe 12(tab.29)</b>	Caractéristiques analytiques de la solution du sol du profil C
<b>Annexe 12(tab.30)</b>	Coefficient de corrélation linéaire (Table r de Bravais Pearson)

## Liste des abréviations

**CE** : Conductivité électrique du sol

**CE<sub>d</sub>** : 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  $\text{mS.m}^{-1}$

**IEM** : Induction électromagnétique

**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 ( $\text{meq}/100\text{g}$ )

**SAR** : Sodium Absorption Ratio

**ESP** : Exchangeable Sodium Percentage (en %)

**AGID**: Agence de Gestion de l'Irrigation et Drainage

**ANRH**: Agence Nationale des Ressources Hydriques

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

**INRAA** : Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie

**ONID**: Office National de l'Irrigation et du Drainage

**ONM**: Office National de Météorologie

**CPCS**: Commission de Pédologie et de Cartographie des sols

**USDA**: United States Department of Agriculture

**FAO**: Food and Agriculture Organization of the United Nations

## Liste des symboles

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

**n** : Indique une accumulation du sodium échangeable

**p** : Indique que l'horizon de surface est labouré

**y** : Indique une accumulation de gypse

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

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------	---

## PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

### CHAPITRE I : LA SALINISATION DES SOLS

I.1. Définition	6
I.2. La salinisation dans le monde	7
I.3. La salinisation en Algérie	7
I.4. Les mécanismes de la salinisation	9
I.4.1. La salinisation	9
I.4.2. La sodisation	10
I.4.3. L'alcalinisation	11
I.5. Dynamique de la salinité dans les sols	11
I.5.1. Dynamique des sels dans les sols irrigués	11
I.5.2. Le processus de salinisation et d'alcalinisation des sols	12
I.6. Relation entre la salinité, les sols et les plantes	15
I.6.1. Introduction	15
I.6.2. Effets de la salinité sur les plantes	15
I.6.3. Effets de la salinité sur les sols	15
I.7. Réhabilitation des sols salés	16

### CHAPITRE II : METHODES DE MESURE DE LA SALINITE DU SOL

Introduction	19
II.1. Méthodes d'évaluation de la salinité au laboratoire	19
II.1.1. Extrait de la pâte saturée	19
II.1.2. Extrait non saturée	19
II.1.3. Evaluation de la salinité par la résistivité des sols	19
II.1.4. Evaluation de la salinité par l'induction électromagnétique	20
II.2. Le conductivimètre électromagnétique (EM38, Geonics LTD)	20
II.2.1. Principe de fonctionnement	20
II.2.2. Mesures verticales et horizontales de l'EM38	21
II.2.3. Etalonnage du conductivimètre électromagnétique EM38	22
II.3. Avantages de la technique	24
II.4. Limites de la technique	25
II.5. Conclusion	25

### CHAPITRE III : CLASSIFICATION DES SOLS SALES

Introduction	27
III.1. Classification Française des sols (CPCS, 1967)	28
III.1.1. Sous classe des sols sodiques à structure non dégradée	28
III.1.2. Sous classe des sols sodiques à structure dégradée	28
III.2. Classification Américaine de l'USDA (Soil Taxonomy)	28
III.2.1. Introduction	28
III.2.2. Ordre des Aridisols (Soil Taxonomy, 2010)	31
III.2.3. Les différents sous-ordres des Aridisols	32

III.2.3.1. Groupe des Salids	32
III.2.3.2. Groupe des Gypsids	33
III.4. Conclusion	33

## **DEUXIEME PARTIE : EXPERIMENTATION**

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

IV.1. Situation géographique	35
IV.2. Synthèse climatique	35
IV.3. Géologie	40
IV.4. Géomorphologie	41
IV.5. Réseau hydrographique et ressources en eaux	43
IV.6. Les sols	44
IV.7. L'occupation du sol	50
IV.8. Conclusion	51

### **CHAPITRE V : MATERIELS ET METHODES**

<b>V.1. Matériel</b>	<b>55</b>
<b>V.2. Méthodologie</b>	<b>58</b>
V.2.1. Analyse des documents de base	59
V.2.2. Prospection de terrain	60
V.2.3. Utilisation de l'EM38 pour la cartographie de la salinité	60
V.2.4. Etude des sols de la parcelle	63
V.2.5. Analyses de laboratoire	64
V.2.6. Etude de la variabilité spatiale de la salinité	68

### **CHAPITRE VI : RESULTATS & DISCUSSION**

<b>VI.1. Etude des paramètres physiques et physico-chimiques du sol</b>	<b>75</b>
<b>VI.2. Caractérisation de la salinité des sols</b>	<b>78</b>
1) Conductivité électrique de l'extrait saturation (CEps)	75
2) Conductivité électrique de l'extrait dilué (CEd1/5)	76
3) Distribution de la salinité selon les transects Sud-Nord	78
<b>VI.3. Etude de la salinité par induction électromagnétique (EM38)</b>	<b>86</b>
VI.3.1. Les lectures électromagnétiques de l'EM38	86
VI.3.2. Relation entre la CEM et les propriétés du sol	87
VI.3.3. Estimation de la CEps à partir des mesures électromagnétiques	88
VI.3.4. Estimation de la CEps des différents horizons du sol	88
VI.3.5. La conductivité électrique calculée(CE <sub>pse</sub> ) pour l'ensemble des horizons	94
VI.3.5.1. Analyses statistiques	94
VI.3.5.2. Fréquences de la conductivité électrique calculée(CE <sub>pse</sub> ) des différents horizons	95
VI.3.6. Vérification de la loi de distribution	96
<b>VI.4. Cartographie de la salinité</b>	<b>98</b>
VI.4.1. Variographie	98
1) Analyse variographique des résultats de la campagne Juin 2012	98
2) Analyse variographique des résultats de la campagne Novembre 2012	101
VI.4.2. Cartographie par krigeage ordinaire des conductivités électriques calculées	103

1) Cartographie par krigeage ordinaire des conductivités électriques calculées de la campagne Juin 2012	103
2) Cartographie par krigeage ordinaire des conductivités électriques calculées de la campagne Novembre 2012	104
<b>VI.5. Distribution spatiale de la salinité</b>	<b>104</b>
1) Distribution spatiale de la salinité de la campagne Juin 2012	105
2) Distribution spatiale de la salinité de la campagne Novembre 2012	111
<b>VI.6. Evolution spatio-temporelle de la salinité</b>	<b>117</b>
1) Evolution spatio-temporelle de la salinité dans l'horizon de surface (0-25cm)	117
2) Evolution spatio-temporelle de la salinité dans l'horizon de sub-surface (25-50cm)	117
3) Evolution spatio-temporelle de la salinité dans l'horizon (50-75cm)	118
4) Evolution spatio-temporelle de la salinité dans l'horizon de profondeur (75-100cm)	118
<b>VI.7. Répartition de l'occupation du sol, en fonction des classes de salinité</b>	<b>120</b>
<b>VI.8. Caractérisation des sols</b>	<b>122</b>
VI.8.1. Introduction	122
<b>VI.8.2. Caractérisation du profil A</b>	<b>122</b>
1) Données générales	122
2) Description morphologique du profil A	122
3) Résultats analytiques du profil A	124
4) Synthèse des résultats morphologiques et analytiques	129
5) Classification du profil A	129
<b>VI.8.3. Caractérisation du profil B</b>	<b>130</b>
1) Données générales	130
2) Description morphologique du profil B	130
3) Résultats analytiques du profil B	132
4) Synthèse des résultats morphologiques et analytiques du profil B	137
5) Classification du profil B	137
<b>VI.8.4. Caractérisation du profil C</b>	<b>138</b>
1) Données générales	138
2) Description morphologique du profil C	138
3) Résultats analytiques du profil C	140
4) Synthèse des résultats morphologiques et analytiques	144
5) Classification du profil C	145
<b>DISCUSSION GENERALE</b>	<b>146</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>150</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	
<b>ANNEXES</b>	

# **Introduction générale**

### Introduction générale

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

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

L'étude de la variabilité spatio-temporelle de la salinité dans la plaine de la Mina est mal connue. La majorité des études existantes concerne, les mécanismes et les processus de salinisation des sols irrigués ont peu abordé les variations spatiales de la salinité et les dynamiques temporelles associées. Selon **Lahmar et Ruellan (2007)**, le manque d'une cartographie précise des sols salés et d'un suivi de l'évolution temporelle de la salinité dans les zones irriguées ne permet pas de juger des risques, ni d'ailleurs des efforts entrepris de restauration des sols salés, et encore moins d'anticiper le phénomène avec l'extension « forcée » de l'irrigation.

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**).

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.

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**). La CEM est un intégreur 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 spatio-temporelle de la salinité, sur une parcelle cultivée, située au niveau de la plaine de la Mina (Relizane). Des approches complémentaires ont été mises en œuvre, dans cette étude, à savoir :

- la cartographie de la salinité à partir d'une méthode géophysique non destructive, par la technique d'induction électromagnétique, permettant de décrire l'extension spatiale de la salinité et de sa profondeur d'apparition ;
- le suivi de l'évolution temporelle de la salinité de sols, à travers des cartes répétées, au cours de deux périodes de l'année (après l'hiver : Juin et après l'été : Novembre) ;
- l'analyse de la répartition de l'occupation du sol, en fonction de la salinité ;
- et la caractérisation des sols étudiés et leur référencement par rapport au système de classification Américain de l'USDA (Soil Taxonomy).

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

- **une première partie** qui concerne la synthèse bibliographique qui elle est divisée en trois chapitres :
  - ✓ le chapitre.I est consacré à la salinisation des sols ;
  - ✓ le chapitre.II est consacré aux méthodes d'évaluation de la salinité ;
  - ✓ le chapitre.III concerne la classification des sols salés.
- dans la **deuxième partie**, nous aborderons une présentation de la zone d'étude;
- dans la **troisième partie**, nous présenterons la méthodologie adoptée et le matériel utilisé;
- dans la **quatrième partie**, nous présenterons les résultats obtenus ainsi qu'une synthèse générale;
- nous terminerons ensuite par une conclusion générale.

**PREMIERE PARTIE :**  
**SYNTHESE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**

**Chapitre I**

**La salinisation des sols**

## Première partie : Synthèse bibliographique

### Introduction

Le sujet sur la salinité des sols est large et varié. L'examen d'une bibliographie complète est donc difficile. Dans cette partie, la bibliographie se limite qu'aux sujets qui sont directement liés à la recherche menée dans cette thèse. Tout d'abord, la salinisation du sol est brièvement discutée dans le **Chapitre.I**. Les méthodes de mesure de la salinité du sol, en particulier, l'utilisation de l'induction électromagnétique (IEM), qui mesure la conductivité électrique apparente du sol (CEa), a révolutionné la façon dont ces informations peuvent être collectées et peut améliorer significativement l'interprétation de la salinité. Cette question est abordée dans le **Chapitre.II**. Nous terminerons cette partie bibliographique par les systèmes de classification des sols salés, dans laquelle nous citerons les systèmes de classification Américain de l'USDA (Soil Taxonomy) et la classification Française (CPCS, 1967), qui seront abordés dans le **Chapitre. III**.

## Chapitre I. La salinisation des sols

### I.1. Définition

Le terme de salinité se rapporte à la présence des principaux solutés inorganiques dissous (essentiellement des ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{--}$ ) dans des échantillons aqueux. La salinité est quantifiée en termes de la concentration totale de ces sels solubles, ou plus concrètement, en termes de conductivité électrique de la solution, parce que les deux sont étroitement liés (USSSL, 1954).

La salinisation est l'accumulation des sels solubles (plus solubles que le gypse) à la surface du sol et dans la zone racinaire (Mermoud, 2006).

La conductivité, inverse d'une résistivité (en ohms), a longtemps été exprimée en mhos (en inversant l'ordre des lettres). Dans le système international on se réfère désormais au Siemens (S), et à ses subdivisions (milli = m et micro =  $\mu$ ), 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:  $\text{mmol} (+) / \text{l} = 10 \times \text{CE}$  (CE en dS/m)  
Pour l'eau d'irrigation et les extraits de sol dans la gamme 0,1-5 dS / m.
- Conductivité en pression osmotique en bars:  $\text{PO} = 0,36 \times \text{CE}$  (CE en dS / 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.

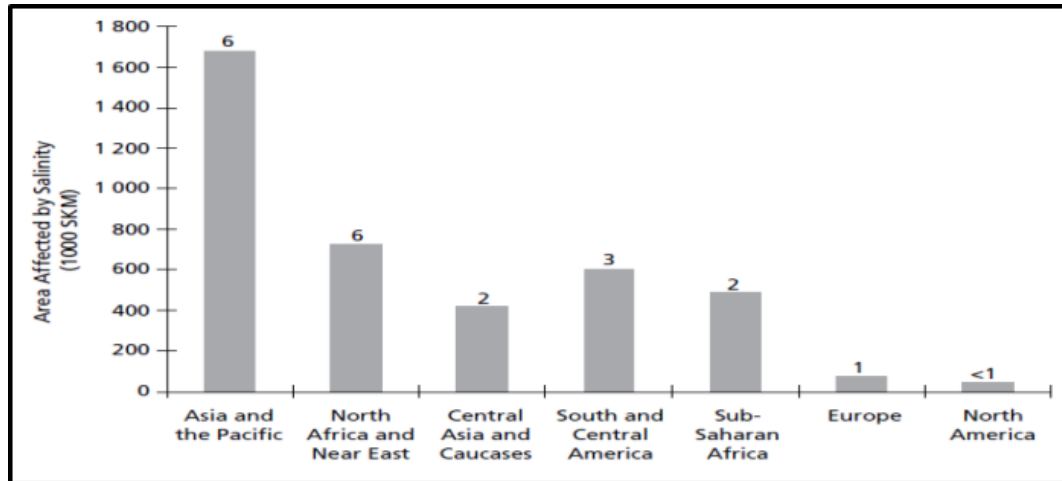
- mmol / l (analyse chimique) en mg / l:
- Multipliez mmol / l pour chaque ion par son poids moléculaire pour obtenir la somme.

### I.2. la salinisation dans le monde

Selon les estimations les plus récentes de la FAO, la salinisation affecte déjà au moins 400 millions d'ha et en menace gravement une surface équivalente (**Legros, 2009**). La plupart de ces terres affectées par le sel sont situés dans les zones arides et semi-arides, en Afrique du Nord, en Asie orientale, en Asie centrale et du Sud de l'Asie (**FAO, 2006**).

Les sols salés sont principalement situés dans les zones arides, et leur proportion est notablement élevée au proche (Egypte, Tunisie) et moyen orient (Iran, Pakistan, Bangladesh), en Asie centrale (Ouzbékistan), au nord de la Chine et en Argentine. Les sols sodiques sont particulièrement étendus en Australie, mais aussi dans certaines situations spécifiques, comme en Hongrie ou en Ouzbékistan. Par comparaison, le développement d'une salinité liée aux activités humaines ne concernerait que 77 millions d'hectares (**Marlet et Job, 2006**).

Dans les pays du Maghreb, les dommages de la salinisation sont connus, à cause de la mauvaise gestion des eaux d'irrigation (**Djili K et al, 2003**).



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

### I.3. La salinisation en Algérie

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

aride et semi-aride, mais aussi sous bioclimat subhumide (Halitim, 1973). Selon Djili (2000), les sols salés sont localisés au Nord qu'au Sud Algérien, et s'expriment mieux entre les isohyètes 450 mm qui semblent être la limite supérieure des sols fortement sodiques (Fig.3).

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

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

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

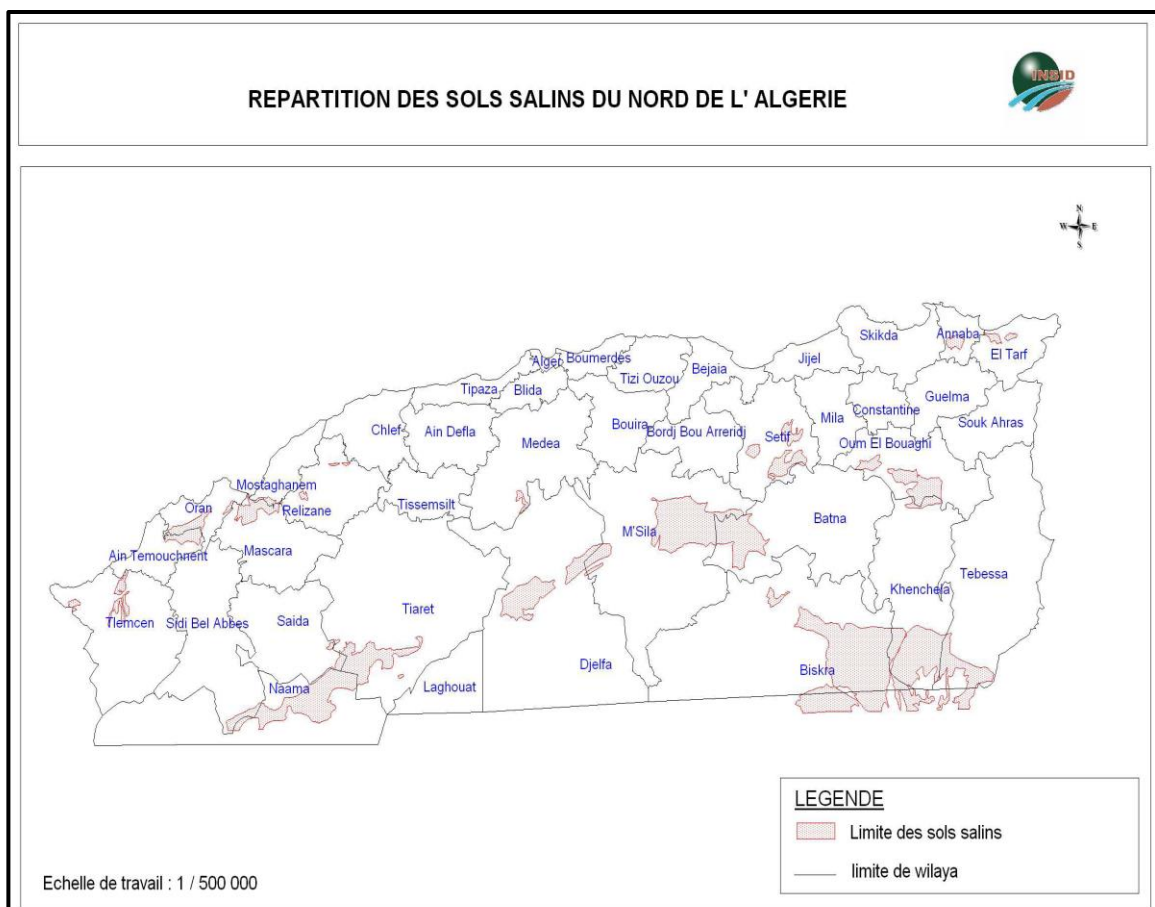
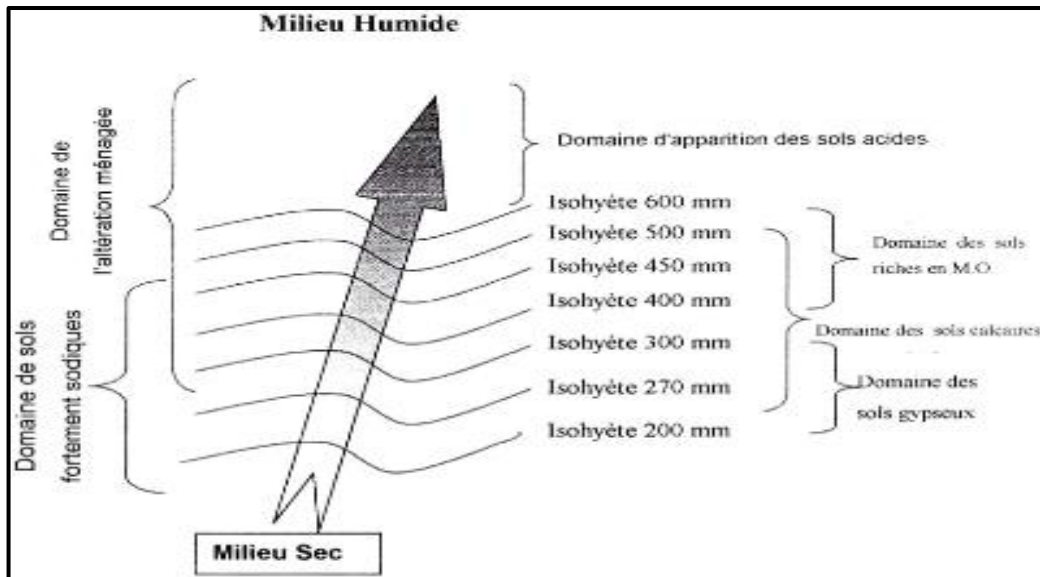


Figure 2. Répartition des sols salins du Nord de l'Algérie (INSID, 2008)



**Figure 3.** Représentation schématique de la distribution de quelques domaines pédologiques dans le Nord de l'Algérie (Djili, 2000)

#### I.4. Les mécanismes de la salinisation

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

##### I.4.1. La salinisation

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

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

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

##### 1) La salinisation primaire

Elle résulte de la présence initiale de sels dans le sol ou dans la nappe phréatique et peut affecter des milieux naturels sans qu'il y ait intervention directe de l'homme.

L'altération des roches contenant des minéraux sodiques, potassiques ou magnésiques conduit à des sels souvent solubles, en particulier les chlorures, les sulfates, les carbonates, les bicarbonates et parfois les silicates de ces métaux (**Zahow et Amrhein, 1992**).

Selon **Aubert (1975)** et de façon générale « les sols sodiques en Afrique du Nord proviennent principalement d'une action de la mer (pas actuelle) ou de la présence de dépôts lagunaires salés et gypseux répartis dans l'échelle stratigraphique depuis le Trias jusqu'au Quaternaire. En Algérie, les couches géologiques salifères, comme le gypse triasique; grès du Crétacé moyen; marnes sénoniennes dans le Sud-Constantinois; poudingues, grès et limons rougeâtres de l'Oligocène continental (Aquitainien) ; poudingues et grès cartésiens; argiles, grès et poudingues helvétiens; gypse, marnes et calcaires du Sahélien; grès du Pliocène continental (bassins fermés des Hautes Plaines); formations quaternaires des plaines littorales, des basses plaines oranaises et des dépressions fermées. (**Benchetrit, 1956**).

## 2) La salinisation secondaire

C'est un processus d'enrichissement d'un sol en sels solubles causé par l'approvisionnement en eau pour l'irrigation et qui aboutit à la formation d'un sol salin. L'irrigation altère le bilan hydrique du sol en générant un apport d'eau supplémentaire ; cet apport est toujours associé à un apport de sels (**FAO, 2006**). Un excès d'eau entraîne la remontée d'une nappe phréatique salée, tandis qu'un manque d'eau provoque une lixiviation insuffisante des sels (**Boivin et al, 2002**). Les sols affectés par salinisation secondaire est de 20% à 50% des terres irriguées en Algérie (**Douaoui et Hartani, 2007**)

### I.4.2. La sodisation

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

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

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

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

Le SAR est défini par l'expression :

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

Dans laquelle :  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  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).

#### **I.4.3. L'alcalinisation**

Le processus d'alcalinisation intervient lorsqu'un sol à complexe saturé en sodium se transforme physiquement suite aux réactions d'échange entre l'ion  $\text{Na}^+$  et les protons au moment d'une humectation (Montoroi, 2005).

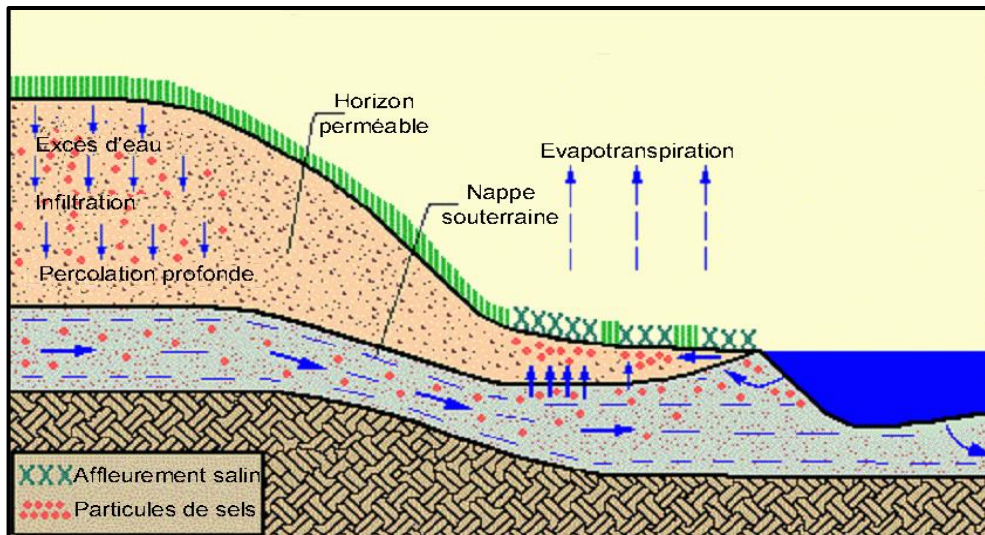
L'alcalinisation se traduit par une augmentation du pH du sol suite à l'accumulation de bases faibles. Elle peut être d'origine naturelle ou due à une irrigation mal contrôlée.

Les eaux d'irrigation faiblement minéralisées présentent une alcalinité résiduelle calcite positive, c'est à dire un excès de carbonates (bases faibles) par rapport au calcium. La concentration de ces eaux par évaporation au cours de l'irrigation entraîne la précipitation de la calcite. Au fur et à mesure que les processus de concentration et de précipitation de la calcite se poursuivent, la teneur en calcium décroît alors que les carbonates s'accumulent.

### **I.5. Dynamique de la salinité dans les sols**

#### **I.5.1. Dynamique des sels dans les sols irrigués**

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



**Figure 4.** Le cycle des sels dans le sol (Lahlou *et al*, 2002)

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

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

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

- la forme saline ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) l'ion sodium reste sous forme neutre.
- la forme alcalinisante (échangeable) liée au complexe absorbant. En présence de cette dernière forme les solutions du sol s'enrichissent en sels alcalins (carbonate ou bicarbonate de sodium) qui confère au sol un pH fortement élevé.

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

- présence d'une nappe salée dont les éléments saturer le complexe absorbant par échange avec les ions alcalinoterreux ( $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$ ) on parle de saturation indirecte (**Duchaufour, 1977**) ;
- Une saturation directe du complexe par altération des roches contenant des minéraux sodiques.

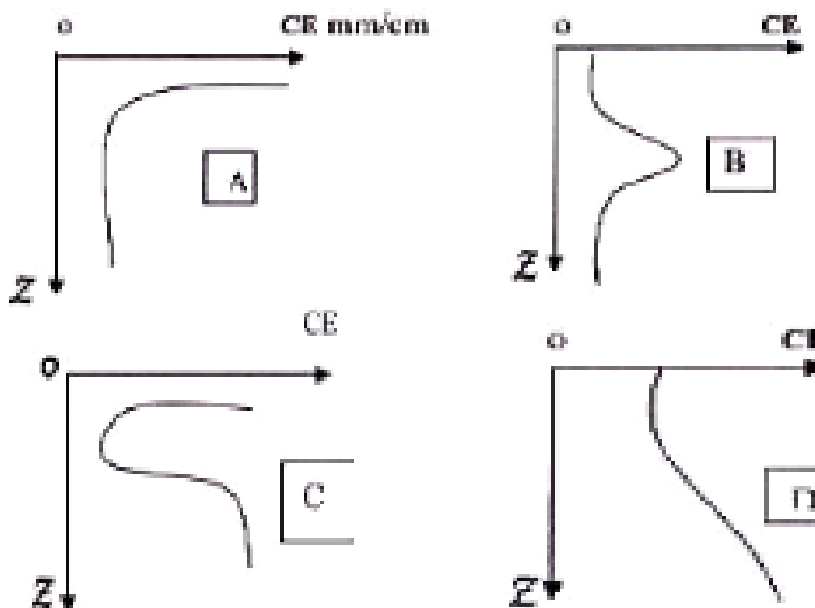
La nappe souterraine en traversant des couches d'alluvions sodiques, transporte des éléments alcalinisants dont elle s'est chargée. Selon **Duchaufour (1977)**, l'ion sodium ne peut subsister qu'en climat sec où le drainage naturel est empêché par la forte évaporation qui sévit. En climat humide, tous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

profil par les eaux de drainage. A cet effet, deux conditions sont nécessaires à la formation des sols salsodiques:

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

Selon **Servant (1976)**, il est possible de distinguer quatre formes principales de salinisation (**Fig.5**) :

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



Z : profondeur en centimètres

CE : conductivité électrique en mmhos/cm

**Figure 5. (A, B, C, D). Les différents types de profils salins (Servant, 1976)**

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

- **Le profil descendant**

Le maximum de salinité se situe dans la partie inférieure du profil. Ce type de distribution est observé dans les sols à croûtes et encroûtement calcaires et dans les sols à encroûtement gypseux de surface des parties amont et médiane de la séquence du Zahrez. Ce type de profil

salin a été qualifié de descendant par **Servant (1975)**. Il indique que le profil a subi une phase de lixiviation des sels solubles.

### - **Le profil ascendant**

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

### - **Le profil convexe**

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

#### **1) Rôle du climat dans le processus de salinisation**

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

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

#### **2) Rôle de la nappe dans le processus de salinisation**

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

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

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

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

#### I.6.1. Introduction

Les sols salés contiennent suffisamment des sels solubles dans leur solution (électrolytes) pour nuire à la croissance de la plupart des plantes. Ces sels solubles, sont principalement le sodium ( $\text{Na}^+$ ), le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) et de potassium ( $\text{K}^+$ ) et aussi les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et les carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ).

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

#### I.6.2. Effets de la salinité sur les plantes

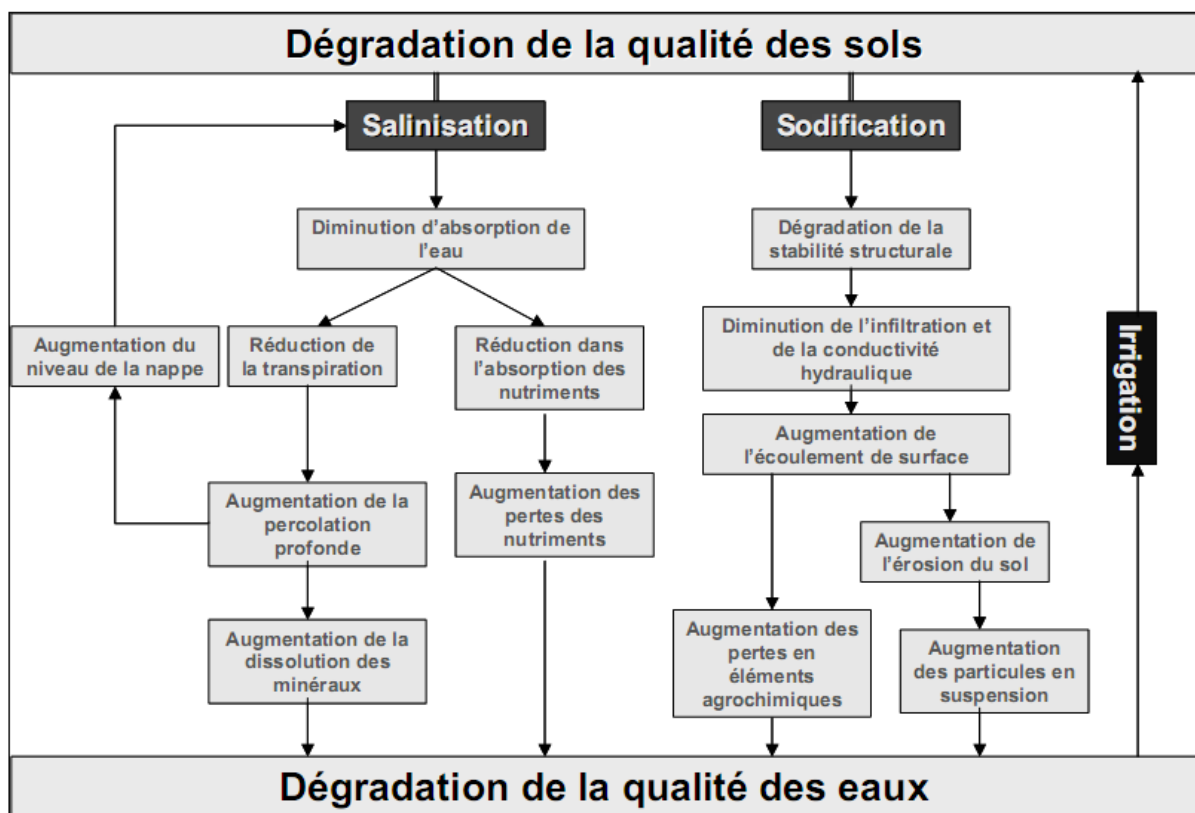
L'accumulation des sels dans les sols est un grave problème environnemental menaçant les processus physiologiques de la plante et la fertilité des sols. Les teneurs élevées en sels tendent à augmenter la pression osmotique de la solution du sol, ce qui diminue la capacité de la plante à utiliser l'eau dont elle a besoin, au risque de la soumettre à une sécheresse conditionnée (**Halitim, 1988**). Les sels constituent aussi un obstacle physique à l'enracinement à cause de la diminution de la disponibilité en eau et de l'instabilité structurale du sol. Ils sont aussi à l'origine des déséquilibres nutritionnels observés chez les plantes. Seules les plantes tolérantes aux sels peuvent se développer. Dans certains cas, la salinité est tellement élevée que le sol devient stérile et dépourvu de toute végétation y compris de plantes halophytes. Dans ce cas, des problèmes de toxicité surviennent aussi ; outre le sodium et le chlore, d'autres éléments à l'état de traces tels que le bore peuvent aussi être toxiques pour les plantes (**Ayers et Westcot, 1988**).

#### I.6.3. Effets de la salinité sur les sols

Dans les sols salins, la présence excessive de sels solubles neutres floccule la fraction argileuse, mais les maintient stable, alors que dans les sols alcalins, un excès en sodium échangeable favorise la dispersion de l'argile et rend la structure du sol instable. Ces sols sont ainsi sensibles aux encroûtements de surface qui favorisent le ruissellement de surface (**Hassan, 2005**). Une prise en masse du sol peut également réduire fortement l'infiltration de

l'eau dans le sol et conduire à une hydromorphie plus ou moins importante du sol selon sa texture et sa position topographique dans le paysage (Douaoui *et al*, 2004).

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



**Figure 6.** Processus de dégradation de la qualité des sols suite à l’irrigation (Lahlou *et al*, 2002).

### I.7. Réhabilitation des sols salés

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

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

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

Une autre option possible en milieu carbonaté est la phyto-remédiation. Son principe est d'utiliser le CO<sub>2</sub> de la respiration racinaire et l'excrétion de protons par les racines pour acidifier le milieu et produire la libération du calcium. Dans des essais conduits au Moyen Orient la phyto-remédiation a prouvé qu'elle était une option efficace et peu coûteuse, dont les résultats sont comparables à ceux obtenus avec du gypse (**Badraoui *et al*, 2005**).

# **Chapitre II**

## **Méthodes d'évaluation de la salinité du sol**

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

### Introduction

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

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

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

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

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

#### II.1.1. Extrait de la pâte saturée

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

#### II.1.2. Extrait non saturée

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

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

#### II.1.3. Evaluation de la salinité par la résistivité des sols

L'évaluation de la salinité à partir de la résistivité (inverse de la conductivité) du sol est basée

sur un principe simple: la capacité du sol à conduire le courant électrique est fonction de la concentration en électrolytes de la solution du sol.

L'appareil de mesure comprend quatre électrodes disposées horizontalement selon la configuration de **Wenner**. L'épaisseur du sol prospecté est fonction de l'écartement entre les deux électrodes sources.

L'appareil est un matériel encombrant à manipuler et parfois le contact des électrodes avec le sol est imparfait aux faibles humidités (**Rhoades et al, 1976**).

#### II.1.4. Evaluation de la salinité par l'induction électromagnétique

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

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

#### II.2.1. Principe de fonctionnement

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

La conductivité globale apparente mesurée est proportionnelle à HS et HP selon la formule suivante:

$$\sigma a = \frac{2 \left( \frac{Hs}{Hp} \right)}{\pi f \mu_0 S^2}$$

Avec :

$\sigma a$  = conductivité apparente du sol (mS/m : millisiemens par mètre)

$\mu_0$  = permittivité de l'air

F = fréquence du courant primaire

S = distance interspire

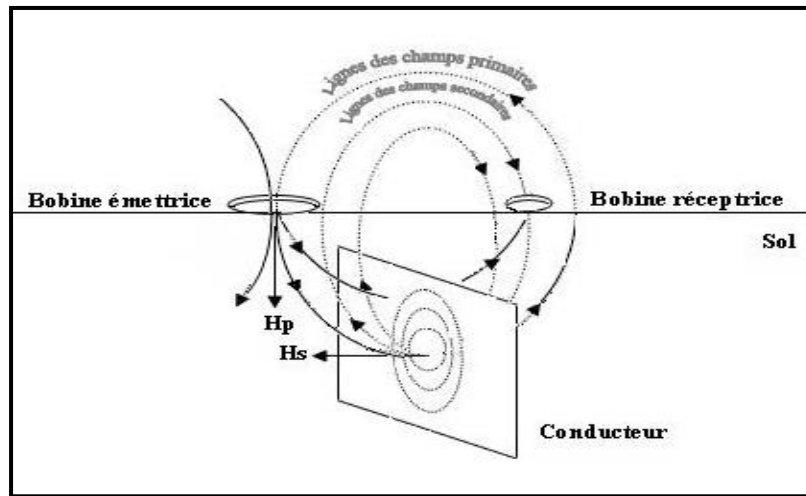


Figure 7. Principe de fonctionnement de l'EM38 (Iddir, 2006)

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

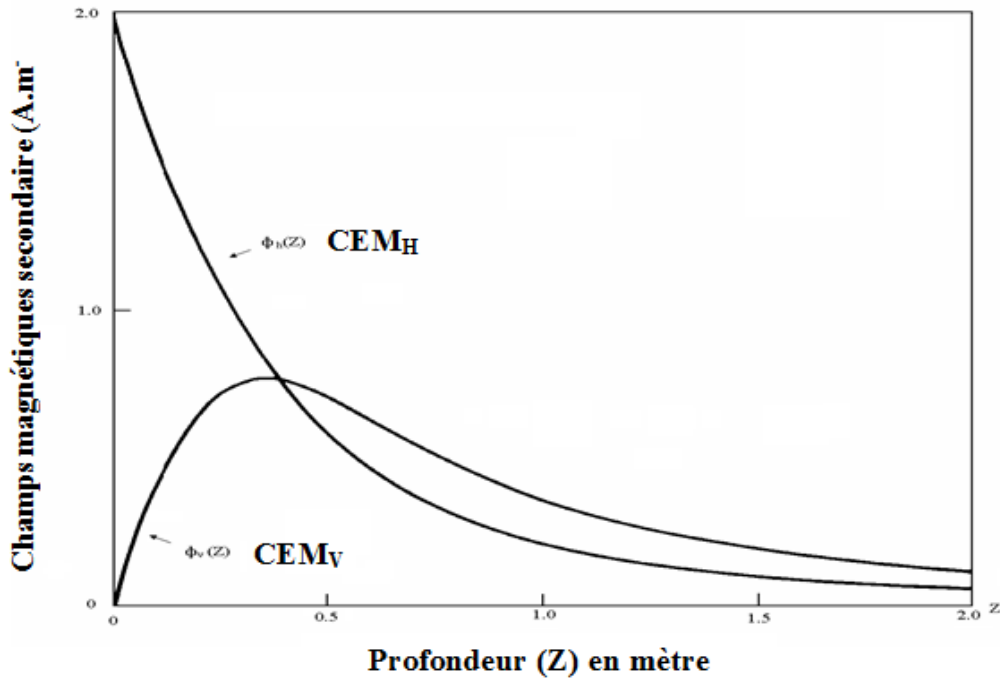
L'EM38 peut être utilisé selon deux configurations (Fig.8) :

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

Selon Job *et al* (1987), la contribution d'une couche élémentaire de sol de sol situé à une profondeur z au champ secondaire Hs est une fonction non linéaire de la profondeur. Elle peut se faire de deux manières selon l'orientation des grands axes des solénoïdes de départ, soit perpendiculaire à la surface du sol mesure noté  $\Phi_v(z)$ , soit parallèlement à celui-ci  $\Phi_h(z)$ , l'appareil étant alors horizontal (Fig.9)



Figure 8. Conductivimètre électromagnétique EM-38 en mode vertical (V) et horizontal (H)



**Figure 9.** Contribution relative d'une couche de sol au champ secondaire suivant sa profondeur dans le sol :  $\phi_v$  ( $CEM_V$ ) en mode vertical,  $\phi_h$  ( $CEM_H$ ) en mode horizontal. (Corwin *et Lesch.*, 2003).

### II.2.3. Etalonnage du conductivimètre électromagnétique EM38

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

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

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

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

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

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

### II.2.3.1. La régression linéaire simple

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

$$CE_{ps (0-zcm)} = \pm c \pm CEa_{(0-zcm)}$$

Où :

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

Il est possible, d'établir de multiples relations de régression empiriques entre la  $CEM_H$  et la  $CEM_V$ , et les lectures moyennes de la  $CE_{ps (0-zcm)}$ . Ce résultat est obtenu par l'échantillonnage du sol directement en dessous des sites où, uniquement les lectures de la  $CEM_V$  et la  $CEM_H$ , ou les deux CEM, ont été prises.

Le modèle de régression peut être établi, dans l'équation ci-dessous:

$$CE_{ps(0-zcm)} = \pm c \pm a * CEM_V \pm b * CEM_H$$

Où :

- $CEM_V$  : lecture électromagnétique obtenue en mode vertical ( $dS.m^{-1}$ );
- $CEM_H$  : lecture électromagnétique obtenue en mode horizontal ( $dS.m^{-1}$ );
- $CE_{ps(0-zcm)}$  : conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée d'un sol échantillonné à une profondeur de 0 à z cm ( $dS.m^{-1}$ ) ;
- a et b: pentes de la relation ;
- c : constante.

### II.2.3.2. La régression multiple

**Rhoades et Corwin (1981)** a montré qu'en soulevant l'appareil de mesure EM38, à différentes hauteurs au-dessus du sol, il est possible d'estimer la conductivité électrique (CE) pour divers intervalles de profondeur du sol, à partir d'une succession de mesures de la CEM faite à diverses orientations, ou à différentes hauteurs au-dessus du sol, ou les deux.

En se basant les régressions multiples **Rhoades et Corwin (1981)** ont développé une équation qui relie la conductivité électrique mesurée d'un intervalle de profondeur du sol avec la conductivité électromagnétique mesurée à différents niveaux au-dessus du sol :

$$CE_{(x-z)} = \pm c \pm \alpha_0 CEM_{(V,H)} \pm \alpha_1 CEM_{(V1,H1)} \pm \alpha_2 CEM_{(V2,H2)} \pm \alpha_3 CEM_{(V3,H3)} \pm \alpha_4 CEM_{(V4,H4)}$$

Où:

- $CE_{(x-z)}$  : Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CEps), exprimée en  $dS.m^{-1}$  à 25°C, mesurée au laboratoire, pour une couche de sol(x-z) ;
- $CEM_{(V,H)}$ ,  $CEM_{(V1,H1)}$ ,  $CEM_{(V2,H2)}$ ,  $CEM_{(V3,H3)}$ ,  $CEM_{(V4,H4)}$  : lectures horizontales ou verticales de la conductivité électromagnétique, exprimées en  $mS.m^{-1}$ , obtenues par l'EM38, respectivement, aux hauteurs (0 cm, 50cm, 75cm, 100cm et 125cm) par rapport au sol (**Fig.22**);
- $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  : pentes de la relation.
- c : Constante.

### II.3. Avantages de la technique

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

- les mesures peuvent être prises aussi rapidement que l'on peut déplacer d'un point de mesure à un autre,

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

### II.4. Limites de la technique

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

### II.5. Conclusion

L'utilisation du conductivimètre électromagnétique EM38 pour l'évaluation de la salinité des sols apparaît comme une méthode rapide et fiable. Sa facilité de mise en œuvre et sa rapidité d'exécution font de l'EM38 un outil performant pour la caractérisation des sols salés.

Néanmoins, une interprétation qualitative, pouvant donner un sens au niveau agronomique aux mesures de CEM, nécessite un étalonnage avec les méthodes conventionnelles (pâte saturée) pour lesquelles on dispose de nombreuses références.

Par ailleurs, ces procédures montrent les résultats d'une nouvelle recherche sur le potentiel d'utilisation de l'EM38 afin de mieux définir les niveaux de tolérance de la salinité dans les conditions de terrain.

# **Chapitre III**

## **Classification des sols salés**

## Chapitre III. Classification des sols salés

### Introduction

Les différents systèmes de classifications des sols ont accordé une importance relative aux sols riches en sels. Ainsi la classification Française (**CPCS, 1967**) place cette catégorie de sols au sommet de la hiérarchie (Classe), tandis que la classification Américaine (**Soil Taxonomy, 2010**), en fait un ordre à part, et accorde une importance capitale à leur propriétés (CE, ESP et SAR).

Selon l'intensité des processus mis en jeu et leurs caractéristiques physico-chimiques, on définit plusieurs types de sols salés (**Servant, 1970; Loyer, 1990**). Leur classification pose encore des problèmes et la majorité des systèmes recommandent une subdivision en quatre catégories (**Daoud, 1993**). On parle de sols salés, sols salins à sols alcalins et des sols alcalins non salés que l'on distingue, en recourant au pH, à la CE, à l'ESP et au SAR (**Hadj Miloud, 2006**).

- a) **Les sols salés** sont des sols dont la conductivité électrique (CE) de l'extrait de la pâte saturée est supérieure à 4ds/m à 25°C et dont le pourcentage de sodium échangeable (ESP) est inférieur à 15 %. Généralement, le pH est inférieur à 8,5. Ces sols correspondent aux « Solontchaks » à cause de la présence de sels en excès et de l'absence de quantité suffisante de sodium échangeable, les sols salés sont généralement floкулés, et en conséquence la perméabilité est supérieure ou égale à celle des sols similaires non salés (**Dogar, 1980**).
- b) **Les sols salins à alcalis** ont une conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée à 25°C supérieure à 4ds/m et un ESP supérieur à 15%. Ces sols sont le résultat de processus continus de salinisation et d'alcalinisation. Dans les conditions où les sels sont en excès, le pH augmente rarement au-dessus de 8,5 et les particules restent floкулées, sinon il peut atteindre la valeur 9. Si les sels en excès sont lessivés, les propriétés de ces sols peuvent changer d'une manière déterminante et devenir semblables à celles des sols alcalins non salés. D'après **Aubert (1983)**, les sols salins à alcalis s'observent dans les oasis du Sud Algérien comme Touggourt et aussi dans le Tell (Vallée du Cheliff). Leur perméabilité dépend du rapport entre la CE et l'ESP, de la teneur et de la nature de la fraction argileuse du sol (**Daoud, 1993**).
- c) **Les sols alcalins non salés** sont les sols ayant une valeur de l'ESP supérieure à 15 %, une CE inférieure à 4dS/m à 25°C et un pH qui varie habituellement de 8,5 à 10.

### III.1. La classification française CPCS (1967)

La classification française est une classification hiérarchisée. Elle est morpho- génétique, est englobe des niveaux suivant la classe, la sous-classe, le groupe, sous- groupe, la famille, la série, le type et la phase. Dans cette classification, les sols salés sont rangés dans la classe des sols salsodiques, elle - même subdivisée en deux (02) sous classes :

#### III.1.1. Sous classe des sols sodiques à structure non dégradée :

Ce sont des sols salins (Solontchaks), soumis à l'influence d'une nappe salée peu profonde, riches en sels de sodium, caractérisés par une conductivité électrique supérieure à 4 mmhos/cm (**Duchaufour, 1988**).

##### 1) Sols salins à complexe calcique (Solontchaks)

Ils sont très fréquents en Algérie (**FAO, 2005**), et sont caractérisés par un ESP < 15% et un profil peu différencié (**Servant, 1975**). Ils se rencontrent dans les zones steppiques ou désertiques dans lesquelles des nappes salées contiennent à l'instar des sels solubles, une quantité importante de calcium qui alimente le profil (**Halitim, 1973**).

##### 2) Sols salins à complexe sodique (Solontchaks sodiques) :

Ce type de sol est caractérisé par un ESP > 15% se rencontre en bordure de mer, ou dans les lagunes côtières, sa structure tend à se dégrader et devient poudreuse (**Duchaufour, 1988**).

#### III.1.2. Sous classe des sols sodiques à structure dégradée :

Ce sont des sols alcalins à structure dégradée (**Duchaufour, 1976**). On distingue trois (03) groupes selon les étapes d'évolution des profils (**Duchaufour, 1988**) :

##### 1) Sols alcalins non lessives (Solontchaks-Solonetz)

Ils sont fréquents en Algérie (**Durand, 1983**). Leur profil est de type AC ou A (B) C.

##### 2) Sols alcalins lessives de type ABC.

Ces sols existent en Algérie, mais sont très localisés dans les zones humides (**Durand, 1983**).

##### 3) Sols alcalins dégradés (Solods):

Présentent une structure dégradée complètement en surface avec un pH de 4 à 5 en profondeur un pH élevé de 9 à 10.

### III.2. La classification américaine (Soil Taxonomy, 2010)

#### III.2.1.Introduction

La classification américaine est une classification hiérarchisée basée sur la morphologie et certaines analyses de laboratoire : c'est une classification morpho- analytique. Les sols sont classés et groupés d'après un ensemble de caractères mesurables (Physico-chimiques et morphologiques). Les critères diagnostiques sont représentés par les horizons diagnostiques

(Epipedons), le pédoclimat, et par des critères secondaires (propriétés pédologiques bien distinctes).

L'originalité de la classification américaine réside dans la définition préalable d'horizons de diagnostic, qui sont le plus souvent des horizons de profondeur, considérés comme plus stables et moins soumis à l'influence humaine que les horizons de surface. La classification proposée utilise comme critères essentiels la présence (ou l'absence) des différents horizons. Ce sont ces horizons qui servent à définir les 12 unités fondamentales de la Soil Taxonomy.

