

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة
الحراش - الجزائر
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE
El-Harrach – ALGER

Département de Science du Sol

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de magister en sciences agronomiques
Option : Pédologie et Mise en valeur des sols

THEME

Evolution spatiale de la salinité des sols du Bas-Chélif.

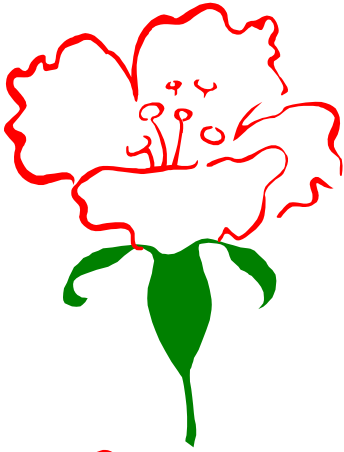
Présenté par : M. SAOUD Mohamed

Soutenu le : 15/12/2014

Devant le Jury:

- | | | |
|------------------------------|-----------------------|--------------------|
| . M. DAOUD Y. | Professeur | Président |
| . M. DJILI K. | Professeur | Directeur de thèse |
| . M SEMAR A. | Maitre de conférences | Examinateur |
| . M ^{me} KOURGLI N. | Maitre de conférences | Examinatrice |

Année universitaire 2013/2014



Dédicace

Je dédie ce modeste et simple travail :

A ceux qui m'ont donné la vie et m'ont soutenu depuis mes débuts : mes très chers parents ; mon père ABDALLAH et ma mère FATMA.

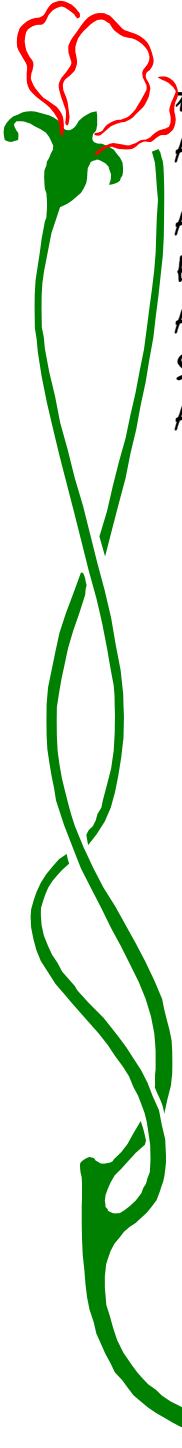
A mes adorables frères : Selmane, Abdelaziz, Assem et Djaber.

A mes adorables sœurs : Asma, Hadjer et Assia, et leurs maris: Abdel-Nacer, Hafsi et Yazid.

A tous les membres du Scoute Musulmane Algérienne (SMA) de la commune de Staouéli.

A tous mes amis et collègues de l'ENSA d'El-Harrach

SAOUD Mohamed



Remerciements

Un grand merci au Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la force pour concrétiser ce travail.

Mon sincère et chaleureux remerciement à mon Directeur de Thèse M^r DJILLI K., Professeur à l'ENSA d'El-Harrach, malgré ses multiples occupations, il m'a fait profiter de son expérience, et il a dirigé avec rigueur ce travail.

Mes remerciements vont également au Président de jury, M^r DAOUD Y., Professeur à l'ENSA d'El-Harrach, pour avoir accepté la présidence du jury et pour ses qualités scientifiques et intellectuelles.

Je remercie M^r SEMAR A., Maître de conférences à l'ENSA d'El Harrach, d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je remercie M^{me} KOURGLI N., Maître de Conférences à l'ENSA d'El Harrach, qui m'a fait l'honneur de siéger dans mon jury de thèse.

Je tiens à remercier par la même occasion M^r DUAMER-ALI K., chercheur à l'INRAA (Mehdi Boualem), pour ses aides et ses conseils fructueux, je lui exprime ma gratitude et mes profonds respects.

TABLE DES MATIERES

	Page
Introduction générale	1
Première partie : Etude bibliographique	
Chapitre I : La salinité des sols	3
1. Définition et origine de la salinité.....	3
2. Classification des sols affectés par la salinité.....	4
3. Impacts de la salinité sur le sol et la plante.....	6
Chapitre II : Méthodes de mesure de la salinité du sol	9
1. Méthodes de laboratoire.....	9
2. Méthodes de terrain.....	10
2.1.Résistivité électrique.....	11
2.2.La réflectométrie TDR.....	12
2.3.L'induction électromagnétique.....	12
2.3.1. Principe de mesure.....	12
2.3.2. Le conductivimètre EM38, Géonics LTD.....	14
2.3.3. Positions et réponses de l'EM38 en fonction de la profondeur.....	14
2.3.4. Influence des paramètres pédologiques sur la CEa.....	15
2.3.5. Etalonnage de la CEa mesurée par EM38.....	16
Chapitre III : Cartographie de la salinité	18
1. La géostatistique.....	18
2. Eléments de la géostatistique.....	19
2.1.Analyse de la structure spatiale.....	19
2.1.1. Variable régionalisée.....	19
2.1.2. Variogramme.....	19
2.1.2.1.Propriétés du variogramme.....	20
a. L'effet de pépite.....	20
b. Le palier.....	20
c. La portée.....	20
2.1.2.2.Ajustement du variogramme.....	21
2.2.Krigeage.....	21
3. Application de la géostatistique à la cartographie de la salinité.....	22
Deuxième partie : Matériel et méthodes	
Chapitre I : Le Milieu naturel	24
1. Site d'étude.....	24
2. Climat.....	25
3. Géologie du site d'étude.....	27
4. Hydrologie et hydrogéologie.....	27
5. Drainage.....	28
6. Pédologie.....	29
Chapitre II : Méthodologie de travail	30