Les subdivisions des ordres, ou sous-ordres, sont basées également sur la présence de certains horizons de diagnostic, différents de ceux qui caractérisent le groupe; mais aussi, et surtout, sur d'autres critères, notamment le microclimat interne du sol, lié bien entendu au climat général et aussi, pour certains sous-ordres, aux conditions de saturation plus ou moins prolongée par l'eau, ou l'hydromorphie (**Legros, 2007**).

Les grands groupes enfin sont déterminés par la présence d'horizons de diagnostic particuliers, notamment ceux qui sont qualifiés de « secondaires ».

La nomenclature est basée sur 12 ordres fondamentaux qui sont résumés dans le tableau ci-dessous:

**Tableau 1.** Clé de détermination de la Soil Taxonomy (**Legros, 2007**)

Ordres	Abrév.	Définition succincte, équivalent en langage CPCS
Gélisols	els	(Grec gelid = très froid). Ont un permafrost en surface ou au moins avant 200cm de profondeur (sols peu évolués des hautes altitudes et latitudes).
Histosols	ist	(Grec histos = tissus). Présentant un horizon organique épais (+ de 40 cm ou plus de 2/3 de l'épaisseur du sol si celui-ci est superficiel), accumulation liée à la présence actuelle ou ancienne de l'eau (tourbes et sols très organiques).
Spodosols	ods	(Grec Spodos = cendres). Présentant un horizon Spodic (sols podzolisés typiques des milieux très acidifiés).
Andisols	ands	(Japonais Ando = noir). Présentant des propriétés andiques (andosols typiques des régions volcaniques si le milieu est humide et frais ou froid). Ordre introduit en 4 <sup>ème</sup> édition.
Oxisols	ox	(Français oxyde). Présentant un horizon Oxic (moins de 10% de minéraux altérables dans la fraction 50-200 microns, présence de sesquioxydes du type Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ou Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , capacité d'échange de moins de 16 cmol (+) par kg d'argile) ou présentant un horizon Kandic : texture fine, enrichissement relatif en argile, capacité d'échange limitée (sols ferrallitiques des zones intertropicales).
Vertisols	erts	(Latin vertos = virer → sols qui bougent). Présentant des sliquesides ou au moins des agrégats à faces obliques, plus de 30% d'argile et des fentes de retrait en période sèche (vertisols des climats secs méditerranéens ou subtropicaux).

Aridisols	ids	(Latin aridus = sec). Correspondent à un climat aride (peu d'eau) que la température soit élevée ou non. Mais peuvent être saturés d'eau si salés. Horizons de diagnostic possibles : Natric, Calcic, Petrocalcic, Gypsic, Petrogypsic, Salic, Argillic, Duripan (sols des climats secs présentant des accumulations calcaires, gypse ou sels). Ordre introduit en 6 <sup>ème</sup> édition.
Ultisols	ults	(Latin ultimus = ultime). Présentant des marques de fortes évolutions : horizon Argillic, Kandic ou Fragipan et taux de saturation inférieur à 35% (sols aux matériaux très altérés de la zone intertropicales et subtropicale).
Mollisols	olls	(Latin mollis = doux → sols à humus doux). Présentant un horizon de surface Mollic avec un taux de saturation supérieur à 50% (sols des prairies et forêts à feuilles caduques, calcaires ou non).
Alfisols	alfs	(Terme inventé). Présentant un horizon Argillic, Kandic, Natric ou un Fragipan. Climat humide ou subhumide, taux de saturation >30%, légèrement acide (sols lessivés des climats humides).
Inceptisols	epts	(Latin inceptum = débutant). N'entrent pas dans les catégories présentées ci-dessus car relativement superficiels et pas suivis en profondeur par des horizons Calcics, Petrocalcic, Gypsic, Petrogypsic, Placic, Duripan, Fragipan, Oxic, Spodic, Sulfuric. En revanche peuvent présenter des horizons correspondant à des sols peu évolués : Cambic, Histic, Mollic, Plaggen, Umbric Epipedon
Entisols	ents	(Terme inventé). N'entrent dans aucune des catégories précédentes. Pas d'horizons de diagnostic développés sauf epipedons Ochric et Anthropic (sols minéraux bruts).

Les sous-ordres sont désignés à l'aide d'un suffixe composé de deux ou trois lettres rappelant l'ordre (**els, ist, ods, ands, ox, erts, ids, ults, olls, alfs, epts et ents**), et d'un préfixe indiquant une caractéristique, très souvent microclimatique, du sous-ordre.

Les noms des grands groupes sont composés à l'aide du nom du sous-ordre auquel on ajoute un autre préfixe, rappelant le nom d'un horizon de diagnostic, ou un terme de microclimat.

Les sous-groupes enfin sont désignés à l'aide du nom du groupe, auquel est adjoint un adjectif composé de la même façon et indiquant une tendance évolutive.

Dans la classification américaine, il n'y a pas un ordre des sols salés, par contre il y a l'horizon salique, un horizon d'accumulation des sels plus solubles que le gypse.

#### a) Caractérisation de l'horizon salique

Selon la **Soil Taxonomy (2010)**, les caractéristiques de l'horizon salique sont :

1. L'horizon salique présente une épaisseur de 15cm ou plus;
2. La conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée ( $CE_{ps}$ ) en  $dS.m^{-1}$  à 25°C est supérieure ou égale à 30dS/m, pendant 90 jours consécutifs ou plus au cours des années normales ;
3. Un produit de la  $CE_{ps}$  en dS/m et de l'épaisseur de l'horizon en cm, est égal 900 ou plus.

**b) Caractérisation de l'horizon gypsique**

Concernant l'horizon gypsique, il est caractérisé comme suit (**Soil Taxonomy, 2010**):

L'horizon gypsique est un horizon dans lequel le gypse est accumulé ou transformé de manière significative. Cela se produit généralement dans l'horizon de sub-surface, mais il peut se produire à la surface dans certains sols.

**Caractéristiques requises**

L'horizon gypsique doit répondre à toutes les exigences suivantes:

1. Il présente une épaisseur de 15 cm ou plus, et
2. N'est pas cimenté par du gypse, avec ou sans autres agents de cimentation; est cimenté et les parties cimentées sont moins de 5 mm d'épaisseur, ou est cimenté, mais, en raison d'une discontinuité latérale, les racines peuvent pénétrer le long des fractures verticales avec une distance horizontale inférieure à 10 cm, et
3. Présente 5 pour cent ou plus (en poids) de gypse et aussi 1 pour cent ou plus (en volume) visible de gypse secondaire, qui est, soit accumulé ou transformé, et
4. Formé d'un produit d'épaisseur, en cm, multiplié par le contenu en gypse en pour cent (en poids) de 150 ou plus.

**III.2.2. Ordre des Aridisols (Soil Taxonomy, 2010)**

Tous les sols:

1. Qui ont :
  - a. Un régime d'humidité du sol aridique, et
  - b. Un epipedon ochrique ou anthropique, et
  - c. Un ou plusieurs des éléments suivants, à moins de 100 cm de la surface du sol: un horizon cambique avec une profondeur inférieure de 25 cm ou plus, un régime de température cryique du sol et un horizon cambique, un horizon calcique, gypsique, pétrocalcique, pétrogypsique ou salique ou un duripan; ou
  - d. Un horizon argileux ou natrique; ou
2. Ont un horizon salique, et
  - a) Une saturation en eau dans une ou plusieurs couches dans les 100 cm de la surface du sol pendant 1 mois ou plus au cours d'une année normale, et
  - a) Une section de contrôle de l'humidité du sol qui est sèche sur plusieurs ou sur toute la partie, pendant un certain moment au cours des années normales, et
  - b) N'ont pas d'horizon sulfurique dans les 150 cm du sol minéral.

**Sont des Aridisols.**

### III.2.3. Les différents sous-ordres des Aridisols

Selon la **Soil Taxonomy (2010)**, les différents sous ordres appartenant aux Aridisols sont les suivants :

- 1) Aridisols qui ont un régime de température du sol cryique: **Cryids**
- 2) Autres Aridisols qui ont un horizon salique à moins de 100 cm de la surface du sol :  
**Salids**
- 3) Autres Aridisols qui ont un duripan à moins de 100 cm de la surface du sol : **Durids**
- 4) Autres Aridisols qui ont un horizon gypsique ou pétrogypsique à moins de 100 cm de la surface du sol et ne disposent pas d'un horizon pétrocalcique entre ces horizons:  
**Gypsid**
- 5) Autres Aridisols qui ont un horizon argileux ou natrique et ne disposent pas d'un horizon pétrocalcique à moins de 100 cm de la surface du sol : **Argids**
- 6) Autres Aridisols qui ont un horizon calcique ou pétrocalcique à moins de 100 cm de la surface du sol: **Calcids**
- 7) Autre Aridisols : **Cambids**

#### III.2.3.1 Groupe des Salids

Il y a deux grands groupes au niveau des Salids (**Soil Taxonomy, 2010**) :

- A. Salids qui sont saturés avec de l'eau dans une ou plusieurs couches à moins de 100 cm de la surface du sol minéral pour 1 mois ou plus dans les années normales :  
**Aquisalids** ;
- B. Autres Salids : **Haplosalids**.

#### A) Grand Groupe des Aquisalids

Les différents sous-groupes des Aquisalids sont (**Soil Taxonomy, 2010**) :

1. Les Aquisalids qui ont un horizon gypsique ou pétrogypsique à moins de 100 cm de la surface du sol sont des **Gypsic Aquisalids** ;
2. Les autres Aquisalids qui ont un horizon calcique ou pétrocalcique moins de 100 cm de la surface du sol sont des **Calcic Aquisalids**.
3. Les autres Aquisalids sont des **Typic Aquisalids**.

#### B) Grand Groupe des Haplosalids

Les différents sous-groupes des Haplosalids sont (**Soil Taxonomy, 2010**) :

1. Les Haplosalids qui ont un duripan moins de 100 cm de la surface du sol sont des **Duric Haplosalids** ;
2. Les autres Haplosalids qui ont un horizon pétrogypsique moins de 100 cm de la surface du sol sont des **Petrogypsic Haplosalids** ;

3. Les autres Haplosalids qui ont un horizon gypsique dans les 100 cm à partir de la surface du sol sont des **Gypsic Haplosalids** ;
4. Les autres Haplosalids qui ont un horizon calcique dans les 100 cm à partir de la surface du sol sont des **Calcic Haplosalids** ;
5. Les autres Haplosalids sont des **Typic Haplosalids**.

#### **III.2.3.2. Groupe des Gypsids**

La clé des grands groupes des Gypsids sont :

1. Les Gypsids qui ont un horizon pétrogypsique ou pétrocalcique à moins de 100 cm du sol sont des **Petrogypsids**;
2. Les autres Gypsids qui ont un horizon natrique à moins de 100 cm du sol sont des **Natrigypsids** ;
3. Les autres Gypsids qui ont un horizon argileux à moins de 100cm du sol sont des **Argigypsids** ;
4. Les autres Gypsids qui ont un horizon calcique à moins de 100 cm du sol sont des **Calcigypsids**;
5. Les autres Gypsids sont des **Haplogypsids**.

#### **Grand Groupe des Haplogypsids (Soil Taxonomy, 2010)**

Les Haplogypsids qui ont, dans un horizon minéral d'au moins 25 cm d'épaisseur à moins de 100 cm de la surface du sol, un pourcentage de sodium échangeable de 15 ou plus (ou un de SAR 13 ou plus) pendant au moins 1 mois en temps normal sont des **Sodic Haplogypsids**;

#### **III.4. Conclusion**

Dans son ensemble, la classification américaine est un outil très précieux, pour les pédologues, en raison de l'extrême précision et de la grande rigueur scientifique des définitions des horizons de diagnostic, et par voie de conséquence des groupes taxonomiques qu'ils servent à définir.

**DEUXIEME PARTIE :**  
**EXPERIMENTATION**

**Chapitre V**  
**Présentation de la zone**  
**d'étude**

## Chapitre IV : Présentation de la zone d'étude

### IV.1. Situation géographique

Le périmètre de la mina se trouve dans le bassin inférieur de l'Oued Chélif et couvre une superficie totale de 20000 Ha 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)

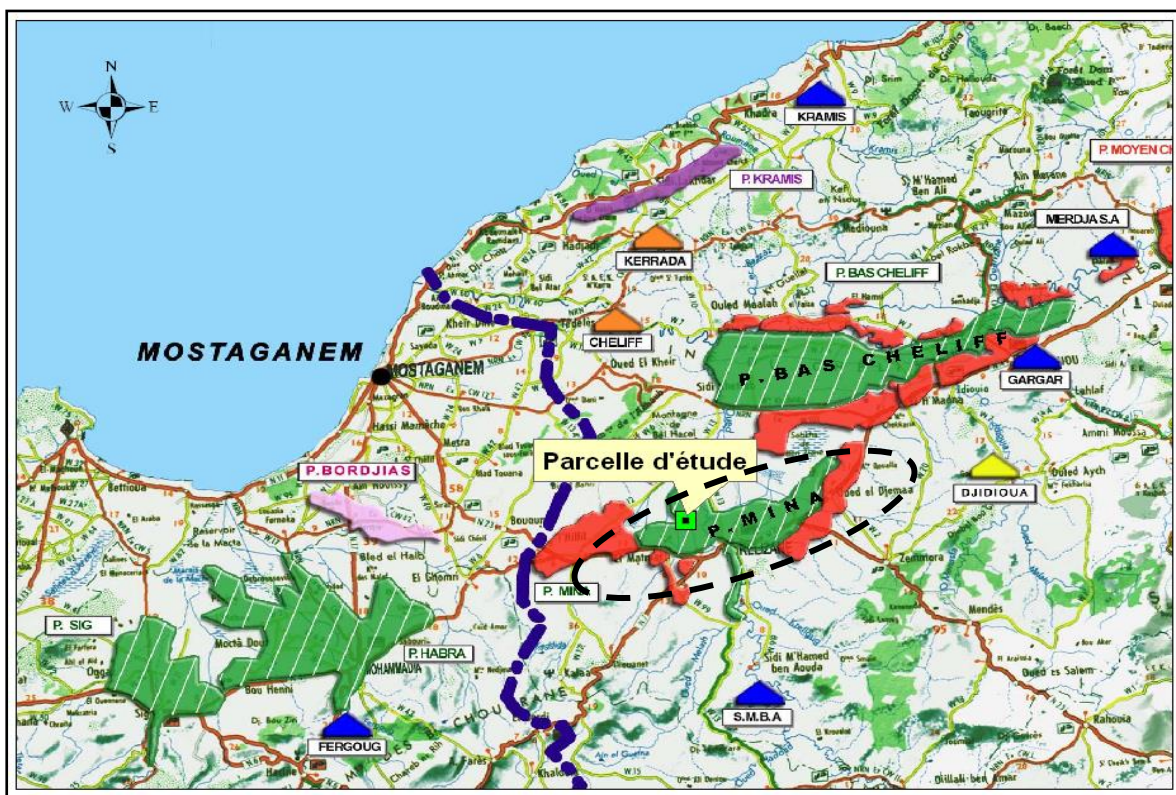


Figure 10. Carte de situation de la plaine de la Mina (Relizane)

### IV.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.

### 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 enregistrés, 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**)

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

**Tableau 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)
Pluie (mm)	11,9	21,2	39,4	28,4	30,4	31,2	28,8	27,2	24,2	5,3	1,5	3,8	<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)
Pluie (mm)	0,7	53,2	86,9	12,5	19,4	66,9	15,1	69,3	4,3	0,1	0,0	0,0	<b>328.5</b>

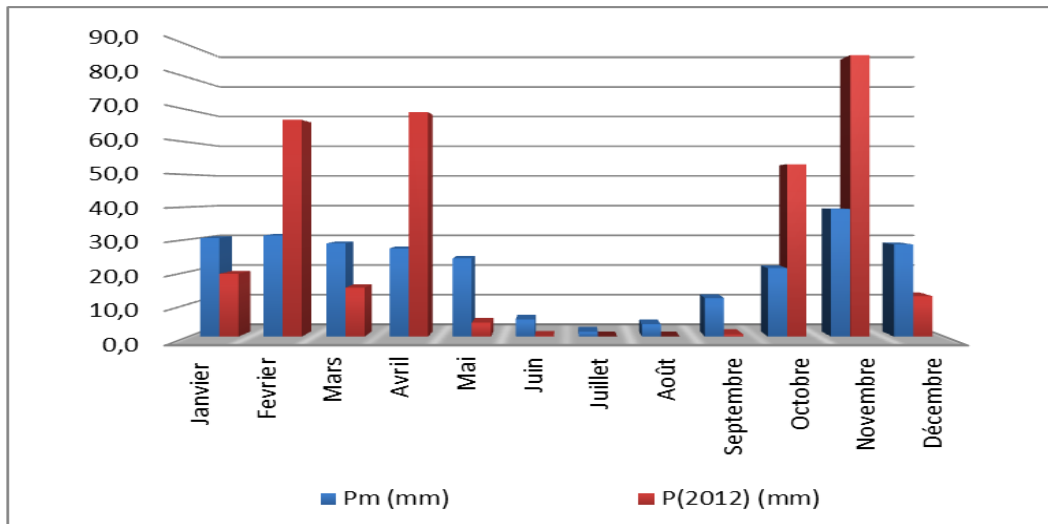


Figure 11. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles

- 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.

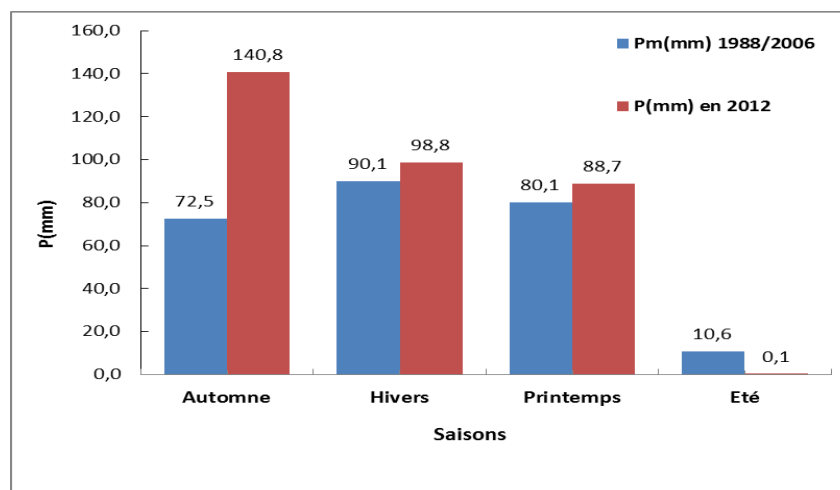


Figure 12. Histogramme du régime saisonnier de la région d'étude

## 2) Les températures

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

Des fortes variations saisonnières sont enregistrées entre le mois le plus chaude 38.9 °C, en Juillet, et le mois le plus froid 6.1 °C, en Janvier, ou la moyenne annuelle est de 20 °C (Tab.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	<b>14.3</b>
M °C	32,5	27,1	23,1	19,3	17,2	18,9	23	24,2	30,1	34,7	38,9	38,5	27,3	
Moy °C	24,2	20,8	15,9	13,6	11,6	12,8	16,1	18,5	22,7	25,8	29,6	29,3	20	

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

### 3) L'évapotranspiration

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

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

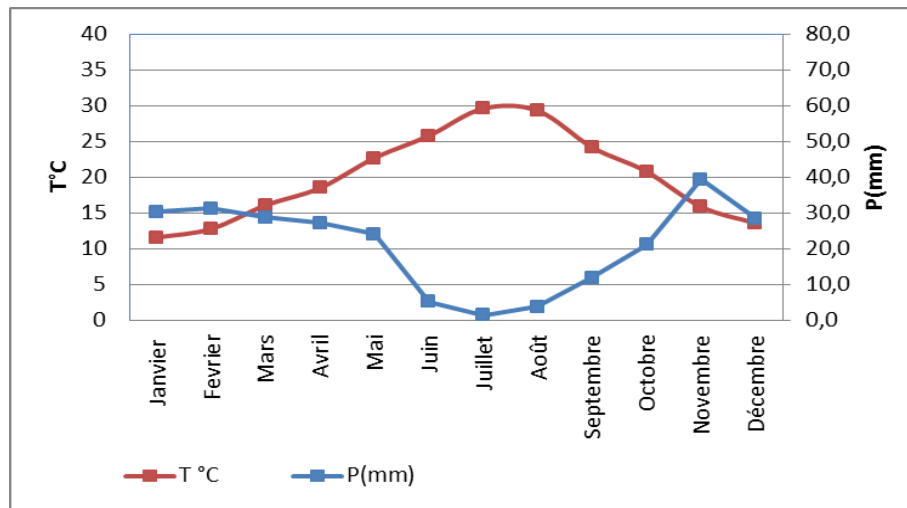
Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
ETP (mm)	44	60	99	137	174	198	231	232	153	98	55	39	<b>1523</b>

### 4) Classification du climat

#### a) Diagramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls

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

La **figure.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)

### b) Climagramme d'Emberger

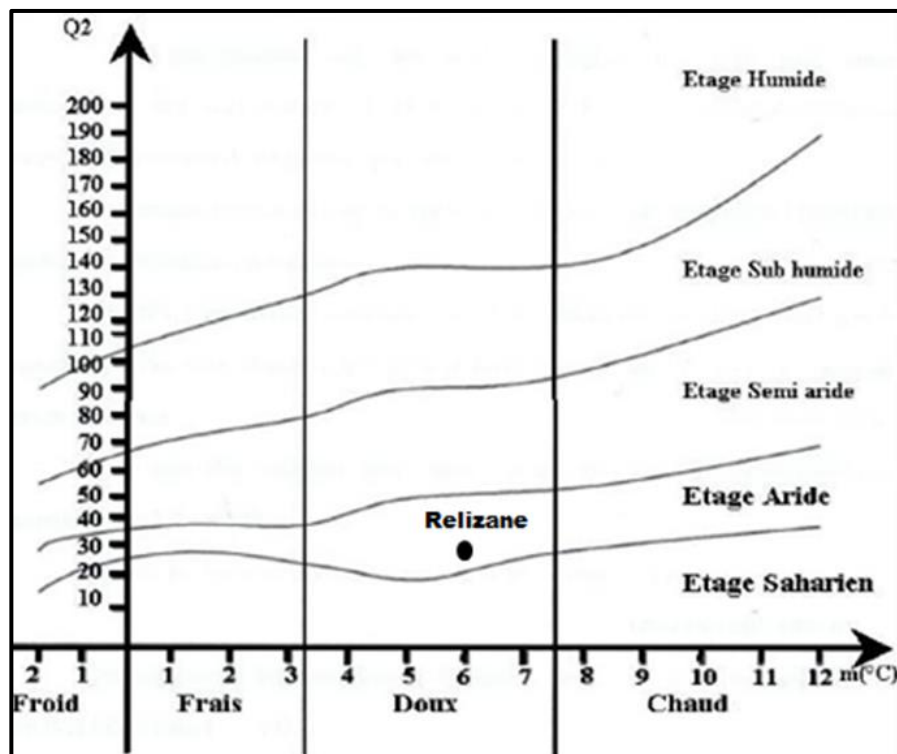
Ce climagramme permet, grâce au quotient pluviométrique de **Stewart (Q)** spécifique au climat méditerranéen, de situer une zone d'étude dans un étage bioclimatique.

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

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

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

Après application de la formule, nous obtenons la valeur de Q égale à 26,5, ce dernier situe Relizane dans l'étage Aride (**Fig.14**).



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

#### IV.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.

#### IV.3. Géologie

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

- **Région de Hillil (Yellel) :** Au nord-ouest, elle est entourée par les monts de Belhacel, qui sont formés de grès pliocène et de sables de désagrégation de ces grès. A l'ouest, on trouve un affleurement de grès recouvert d'une croûte calcaire sur le piedmont. Au sud, les monts de Gerbouça sont formés de grès et marne du pliocène.
- **Région de Touila-Khaourara :** A l'ouest les affleurements sont formés de grès pliocène et de marnes grises du miocène. A l'est, la plaine est séparée de la vallée de la mina par des collines formées de grès et de poudingues.

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

#### IV.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 de oued djemâa, le cône de déjection comporte une texture lourde, alors que dans les zones de Khourara et Yellel, la texture est plus légère. Les couvertures sableuses sont caractérisées par des dépôts sableux épais (plus de 2m) d'origine éolienne qui proviennent des ables de désagrégation des grés pliocènes. La topographie est légèrement ondulée à uniforme. Ces dépôts sont localisés dans la plaine de Yellel au pied du massif de Belhacel.

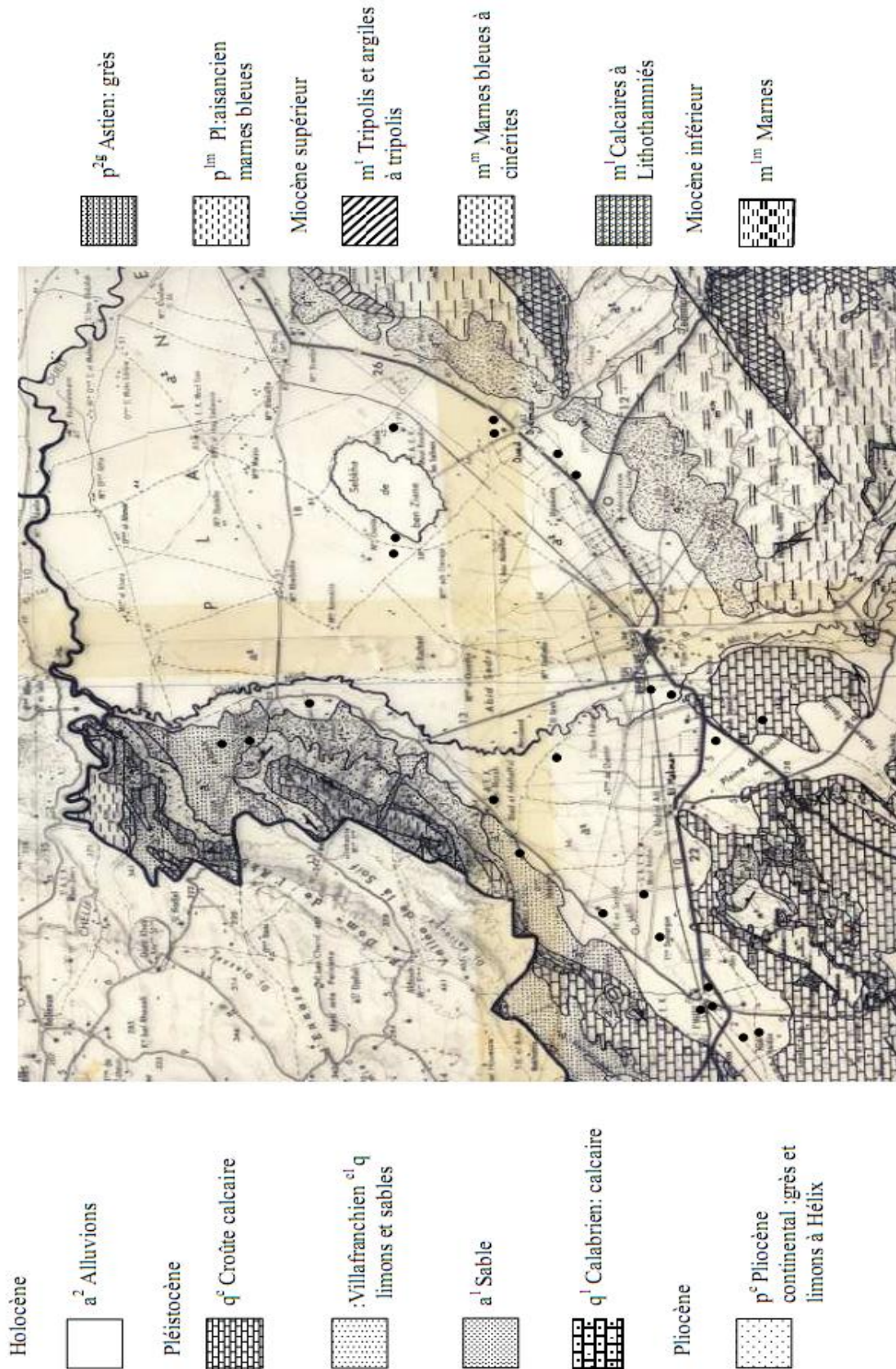


Figure 15. Carte géologique 1/50000 de Relizane (Boualla, 2002)

#### IV.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)

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>

(ANRH, 2003)

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

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>

(INSID, 2008).

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

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

#### **IV.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  $2 \text{ dS.m}^{-1}$ , 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) :

##### **A. Classe des sols peu évolués**

##### **A.I. Sous classe des sols peu évolués non climatiques**

##### **A.I.I. Groupe des sols d'apport alluvial**

##### **A.I.I.I. Sous-groupe des sols Modaux**

##### **A.I.I.I.1. Série : sols profonds**

Ces sols sont localisés, surtout, dans la plaine de Hillil (Yellel) et Mina, en bordure de l'oued. Ils sont poreux avec une structure du sol est peu développée. Leur texture est variable, mais, en général, elle est fine en surface et légère, en profondeur avec des horizons sableux. Dans certaines zones, la texture est grossière sur l'ensemble du profil.

Le taux d'argile, dans les profils, est compris entre 3 et 47%, et celui des sables de 7 à 80%.

Le calcaire total varie de 4 à 33%, la matière organique de 0.9 à 0.36%, le  $\text{P}_2\text{O}_5$  entre 0.4 et 1.1% et le  $\text{K}_2\text{O}$  entre 2 et 4%.

La capacité d'échange cationique varie de 3 à 23.3 meq/100g de sol et la conductivité électrique varie de 1 à  $4.5 \text{ dS.m}^{-1}$

##### **A.I.I.I.2. Série : à pseudo-gley**

Ces sols sont situés sur les bourrelets alluviaux de l'oued Mina. Ils sont mal structurés, mais poreux. Ils présentent une texture fine et sont moyennement profonds. La conductivité électrique est de 2 à 4 dS/m.

**A.I.I.3. Série : sur sols brun calcaire**

Ces sols sont localisés dans la plaine de Yellel. La surface est très limitée. Le sol peu évolué, de texture grossière, recouvre un sol brun calcaire de texture moyenne à 55 cm qui repose sur une croûte calcaire vers un mètre de profondeur. Ce sont des sols faiblement calcaires.

**A.I.I.4. Série : sur sol hydromorphe**

Cette série de sol est localisée dans la région de Yellel, au centre de la plaine, dans une zone déprimée. Leur structure est moyenne, en surface et devient grossière en profondeur.

Le taux d'argile est de 31 à 51% et le taux de calcaire de 18 à 32%.

Ils présentent une conductivité électrique est inférieure à  $1 \text{ dS.m}^{-1}$  (jusqu'à 80 cm de profondeur) et atteint  $2.5 \text{ dS.m}^{-1}$  (de 80 à 120 cm).

**A.I.I.5. Série : sur sol halomorphe**

Ils sont localisés dans la vallée de la Mina, en bordure de l'oued. Ce sont des alluvions récentes qui ont recouverts un sol halomorphe, sur une épaisseur qui varie de 55 à 73 cm.

Leur texture est légère avec un taux d'argile variant de 16 à 48 % et un taux d'argile plus limon de 25 à 79 %. Le taux de calcaire est de 16 à 23% et de la matière organique de 0.31 à 0.8 %.

La conductivité électrique est inférieure à  $2.7 \text{ dS.m}^{-1}$  (entre 0 et 50cm) et varie de 3.8 à  $14 \text{ dS.m}^{-1}$  (entre 50 et 120cm).

**A.I.I.II. Sous-groupe des sols modaux à faciès verticale****A.I.I.II.1. Série : Sols profonds**

Ils sont localisés dans la plaine de Yellel. Ils sont caractérisés par une structure polyédrique moyenne à grossière mal développée. Leur texture est très fine avec un taux d'argile de 29 à 55% et un taux d'argile plus limons de 58 à 77%. Le taux de calcaire est de 18 à 34%.

Leur conductivité électrique est inférieure à  $1 \text{ dS.m}^{-1}$  (0 à 50 cm) et varie de 1 à  $3.2 \text{ dS.m}^{-1}$  (50 à 120 cm).

**A.I.I.III. Sous-groupe des sols à pseudo-gley****A.I.I.III.1. Série des sols profonds**

Dans ce cas, l'hydromorphie apparaît vers 50 cm. Le sol est très poreux et sa texture est moyenne avec des lentilles sableuses en profondeur.

Le taux de calcaire est de 14 à 21 % et la conductivité électrique est inférieure à  $2 \text{ dS.m}^{-1}$ .

**A.I.I.IV. Sous-groupe des sols à pseudo-gley****A.I.I.IV.1. Série : Sols profonds**

Ils sont localisés dans la région de Yellel, dans les zones basses et dans les cônes de déjection des autres plaines. Ils sont très lourds avec une structure polyédrique grossière ou en plaquette

avec des facettes lissées. Ils sont très compacts et faiblement poreux et à l'état sec, ils présentent des fentes de dessiccations.

Le taux d'argile varie de 31 à 84 % avec un taux de sable de 4 à 16 %. Le calcaire varie de 18 à 27% et la matière organique de 0.6 à 1%.

Leur conductivité électrique est inférieure à 2.2 dS.m<sup>-1</sup> et le pH est de 7.7 à 7.9, avec une CEC variant de 9.8 à 27 meq/100g.

#### **A.I.IV.2. Série : sur sol brun calcaire vertique**

Ils sont de même que les sols de la série précédente. Ils sont mal structurés et leur texture est fine. Ils recouvrent un sol brun calcaire très argileux (plus de 50% d'argile à 50 cm), avec une accumulation de calcaire sous forme d'amas en profondeur.

Le taux d'argile varie de 37 à 40%. Ils sont calcaires et faiblement salés.

#### **A.I.IV. Sous-groupe : halomorphe**

##### **A.I.IV.1. Série : Sols profonds**

Ils sont localisés dans la plaine Touila khaourara, Mina et Yellel à la limite de la zone salée.

Leur texture est fine et leur structure est polyédrique fine à moyenne et devient grossière, à partir de 50 cm, parfois vertique avec des caractères d'hydromorphie. Dans certaines zones, ils présentent une accumulation de calcaire sous forme d'amas pulvérulents.

Le taux d'argile est de 35 à 40% et le calcaire est de 19 à 29%.

Leur conductivité électrique varie de 1.2 à 5.9 dS.m<sup>-1</sup>(de 0 à 50 cm) et de 3.2 à 15 dS.m<sup>-1</sup>(de 50 à 120 cm).

#### **A.I.IV. Sous-groupe : vertique halomorphe**

##### **A.I.IV.1. Série : Sols profonds**

Ils sont situés dans la plaine de Yellel, et surtout dans la plaine de Khaourara. Ils présentent une structure vertique et sont moyennement salés ou alcalisés. Leur texture est très fine, surtout dans les horizons de surface. Ils sont faiblement poreux.

Le taux d'argile est de 38 à 58% avec un taux de calcaire de 14 à 24 %. La conductivité électrique varie de 1 à 3 dS.m<sup>-1</sup>(de 0 à 50cm) et 2.5 à 4.9 dS.m<sup>-1</sup>(de 80 à 120 cm).

### **B. Classe des sols calcimagnésiques**

#### **B.I. Sous classe des sols carbonatés**

##### **B.I.I. Groupe des rendzines**

##### **B.I.I.1. Série : sols profonds**

Ce sont des sols bien structurés, de texture moyenne, assez riches (1.2% de matière organique de 0 à 50cm). Ils reposent sur une croûte ou encroûtement calcaire (parfois nodulaires) sur 50 cm. Leurs horizons de surface sont souvent riches en inclusions (cailloux)

**B.I.II. Groupe des sols bruns calcaires****B.I.II.I. Sou –groupe : modaux****B.I.II.I.1. Série : sols profonds**

Ce sont les meilleurs sols de la Mina. Ils sont localisés dans les plaines d'oued Djemaa et Yellel.

Ils sont assez riches et profonds ; leur structure est grenue à polyédrique fine, leur texture est fine en surface à moyenne, en profondeur. Ils sont très poreux.

Leur taux d'argile varie de 11 à 35%. Le calcaire varie de 12 à 36% et la matière organique de 0.2 à 1.7%.

Leur conductivité électrique est inférieure à  $2 \text{ dS.m}^{-1}$  (0 à 80cm) et varie entre 0 et  $4 \text{ dS.m}^{-1}$  (80 à 120 cm). Le pH varie de 7.6 à 8.

La CEC de ce type de sol varie de 8.8 à 23.8 meq/100g, le  $\text{P}_2\text{O}_5$  de 0.56 à 1.4% et le  $\text{K}_2\text{O}$  de 4 à 8%.

**B.I.II.I.2. Série : halomorphes en profondeur**

Ce sont les mêmes sols que la série précédente, mais ils présentent des caractères de salure à partir de 80 cm.

La conductivité électrique est inférieure à  $2 \text{ dS.m}^{-1}$  (de 0 à 80cm) et de 4 à  $9 \text{ dS.m}^{-1}$  en profondeur.

**B.I.II.I.3. Série : à accumulation calcaire**

Ce sont des sols à horizon d'accumulation de calcaire sous forme de nodules ou d'amas à partir de 50cm de profondeur.

Ils sont assez riches et bien structurés avec une texture moyenne. Le taux d'argile est 25 à 46%. Le calcaire est inférieur à 11% (0 à 25cm) et supérieur à 19% (> 50cm) avec un pH variant de 7.7 à 7.9. Le taux de matière organique est supérieur à 1% (0 à 50cm) et de 0.3% à partir de 50cm.

La conductivité électrique est très faible.

**B.I.II.I.4. Série : à accumulation calcaire**

Ces sols sont localisés dans la plaine de Yellel et présentent une extension limitée. Le sol brun calcaire repose sur un sol vertique vers 50cm de profondeur. La texture est fine sur les 50 premiers centimètres ; elle est équilibrée dans le sol vertique.

Le taux d'argile varie 27 à 44%, avec un taux d'argile plus limons variant entre 41 et 52 %. Le taux de calcaire est de 7 à 25%. Alors que la conductivité électrique est inférieure à  $1.4 \text{ dS.m}^{-1}$ .

**B.I.II.1.5. Série : sur encroûtement (encroûtement de nappe)**

Ces sols sont identiques à ceux de la série précédente sauf qu'ils ont un encroûtement calcaire variant entre 40 et 90cm. Ils sont localisés dans le centre de la plaine de Yellel, le long de la voie ferrée.

Leur structure est grenue, en surface à polyédrique fine en profondeur. La texture est moyenne à fine.

**B.I.II.II. Sous-groupe des sols vertiques****B.I.II.II.1. Série des sols profonds**

Ces sols sont localisés dans la plaine de l'Oued Djemaa. Ils sont caractérisés par une structure verticale et texture fine à très fine. Leur porosité est faible et la texture varie de 32 à 57 %.

Le calcaire varie entre 9 et 36% et la conductivité électrique est inférieure à  $1.5 \text{ dS.m}^{-1}$  (0 à 80 cm) et entre  $0.7$  à  $4.6 \text{ dS.m}^{-1}$  (80 à 120 cm).

**B.I.II.III. Sous-groupe des sols halomorphes****B.I.II.III.1. Série : sols profonds (ou accumulation calcaire en profondeur)**

Ces sols sont localisés dans la plaine de la Mina et Oued Djemaa, leur texture est fine et leur structure est grenue, en surface, à polyédrique fine à grossière, en profondeur.

Le taux d'argile varie entre 30 à 45%, avec un taux d'argile plus limons fins variant entre 51 et 70%. Le calcaire varie entre 13 et 22% et la matière organique de 0.4 à 1.4%.

Leur CEC varie de 15 à 27 meq/100g. Alors que leur conductivité électrique est inférieure à  $1.4 \text{ dS.m}^{-1}$  (0 à 50 cm) et varie de 2 à  $5.4 \text{ dS.m}^{-1}$

**B.I.II.III.2. Série : à encroûtement de nappe**

Cette série est localisée dans la région de Yellel, le long de la voie ferrée, sur une faible surface. L'encroûtement qui est à 83 cm repose sur une croûte de nappe à 118 cm.

Le taux de matière organique varie entre 1.1 et 1.9 % et la conductivité électrique croit de  $1.6 \text{ dS.m}^{-1}$ , en surface, à  $7.7 \text{ dS.m}^{-1}$ , en profondeur.

**B.I.III. Groupe des sols bruns calciques****B.I.III.I. Sous-groupe des Rendzines brunifiées modales****B.I.III.I.1. Série : sur croûte**

Sols peu épais reposants sur une croûte calcaire à une profondeur inférieure à 30cm.

**C. Classe des Sols Isohumiques****C.I. Sous classe des sols Marrons à complexe saturé****C.I.I. Groupe des sols Marrons Isohumiques****C.I.I.I. Sous-groupe : modal (à faciès recalcarifié)**

**C.I.I.I.1 Série : Profonds**

Ils sont localisés dans les plaines. Ils sont riches bien structurés et profonds. Leur taux en matière organique est de 1.2 à 1.8 %, en surface, et 0.4 à 0.6 %, en profondeur. Leur CEC est de 10 à 26 meq/100g.

Leur taux de calcaire est de 2 à 33%. Dans certains sols, les horizons de surface sont recalcarifiés par les labours profonds ou par les eaux de ruissellement.

**C.I.I.I.2. Série : à accumulation calcaire**

Ces sols sont identiques à la série précédente, sauf qu'ils présentent un horizon d'accumulation calcaire sous forme de nodules et d'amas à une profondeur variant de 50 à 115cm.

**C.I.I.I.2. Série : à encroûtement calcaire**

Ils ont un encroûtement calcaire le plus souvent très friable ou un encroûtement à nodules sur 45 à 85 cm. Ils sont bien structurés et leur texture est moyenne.

Le taux de matière organique est 1 à 1.3 % et la CEC varie entre 12 et 18 meq/100g.

**D. Classe des sols halomorphes****D.I. Sous classe des sols halomorphes à structure dégradée****D.I.I. Groupe des sols à alcalis****D.I.I.I. Sous-groupe : moyennement ou peu salins****D.I.I.I.1. Série : sols profonds**

Sols localisés dans les plaines de la Mina, Touila, Khaourara, et, au sud de la Sebkha de Benziane.

Leur structure est dégradée et leur texture est très fine (41 à 53% d'argile), lorsqu'ils sont situés, au centre des plaines ; à proximité de l'Oued, la texture devient plus légère (25% d'argile). Le taux argile plus limons fin varie entre 71 et 90%. Alors que le taux de sable est inférieur à 12%.

La conductivité électrique varie entre 2 et 9 dS.m<sup>-1</sup>(0 et 50 cm) et entre 5 et 18 dS.m<sup>-1</sup>(50 à 120 cm).

**E. Classe des sols hydromorphes****E.I. Sous classe des sols hydromorphes peu humifères****E.I.I. Groupe des sols à pseudo-gley****E.I.I.I. Sous-groupe des sols à pseudo-gley halomorphes**

**E.I.I.I.1. Série : Profonds**

Ces sols sont localisés dans la plaine de la Mina à la limite des sols halomorphes. L'hydromorphie remonte jusqu'en surface. La texture est très fine (argile > 47 %). La conductivité électrique est de 5 dS.m<sup>-1</sup> (de 0 à 70cm) et de 9 dS.m<sup>-1</sup> (de 70 à 150 cm)

**E.I.I.I.2. Série : à nappe**

Ces sols sont situés dans la zone est de la plaine de Yellel. La nappe est à une profondeur de 85cm. Sa formation est due aux irrigations abondantes et à une absence de réseau de drainage.

**IV.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

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

(INSID, 2008)

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 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)

<b>Occupation du sol</b>	<b>Superficie (%)</b>
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>

Tapez une équation ici. **IV.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.

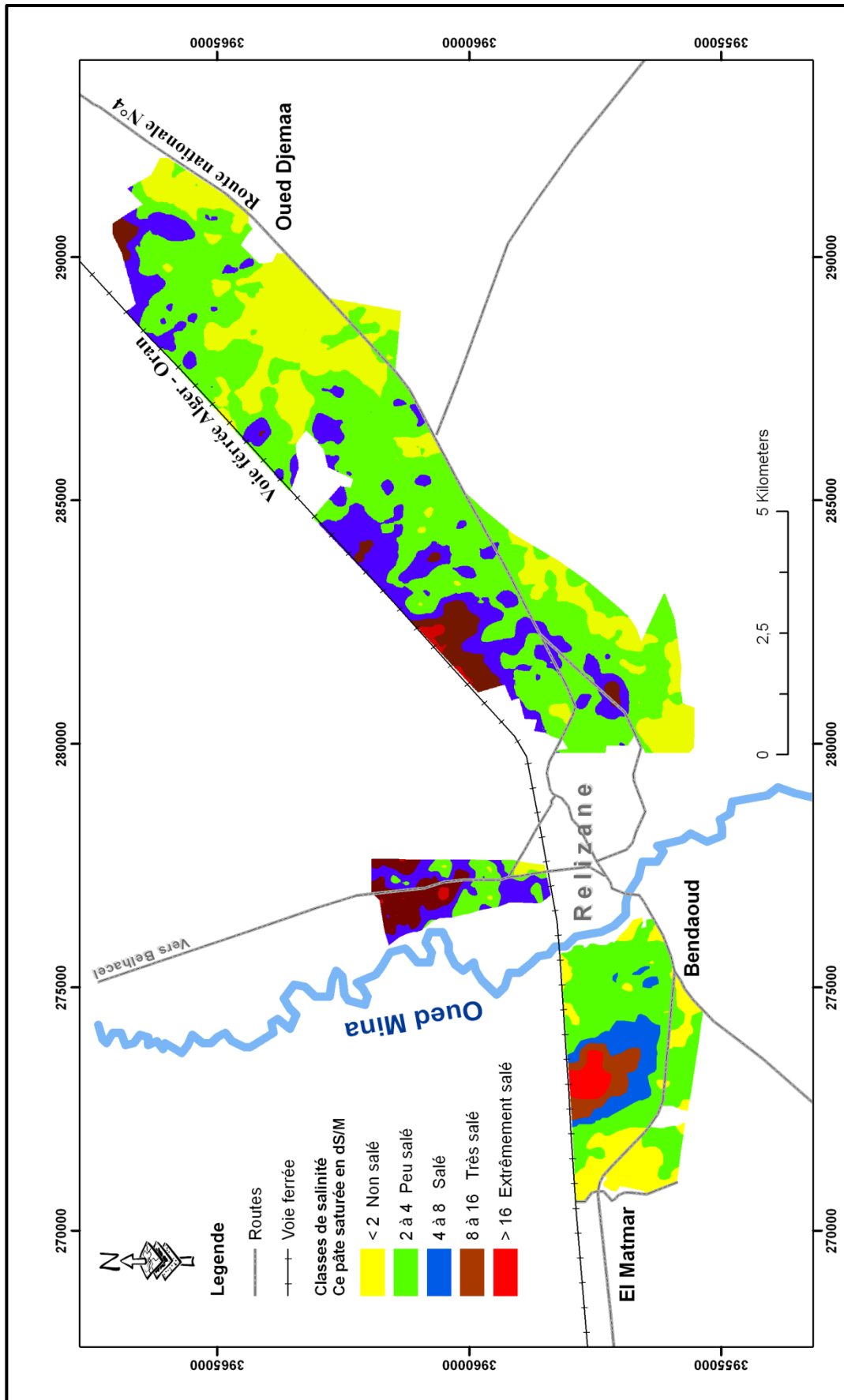


Figure 16. Carte de salinité des sols du périmètre irrigué de la Mina sur 6000 Ha (INSID, 2008)

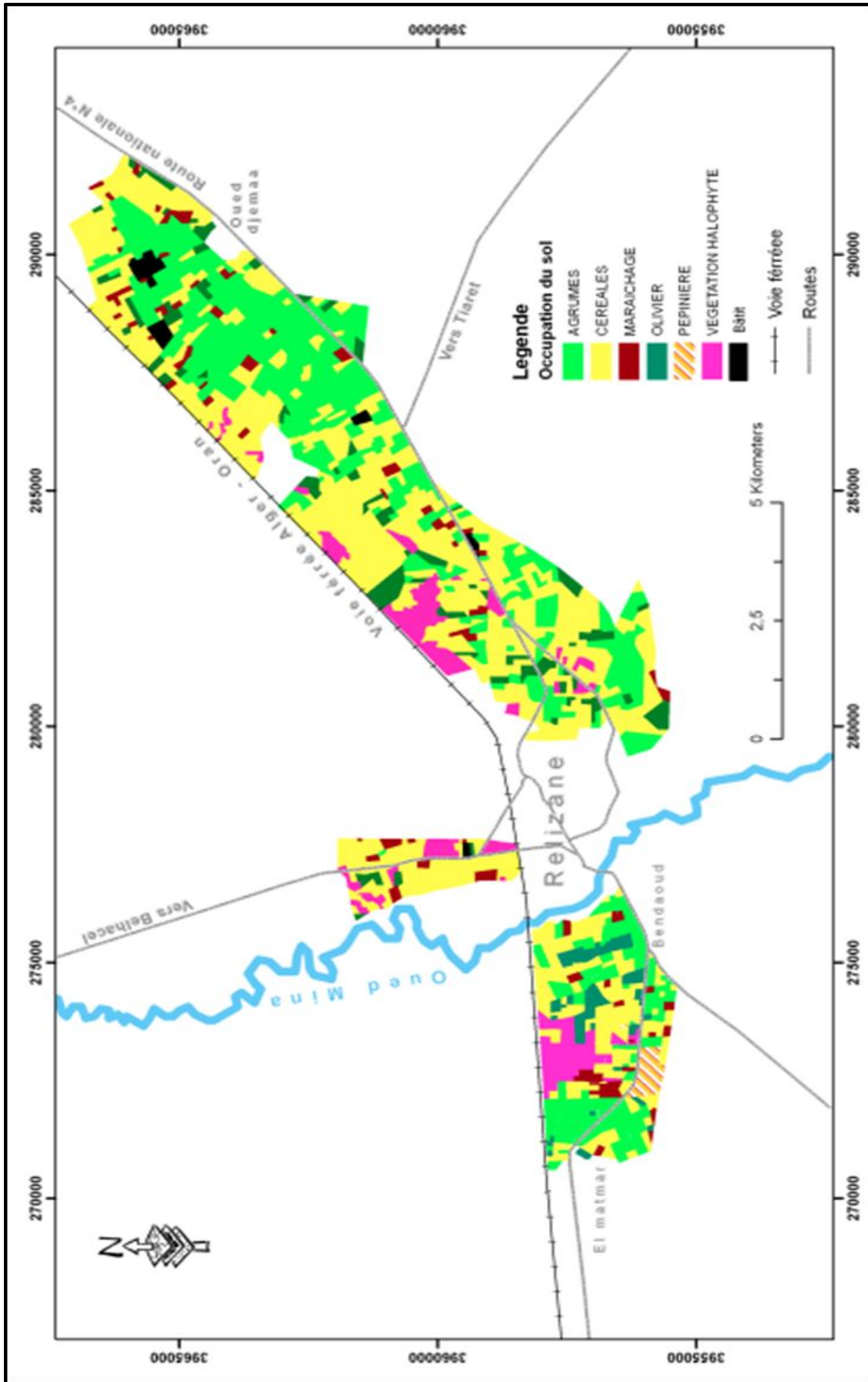


Figure 17. Carte d'occupation des sols du périmètre irrigué de la Mina sur 6000 Ha (INSID, 2008)

# Chapitre IV

## Matériel & Méthodes

## Chapitre V. 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.

### V.1. Matériel

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

Cette parcelle présente une superficie de 11,3 ha, et elle est occupée par une culture d'Oliviers et une culture d'Avoine (Fig.19)

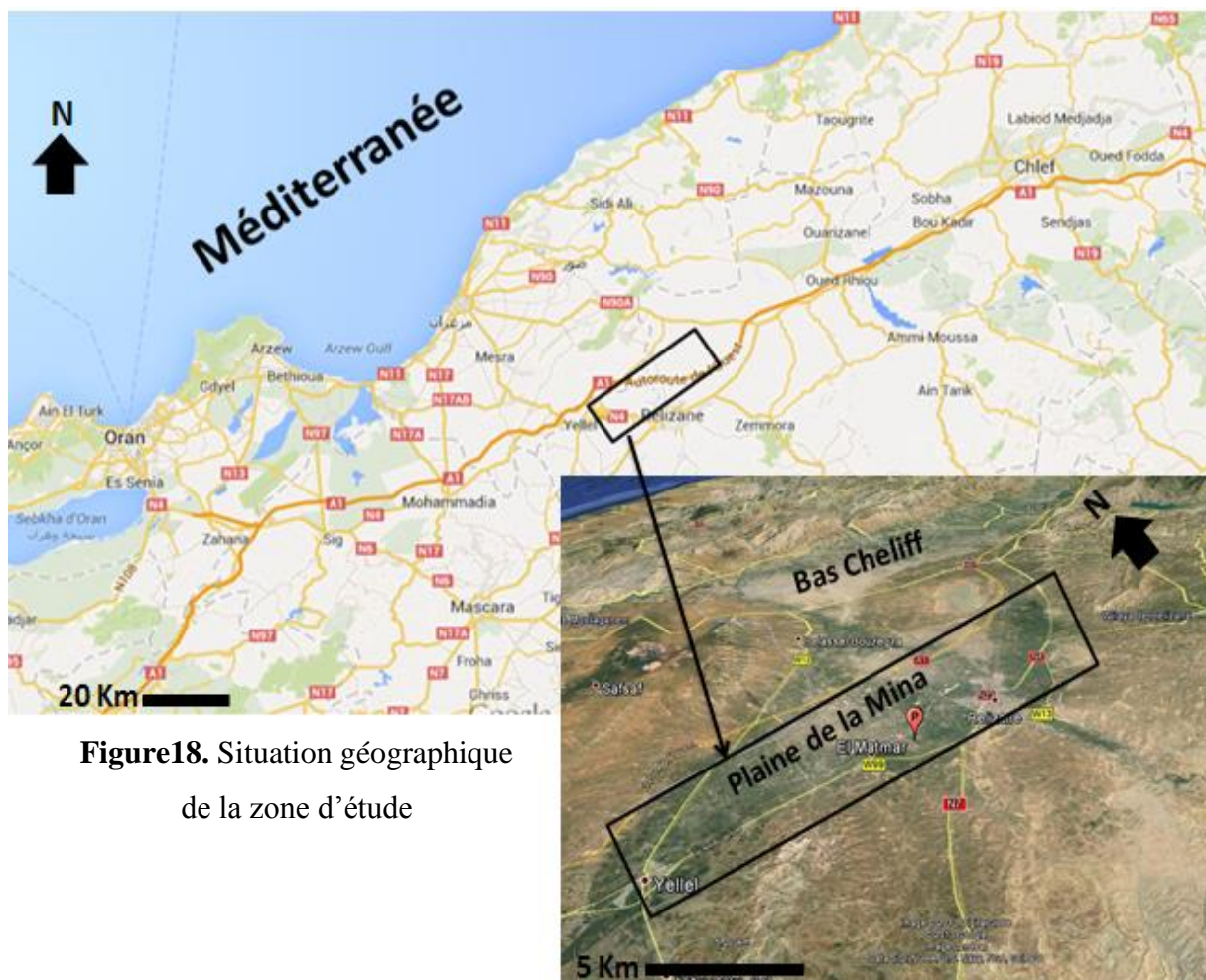


Figure18. Situation géographique de la zone d'étude

La prospection sur terrain par l'appareil de mesure EM38 a montré des variations de la salinité sur les sols de la parcelle. Les mesures électromagnétiques, réalisées sur ces zones nous ont permis, de suggérer la division du terrain en trois zones. La carte a fait ressortir trois zones de différents niveaux de salinité :

1. **Une zone A** : localisée au sud-ouest de la parcelle et correspond aux **faibles valeurs** de la salinité;
2. **Une zone B** : localisée à l'est et au centre, juste avant le drain tertiaire se trouvant au milieu de la parcelle et correspond aux **fortes valeurs** de la salinité;
3. **Une zone C** : localisée au nord de la parcelle, après le drain tertiaire et correspond à des **valeurs extrêmes** de la salinité;

Un profil pédologique représentatif a été implanté, au niveau de chaque zone :

- **Le profil A** : représentant la zone A, caractérisée par une faible salinité avec des valeurs de l'EM38 inférieures à  $100 \text{ dS.m}^{-1}$  ;
- **Le profil B** : représentant la la zone B, caractérisée par une forte salinité avec des valeurs de l'EM38 situées entre 100 et  $200 \text{ dS.m}^{-1}$  ;
- **Le profil C** : représentant la zone C, caractérisée par une extrême salinité avec des valeurs de l'EM38 supérieures à  $200 \text{ dS.m}^{-1}$ .



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



Photo 1. Vue générale de la parcelle d'étude

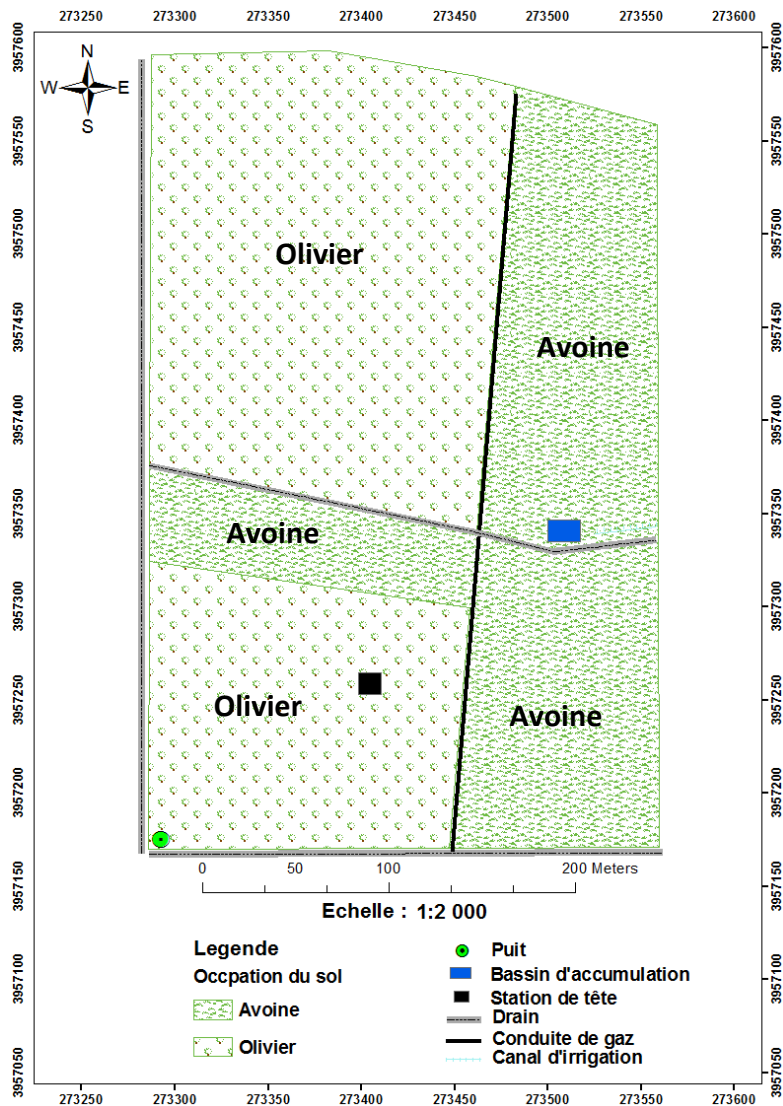


Figure 20. Occupation du sol de la parcelle d'étude

## V.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.

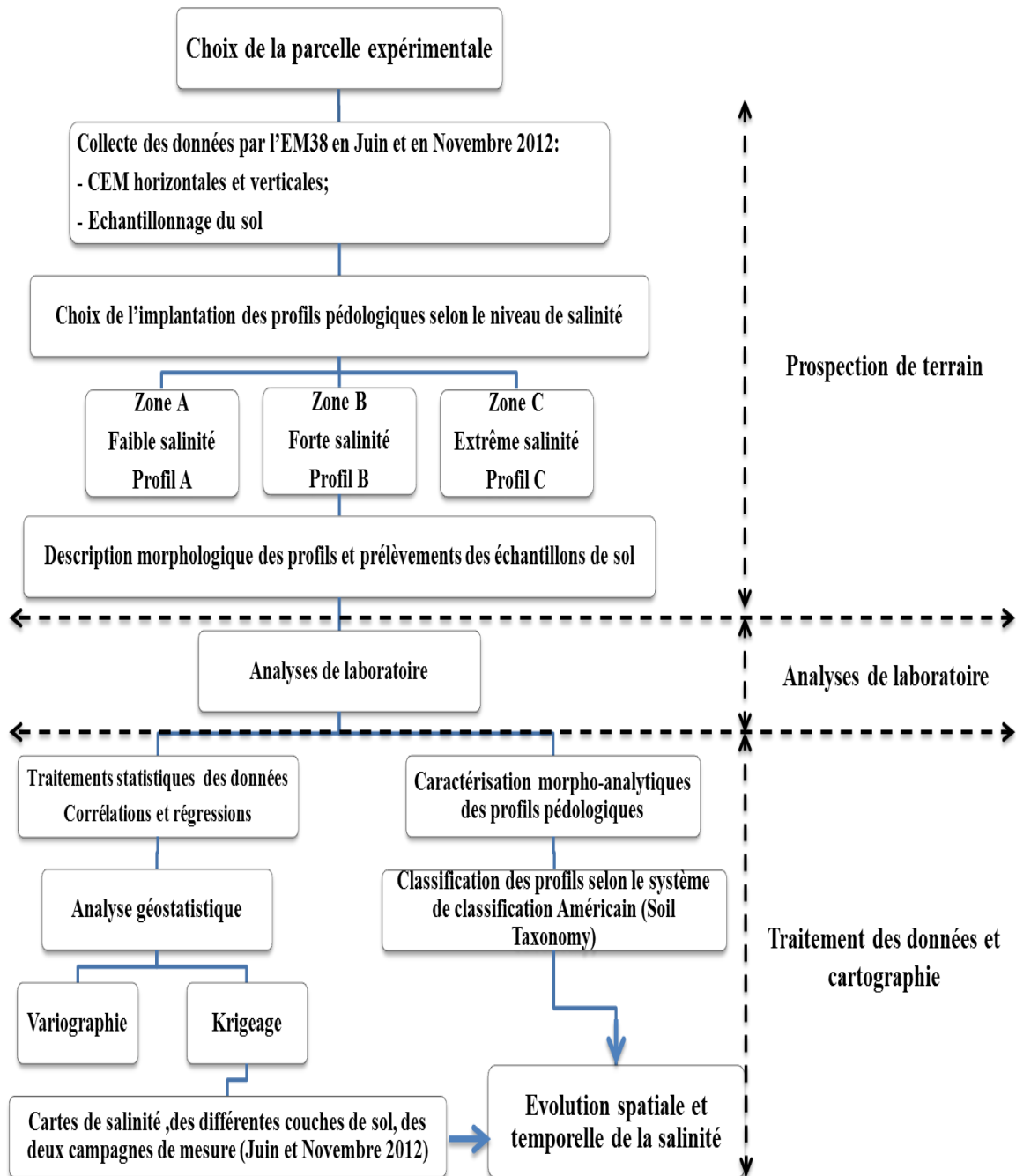


Figure 21. Démarche méthodologique

### V.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).

### **V.2.2. Prospection de terrain**

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

Après la délimitation de la parcelle, par le biais d'un GPS de navigation de type GARMIN, nous avons établi un plan de cette parcelle, par l'utilisation du logiciel ARC-GIS, sur lequel nous avons définis un plan d'échantillonnage selon une grille régulière de 10 m x 10 m, afin de positionner 910 points de mesures de l'EM38 et 20 points de prélèvements des échantillons de sol. Ainsi, nous avons créé une base de données numérique que nous avons intégrée dans un système d'information géographique.

La prospection sur terrain a nécessité, l'utilisation du conductivimètre électromagnétique (EM38) pour la cartographie de la salinité et une tarière pédologique pour le prélèvement des échantillons de sol. Nous avons réalisé deux campagnes de mesures par l'EM38, dans la même parcelle (en Juin 2012 et en Novembre 2012), afin de suivre l'évolution spatio-temporelle de la salinité. Ensuite, nous avons procédé à l'étude des sols par l'ouverture de trois fosses pédologiques représentant trois zones de différents niveaux de salinité, par une description détaillée des profils.

### **V.2.3. Utilisation de l'EM38 pour la cartographie de la salinité**

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

- **Le premier, concerne les données à calibrer** et comporte les mesures au champ de la conductivité électromagnétique (CEM) du sol par l'appareil de mesure EM38 de

Geonics, en 910 points de mesures sur une grille régulière de 10 m x 10 m visant à couvrir toute la parcelle d'étude. Les lectures verticales et horizontales de l'EM38 ont été obtenues en maintenant l'appareil au-dessus de la surface du sol, pour les hauteurs (0 cm, 50 cm, 75 cm, 100 cm et 125 cm) (**Photo.2 et Fig.22**);

- **Le second, concerne, les données de calibrage**, et correspond à 20 points de mesure sélectionnés parmi les 910 points de mesure mentionnés ci-dessus de façon à représenter spatialement toute la zone d'étude et, implicitement, à couvrir la gamme de conductivité électrique apparente du sol(**Fig.24**). Des échantillons de sol ont été prélevés jusqu'à une profondeur de 100 cm par incréments de 25 cm pour déterminer la conductivité électrique de la pâte saturée ( $CE_{ps}$ ) au laboratoire (**Fig.23**)

Vue la profondeur d'investigation de l'EM38, en position horizontale (0.75cm), seules les lectures verticales 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 mesuré. La meilleure méthode consiste à intervenir après des pluies importantes qui homogénéisent les profils hydriques des sols (**Job et al, 1990**).

Afin de suivre l'évolution spatio-temporelle de la salinité, la prospection de la salinité, sur terrain s'est déroulée, sur deux campagnes de mesures :

- **En Juin 2012 (après la période pluvieuse)** : correspondant à un maximum de pluviométrie, pendant cette période;
- **Novembre 2012 (après la période sèche)** : correspondant à une période de sécheresse et d'irrigation des sols.



**Photo 2.** Utilisation de l'EM38

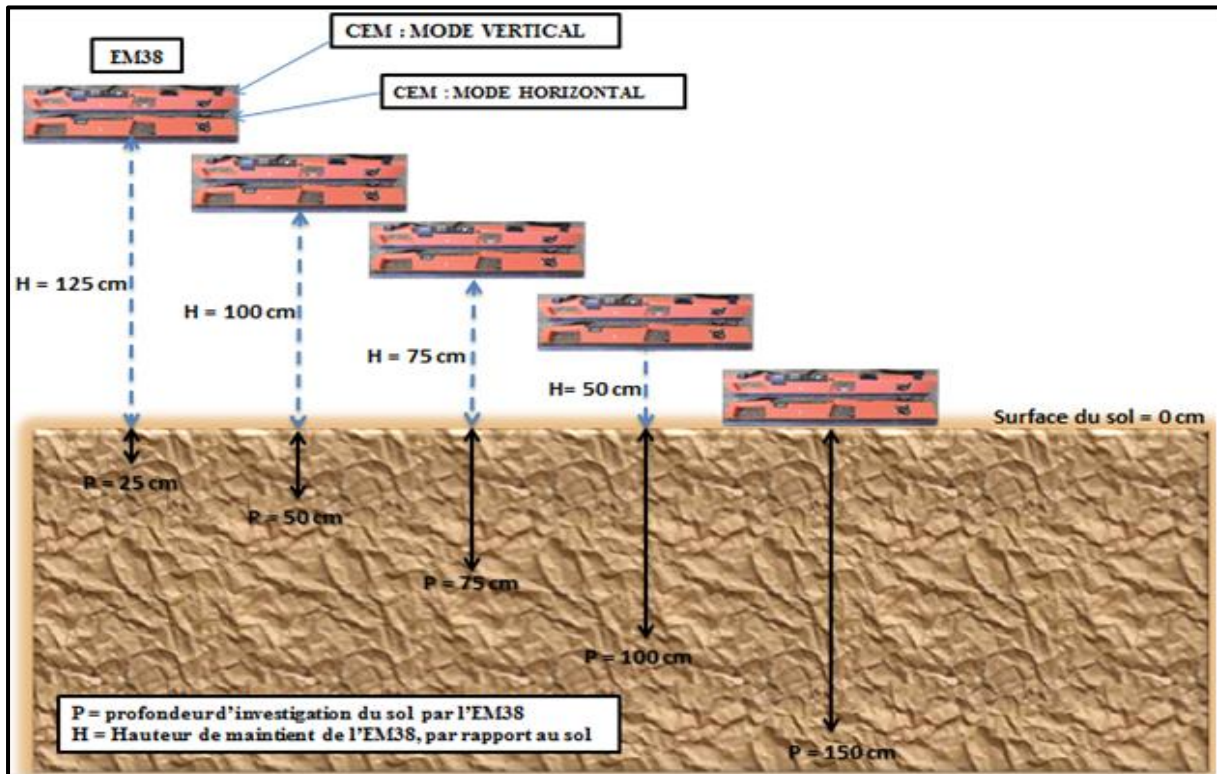


Figure 22. Lectures verticales et horizontales de l'EM38 à différentes hauteurs

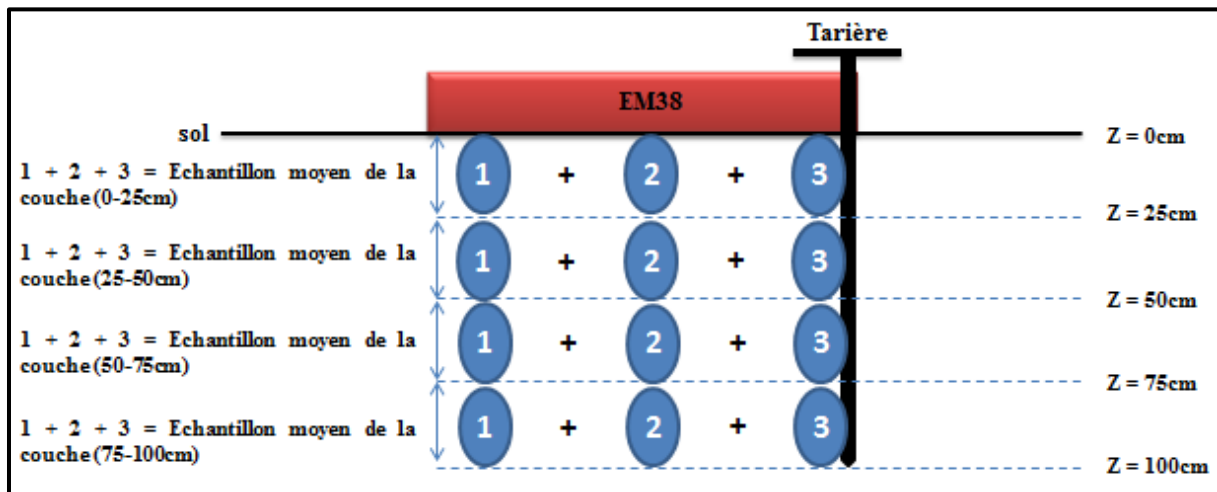


Figure 23. Méthode de prélèvement des échantillons de sol

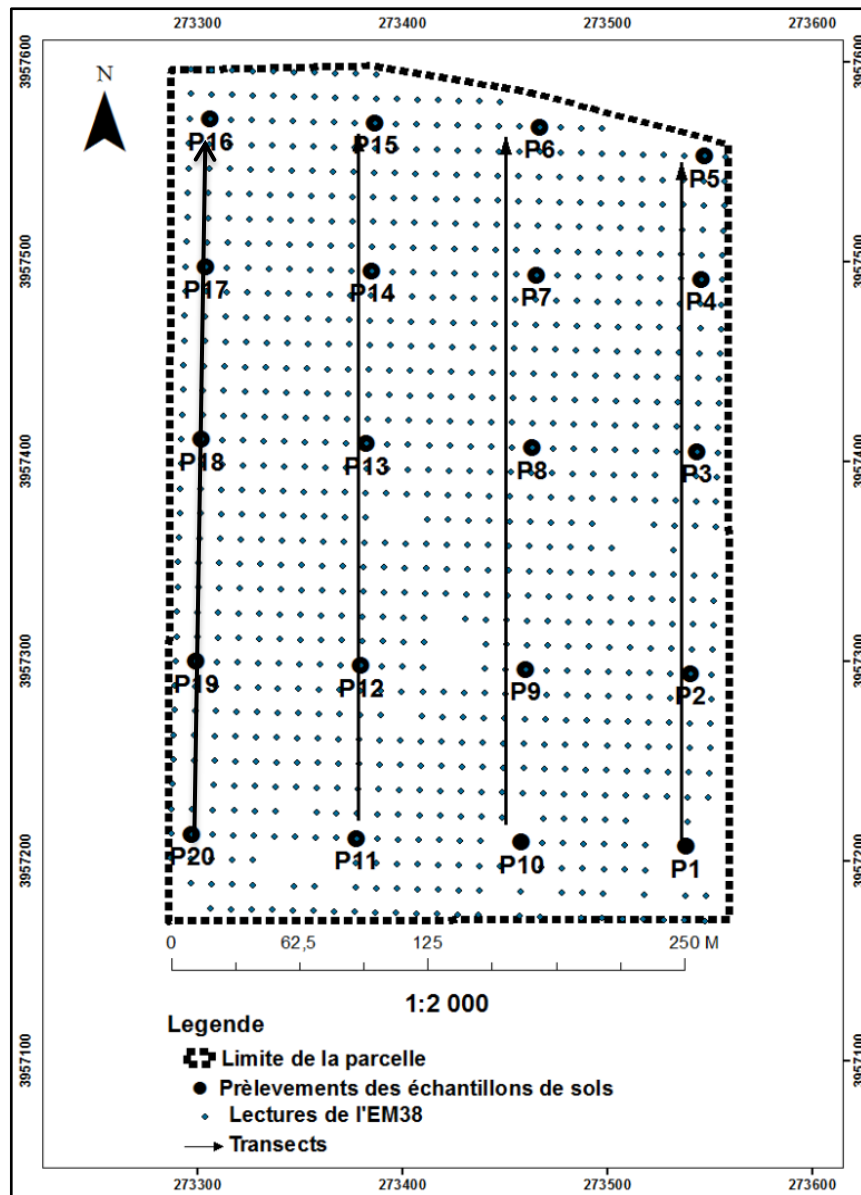


Figure 24. Plan d'échantillonnage

#### V.2.4. Etude des sols de la parcelle

L'étude des sols a été effectuée, le 16 Septembre de l'année 2012. Trois fosses pédologiques de 150 cm de profondeur ont été ouvertes, et leur description a été réalisée selon les paramètres suivants : l'épaisseur de l'horizon, la couleur, l'humidité, les propriétés mécaniques, les tâches, les revêtements, les cristaux, les nodules, les ciments, les fentes, les éléments grossiers, la texture, la structure, l'effervescence à l'Hcl, la porosité, la salure, la matière organique, l'enracinement, les traces d'activités.

Pour chaque horizon, délimité, des échantillons de sol ont été prélevés, en commençant par les horizons sous-jacents, vers les horizons de surface, pour éviter de contaminer les échantillons issus des horizons de profondeur.

Les échantillons de sol prélevés ont été codés et mis dans 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).

### **V.2.5. Analyses de laboratoire**

Une fois les échantillons de sol séchés, broyés et passés sur des tamis à maille carrée de 2mm, nous avons procédé aux mesures de la granulométrie, du pH, de la CE, du calcaire, du gypse, du carbone, de la CEC, des cations échangeables et des sels solubles

#### **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<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 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 µm) et fins (2 à 20 µm) ; les argiles (0 à 2 µm), les sables fins (50 -200µm) et grossiers (200-2000µm).
- La mesure du pH a été effectuée par un pH-mètre, avec un rapport sol – eau est de 1/2.5. La valeur du pHeau (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<sup>-1</sup>, 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<sub>ps</sub>) exprimée en dS/m ;
- Le dosage du calcaire total (en %) a été réalisé par le calcimètre Bernard ;
- Le carbone organique (en g.kg<sup>-1</sup>) : dosage par la méthode Ane ;
- La matière organique : déterminé par dosage du carbone organique en appliquant la formule (M0% = C \*1,72);

- Le gypse (en %) est dosé par la méthode de précipitation par le chlorure de baryum et calcination pendant 2h, au four à moufle;
- 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 ( $\text{AgNO}_3$  en  $\text{meq.l}^{-1}$ ) en présence de chromate de potassium ;
  - ✓ Les carbonates ( $\text{CO}_3^{-2}$  en  $\text{meq.l}^{-1}$ ) et les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$  en  $\text{meq.L}^{-1}$ ) sont dosés par titrimétrie avec du  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ;
  - ✓ Les sulfates ( $\text{SO}_4^{-2}$  en  $\text{meq.l}^{-1}$ ) sont dosés par la méthode gravimétrique par précipitation sous forme de sulfate de Baryum ( $\text{BaSO}_4$ ) ;
- 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  $\text{meq}/100\text{g}$  de sol) sont dosés, par l'absorption anatomique ;
- La détermination des bases échangeables et la capacité d'échange par la méthode de Bower modifiée ;
  - ✓ L'extraction des cations échangeables ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ) par l'Acétate de sodium à pH 8.2 ;
  - ✓ Le déplacement du  $\text{Na}^+$  par l'Acétate d'ammonium à pH 7 (après trois lavage à l'alcool afin d'éliminer l'excès de  $\text{Na}^+$ ) ;
  - ✓ Le dosage, ensuite, du  $\text{Na}^+$  issu de ce déplacement qui représente la valeur de la CEC (exprimée en  $\text{meq}/100\text{g}$  de sol).

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

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

### ➤ Réalisation de l'extrait de pâte saturée

- Dans une capsule de porcelaine on pèse 200g de sol. Ensuite, à l'aide d'une éprouvette graduée remplie d'eau distillée, on humecte le sol et on le mélange à l'aide d'une spatule, on ajoutant avec précaution de l'eau jusqu'à l'obtention d'une pâte satisfaisant les conditions suivantes :
  - ✓ Elle doit couler lentement, lorsqu'on incline la capsule ;
  - ✓ Sa surface doit être brillante ;

- ✓ Elle doit se détacher librement de la spatule.
- On note le volume d'eau versé.
- On rassemble cette boue au fond de la capsule en ménageant un trou de 2 à 3 cm<sup>3</sup>. Après une heure, si de l'eau s'est rassemblée dans le creux, le point de saturation a été dépassé, il convient d'ajouter de la terre (on notant le poids) et de renouveler les trois tests précédents.
- On laisse reposer pendant 4 heures en couvrant d'un papier filtre humide ou d'un film plastique fin pour éviter l'évaporation.
- On procède ensuite à la centrifugation de la pâte saturée, pendant 10 minutes, à 3000 tours/minute, dans des supports de godets (de 250 à 500 ml) préalablement tapissé tapissés de film plastique pour éviter les pollutions.
- Après séparation par centrifugation, on récupère l'aliquote et on mesure, ensuite, la conductivité électrique à l'aide d'un conductivimètre de paillasse
- On procède, ensuite à une filtration de l'aliquote, sur papier filtre sans cendre, afin d'éliminer les es fragments de matière organique. La solution doit être parfaitement limpide.
- Les volumes récupérés sont généralement faibles mais les solutions sont concentrées. A cet effet, on effectue des dilutions (1/50ou 1/100) après avoir mesuré la conductivité électrique. Cette solution est destinée aux analyses du bilan ionique (cations et anions solubles).

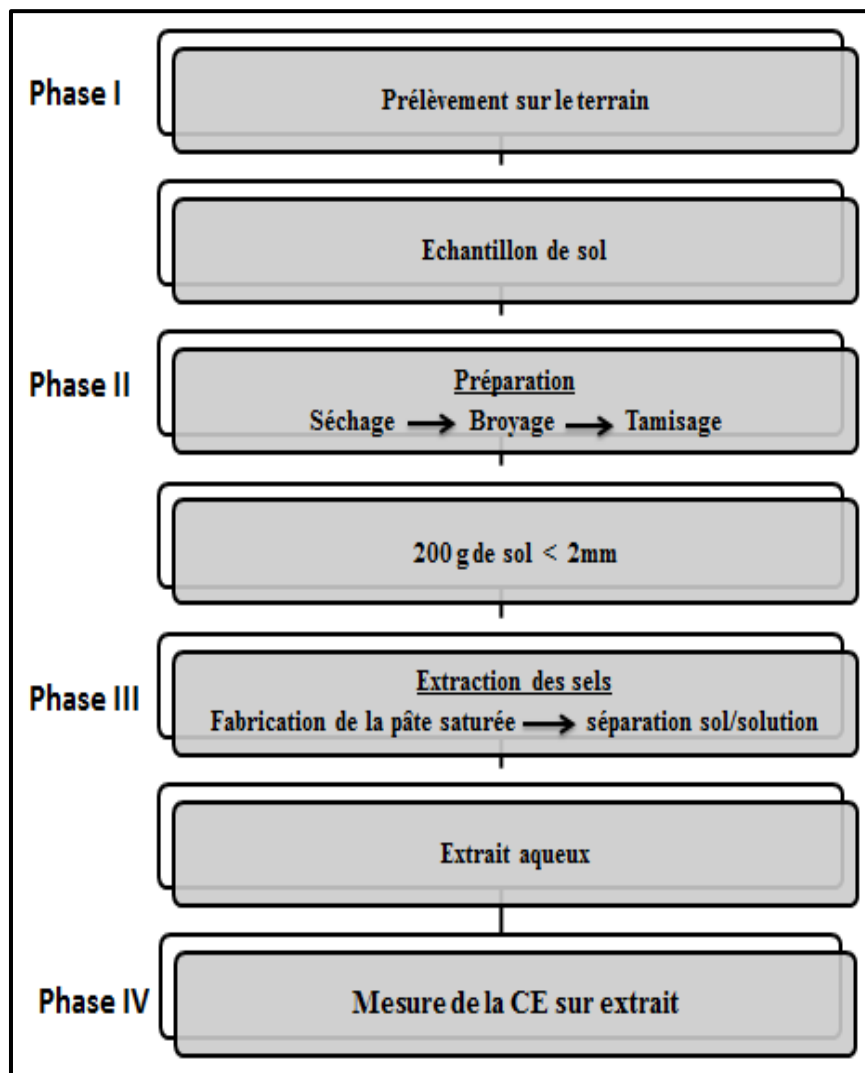


Figure 25. Schéma du protocole expérimental de la pâte saturée



Photos 3(a et b). Préparation de la pâte saturée



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



Photo 5. Mesure de la CE de l'extrait obtenu.

### V.2.6. Etude de la variabilité spatiale de la salinité

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

#### 1) Le coefficient de variation

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

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

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

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

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

#### 2) Régression linéaire et corrélation

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

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

**Modèle linéaire:**  $Y = a + bX$

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

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

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

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

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

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

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 :

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

### 3) Méthodes de prédiction spatiale ou Variographie

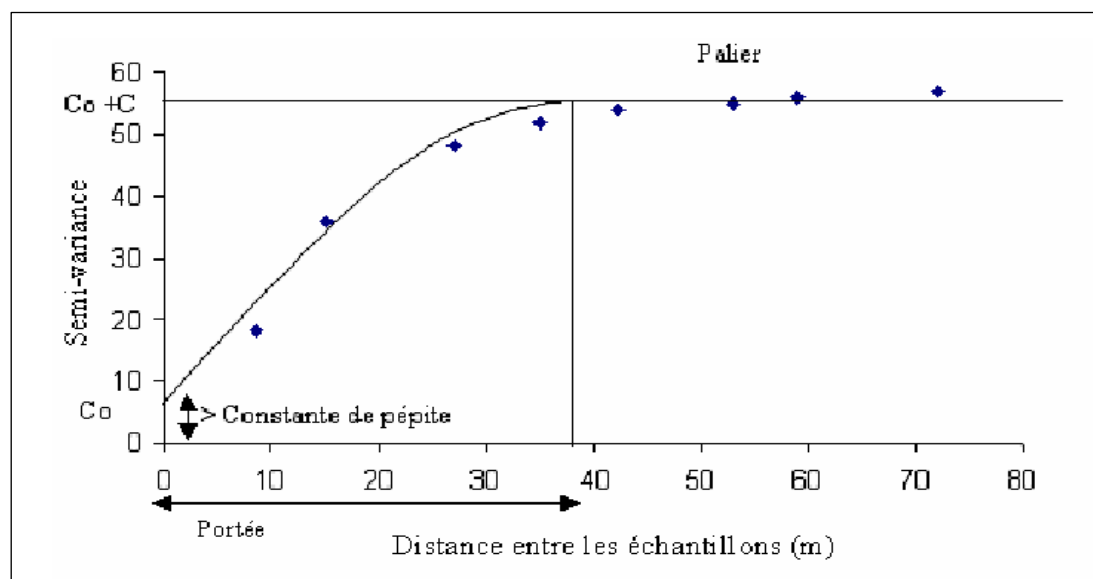
La géostatistique est un outil d'analyse de la structure de variation et d'organisation spatiale de l'information géographique. Elle regroupe un ensemble de techniques statistiques permettant aux pédologues et aux scientifiques du sol de mieux comprendre et de reproduire le modèle de la variabilité spatiale 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.

#### a) 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.26** 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 26.** Semi-variogramme théorique (modèle sphérique) (**Quenum, 2009**).

Pour faire l'analyse spatiale d'une propriété, trois paramètres sont importants à considérer dans ce graphique. Ce sont la constante de pépite, le palier et la portée. La constante de pépite (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 (lag), 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).

#### **b) L'interpolation par le krigeage**

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

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

L'échantillonnage fournit des informations exactes sur le sol aux points d'où proviennent les données. Cependant, ceci ne dit pas ce qui se passe entre ces points. Il faut donc une méthode

précise pour estimer les valeurs aux points intermédiaires ou les moyennes sur un ensemble. Le krigeage est une méthode d'estimation qui tient compte d'un certain nombre de facteurs. Il fournit la moyenne pondérée des valeurs des échantillons qui conduit à l'erreur d'estimation de la variance minimale (**Armstrong et Carignan, 1997**). 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 and 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 chaque horizon et les performances de prédiction de la salinité sont représentées dans des tableaux.

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;

- et la racine carrée de l'écart quadratique moyen (RMSE) doit être proche de 1 (**Johnston et al, 2001**).

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

# **Chapitre VI**

## **Résultats & Discussion**

## Chapitre VI. Résultats et discussions

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

Les résultats portent sur les paramètres physiques et physico-chimiques des 160 échantillons de sol prélevés, au cours de deux campagnes, sur quatre niveaux de profondeur

#### 1) Analyse de l'humidité

Les **tableaux.12** et **13** montrent que l'humidité moyenne du sol est de 15 %, en Juin et 20.3%, en Novembre.

Les teneurs en eau de l'horizon de surface sont plus variables dans l'espace ( $CV > 15\%$ ) que celles des autres couches ( $CV < 15\%$ ). Cette variabilité spatiale est aussi remarquée, pendant la campagne Juin, au niveau de l'horizon de profondeur (75-100cm) avec un CV supérieur à 15%.

**Tableau 12.** Résultats de l'humidité du sol en (%) (Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	9,0	16,1	17,5	17,5	15,0
C .V. %	32,1	13,9	11,9	20,0	12,3

**Tableau 13.** Résultats de l'humidité du sol en (%) (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	23,0	23,1	21,0	20,4	20,3
C .V. %	20,0	12,3	13,9	13,7	11,3

#### 2) Analyse de la texture

D'après les **Tableaux.14, 15 et 16**, nous remarquons que les fractions granulométriques prédominantes sont les fractions argileuses et limoneuses. Dans l'horizon de surface, les argiles et les limons ont pratiquement les mêmes taux avec des moyennes respectives de 46.5 et 48.8%. Dans l'horizon de sub-surface, la fraction argileuse prédomine avec un taux moyen de 55.4%. La fraction sableuse est peu représentée avec une moyenne qui varie entre 4.2 et 6.7%, dans tout le profil. Nous observons, au niveau des horizons profonds, une diminution de la fraction argileuse, avec une moyenne de 36.7 à 45.6% et une forte augmentation de la fraction limoneuse avec une moyenne de 50 à 56.6%.

Nous remarquons que le coefficient de variabilité pour l'argile est élevé ( $41.2\% < CV < 44.7\%$ ) dans les horizons de profondeur et modéré dans les horizons de surface ( $28.2\% < CV < 30.1\%$ ) (**Tab.14**). Pour les limons ce sont les couches (25-50cm et 50-75cm) qui présentent des coefficients de variabilité élevés ( $35.2\% < CV < 37.5\%$ ) (Tab.), alors que pour les horizons de surface et de profondeur, la variabilité est modérée ( $23.1 < CV < 23.8\%$ ) (**Tab.15**). Pour le sable, les coefficients de variabilité sont élevés dans tous les horizons ( $81.6\% < CV < 108.4\%$ ) (**Tab.16**).

**Tableau 14.** Résultats de l'Argile (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	46,5	55,4	45,7	36,7	46,1
C .V. %	28,2	30,1	44,7	41,2	29,6

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

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	48,8	40,4	50,2	56,6	49,0
C .V. %	23,1	37,5	35,2	23,5	23,8

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

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	4,8	4,2	4,2	6,7	4,4
C .V. %	81,6	97,9	108,4	106,7	85,4

### 3) Analyses de la matière organique (M.O)

Les **tableaux 17** et **18** montrent que le taux de matière organique diminue avec la profondeur, la moyenne varie entre 0.57%, en profondeur à 1.82 % dans l'horizon de surface. Le coefficient de variabilité est élevé dans l'horizon (50-75cm) ( $CV > 35\%$ ), en Juin, et modéré dans le reste du profil ( $CV < 35\%$ ). Par contre, en Novembre, le coefficient de variabilité est élevé dans tous les horizons ( $CV > 35\%$ ), sauf pour l'horizon de surface ( $CV < 35\%$ ).

**Tableau 17.** Résultats de la matière organique (Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	1,82	1,28	0,68	0,57	1,09
C .V. %	17,55	26,93	32,60	40,73	17,55

**Tableau 18.** Résultats de la matière organique (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	1,8	1,3	0,7	0,6	1,1
C .V. %	30,9	36,6	38,6	62,7	42,2

#### 4) Analyses du potentiel Hydrogène (pH)

Les **tableaux 19** et **20** indiquent que le pH est supérieur à 8 avec une moyenne de 8.26 à 8.52 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 (Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	8,26	8,40	8,51	8,52	8,42
C .V. %	1,12	1,03	2,43	2,47	1,13

**Tableau 20.** Résultats du pH (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	8,27	8,42	8,51	8,50	8,42
C .V. %	1,36	1,80	2,77	3,16	2,27

#### 5) Analyses statistiques du calcaire ( $\text{CaCO}_3$ )

Les **tableaux 21** et **22** montrent que les teneurs en calcaire sont homogènes au niveau du profil, la moyenne varie de 14.3 à 17.5 %, avec un faible coefficient de variabilité ( $CV < 15\%$ ).

**Tableau 21.** Résultats du calcaire ( $\text{CaCO}_3$  en %)(Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	15,3	16,2	17,0	17,5	16,5
C .V. %	10,5	11,1	7,3	6,8	5,9

**Tableau 22.** Résultats du calcaire ( $\text{CaCO}_3$  en %)(Novembre)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	14,3	14,5	15,1	15,0	14,7
C .V. %	7,1	7,6	7,8	6,0	4,0

## VI.2. Caractérisation de la salinité des sols

Les résultats portent sur la conductivité électrique (extrait de la pâte saturée et extrait dilué) des 160 échantillons de sol prélevés, au cours de deux campagnes, sur quatre niveaux de profondeur.

### 1) Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée ( $CE_{ps}$ )

Les valeurs moyennes de la  $CE_{ps}$  passent de  $7.1 \text{ dS.m}^{-1}$  dans l'horizon de surface et augmentent progressivement vers la profondeur pour atteindre une valeur de  $25 \text{ dS.m}^{-1}$ , en Juin. En Novembre, la salinité affiche une légère augmentation de la surface vers la profondeur. Les valeurs de la  $CE_{ps}$  passent de  $8.4 \text{ dS.m}^{-1}$ , (horizon de surface) à  $27.6 \text{ dS.m}^{-1}$  (horizon de profondeur).

La salinité moyenne de la couche (0-100cm) révèle que le profil salin moyen est de type descendant (**Fig.27**), elle se situe entre  $7.1 \text{ dS.m}^{-1}$  en surface et  $27.6 \text{ dS.m}^{-1}$  en profondeur, avec une moyenne de  $18.4 \text{ dS.m}^{-1}$ , en Juin (**tab.23**) et  $21.2 \text{ dS.m}^{-1}$ , en Novembre (**tab.24**).

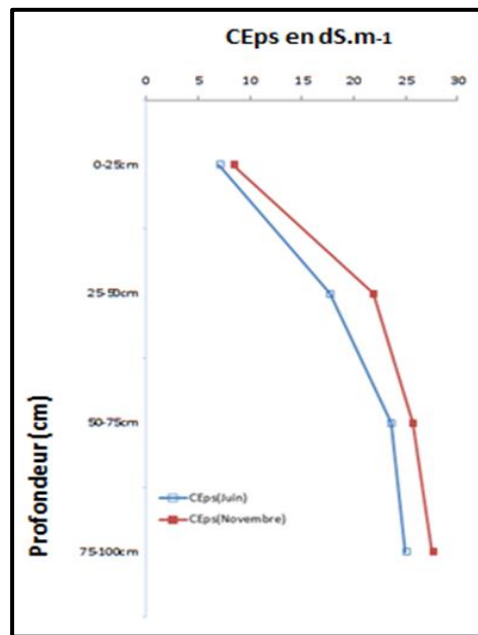
Les valeurs du coefficient de variation de la  $CE_{ps}$  sont supérieures à 35 %, au niveau des horizons (0-25cm ; 50-75cm ; 75-100cm), pour les deux campagnes de mesures. Ces valeurs expriment une forte variabilité de la salinité en surface et en profondeur. Cette variabilité est cependant modérée dans l'horizon (25-50cm) qui enregistrent un coefficient de variation de l'ordre de 31 % (Juin) et 31.3%, ( Novembre). La couche (0-100cm) présente un coefficient de variabilité modéré de 34.4% et 34.1%.

**Tableau 23.** Les résultats de la  $CE_{ps}$  en dS/m (Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	7,1	17,7	23,6	25,0	18,4
C .V. %	57,4	31,0	35,1	41,5	34,4

**Tableau 24.** Les résultats de la  $CE_{ps}$  en dS/m (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	8,4	21,9	25,7	27,6	21,2
C .V. %	43,9	31,3	36,5	37,1	34,1



**Figure 27.** Profils salins moyens des échantillons prélevés ( $CE_{ps}$  en  $dS.m^{-1}$ )

## 2) Conductivité électrique de l'extrait dilué ( $CE_{d1/5}$ )

Les valeurs moyennes de la  $CE_d$  passent de  $1.7 dS.m^{-1}$  dans l'horizon de surface et augmentent progressivement vers la profondeur pour atteindre une valeur de  $4.4 dS.m^{-1}$ , en Juin. En Novembre, les valeurs de la  $CE_d$  passent de  $1.6 dS.m^{-1}$ , (horizon de surface) à  $4.3 dS.m^{-1}$  (horizon de profondeur).

Les résultats des **tableaux.25** et **26** révèlent que la conductivité électrique de l'extrait dilué ( $CE_{d1/5}$ ), pour l'ensemble des horizons se situe entre  $0.2$  et  $7.4 dS.m^{-1}$ .

Les valeurs du coefficient de variation de la  $CE_{d1/5}$  sont supérieures à 35 %, pour l'horizon (0-25cm) de la campagne Juin et les horizons (0-25cm et 25-50cm) de la campagne Novembre. Elles expriment une forte variabilité de la salinité dans ces couches. Cette variabilité est, cependant, modérée, au niveau des horizons (25-50cm, 50-75cm et 75-100cm), en Juin, qui enregistre des coefficients de variation, respectivement, de l'ordre de 33.4 %, 28.2% et 34.7%. En Novembre, les horizons (25-50cm et 50-75cm) enregistrent des coefficients de variation, respectivement, de l'ordre de 27.2 % et 29.1%.

Pour la campagne Juin, la  $CE_{d1/5}$  moyenne de la couche (0-100cm) se situe entre  $1.6 dS.m^{-1}$ , en surface, et  $4.7 dS.m^{-1}$ , en profondeur.

La valeur moyenne de la  $CE_{d1/5}$  du profil est de  $3.6 dS.m^{-1}$ , en Juin et  $3.7 dS.m^{-1}$ , en Novembre.

**Tableau 25.** Résultats statistiques de la  $CE_{d_{1/5}}$  en  $dS.m^{-1}$ . (Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	1,7	3,7	4,6	4,4	3,6
C .V. %	59,6	33,4	28,2	34,7	32,6

**Tableau 26.** Les résultats statistiques de la  $CE_{d_{1/5}}$   $dS.m^{-1}$ . (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	1,6	4,1	4,7	4,3	3,7
C .V. %	57,0	27,2	29,1	35,3	28,2

L'analyse corrélative entre les valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée ( $CE_{ps}$ ) et celles de l'extrait dilué ( $CE_{d_{1/5}}$ ), montre une bonne corrélation ( $r^2 > 0.8$ ) qui est statistiquement hautement significative (Fig.28 et 29).

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

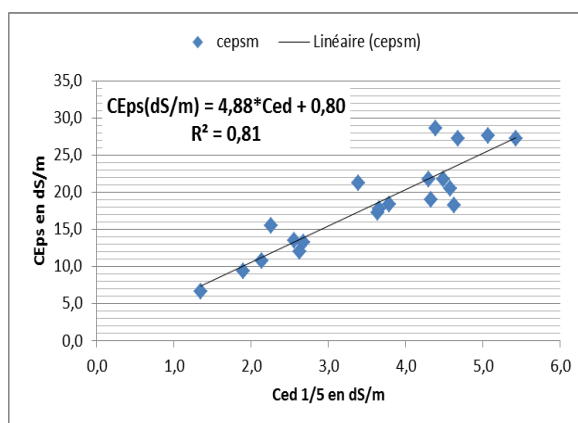
$$CE_{ps} (dS.m^{-1}) = 4.88 * CE_{d_{1/5}} + 0.8 \quad (r^2=0.81) \quad (\text{Juin 2012})$$

$$CE_{ps} (dS.m^{-1}) = 5.52 * CE_{d_{1/5}} + 0.63 \quad (r^2= 0.83) \quad (\text{Novembre 2012})$$

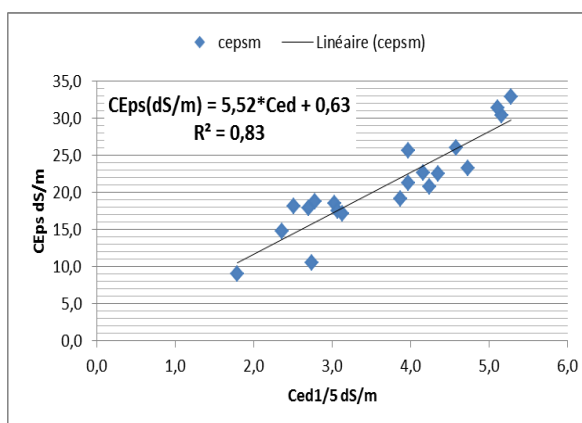
Avec :

$CE_{ps}$  : conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée en  $dS.m^{-1}$  à 25°C ;

$CE_{d_{1/5}}$  : conductivité électrique de l'extrait dilué 1/5 en  $dS.m^{-1}$  à 25°C.