1. Mesure de la conductivité électromagnétique.....	30
2. Prélèvement des échantillons de sol.....	31
3. Caractérisation des échantillons et mesure des différents paramètres étudiés...	32
3.1. Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CE_{ps}).....	32
3.2. pH de l'extrait de pâte saturée (pH_{ps}).....	33
3.3. Calcaire total.....	33
3.4. Gypse.....	33
3.5. Granulométrie.....	33
3.6. Humidité pondérale.....	33
4. Traitement des données.....	33
4.1. Traitements statistiques.....	33
4.1.1. Statistiques descriptives.....	34
4.1.1.1. Moyenne arithmétique.....	34
4.1.1.2. Médiane.....	34
4.1.1.3. Minimum et maximum.....	34
4.1.1.4. Quartiles.....	34
4.1.1.5. Variance et écart-type.....	35
4.1.1.6. Coefficient de variation.....	35
4.1.2. Profils de distribution.....	35
4.1.3. Tests de corrélation.....	35
4.1.4. Comparaison de moyennes.....	35
4.2. Etalonnage de la conductivité électromagnétique.....	35
4.3. Analyses géostatistiques.....	36
4.3.1. Etude variographique.....	36
4.3.2. Le Krigeage.....	37
4.3.3. Transformation des coordonnées.....	37

Troisième partie : Résultats et discussion

Chapitre I : Caractéristiques des sols étudiés.....	38
1. La texture.....	38
1.1. L'argile.....	38
1.2. Le limon.....	39
1.3. Le sable.....	39
2. L'humidité pondérale.....	44
3. pH_{ps}	45
4. Le calcaire total.....	46
5. Le gypse.....	47
6. La CE_{ps}	48
7. La CEM.....	49
8. Relations entre la CE_{ps} et les paramètres pédologiques étudiés.....	53
9. Conclusion.....	53
Chapitre II : Etalonnage de la conductivité électromagnétique.....	55
1. Identification et essai d'équations d'étalonnage.....	55
2. Choix de l'équation d'étalonnage.....	56

2.1. Test de comparaison de moyenne.....	56
2.2. Test de corrélation.....	57
3. Application de l'équation de Rhoades et Corwin (1981).....	57
Chapitre III : Cartographie de la salinité.....	60
1. Etude variographique.....	60
1.1.La CEC1.....	60
1.2.La CEC2.....	61
1.3.La CEC3.....	62
1.4.La CEC4.....	63
1.5.La CEC5.....	64
2. Estimation spatiale de la CEC.....	66
3. Qualité de l'estimation.....	72
3.1.Le test 1.....	72
3.2.Le test 2.....	73
Conclusion générale.....	74
Références bibliographiques	76
ANNEXES	

Liste des tableaux

Tableau I. Classes des sols affectés par les sels (USSL, 1954).....	5
Tableau II. Précipitations moyennes mensuelles (1985/86 à 2010/11).....	26
Tableau III. Températures moyennes mensuelles (1993/94 à 2010/11).....	26
Tableau IV. Statistiques descriptives de la granulométrie des 5 couches du sol.....	41
Tableau V. Statistiques descriptives de Hp%.....	44
Tableau VI. Statistiques descriptives de pH _{ps}	45
Tableau VII. Statistiques descriptives du calcaire (%).....	46
Tableau VIII. Statistiques descriptives du gypse (%).....	47
Tableau IX. Statistiques descriptives de CE _{ps} (dS.m ⁻¹).....	48
Tableau X. Résultats statistiques des lectures de l'EM 38.....	51
Tableau XI. Matrice de corrélations entre CE _{ps} et les différents paramètres étudiés.....	53
Tableau XII. Résultats des régressions linéaires.....	56
Tableau XIII. Matrice de corrélation entre les différentes valeurs de la conductivité électrique.....	57
Tableau XIV. Résultats statistiques de la CEC (dS.m ⁻¹) selon les niveaux de profondeur.....	57
Tableau XV. Superficies et pourcentages des différentes classes de salinité.....	66
Tableau XVI. Erreurs moyennes réelles et absolues.....	72
Tableau XVII. Nombre et pourcentage des points mesurés et estimés dans les cartes...	73

Liste des figures

Figure 1: Principe de fonctionnement du conductimètre électromagnétique.....	13
Figure 2: Position des dipôles par rapport à l'appareil.....	14
Figure 3: Réponses de l'EM38 en fonction de la profondeur.....	15
Figure 4: Propriétés du variogramme théorique.....	21
Figure 5: Carte de la situation géographique du site d'étude (épingle en jaune).....	24
Figure 6: Situation géographique de la station de Hmadna.....	25
Figure 7: Carte des étages bioclimatiques du bassin de Chélif.....	25
Figure 8: Diagramme ombrothermique de la station climatique de Hmadna (1993-2011).....	27
Figure 9: Schéma des réseaux de drainage.....	28
Figure 10: Carte des sols du site de Hmadna.....	29
Figure 11: Localisation des mesures électromagnétiques.....	31
Figure 12: Localisation des échantillons prélevés.....	32
Figure 13 : Schéma descriptif de l'angle d'anisotropie.....	37
Figure 14: Diagramme textural des sols de Hmadna.....	42
Figure 15: Profils d'argile.....	43
Figure 16: Profils de limon.....	43
Figure 17: Profils de sable.....	43
Figure 18 : Profils d'Hp (%).....	45
Figure 19 : Profils de pH _{ps} (%).....	46
Figure 20 : Profils de calcaire (%).....	47
Figure 21 : Profils du gypse.....	48
Figure 22 : Profils de CE _{ps}	49
Figure 23 : Prospection électromagnétique en position verticale.....	50
Figure 24 : Prospection électromagnétique en position horizontale.....	50
Figure 25 : Profils de l'EMh.....	52
Figure 26 : Profils de l'EMv.....	52
Figure 27 : Profils de CEC (dS.m ⁻¹).....	58
Figure 28: Comparaison entre profils moyens de CE _{ps} et CEC.....	59
Figure 29: Variogrammes directionnels de CEC1.....	61
Figure 30: Variogrammes directionnels de CEC2.....	62
Figure 31: Variogrammes directionnels de CEC3.....	63