**Figure 28.** Corrélation entre  $CE_{d_{1/5}}$  et  $CE_{ps}$  (Juin 2012)



**Figure 29.** Corrélation entre  $CE_{d_{1/5}}$  et  $CE_{ps}$  (Novembre 2012)

**3) Distribution de la salinité selon les transects Sud-Nord (Fig.30 à 37)****a) Distribution de la salinité de l'horizon de surface (0-25cm)**

Les valeurs minimales de la  $CE_{ps}$  de l'horizon de surface (0-25cm) sont observées dans la partie sud de la parcelle, avant le drain tertiaire, situé au centre, elles sont de l'ordre de 1.1 à 10.3  $dS.m^{-1}$ , en Juin et de 2 à 8.7  $dS.m^{-1}$ , en Novembre. Par contre les valeurs maximales, situées au nord de la parcelle, varient de 5.1 à 17  $dS.m^{-1}$ , en Juin et de 7.5 à 12.4  $dS.m^{-1}$ , en Novembre.

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

Pour l'horizon de sub-surface (25-50cm), les valeurs minimales de la  $CE_{ps}$  sont de 7.1 à 20.4  $dS.m^{-1}$ , dans le sud de la parcelle, en Juin et de 10.7 à 21.9  $dS.m^{-1}$ , en Novembre. Par contre les valeurs maximales, situées, dans le nord de la parcelle, varient de 13.7 à 29  $dS.m^{-1}$ , en Juin, et de 18.4 à 31  $dS.m^{-1}$ , en Novembre.

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

Pour l'horizon (50-75cm), les valeurs minimales de la  $CE_{ps}$  sont de 9 à 21.5  $dS.m^{-1}$ , dans le sud de la parcelle, en Juin, et de 12.2 à 22.7  $dS.m^{-1}$ , en Novembre. Les valeurs maximales sont de 22.3 à 41.7  $dS.m^{-1}$ , dans le nord de la parcelle, en Juin et de 21 à 41  $dS.m^{-1}$ , en Novembre.

**d) Distribution de la salinité de l'horizon de profondeur (75-100cm)**

Pour l'horizon de profondeur (75-100cm), les valeurs minimales de la  $CE_{ps}$  sont de 8.9 à 20.4  $dS.m^{-1}$ , dans le sud de la parcelle, en Mai, et de 10.2 à 27.8  $dS.m^{-1}$ , en Novembre. Les valeurs maximales sont de 24.4 à 46  $dS.m^{-1}$ , dans le nord, en Juin, et de 24.7 à 46.3  $dS.m^{-1}$ , en Novembre.

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

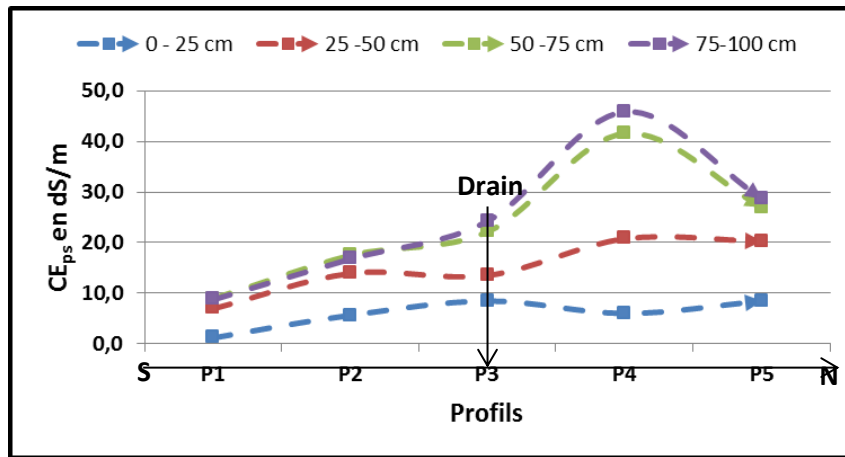


Figure 30. Distribution de la  $CE_{ps}$  selon le transect 1. Sud-Nord (Juin 2012)

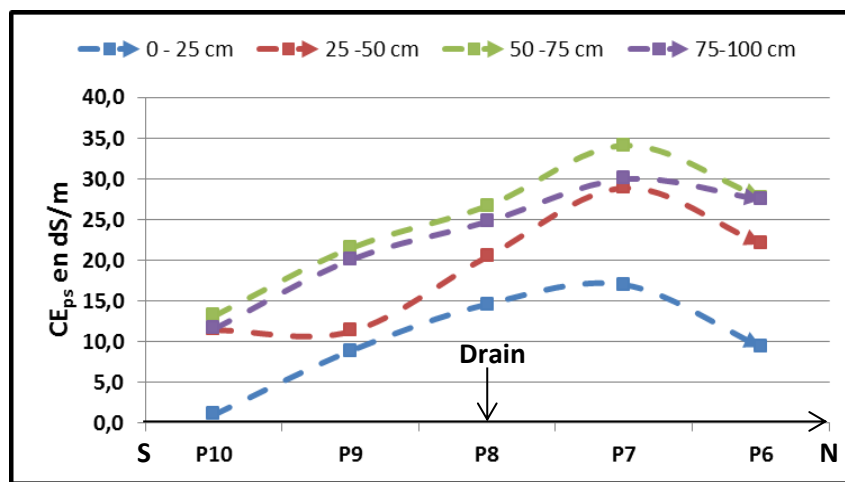


Figure 31. Distribution de la  $CE_{ps}$  selon le transect 2. Sud-Nord (Juin 2012)

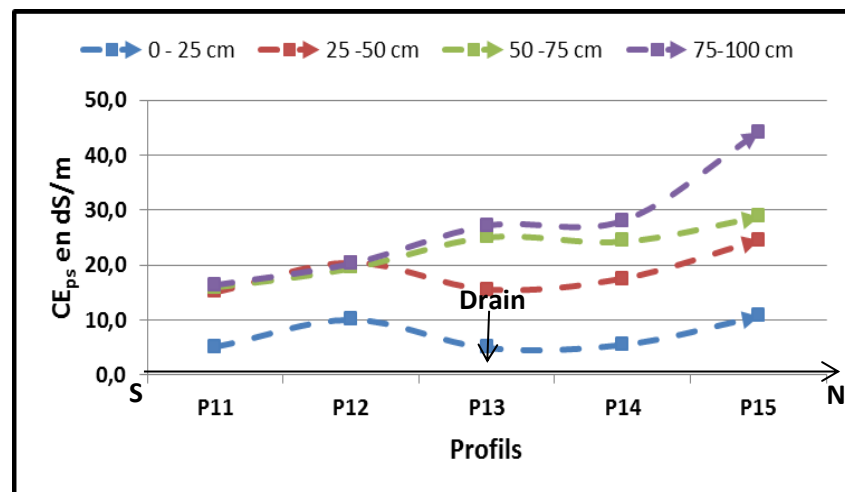


Figure 32. Distribution de la  $CE_{ps}$  selon le transect 3. Sud-Nord (Juin 2012)

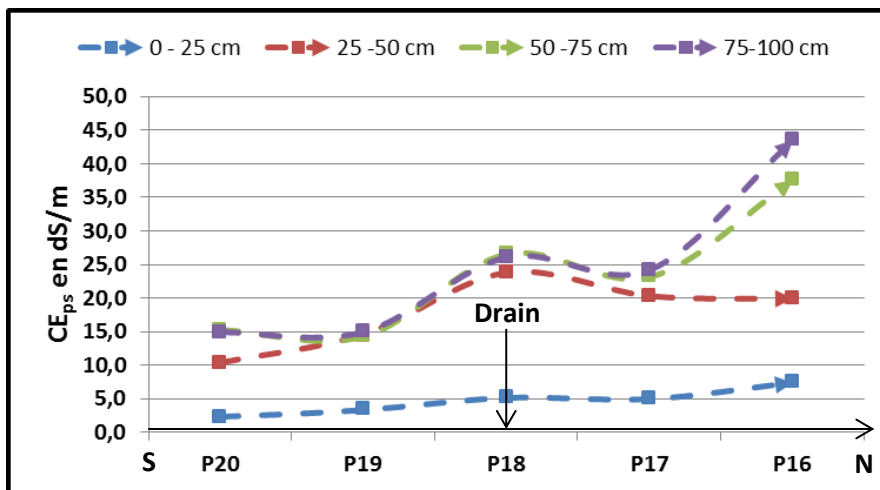


Figure 33. Distribution de la  $CE_{ps}$  selon le transect 4. Sud-Nord (Juin 2012)

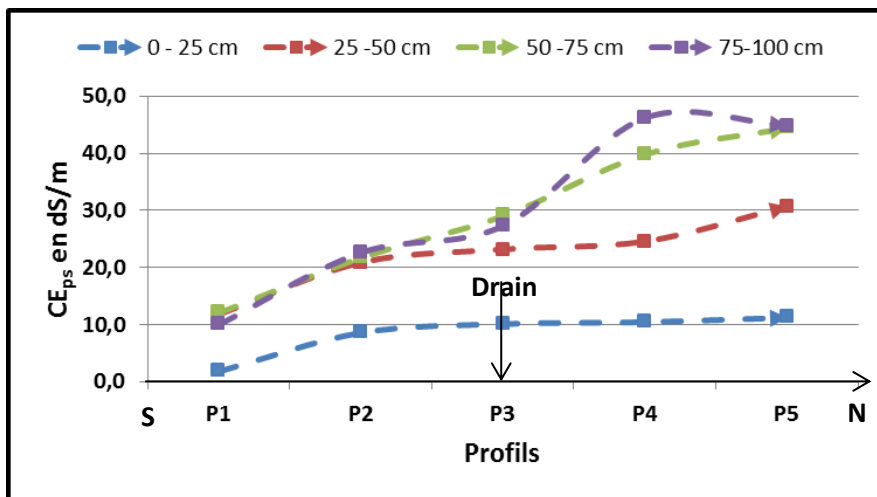


Figure 34. Distribution de la  $CE_{ps}$  selon le transect 1. Sud-Nord (Novembre 2012)

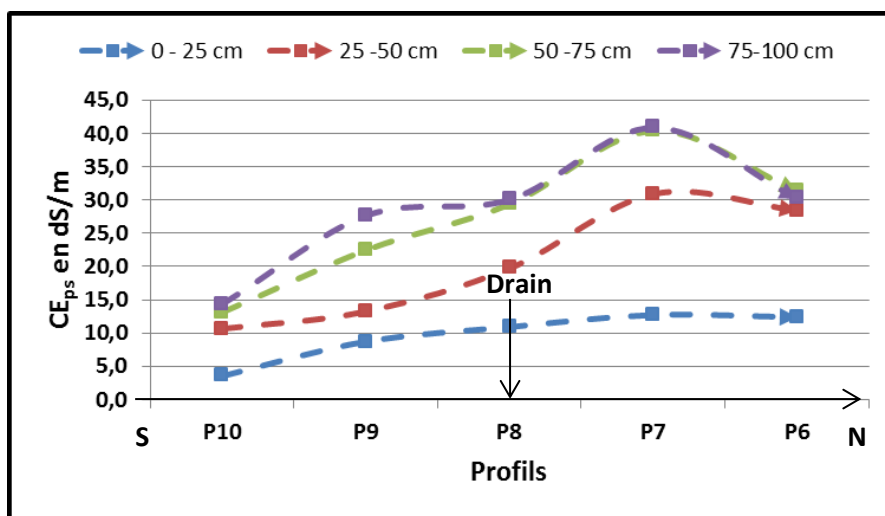


Figure 35. Distribution de la  $CE_{ps}$  selon le transect 2. Sud-Nord (Novembre 2012)

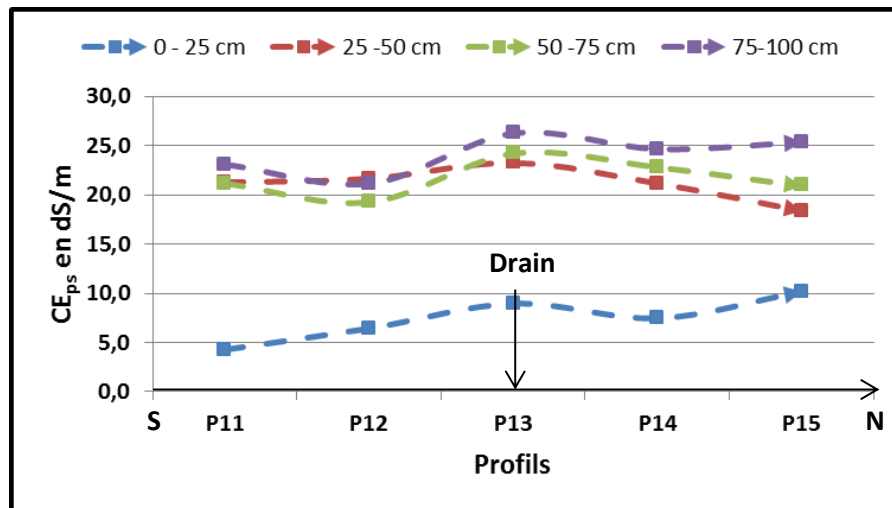


Figure 36. Distribution de la CE<sub>ps</sub> selon le transect 3. Sud-Nord (Novembre 2012)

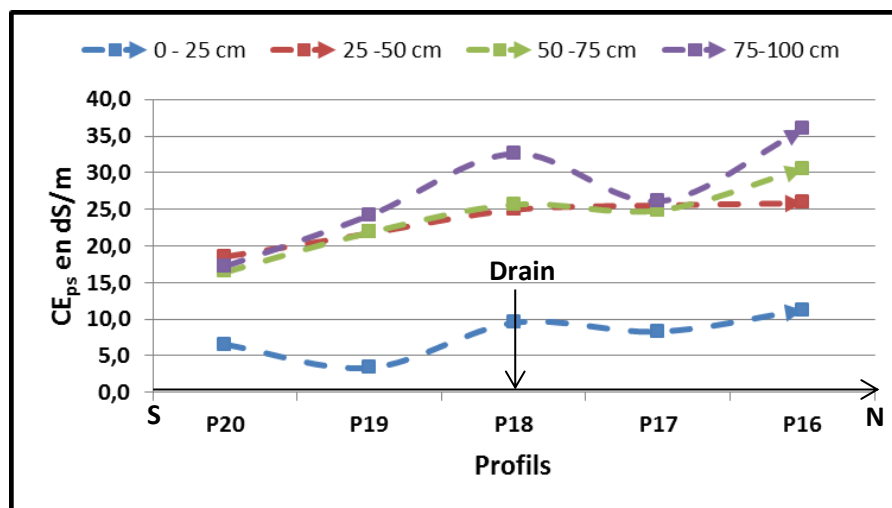


Figure 37. Distribution de la CE<sub>ps</sub> selon le transect 4. Sud-Nord (Novembre 2012)

#### 4) Distribution verticale de la salinité

##### a) Profils de types convexes

Les figures 38 et 39 montrent une grande variabilité verticale (intra-profil) et spatiale (inter-profils) de la salinité du sol. En effet, nous distinguons deux types de profils salins présentant deux allures différentes :

- Les profils (2, 7, 8, 9, 10, 12, 18 et 20) de la campagne Juin sont de type convexe avec un maximum de salinité dans l'horizon médian (50-75cm). Ce type de profil, caractérisé par un maximum de salinité, dans les horizons peu à moyennement profonds, serait le résultat d'une salinisation due aux pluies d'hivers (Servant, 1976) ;

- Les profils (1, 3, 6, 12, 20) de la campagne Novembre, sont de type convexe avec un maximum de salinité dans l'horizon médian (50-75cm). Ce type de profil serait le résultat d'une remontée capillaire des sels, pendant la période sèche.

**b) Profils de types descendants**

Les profils de types descendants de la campagne Juin, sont caractérisés par des maximums de salinité dans les horizons profonds (50-75 et 75-100 cm). Ce type de profil serait le résultat d'une lixiviation des sels par les pluies hivernales.

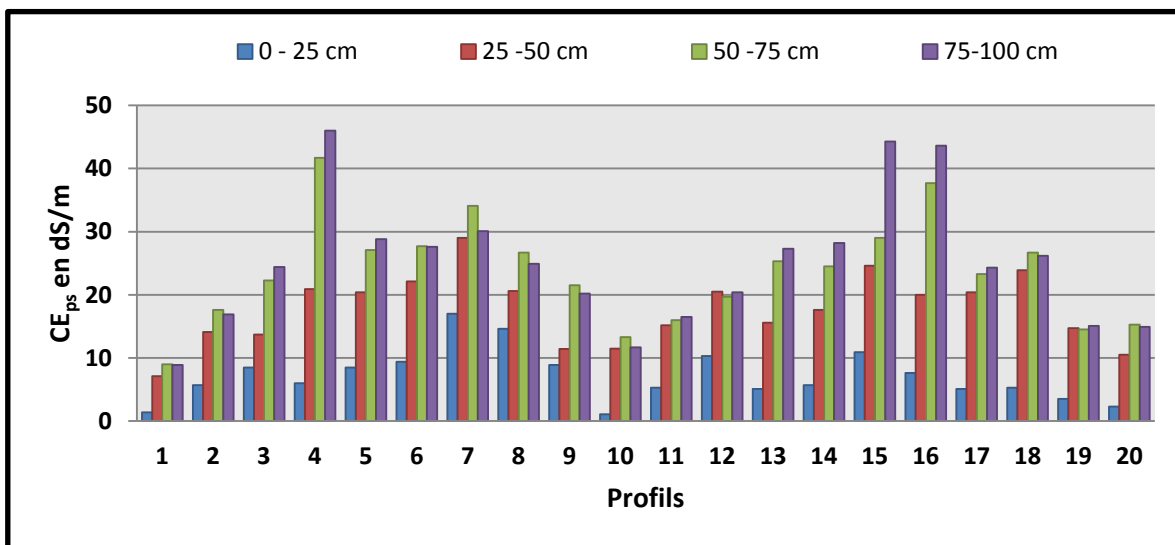


Figure 38. Evolution de la CE<sub>ps</sub> (dS/m) par profils (Juin 2012)

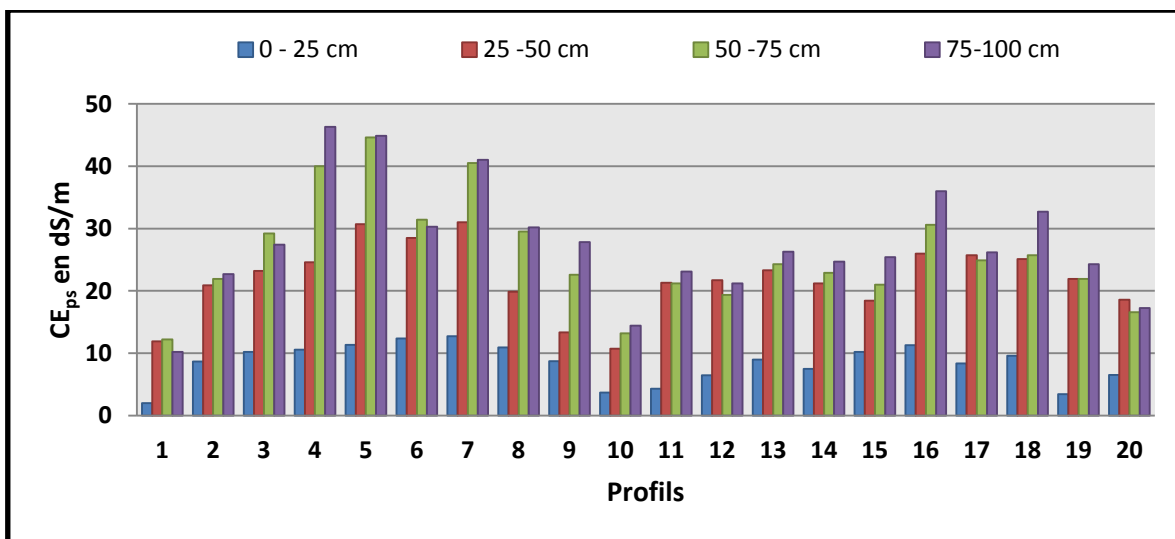


Figure 39. Evolution de la CE<sub>ps</sub> (dS/m) par profils (Novembre 2012)

### VI.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 ( $CE_{psc}$ ) de la parcelle d'étude.

#### VI.3.1. Les lectures électromagnétiques de l'EM38

Le rapport entre les mesures électromagnétiques en mode horizontal et en mode vertical [ $CEM_H / CEM_V$ ] permet la distinction entre les différents profils salins et de caractériser l'évolution de la salinité en profondeur (**Tab.27**) :

- Lorsque  $CEM_H > CEM_V$  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  $CEM_H < CEM_V$ , il s'agit d'un profil salin croissant en profondeur, où les sels se sont accumulés.

La comparaison entre les lectures de l' $CEM_H$  et celles de l' $CEM_V$  est une première possibilité d'interprétation des résultats. Les résultats du rapport entre les lectures horizontales et les lectures verticales [ $CEM_H / CEM_V$ ] pour les deux campagnes de mesure est inférieur à 1.05 (**Tab.28**). Ces deux valeurs indiquent une forte concentration de la salinité en profondeur (profil lessivé ou profil salin descendant).

**Tableau 27.** Distinction des différents profils salins

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

**Tableau 28.** Types de profils de salinité obtenus, pour les deux campagnes de mesure

Type de profil	$CEM_{(H)} / CEM_{(V)}$	Campagne de mesure
Profil lessivé	$CEM_H / CEM_V = 0.74 (\leq 1.05)$	Juin 2012
Profil lessivé	$CEM_H / CEM_V = 0.77 (\leq 1.05)$	Novembre 2012

### VI.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 le **tableau 29**.

La corrélation entre la  $CEM_V$  et la  $CEM_H$  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  $CE_{ps}$  ( $0.865 < r < 0.918$ ), suivie par la  $Ced_{1/5}$  ( $0.78 < r < 0.89$ ) et le pH ( $0.50 < r < 0.81$ ). 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; Bronson et al, 2005**).

Pour la matière organique, la corrélation avec la CEM est significative ( $-0.52 < r < -0.667$ ). Dans cette étude, nous avons trouvé une relation positive entre la CEM et la teneur en eau (campagne Juin 2012), cependant, la relation est négative avec la teneur en argile ( $-0.038 < r < -0.355$ ). Dans leur étude (**Nolin et al, 2002**) ont aussi rapporté des corrélations significatives entre la CE, la texture du sol et la matière organique.

Les corrélations entre la CEM et la teneur en limon est négative ( $0.114 < r < 0.357$ ), bien que certains chercheurs ont trouvé une corrélation positive entre eux (**Carrol et Oliver, 2005**). Il n'y a pas de corrélation entre la teneur en sable avec la CEM ( $-0.11 < r < 0.259$ ) et entre la teneur en argile avec la CEM ( $-0.147 < r < -0.258$ ).

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**).

**Tableau 29.** Relation entre la CEM et les propriétés du sol des deux campagnes de mesures

Variables	Campagne Juin 2012		Campagne Novembre 2012	
	CEM <sub>H</sub>	CEM <sub>V</sub>	CEM <sub>H</sub>	CEM <sub>V</sub>
CEM <sub>H</sub> mS.m <sup>-1</sup>	1,000	<b>0,944</b>	1,000	<b>0,981</b>
CEM <sub>V</sub> mS.m <sup>-1</sup>	<b>0,944</b>	1,000	<b>0,981</b>	1,000
CE <sub>ps</sub> dS.m <sup>-1</sup>	<b>0,918</b>	<b>0,869</b>	<b>0,865</b>	<b>0,889</b>
Ced <sub>(1/5)</sub> dS.m <sup>-1</sup>	<b>0,892</b>	<b>0,896</b>	<b>0,783</b>	<b>0,816</b>
Humidité %	<b>0,722</b>	<b>0,820</b>	0,404	0,419
M.O %	<b>-0,677</b>	<b>-0,578</b>	<b>-0,529</b>	<b>-0,521</b>
pH	<b>0,595</b>	<b>0,502</b>	<b>0,813</b>	<b>0,791</b>
Argile %	-0,173	-0,147	-0,258	-0,224
Limon %	0,170	0,168	0,287	0,272
Sable %	0,124	0,073	0,137	0,087
CaCO <sub>3</sub> %	0,071	0,042	-0,150	-0,238

*En gras, valeurs significatives au seuil alpha=0,050 (test bilatéral).*

### VI.3.3. Estimation de la CE<sub>ps</sub> à partir des mesures électromagnétiques

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

### VI.3.4. Estimation de la CE<sub>ps</sub> des différents horizons du sol

Ce type d'étalonnage se base sur l'utilisation des régressions multiples (**Rhoades et Corwin, 1981**) qui consiste à relier toutes les mesures électromagnétiques verticales ou horizontales de l'EM-38, obtenues à différentes hauteurs, aux conductivités électriques de l'extrait de pâte saturée des quatre horizons du sol (0-25cm ; 25cm-50cm ; 50cm-75cm ; 75cm-100cm).

$$CE_{(x-z)} = \pm c \pm \alpha_0 CEM_V \pm \alpha_1 CEM_{V1} \pm \alpha_2 CEM_{V2} \pm \alpha_3 CEM_{V3} \pm \alpha_4 CEM_{V4}$$

Où:

- CE<sub>(x-z)</sub> : Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée(CEps), exprimée en dS.m<sup>-1</sup> à 25°C, mesurée au laboratoire, pour une couche de sol(x-z) ;
- CEM<sub>V</sub>, CEM<sub>V1</sub>, CEM<sub>V2</sub>, CEM<sub>V3</sub>, CEM<sub>V4</sub> : lectures horizontales ou verticales de la conductivité électromagnétique, exprimées en mS.m<sup>-1</sup>, obtenues par l'EM38, aux hauteurs respectives, par rapport au sol (0 cm ; 50 cm ; 75 cm ; 100 cm et 125 cm) ;
- $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  : constantes ;
- c : constante.

La table de **Bravais Pearson (Tab.14. Annexe.10)** indique que le  $r$  calculé, pour toutes les équations, dépasse la valeur de la table, d'où la relation est significative avec un risque d'erreur ( $\alpha = 0.05$ ). Les résultats ont révélé une étroite relation entre les valeurs de la  $CE_{ps}$  calculées et les valeurs de la  $CE_{ps}$  mesurées au laboratoire, pour les différents horizons des deux campagnes de mesure (**Tab.33 et 35**).

Les **tableaux.30 et 31** montrent que le coefficient de corrélation varie entre 0,83 et 0,94, avec une erreur d'estimation de 2.08 à 6.11  $dS.m^{-1}$ , d'où la relation est significative avec un risque d'erreur ( $\alpha = 0.05$ ). Cette relation est plus forte au niveau des couches inférieures (à 25-50, 50-75cm et 75-100cm), où les valeurs de  $r$  varient entre 0,86 et 0,94, par rapport à l'horizon de surface (0-25cm), où les valeurs de  $r$  varient de 0,83 à 0,86. Des résultats similaires ont été trouvés par **Sharma et Gupta (2000)** avec des coefficients de corrélation variant entre 0,79 et 0,89 pour différentes profondeurs.

**Tableau 30.** Equations de régressions multiples obtenues pour le calcul de la  $CE_{ps}$  des différents horizons du sol à partir des mesures des conductivités électromagnétiques verticales ( $CEM_V$ ), obtenues à différentes hauteurs, par l'EM38 (Campagne de mesure Juin 2012).

Profondeur (cm)	Equations de régressions (Juin 2012)	n	r	Erreur (dS/m)
0-25cm	$CE_{psc1} = -4.02 + 0.065 * CEM_V - 0.19 * CEM_{V1} - 0.05 * CEM_{V2} - 0.34 * CEM_{V3} + 0.8 * CEM_{V4}$	20	0.86	2.45
25-50cm	$CE_{psc2} = 4.47 - 0.024 * CEM_V + 0.067 * CEM_{V1} + 0.1 * CEM_{V2} - 0.15 * CEM_{V3} + 0.11 * CEM_{V4}$	20	0.87	3.09
50-75cm	$CE_{psc3} = 7.29 + 0.067 * CEM_V - 0.24 * CEM_{V1} + 0.27 * CEM_{V2} + 0.35 * CEM_{V3} - 0.47 * CEM_{V4}$	20	0.94	3.16
75-100cm	$CE_{psc4} = 5.97 + 0.045 * CEM_V - 0.24 * CEM_{V1} + 0.186 * CEM_{V2} + 0.55 * CEM_{V3} - 0.46 * CEM_{V4}$	20	0.86	6.11

**Tableau 31.** Equations de régressions multiples obtenues pour le calcul de la  $CE_{ps}$  des différents horizons du sol à partir des mesures des conductivités électromagnétiques verticales ( $CEM_V$ ), obtenues à différentes hauteurs, par l'EM38 (Campagne de mesure Novembre 2012).

Profondeur (cm)	Equations de régressions (Novembre 2012)	n	r	Erreur (dS/m)
0-25cm	$CE_{psc_1} = 2.85 + 0.04*CEM_V + 0.04*CEM_{V1} - 0.19*CEM_{V2} + 0.08*CEM_{V3} + 0.05*CEM_{V4}$	20	0.83	2.08
25-50cm	$CE_{psc_2} = 15.48 - 0.05*CEM_V + 0.62*CEM_{V1} - 1,04*CEM_{V2} + 1.11*CEM_{V3} - 0.71*CEM_{V4}$	20	0.87	3.08
50-75cm	$CE_{psc_3} = 8.34 + 0.03*CEM_V + 0.23*CEM_{V1} + 0.52*CEM_{V2} - 0.02*CEM_{V3} - 1.32*CEM_{V4}$	20	0.87	4.88
75-100cm	$CE_{psc_4} = 7.6 + 0.1*CEM_V + 0.02*CEM_{V1} + 0.2*CEM_{V2} - 0.17*CEM_{V3} - 0.36*CEM_{V4}$	20	0.88	5

### VI.3.5. Analyse statistique des valeurs mesurées et calculées de la $CE_{ps}$

Les **tableaux 33** et **35** montrent la comparaison entre les paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la  $CE_{ps}$ , des différents horizons, pour les deux campagnes de mesures.

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

Les résultats de la campagne Juin montrent que les moyennes de la  $CE_{ps}$  mesurée et celles calculées sont identiques, avec une différence de 14% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 17%, et la différence entre la valeur minimale est de 31%.

Pour la campagne de Novembre, les différences sont de 0,1% dans la moyenne et 12% de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 7%, et la différence entre la valeur minimale est de 29%.

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

Les résultats de la campagne Juin montrent des différences de 0,1% dans la moyenne et 13% dans l'écart type sont observées. La différence entre la valeur maximale est de 12%, et la différence entre la valeur minimale est de 12%.

Pour la campagne de Novembre, les moyennes de la  $CE_{ps}$  mesurée et celles calculées sont identiques, avec une différence de 12% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 4 %, et la différence entre la valeur minimale est de 11%.

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

Les résultats de la campagne Juin montrent que les moyennes de la  $CE_{ps}$  mesurée et celles calculées sont identiques, et une différence de 4% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 0.2 %, et la différence entre la valeur minimale est de 11%.

Pour la campagne de Novembre, les moyennes de la  $CE_{ps}$  mesurée et celles calculées sont identiques, avec une différence de 14% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 3 %, et la différence entre la valeur minimale est de 11%. ;

**4) Analyse statistique des valeurs de la  $CE_{ps}$  de l'horizon de profondeur (75-100cm)**

Les résultats de la campagne Juin montrent que les moyennes de la  $CE_{ps}$  mesurée et celles calculées sont identiques, avec une différence de 13% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 2 %, et la différence entre la valeur minimale est de 11%.

Pour la campagne de Novembre, les moyennes de la  $CE_{ps}$  mesurée et celles calculées sont identiques, avec une différence de 12% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 17 %, et la différence entre la valeur minimale est de 17%.

**Tableau 32.** Valeurs des conductivités électriques ( $CE_{ps}$ ), mesurées et calculées (Juin 2012)

N°	$CE_{ps}$ ( $dS.m^{-1}$ ) mesurée au laboratoire				$CE_{ps}$ ( $dS.m^{-1}$ ) calculée par les équations de régressions			
	0-25 cm	25 -50 cm	50 -75 cm	75-100 cm	0 - 25 cm	25 -50 cm	50 -75 cm	75-100 cm
1	1,4	7,1	9,0	8,9	2,0	8,1	8,0	7,9
2	5,7	14,1	17,6	16,9	5,3	13,0	14,3	15,5
3	8,5	13,7	22,3	24,4	10,9	20,8	26,1	28,6
4	6,0	20,9	41,7	46,0	5,7	20,2	41,8	47,0
5	8,5	20,4	27,1	28,8	10,6	21,0	27,4	30,1
6	9,4	22,1	27,7	27,6	9,7	19,8	25,1	27,1
7	17,0	29,0	34,1	30,1	12,6	25,4	33,4	34,6
8	14,6	20,6	26,7	24,9	14,1	19,7	28,0	28,5
9	8,9	11,4	21,5	20,2	8,1	13,1	21,4	20,7
10	1,1	11,5	13,3	11,7	1,6	10,4	14,1	10,8
11	5,3	15,2	16,0	16,5	3,9	14,7	17,7	19,7
12	10,3	20,5	19,7	20,4	4,4	16,5	19,1	21,2
13	5,1	15,6	25,3	27,3	7,1	19,1	24,9	27,0
14	5,7	17,6	24,5	28,2	7,4	18,9	25,5	26,9
15	10,9	24,6	29,0	44,3	10,7	20,4	26,7	29,0
16	7,6	20,0	37,7	43,6	6,9	22,3	29,7	31,0
17	5,1	20,4	23,3	24,3	6,8	19,7	26,0	27,8
18	5,3	23,9	26,7	26,2	7,3	25,1	30,8	32,3
19	3,5	14,7	14,5	15,1	3,8	13,7	16,7	18,1
20	2,3	10,5	15,3	14,9	3,2	11,7	16,2	16,5

**Tableau 33.** Paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la  $CE_{ps}$  (Juin 2012).

Profon- deur (cm)	Corrélation		$CE_{ps}$ ( $dS.m^{-1}$ ) Mesurée au laboratoire				$CE_{ps}$ ( $dS.m^{-1}$ ) calculée par les équations de régressions			
	n	r	Ecart type	Moy	Min	Max	Ecart type	Moy	Min	Max
0-25cm	20	0.86	7.11	4.03	1.1	17	7.11	3.46	1.6	14.1
25-50cm	20	0.87	17.69	5.45	7.1	29	17.68	4.72	8.1	25.4
50-75cm	20	0.94	23.65	8.17	9	41.7	23.65	7.85	8	41.8
75-100cm	20	0.86	25.02	10.35	8.9	46	25.02	9.02	7.9	47

**Tableau 34.** Valeurs des conductivités électriques ( $CE_{ps}$ ), mesurées et calculées (Novembre 2012)

N°	$CE_{ps}$ ( $dS.m^{-1}$ ) mesurée au laboratoire				$CE_{ps}$ ( $dS.m^{-1}$ ) calculée par les équations de régressions			
	0 – 25 cm	25 -50 cm	50 -75 cm	75-100 cm	0 – 25 cm	25 -50 cm	50 -75 cm	75-100 cm
1	2,0	11,9	12,2	10,2	2,8	14,2	14,7	11,9
2	8,7	20,9	21,9	22,7	6,0	16,7	15,5	18,5
3	10,2	23,2	29,2	27,4	8,1	25,1	29,3	28,3
4	10,6	24,6	40,0	46,3	11,8	25,3	34,1	38,7
5	11,3	30,7	44,6	44,9	11,6	29,7	39,0	39,5
6	12,4	28,5	31,4	30,3	8,8	25,2	27,2	28,4
7	12,7	31,0	40,5	41,0	11,4	26,9	35,0	37,1
8	10,9	19,9	29,5	30,2	11,3	24,3	33,9	37,3
9	8,7	13,4	22,6	27,8	6,4	16,1	18,3	21,0
10	3,7	10,7	13,2	14,4	4,4	12,0	12,5	14,8
11	4,3	21,3	21,2	23,1	6,7	19,5	21,5	22,4
12	6,5	21,7	19,4	21,2	6,8	19,9	22,7	23,1
13	9,0	23,3	24,3	26,3	8,5	21,0	27,5	29,2
14	7,5	21,2	22,9	24,7	8,2	22,3	25,9	27,7
15	10,2	18,4	21,0	25,4	10,2	20,2	28,0	33,3
16	11,3	26,0	30,6	36,0	10,9	23,7	31,0	35,2
17	8,4	25,7	24,9	26,2	10,2	28,9	30,0	31,8
18	9,6	25,1	25,7	32,7	10,7	27,5	30,6	33,4
19	3,4	21,9	21,9	24,3	6,7	19,0	19,8	21,6
20	6,5	18,6	16,6	17,3	6,3	20,6	17,2	19,0

**Tableau 35.** Paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la  $CE_{ps}$  (Novembre 2012).

Profondeur (cm)	Corrélation		$CE_{ps}$ ( $dS.m^{-1}$ ) mesurée au laboratoire				$CE_{ps}$ ( $dS.m^{-1}$ ) calculée par les équations de régressions			
	n	r	Ecart type	Moy	Min	Max	Ecart type	Moy	Min	Max
0-25cm	20	0.83	8.4	3	2	12.7	8.39	2.65	2.8	11.8
25-50cm	20	0.88	21.90	5.80	10.7	31	21.91	5.08	12	29.7
50-75cm	20	0.87	25.68	8.78	12.2	44.6	25.69	7.53	12.5	39
75-100cm	20	0.88	27.62	9.42	10.2	46.3	27.61	8.28	11.9	39.5

### VI.3.5. La conductivité électrique calculée ( $CE_{psc}$ ) pour l'ensemble des horizons

Les calculs ont porté sur l'ensemble des valeurs de la conductivité électrique calculée ( $CE_{psc}$ ) par le biais de l'équation de régression.

#### VI.3.5.1. Analyses statistiques

##### 1) Campagne Juin 2012

Les résultats révèlent que la conductivité électrique calculée ( $CE_{psc}$ ) pour l'ensemble des horizons se situe entre 0,02 et 49,09  $dS.m^{-1}$  (**Tab.36**). Ce résultat signifie que la salinité de la parcelle étudiée est très hétérogène. La salinité moyenne varie entre 8,73  $dS.m^{-1}$  en surface et 25,31  $dS.m^{-1}$  en profondeur. Le profil salin moyen est donc de type descendant. Le coefficient de variation de la  $CE_{psc1}$  est supérieur à 50 %, et exprime une forte variabilité de la salinité en surface. Cette variabilité est modérée, au niveau des autres horizons qui enregistrent des coefficients de variation de l'ordre de 27.36 % pour H2, 30.57 % pour H3 et 30.26 % pour H4.

La médiane indique que 50 % des horizons ont des  $CE_{psc}$  inférieures à 8.51  $dS.m^{-1}$  en surface, 17.75  $dS.m^{-1}$  en sub-surface, 23.55  $dS.m^{-1}$  dans le troisième horizon, et 25.30  $dS.m^{-1}$  en profondeur. La différence entre la moyenne et la médiane montre qu'il y a une dissymétrie à droite pour la  $CE_{psc1}$ ,  $CE_{psc3}$  et  $CE_{psc4}$ , par contre, la  $CE_{psc2}$  a une dissymétrie à gauche.

##### 2) Campagne Novembre 2012

Selon le **tableau 36** les résultats révèlent que la conductivité électrique calculée ( $CE_{psc}$ ) pour l'ensemble des horizons se situe entre 2,19 et 62,36  $dS.m^{-1}$ . Ce résultat signifie que la salinité de la parcelle étudiée est très hétérogène. La salinité moyenne varie entre 8,28  $dS.m^{-1}$  en surface et 28,35  $dS.m^{-1}$  en profondeur. Le profil salin moyen est donc de type descendant. Le coefficient de variation de la  $CE_{psc1}$  est inférieur à 50 %, et exprime une variabilité modérée dans le profil. Cette variabilité enregistre des coefficients de variation de l'ordre de 33.45 % pour H1, 28.12 % pour H2, 35.6 % pour H3 et 32.45 % pour H4.

La médiane indique que 50 % des horizons ont des  $CE_{psc}$  inférieures à 8.33  $dS.m^{-1}$  en surface, 22.08  $dS.m^{-1}$  en sub-surface, 26.03  $dS.m^{-1}$  dans le troisième horizon, et 28.14  $dS.m^{-1}$  en profondeur. La différence entre la moyenne et la médiane montre qu'il y a une dissymétrie à droite pour la  $CE_{psc2}$ ,  $CE_{psc3}$  et  $CE_{psc4}$ , par contre, la  $CE_{psc1}$  a une dissymétrie à gauche.

**Tableau 36.** Les paramètres de statistiques descriptives de la conductivité électrique calculée

Paramètres	CE <sub>psc</sub> en dS.m <sup>-1</sup> 25°C (Juin 2012)				CE <sub>psc</sub> en dS.m <sup>-1</sup> 25°C (Novembre 2012)			
	CE <sub>psc1</sub>	CE <sub>psc2</sub>	CE <sub>psc3</sub>	CE <sub>psc4</sub>	CE <sub>psc1</sub>	CE <sub>psc2</sub>	CE <sub>psc3</sub>	CE <sub>psc4</sub>
<b>Minimum</b>	0.02	7.58	7.85	8.04	2.19	4.67	5.08	10.34
<b>Maximum</b>	24.45	29.77	49.09	48.39	14.73	51.67	62.36	54.73
<b>Moyenne</b>	8.73	17.63	23.83	25.31	8.28	22.58	27.16	28.35
<b>Médiane</b>	8.51	17.75	23.55	25.30	8.33	22.08	26.03	28.14
<b>Coefficient de variation %</b>	54.22	27.36	30.57	30.26	33.45	28.12	35.60	32.45

### VI.3.5.2. Fréquences de la conductivité électrique calculée(CE<sub>psc</sub>) des différents horizons

#### 1) Campagne Juin 2012

Le **tableau 37** présente les fréquences des différentes classes de salinité pour chaque horizon, où la proportion des horizons non salés avec une CE<sub>psc</sub> inférieure à 2 dS.m<sup>-1</sup> est de 6.5 % des horizons de surface (H1) et nulle pour les autres horizons. Aussi, la proportion des horizons extrêmement salés avec une CE<sub>psc</sub> > 16 dS.m<sup>-1</sup> est de 7.9% des horizons H1, 59.5 % des horizons H2, 83.7 % des horizons H3 et 86.7 % des horizons H4.

Par ailleurs,

- 12.45 % des H1, 0 % des H2, 0 % des H3 et 0 % des H4 sont légèrement salins avec une CE<sub>psc</sub> comprise entre 2 et 4 dS.m<sup>-1</sup>
- 27.9 % des H1, 0.3 % des H2, 0.1 % des H3 et 0 % des H4 sont salins avec une CE<sub>psc</sub> comprise entre 4 et 8 dS.m<sup>-1</sup>
- 45.4 % des H1, 40.2 % des H2, 16.2 % des H3 et 13.3 % des H4 sont très salins avec une CE<sub>psc</sub> comprise entre 8 et 16 dS.m<sup>-1</sup>.
- 7.9 % des H1, 59.5 % des H2, 61.5 % des H3 et 57.4 % des H4 sont extrêmement salins avec une CE<sub>psc</sub> comprise entre 16 et 30 dS.m<sup>-1</sup>
- 0 % des H1, 0 % des H2, 22.2 % des H3 et 29.3 % des H4 sont extrêmement salins avec une CE<sub>psc</sub> > 30 dS.m<sup>-1</sup>

#### 2) Campagne Novembre 2012

Le **tableau 37** présente les fréquences des différentes classes de salinité pour chaque horizon, où la proportion des horizons non salés avec une CE<sub>psc</sub> inférieure à 2 dS.m<sup>-1</sup> est nulle pour tous les horizons. Aussi, la proportion des horizons extrêmement salés avec une CE<sub>psc</sub> > 16

$\text{dS.m}^{-1}$  est nulle pour les horizons H1, 85.1 % des horizons H2, 87.5 % des horizons H3 et 90 % des horizons H4.

Par ailleurs,

- 6.1 % des H1, 0 % des H2, 0 % des H3 et 0 % des H4 sont légèrement salins avec une  $\text{CE}_{\text{psc}}$  comprise entre 2 et 4  $\text{dS.m}^{-1}$
- 40.1 % des H1, 0 % des H2, 0 % des H3 et 0 % des H4 sont salins avec une  $\text{CE}_{\text{psc}}$  comprise entre 4 et 8  $\text{dS.m}^{-1}$
- 53.7 % des H1, 14.5 % des H2, 12.4 % des H3 et 10 % des H4 sont très salins avec une  $\text{CE}_{\text{psc}}$  comprise entre 8 et 16  $\text{dS.m}^{-1}$  - 0 % des H1, 79 % des H2, 56.7 % des H3 et 53 % des H4 sont extrêmement salins avec une  $\text{CE}_{\text{psc}}$  comprise entre 16 et 30  $\text{dS.m}^{-1}$ .
- 0 % des H1, 6.1 % des H2, 30.8 % des H3 et 37 % des H4 sont extrêmement salins avec une  $\text{CE}_{\text{psc}} > 30 \text{ dS.m}^{-1}$ .

**Tableau 37.** Répartition de la fréquence des horizons (en %), en fonction des classes de salinité ( $\text{CE}_{\text{psc}}$  en  $\text{dS.m}^{-1}$ )

Horizons (cm)	Nbre	Classes de salinité ( $\text{CE}_{\text{psc}}$ en $\text{dS.m}^{-1}$ )					
		< 2	2 - 4	4 - 8	8 - 16	16 - 30	>30
<b>Juin 2012</b>							
H1 (0-25cm)	862	6.5%	12.4%	27.9%	45.4%	7.9%	0%
H2 (25-50cm)	862	0%	0%	0.3%	40.2%	59.5%	0%
H3 (50-75cm)	862	0%	0%	0.1%	16.2%	61.5%	22.2%
H4 (75-100cm)	862	0%	0%	0%	13.3%	57.4%	29.3%
<b>Novembre 2012</b>							
H1 (0-25cm)	847	0%	6.1%	40.1%	53.7%	0%	0%
H2 (25-50cm)	847	0%	0%	0.4%	14.5%	79%	6.1%
H3 (50-75cm)	847	0%	0%	0.1%	12.4%	56.7%	30.8%
H4 (75-100cm)	847	0%	0%	0%	10%	53%	37%

### VI.3.6. Vérification de la loi de distribution

La plupart des méthodes de test paramétriques requièrent la normalité des données. Il est donc important de disposer d'une méthode permettant de vérifier cette normalité. Une approche élégante est le test de conformité de Kolmogorov-Smirnov.

Ce test non paramétrique consiste à comparer la distribution de fréquences relatives cumulées d'une variable observée avec la distribution théorique que cette variable aurait si elle était distribuée normalement. On superpose les deux distributions, on cherche la

classe où l'écart entre la distribution théorique et la distribution observée est le plus grand, et on vérifie (dans une table conçue à cet effet ou en calculant directement la valeur critique), si cet écart est significativement grand, c'est-à-dire si l'hypothèse de normalité  $H_0$  : distribution normale peut être rejetée au seuil considéré.

Dans cette étude, la vérification de la loi de distribution a été effectuée par le test **Kolmogorov-Smirnov** qui a été réalisé à partir de la distribution des fréquences pour un niveau de signification de 0,05.

$$N'(X) - F(X) < \frac{1.36}{\sqrt{N}}$$

Où :  $N'(X)$  est la fréquence cumulée et  $F(X)$  est la fonction de répartition de la distribution normale envisagée et  $N$  et le nombre d'échantillons.

Selon le **tableau 38**, pour les résultats de la campagne Juin 2012 (Tableau), seule la  $CE_{psc1}$  suit une distribution normale, contrairement à la  $CE_{psc2}$ ,  $CE_{psc3}$  et la  $CE_{psc4}$  qui ne suivent aucune des lois proposées, à cet effet, elles suivent une loi anormale. Concernant les résultats de la campagne de Novembre 2012, la  $CE_{psc2}$  et la  $CE_{psc3}$  suivent une distribution normale, contrairement, la  $CE_{psc1}$  et la  $CE_{psc4}$  ne suivent aucune des lois proposées, à cet effet, elles suivent une loi anormale (**Tab.39**).

**Tableau 38.** Vérification de la loi de distribution de la  $CE_{psc}$  par le test de Kolmogorov-Smirnov (Juin 2012).

Paramètres	N	$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$	Test K-S	Lois de distribution
$CE_{psc1}$	864	0.046	0.04	N
$CE_{psc2}$	864	0.046	0.048	AN
$CE_{psc3}$	864	0.046	0.056	AN
$CE_{psc4}$	864	0.046	0.051	AN
<b>Ln</b> $CE_{psc2}$	864	<b>0.046</b>	0.082	<b>AN</b>
<b>Ln</b> $CE_{psc3}$	864	<b>0.046</b>	0.075	<b>AN</b>
<b>Ln</b> $CE_{psc4}$	864	<b>0.046</b>	0.081	<b>AN</b>
<b>Exp</b> $CE_{psc2}$	864	<b>0.046</b>	0.457	<b>AN</b>
<b>Exp</b> $CE_{psc3}$	864	<b>0.046</b>	0.505	<b>AN</b>
<b>Exp</b> $CE_{psc4}$	864	<b>0.046</b>	0.502	<b>AN</b>

N : Normale ; AN : Anormale

**Tableau 39.** Vérification de la loi de distribution de la  $CE_{psc}$  par le test de Kolmogorov-Smirnov (Novembre 2012).

Paramètres	N	$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$	Test K-S	Lois de distribution
$CE_{psc1}$	847	0.047	0,049	AN
$CE_{psc2}$	847	0.047	0,043	N
$CE_{psc3}$	847	0.047	0,045	N
$CE_{psc4}$	847	0.047	0,054	AN
<b>Ln <math>CE_{psc1}</math></b>	847	<b>0.047</b>	0,088	<b>AN</b>
<b>Ln <math>CE_{psc4}</math></b>	847	<b>0.047</b>	0,108	<b>AN</b>
<b>Exp<math>CE_{psc1}</math></b>	847	<b>0.047</b>	0,38	<b>AN</b>
<b>Exp<math>CE_{psc4}</math></b>	847	<b>0.047</b>	0,504	<b>AN</b>

N : Normale ; AN : Anormale

#### VI.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).

##### VI.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.

#### 1) Analyse variographique des résultats de la campagne Juin 2012

##### a) Structure du semi-variogramme de l'horizon de surface (0-25cm)

Le semi-variogramme de la **figure 40** s'ajuste mieux à un modèle Rational Quadratique avec un rapport d'anisotropie égal à 1.61 selon la direction  $273.7^\circ$  (**Tabl.40**). Ce résultat signifie que la  $CE_{psc}$  du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépite est de  $3.79 \text{ dS.m}^{-1}$  indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier ( $9.28 \text{ dS.m}^{-1}$ ) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 94.59 m, selon la direction 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.