Figure 32: Variogrammes directionnels de CEC4.....	64
Figure 33: Variogrammes directionnels de CEC5.....	65
Figure 34: Carte d'isovaleurs de CEC de la couche H1.....	67
Figure 35: Carte d'isovaleurs de CEC de la couche H2.....	68
Figure 36: Carte d'isovaleurs de CEC de la couche H3.....	69
Figure 37: Carte d'isovaleurs de CEC de la couche H4.....	70
Figure 38: Carte d'isovaleurs de CEC de la couche H5.....	71

Résumé

L'objectif de cette recherche est d'évaluer l'état actuel de la salinité des sols par utilisation de l'induction électromagnétique de l'EM38. L'expérimentation est réalisée sur une superficie de 267,4 hectares situés au Bas-Cheliff au sein de la station expérimentale de l'INRAA. Les mesures par l'EM38 ont été effectuées sur 317 points situés aux nœuds d'une grille d'un pas d'étude de 25 à 50 m, pour cinq (05) niveaux de profondeur avec un incrément de 30 cm en position verticale, et pour trois (03) niveaux de profondeur en position horizontale. L'étalonnage des lectures de l'induction électromagnétique à la conductivité électrique de l'extrait de pate saturée a été réalisé en utilisant trente sept (37) sondages à partir desquels des prélèvements d'échantillons ont été effectués sur cinq niveaux de profondeur. Les principaux résultats obtenus montrent que les valeurs de la CE_{ps} se situent entre 1 $dS.m^{-1}$ et 70 $dS.m^{-1}$ dans H1, 3,5 $dS.m^{-1}$ et 66 $dS.m^{-1}$ dans H2, 4 $dS.m^{-1}$ et 72 $dS.m^{-1}$ dans H3, 4 $dS.m^{-1}$ et 79 $dS.m^{-1}$ dans H4, et 5 $dS.m^{-1}$ et 71 $dS.m^{-1}$ dans H5. Le profil salin est par conséquent descendant. Les résultats ont montré également que l'équation de Rhoades et Corwin (1981) peut être utilisée pour prédire les valeurs de la CE_{ps} dans le contexte de cette étude ($r = 0,807$; $p < 0,001$). L'analyse des cartes de salinité des cinq couches révèle que la salinité en H1 comprend toutes les classes de salinité (non salin à extrêmement salin) avec une prédominance de la classe 'très salin' (56,7 %), les classes 'non salin' (0,22 %) et 'légèrement salin' (4 %) sont très peu représentées. En H2, la classe 'salin' occupe 0,4 % de la superficie, et la 'extrêmement salin' plus de 66 %. Les couches H3, H4, et H5 présentent une salinité qui se situe entre 'très salin' et 'extrêmement salin' avec une prédominance de la classe 'extrêmement salin' (86,4 % en H3, 93,5 % en H4, et 97 % en H5). L'évaluation de la qualité de l'estimation de cette salinité révèle que les erreurs moyennes réelles sont extrêmement faibles ($< 1 dS.m^{-1}$). Les erreurs moyennes absolues sont de l'ordre de 6 à 7 $dS.m^{-1}$ dues soit aux équations d'étalonnage, soit à la méthode d'interpolation utilisée ou soit au fait que les valeurs de la CEc ont été regroupées en classes de salinité. La démarche adoptée a permis de réaliser une bonne estimation de l'état actuel de la salinité des sols avec une source d'erreur très acceptable dans le contexte pédologique et environnemental de cette étude.

Mots clés : salinité ; Conductivité électrique ; Conductivité électromagnétique ; EM38 ; Cartographie ; Bas-Cheliff.

Abstract

The objective of this research is to assess the current status of soil salinity by use of electromagnetic induction EM38. The experiment is carried out on an area of 267.4 hectares located in Lower Cheliff in the experimental station of INRAA. Measurements by EM38 were performed on 317 points to nodes of a grid of 25 to 50 m, for five (05) depth levels in increments of 30 cm in the vertical position, and three (03) levels of depth in a horizontal position. The calibration of electromagnetic induction readings in the electrical conductivity of the saturated paste extract was carried out using 37 holes from which samples have been carried out on five levels deep. The main results show that CE_{ps} values are between 1 $dS.m^{-1}$ and 70 $dS.m^{-1}$ in H1, 3.5 $dS.m^{-1}$ and 66 $dS.m^{-1}$ in H2, 4 $dS.m^{-1}$ and 72 $dS.m^{-1}$ in H3, 4 $dS.m^{-1}$ and 79 $dS.m^{-1}$ in H4, and 5 $dS.m^{-1}$ and 71 $dS.m^{-1}$ in H5. The salt profile is therefore descendant. The results also showed that the equation of Rhoades and Corwin (1981) can be used to predict the values of CE_{ps} in the context of this study ($r = 0.807$; $p < 0.001$). Analysis of salinity maps of the five layers reveals that salinity in H1 includes all classes of salinity (non saline to extremely saline) with a predominance of class 'highly saline' (56.7%), classes of 'non saline' (0.22%) and 'slightly saline' (4%) are poorly represented. In H2, the class 'saline' occupies 0.4% of the area, and 'extremely saline' over 66%. H3, H4, and H5 layers have a salinity of between 'highly saline' and 'extremely saline' with predominance of class 'extremely saline' (86.4% in H3, 93.5% in H4, and 97% in H5). The estimation quality evaluation of the actual salinity reveals that average errors are extremely low ($< 1 dS.m^{-1}$). The average absolute errors are of the order 6 to 7 $dS.m^{-1}$ due to the calibration equation, or to the interpolation method to be used, or the fact that the values of the CEc have been divided into classes salinity. The approach has achieved a good estimate of the current state of soil salinity with a very acceptable source of error in the soil and environmental context of this study.