#### **b) Structure du semi-variogramme de l'horizon de sub-surface (25-50cm)**

Le semi-variogramme de la **figure 41** s'ajuste mieux à un modèle Rational Quadratique avec un rapport d'anisotropie égal à 1.61 selon la direction  $290.7^\circ$  (**Tab.40**). Ce résultat signifie que la CEpsc du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépité est de  $1.56 \text{ dS.m}^{-1}$  indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier ( $9.72 \text{ dS.m}^{-1}$ ) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 81.68 m, selon la direction 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.

#### **c) Structure du semi-variogramme de l'horizon (50-75cm)**

Le semi-variogramme de la **figure 42** s'ajuste mieux à un modèle Exponentiel avec un rapport d'anisotropie égal à 1.64 selon la direction  $282.4^\circ$  (**Tab.40**). Ce résultat signifie que la CEpsc du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépité est de  $2.75 \text{ dS.m}^{-1}$  il indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier ( $25.35 \text{ dS/m}$ ) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 85.36 m, selon la direction 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.

#### **d) Structure du semi-variogramme de l'horizon de profondeur (75-100cm)**

Le semi-variogramme de la **figure 43** s'ajuste mieux à un modèle Exponentiel avec un rapport d'anisotropie égal à 1.7 selon la direction  $281.9^\circ$  (**Tab.40**). Ce résultat signifie que la CEpsc du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépité est de  $1.91 \text{ dS.m}^{-1}$  indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier ( $25.14 \text{ dS/m}$ ) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 87.03 m, selon la direction 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 40. Paramètres du modèle de variogramme des différents horizons (Juin 2012)

Profondeur du sol (cm)	Modèle	Pépite (dS/m <sup>2</sup> )	Pallier (dS/m <sup>2</sup> )	Portée (m)	Anisotropie	Direction
0-25cm	R. quadratique	3.78	9.28	94.64	1.61	273.7
25-50cm	R. quadratique	1.56	9.72	81.67	1.17	290.7
50-75cm	Exponentiel	2.75	25.35	85.36	1.64	282.4
75-100cm	Exponentiel	1.91	25.14	87.03	1.70	281.9

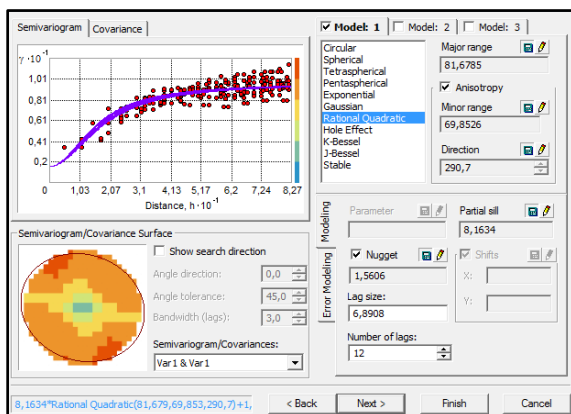


Figure 40. Modèle du variogramme de l'horizon de surface (0-25cm)

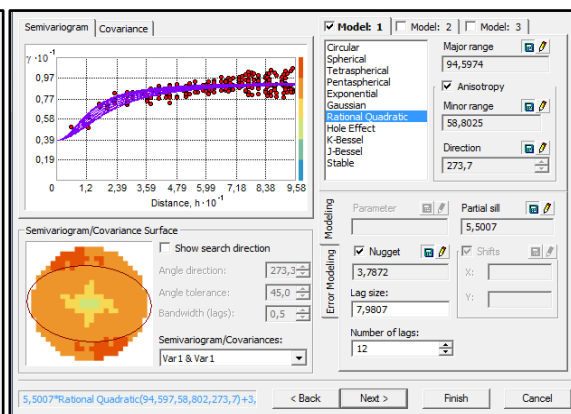


Figure 41. Modèle du variogramme de l'horizon de sub-surface (25-50cm)

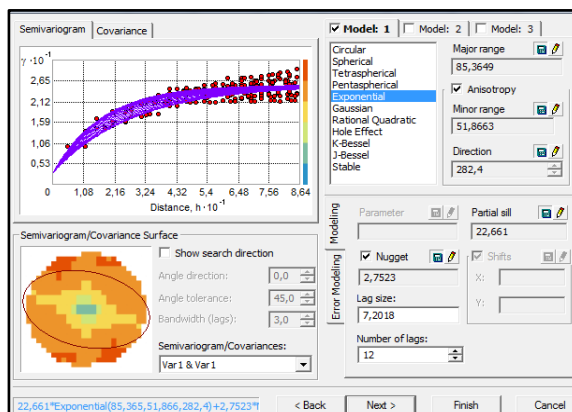


Figure 42. Modèle du variogramme de l'horizon (50-75cm)

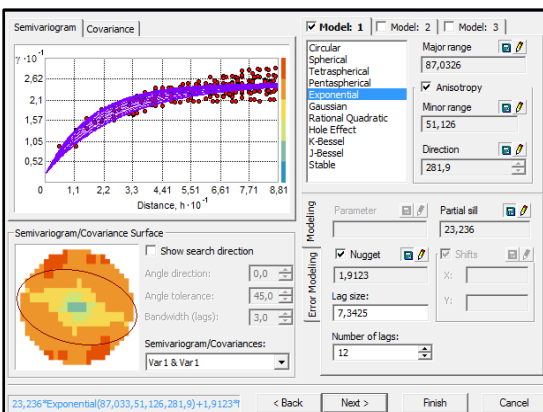


Figure 43. Modèle du variogramme de l'horizon de profondeur (75-100cm)

## 2) Analyse variographique des résultats de la campagne Novembre 2012

### a) Structure du semi-variogramme de l'horizon de surface (0-25cm)

Le semi-variogramme de la **figure 44** s'ajuste mieux à un modèle Exponentiel avec un rapport d'anisotropie égal à 1.48 selon la direction  $278.3^\circ$  (**Tab.41**). Ce résultat signifie que la CEpsc du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée. L'effet de pépité est de  $0.57 \text{ dS.m}^{-1}$  indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier ( $3.43 \text{ dS/m}$ ) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 95.93 m, selon la direction 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.

### b) Structure du semi-variogramme de l'horizon de sub-surface (25-50cm)

Le semi-variogramme de la **figure 45** s'ajuste mieux à un modèle Exponentiel avec un rapport d'anisotropie égal à 1.20 selon la direction  $282.3^\circ$  (**Tab.41**). Ce résultat signifie que la CEpsc du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée. L'effet de pépité est de  $13.99 \text{ dS.m}^{-1}$  indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier ( $28.63 \text{ dS/m}$ ) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 92.28 m, selon la direction 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.

### c) Structure du semi-variogramme de l'horizon (50-75cm)

Le semi-variogramme de la **figure 46** s'ajuste mieux à un modèle Exponentiel avec un rapport d'anisotropie égal à 1.14 selon la direction  $345.7^\circ$  (**Tab.41**). Ce résultat signifie que la CEpsc du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée. L'effet de pépité est de  $19.84 \text{ dS.m}^{-1}$ , il indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier ( $38.64 \text{ dS/m}$ ) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 84.57 m, selon la direction 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.

**d) Structure du semi-variogramme de l'horizon de profondeur (75-100cm)**

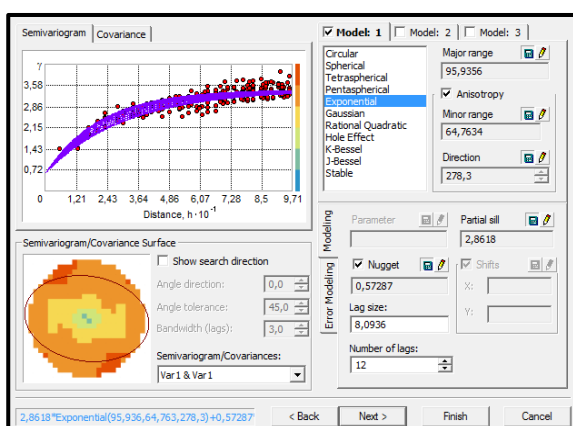
Le semi-variogramme de la **figure 47** s'ajuste mieux à un modèle Rational Quadratique avec un rapport d'anisotropie égal à 1.18 selon la direction 282.3°(**Tab.41**). Ce résultat signifie que la CEpsc du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépite est de 10.3 dS.m<sup>-1</sup>, il indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier (39.35 dS/m) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

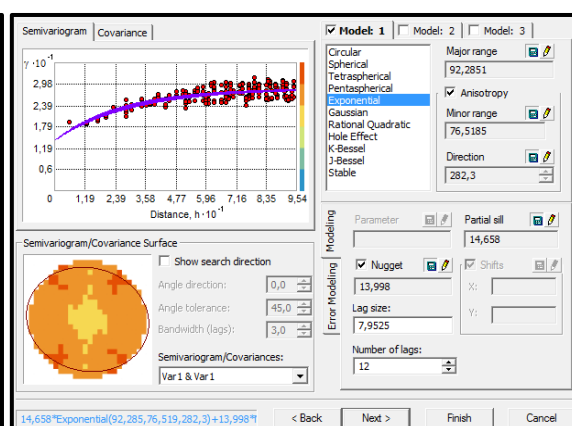
La portée est de 90.35 m, selon la direction la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEpsc deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

**Tableau 41.** Paramètres du modèle de variogramme des différents horizons (Nov. 2012)

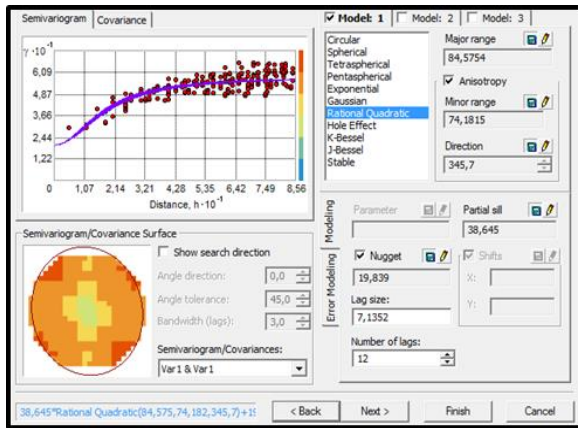
Profondeur du sol (cm)	Modèle	Pépité dS.m <sup>-1</sup>	Pallier dS.m <sup>-1</sup>	Portée (m)	Anisotropie	Direction
0-25cm	Exponentiel	0.57	3.43	95.93	1.48	278.3
25-50cm	Exponentiel	13.98	28.63	92.28	1.20	282.3
50-75cm	R. quadratique	19.84	38.64	84.57	1.14	345.7
75-100cm	R. quadratique	10.3	39.35	90.35	1.18	285.9



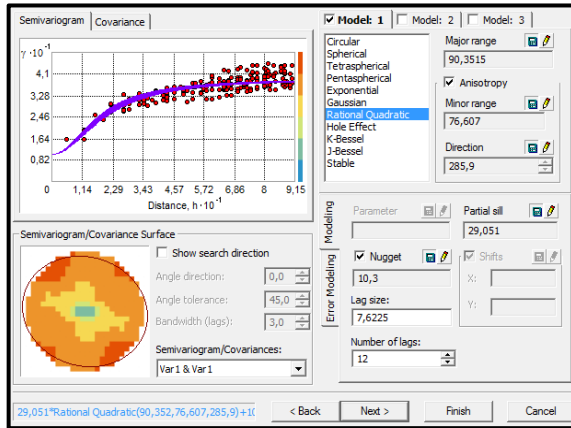
**Figure 44.** Modèle du variogramme de l'horizon de surface (0-25cm)



**Figure 45.** Modèle du variogramme de l'horizon de sub-surface (25-50cm)



**Figure 46.** Modèle du variogramme de l'horizon (50-75cm)



**Figure 47.** Modèle du variogramme de de l'horizon de profondeur (75-100cm)

#### VI.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 E.H., Srivastava R.M., 1989).

Dans cette étude, les modèles de semi-variogrammes ont été testés pour chaque horizon et les performances de prédiction de la salinité sont représentés les **tableaux 42 et 43**.

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;
- La racine carrée de l'écart quadratique moyen (**RMSE**) doit être proche de 1 (Johnston K., and al, 2001).

##### 1) Cartographie par krigeage ordinaire des conductivités électriques calculées de la campagne Juin 2012

Dans le **tableau 42** (Juin 2012), les résultats montrent que, pour les différents horizons, les valeurs de la EM sont situées entre l'intervalle -0.0014 à 0.0013, les valeurs de la RMS et de l'ASE sont situées, respectivement, entre l'intervalle 1.87 à 3.35 et 1.88 à 3.38. Les valeurs de la RMSE sont situées entre l'intervalle 0.99 à 1.

**Tableau 42.** Erreurs de prédiction des modèles de variogramme (Juin 2012)

Profondeur du sol (cm)	Modèles	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> )
0-25cm	R. quadratique	2.39	2.41	-0.0014	1
25-50cm	R. quadratique	1.87	1.88	0.0024	0.99
50-75cm	Exponentiel	3.35	3.38	0.0010	0.99
75-100cm	Exponentiel	3.228	3.236	0.0013	1

## 2) Cartographie par krigeage ordinaire des conductivités électriques calculées de la campagne Novembre 2012

Pour le **tableau 43**, les résultats montrent que, pour les différents horizons, les valeurs de la EM sont situées entre l'intervalle -0.00001 à 0.0001, les valeurs de la RMS et de l'ASE sont situées, respectivement, entre l'intervalle 1.27 à 5.78 et 1.26 à 5.83. Les valeurs de la RMSE sont situées entre l'intervalle 0.98 à 1.

**Tableau 43.** Erreurs de prédiction des modèles de variogramme (Novembre 2012)

Profondeur du sol (cm)	Modèles	Erreurs de prédiction			
		(RMS) (dS.m <sup>-1</sup> )	ASE (dS.m <sup>-1</sup> )	(EM) (dS.m <sup>-1</sup> )	RMSE (dS.m <sup>-1</sup> )
0-25cm	Exponentiel	1.27	1.26	-0.0017	1.0
25-50cm	Exponentiel	5.51	4.52	-0.0035	0.99
50-75cm	Exponentiel	5.74	5.64	0.0003	1.0
75-100cm	R. quadratique	4.22	4.19	-0.00001	1.0

### VI.5. Distribution spatiale de la salinité

Les cartes krigées, issues de l'analyse géostatistique des conductivités électriques estimées aux 910 emplacements de mesures de la conductivité électromagnétique, sont présentées dans les **figures (48 à 55)**. Les couleurs ont été choisies pour correspondre aux seuils d'interprétation habituels de la salinité de l'USDA. Les calculs des superficies ont été établis automatiquement, par le module Géostatistical Analyst du logiciel ARCGIS 9.3, avec lequel

les cartes de salinité ont été générées. Le tableau représente la répartition des superficies en hectares (Ha) en fonction des classes de salinité.

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

### 1) Distribution spatiale de la salinité (campagne Juin 2012)

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

La **figure 48** montre une hétérogénéité de la répartition des différentes classes de la salinité au niveau de la parcelle. Aussi, les plus fortes concentrations de la salinité sont situées dans la partie nord de la parcelle et les plus faibles concentrations sont situées dans la partie sud.

- **Les sols non salins** ( $CE_{psc} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent une faible partie de la parcelle (0,6 ha soit 5%) et se situent essentiellement au sud-ouest et au sud-est;
- **Les sols légèrement salins** ( $2 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent 1.5 ha soit 13% et se répartissent aussi sur sud-ouest et au sud-est de la parcelle;
- **Les sols salins** ( $4 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent une superficie de 3.1 ha, soit 28% et occupent la partie centrale du sud de la parcelle, avec quelques plages au nord-ouest;
- **Les sols très salins** ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent environ la moitié de la parcelle soit 5.7 ha, soit 50%. Ils sont concentrés au nord et au centre de la parcelle avec quelques plages dans la partie centrale du sud de la parcelle;
- **Les sols extrêmement salins** ( $16 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent 0.5 ha, soit 4%, et sont situés au nord-est de la parcelle;
- Les sols avec une  $CE_{psc}$  supérieure à  $30 \text{ dS.m}^{-1}$  sont inexistantes.

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

La **figure 49** montre, au contraire de la couche (0-25cm), une homogénéité de la répartition de la salinité, au niveau de la parcelle. Les plus fortes concentrations de la salinité sont situées, dans la partie nord de la parcelle et les plus faibles concentrations sont situées dans la partie sud.

- **Les sols non salins** ( $CE_{psc} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistantes;
- **Les sols légèrement salins** ( $2 \text{ dS.m}^{-1} < CE_C < 4 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistantes;
- **Les sols salins** ( $4 < CE_{psc} < 8 \text{ dS/m}$ ) occupent une très faible superficie, représentée par une plage de 0.1 ha, soit 01%, située au sud-est de la parcelle;
- **Les sols très salins** ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent 4.5 ha, soit 39% de la, et sont concentrés au centre et au sud de la parcelle avec quelques plages dans le centre et le nord de la parcelle;

- **Les sols extrêmement salins** ( $16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent la majeure partie de la parcelle et représentent 60 %, soit 6.7 ha, et sont situés au nord et au centre de la parcelle;
- Les sols avec une  $\text{CE}_{\text{psc}}$  supérieure à  $30 \text{ dS.m}^{-1}$  sont inexistantes.

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

La **figure 50** montre une dominance des sols extrêmement salés, au niveau de la parcelle et l'apparition d'une plage à très fortes concentrations en sels ( $\text{CE}_{\text{psc}} > 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ). Ces concentrations de la salinité sont situées, dans la partie nord de la parcelle (entre le drain situé au centre et la limite nord).

- **Les sols non salins** ( $\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistantes;
- **Les sols légèrement salins** ( $2 \text{ dS/m} < \text{CE}_{\text{psc}} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistantes;
- **Les sols salins** ( $4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistantes ;
- **Les sols très salins** ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent 1.6 ha, soit 14% de la parcelle, et sont concentrés au sud-est et au sud-ouest;
- **Les sols extrêmement salins** ( $16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent la majeure partie de la parcelle et représentent 66 %, soit 7.4 ha, et sont situés au nord et au centre de la parcelle;
- Les sols avec une  $\text{CE}_{\text{psc}}$  supérieure à  $30 \text{ dS.m}^{-1}$  représentent 2.2 ha, soit 20%. Ils sont localisés au nord de la parcelle.

#### d) Distribution de la salinité dans l'horizon de profondeur (75-100cm)

La **figure 51** montre, comme dans l'horizon (50-75cm), une dominance des sols extrêmement salés, au niveau de la parcelle et une légère extension de la plage à très fortes concentrations en sels ( $\text{Ceps} > 30 \text{ dS/m}$ ).

- **Les sols non salins** ( $\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistantes;
- **Les sols légèrement salins** ( $2 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{C}} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistantes;
- **Les sols salins** ( $4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistantes ;
- **Les sols très salins** ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent 1.4 ha, soit 12% de la, et sont concentrés au sud-est et au sud-ouest de la parcelle;
- **Les sols extrêmement salins** ( $16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent la majeure partie de la parcelle et représentent 60 %, soit 6.8 ha, et sont situés au nord et au centre de la parcelle;
- Les sols avec une  $\text{CE}_{\text{psc}}$  supérieure à  $30 \text{ dS.m}^{-1}$  représentent 3.1 ha, soit 28% et sont localisés au nord de la parcelle.

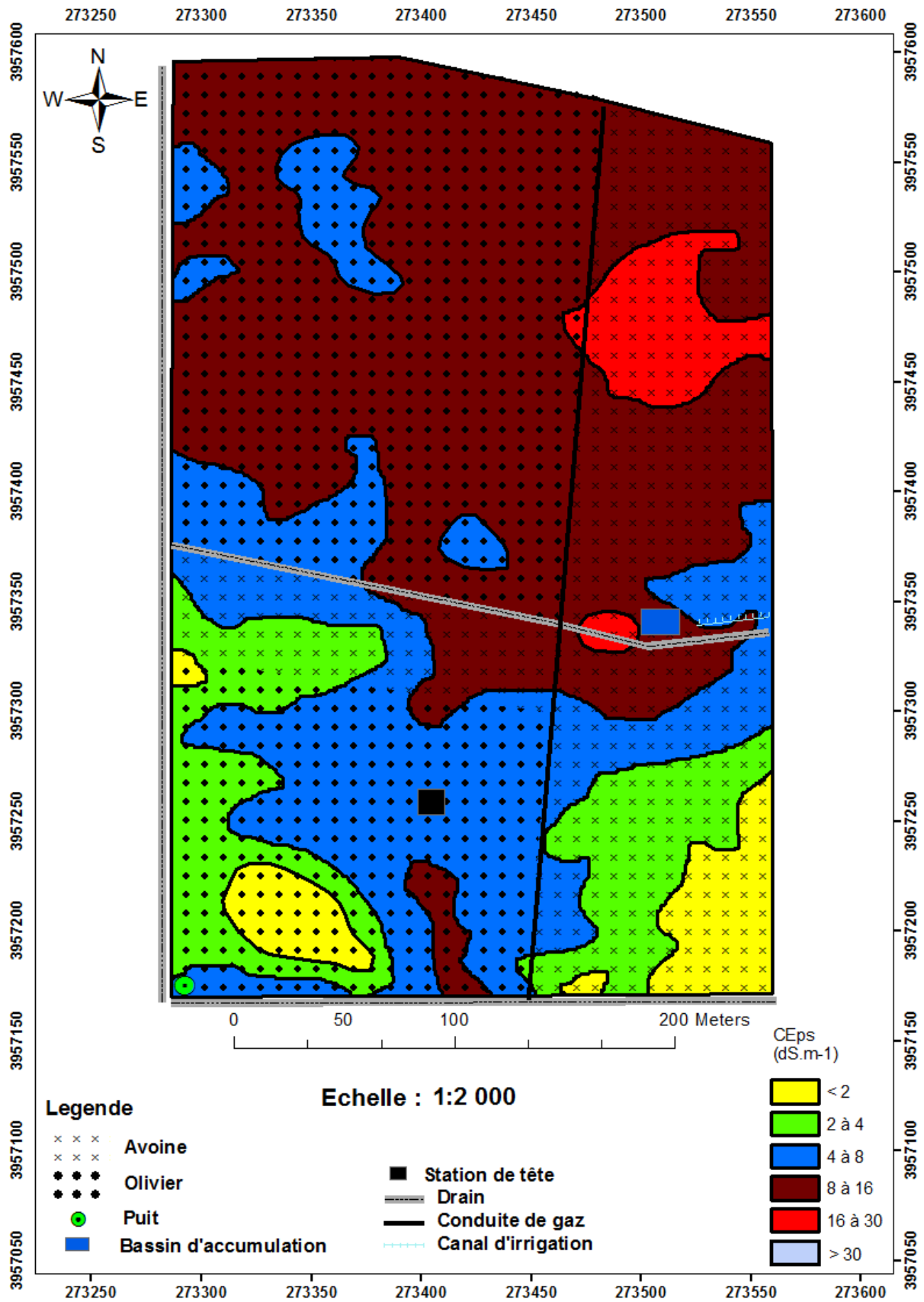


Figure 48. Carte de salinité de l'horizon de surface (0-25cm) (Juin 2012).

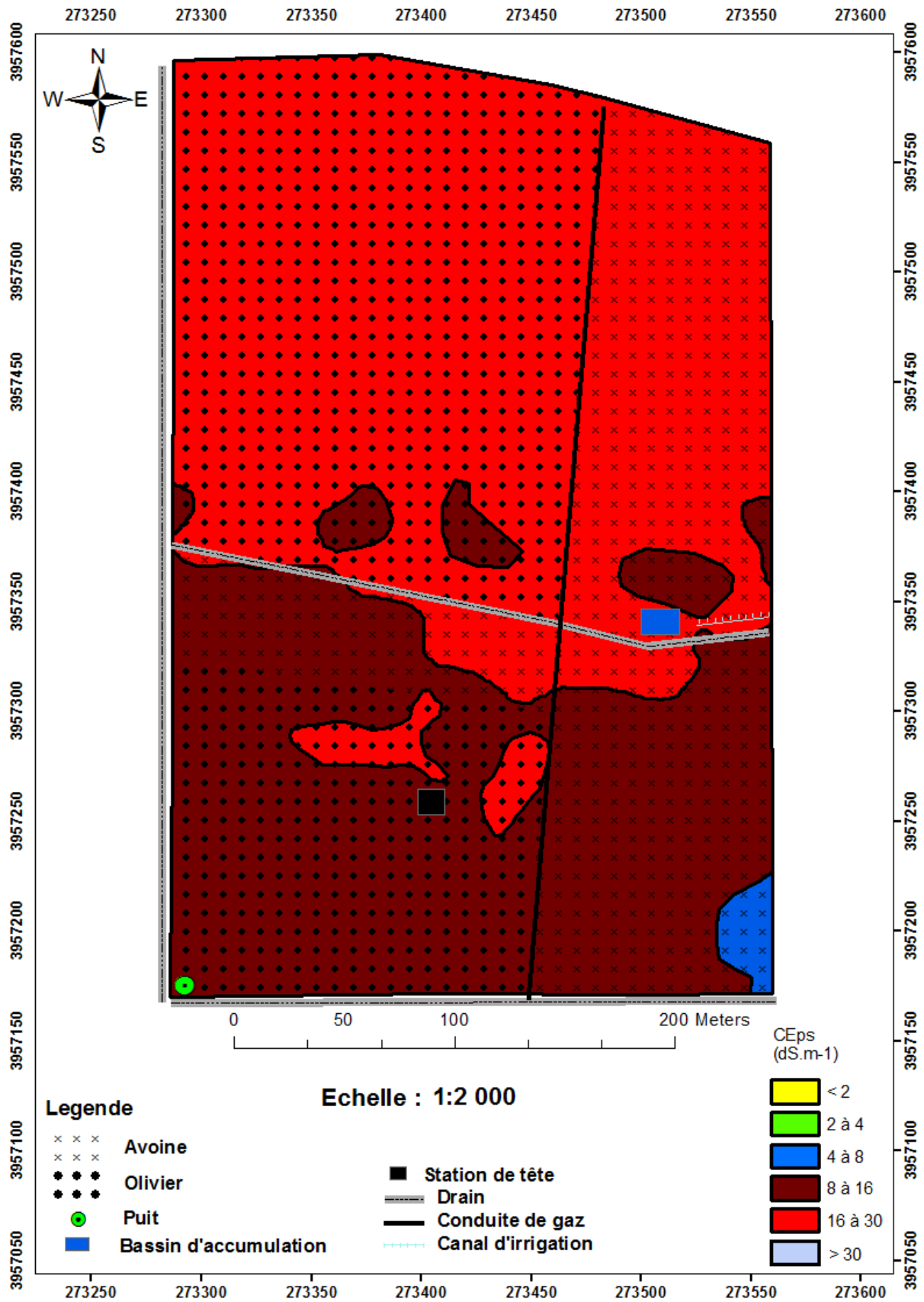


Figure 49. Carte de salinité de l'horizon de sub-surface (25-50cm) (Juin 2012).

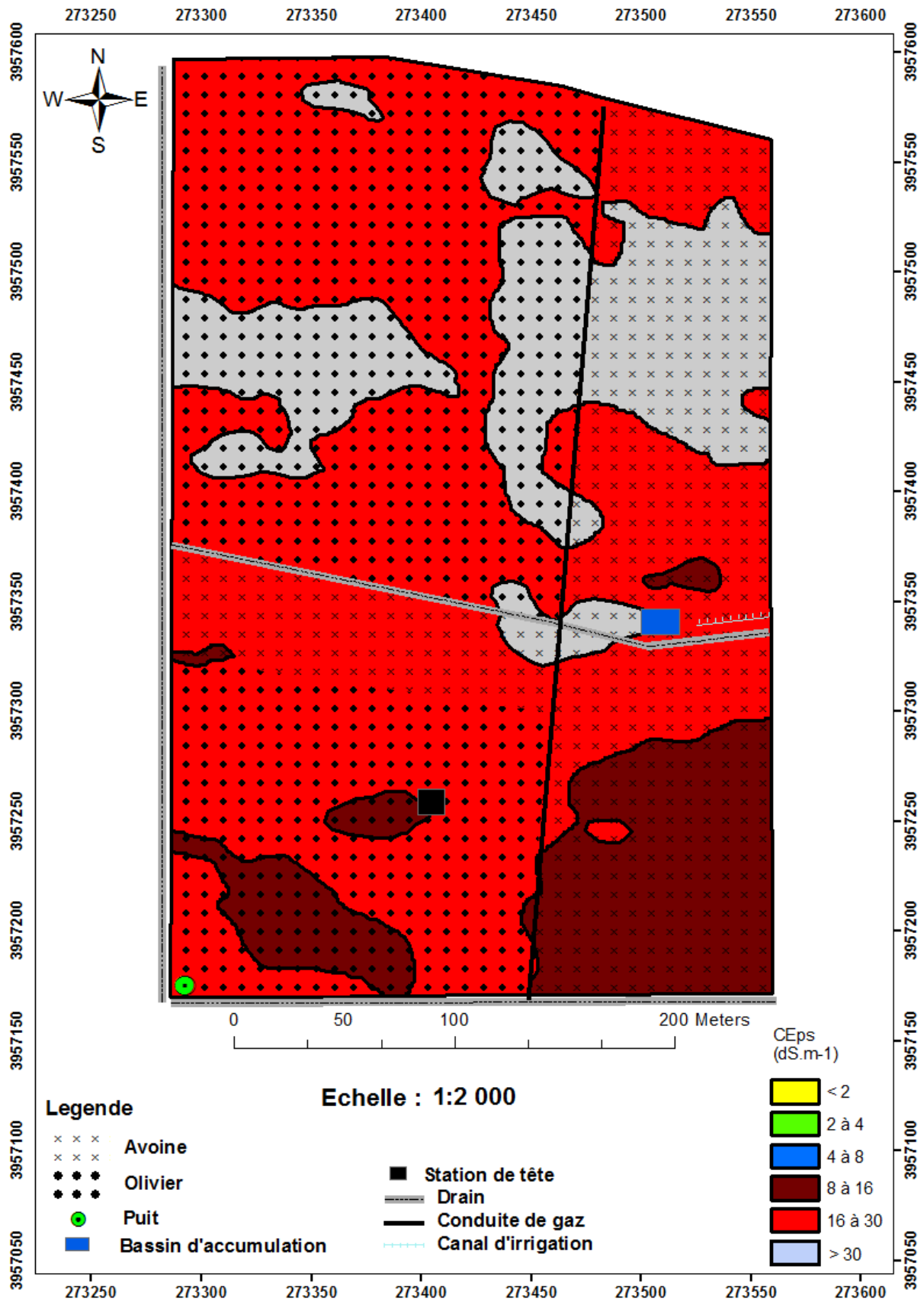


Figure 50. Carte de salinité de l'horizon (50-75cm) (Juin 2012).

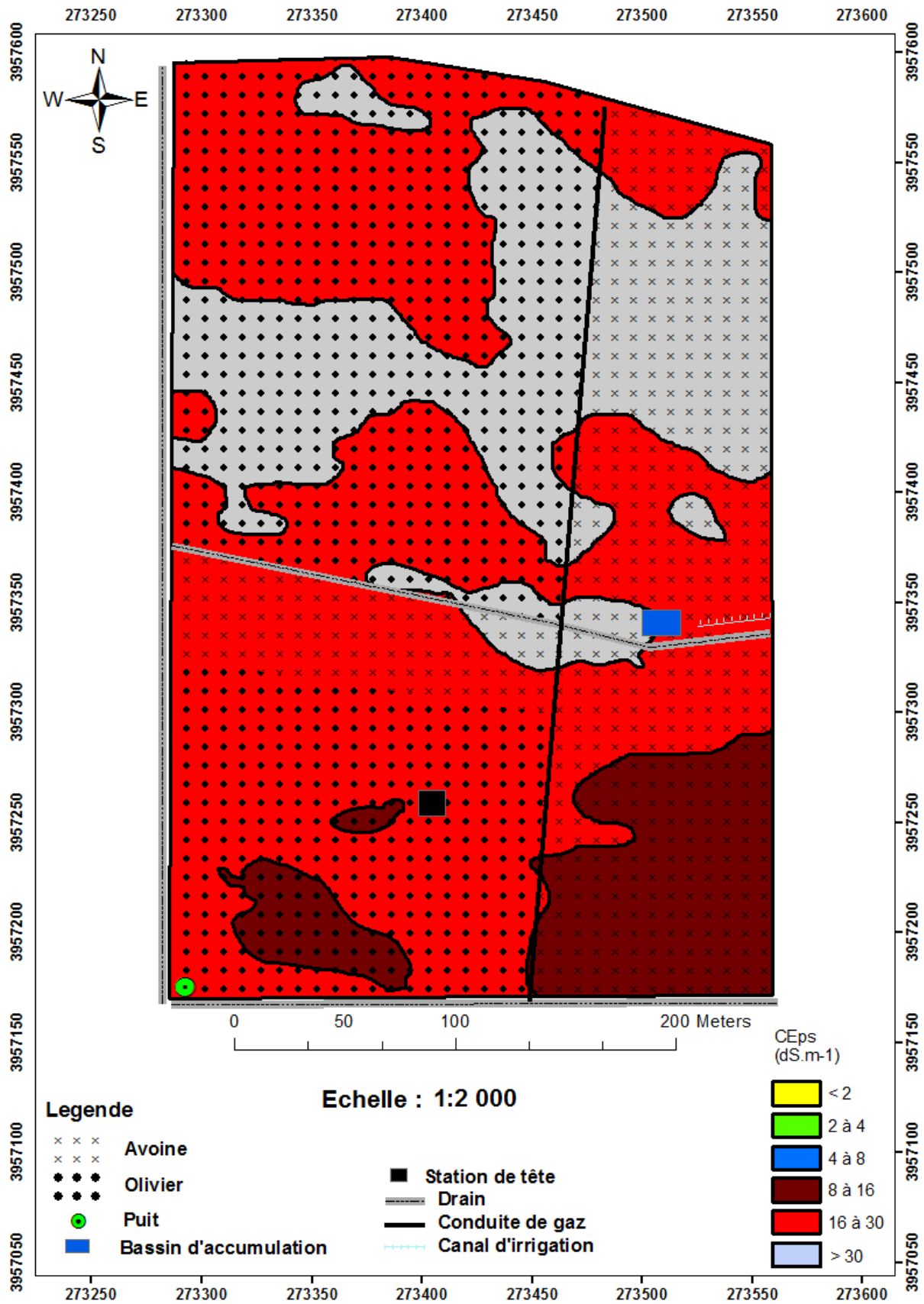


Figure 51. Carte de salinité de l'horizon de profondeur (75-100cm) (Juin 2012).

## 2) Distribution spatiale de la salinité (campagne Novembre 2012)

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

La **figure 52** montre une prédominance des sols salés et très salés et la disparition de la classe de la salinité ( $< 2 \text{ dS.m}^{-1}$ ).

- **Les sols non salins** ( $\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS/m}$ ) sont inexistants ;
- **Les sols légèrement salins** ( $2 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent 0.6 ha soit 5% et se répartissent sur sud-ouest de la parcelle;
- **Les sols salins** ( $4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent une superficie de 4.5 ha, soit 40% et occupent le sud de la parcelle, avec quelques plages au nord;
- **Les sols très salins** ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent plus de la moitié de la parcelle soit 6.2 ha (55 %) et sont concentrés au nord et au centre de la parcelle;
- **Les sols extrêmement salins** ( $16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistants;
- Les sols avec une  $\text{CE}_{\text{psc}}$  supérieure à  $30 \text{ dS.m}^{-1}$  sont inexistants.

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

La **figure 53** montre une prédominance des sols extrêmement salés et la disparition des classes de salinité ( $< 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ). Cependant, il y a l'apparition, dans la partie nord de la parcelle, de quelques plages de salinité ( $> 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ).

- **Les sols non salins** ( $\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistants ;
- **Les sols légèrement salins** sont inexistants ;
- **Les sols salins** ( $4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistants ;
- **Les sols très salins** ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent une faible proportion de 0.8 ha (soit 7%), au sud-ouest et le sud-est de la parcelle(Fig.);
- **Les sols extrêmement salins** ( $16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont prédominants et occupent 10 ha, soit 88 %, (Fig.);
- Les sols avec une  $\text{CE}_{\text{psc}}$  supérieure à  $30 \text{ dS.m}^{-1}$  ne représentent que quelques plages (0.5 ha, soit 5%), au nord-est et nord-ouest de la parcelle.

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

La **figure 54** montre une prédominance des sols extrêmement salés la disparition des classes de salinité ( $< 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ). Cependant, il y a l'apparition de quelques plages de salinité ( $> 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ), dans la partie nord de la parcelle.

- **Les sols non salins** ( $\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistants ;
- **Les sols légèrement salins** sont inexistants ;
- **Les sols salins** ( $4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistants ;

- **Les sols très salins** ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent une faible proportion représentées par quelques plages au sud-est et au sud-ouest de la parcelle (0.8 ha, soit 7%);
- **Les sols extrêmement salins** ( $16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent 6.6 ha, soit 58%, au sud, au centre et quelques plages au nord –ouest de la parcelle;
- Les sols, avec une  $\text{CE}_{\text{psc}}$  supérieure à  $30 \text{ dS.m}^{-1}$ , occupent le reste de la parcelle (3.9 ha, soit 35%), et ils rencontrés au nord de la parcelle.

#### **d) Distribution de la salinité dans l'horizon de profondeur (75-100cm)**

La **figure 55** montre une prédominance des sols extrêmement salés la disparition des classes de salinité ( $< 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ). Cependant, il y a l'apparition, dans la partie nord de la parcelle, de quelques plages de salinité ( $> 30 \text{ dS.m}^{-1}$ );

- **Les sols non salins** ( $\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistantes;
- **Les sols légèrement salins** ( $2 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistantes ;
- **Les sols salins** ( $4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistantes;
- **Les sols très salins** ( $8 \text{ dS/m} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS/m}$ ) occupent une faible proportion représentées par quelques plages au sud-est et au sud-ouest de la parcelle (1 ha, soit 9%);
- **Les sols extrêmement salins** ( $16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ) occupent 5.4 ha, soit 48 %, au sud, au centre et quelques plages au nord –ouest de la parcelle;
- Les sols, avec une  $\text{CE}_{\text{psc}}$  supérieure à  $30 \text{ dS.m}^{-1}$ , occupent le reste de la parcelle (4.9 ha, soit 43%), et sont rencontrés au nord de la parcelle.

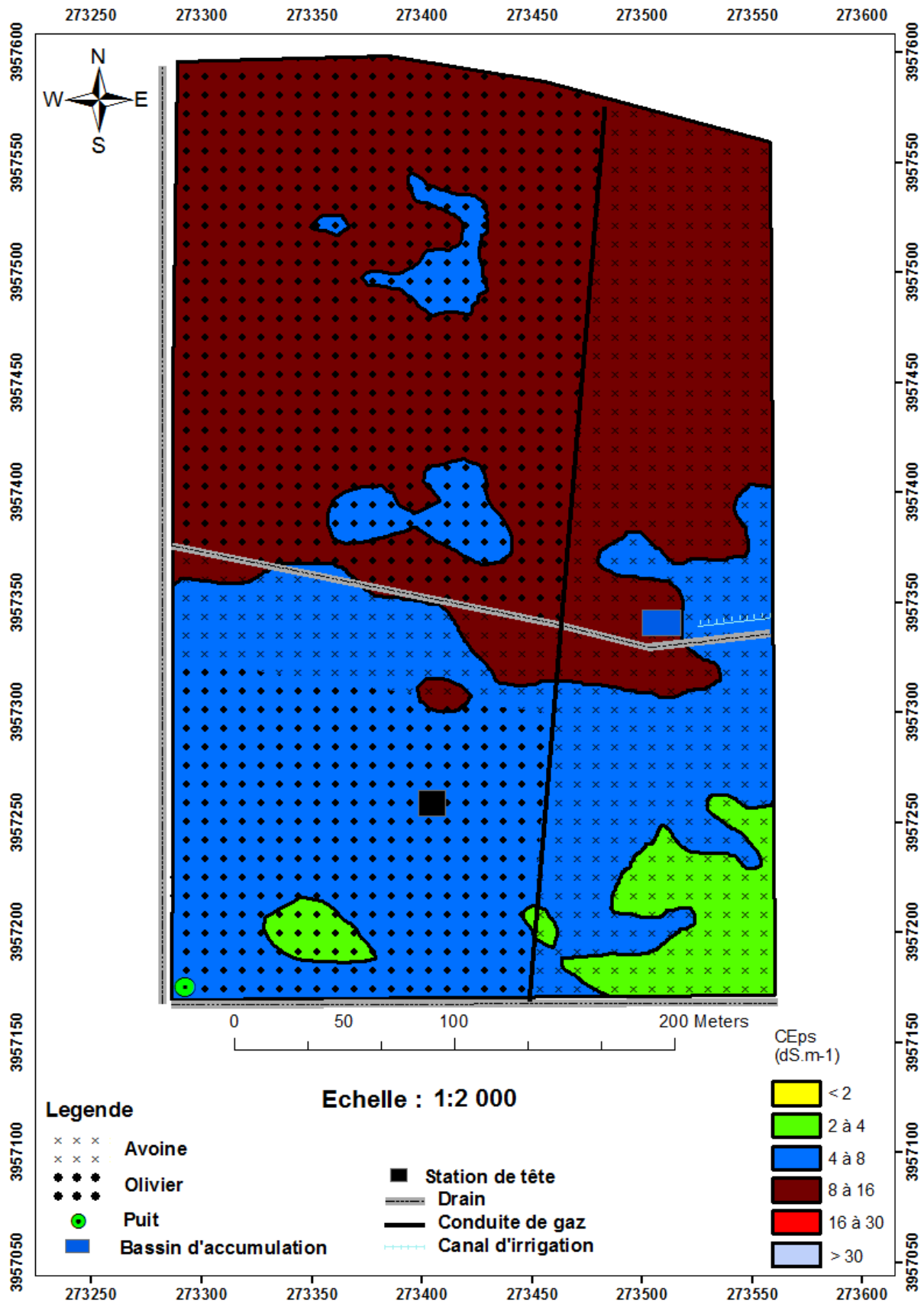


Figure 52. Carte de salinité de l'horizon de surface (0-25cm) (Novembre 2012).

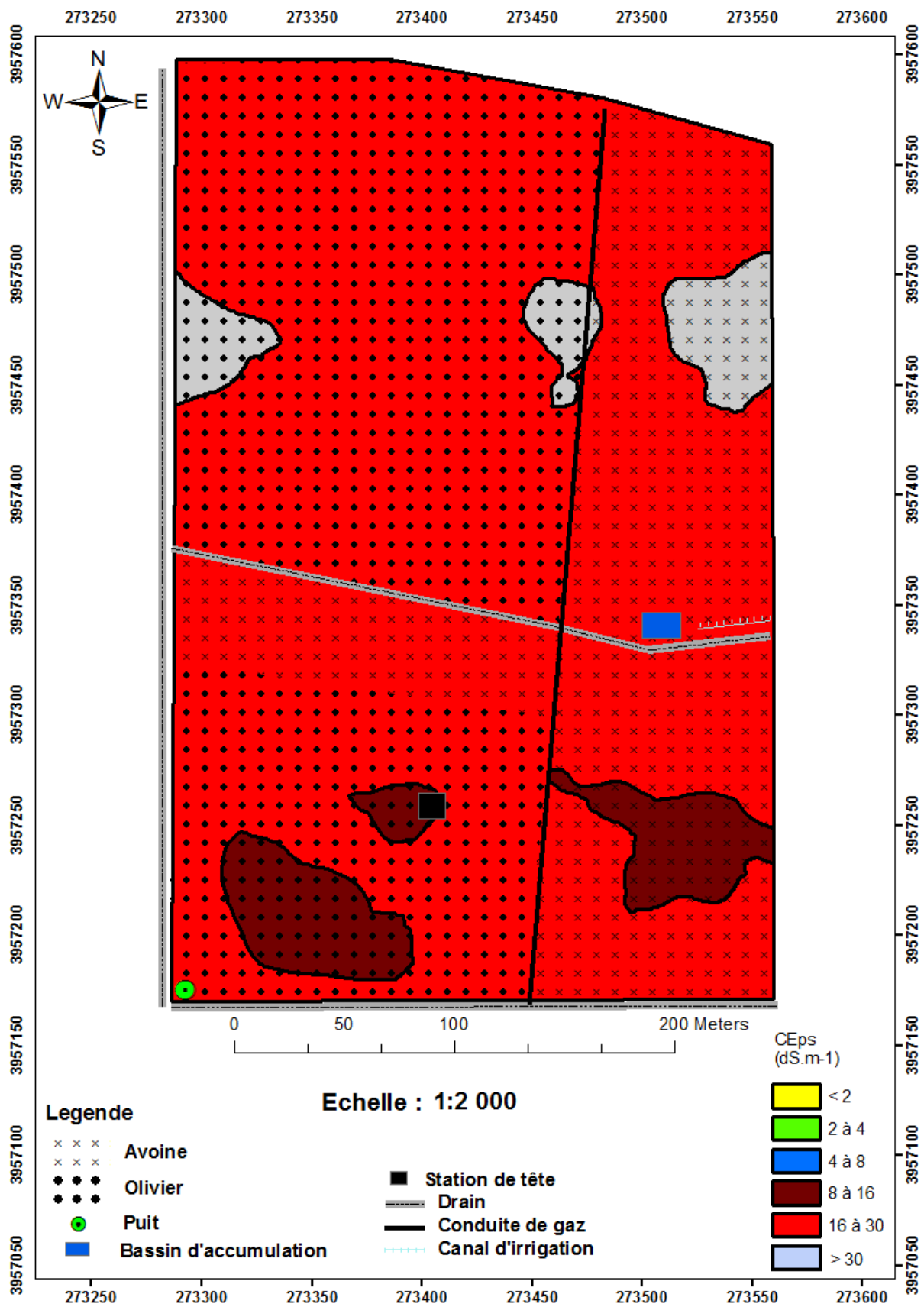


Figure 53. Carte de salinité de l'horizon de sub-surface (25-50cm) (Novembre 2012).

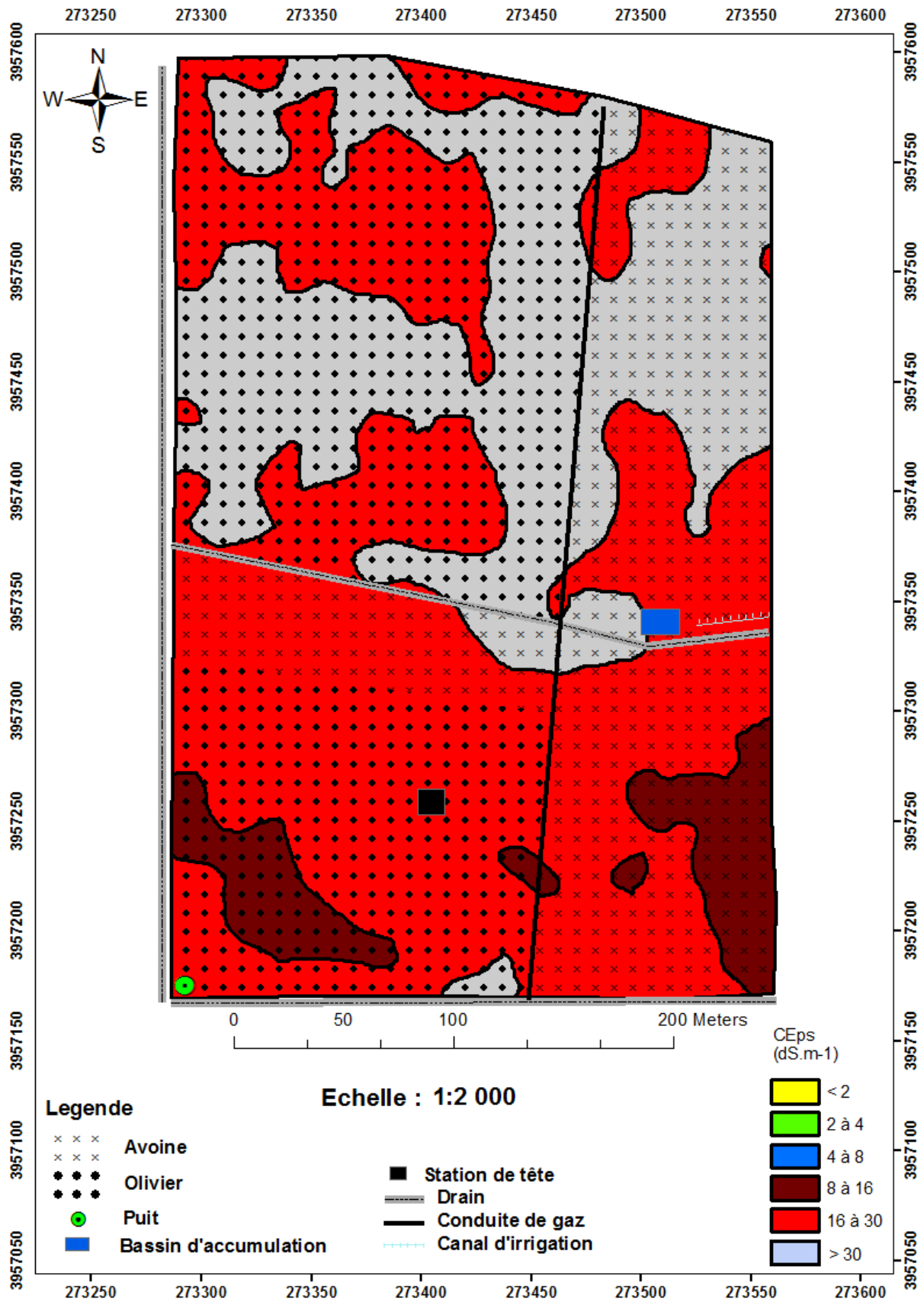


Figure 54. Carte de salinité de l'horizon (50-75cm) (Novembre 2012).