Keywords: salinity; Electrical conductivity; Electromagnetic conductivity; EM38; cartography; low-Cheliff.

ملخص

يهدف هذا البحث إلى تقييم الوضع الحالي لملوحة التربة باستخدام الحث الكهرومغناطيسي EM38. وجرت التجربة على مساحة تقدر بـ 267.4 هكتار وتقع في منطقة الشلف السفلى في المحطة التجريبية لمعهد البحث الزراعي (INRAA). أجريت القياسات باستخدام EM38 على 317 نقطة موزعة على عقد شبكة بخطى تقدر من 25 إلى 50 م، على خمس (05) مستويات من العمق كل 30 سم في الوضع الرأسي، وثلاثة (03) مستويات من العمق في الوضع أفقي. تم معايرة قراءات الحث الكهرومغناطيسي بالنسبة إلى الناقلية الكهربائية لمستخلص العجينة المشبعة باستخدام سبع وثلاثين (37) نقطة، أخذت من كل منها عينات للتربة على خمس مستويات من العمق. أظهرت النتائج الرئيسية أن قيم CE_{ps} تقدر ما بين 1 إلى 70 dS.m^{-1} في H1، وبين 3.5 و 66 dS.m^{-1} في H2، وبين 4 و 72 dS.m^{-1} في H3، وبين 4 و 79 dS.m^{-1} في H4، وبين 5 و 71 dS.m^{-1} في H5. وبالتالي فإن المقطع الملحي متناقص. كما أظهرت النتائج أيضا أن معادلة Rhoades and Corwin (1981) يمكن استخدامها للتنبؤ بـ CE_{ps} في ضوء هذه الدراسة ($r = 0,807$; $p < 0,001$). كشف تحليل خرائط ملوحة مستويات العمق الخمس عن أن الملوحة في H1 تشمل جميع طبقات الملوحة (من غير المالحة إلى المالحة للغاية) مع غلبة فئة "المالحة جدا" (56,7%)، أما الطبقات غير المالحة (0,22%)، و خفيفة الملوحة (4%) فهي ممثلة تمثيلا ضعيفا. في المستوى H2، تحتل الطبقة المالحة 0,4% من المساحة، و "المالحة للغاية" أكثر من 66%. أما المستويات H3، H4، H5 فإن ملوحتها متواجدة بين "مالح" و "مالحة للغاية" مع غالبية الطبقة "المالحة للغاية" (86,4% في H3، 93,5% في H4، و 97% في H5). إن تقييم نوعية تقدير الملوحة الفعلية يكشف أن الأخطاء المتوسطة الحقيقية منخفضة للغاية ($< 1 \text{ dS.m}^{-1}$). أما الأخطاء المتوسطة بالقيمة المطلقة فهي من 6 إلى 7 dS.m^{-1} . ويرجع ذلك إما إلى معادلات المعايرة، أو إلى الطريقة الجيوإحصائية المستخدمة أو من نتيجة أن قيم CEC قد تم تجميعها حسب طبقات الملوحة. وفي الأخير فإن الطريقة المتبعة سمحت بإنجاز تقدير جيد للوضع الحالي لملوحة التربة مع هامش خطأ مقبول جدا في السياق البيداغوجي والبيئي لهذه الدراسة.

الكلمات الرئيسية: الملوحة، الناقلية الكهربائية، الموصلية الكهرومغناطيسية، EM38، رسم الخرائط، الشلف السفلى.

ABREVIATIONS

A : argile
CE : conductivité électrique
CEa : conductivité électrique apparente
CEC : capacité d'échange cationique
CEc : conductivité électrique calculée
CEM : conductivité électromagnétique
CE_{ps} : conductivité électrique de l'extrait de pate saturée
CV : coefficient de variation
EMh : conductivité électromagnétique en mode horizontal
EMv : conductivité électromagnétique en mode vertical
ESP : Exchangeable Sodium Percentage
Hp : humidité pondérale
L : limon
pH_{ps} : potentiel hydrogène de l'extrait de pate saturée
PO : pression osmotique
S : sable
SAR : Sodium Absorption Ratio
sgn : signification statistique
H1 : horizon 1
H2 : horizon 2
H3 : horizon 3
H4 : horizon 4
H5 : horizon 5
CPCS : Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
FAO: Food and Agriculture Organisation
INRAA: Institut National de la Recherche Agronomique Algérien
IPTRID: International Program of Technology and Research in Irrigation and Drainage
IRD : Institut de Recherche pour le Développement
SIG : Système d'Information Géographique
TDR : Time Domain Reflectometry
USDA: United States Department of Agriculture
USSL: United States Salinity Laboratory
WRB: Word Reference Base

INTRODUCTION GENERALE

Au fur et à mesure que la population mondiale augmente, l'intensification agricole impose une pression accrue sur les terres irriguées et productives. Celle-ci est accompagnée par un développement dans les systèmes d'irrigation. Dans la majorité des situations, le développement de l'irrigation s'accompagne par l'apparition de processus de salinisation, de sodisation ou d'alcalinisation des sols à des degrés divers (Boualla et *al.*, 2012).

La salinisation des sols constitue un processus important, notamment dans les zones arides et semi-arides (Saidi et *al.*, 2004), provoquant une dégradation des propriétés physiques, chimiques, et biologiques des sols. Les conséquences de cette dégradation est la diminution de la fertilité des sols qui entraîne une réduction des rendements des cultures, et parfois la disparition du couvert végétal naturel. La salinité devient de plus en plus importante d'une année à autre. Dans ce sens, Abbas et *al.* (2011) ont révélé qu'à l'échelle mondiale, la salinisation des sols se propage à une vitesse pouvant aller jusqu'à 2 millions d'hectares par an. Dans le monde, les sols salés occupent plus de 1 milliard d'hectares, soit environ quatre (04) fois plus la superficie de l'Algérie. Parmi cette grande superficie, environ 77 millions d'hectares de terres sont salinisées à cause de l'activité humaine, dont 58% dans les régions irriguées (Metternicht et Zinck, 2003).