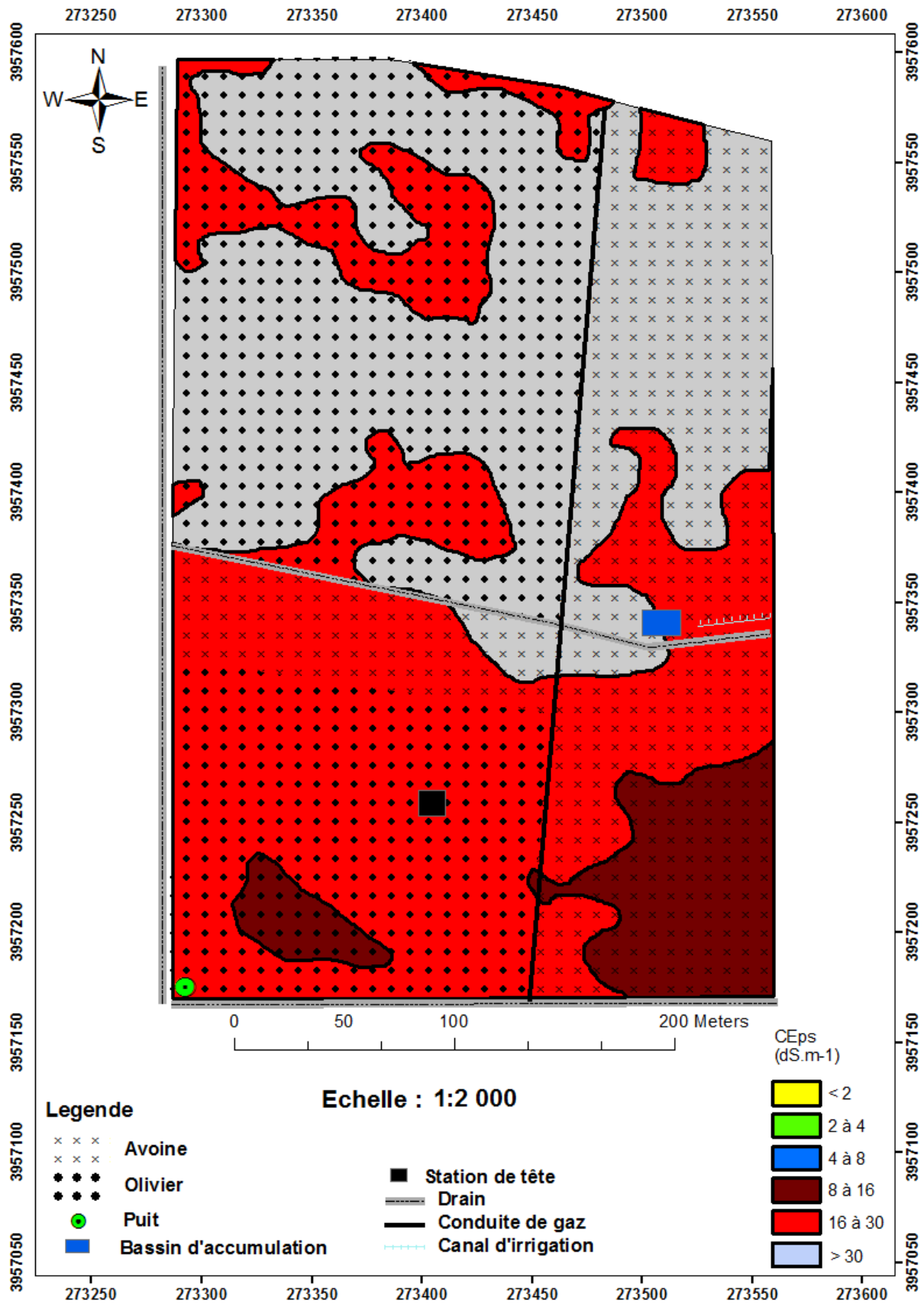


Figure 55. Carte de salinité de l'horizon de profondeur (75-100cm)(Novembre 2012).

## VI.6. Evolution spatio-temporelle de la salinité

La variabilité spatiale de la salinité, au niveau de la parcelle, est particulièrement marquée par toute une gamme de valeurs de la  $CE_{psc}$ . De plus, on observe un gradient de salinité croissant vers le nord de la parcelle.

### 1) Evolution spatio-temporelle de la salinité dans l'horizon de surface (0-25cm)

La répartition spatiale de la salinité, dans l'horizon de surface, montre une structure spatiale analogue des cartes obtenues en Juin et en Novembre 2012 (**fig.49 et 53**). En effet, les plus fortes concentrations sont observées dans le nord et les plus faibles concentrations dans le sud de la parcelle, pour les deux campagnes de mesures. Cependant, les conductivités électriques sont plus fortes en Novembre qu'en Juin (**Tab.44 ; fig.57 et 58**).

- **Sols non salins** ( $CE_{psc} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$ ) : ils sont faiblement représentés, en Juin, (0.6 ha) mais inexistant, en Novembre ;
- **Sols moyennement salins** ( $2 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$ ) : leur superficie est passée de 1.4 ha (13.24 %), en Juin, à 0.6 ha (7.94 %), en Novembre, soit une réduction de 5.3 % ;
- **Sols salins** ( $4 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$ ) : leur superficie est passée de 2.97 ha (26.4%), en Juin, à 4.55 ha (40.4 %), en Novembre, soit une augmentation de 14 % ;
- **Sols très salins** ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) : leur superficie est passée de 5.7 ha (50.67%), en Juin, à 6.1 ha (54.2 %) en Novembre, soit une augmentation de 3.53 % ;
- **Sols extrêmement salins** ( $16 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ) : ils occupent 0.48 ha (4.27 %) de la superficie, en Juin, mais inexistant, en Novembre.

### 2) Evolution spatio-temporelle de la salinité dans l'horizon de sub-surface (25-50cm)

Selon le **tableau 44 et les figures 57 et 58**, l'horizon de sub-surface est caractérisé par une forte augmentation de la salinité en Novembre ( $CE_{psc} > 8 \text{ dS/m}$ ) et la disparition des classes de salinité inférieures à 8 dS/m. Ceci pourrait être dû aux remontées des sels par capillarité, pendant la période estivale, jusqu'à l'horizon de sub-surface. En effet, l'apparition de très fortes concentrations en sels ( $CE_{psc} > 30 \text{ dS/m}$ ), au nord de la parcelle, témoigne de cette situation.

- **Les sols non salins** ( $CE_{psc} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$ ) et les sols moyennement salins ( $2 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistant pendant toute la période (Juin à Novembre) ;
- **Les sols salins** ( $4 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont représentés par une très faible plage de 0.1 ha, en Juin ;

- **Les sols très salins** ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) : avec une superficie de 4.46 ha (39.68%), en Juin, elle diminue jusqu' à 0.65 ha (5.78 %), en Novembre, soit une réduction de 33.9 % ;
- **Les sols extrêmement salins** ( $16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ) : leur superficie a évolué de 5.7 ha (59.52%), en Juin, à 10.2 ha (89.96 %), en Novembre, soit une augmentation de 30.44 % ;
- Les sols à  $\text{CE}_{\text{psc}} > 30 \text{ dS.m}^{-1}$  sont inexistantes en Juin, mais représentent 4.27% (soit 0.48 ha) de la superficie, en Novembre.

#### IV.4.3. Evolution spatio-temporelle de la salinité dans l'horizon (50-75cm)

Le **tableau 44 et les figures 57 et 58**, montre que l'horizon (50-75cm) est caractérisé par une forte augmentation de la salinité en Novembre ( $\text{CE}_{\text{psc}} > 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) et la réduction des classes de salinité ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) et ( $16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ) ;

- **Les sols non salins** ( $\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$ ), moyennement salins ( $2 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$ ) et **les sols salins** ( $4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistantes pendant toute la période (Juin à Novembre) ;
- **Les sols très salins** ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) : leur superficie est passée de 1.73 ha (14.93%), en Juin, à 0.63 ha (5.6 %), en Novembre, soit une réduction de 9.33 % ;
- **Les sols extrêmement salins** ( $16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ) : leur superficie a légèrement diminué, elle était de 7.66 ha (65.16%), en Juin, à 6.58 ha (58.44 %), en Novembre, soit une réduction de 6.72 % ;
- Les sols à  $\text{CE}_{\text{psc}} > 30 \text{ dS.m}^{-1}$  : leur superficie est évoluée de 2.24 ha (19.91%), en Juin, à 4.05 ha (35.97 %), en Novembre, soit une augmentation de 16.06 %.

#### IV.4.4. Evolution spatio-temporelle de la salinité dans l'horizon de profondeur (75-100cm)

Le **tableau 44 et les figures 56 et 57**, montre que l'horizon de profondeur est caractérisé par une forte augmentation de la salinité en Novembre ( $\text{CE}_{\text{psc}} > 16 \text{ dS/m}$ ) et la réduction des classes de salinité ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) et ( $16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ).

- **Les sols non salins** ( $\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$ ), moyennement salins ( $2 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$ ) et **les sols salins** ( $4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$ ) sont inexistantes pendant toute la période (Juin à Novembre) ;
- **Les sols très salins** ( $8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ ) : leur superficie est passée de 1.4 ha (12.44%), en Juin, à 0.91 ha (8.09 %), en Novembre, soit une réduction de 4.35 % ;

- **Les sols extrêmement salins** ( $16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ) : leur superficie est passée de 6.73 ha (59.82%), en Juin, à 5.2 ha (46.22 %), en Novembre, soit une réduction de 13.6 % ;
- Sols à  $\text{CE}_{\text{psc}} > 30 \text{ dS.m}^{-1}$  : leur superficie est passée de 3.12 ha (27.73%), en Juin, à 5.14 ha (45.69 %), en Novembre, soit une augmentation de 17.96 %.

**Tableau 44.** Superficie des classes de salinité en hectares (Ha) des deux campagnes de mesures.

Profondeur (cm)	Superficie en Ha (Juin 2012)					
	Non salin	Peu salin	Salin	Très Salin	Extrêmement salin	Hyper salin
0-25cm	0,6	1,5	3,1	5,7	0,5	0,0
25-50cm	0,0	0,0	0,1	4,5	6,7	0,0
50-75cm	0,0	0,0	0,0	1,6	7,4	2,2
75-100cm	0,0	0,0	0,0	1,4	6,8	3,1
Profondeur (cm)	Superficie en Ha (Novembre 2012)					
	Non salin	Peu salin	Salin	Très Salin	Extrêmement salin	Hyper salin
0-25cm	0,0	0,6	4,5	6,2	0,0	0,0
25-50cm	0,0	0,0	0,0	0,8	10,0	0,5
50-75cm	0,0	0,0	0,0	0,8	6,6	3,9
75-100cm	0,0	0,0	0,0	1,0	5,4	4,9

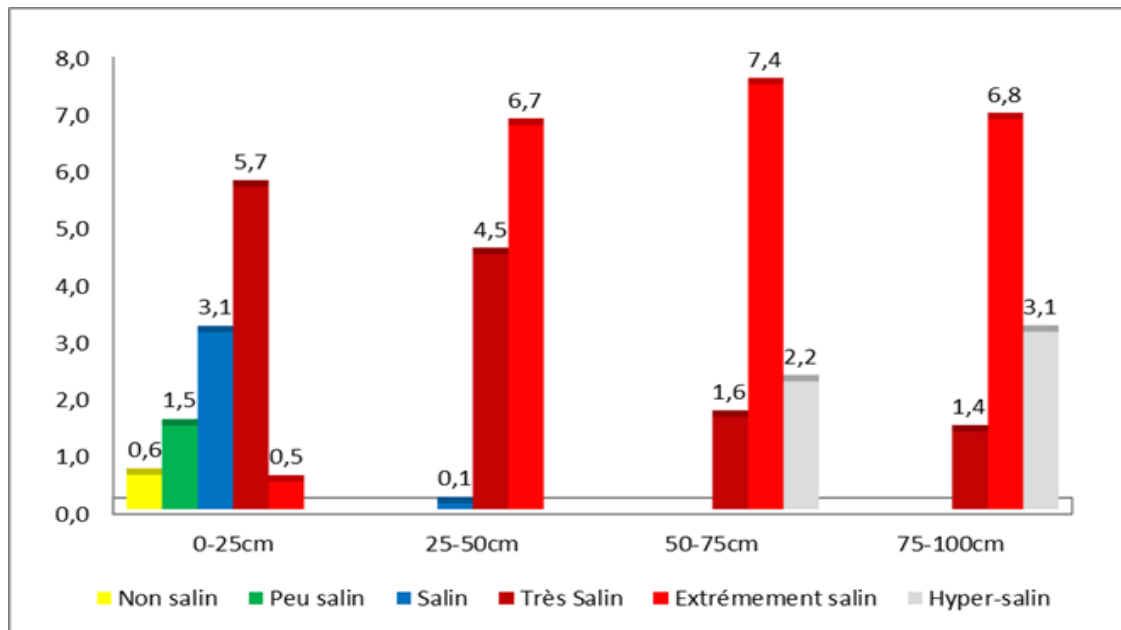


Figure 56. Répartition en (Ha) des classes de salinité dans les horizons (Juin 2012)

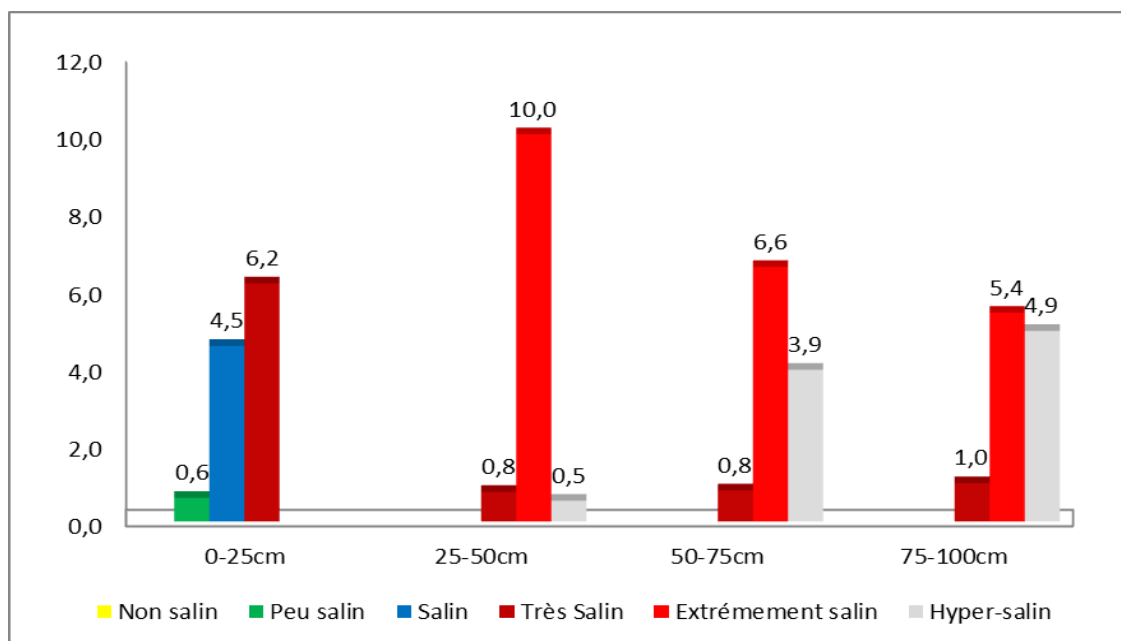


Figure 57. Répartition en (Ha) des classes de salinité dans les horizons (Novembre 2012)

### VI.7. Répartition de l'occupation du sol, en fonction des classes de salinité

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de la répartition de l'occupation du sol de la parcelle (en Ha), composée d'oliviers et d'avoine, en fonction des différents niveaux de salinités que nous avons définis et les dangers que peut présenter la salinité sur la durabilité du système agricole de la parcelle étudiée.

L'examen du **tableau 45** montre que, sur les 11.3 Ha de la superficie, l'olivier occupent occupe 6.7Ha (soit 59.5%) et l'orge 4.6 Ha (soit 40.5%). Aussi cette répartition a pu être détaillée, en fonction des classes de salinité, par une simple intersection entre la couche d'information (classes de salinité) et la couche (occupation du sol). Cette étape a été réalisée par le logiciel ArcMap par la création d'une troisième couche d'information qui représente le type d'occupation en fonction des classes de salinité pour chaque horizon.

Les résultats indiquent que la superficie affectée par une faible salinité ( $CEps < 4 \text{ dS.m}^{-1}$ ) ne représente qu'une faible proportion par rapport à la superficie de la parcelle (11.3 ha). Pour la campagne du mois de Juin, cette superficie n'est que de 1.9% pour l'olivier et 0.9% pour l'avoine. Alors que pour la campagne de Novembre, elle évolue vers les classes supérieures.

Par ailleurs, la superficie affectée par une forte salinité ( $CEps > 8 \text{ dS.m}^{-1}$ ), représente, respectivement, pour l'olivier, 52.9% et 53% pour les campagnes de mesures Juin et Novembre. Alors que pour l'avoine, elle passe de 35.5%, en Juin, à 35.3%, en Novembre.

Pour la superficie affectée par une salinité de 4 à  $8 \text{ dS.m}^{-1}$ , elle est de 4.7% pour l'olivier en Juin et 5.8% en Novembre, alors que pour l'avoine, elle passe de 2.4%, en Juin, à 4.2%, en Novembre.

**Tableau 45.** Répartition de l'occupation du sol en fonction des classes de salinité.

Classes de salinité	Juin 2012		Novembre 2012	
	Olivier (%)	Avoine (%)	Olivier (%)	Avoine (%)
Non salé ( $CEps < 2 \text{ dS.m}^{-1}$ )	0,5	0,9	0	0
Peu salé ( $2 < CEps < 4 \text{ dS.m}^{-1}$ )	1,4	1,9	0,2	1,1
Salé ( $4 < CEps < 8 \text{ dS.m}^{-1}$ )	4,7	2,4	5,8	4,2
Très salé ( $8 < CEps < 16 \text{ dS.m}^{-1}$ )	15,0	14,0	11,0	8,2
Extrêmement salé ( $16 < CEps < 30 \text{ dS.m}^{-1}$ )	31,0	16,5	28,9	19,7
Hyper-salé ( $CEps > 30 \text{ dS.m}^{-1}$ )	6,9	4,9	13,4	7,4
$CEps > 8 \text{ dS.m}^{-1}$	<b>52,9</b>	<b>35,5</b>	<b>53,4</b>	<b>35,3</b>
$CEps < 4 \text{ dS.m}^{-1}$	<b>1.9</b>	<b>2.8</b>	<b>0,2</b>	<b>1.1</b>

## VI.8. Caractérisation des sols

### VI.8.1. Introduction

L'étude pédologique a conduit à l'observation de trois profils de sols, répartis sur toute la parcelle, selon un transect du Sud-Est au Nord-Ouest.

Le volet de ce chapitre est réservé à la présentation et la discussion des paramètres morphologiques et analytiques des sols de la parcelle d'étude qui sont présentées et discutées dans le détail.

### VI.8.2. Caractérisation du profil A

#### 1) Données générales

Le profil se situe au sud-est de la parcelle d'étude, délimitée au sud par un drain tertiaire, et au nord par autre drain tertiaire.

- Coordonnées géographiques : 0° 29' 44.8'' longitude Est et 35° 43' 59'' de latitude Nord;
- Altitude : 63m ;
- Date de description: 16/09/2012 ;
- Temps : Ciel clair ;
- Précédent climatique : Il a plu dans la région les jours précédents.
- Topographie : Terrain plat ;
- Matériaux d'origines : Alluvions ;
- État de surface : Terrain cultivé (avoine)

#### 2) Description morphologique du profil A

**Anp (0 à 28cm)** : Sec; couleur à l'état sec 10 YR 6/3 argilo-limoneux; structure polyédrique angulaire fine à moyenne; poreux; plastique; collant; peu compacte; friable; absence d'éléments grossiers; moyennement organique; présence de fissures, présence de racines fines, forte activité biologique ; présence de tâches blanchâtres hétérogènes ; vive effervescence à l'Hcl généralisée ; transition nette régulière.

**BCny : (28 à 76 cm)** : Frais; couleur 10YR 6/4; argilo-limoneux; structure polyédrique anguleuse grossière; collant ; compact; peu friable; porosité structurale importante; absence d'éléments grossiers; présence de fentes verticale(plus épaisses au sommet et moins épaisses à la base); présence de racines mortes; moyennement organique; activité biologique moyenne; plastique; présence de tâches blanchâtres sous forme de pseudo-mycéliums; vive effervescence à l'Hcl généralisée; transition nette et régulière.

**Cny1 : (76 à 95 cm)** : humide; couleur 10YR 6/4; limono-argileux; structure massive; compact ; peu friable; collant; plastique; peu poreux; absence d'éléments grossiers; non or-

ganique; présence de traces noirâtres correspondant à des anciennes racines, faible activité biologique; présence de tâches blanchâtres moins intenses que l'horizon sus-jacent ; vive effervescence à l'Hcl généralisée ; transition régulière et nette.

**Cny2 : (95 à 150 cm) :** humide; couleur 10YR 7/4; limoneux; structure massive; peu compact ; très friable; collant; plastique; très peu poreux; très fragile, absence d'éléments grossiers; non organique; présence de traces noirâtres correspondant à des anciennes racines, faible activité biologique; présence des taches blanchâtres moins intenses que l'horizon sus-jacent; présence de tâches d'hydromorphie (oxydo-réduction) de couleur grisâtres et ocres, vive effervescence à l'Hcl généralisée.

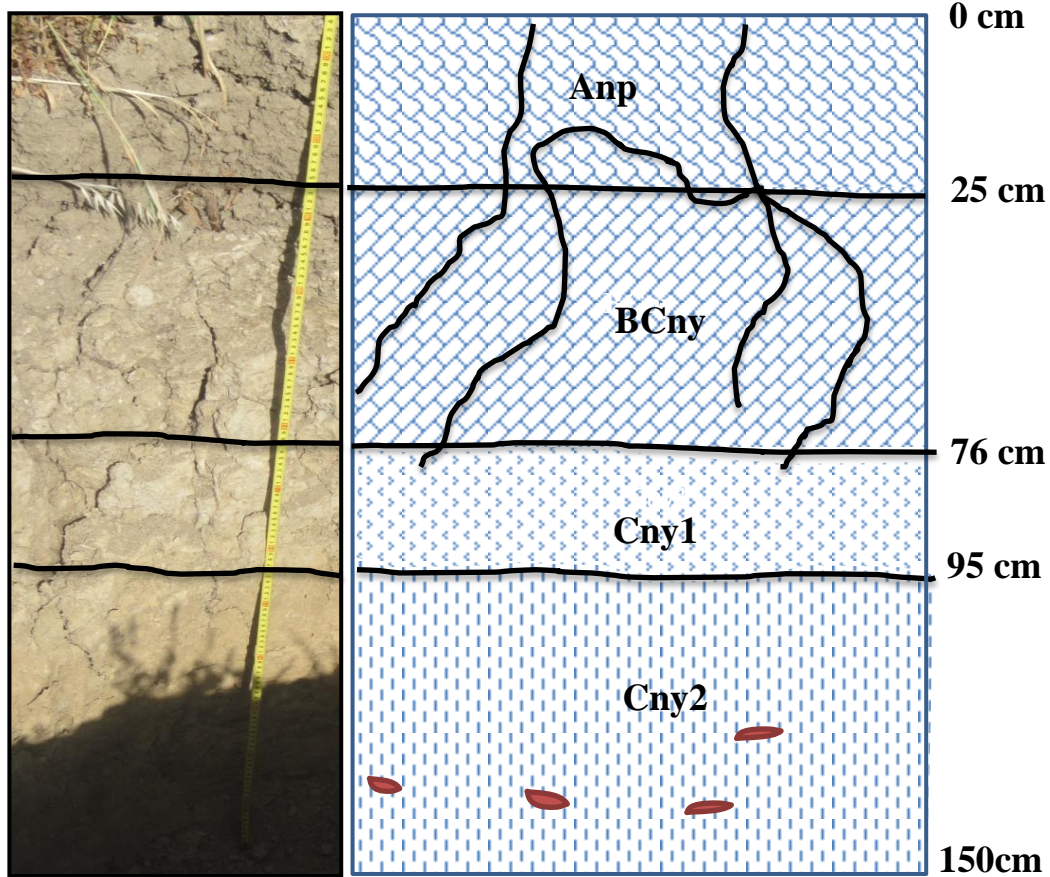
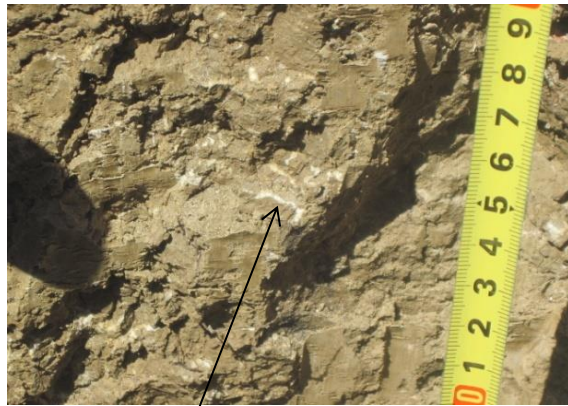


Photo 6. Profil A

Figure 58. Coupe schématique du profil A



**Photo 7.** Fentes de retrait



**Photo 8.** Accumulations gypseuses

Ce profil est développé sur des alluvions, sa profondeur est supérieure à 150 cm. Il est caractérisé par la présence de fentes jusqu'à une profondeur de 70 cm du profil. Ces fentes sont plus larges en surface (1 à 2cm) et deviennent moins épaisses en profondeur.

- **L'horizon de surface (Anp)** est un horizon cultural, bien différencié et organique. Il se distingue par sa structure polyédrique angulaire fine et sa texture argilo-limoneuse;
- **L'horizon de sub-surface (BCny)** se distingue du premier par sa structure polyédrique anguleuse grossière et par la présence de tâches blanchâtres sous forme de pseudo-mycéliums ;
- **Le troisième horizon (Cny1)** se caractérise par sa texture limono-argileuse et sa structure massive à éclats anguleux et par la présence de tâches blanchâtres moins nombreuses que l'horizon sus-jacent.
- **L'horizon de profondeur (Cny2)** est limoneux et il est marqué par la présence de quelques tâches d'hydromorphie (oxydo-réduction < 5%).

### 3) Résultats analytiques du profil A

#### a) Propriétés physiques et physico-chimiques du profil A

Les résultats analytiques sont présentés dans le **tableau.21 de l'Annexe.10**, et les résultats statistiques sont présentés dans le **tableau.46**.

#### - Le gypse

Les teneurs en gypse sont faibles dans l'horizon de surface, elles oscillent entre 2.16 % et 5.6 %, avec une moyenne du profil de 4.6 % et un coefficient de variabilité élevé. Ces valeurs sont cependant supérieures à 5% à partir de l'horizon de sub-surface.

### - Le calcaire

Les teneurs en calcaire sont homogènes au niveau du profil, elles varient de 11.8% à 16.6% pour le calcaire total et de 6.3 à 7.3%, pour le calcaire actif, avec une moyenne respective de 14.8 et 6.8 % et un faible coefficient de variabilité. Le profil, est moyennement calcaire.

### - La matière organique

Le taux de matière organique diminue avec la profondeur, et varie entre 1.3%, en profondeur à 3.8 % dans l'horizon cultural (Ap), avec une moyenne de 2.1 % et un coefficient de variabilité très élevé.

### - La granulométrie

Nous remarquons que les fractions granulométriques prédominantes sont les fractions argileuses et limoneuses. Dans l'horizon de surface, les argiles et les limons ont pratiquement les mêmes taux qui sont respectivement de 45 et 49 %. Dans l'horizon de sub-surface, la fraction argileuse prédomine avec un taux de 53 %. La fraction sableuse est très peu représentée et varie entre 4 et 7 %. Nous observons au niveau des horizons profonds une diminution de la fraction argileuse (53 à 20%) et une forte augmentation de la fraction limoneuse (43 à 73 %). Tous les horizons ont des textures argilo-limoneuses sauf pour le troisième horizon qui présente une texture limono-argileuse et l'horizon de profondeur qui présente une texture limoneuse. Nous remarquons aussi que le coefficient de variabilité pour l'argile est élevé pour ce profil.

**Tab.46.** Statistiques descriptives des propriétés physiques et physico-chimiques du profil A

Paramètres	M0 %	Calcaire (%)	Gypse %	Granulométrie (%)		
				Argile	Limon	Sable
<i>Moy</i>	2,1	14,8	4,6	38,3	55,8	6,0
<i>Max</i>	3,7	16,6	5,6	53,0	73,0	7,0
<i>Min</i>	1,3	14,0	4,6	20,0	43,0	4,0
<i>CV %</i>	54,58	11,8	35,41	37,18	23,4	23,57

### b) Composition du complexe adsorbant

Les résultats du complexe adsorbant sont présentés dans le **tableau.22 de l'Annexe.10**, et les résultats statistiques sont présentés dans le **tableau.47**.

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

Les valeurs de la capacité d'échange cationique sont comprises entre 15.6 et 35.4 meq/100g de terre. La moyenne de la CEC est de 29.3 (meq/100g) et le coefficient de variation est modéré (15.6%).

### - Les bases échangeables

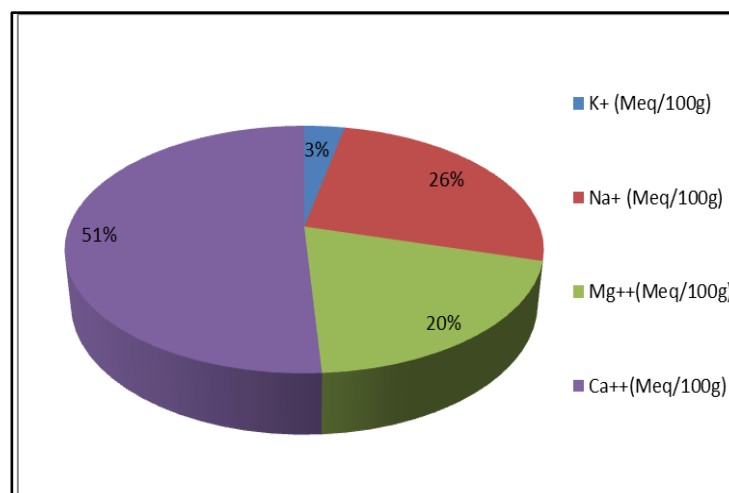
La garniture cationique du complexe adsorbant (**Tab.47 ; Fig.59**) révèle que le calcium échangeable constitue l'essentiel du complexe adsorbant avec un taux moyen de 51 % de la CEC, ensuite vient le sodium (26%), le magnésium (20%), et le potassium (3%).

La moyenne du calcium échangeable dans le profil est de 15.6 meq/100g et le coefficient de variation est faible (13.6%). Le magnésium présente des teneurs appréciables de la capacité d'échange cationique (20 %) avec une moyenne de 6 meq/100g et un coefficient de variation modéré de 33 %, alors que les teneurs du potassium sont relativement faibles (3%) pour une moyenne de 01 meq/100g et un coefficient de variation élevé de 47.6%.

Pour le sodium, il présente des teneurs qui oscillent entre 20.7 et 44 % de la CEC pour une moyenne de 8 meq/100g, avec un coefficient de variation modéré de 26.1%. Les pourcentages de sodium échangeable  $ESP > 15 \%$ , au niveau de chaque horizon, suggèrent que tous les horizons sont sodiques (**USDA, 2010**).

**Tableau 47.** Paramètres statistiques du complexe adsorbant du profil A

Paramètres	Complexe Absorbant (meq/100g)				CEC (meq/100g)	ESP (%)
	$K^+$	$Na^+$	$Mg^{++}$	$Ca^{++}$		
<i>Min</i>	0,6	5,8	4,3	13,5	<b>24,5</b>	<b>20,7</b>
<i>Max</i>	1,6	10,8	8,4	18,4	<b>35,4</b>	<b>44,0</b>
<i>Moy</i>	1,0	8,0	6,0	15,6	<b>29,3</b>	<b>28,2</b>
<i>CV %</i>	47,6	26,1	33,0	13,6	<b>15,6</b>	<b>38,8</b>



**Figure 59.** Composition cationique moyenne du complexe adsorbant du profil A

### c) Composition de la solution du sol

Les résultats analytiques et statistiques des différents paramètres de la solution du sol sont indiqués, respectivement, dans le **tableau.23 de l'Annexe.10** et le **tableau 48**.

#### - La conductivité électrique

La distribution des sels en fonction de la profondeur (**Tab.48**) révèle une forte salinité de l'horizon de profondeur (CE= 23.2 dS/m) et une faible salinité de l'horizon de surface (CE= 2.42 dS/m). Cette CE est relativement plus faible que celle des autres horizons du profil. Ce phénomène serait dû à une lixiviation des sels provoquée par les pluies (la description a été réalisé après la saison humide) et qui se seraient accumulés au niveau des horizons de profondeur, provoquant une augmentation de la CE (CE=23.2dS/m). La salinité augmente sensiblement dans les deux horizons Cny1 et Cny2 pour atteindre respectivement les valeurs de 20.6 et 23.2 dS/m. Ce résultat indique que le profil salin est descendant.

#### - Le pH

Le **tableau 48** indique que le pH est supérieur à 8 avec une moyenne de 8.3. Ces valeurs correspondent à une réaction du sol relativement alcaline, caractéristique principale des sols calcaires et des sols salés.

#### - Le SAR

Les valeurs du SAR varient de 14.3 pour les horizons de surface et de sub-surface à 23.1 pour les horizons de profondeur (**Tab.48**), les faibles valeurs du SAR dans les horizons de surface et de sub-surface sont dues, probablement aux valeurs de la CE, qui ne sont pas très élevées (2.42 dS/m <CE< 9.9 dS/m).

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

Selon la **figure 60**, le cation  $\text{Na}^+$  est le plus représenté avec un taux moyen de 66.4% et une concentration qui varie entre 62 meq/l et 207 meq/l. Le  $\text{Ca}^{++}$  vient en deuxième position avec un taux de 17.6% avec des teneurs qui varient entre 9.6 meq/l et 54.2 meq/l. Le  $\text{Mg}^{++}$  se situe en troisième position avec un taux de 15.7% et des concentrations qui varient entre 12.75 meq/l et 52.54 meq/l, alors que le  $\text{K}^+$  vient en dernière position avec un taux de 0.3%, et des teneurs qui varient entre 0.56 meq/l et 0.72 meq/l.

De ce fait, le classement des cations est de type :  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$

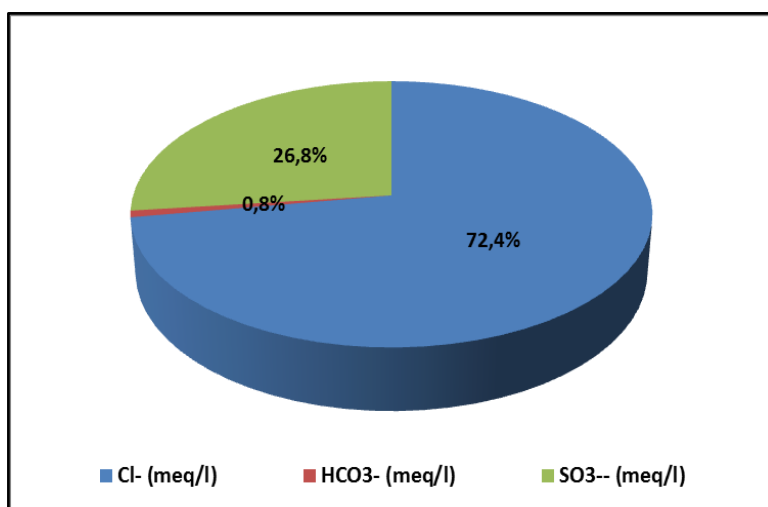
#### - Les anions de la solution du sol

Selon la **figure 61**, l'anion  $\text{Cl}^-$  est le plus représenté avec un taux moyen de 72.4% et une concentration qui varie entre 55 meq/l et 218.1 meq/l. Le  $\text{SO}_4^-$  vient en deuxième position avec un taux de 26.8% avec des teneurs qui varient entre 23.1 meq/l et 60.8 meq/l. Le

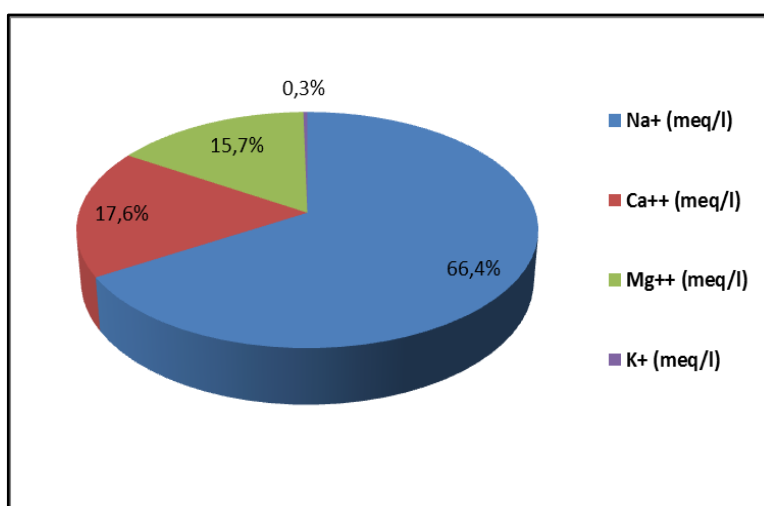
HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> vient en dernière position avec un taux de 0.8% et des teneurs qui varient entre 1 meq/l et 2 meq/l.

**Tableau 48.** Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil A

Para- mètres	pH	CE dS.m <sup>-1</sup>	Cations (meq.l <sup>-1</sup> )				Anions (meq.l <sup>-1</sup> )			SAR
			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>	8.18	2,4	61,73	9,60	12,75	0,56	55	1,0	23,1	<b>14,28</b>
<b>Max</b>	8,67	23,2	207,40	54,20	52,54	0,72	218,1	2,0	60,8	<b>23,12</b>
<b>Moy</b>	8.3	13,9	134,78	35,78	31,92	0,65	137,98	1,5	51,2	<b>18,58</b>
<b>CV%</b>	2.7	68,6	42,42	40,88	48,32	6,98	51,22	38,5	36,6	<b>20,00</b>



**Figure 60.** Répartition moyenne des cations dans la solution du sol du profil A



**Figure 61.** Répartition moyenne des anions dans la solution du sol du profil A

#### 4) Synthèse des résultats morphologiques et analytiques

Sur le plan morphologique, le profil A se caractérise par une structure polyédrique fine dans l'horizon de surface et devient moyenne au niveau de l'horizon de sub-surface à massive vers la base.

Il est caractérisé par la présence de tâches blanchâtres qui correspondraient à des accumulations gypseuses (4.6 à 5.6%) constituant ainsi un trait morphologique et pédogénétique important de ce sol.

Les taches d'oxydoréduction sont faibles (< 5%) et n'apparaissent que dans l'horizon de profondeur.

Par ailleurs, la texture est dominée par les argiles (45 à 53%) dans la partie supérieure du profil et une augmentation des limons (58 à 73%), dans sa partie inférieure. Les sables sont très peu représentés (4 à 7%). Le taux de matière organique diminue, avec la profondeur, et varie de 3.7% à 1.3%. Le calcaire est présent dans tout le profil, avec des taux homogènes qui se situent autour de 15%.

Les principaux résultats analytiques indiquent que le profil A se caractérise par un profil salin descendant, faiblement salé en surface à fortement salé en profondeur (2.42 dS/m < CE < 23.2 dS/m) et par un SAR important (14.28 < SAR < 23.12). Le pourcentage de sodium échangeable est fort (20.7% < ESP < 47%) et le pH est légèrement alcalin à alcalin (8.18 < pH < 8.67). Les ions prédominants de la solution du sol sont les chlorures (70%) et le sodium (67%). Le faciès chimique de la solution du sol est de type **chloruré-sodique**.

#### 5) Classification du profil A

Les résultats morphologiques et analytiques du profil A suggèrent que ce sol remplit les conditions des critères diagnostiques du sous ordre des Gypsids (ordre des Aridisols) tels que définis par la classification USDA (Soil Taxonomy, 2010).

**Tableau 49.** Critères diagnostiques du profil A

Profils	E (cm)	Gypse (%)	E*Gypse	SAR	ESP (%)
<b>Profil A</b>	122 > 15	5.38 > 5	656.7 > 150	18.58 > 13	28.2 > 15

Selon les résultats représentés dans le **tableau.49**, l'épaisseur de l'horizon gypsiq est supérieure à 15cm (122cm) et le pourcentage du gypse est supérieur à 5 % (5.38 %) et le produit E\*Gypse est supérieur à 150 (656.7).

Pour situer notre sol à un niveau avancé dans cette classification, nous avons retenu les suffixes suivants :

- **Sodic** : il y a plus de 15 % de sodium échangeable sur le complexe d'échange ou un SAR > 13 dans les 100 premiers cm de profondeur. Le profil A présente un SAR >13 et un ESP > 15 % (tableau), de ce fait il est Sodic.

A cet effet, le profil étudié appartient à : *l'Ordre des Aridisols ; Sous Ordre des Gypsid ; Grand Groupe des Haplogypsid ; Sous-Groupe des Sodic Haplogypsid.*

Il correspond aux sols *Salins à complexe sodique* de la classification CPCS (1967).

### VI.8.3. Caractérisation du profil B

#### 1) Données générales

Le profil se situe au sud-ouest de la parcelle d'étude, délimitée au sud par un drain tertiaire, au nord par autre drain tertiaire et l'ouest par un drain secondaire.

- Coordonnées géographiques : 0°29' 36.7'' longitude Est et 35°44' 0.1'' de latitude Nord;
- Altitude : 62m ;
- Date de description: 16/09/2012 ;
- Temps : Ciel clair ;
- Précédent climatique : Il a plu dans la région les jours précédents.
- Topographie : Terrain plat ;
- Matériaux d'origines : Alluvions ;
- État de surface : Jeune plantation d'olivier

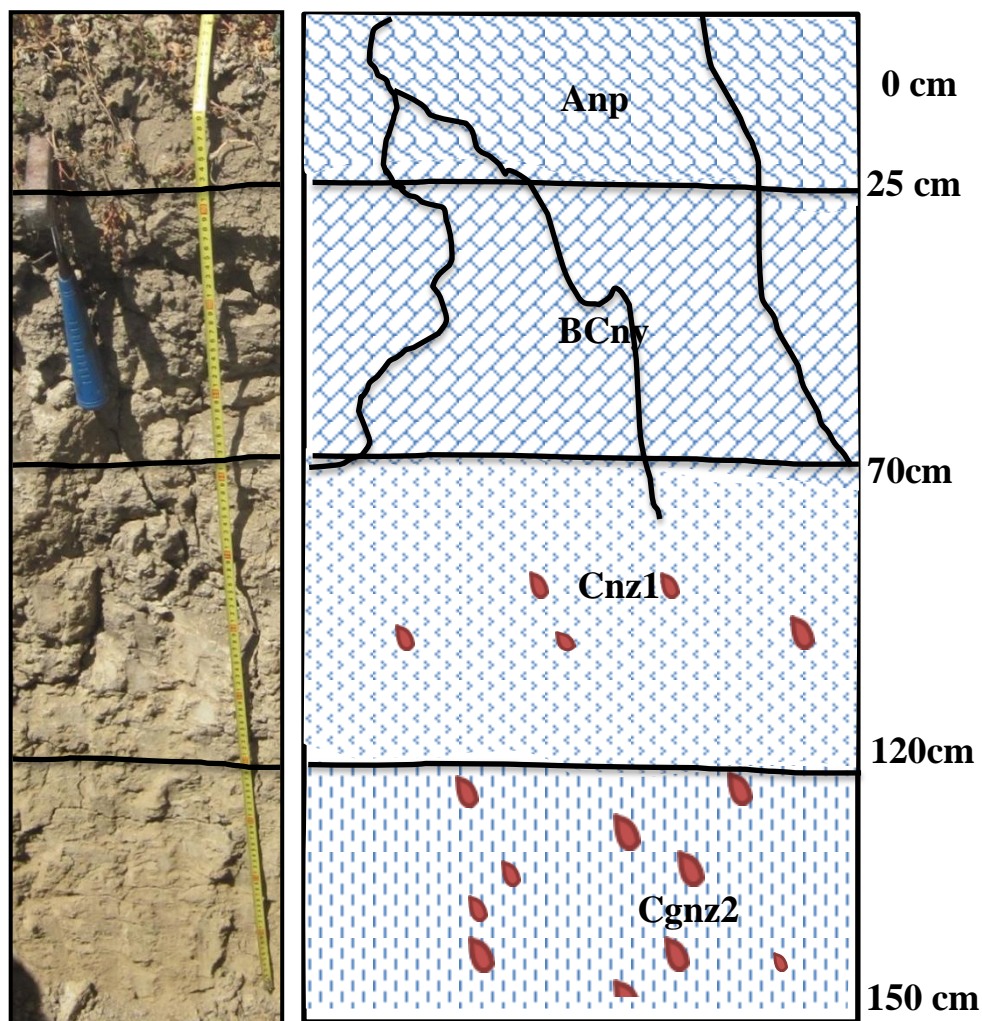
#### V.3.2. Description morphologique

**Anp ( 0 à 25cm) :** Sec; couleur 10 YR 6/3, argilo-limoneux; structure polyédrique angulaire fine à moyenne; poreux; plastique; collant; peu compacte; friable; absence d'éléments grossiers; moyennement organique; présence fentes verticales, présence de racines fines, forte activité biologique ; présence de tâches blanchâtres hétérogènes ; vive effervescence à l'Hcl généralisée ; transition nette régulière.

**BCny (25 à 70cm) :** humide; couleur 10 YR 6/3; argilo-limoneux; structure polyédrique anguleuse grossière; collant; compact; peu friable; porosité structurale importante; absence d'éléments grossiers; présence de fentes verticales; présence de racines mortes; moyennement organique; activité biologique moyenne; plastique; présence de tâches blanchâtres sous forme de pseudo-mycéliums; vive effervescence à l'Hcl généralisée; transition nette et régulière.

**Cnz1 (70 - 120 cm)** : humide; couleur 10YR 6/6; limoneux; structure massive à éclat anguleux; moyennement compact; moyennement friable ; collant ; plastique ; très poreux ; très fragile; absence d'éléments grossiers ; non organique ; présence de traces noirâtres correspondant à des anciennes racines, faible activité biologique ; présence de petites taches blanchâtres; présence de quelques tâches d'hydromorphie (oxydo-réduction) de couleur grisâtres et ocres, vive effervescence à l'Hcl, généralisée ; transition régulière et nette.

**Cnz2 (120 - 150 cm)** : humide; couleur 10YR 6/6; limoneux; structure massive; peu compact ; très friable; collant; plastique; très peu poreux; très fragile, non organique; présence de traces noirâtres correspondant à des anciennes racines, faible activité biologique; diminution des tâches blanchâtres; présence de tâches d'hydromorphie (oxydo-réduction) de plus nombreuses que l'horizon sus-jacent, vive effervescence à l'Hcl généralisée.



**Photo 9.** Profil B

**Figure 62.** Coupe schématique du profil B



**Photo 10.** Accumulations salines

Ce profil est développé sur des alluvions, sa profondeur est supérieure à 150 cm. Il est caractérisé par la présence de fentes jusqu'à une profondeur de 70 cm du profil. Le profil est caractérisé par la présence de fortes accumulations salines dans les horizons de profondeur, ainsi que de quelques tâches d'oxydo-réduction à partir de 70 cm mais deviennent plus accentuées en profondeur.

**L'horizon de surface (Anp)** est un horizon cultural, bien différencié et organique. Il se distingue par sa structure polyédrique angulaire fine et sa texture argilo-limoneuse;

**L'horizon de sub-surface (BCny)** se distingue du premier par sa structure polyédrique anguleuse moyenne et par la présence de tâches blanchâtres sous forme de pseudo-mycéliums (Gypse) ;

**Le troisième horizon (Cnz1)** se caractérise par sa texture limoneuse, en présence d'une fraction de sable (18.5%), et une structure massive. Les tâches blanchâtres correspondent aux accumulations salines. Il est fortement salé et se caractérise par la présence de quelques tâches d'hydromorphie;

**L'horizon de profondeur (Cgnz2)** est limoneux et il se distingue par la présence de tâches d'hydromorphie, plus accentuées à la base du profil.

### 3) Résultats analytiques du profil B

#### 1) Propriétés physiques et physico-chimiques du profil B

Les résultats analytiques sont présentés dans le **tableau.24 de l'Annexe.11**, et les résultats statistiques sont présentés dans le **tableau.50**.

### - Le gypse

Les teneurs en gypse sont faibles dans l'horizon de surface, elles oscillent entre 2.98 % et 6.2 %, avec une moyenne du profil de 4.3 % et un coefficient de variabilité modéré. Ces valeurs sont cependant supérieures à 5% à partir de l'horizon de sub-surface.

### - Le calcaire

Les teneurs en calcaire sont homogènes au niveau du profil, elles varient de 11.9% à 17.4% pour le calcaire total et de 5.3 à 8.5%, pour le calcaire actif, avec une moyenne respective de 14.5 et 6.8 % et un faible coefficient de variabilité. Le profil, est donc moyennement calcaire.

### - La matière organique

Le taux de matière organique diminue avec la profondeur, et varie entre 1.0 %, en profondeur à 3.1 % dans l'horizon cultural (Anp), avec une moyenne de 1.7 % et un coefficient de variabilité très élevé.

### - La granulométrie

Nous remarquons que les fractions granulométriques prédominantes sont les fractions argileuses et limoneuses. Dans l'horizon de surface, les argiles et les limons ont pratiquement les mêmes taux qui sont respectivement de 49 et 46 %. Dans l'horizon de sub-surface, la fraction argileuse prédomine avec un taux de 49 %. La fraction sableuse est moyennement représentée et varie entre 5 et %. Nous observons au niveau des horizons profonds une diminution de la fraction argileuse (53 à 20%) et une forte augmentation de la fraction limoneuse (43 à 73 %). Le premier et le deuxième horizon présentent des textures argilo-limoneuses, alors que le troisième et le dernier horizon sont limoneux. Nous remarquons aussi que le coefficient de variabilité pour l'argile est élevé pour ce profil (**Tab.50**).