L'Algérie, dont plus de 20 % des sols irrigués sont concernés par la salinisation (Douaoui et Hartani, 2007), est parmi les pays les plus menacés par ce problème. Ceci nécessite une surveillance attentive de l'état et de la variation spatiale et temporelle de la salinité des sols pour freiner les tendances de ce problème, et assurer une gestion durable des terres.

Pour évaluer, comprendre et suivre le développement de la salinisation dans l'espace et dans le temps, des méthodes rapides et fiables ont été mises au point et mises à la disposition des utilisateurs. Il s'agit, en particulier, du cas des méthodes pouvant effectuer des mesures rapides in-situ, comme c'est le cas de l'induction électromagnétique, là où la gestion des sols est fortement recommandée.

L'induction électromagnétique, qui est une méthode géophysique conçue pour mesurer la conductivité électromagnétique du sol (CEM), a été largement utilisée pour fournir des informations sur l'origine, l'évaluation et la distribution spatiale de la salinité des sols (Lesch et al., 1992 ; Rhoades, 1993 ; Sudduth et al., 2001 ; Herrero et al., 2003 ; Corwin et Lesch,

2005 ; Yao et al., 2007 ; Yao et Yang, 2010). Cette méthode a pour avantages de réaliser des mesures rapides, précises, non destructives, et à différentes profondeurs du sol.

En dehors de l'efficacité de cette méthode sur le plan expérimental, en fournissant de l'information sur la salinité sur des points échantillonnés et mesurés, il est toujours demandé de trouver des techniques efficaces pour prédire la salinité dans des endroits où l'échantillonnage n'a pas pu être effectué. Plusieurs auteurs ont cité la géostatistique pour effectuer ce travail (Gallichand et al., 1992 ; Cetin et Kirda, 2003 ; Triantafilis et al., 2004 ; Douaik et al., 2005 ; Eldeiry et Garcia, 2010 ; Juan et al., 2011 ; Maina et al., 2012). Elle a été largement appliquée en science des sols lors des trois dernières décennies (Yao et Yang, 2010).

La combinaison de l'induction électromagnétique avec les méthodes géostatistiques pour caractériser et prédire la variabilité spatiale de la salinité des sols a été largement utilisée en agriculture de précision (Job et al., 1987 ; Boivin et al., 1989 ; Lesch et al., 1992 ; Barbiéro et al., 2001 ; Triantafilis et al., 2001 ; Triantafilis et al., 2004 ; Yang and Yao, 2007), et les résultats obtenus ont été très satisfaisants.

C'est dans cet objectif que s'inscrit le présent travail qui a pour but d'évaluer la salinité des sols et de prédire sa répartition dans le profil et dans l'espace au sein de la station de recherche de l'INRAA-Hmadna située dans les plaines alluviales du Bas-Chélif dans la région de Relizane. Pour ce faire, les mesures de la conductivité électrique de l'extrait de pate saturée (CE_{ps}) de 185 échantillons de sols provenant de 37 profils subdivisés en couches de 30 cm d'épaisseur jusqu'à une profondeur de 150 cm ont été confrontées et corrélées à celles obtenues par l'induction électromagnétique de l'EM38 (CEM). Cette étape a permis de prédire la conductivité électrique calculée de l'extrait de pate saturée (CEc). La spatialisation de la salinité a été réalisée, après une analyse variographique des données, par krigeage de la CEc calculée à partir de 317 mesures effectuées par l'EM38 sur les 5 couches du sol.

Le présent document est structuré en trois parties. La première partie est une présentation bibliographique relative à la salinité, aux techniques de son évaluation, et aux méthodes de sa cartographie. La deuxième partie explicite la méthodologie adoptée pour la réalisation de ce travail. Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans la troisième partie.

Première partie : Etude bibliographique

La salinisation est l'un des processus majeurs qui contribuent à la dégradation des terres agricoles (IRD, 2008 ; Boualla et *al.*, 2012) et dont les effets se traduisent souvent par une désertification. La gestion et la réhabilitation des sols affectés par ce phénomène nécessitent des études appropriées qui permettent d'évaluer son état actuel et de comprendre les facteurs qui l'influencent et qui régissent ses processus d'évolution spatiale et temporelle. C'est pourquoi cette revue bibliographique sera axée sur trois chapitres relatifs (a) à la salinité des sols, (b) aux techniques de son évaluation au laboratoire et sur terrain et (c) aux méthodes de sa cartographie.

Chapitre I: La Salinité des sols

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord la salinité et ses origines ensuite ses effets sur le sol et la plante et, en fin, nous montrons la place que lui réservent les différentes classifications des sols.

1. Définition et origine de la salinité

La salinité se réfère à la quantité des sels solubles qui se trouve dans le sol (Chesworth, 2008). Les sels solubles englobent une large gamme d'anions et de cations présents dans le sol soit sous forme cristallisée, soit sous forme dissoute dans la solution du sol, soit sous forme adsorbée sur la surface des colloïdes (Douaik, 2005). Ils sont constitués principalement par le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium pour les cations et par les chlorures, les sulfates, les carbonates et les bicarbonates et nitrates pour les anions (Chesworth, 2008).

Plusieurs processus géochimiques peuvent avoir lieu comme conséquence à l'action des sels solubles dans le sol. Le processus suivant lequel le sol s'enrichit en sels solubles est la salinisation (IPTRID, 2006). L'autre processus qui est l'alcalinisation se produit lorsque le pH du sol augmente à des valeurs supérieures à 8,5 (USSSL, 1954). Ce processus est souvent accompagné du processus de sodisation lorsque le sodium échangeable est l'élément majoritaire adsorbé sur le complexe colloïdal (IRD, 2008).