**Tableau 50.** Statistiques descriptives des paramètres du profil B

Paramètres	M0 (%)	Calcaire (%)	Gypse (%)	Granulométrie (%)		
				Argile	Limon	Sable
<i>Moy</i>	1,7	14,5	4,3	33,8	55,8	10,8
<i>Max</i>	3,1	17,4	6,2	49,0	69,0	19,0
<i>Min</i>	1,0	11,9	3,0	18,0	46,0	5,0
<i>E. type</i>	0,9	2,2	1,4	17,6	11,6	6,9
<i>CV %</i>	55,8	15,5	31,9	52,2	20,8	64,6

## 2) Composition du complexe adsorbant

Les résultats du complexe adsorbant sont présentés dans le **tableau.25 de l'Annexe.11** et le **tableau 51**.

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

Les valeurs de la capacité d'échange cationique sont comprises entre 21.9 et 34.7 meq/100g de terre. La moyenne de la CEC est de 25.9 (meq/100g) et le coefficient de variation est modéré (23%).

### - Les bases échangeables

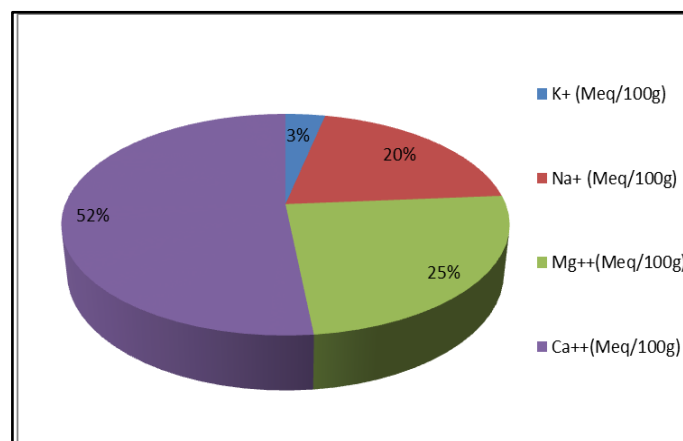
Selon la **figure 63**, la garniture cationique du complexe adsorbant révèle que le calcium échangeable constitue l'essentiel du complexe adsorbant avec un taux moyen de 52 % de la CEC, ensuite vient le magnésium (25%), le sodium (20%), et le potassium (3%).

La moyenne du calcium échangeable dans le profil est de 12.6 meq/100g et le coefficient de variation est modéré (28.7%). Le magnésium présente des teneurs appréciables de la capacité d'échange cationique (25 %) avec une moyenne de 8.2 meq/100g et un coefficient de variation modéré de 31.9 %, alors que les teneurs du potassium sont relativement faibles (3%) pour une moyenne de 0.8 meq/100g et un coefficient de variation élevé de 45.9%.

Pour le sodium, il présente des teneurs qui oscillent entre 15.1 et 32.1% de la CEC pour une moyenne de 4.91 meq/100g, avec un coefficient de variation élevé de 40.9%. La moyenne de l'ESP, dans le profil est de 19.7% avec un coefficient de variation élevé de (41.7%). Les pourcentages de sodium échangeable ESP > 15 %, au niveau de chaque horizon, suggèrent que tous les horizons sont sodiques (USDA, 2010).

**Tableau 51.** Paramètres statistiques du complexe adsorbant du profil B

Paramètres	Complexe Absorbant (meq/100g)				CEC (meq/100g)	ESP %
	$K^+$	$Na^+$	$Mg^{++}$	$Ca^{++}$		
<i>Min</i>	0,35	3,57	4,37	9,52	<b>21,95</b>	<b>15,15</b>
<i>Max</i>	1,28	7,04	8,72	17,59	<b>34,75</b>	<b>32,07</b>
<i>Moy</i>	0,84	4,97	6,01	12,63	<b>25,90</b>	<b>19,74</b>
<i>CV %</i>	45,95	33,91	31,86	28,76	<b>22,99</b>	<b>41,73</b>



**Figure 63.** Composition cationique moyenne du complexe adsorbant du profil B

### 3) Composition de la solution du sol

Les résultats analytiques et statistiques des différents paramètres de la solution du sol sont indiqués dans le **tableau.25 de l'Annexe.11 et le tableau 52.**

#### - La conductivité électrique

La distribution des sels, en fonction de la profondeur, révèle une forte salinité de l'horizon de profondeur (CE= 45 dS/m) par rapport à l'horizon de surface (CE= 14.75 dS/m). Cette CE est plus faible que celle des autres horizons du profil. Ce phénomène serait dû à une lixiviation des sels provoquée par les pluies comme pour le cas du profil A (la description a été réalisée après la saison humide) et qui se seraient accumulés au niveau des horizons de profondeur, provoquant une augmentation de la CE (CE=45 dS/m). La salinité augmente sensiblement dans les deux horizons Cnz1 et Cnz2 pour atteindre respectivement les valeurs de 45 et 38.8 dS/m. Ce résultat indique que le profil salin est descendant.

#### - Le pH

Les résultats montrent que le pH est supérieur à 8, avec une moyenne de 8.4. Ces valeurs correspondent à une réaction du sol relativement alcaline, caractéristique principale des sols calcaires et des sols salés.

#### - Le SAR

Les valeurs du SAR varient de 18.4 pour les horizons de surface à 49.7 pour les horizons de profondeur. Les valeurs du SAR sont plus faibles dans les horizons de surface, par rapport à ceux, en profondeur. Ceci est dû, probablement, aux valeurs de la CE, qui sont aussi plus faibles (14.8 dS/m), en surface par rapport à celles, en profondeur (45 dS/m).

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

La **figure 64** montre que le cation  $\text{Na}^+$  est le plus représenté avec un taux moyen de 73% et une concentration qui varie entre 132.6 meq/l et 460.3 meq/l. Le  $\text{Mg}^{++}$  vient en deuxième position avec un taux de 15% avec des teneurs qui varient entre 27.7 meq/l et 87.1 meq/l. Le  $\text{Ca}^{++}$  se situe en troisième position avec un taux de 11% et des concentrations qui varient entre 38.3 meq/l et 64.6 meq/l, alors que le  $\text{K}^+$  vient en dernière position avec un taux de 1%, et des teneurs qui varient entre 0.5 meq/l et 0.9 meq/l.

De ce fait, le classement des cations est de type :  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{K}^+$

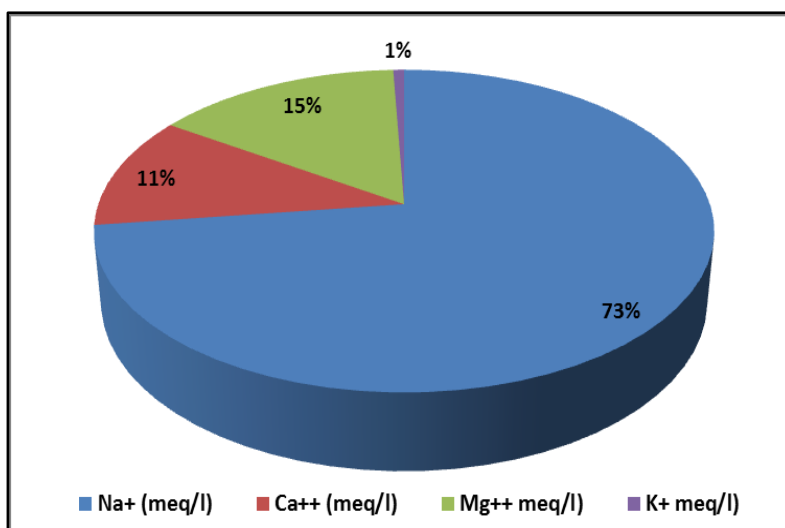
#### - Les anions de la solution du sol

Selon la **figure 65**, l'anion  $\text{Cl}^-$  est le plus représenté avec un taux moyen de 76.9% et une concentration qui varie entre 108.2 meq/l et 473.1 meq/l. Le  $\text{SO}_4^{--}$  vient en deuxième position avec un taux de 22.6% avec des teneurs qui varient entre 71.9 meq/l et 91.5 meq/l.

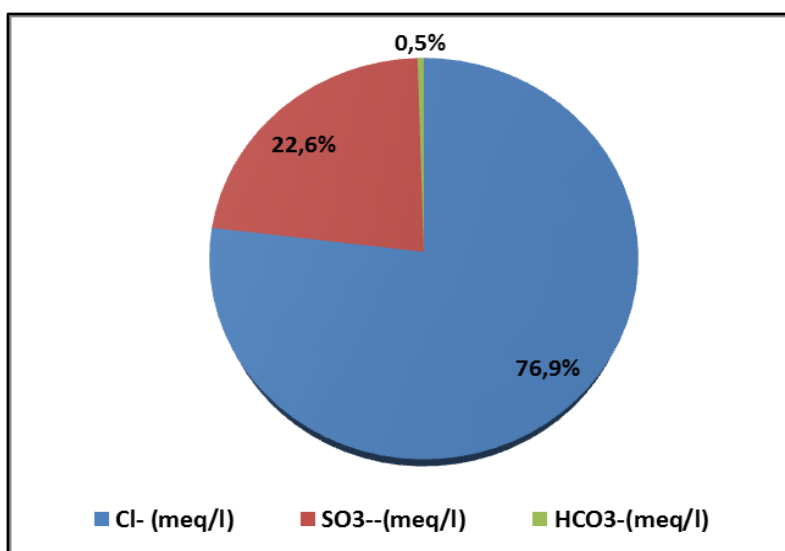
Le  $\text{HCO}_3^-$  vient en dernière position avec un taux de 0.8% et des teneurs qui varient entre 1 meq/l et 3 meq/l.

**Tableau 52.** Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil B

Paramètres	pH	CE dS.m <sup>-1</sup>	Cations (meq.l <sup>-1</sup> )				Anions (meq.l <sup>-1</sup> )			SAR
			Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
<b>Min</b>	8.3	14,8	132,6	38,3	27,7	0,5	108,2	71,9	1,0	<b>18,4</b>
<b>Max</b>	8.5	45,0	460,3	64,6	87,1	0,9	473,1	91,5	3,0	<b>49,7</b>
<b>Moy</b>	8.4	30,9	288,0	50,1	59,6	0,7	285,0	83,7	1,8	<b>31,7</b>
<b>CV%</b>	1	44,1	47,9	22,2	41,9	23,1	56,7	10,1	54,7	<b>41,4</b>



**Figure 64.** Répartition moyenne des cations dans la solution du sol du profil B



**Figure 65.** Répartition moyenne des anions dans la solution du sol du profil B

#### 4) Synthèse des résultats morphologiques et analytiques du profil B

Sur le plan morphologique, le profil B se caractérise par une structure polyédrique fine dans l'horizon de surface et devient moyenne au niveau de l'horizon de sub-surface à massive vers la base.

Il est caractérisé par la présence de tâches blanchâtres qui correspondraient à des accumulations gypso-salines, surtout dans l'horizon **BCny** qui présente un taux de gypse de 6.32%.

Les tâches d'oxydoréduction forment environ 5 à 7% de la matrice du sol et apparaissent à partir du troisième horizon.

Par ailleurs, la texture est dominée par les argiles (49%) dans la partie supérieure du profil et une augmentation des limons (69%) dans sa partie inférieure. Les sables affichent une augmentation, dans la partie inférieure du profil (13.6 à 18.5%). Le taux de matière organique diminue, avec la profondeur, et varie de 3.1% à 1.0%. Le calcaire est présent dans tout le profil, avec des taux homogènes qui se situent autour de 14.5%.

Les principaux résultats analytiques indiquent que le profil B se caractérise par un profil salin descendant, fortement salé ( $14.75 \text{ dS/m} < \text{CE} < 45 \text{ dS/m}$ ) et par un SAR important ( $18.38\% < \text{SAR} < 49.7\%$ ). Le pourcentage de sodium échangeable est important ( $15.15\% < \text{ESP} < 32.07\%$ ) et le pH est légèrement alcalin à alcalin (8.3 à 8.5). Les chlorures (73%) et le sodium (71%) sont les ions prédominants de la solution du sol. Le faciès chimique de la solution du sol est de type **chloruré-sodique**.

#### 5) Classification du profil B

Les résultats morphologiques et analytiques (tableaux. et) du profil A suggèrent que ce sol remplit les conditions des critères diagnostiques du sous ordre des Salids (ordre des Aridisols) tels que définis par la classification USDA (**Soil Taxonomy, 2010**).

**Tableau 53.** Critères diagnostiques du profil B

Profils	E (cm)	CEps (dS/m)	E*CE	Gypse (%)	E (cm)*Gypse
<b>Profil B</b>	80 > 15	41.9 > 30	3352 > 900	6.19 > 5	297.1 >150

Selon les résultats représentés dans le **tableau.53**, l'épaisseur de l'horizon salique est supérieure à 15cm (80cm) et la CEps est supérieure à 30 dS/m (41.9 dS/m) et le produit E\*CEps est supérieur à 900 (3352).

Pour situer notre sol à un niveau avancé dans cette classification, nous avons retenu les suffixes suivants :

- **Gypsic** : il y a plus de 05% de Gypse (6.19%) dans un horizon qui a plus de 15cm d'épaisseur (48cm) avec un produit Gypse\*E supérieur à 150 (297.1), de ce fait il est Gypsic.

A cet effet, le profil étudié appartient à l'*Ordre des Aridisols* ; *Sous Ordre des Ordre des Salids* ; *Grand Groupe des Haplosalids* ; *Sous-Groupe des Gypsic Haplosalids*.

*Il correspond aux sols Salins à complexe sodique de la classification CPCS (1967).*

#### VI.8.4. Caractérisation du profil C

##### 1) Données générales

Le profil se situe au nord-ouest de la parcelle d'étude, délimitée au sud par un drain tertiaire, et à l'ouest par un drain secondaire.

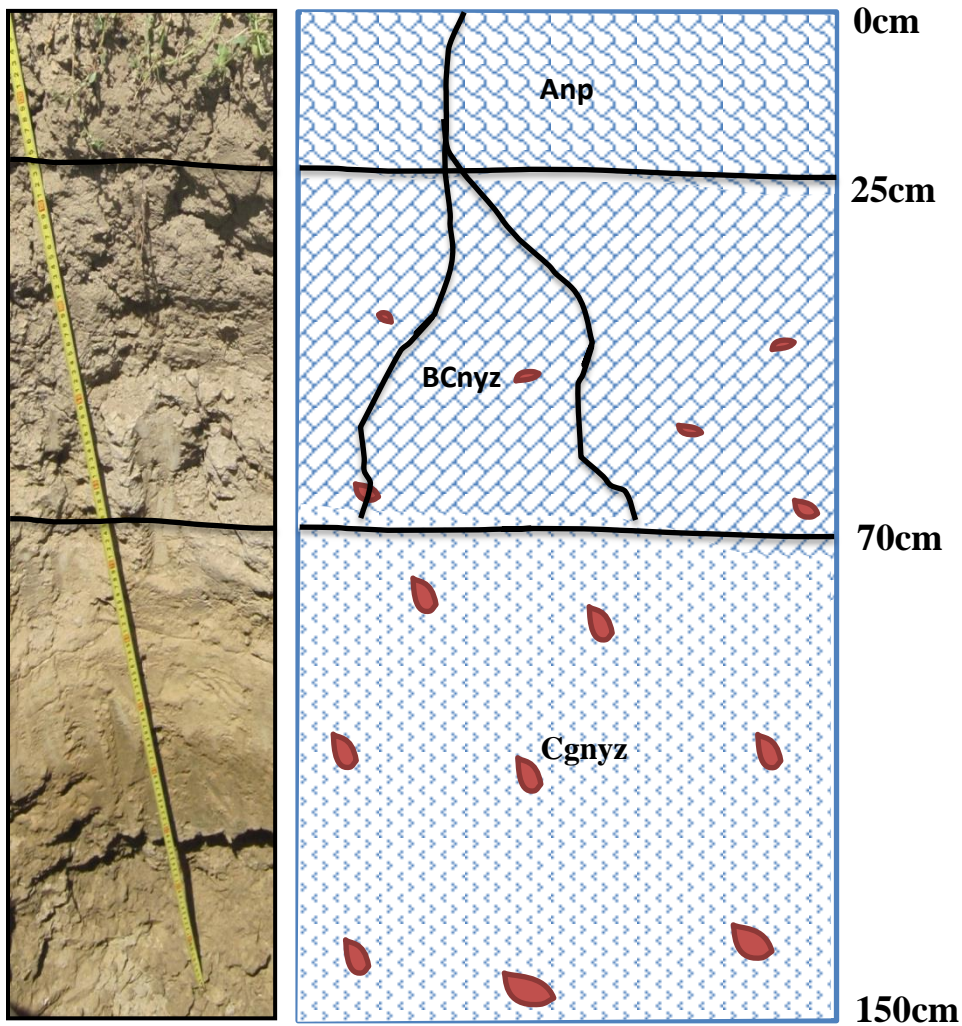
- Coordonnées géographiques 0° 29' 36,8'' longitude Est et 35° 44' 7'' de latitude Nord;
- Altitude : 61m ;
- Date de description: 16/09/2012 ;
- Temps : Ciel clair ;
- Précédent climatique : Il a plu dans la région les jours précédents.
- Topographie : Terrain plat ;
- Matériaux d'origines : Alluvions ;
- État de surface : Jeune plantation d'olivier.

##### 2) Description morphologique du profil C

**Anp (0 à 25cm)** : Sec; couleur à l'état sec 10 YR 6/4 argilo-limoneux; structure polyédrique angulaire fine à moyenne; poreux; plastique; collant; peu compacte; friable; absence d'éléments grossiers; moyennement organique; présence de fissures, présence de racines fines, forte activité biologique; présence de tâches blanchâtres hétérogènes; vive effervescence à l'Hcl généralisée ; transition nette régulière.

**BCnyz (25 - 70cm)** : Humide; couleur 10YR 5/4; argilo-limoneux; structure polyédrique anguleuse grossière; collant ; compact; peu friable; porosité structurale importante; absence d'éléments grossiers; présence de fentes verticale(plus épaisses au sommet et moins épaisses à la base); présence de racines mortes; moyennement organique; activité biologique moyenne; plastique; présence de tâches blanchâtres sous forme de pseudo-mycéliums; présence de quelques taches d'hydromorphie (oxydo-réduction) de couleur grisâtres et ocre, vive effervescence à l'Hcl généralisée; transition nette et régulière.

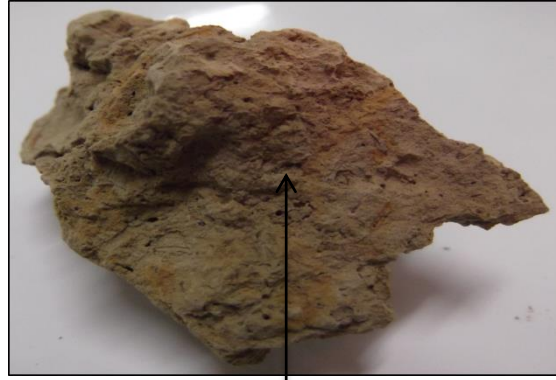
**Cgnyz (70 - 150 cm):** humide; couleur 10YR 6/3; argilo-limoneux ; structure massive à éclat anguleux; moyennement compact ; moyennement friable ; collant ; plastique ; très poreux ; très fragile ; absence d'éléments grossiers ; non organique ; présence de traces noirâtres correspondant à des anciennes racines, faible activité biologique; présence de nombreuses taches d'hydromorphie (oxydo-réduction) de couleur grisâtres et ocres, présence de taches blanchâtres; vive effervescence à l'Hcl, généralisée.



**Photo 11.** Profil C **Figure 66.** Coupe schématique du profil C



**Photo 12.** Couche de pseudo-sable



**Photo 13.** Tâches d'oxydo-réduction

Ce profil est développé sur des alluvions, sa profondeur est supérieure à 150 cm. Il est caractérisé par la présence de fentes et l'apparition d'une fine couche de pseudo-sable à la surface du sol. Le profil est caractérisé par la présence de très fortes accumulations salines dans les horizons de profondeur, ainsi que de fortes tâches d'oxydo-réduction à partir de 50 cm.

**L'horizon de surface (Anp)** est un horizon cultural, bien différencié et organique. Il se distingue par sa structure polyédrique angulaire fine et sa texture argilo-limoneuse;

**L'horizon de sub-surface (BCnyz)** se distingue du premier par sa structure polyédrique anguleuse moyenne et par la présence de fortes accumulations de sels;

**Le troisième horizon (Cgnyz)** se caractérise par son épaisseur (80cm), sa texture argilo-limoneuse, et sa structure massive. Les tâches blanchâtres correspondent aux accumulations salines. Il est très fortement salé et se caractérise par la présence de fortes tâches d'oxydo-réduction.

### 3) Résultats analytiques du profil C

#### a) Propriétés physiques et physico-chimiques du profil C

Les résultats analytiques sont présentés dans le **tableau.27 de l'Annexe.12**, et les résultats statistiques sont présentés dans le **tableau 54**.

##### - Le gypse

Les teneurs en gypse oscillent entre 4.4 et 5.3 %, avec une moyenne du profil de 05 % et un coefficient de variabilité faible. Mise à part l'horizon de surface, les valeurs du gypse sont supérieures à 5%.

##### - Le calcaire

Les teneurs en calcaire sont homogènes au niveau du profil, elles varient de 10.6% à 19.4% pour le calcaire total et de 7.8 à 8.8%, pour le calcaire actif, avec une moyenne respective de

14.1 et 8.1 % et un coefficient de variabilité faible pour le calcaire actif et modéré pour le calcaire total. Le profil, est moyennement calcaire.

- **La matière organique**

Le taux de matière organique diminue avec la profondeur, et varie entre 0.7%, en profondeur à 2.6 % dans l'horizon cultural (Anp), avec une moyenne de 1.3 % et un coefficient de variabilité très élevé.

- **La granulométrie**

Les fractions granulométriques prédominantes sont les fractions argileuses et limoneuses. Dans l'horizon de surface, les argiles et les limons ont pratiquement les mêmes taux qui sont respectivement de 49 et 48 %. Dans l'horizon de sub-surface, la fraction argileuse prédomine avec un taux de 58 %. La fraction sableuse est très peu représentée et varie entre 1 et 3 %. Nous observons au niveau des horizons profonds une diminution de la fraction argileuse (40%) et une forte augmentation de la fraction limoneuse (55 %). Tous les horizons ont une textures argilo-limoneuse. Nous remarquons aussi que le coefficient de variabilité de l'argile est faible pour ce profil (14.1%) (**Tab.54**).

**Tableau 54.** Statistiques descriptives des paramètres du profil C

<i>Paramètres</i>	<i>M0</i> (%)	<i>Calcaire</i> (%)	<i>Gypse</i> (%)	<i>Granulométrie (%)</i>		
				<i>Argile</i>	<i>Limon</i>	<i>Sable</i>
<b>Moy</b>	1,3	14,1	5,0	50,3	47,7	2
<b>Max</b>	2,6	19,4	5,3	58,0	55,0	3
<b>Min</b>	0,7	10,6	4,4	44,0	40,0	1
<b>CV %</b>	82,3	33,1	9,5	14,1	15,7	50

**b) Composition du complexe adsorbant**

Les résultats du complexe adsorbant sont présentés dans le **tableau 55** et le **tableau.28** de l'**Annexe.12**.

- **La capacité d'échange cationique (CEC)**

Les valeurs de la capacité d'échange cationique sont comprises entre 27.8 et 30 meq/100g de terre. La moyenne de la CEC est de 29.1 (meq/100g) avec un faible coefficient de variation (4%).

- **Les bases échangeables**

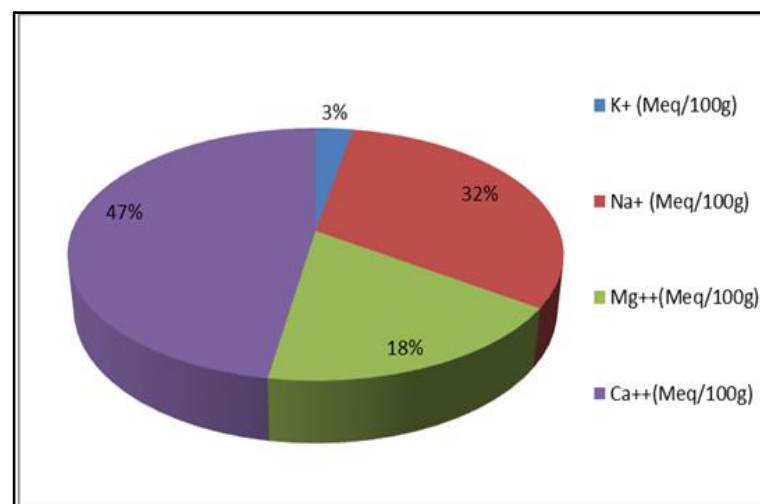
Selon la **figure 67** montre, la garniture cationique du complexe adsorbant révèle que le calcium échangeable constitue l'essentiel du complexe adsorbant avec un taux moyen de 47 % de la CEC, ensuite vient le sodium (32%), le magnésium (18%), et le potassium (3%).

Le tableau 56 montre que la moyenne du calcium échangeable dans le profil est de 14.8 meq/100g et le coefficient de variation est faible (9.9%). Le magnésium présente des teneurs appréciables de la capacité d'échange cationique (18%) avec une moyenne de 5.6 meq/100g et un coefficient de variation élevé de 35.1 %, alors que les teneurs du potassium sont relativement faibles (3%) pour une moyenne de 0.9 meq/100g et un coefficient de variation faible de 13.1%.

Pour le sodium, il présente des teneurs qui oscillent entre 18.3 et 50.9% de la CEC pour une moyenne de 9.9 meq/100g, avec un coefficient de variation très élevé de 50.7%. La moyenne de l'ESP, dans le profil est de 33.6% avec un coefficient de variation élevé de (48.9%). Les forts pourcentages de sodium échangeable ESP > 15 %, au niveau de chaque horizon, suggèrent que tous les horizons sont sodiques (USDA, 2010).

**Tableau 55.** Paramètres statistiques du complexe adsorbant du profil C

Paramètres	Complexe Absorbant (meq/100g)				CEC (meq/100g)	ESP %
	$K^+$	$Na^+$	$Mg^{++}$	$Ca^{++}$		
<i>Min</i>	0,8	5,1	3,8	13,2	27,8	18,3
<i>Max</i>	1,0	15,1	7,7	16,1	30,0	51,0
<i>Moy</i>	0,9	9,9	5,6	14,8	29,1	33,6
<i>CV %</i>	13,1	50,7	35,1	9,9	4,0	48,9



**Figure 67.** Composition cationique moyenne du complexe adsorbant du profil C

### c) Composition de la solution du sol

Les résultats analytiques et statistiques des différents paramètres de la solution du sol sont indiqués dans le **tableau.29 de l'Annexe.12** et le **tableau 56**.

### - La conductivité électrique

La distribution des sels en fonction de la profondeur, révèle une très forte salinité de l'horizon de profondeur (CE= 50.1 dS/m) par rapport à l'horizon de surface de surface (CE= 8.4 dS/m). Cette CE est plus faible que celle des autres horizons du profil. Ce phénomène serait dû à une lixiviation des sels provoquée par les pluies comme pour le cas des profils A et B (la description a été réalisé après la saison humide) et qui se seraient accumulés au niveau des horizons de profondeur, provoquant une augmentation de la CE (CE=35.5 dS/m), au niveau de l'horizon médian. La salinité augmente sensiblement dans les deux horizons BCnyz1 et Cgnyz2 pour atteindre respectivement les valeurs de 35.5 et 50.1 dS/m. Ce résultat indique que le profil salin est descendant.

### - Le pH

Les résultats montrent que le pH est supérieur à 8 avec une moyenne de 8.5. Ces valeurs correspondent à une réaction du sol relativement alcaline, caractéristique principale des sols calcaires et des sols salés.

### - Le SAR

Les valeurs du SAR varient de 14.2 pour les horizons de surface à 55.6 pour les horizons de profondeur, les valeurs du SAR dans les horizons de surface sont plus faibles par rapport à ceux, en profondeur. Ceci est dû, probablement, aux valeurs de la CE, qui sont faibles (8.4 dS/m) par rapport à celles, en profondeur (50.1 dS/m).

### - Les cations de la solution du sol

Selon la **figure 68**, le cation  $\text{Na}^+$  est le plus représenté avec un taux moyen de 78% et une concentration qui varie entre 92.6 meq/l et 517.4 meq/l. Le  $\text{Mg}^{++}$  vient en deuxième position avec un taux de 10.8% avec des teneurs qui varient entre 15.1 meq/l et 72.1 meq/l. Le  $\text{Ca}^{++}$  se situe en troisième position avec un taux de 10.1 % et des concentrations qui varient entre 35 meq/l et 50.6 meq/l, alors que le  $\text{K}^+$  vient en dernière position avec un taux de 1%, et des teneurs qui varient entre 0.8 meq/l et 1 meq/l.

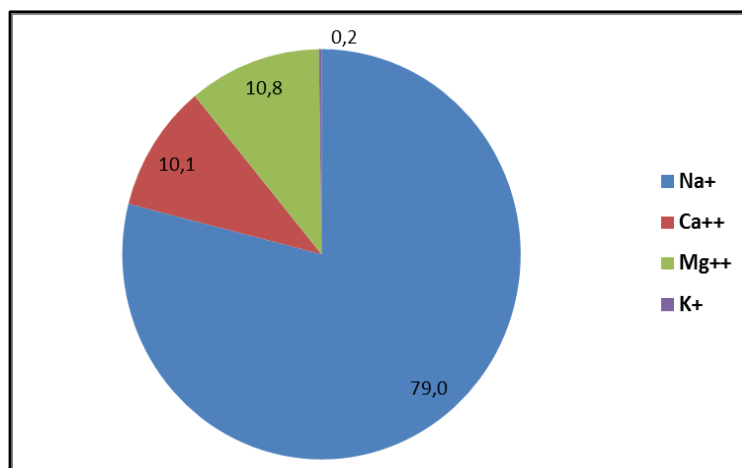
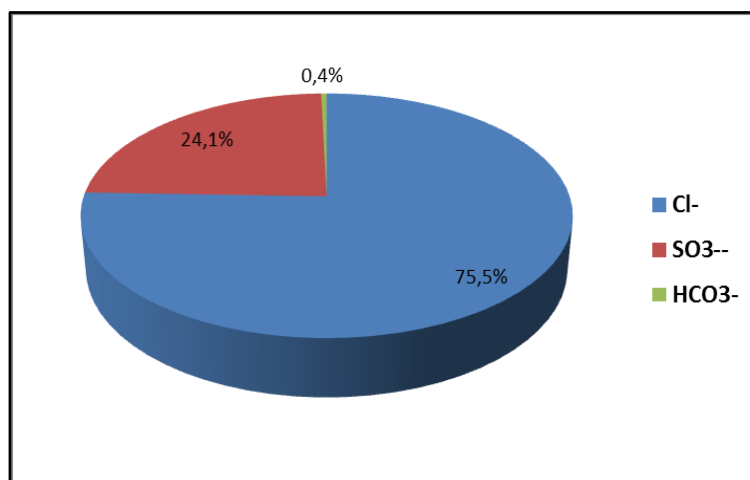
De ce fait, le classement des cations est de type :  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{K}^+$

### - Les anions de la solution du sol

Selon la **figure 69**, l'anion  $\text{Cl}^-$  est le plus représenté avec un taux moyen de 75.5% et une concentration qui varie entre 49 meq/l et 493.6 meq/l. Le  $\text{SO}_4^{--}$  vient en deuxième position avec un taux de 24.1% avec des teneurs qui varient entre 75.3 meq/l et 64.4 meq/l. Le  $\text{HCO}_3^-$  vient en dernière position avec un taux de 0.4% et des teneurs qui varient entre 1 meq/l et 2 meq/l.

**Tableau 56.** Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil C

Para- mètres	pH	CE <sub>ps</sub> dS.m <sup>-1</sup>	Cations en (meq.l <sup>-1</sup> )				Σ <sup>+</sup>	Anions en en (meq.l <sup>-1</sup> )			Σ <sup>-</sup>	SAR
			Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>		Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		
<b>Min</b>	8,3	8,4	92,6	35,0	15,1	0,8	143,8	49,0	75,3	1,0	126,3	14,2
<b>Max</b>	8,6	50,1	517,4	50,6	72,1	1,0	640,9	493,6	134,4	2,0	571,6	55,6
<b>Moy</b>	8,5	31,3	330,1	42,1	45,0	0,9	418,1	299,8	95,6	1,7	397,1	39,0
<b>CV%</b>	2	67,6	65,7	18,7	63,6	13,3	60,4	76,0	35,2	34,6	59,9	56,1

**Figure 68.** Répartition moyenne des cations dans la solution du sol du profil C**Figure 69.** Répartition moyenne des anions dans la solution du sol du profil C

#### 4) Synthèse des résultats morphologiques et analytiques du profil C

Sur le plan morphologique, le profil C se caractérise par une structure polyédrique angulaire fine dans l'horizon de surface et devient moyenne, à éclats anguleux, au niveau de l'horizon de sub-surface et massive vers la base. Il est caractérisé par la présence de tâches blanchâtres qui correspondraient à des accumulations gypso-salines.

Le taux de gypse est supérieur à 5% dans tout le profil sauf dans l'horizon de surface. Concernant la texture, elle est dominée par les argiles (49%) dans la partie supérieure du profil et une augmentation des limons (55%) dans sa partie inférieure. Les sables sont très peu représentés mais augmentent progressivement vers la profondeur passant de 1 à 3%. Le taux de matière organique diminue, avec la profondeur, et varie de 2.6% à 0.7%. Enfin, ce profil est partout calcaire avec des taux homogènes qui se situent autour de 14.1%.

Les principaux résultats analytiques indiquent que le profil C se caractérise par un profil salin descendant très fortement salin ( $8.39 \text{ dS/m} < \text{CE}_{\text{ps}} < 50.1 \text{ dS/m}$ ) et par un SAR important ( $14.2\% < \text{SAR} < 55.6\%$ ). Le pourcentage de sodium échangeable est important ( $18.31\% < \text{ESP} < 50.96\%$ ) et le pH est légèrement alcalin à alcalin (8.3 à 8.6). Les chlorures (77%) et le sodium (69 %) sont les ions prédominants de la solution du sol. Le faciès chimique de la solution du sol est de type chloruré-sodique.

### 5) Classification du profil C

Les résultats morphologiques et analytiques du profil A suggèrent que ce sol remplit les conditions de critères diagnostiques du sous ordre des Salids (ordre des Aridisols) tels que définis par la classification USDA (Soil Taxonomy, 2010).

**Tableau 57.** Critères diagnostiques du profil C

Profils	E (cm)	$\text{CE}_{\text{ps}}$ ( $\text{dS.m}^{-1}$ )	$\text{E} * \text{CE}_{\text{ps}}$	$\text{E} * \text{Gypse}$ (%)
<b>Profil C</b>	125 > 15	42.8 > 30	5350 > 450	653.1 > 150

Les résultats représentés dans le **tableau.57**, l'épaisseur de l'horizon salique est supérieure à 15cm (125cm) et la  $\text{CE}_{\text{ps}}$  est supérieure à 30 dS/m (42.8 dS/m) et le produit  $\text{E} * \text{CE}_{\text{ps}}$  est supérieur à 900 (5350).

Pour situer notre sol à un niveau avancé dans cette classification, nous avons retenu les suffixes suivants :

- **Gypsic** : il y a plus de 05 % de Gypse (5.22%), dans un horizon qui a plus de 15cm d'épaisseur ( $E = 125\text{cm}$ ) avec un produit ( $\text{Gypse} * E$ ) est supérieur à 150 (653.1), de ce fait il est Gypsic.

A cet effet, le profil étudié appartient à l'*Ordre des Aridisols* ; *Sous Ordre des Salids* ; *Grand Groupe des Haplosalids* ; *Sous-Groupe des Gypsic Haplosalids*.

Il correspond aux sols **Salins à complexe sodique** de la classification CPCS (1967).

## Discussion générale

### A. Caractérisation de la salinité

Les résultats d'analyses de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée ( $CE_{ps}$ ) montrent un profil salin descendant, pour les deux campagnes de mesures. D'après ces résultats, la moyenne de la  $CE_{ps}$  du profil salin, est passée de 18.4 dS/m, au mois de Juin à 21.2 dS/m au mois de Novembre, soit une augmentation de l'ordre de 15.21%.

Concernant la répartition verticale de la salinité, nous distinguons deux types de profils salins : les profils salins de type convexe, sont concentrés dans le sud, et les profils salins descendants au nord de la parcelle.

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

L'analyse de la corrélation entre la CEM et les propriétés du sol est positive entre la CEM et la  $CE_{psc}$  ( $0.74 < r < 0.889$ ), suivie par le pH ( $0.74 < r < 0.854$ ), et la  $Ced_{1/5}$  ( $0.638 < r < 0.844$ ). Dans cette étude, nous avons aussi trouvé une relation positive entre la CEM et la teneur en eau ( $0.547 < r < 0.678$ ), mais il n'y a pas de corrélation avec la texture (argile, limon et sable) et la matière organique.

L'utilisation des régressions multiples pour relier toutes les mesures de la CEM(V) à celles des conductivités électriques de l'extrait de pâte saturée des quatre horizons du sol (0-25cm ; 25cm-50cm ; 50cm-75cm ; 75cm-100cm) a montré une corrélation significative avec un coefficient de corrélation ( $r^2$ ) supérieur à 0.8. L'analyse statistique des valeurs ainsi obtenues de la  $CE_{ps}$  calculée montrent que les valeurs minimales de la  $CE_{ps}$ , pour la campagne Juin 2012, sont observées dans la partie sud de la parcelle, avant le drain tertiaire, situé au centre, elles sont de 1.1 à 21.5 dS/m, alors que les valeurs maximales sont observées dans le nord de la parcelle et elles sont de 5.1 à 46 dS/m. Par contre les valeurs minimales de la  $CE_{ps}$  pour le mois de Novembre sont de 2 à 27.8 dS/m et les valeurs maximales de 7.5 à 46.3 dS/m. De ce fait, l'évolution de la salinité augmente du sud vers le nord de la parcelle.

Selon le test de **Kolmogorov-Smirnov**, sur la distribution de la conductivité électrique, l'horizon de surface de la campagne Juin 2012 et l'horizon de sub-surface et l'horizon (50-75cm) de la campagne Novembre 2012 suivent une loi normale. Les autres horizons ne suivent aucune des lois proposées (Log et Exponentielle).

L'analyse des cartes de salinité a permis de dégager les principaux résultats sur l'évolution saisonnière de la salinité, à savoir :

- La cartographie de la campagne Juin 2012 a montré, en premier lieu, l'existence d'une zone non salée, dans l'horizon de surface, au sud-est de la parcelle, qui disparaît ensuite, en Novembre 2012. Aussi, la salinité croît de façon régulière en se rapprochant de la limite nord de la parcelle, particulièrement après le drain tertiaire, situé au centre ;
- Les cartes krigées présentent des conductivités électriques plus fortes en profondeur et atteignent des valeurs de 62.36 dS/m, observées, au nord de la parcelle. Cette zone correspond à une micro-dépression, située avant la limite nord de la parcelle;
- Il y a, au sein de la parcelle d'étude, des zones très contrastées en termes de concentration en sels. Même en saison des pluies, l'effet de la pluviométrie naturelle semble insuffisant pour lisser les différences de salinité, à cause, probablement de l'insuffisance du drainage et la faible perméabilité du sol, suite à la dégradation de la structure ;
- Les profils salins moyens sont de type descendant. Cette forme dominante (profil descendant) n'est pas modifiée, au cours des saisons sèches ou humides. Cela pourrait être lié au climat, au drainage et à l'activité anthropique (travail du sol et irrigation).

Dans les pays arides et en régime naturel, les profils salins verticaux sont en ascendants, c'est-à-dire que les sels se concentrent à la surface des sols sous l'effet conjugué des remontées capillaires et de l'évaporation. Sous irrigation, au contraire, les sels sont drainés vers le bas du profil. Entre ces deux extrêmes, toutes les situations intermédiaires peuvent exister. Elles sont caractéristiques d'une situation pédologique ou d'un itinéraire technique donné (**Job et al, 1990**)

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

De telles fluctuations sont observées, dans les sols de la parcelle d'étude, au cours des deux campagnes de mesures, avec des redistributions verticales des sels qui modifient le profil de salinité en amplifiant ou en réduisant les différences de salinité entre les profondeurs. Néanmoins, nous avons constaté que la forme du profil de salinité, descendant, pourrait s'expliquer, principalement par l'usage de la parcelle, notamment par le fait qu'elle soit la-

bourée. L'influence de l'activité anthropique sur les flux hydriques et les flux salins apparaît ainsi dominante pour expliquer les variations verticales de la salinité.

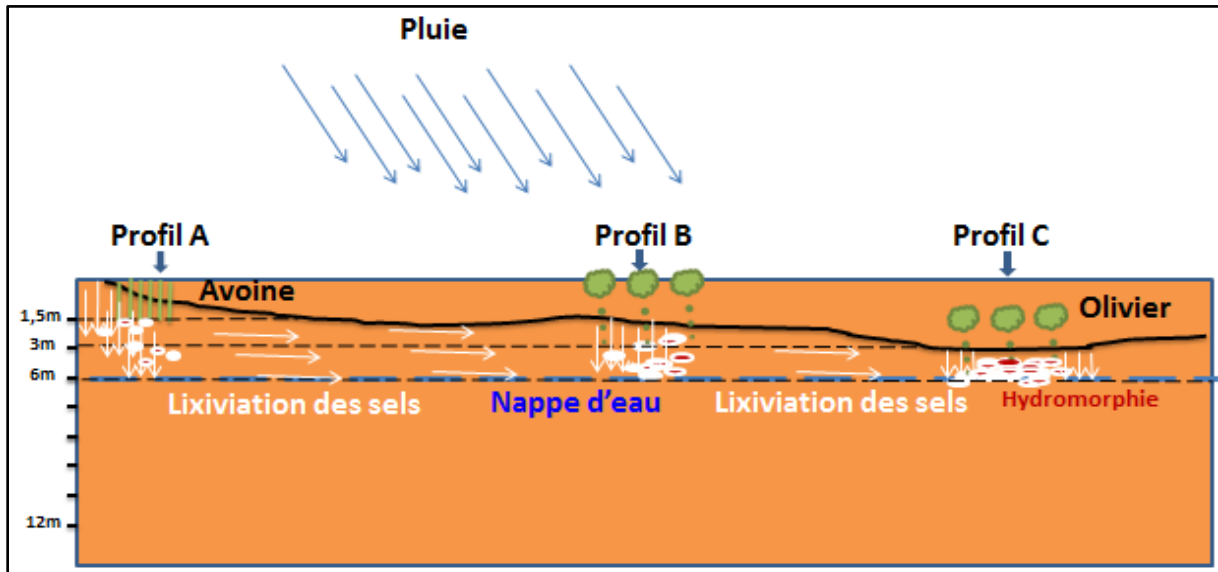
## B. Caractérisation des sols

En fonction des caractères morphologiques, ainsi que les teneurs en sels solubles, gypse et en sodium échangeable des divers horizons des profils étudiés, on peut distinguer, en allant du sud vers le nord de la parcelle :

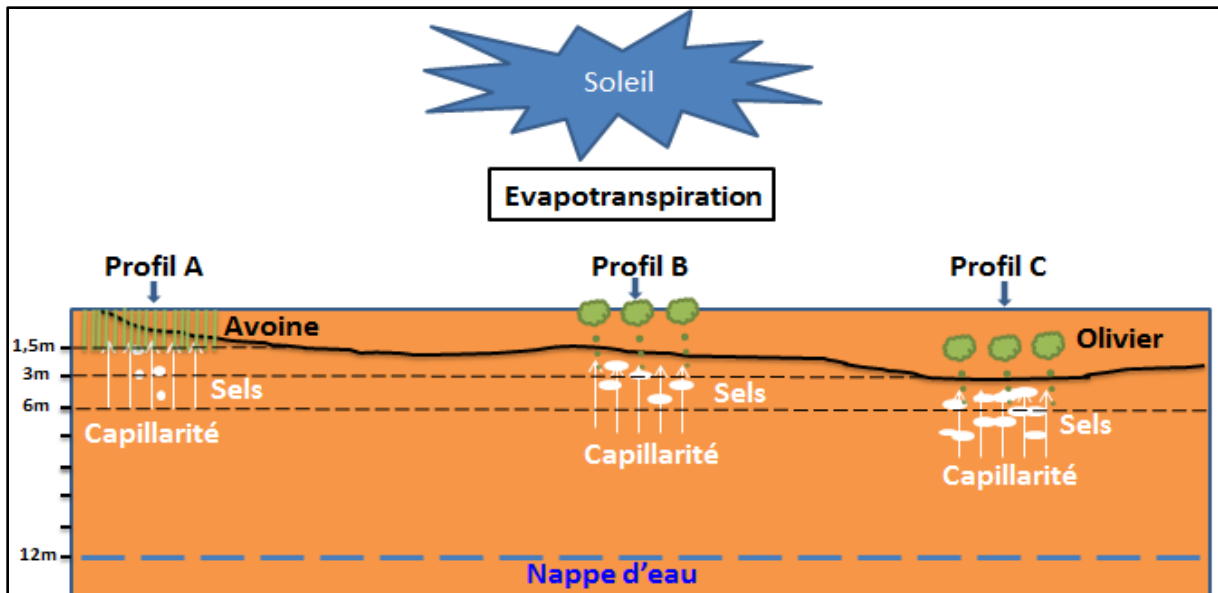
- Le **profil A**, est situé dans la zone sud-est de la parcelle, dans laquelle ont été trouvées les plus faibles valeurs des conductivités électromagnétiques, se caractérise par un profil salin descendant, faiblement salé en surface à fortement salé en profondeur ( $2.42 \text{ dS/m} < CE_{ps} < 23.2 \text{ dS/m}$ ) et par un SAR important ( $14.28 < SAR < 23.12$ ) et un pourcentage de sodium échangeable fort ( $20.7\% < ESP < 47\%$ ). La présence d'un horizon gypsique, dans le profil, situe ce type de sol au sous-Groupe des *Sodic Haplogypsis* de la classification Américaine(USDA), correspondant aux sols *Salins à complexe sodique* de la classification **CPCS (1967)**.
- Le **profil B**, situé dans la zone sud-ouest de la parcelle, est caractérisé par les fortes accumulations salines dans les horizons de profondeur, ainsi que la présence de quelques tâches d'oxydo-réduction à partir de 70 cm, mais plus accentuées en profondeur. Les principaux résultats analytiques indiquent que ce profil se caractérise par un profil salin descendant, fortement salé ( $14.75 \text{ dS/m} < CE_{ps} < 45 \text{ dS/m}$ ), par un SAR important ( $18.38\% < SAR < 49.7\%$ ), un pourcentage de sodium échangeable important ( $15.15\% < ESP < 32.07\%$ ) et d'une teneur en gypse de plus de 5%. La présence d'un horizon salique, et d'un horizon gypsique, dans le profil, situe ce type de sol au sous-Groupe des *Gypsic Haplosalids* de la classification Américaine(USDA), correspondant aux sols *Salins à complexe sodique* de la classification **CPCS (1967)**.
- Le **profil C**, situé dans la zone nord-ouest de la parcelle se caractérise une très forte salinité ( $8.39 \text{ dS/m} < CE_{ps} < 50.1 \text{ dS/m}$ ), un fort pourcentage de sodium échangeable ( $18.3\% < ESP < 48.9\%$ ) et une teneur en gypse de 5% et plus. La présence d'un horizon salique et d'un horizon gypsique, dans le profil, situe ce type de sol au sous-Groupe des *Gypsic Haplosalids* de la classification Américaine(USDA), correspondant aux sols *Salins à complexe sodique* de la classification **CPCS (1967)**.

L'analyse des valeurs de la  $CE_{ps}$ , des différents horizons des profils, indiquent une forte concentration de la salinité, dans les horizons moyens et en profondeur, d'où le profil salin est descendant. Selon **Aubert (1976)**, les processus pédogénétiques peuvent modifier la morpho-

logie de ces horizons de moyenne profondeur. Dans ces sols salés assez argileux, comportant une nappe salée à moyenne profondeur, apparaissent des pseudo-mycéliums dits (gypso-salins). Selon **Aubert (1976)**, le dépôt du gypse prend naissance à la suite des échanges d'ions entre celui-ci et la solution qui le traverse en remontant de la nappe phréatique par capillarité. Dans certains sols il peut y avoir un véritable stockage du gypse à moyenne profondeur (**Aubert, 1976**).



**Figure 70.** Mécanisme de la salinisation dans les sols de la parcelle (période pluvieuse)



**Figure 71.** Mécanisme de la salinisation dans les sols de la parcelle (période sèche)

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif d'étudier la variabilité spatio-temporelle de la salinité des sols tout en mettant en relation les méthodes qui permettent d'identifier cette variabilité. Des approches complémentaires ont été pour cela mises en œuvre, à savoir, la cartographie de la salinité, à partir de méthodes géophysiques non destructives, permettant de décrire l'extension spatiale de la salinité et de sa profondeur d'apparition, ainsi que l'analyse de son évolution saisonnière.

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

L'analyse de la répartition spatiale de la conductivité électrique a mis en évidence une dynamique spatio-temporelle de la salinité, en relation avec :

- **Le climat**, dont les variations des régimes pluviométriques et de températures, pendant les saisons, influent directement sur le profil salin du sol, par une lixiviation des sels, pendant les *périodes pluvieuses*, conduisant à un profil descendant et un profil convexe, lorsque le lessivage est insuffisant. Par contre, pendant la *saison sèche*, les remontées capillaires conduisent à une concentration des sels dans la partie médiane du profil salin;
- **La nappe phréatique** proche des horizons profonds du sol, et dont les fluctuations provoquent une différenciation morphologique du profil de sol, laissant apparaître des accumulations gypso-salines et des tâches d'oxydo-réduction plus ou moins accentuées, en fonction de sa profondeur;
- **L'activité anthropique**, en particulier, le travail du sol, qui entraîne une coupure des remontées capillaires, en brisant les capillaires du sol, et à la pratique de l'irrigation qui ne tient pas compte de la dose de lessivage à apporter, influençant la concentration des sels dans la zone racinaire;
- **Le mauvais drainage** ne permettant pas un rabattement de la nappe. Le drain tertiaire situé, au centre de la parcelle étant déconnecté du drain secondaire la traversant du côté ouest ;
- **Et la topographie** (pente) qui influe sur le sens de l'écoulement des solutés du sud vers le nord de la parcelle.