La salinité des sols a des sources très variées. Elle provient naturellement par le biais de l'altération des roches mères contenant des minéraux nécessaires à la formation des sels solubles (minéraux sodiques, potassiques, magnésiens, de produits de l'hydrothermalisme

riches en soufre et en chlore, ou de la dissolution des évaporites (IRD, 2008)). L'océan peut être une source principale de la salinité, notamment dans les zones côtières (Kloppmann et *al.*, 2011) où le matériau de base est constitué de dépôts marins anciens. Les eaux salées des nappes phréatiques ou artésiennes peuvent aboutir à la salinité par remontée de la nappe (Ben Hassine, 2005).

L'IRD (2008) a déclaré que la surface mondiale naturellement touchée par la salinité est de l'ordre de 930 millions d'hectares de terres, dont 351 millions présentent un caractère salin, et le reste présentant un caractère sodique.

La salinité peut être provoquée en conditions anthropiques par l'irrigation par des eaux salées. La salinisation anthropique est la conséquence de la mauvaise combinaison d'une forte évaporation et d'un apport inadapté d'eau d'irrigation chargée en sels dissous (Boualla et *al.*, 2012). Marlet (2004) a révélé que plus de 50% des périmètres irrigués du monde sont affectés à des degrés divers par la salinisation. De plus, l'IRD (2008) a confirmé que 21% des terres irriguées souffrent d'engorgement, de salinisation et/ou d'alcalinisation qui réduisent leurs rendements agricoles. De même, 1 à 2% des surfaces irriguées sont perdues chaque année du fait de ces deux processus. A titre d'exemple et dans un contexte plus local, Bradaï et *al.* (2011) ont montré que les eaux souterraines de la nappe de la plaine du Bas-Chélif ont une salinité élevée peu propice à l'irrigation indiquant des risques élevés de salinisation et de sodisation des sols. Ils ont montré également que l'évolution chimique de ces eaux sous l'effet d'une évaporation est susceptible de faire précipiter la calcite et la sépiolite et que l'addition continue d'eau d'irrigation causera une accumulation de carbonates de sodium entraînant ainsi une sodisation probable des sols.

2. Classification des sols affectés par la salinité

La salinité du sol est décrite et caractérisée en termes de concentration et de type de sels solubles. Elle est reliée à la conductivité électrique du sol mesurée en decisiemens par mètre (dS.m^{-1}). Selon USSL (1954), les sols affectés par les sels sont classés en fonction de la conductivité électrique de leur extrait de pâte saturée (CE dS.m^{-1}), du pourcentage de sodium échangeable (ESP en %) et de leur pH (tableau I).

Tableau I. Classes des sols affectés par les sels (USSS, 1954)

Classes	CE (dS.m ⁻¹)	ESP (%)	pH
Non salin	<4	<15	<8.5
Salin	>4	<15	<8.5
Sodique	<4	>15	>8.5
Salin-sodique	>4	>15	>8.5

CE = conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée

pH = pH de l'extrait de pâte saturée

ESP = pourcentage de sodium échangeable

Cependant, les différents systèmes de classification des sols (CPCS, 1967 ; Soil Taxonomie, 2010 ; WRB, 2006 ; Référentiel Pédologique, 2008), n'accordent pas la même importance à la salinité des sols. Ainsi, selon le concept de base du système de la classification considérée et l'importance accordée à la salinité dans le diagnostic des unités taxonomiques, les sols affectés par les sels se situent à des niveaux hiérarchiques différents.

La CPCS (1967) accorde une place de choix à la salinité et lui dédie une classe des sols à part entière qui se situe au sommet du niveau hiérarchique de cette classification. La CPCS (1967) a proposé de les dénommer sols « sodiques ». On peut y distinguer (a) les sols sodiques à structure non dégradée, et (b) les sols sodiques à structure dégradée. Les sols sodiques inclus dans ce système de classification présentent un schéma d'évolution dominé soit par une richesse en sels solubles dont la CE de l'extrait de pâte saturée est supérieure à 7 mmhos/cm à 25°C dans l'ensemble du profil, soit par la présence de sodium échangeable (et/ou de magnésium) occupant plus de 10% de la CEC, avec l'apparition d'une structure massive, diffuse, et une compacité élevée.

La classification de la FAO (WRB, 2006) cite deux groupes aux sols affectés par la salinité, le groupe des Solonchaks et celui des Solonetz. Les Solonchaks sont des sols ayant un horizon *salic* débutant dans les 50 premiers cm de la surface du sol et n'ayant pas d'horizon *thionic* dans la même profondeur. Les Solonetz sont d'autres sols ayant un horizon *natric* débutant dans les 100 premiers cm de la surface du sol. L'horizon *natric* est un horizon de subsurface dense dont la teneur en argile est plus élevée que celle de l'horizon sus-jacent, et l'horizon *salic* est un horizon de surface ou de subsurface contenant un enrichissement secondaire en sels solubles.

D'après le référentiel pédologique (2008), les sols salés et les sols sodiques sont classés dans le Solum « Salisols et Sodisols ». Il est formé sous l'influence dominante de sels solubles et/ou du sodium. Il en existe deux horizons de références spécifiques, un horizon salique et un horizon sodique. Le premier horizon est caractérisé par la présence d'une certaine quantité de

sels solubles dans la solution du sol ou précipités dans l'horizon lui-même ; le second horizon est caractérisé par la présence, sur le complexe d'échange ionique de l'horizon, d'une quantité de sodium relativement importante par rapport aux autres cations adsorbés.