Le périmètre irrigué de la Mina est doté d'un système hydro-agricole très important et représente un atout pour le développement socio-économique de cette région. Cette activité

contribue à la sécurisation alimentaire des exploitants. Cependant, les performances de ce périmètre sont limitées du fait de la dégradation de ses sols par la salinisation. Ces sols présentent des transformations morphologiques et chimiques importantes pouvant intervenir sur leurs potentialités agronomiques qui sont souvent néfastes aux cultures, si les pratiques agricoles et les techniques d'irrigation appropriées ne sont pas adaptées.

L'étude morpho-analytique des profils pédologiques a montré que le pH est supérieur à 8, avec un pourcentage de sodium échangeable élevé (ESP >15%).

L'une des principales caractéristiques de ces sols est la présence, à côté du sodium soluble et échangeable, de fortes teneurs de magnésium soluble et échangeable. La présence de ce magnésium induit certaines conséquences au niveau des propriétés des sols (**Daoud et al, 1993**). Selon **Saidi, 2004**, en présence du sodium échangeable, le magnésium manifeste un effet négatif vis-à-vis de l'arrangement structural des particules argileuses.

Les accumulations gypso-salines, la texture argileuse, les caractères vertiques, et la présence de signes d'hydromorphie dans les horizons de profondeur, constituent des traits morphologiques et pédogénétiques importants de ces types de sols et révèlent la présence d'une nappe phréatique proche de ces horizons.

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 échangeable élevé dans les sols, pourrait affecter les propriétés physiques du sol à long terme suite à l'utilisation des eaux d'une qualité moyenne à médiocre pour l'irrigation.

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

Aussi, ce travail ouvre des perspectives et pose des problématiques sur les interactions entre le sol et la nappe, située en dessous, ainsi que l'intensité et le régime des flux d'eau et des éléments chimiques entre le sol et cette nappe. Une analyse des fluctuations saisonnières de la nappe, et son effet sur la dynamique de la salinité et sur la qualité des eaux d'irrigation, en conséquence, sur le rendement des cultures végétales, fourniront des éléments qui permettront de mieux comprendre ces interactions entre les sols salés et leur environnement.

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

## Références bibliographiques

- Amakor Xystus N., 2013.** “Using Electromagnetic Induction Sensing to Understand the Dynamics and Interacting Factors Controlling Soil Salinity”. All Graduate Theses and Dissertations. Paper 1723. <http://digitalcommons.usu.edu/etd/1723>
- ANRH, 2003.** Suivi et modelisation de la salinité des sols dans le périmètre irrigué de la Mina. 43 p.
- Armstrong, M. et Carignan, J., 1997.** Géostatistique linéaire. Application au domaine minier. Les presses de l'École des mines. Paris. 115 p.
- Aubert G., 1975.** Les sols sodiques en Afrique du Nord. Annales de l'INA Alger, n°6, 185-195.
- Aubert G., 1983.** Observation sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodiques. Cah. ORSTOM. Ser. ped. Vol xxx n°1, pp = 73-78.
- Ayers R.S. et Westcot D.W., 1988.** La qualité de l'eau en agriculture. Bul. FAO d'Irrig. Et de Drain. 29 Rev. 1, Rome, 180 p
- Badraoui M, Poss R, Belghiti M, Soudi B, Bellouti A, Grünberger O et Hammecker C, 2005.** Gestion de l'eau dans les périmètres irrigués : maintien d'une production durable et réhabilitation des sols salés. Académie d'Agriculture de France, 19 mai 2005.
- Banton, O., Seguin, M.K. et Cimon, M.A. 1997.** Mapping field-scale physical properties of soil with electrical resistivity. Soil. Sci. Soc. Amer. J., 61: 1010-1017.
- Benchetrit Maurice, .1956-** Les sols d'Algérie. In: Revue de géographie alpine. 1956.
- Boivin P., Brunet D., Job J.O., 1988.** Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés : une méthode rapide et fiable. Cah. Orstom, sér. Pédol., 24 (1), 39-48
- Boivin P., Favre F., Hammecker C., Maeght J.L., Delarivière J., Poussin J.C., Wopereis M.C.S., 2002.** Processes driving soil solution chemistry in a flooded rice-cropped vertisol: analysis of long-time monitoring data. Geoderma 110. pp 87–107.
- Boualla N., 2002.** Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de la plaine de la Mina. Thèse de magister. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.
- Bridget R. Scanlon et al, 1999.** Evaluation of Electromagnetic Induction as a Reconnaissance Technique to Characterize Unsaturated Flow in an Arid Setting. Vol. 37, N°2- GROUND WATER – March – April 1999.
- Bronson K., F. Booker. J. D., Officer S. J., Lascano R. J., Maas S. J., Searcy S.W., 2005.** Apparent Electrical Conductivity, Soil Properties and Spatial Covariance in the U.S. Southern High Plains. Precision Agriculture, 6, 297-311.
- C.P.C.S., 1967.** Classifications des sols. Commission de pédologie et de cartographie des sols. Doc multi. INRAA Grignon, 96p.
- Cameron D.R., De Jong E., Read D.W.L., Oosterveld M., 1981.** Mapping salinity using resistivity and electromagnetic inductive techniques. Can. J. Soil Sci.; 61(1):67-78.
- Carroll, Z., & Oliver, M., 2005.** Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity. Geoderma, 128, 354-374.
- Cherbuy B., 1991:** Les sols salés et leur réhabilitation étude bibliographique. CEMAGREF, école. Nat. Renne, 170p.
- Corwin D. L., Lesch S. M., 2003.** Using the Dual-Pathway Parallel Conductance Model to Determine How Different Soil Properties Influence Conductivity Survey Data. Agronomy Journal 95:365-379
- Corwin D.L., 2005.** Mapping, Monitoring, and Assessment of salinity Using Apparent Soil Electrical Conductivity. Proceedings of the International Salinity Forum, Managing Saline Soils and Water: Science, Technology, and Soil Issues. April 25- 27. Riverside, CA pp: 125-128.

- Corwin D.L., Rhoades J.D., 1982.** An improved technique for determining soil electrical conductivity. Depth relations from above-ground electromagnetic measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 810 - 812.
- Corwin, D.L. (ed.). 2005.** Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 46:1–10.
- Corwin, D.L., and S.M. Lesch. 2005.** Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 46:11–43.
- Daoud Y et Halitim A., 1994.** Irrigation et Salinisation au Sahara Algérien. *Sécheresse.* 3 (5), pp : 151- 160.
- Daoud Y., 1993.** Contribution à l'étude des sols des plaines de Cheliff, le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux. Thèses doctorat d'état. INA. Alger, 193 p.
- Daoud Y., Cheverry C., et Robert M., 1993.** Rôle physico-chimique du magnésium dans les sols salés des plaines du Cheliff. *SCIENCE DU SOL - 1993 -Vol. 31,4,* 281-29.
- De Jong E., Ballantyne A.K., Cameron D.R., Read D.W.L., 1979.** Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid salinity surveys. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43(6):810-812.
- Djili K., 2000.** Contribution à la connaissance des sols du Nord de l'Algérie : Création d'une banque de données 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.
- Dogar M.A., 1980.** Méthodes d'analyses des sols sales-alcalins. Cours polycopié, I.N.A., Alger, 35.
- Douaoui. A., et Hartani. T. 2007.** Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Actes de l'atelier régional SIRMA. 4-7 juin 2007, Nabeul, Tunisie.
- Duchaufour Ph. Souchier B., 1977.** Pédologie1, Pédogenèse et classification. Masson. Paris.
- Duchaufour Ph., 1976.** Principes d'une classification écologique des sols. *Agrochimica*, XX, 4-5, pp : 313 – 323.
- Duchaufour Ph., 1988.** Abrèges de pédologie. 2eme édition. Masson. Paris. Milan. Barcelone. Mexico, 224 p
- Dunia H. Tabet., 1999.** Intérêt d'une approche spatiale pour le suivi de la salinité des sols dans les systèmes irrigués. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Montpellier, 435p.
- Durand J.H., 1983.** Les sols irrigables, Agence de coopération culturelle et technique. P.U. France, 190 p.
- FAO, 1988.** Soils Bulletin 39. Salt-Affected Soils and their Management. Food And Agriculture Organization of the United Nations Rome.
- FAO, 2005.** Utilisation des engrais par culture en Algérie. Rome, 61 p.
- FAO, 1999.** Soil Salinity assessment. Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. Irrigation and Drainage paper. N°57, Rome, 1999. 150 p.
- FAO., 2006.** Conférence électronique sur la salinisation. Extension de la salinisation et stratégies de réhabilitation. Organisée et coordonnée par Programme International pour la Technologie et la Recherche en Irrigation et Drainage, du 6 février au 6 Mars 2006. 12p.
- Franzen D., 2005.** Managing Saline Soils in North Dakota. ([www.ext.nodak.edu](http://www.ext.nodak.edu))
- Geonics, 1992.** EM38 operating manual. Geonics: Ontario. p. 29.
- Ghoul A., Peter G., 1974.** Etude agro-pédologique du périmètre de la Mina.

- Ghoul A., 1974.** Etude agro-pédologique des extensions du périmètre de la Mina. Echelle 1/20000. ANRH.
- Guéro, Y., 2000.** Contribution à l'étude des mécanismes de dégradation physico-chimique des sols sous climat sahélien. Exemple pris dans la vallée du moyen Niger. Thèse de Doctorat de l'Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger), 109p.
- Hadj Miloud S., 2010.** Morphologie et propriétés des Solontchaks Références de la Mina. Thèse de Magistère. Ecole Doctorale : Sciences du Sol. INA d'El Harrach (Alger). 110 pages.
- Halitim A., 1973.** Etude expérimentale de l'amélioration des sols sodiques d'Algérie en vue de leur mise en culture. Thèse de 3eme cycle. Univ de Renne, 176 p.
- Halitim A., 1985.** Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes Plaines Steppiques d'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la génèse et le comportement des sols. Thèse Doct. d'Etat, Université de Rennes, 383 p.
- Halitim A., 1988.** Sols des régions arides d'Algérie. OPU, Alger, 384 p
- Hassan G, Persaud N, Reneau R.B., 2005.** Utility of hydrus-2D in modeling profile soil moisture and salinity dynamics under saline water irrigation of soybean. Soil sciences, 170, 1, 28–37.
- Heath, J., Challis, P., Norman, C., 1999.** **Manual for Calibration of EM38.** Agriculture Victoria- Natural Resources & Environment. Institute of Sustainable Irrigated Agriculture. 1-9.
- Hendrickx J.M.H., Baerends B., Raza Z.I., Sadig M., Akram Chaudhry M., 1992.** Soil salinity assessment by electromagnetic induction of irrigated land. Soil Sci. Soc. Am. J. 56(6):1933–1941.
- Hendrickx, J.M.H., Kachanoski R.G., 2002.** Indirect measurement of solute concentration: Non-intrusive electromagnetic induction. p. 1297–1306. In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- Iddir M.E.A., 2006.** Evaluation de la salinité par induction électromagnétique : Exemple d'une parcelle cultivée de la plaine de la Macta (Wilaya de Mascara). Thèse de Magistère. Option Pédosphère. INA d'El Harrach (Alger). 113 pages.
- Ihou A. 1995.** Evolution des sols irrigués de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal. Mémoire d'ingénieur IST de l'UCAD, no d'ordre 055/IST/95.
- INSID., 2008.** Caractérisation de l'état actuel de la salinité dans le périmètre irrigué de la Mina.
- International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI., 2000.** EM38 Workshop Proceedings, New Delhi, India. Feb. 4. 2000. 94 pp
- Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989.** An Introduction to Applied Geostatistics, New York: Oxford Univ. Press.,.
- Jaynes, D.B., J.M. Novak, T.B. Moorman, and C.A. Cambardella. 1995.** Estimating herbicide partition coefficients from electromagnetic induction measurements. J. Environ. Qual. 24:36- 41.
- Job J.O, Bellier G, Gaaloul N, Montoroi J.P, Zante P., 1997.** Interprétation pédologique des données électromagnétiques et électriques. Application au bassin versant d'El Gouazine. Colloque GEOFCAN, Bondy, France, 17-22 p.
- Job J.O., Hachicha M., Loyer J.Y., 1990.** Conductivimétrie électromagnétique et cartographie de la salinité des sols. ORSTOM. Fonds documentaire. N° 31.297 ex1, cote: B. 33p.
- Job J.O., Loyer J.Y., Ailoul M., 1987.** Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. v.23, n°2, pp.123-131.
- Johnston K., Hoef J.M.V., Krivoruchko K., Lucas N., 2001.** Using ARCGIS Geostatistical Analyst. ESRI. 380 New York Street. Redlands, CA 92373-8100, USA. 300p.
- Johnston MA, Meyer JH, Savage MJ, and Van Antwerpen R., 1994.** Electromagnetic

induction as a technique for diagnosing and mapping soil salinity. Proceedings of the South African Sugar Technologists Association.

**Johnston, M. A., M. J. Savage, J. H. Moolman, and H. M. du Plessis. 1996.** Calibration models for interpretation of soil salinity measurements using an electromagnetic induction technique. *S. Afr. J. Plant Soil.* 13: 110-114.

**Johnston, M.A. 1994.** An Evaluation of the Four-Electrode and Electromagnetic Induction Techniques of Soil Salinity Measurement. Water Research Commission Report No. 26911194, South Africa, 191 pp.

**Khorsandi, F., and F. A. Yazdi. 2011.** Estimation of saturated paste extracts' electrical conductivity from 1:5 soil/water suspension and gypsum. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 42:315-321.

**Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Myers, D.B., Drummond, S.T. et Hong, S.Y. 2005.** Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Comp. Electron. Agric.*, 46: 285-308.

**Le Houerou H.N., 1993:** Salt – tolerant plants for the arid region of the Mediterranean isoclimatique zone In: H. Leith et A Al Massoom (edits): towards the rational use of high salinity tolerant plants. Vol 1. Kluwer academ, pp: 403- 422.

**Lahlou M, 2002.** Élaboration et validation de deux modèles de simulation du mouvement des sels dans les sols irrigués. Thèse de doctorat, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc.

**Lahlou M., Badraoui M., Souidi B., Goumari A., Tessier D., 2002.** Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols. Actes de l'atelier du PCSI, Montpellier, France, 28-29 mai 2002. 19p.

**Lahmar R et Ruellan A., 2007.** Dégradation des sols et stratégies coopératives en Méditerranée : la pression sur les ressources naturelles et les stratégies de développement durable. *Cahiers Agricultures* vol. 16, n° 4, juillet-août 2007, pp. 318-323.

**Le Brusq J. Y., Loyer J. Y., 1982.** Relations entre les mesures de conductivité sur des extraits de sols de rapport sol/solution variables, dans la vallée du Fleuve Sénégal. *Cah. ORSTOM.Sér. Pédo.*, Vol XIX, n° 3 pp. 293-301.

**Legros J.P., 1996.** Cartographie des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Presses polytechniques et universitaires romandes, 574 p.

**Legros J.P., 2007.** Les grands sols du Monde. Presses polytechniques et universitaires romandes, 574 p.

**Legros J.P., 2009.** La salinisation des terres dans le monde. Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, 2009, <http://academie.biu-montpellier.fr/>, conférence n°4069, Bull. n°40, p. 257-269.

**Lesch, S.M., Strauss, D.J. et Rhoades, J.D., 1995.** Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques: I. Statistical predictions models: a comparison of multiple linear regression and co-kriging. *Water Resour. Res.*, 31: 373-386.

**Loyer J.Y., 1990.** Solums salsodiques - Salisol et sodisols. Référentiel pédologique. Techniques et pratiques. pp. 241-249. INRA, Paris.

**Marlet S., Job J.O., 2006.** Processus et gestion de la salinité des sols. In Tiercelin, J.R. *Traité d'irrigation*, seconde édition. Tec & Doc Lavoisier. p. 797-822.

**McKenzie, R. C., W. Chomistek, and N. F. Clark., 1989.** Conversion of electromagnetic inductance readings to saturated paste extract values in soils for different temperature, texture and moisture conditions. *Can. J. Soil Sci.* 69: 25-32.

**McNeill, J.D., 1980.** Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Geonics Tech. Note TN-6. Geonics Limited, Mississauga, ON, Canada. P14

**Mermoud A., 2006.** Maitrise de la salinité des sols. Cours de physique du sol. Ecole polytechnique de Lausanne. p.1-14.

- Middleton, Nick (ed.)/Thomas, David (ed.), 1997.** UNEP-World Atlas of Desertification-2nd – London – Arnold --182p.
- Montoroi J. P., 1997.** Conductivité électrique de la solution du sol et d'extraits aqueux de sol. Application à un sol sulfaté acide salé de Basse-Casamance (Sénégal). *Étude et Gestion des Sols*, 4, 4, pages : 279-298.
- Montoroi. J. P., 2005.** Sols salés et environnement. *Sols et Environnement*. Chapitre 27, 608-627p. Dunod, Paris. 816p.
- Morizet J., Dejou J., Guyot J., 1970.** Principales caractéristiques physico- chimiques des sols de type vertique et sodique dans le Marais rochefortais. *Bull. de l'AFES*, n° 5, pp. 11-24.
- Navarro-Pedreno J., Jordan M. M., Melendez-Pastor I., Gomez I., Juan P, and Mateu J., 2007.** Estimation of soil salinity in semi-arid land using a geostatistical model. *Land Degradation & Development*, 18: 339–353.
- Nolin, M.C., 2000.** Variabilité et structure d'organisation spatiale des sols. Pages 143-169 dans CRAAQ. 1er Colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision. 23-24 Juillet 2000. Ste-Hyacinthe (Québec, Canada).
- Nolin, M.C., Cambouris, A.N. et Simard, R.R., 1997.** La variabilité des sols: son origine et sa gestion. Pages 35-77 dans Éditeur (ed.). Actes du Colloque : Nouvelle technologie en agriculture, Campus du fort St-Jean.
- Nolin, M.C., Gagnon, B., Leclerc, M-L., Cambouris, A.N., Bélanger, G. et Simard, R.R., 2002.** Influence of pedodiversity and land uses on the within-field spatial variability of selected soil land forage quality indicators. In precision Agriculture, proceedings of the 6 Th international Conférence, P.C. Robert et al. (Eds.). ASA-CSSA-SSSA. Minneapolis, MN
- Norman, C.P., 1990b.** Training Manual on the Use of the EM38 for Soil Salinity Appraisal. Technical Report Series No. 181, Apr 1990. Department of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Sustainable Irrigated Agriculture, Tature, Vic. Australia. 32 pp.
- Quenum M., 2009.** Cartographie à l'échelle de la parcelle agricole de variables indicatrices de la capacité des sols à fixer le phosphore à l'aide de la télédétection et des nouvelles technologies. Thèse de Doctorat. Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement. Université du Québec. 206 pp.
- Rashidi, M. And M. Seilsepour., 2008.** Sodium adsorption ratio pedotransfer function for calcareous soils of varamin region. *Int. J. Agri. Biol.*, 10: 715–8
- Rhoades, J.D. 1976.** Measuring, mapping and monitoring field salinity and water depths with soil resistance measurements. *FAO Soils Bulletin*, 31: 69-1 09.
- Rhoades, J. D., F. Chanduvi, and S. Lesch., 1999.** Soil salinity assessment - Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. In: *FAO irrigation and drainage paper no. 57*, FAO Rome (Italy), Land and Water Development Div., 166 pp.
- Rhoades, J.D. and D.L. Corwin., 1981.** Determining soil Electrical Conductivity-depth Relations Using an Inductive Electromagnetic Soil Conductivity Meter. *Soil Science society of America journal*, 1981. 45: p. 255-260.
- Rhoades, J.D., Chanduvi, F. and Lesch, S. (Eds.), 1999.** Soil Salinity Assessment. Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements. *Irrigation and Drainage Paper No 57*. FAO, Rome, Italy. 153 pp.
- Rhoades, J.D. and Ingvalson, R.D. 1971.** Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. *Soil Science Society of America Proceedings*, 35: 54-60.
- Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Shouse, P.J., and Alves, W.J. 1989b.** Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibration. *Soil Sci. Soc. Am. Journal* 53: 433-439.
- Rhoades, J.D., P.A. Raats, and R.J. Prather., 1976.** Effects of liquid- phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 651–655.

- Richards L.A., 1954.** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agric. Handb. N° 60 vol 1. Us.
- Saidi D., 2004.** Influence de la phase saline sur les propriétés physiques des matériaux argileux du Bas Cheliff. Thèse de Doctorat d'Etat Es Sciences en Sciences Agronomiques. Spécialité science du sol. Institut National Agronomique, El Harrach, Alger. 181p.
- Servant J., 1976.** Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. Thèse de doctorat d'état, Université du Languedoc, 194p
- Servant J.M., 1970.** Etude expérimentale de l'influence des conditions salines sur la perméabilité des sols sales de la région méditerranéenne Française. Ann de l'I.N.A., El-Harrach, Vol. VI, pp. 225-245.
- Servant J.M., 1976.** Sur quelques aspects de la pédogénèse en milieu halomorphe : l'exemple des sols salés de la région méditerranéenne Française. Ann. de l'INRA. Vol. VI. n° 1, pp : 225-245.
- Servant J.M., 1978.** La salinité dans le sol et les eaux caractérisation et problèmes d'irrigation drainage. Bull. B.R.G.M. Sect. III. N ° 2, pp 123- 142.
- Servant, J., 1975.** Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du sud et du sud-ouest de la France. Thèse de Doct Sc nat, ENSA, France, 194p.
- Sharma D.P. and Gupta S.K, 2000.** Application of em38 for soil salinity appraisal: an Indian experience. EM38 Workshop, New Delhi, India, Feb. 4, 2000, pp 23-35.
- Slavich, P.G., 1990.** Determining EC, Depth Profiles from Electromagnetic Induction Measurements. Aust. J. Soil Res. 28: 443 - 452.
- Trangmar, B.B., Yost, R.S., Uehara, G., 1985.** Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy 38, 45–94.
- Triantafilis, J., I.O.A. Odeh, and A.B. McBratney., 2001.** Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton. Soil Science Society of America Journal 65, no. 3: 869–878.
- Triantafilis J., Laslett G.M., McBratney A.B., 2000.** Calibrating an electromagnetic Induction Instrument to Measure Salinity in Soil under Irrigated Cotton. Soil Sci. Soc. Am. J. 64(6):1009-1017.
- U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954.** Diagnostic and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A Handbook, n°60, 160p.
- United States Department of Agriculture (USDA), 1999.** Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agriculture handbook, Number 36. Second Edition. Washington(DC): USDA, Natural Resources Conservation Service; 869 p.
- United States Department of Agriculture (USDA), 2010.** Keys to Soil Taxonomy. By Soil Survey Staff. Natural Resources Conservation Service. Eleventh Edition. 338p
- Vaueclin M., 1982.** Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. Colloques INRA, n° 15, pp.9-43.
- Willem F. Vlotman, 2000.** Calibrating the EM38. EM38 Workshop, New Delhi, India, Feb. 4, 2000, pp 1-21.
- Williams, B. G., and Hoey, D. 1987.** The use of electrical induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils. Aust. J. Soil Res. 25:21-27.
- Wittler J.M., Cardon G.E., and Cooper C.A., 2004.** Regional Calibration of the EM-38 for Salinity Assessment in the Arkansas Valley. (6349).
- Wollenhaupt, N. C., J. L. Richardson, J. E. Foss, and E. C. Doll., 1986.** A rapid method for estimating weighted soil salinity from apparent soil electrical conductivity measured with an above ground electromagnetic induction meter. Can. J. Soil Sci. 66: 315-321.
- Zahow M.F., Amrhein C., 1992.** Reclamation of a saline sodic soil using synthetic polymers and gypsum. Soil Sci. Soc. Am. J. 56, pp. 1257-1260.



## 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.

**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

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

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

**Tableau 2.** Les résultats statistiques de l'humidité du sol en (%) (Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
<b>Minimum</b>	6,0	10,1	13,7	11,1	11,8
<b>Maximum</b>	16,6	19,7	20,8	25,8	18,6

**Tableau 3.** Les résultats statistiques de l'humidité du sol en (%) (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
<b>Minimum</b>	15,3	17,1	15,8	14,6	11,9
<b>Maximum</b>	30,3	27,3	26,4	24,8	25,3

**Tableau 4.** Les résultats statistiques de l'Argile (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
<b>Minimum</b>	22,0	34,0	3,0	1,0	26,8
<b>Maximum</b>	71,0	85,0	86,0	66,0	71,5

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

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
<b>Minimum</b>	26,0	11,0	13,0	33,0	27,3
<b>Maximum</b>	75,0	64,0	85,0	88,0	71,5

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

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
<b>Minimum</b>	2,0	1,0	1,0	1,0	1,3
<b>Maximum</b>	19,0	19,0	16,0	24,0	18,0

**Tableau 7.** Les résultats statistiques de la matière organique (%) (Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
<b>Minimum</b>	1,36	0,27	0,23	0,17	0,59
<b>Maximum</b>	3,69	1,92	1,14	1,32	1,53

**Tableau 8.** Les résultats statistiques de la matière organique (%) (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
<b>Minimum</b>	1,1	0,3	0,2	0,2	0,4
<b>Maximum</b>	3,7	1,9	1,1	1,8	2,1

**Tableau 9.** Les résultats statistiques du pH (Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Minimum	8,07	8,08	8,20	8,10	8,29
Maximum	8,49	8,60	8,90	8,90	8,72

**Tableau 10.** Les résultats statistiques du pH (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Minimum	8,08	8,08	8,20	8,07	8,11
Maximum	8,49	8,82	8,90	8,90	8,78

**Tableau 11.** Les résultats statistiques du calcaire (CaCO<sub>3</sub> en %)(Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Minimum	11,5	11,0	14,9	14,9	13,5
Maximum	18,3	19,1	19,5	20,0	18,0

**Tableau 12.** Les résultats statistiques du calcaire (CaCO<sub>3</sub> en %)(Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Minimum	12,3	12,7	13,6	13,2	14,0
Maximum	16,6	16,3	17,8	16,6	16,1

**Tableau 13.** Les résultats statistiques de la CEps en dS/m (Juin2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
<b>Minimum</b>	1,1	7,1	9,0	8,9	6,6
<b>Maximum</b>	17,0	29,0	41,7	46,0	28,7

**Tableau 14.** Les résultats statistiques de la CEps en dS/m (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
<b>Minimum</b>	2,0	10,7	12,2	10,2	9,8
<b>Maximum</b>	12,7	31,0	44,6	46,3	32,1

**Tableau 15.** Les résultats statistiques de la Ced<sub>1/5</sub> en dS/m (Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
<b>Minimum</b>	0,2	1,5	1,9	1,8	1,4
<b>Maximum</b>	4,4	5,4	6,3	7,4	5,4

**Tableau 16.** Les résultats statistiques de la Ced<sub>1/5</sub> (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
<b>Minimum</b>	0,3	2,1	2,6	2,0	1,8
<b>Maximum</b>	4,6	6,2	7,4	6,8	5,3

**Tableau 17.** Valeurs de la conductivité électromagnétique (CEM) verticales et horizontales,

obtenues en Juin 2012 et utilisées pour le calcul de la CEps de chaque horizon par les régressions multiples.

<i>N°</i>	<i>CEM<sub>v</sub></i>	<i>CEM<sub>v1</sub></i>	<i>CEM<sub>v2</sub></i>	<i>CEM<sub>v3</sub></i>	<i>CEM<sub>v4</sub></i>	<i>CEM<sub>H</sub></i>	<i>CEM<sub>H1</sub></i>	<i>CEM<sub>H2</sub></i>	<i>CEM<sub>H3</sub></i>	<i>CEM<sub>H4</sub></i>
<b>P1</b>	<b>77</b>	<b>48</b>	<b>36</b>	<b>29</b>	<b>23</b>	56	15	13	11	9
<b>P2</b>	<b>222</b>	<b>129</b>	<b>96</b>	<b>76</b>	<b>62</b>	156	73	56	44	35
<b>P3</b>	<b>470</b>	<b>259</b>	<b>195</b>	<b>150</b>	<b>117</b>	362	160	115	87	65
<b>P4</b>	<b>472</b>	<b>256</b>	<b>225</b>	<b>177</b>	<b>123</b>	440	188	130	98	75
<b>P5</b>	<b>480</b>	<b>264</b>	<b>200</b>	<b>154</b>	<b>119</b>	341	154	110	83	66
<b>P6</b>	<b>445</b>	<b>244</b>	<b>183</b>	<b>140</b>	<b>109</b>	429	150	109	79	58
<b>P7</b>	<b>649</b>	<b>343</b>	<b>252</b>	<b>186</b>	<b>143</b>	553	220	154	112	82
<b>P8</b>	<b>620</b>	<b>300</b>	<b>200</b>	<b>158</b>	<b>122</b>	400	182	128	93	68
<b>P9</b>	<b>328</b>	<b>153</b>	<b>115</b>	<b>86</b>	<b>68</b>	203	88	64	47	36
<b>P10</b>	<b>190</b>	<b>88</b>	<b>65</b>	<b>37</b>	<b>32</b>	119	53	37	29	22
<b>P11</b>	<b>256</b>	<b>154</b>	<b>118</b>	<b>93</b>	<b>72</b>	188	86	60	46	37
<b>P12</b>	<b>301</b>	<b>181</b>	<b>137</b>	<b>106</b>	<b>82</b>	243	98	66	50	40
<b>P13</b>	<b>422</b>	<b>235</b>	<b>176</b>	<b>135</b>	<b>103</b>	301	141	105	74	56
<b>P14</b>	<b>447</b>	<b>240</b>	<b>176</b>	<b>134</b>	<b>102</b>	329	147	102	73	55
<b>P15</b>	<b>483</b>	<b>261</b>	<b>194</b>	<b>150</b>	<b>116</b>	364	166	117	84	63
<b>P16</b>	<b>543</b>	<b>295</b>	<b>215</b>	<b>160</b>	<b>120</b>	543	192	130	95	70
<b>P17</b>	<b>456</b>	<b>250</b>	<b>184</b>	<b>140</b>	<b>106</b>	325	150	101	75	56
<b>P18</b>	<b>590</b>	<b>329</b>	<b>240</b>	<b>176</b>	<b>133</b>	467	203	135	97	73
<b>P19</b>	<b>239</b>	<b>140</b>	<b>107</b>	<b>83</b>	<b>65</b>	160	80	51	39	30
<b>P20</b>	<b>218</b>	<b>117</b>	<b>88</b>	<b>68</b>	<b>53</b>	170	68	46	34	25

\*N.B. Seules les valeurs verticales en gras ont été utilisées pour le calcul de la CEps

**Tableau 18.** Valeurs des conductivités électriques ( $CE_{ps}$ ), mesurées et calculées (**Juin 2012**)

N°	CE <sub>ps</sub> (dS.m <sup>-1</sup> ) mesurée au laboratoire				CE <sub>ps</sub> (dS.m <sup>-1</sup> ) calculée par les équations de régressions			
	0-25 cm	25 -50 cm	50 -75 cm	75-100 cm	0 - 25 cm	25 -50 cm	50 -75 cm	75-100 cm
1	1,4	7,1	9,0	8,9	2,0	8,1	8,0	7,9
2	5,7	14,1	17,6	16,9	5,3	13,0	14,3	15,5
3	8,5	13,7	22,3	24,4	10,9	20,8	26,1	28,6
4	6,0	20,9	41,7	46,0	5,7	20,2	41,8	47,0
5	8,5	20,4	27,1	28,8	10,6	21,0	27,4	30,1
6	9,4	22,1	27,7	27,6	9,7	19,8	25,1	27,1
7	17,0	29,0	34,1	30,1	12,6	25,4	33,4	34,6
8	14,6	20,6	26,7	24,9	14,1	19,7	28,0	28,5
9	8,9	11,4	21,5	20,2	8,1	13,1	21,4	20,7
10	1,1	11,5	13,3	11,7	1,6	10,4	14,1	10,8
11	5,3	15,2	16,0	16,5	3,9	14,7	17,7	19,7
12	10,3	20,5	19,7	20,4	4,4	16,5	19,1	21,2
13	5,1	15,6	25,3	27,3	7,1	19,1	24,9	27,0
14	5,7	17,6	24,5	28,2	7,4	18,9	25,5	26,9
15	10,9	24,6	29,0	44,3	10,7	20,4	26,7	29,0
16	7,6	20,0	37,7	43,6	6,9	22,3	29,7	31,0
17	5,1	20,4	23,3	24,3	6,8	19,7	26,0	27,8
18	5,3	23,9	26,7	26,2	7,3	25,1	30,8	32,3
19	3,5	14,7	14,5	15,1	3,8	13,7	16,7	18,1
20	2,3	10,5	15,3	14,9	3,2	11,7	16,2	16,5

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

obtenues en Novembre 2012 et utilisées pour le calcul de la CEps de chaque horizon par les régressions multiples.

N°	<i>CEM<sub>v</sub></i>	<i>CEM<sub>v1</sub></i>	<i>CEM<sub>v2</sub></i>	<i>CEM<sub>v3</sub></i>	<i>CEM<sub>v4</sub></i>	<i>CEM<sub>h</sub></i>	<i>CEM<sub>h1</sub></i>	<i>CEM<sub>h2</sub></i>	<i>CEM<sub>h3</sub></i>	<i>CEM<sub>h4</sub></i>
P1	84	57	50	35	26	79	36	22	17	15
P2	225	128	103	77	61	184	74	52	41	33
P3	382	220	174	131	97	272	128	87	68	55
P4	561	306	239	179	137	435	196	135	97	76
P5	557	314	240	178	135	398	190	132	98	74
P6	383	218	168	126	96	310	133	90	70	52
P7	494	260	200	150	112	388	160	112	86	62
P8	502	266	205	152	116	347	158	112	80	60
P9	249	139	110	80	64	200	84	60	47	37
P10	152	93	75	52	45	139	53	37	31	25
P11	276	157	125	93	71	208	95	64	52	41
P12	285	164	129	95	73	213	97	70	54	42
P13	392	222	174	128	99	318	139	96	74	57
P14	393	232	182	135	105	300	143	103	77	60
P15	465	251	197	146	114	387	155	111	85	65
P16	485	262	202	150	116	415	173	124	93	69
P17	439	245	187	142	107	354	154	110	80	61
P18	456	247	189	143	108	328	145	105	80	61
P19	265	149	118	88	68	204	95	66	49	38
P20	233	134	106	81	62	195	84	59	45	35

\*N.B. Seules les valeurs verticales en gras ont été utilisées pour le calcul de la CEps

**Tableau 20.** Valeurs des conductivités électriques ( $CE_{ps}$ ), mesurées et calculées (Novembre 2012)

N°	$CE_{ps}$ ( $dS.m^{-1}$ ) mesurée au laboratoire				$CE_{ps}$ ( $dS.m^{-1}$ ) calculée par les équations de régressions			
	0 – 25 cm	25 -50 cm	50 -75 cm	75-100 cm	0 – 25 cm	25 -50 cm	50 -75 cm	75-100 cm
1	2,0	11,9	12,2	10,2	2,8	14,2	14,7	11,9
2	8,7	20,9	21,9	22,7	6,0	16,7	15,5	18,5
3	10,2	23,2	29,2	27,4	8,1	25,1	29,3	28,3
4	10,6	24,6	40,0	46,3	11,8	25,3	34,1	38,7
5	11,3	30,7	44,6	44,9	11,6	29,7	39,0	39,5
6	12,4	28,5	31,4	30,3	8,8	25,2	27,2	28,4
7	12,7	31,0	40,5	41,0	11,4	26,9	35,0	37,1
8	10,9	19,9	29,5	30,2	11,3	24,3	33,9	37,3
9	8,7	13,4	22,6	27,8	6,4	16,1	18,3	21,0
10	3,7	10,7	13,2	14,4	4,4	12,0	12,5	14,8
11	4,3	21,3	21,2	23,1	6,7	19,5	21,5	22,4
12	6,5	21,7	19,4	21,2	6,8	19,9	22,7	23,1
13	9,0	23,3	24,3	26,3	8,5	21,0	27,5	29,2
14	7,5	21,2	22,9	24,7	8,2	22,3	25,9	27,7
15	10,2	18,4	21,0	25,4	10,2	20,2	28,0	33,3
16	11,3	26,0	30,6	36,0	10,9	23,7	31,0	35,2
17	8,4	25,7	24,9	26,2	10,2	28,9	30,0	31,8
18	9,6	25,1	25,7	32,7	10,7	27,5	30,6	33,4
19	3,4	21,9	21,9	24,3	6,7	19,0	19,8	21,6
20	6,5	18,6	16,6	17,3	6,3	20,6	17,2	19,0

**Résultats analytiques du profil A**

**Tableau 21.** Propriétés physiques et physico-chimiques du profil A

<i>Horizons</i>	<i>Profondeur (cm)</i>	<i>M0 (%)</i>	<i>Calcaire (%)</i>	<i>Gypse (%)</i>	<i>Granulométrie (%)</i>		
					<i>Argile</i>	<i>Limon</i>	<i>Sable</i>
<i>Anp</i>	0-28	3,7	12,7	2,16	45	49	6
<i>BCny</i>	28-76	2,0	14,0	5,6	53	43	4
<i>Cny1</i>	76-95	1,3	15,7	5,38	35	58	7
<i>Cny2</i>	95-150	1,3	16,6	5,17	20	73	7

**Tableau 22.** Complexe adsorbant du profil A

<i>Horizons</i>	<i>Complexe Absorbant (meq/100g)</i>				<i>CEC (meq/100g)</i>	<i>ESP (%)</i>
	<i>K<sup>+</sup></i>	<i>Na<sup>+</sup></i>	<i>Mg<sup>++</sup></i>	<i>Ca<sup>++</sup></i>		
<i>Anp</i>	1,63	7,33	6,72	13,5	35,4	20,71
<i>BCny</i>	0,87	8,08	8,37	15,92	29,55	27,34
<i>Cny1</i>	0,75	5,8	4,28	14,63	27,8	20,86
<i>Cny2</i>	0,6	10,78	4,43	18,44	24,5	44,00

**Tableau 23.** Caractéristiques analytiques de la solution du sol du profil A

<i>Horizons</i>	<i>pH</i>	<i>CE dS.m<sup>-1</sup></i>	<i>Cations (meq.l<sup>-1</sup>)</i>					<i>Anions (meq.l<sup>-1</sup>)</i>				<i>SAR</i>
			<i>Na<sup>+</sup></i>	<i>Ca<sup>++</sup></i>	<i>Mg<sup>++</sup></i>	<i>K<sup>+</sup></i>	<i>Σ<sup>+</sup></i>	<i>Cl<sup>-</sup></i>	<i>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>	<i>SO<sub>4</sub><sup>-</sup></i>	<i>Σ<sup>-</sup></i>	
<b>Anp</b>	8,67	2,42	61,73	9,6	12,75	0,66	<b>84,7</b>	55	2	23,1	<b>80,1</b>	<b>15,44</b>
<b>BCny</b>	8,18	9,9	93,47	32,7	20,24	0,56	<b>147,0</b>	79,6	1	60,8	<b>141,4</b>	<b>14,28</b>
<b>Cny1</b>	8,24	20,06	176,5	46,6	42,14	0,64	<b>265,9</b>	199,2	1	59,9	<b>260,1</b>	<b>21,46</b>
<b>Cny2</b>	8,27	23,2	207,4	54,2	52,54	0,72	<b>314,9</b>	218,1	2	60,8	<b>280,9</b>	<b>23,12</b>

**Résultats analytiques du profil B**

**Tableau 24.** Propriétés physiques et physico-chimiques du profil B

<i>Horizons</i>	<i>Profondeur (cm)</i>	<i>M0 (%)</i>	<i>Calcaire (%)</i>	<i>Gypse (%)</i>	<i>Granulométrie (%)</i>		
					<i>Argile</i>	<i>Limon</i>	<i>Sable</i>
<b>Anp</b>	0-28	3,1	14,4	2,98	48.7	46.3	5
<b>BCny</b>	28-76	1,4	11,9	6,19	48.8	46.4	4.8
<b>Cnz1</b>	76-95	1,0	14,4	3,95	19.3	62.1	18.5
<b>Cgnz2</b>	95-150	1,3	17,4	3,94	17.6	68.8	13.6

**Tableau 25.** Complexe adsorbant du profil B

<i>Horizons</i>	<i>Complexe Absorbant (meq/100g)</i>				<i>CEC</i>	<i>ESP %</i>
	<i>K<sup>+</sup></i>	<i>Na<sup>+</sup></i>	<i>Mg<sup>++</sup></i>	<i>Ca<sup>++</sup></i>	<i>(meq/100g)</i>	
<b>Anp</b>	1,28	5,63	5,9	13,06	<b>34,75</b>	<b>16,20</b>
<b>BCny</b>	0,79	3,57	4,37	17,59	<b>23</b>	<b>15,52</b>
<b>Cnz1</b>	0,35	7,04	8,72	10,36	<b>21,95</b>	<b>32,07</b>
<b>Cnz2</b>	0,93	3,62	5,04	9,52	<b>23,9</b>	<b>15,15</b>

**Tableau 26.** Caractéristiques analytiques de la solution du sol du profil B

<i>Horizons</i>	<i>pH</i>	<i>CE dS.m<sup>-1</sup></i>	<i>Cations (meq.l<sup>-1</sup>)</i>				$\Sigma^+$	<i>Anions (meq.l<sup>-1</sup>)</i>			$\Sigma^-$	<i>SAR</i>
			<i>Na<sup>+</sup></i>	<i>Ca<sup>++</sup></i>	<i>Mg<sup>++</sup></i>	<i>K<sup>+</sup></i>		<i>Cl<sup>-</sup></i>	<i>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>	<i>SO<sub>4</sub><sup>-</sup></i>		
<b>Anp</b>	8,3	14,7	132,6	38,2	27,6	0,87	199,4	108,2	3	71,9	183,1	18,4
<b>BCny</b>	8,4	25	240,4	46	55,4	0,66	342,6	203	1	91,5	295,5	28,0
<b>Cnz1</b>	8,5	45	460,3	51,6	68,3	0,83	581,0	473,1	2	87,3	562,4	49,7
<b>Cnz2</b>	8,4	38,8	318,7	64,6	87,0	0,51	470,9	355,5	1	83,9	440,4	30,6

**Résultats analytiques du profil C**

**Tableau 27.** Propriétés physiques et physico-chimiques du profil C

<i>Horizons</i>	<i>Profondeur (cm)</i>	<i>M0 (%)</i>	<i>Calcaire (%)</i>	<i>Gypse (%)</i>	<i>Granulométrie (%)</i>		
					<i>Argile</i>	<i>Limon</i>	<i>Sable</i>
<i>Anp</i>	0-25	2,6	12,3	4,43	49	48	3
<i>BCnyz</i>	25-70	0,7	10,6	5,33	58	40	1
<i>Cgnyz</i>	70-150	0,7	19,4	5,12	44	55	2

**Tableau 28.** Complexe adsorbant du profil C

<i>Horizons</i>	<i>Complexe Absorbant (meq/100g)</i>				<i>CEC</i>	<i>ESP %</i>
	<i>K<sup>+</sup></i>	<i>Na<sup>+</sup></i>	<i>Mg<sup>++</sup></i>	<i>Ca<sup>++</sup></i>	<i>(meq/100g)</i>	
<i>Anp</i>	1	5,09	7,72	15,03	27,8	18,31
<i>BCnyz</i>	0,77	9,45	5,39	16,06	30	31,50
<i>Cgnyz</i>	0,87	15,06	3,79	13,17	29,55	50,96

**Tableau 29.** Caractéristiques analytiques de la solution du sol du profil C

<b>Horizons</b>	<b>pH</b>	<b>CE<sub>ps</sub> dS.m<sup>-1</sup></b>	<b>Cations en (meq.l<sup>-1</sup>)</b>				<b>Σ<sup>+</sup></b>	<b>Anions en (meq.l<sup>-1</sup>)</b>			<b>Σ<sup>-</sup></b>	<b>SAR</b>
			<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>++</sup></b>	<b>Mg<sup>++</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>		
<b>Anp</b>	8,3	8,39	92,6	35,0	15,1	1,0	143,8	49	2	75,3	126,3	14,2
<b>BCnyz</b>	8,6	35,5	380,4	40,7	47,8	0,8	469,7	356,9	2	134,4	493,3	47,3
<b>Cgnyz</b>	8,6	50,1	517,4	50,6	72,1	0,8	640,9	493,6	1	77,0	571,6	55,6

**Tableau 30.** 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 :  $v = n - 2$

## Résumé

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

*Le contrôle de la salinité du sol, par la connaissance de sa distribution spatiale et de son évolution dans le temps, devient nécessaire en vue d'aboutir à des stratégies de développement agricole durable. La méthode conventionnelle de détermination de la salinité, par la mesure de la conductivité électrique d'un extrait de la pâte saturée du sol (CEps), reste difficile à cause de la grande variabilité spatiale des teneurs en sels d'un point à un autre, qui rend cette méthode laborieuse. Comme solution alternative, l'induction électromagnétique par l'appareil (EM38), a été développée par Geonics Ltd (Canada) et peut être utilisée pour faciliter les mesures rapides de la salinité des sols au champ. Elle est rapide et permet une forte densité de points de mesure. Le présent travail vise l'étude de l'évolution spatio-temporelle de la salinité des sols, par l'utilisation de cette méthode, sur une parcelle cultivée représentative de la plaine de Mina (Relizane). Un ensemble de 9090 mesures de la conductivité électromagnétique (CEM) ont été réalisées sur une grille régulière de 10 x 10 m avec l'instrument EM38, alors que 160 échantillons ont été prélevés pour la détermination de CEps. Des modèles de régression linéaires multiples ont été utilisés pour convertir les valeurs de CEM en CEps. Le krigeage a été employé pour extrapoler aux endroits non échantillonnés. L'élaboration des cartes de salinité s'est fondée sur ces valeurs prédites. Les résultats ont mis en évidence des cycles de salinisation et de désalinisation du sol. Les profils salins sont de type descendant avec des pics salins traduisant un transfert des sels et leur redistribution. Trois profils pédologiques ont été implantés, au niveau de la parcelle d'étude, et ont subi une description morphologique détaillée et des analyses physiques et chimiques ont été déterminées, au laboratoire. Les profils ont été, ensuite, classés, dans le système de classification Américaine (Soil Taxonomy).*

## Abstract

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

*Control soil salinity, with the knowledge of the spatial distribution and its evolution over time, it becomes necessary to lead to strategies sustainable agricultural development. The conventional method for determining the salinity by measuring the electrical conductivity of an extract of the saturated soil (ECe) dough remains difficult because of the large spatial variability of salt levels from one point to another which makes this laborious method. As an alternative, the electromagnetic induction unit (EM38), was developed by Geonics Ltd. (Canada) and can be used to facilitate the swift action of soil salinity in the field. It is fast and allows a high density of measurement points. The present work aims to study the spatio-temporal evolution of soil salinity, by using this method on a plot cultivated representative of the plain of Mina (Relizane). A set of 9090 measurements of electromagnetic conductivity (ECM) were performed on a regular grid of 10 × 10 m with the EM38 instrument, while 160 samples were taken for determination of stocks. Of multiple linear regression models were used to convert the values of ECM stocks. Kriging was used to extrapolate to unsampled*

*locations. The development of salinity maps was based on the predicted values. The results showed cycles of salinization and soil desalinization. Saline profiles are top-down with saline peaks reflecting a transfer of salts and their redistribution. Three soil profiles were implanted at the study plot, and underwent a detailed morphological description and physical and chemical analyzes were determined in the laboratory. The profiles were then classified in the American classification system (Soil Taxonomy).*

## ملخص

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

للتحكم على ملوحة التربة بمعرفة توزيعها المكاني وتطورها مع مرور الوقت، لذا يصبح من الضروري ان تؤدي الى استراتيجيات التنمية الزراعية المستدامة. تبقى الطريقة التقليدية لتحديد نسبة الملوحة عن طريق قياس التوصيل الكهربائي للخلاصة المشبعة للتربة صعبة وذلك بسبب التغير المكاني الكبير لمستويات الملح من نقطة الى اخرى، مما يجعل هذه الطريقة شاقة. كبديل، تم تطوير جهاز الحث الكهرومغناطيسي (EM38) عن طريق GEONICS المحدودة (كندا). ويمكن استخدام هذا الجهاز لتسهيل قراءات سريعة لملوحة التربة في الحقل. فهو سريع ويسمح بقياس كثافة عالية من النقاط. يهدف هذا العمل الى دراسة التطور المكاني والزمني لملوحة التربة باستخدام هذا الاسلوب على قطعة ارض مزروعة من سهل مينا (غليزان). اجريت 9090 عملية قياس للموصلية الكهرومغناطيسية (ECM) على شكل شبكة 10x10م بواسطة EM 38. في حين اخذت 160 عينة لتحديد الموصلية الكهرومغناطيسية لمستخرج العجينة المشبعة. استعملنا عدة نماذج الانحدار الخطي لتحويل قيم ECM الى CEps. وقد استخدمنا كريغ (Krigage) لاستقراء الاماكن التي لم تاخذ منها العينات. واستند تطوير خرائط الملوحة على القيم المتوقعة. وظهرت نتائج دورات تملح وتحلية التربة ملامح الملوحة هي من الاعلى الى الاسفل مع وجود قمم مالحة مما يعكس نقل الاملاح واعادة توزيعها. تم زرع ثلاث مقاطع التربة في الحقل المدروس وخضعت لعملية الوصف المورفولوجي؛ الفيزيائي والكميائي المفصل. وكل هذه التحاليل كانت في المخبر، ثم تم تصنيفها في نظام التصنيف الامريكي للتربة (Soil Taxonomy).