Pour ce qui est de la Soil Taxonomie (2010), il ressort que les sols affectés par les sels n'ont pas une place à part au niveau des ordres. Cette classification qui est fondée sur les critères diagnostiques considère deux horizons diagnostiques pour caractériser la sodicité et la salinité des sols, *natric horizon* et *salic horizon*. Le premier horizon est caractérisé par un pourcentage d'argile plus élevé que celui des horizons sus-jacents, une structure colonnaire, ESP égal ou supérieur à 15%, et un SAR qui est égal ou supérieur à 13. Le second est un horizon d'accumulation de sels solubles, d'une épaisseur de 15 cm ou plus, caractérisé par une CE de l'extrait de pâte saturée égale ou supérieure à 30 dS.m⁻¹, et le produit de la CE (dS.m⁻¹) par l'épaisseur (cm) est égal ou supérieur à 900. De ce fait, on retrouve les sols salés dans les différents niveaux de classification, comme par exemple au niveau des suborders (Salids), des grands groupes (Natrixerals, Natraquerts, Natrargids, Natrixerolls), ou des sous-groupes (Natric Haploxerals ; Natric Petrocalcids ; Sodic Xerarents ; Sodic Calcixerepts).

3. Impacts de la salinité sur le sol et la plante

La salinité agit sur les propriétés physiques des sols, elle est souvent liée très étroitement à la sodicité des terres agricoles. Plusieurs facteurs interviennent dans la contribution de ces deux processus dans la dégradation des sols. Selon Richards (1954), les sols sodiques ont un pH de plus de 8,5 avec une dominance de l'ion sodium. Cette saturation en sodium provoque généralement la dispersion des particules d'argile avec comme conséquence une dégradation de la structure du sol. De ce fait, le sol devient compact et imperméable, empêchant donc l'aération et la pénétration de l'eau nécessaires pour une croissance régulière des plantes. Douaoui et *al.* (2001) ont montré que la dégradation physique des sols du Bas-Chéiff est principalement liée à la sodisation. Ils ont conclu que l'ESP est le principal facteur de la dégradation de la structure de surface du sol, suivi par les limons et la salinité. De même, dans une étude effectuée sur des horizons de surface des sols affectés par les sels solubles et le sodium échangeable du Chéiff, Saidi et *al.* (2004) ont montré que les échantillons étudiés manifestent un comportement structural à risque lorsque le rapport d'adsorption du sodium (SAR) de la solution du sol dépasse un certain seuil. Ainsi, la désagrégation augmente à mesure que la concentration du sodium et la concentration électrolytique augmentent. Egalement, le taux d'infiltration diminue au fur et à mesure que le SAR et la concentration

saline augmentent. Partant de cette expérience, ils ont conclu que la salinité des sols de la plaine du Chélif s'accompagne toujours d'une sodisation du complexe absorbant, et que les valeurs seuils acceptables du SAR et de l'ESP nécessaires pour conserver une structure stable se situent respectivement entre 2 et 5 %.

La salinité provoque aussi un impact négatif sur les rendements des cultures et la production agricole dans les zones sèches et irriguées en raison de terres ayant des propriétés physicochimiques médiocres, de la mauvaise gestion de l'eau et de l'expansion de la frontière agricole dans les zones marginales. Dans des sols sévèrement touchés par la salinité, il se forme souvent une mince croûte de couleur blanchâtre (efflorescence saline) en surface. Comme conséquence de la salinité sur la plante, le mécanisme essentiel qui limite son développement est la pression osmotique ($PO = 0.036 * CE$) (Chesworth, 2008). Selon cette formule empirique, la pression osmotique augmente avec la concentration en sels et rend l'absorption de l'eau par la plante plus difficile. La présence de ces sels et l'élévation de la pression osmotique de la solution du sol, ou une toxicité ionique spécifique, entraînent la formation de paysages particuliers, soit occupés par une végétation naturelle spécialisée dite halophyte, soit présentant une absence totale de végétation (exemples : chotts et sebkhas) (Loyer, 1991). Daddi Bouhoun et Brinis (2004) ont montré que l'accumulation des sels mesurée dans le sol est suffisante pour provoquer une chute des rendements des palmeraies de la cuvette de Ouargla. Dans une autre étude, Daddi Bouhoun et *al.* (2011) montrent qu'avec le niveau des nappes, l'augmentation de la salinité des sols dans les ghouts de Oued Souf favorise les accumulations salines et induit une halomorphie excessive et un dépérissement des palmeraies de la région par l'asphyxie racinaire et le stress salin. De même, Faouzi et Larabi (2001) ont montré que les remontées du niveau de la nappe au-delà d'un certain niveau, soit 2 m de profondeur par rapport à la surface du sol, engendrent de nombreux problèmes d'ordre environnemental (l'accumulation de sels dans les sols), agricole (l'asphyxie de plantes), et sanitaire (l'accumulation de sels et de nitrates dans les eaux souterraines). Les résultats obtenus par Djili et *al.* (2003) ont montré que l'intensité de la salinité en milieu agricole saharien est en rapport avec la qualité des eaux d'irrigation utilisées notamment dans les horizons de surface. En effet, la salinité qui était initialement inférieure à 2 dS.m^{-1} dans les horizons de surface, est passée à plus de 12 dS.m^{-1} après 5 campagnes d'irrigation. Ce qui s'est traduit par une chute des rendements céréaliers.

Dans un autre contexte, Boumia (2011) a étudié l'effet de la salinité sur la germination des grains de gombo (*Abelmoschus esculentus L.*) en utilisant le NaCl et NaCl+CaCl₂ à

différentes concentrations en méq/l. Elle a trouvé que les graines expriment une sensibilité à la salinité en termes de précocité, vitesse, temps moyen, et taux final de la germination.

Chapitre II: Méthodes de mesure de la salinité du sol

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour évaluer et quantifier la salinité du sol. On peut les regrouper en deux, (i) les méthodes de laboratoire et (ii) les méthodes de terrain.

1. Méthodes de laboratoire

Le principe de base des méthodes de laboratoire repose sur la mesure de la conductivité électrique. Lorsqu'on applique un champ électrique à un milieu conducteur, un courant électrique parallèle et proportionnel à ce champs y apparait selon la loi d'Ohm ($\vec{i} = \sigma \cdot \vec{E}$) ; \vec{i} étant la densité du courant, \vec{E} le champ électrique, et σ la conductivité électrique (dS.m^{-1}). Cette dernière est définie comme étant la capacité d'un matériau de 1 m de long à laisser passer un courant électrique (Schneider, 2010). Elle est représentée par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{1}{2\pi aR}$$

où a est la distance inter-électrodes, et R la résistance (Ω)

Les méthodes de laboratoire utilisées pour mesurer la CE des sols comprennent la mesure de la CE de l'extrait de pâte saturée (Richards, 1954), et la mesure de la CE d'un extrait dilué basé sur un rapport sol/eau de type 1/1, 1/2, 1/5, etc.

En raison de la progression faite dans la compréhension des sols salins, il a été constaté que la plante répond à la concentration des sels dans la solution du sol plutôt qu'à la teneur totale en sel dans le sol. Par conséquent, la conductivité de l'extrait de pâte saturée est recommandée comme méthode de référence pour estimer la salinité des sols par rapport à la croissance de la plante. L'utilisation de l'extrait de pâte saturée comme méthode de référence fournit une mesure plus représentative des sels solubles dans la solution du sol parce qu'elle se rapproche de la teneur en eau du sol sur le terrain quand il est à la capacité au champ. La CE a une relation directe avec l'humidité du sol sur le terrain (Sonmez et *al.*, 2008). Par ailleurs, le point de saturation est choisi parce qu'il simule l'état naturel de la solution du sol dans laquelle la solubilité et la phytodisponibilité des ions sont élevées, et peuvent donc être liées à la réponse des plantes mieux que d'autres rapports sol/eau (Yazdi et Khorsandi, 2002). Cependant, cette méthode, bien que plus précise, est plus longue, coûteuse et plus susceptible d'erreurs dues à la variabilité entre les manipulateurs dans la préparation de la pâte saturée (Douaïk, 2005).

Dans le cas où un grand nombre d'échantillons de sol doit être traité, la CE peut être mesurée par des rapports sol/eau plus dilués que la pâte saturée du fait qu'ils sont plus rapides à

confectionner, moins coûteux et plus faciles à mettre en œuvre surtout quand il s'agit d'étudier de grandes étendues de terre (Douaik, 2005). Les extraits dilués sont très utilisés dans le suivi temporel des variations verticales et spatiales de la salinité (Pansu et Gautheyrou, 2003). Les extraits dilués doivent être calibrés avec les extraits de pâte saturée (CE_{ps}). Dans ce sens, Hogg et Henry (1984) d'une part et Zhang *et al.* (2005) d'autre part ont mis en évidence une forte relation entre la CE_{ps} et la CE des différentes dilutions qu'ils ont étudié. La charge saline, le type de sel, et la texture du sol déterminent dans certaines mesures le rapport entre la CE_{ps} et la CE de l'extrait dilué. Pittman *et al.* (2001) ont étudié la corrélation entre CE_{ps} et $CE_{1/1}$ en utilisant des équations de régression multiple, ils ont constaté que ces deux paramètres sont fortement corrélés mais que la corrélation dépend de la charge ionique et de la texture du sol. Yazdi et Khorsandi (2002) ont établi des rapports entre CE_{ps} et $CE_{1/2}$ pour évaluer l'effet du gypse et de la texture du sol sur ces relations. Sonmez *et al.* (2008) ont trouvé une forte corrélation entre CE_{ps} et les différents rapports de dilution (1/1, 1/2,5, 1/5) en étudiant trois textures différentes (sableuse, limoneuse et argileuse). Visconti *et al.* (2010) ont trouvé que le rapport 1/5 est le plus fiable pour estimer CE_{ps} quand $CE_{1/5}$ est supérieur à 2,4 dS.m⁻¹ et le pourcentage du gypse dans le sol est inférieur à 0,2%. Tamazouzt (2013) a trouvé des corrélations très hautement significatives entre CE_{ps} et les rapports de dilution (1/1, 1/2,5, 1/5 et 1/10), avec un coefficient de corrélation situé entre 0,89 et 0,92.

2. Méthodes de terrain

Comme alternative à la détermination de la CE au laboratoire, la salinité de sol peut être évaluée sur le terrain en mesurant la CE apparente (CE_a). Cette dernière peut être représentée par la conductivité à travers trois voies agissant en parallèle (Rhoades, 1993 ; Corwin et Lesch, 2005):

- Conductivité par des couches alternatives des particules solides et de la solution du sol qui enveloppe et sépare ces particules (voie solide-liquide)
- Conductivité par des voies continues de la solution du sol (voie liquide)
- Conductivité le long des surfaces des particules en contact direct et continu entre elles (voie solide)

La conductivité électrique apparente est donnée par la formule suivante (Corwin et Lesch, 2005):

$$ECa \text{ (dS. m}^{-1}\text{)} = \frac{(\theta_{ss} + \theta_{ws})^2 EC_{ws} EC_{ss}}{\theta_{ss} EC_{ws} + \theta_{ws} EC_s} + (\theta_{sc} EC_{sc}) + (\theta_{wc} EC_{wc})$$

ECa: conductivité électrique apparente du sol

θ_{ss} : teneur en eau volumique dans la phase solide

θ_{sc} : teneur en eau volumique dans la surface solide

θ_{ws} : teneur en eau volumique dans les micropores (voies solide-liquide)

θ_{wc} : teneur en eau volumique dans les macropores (voies liquides)

EC_{ws}: conductivité électrique de l'eau dans les micropores

EC_{wc}: conductivité électrique de l'eau dans les macropores

EC_{ss}: conductivité électrique de la phase solide

EC_s: conductivité électrique de la surface des particules solides

La conductivité électrique apparente peut être mesurée à l'aide de trois techniques différentes: sonde d'électrodes (résistivité électrique), induction électromagnétique, et sonde TDR.

2.1. Résistivité électrique

La résistivité électrique d'un horizon de sol (ρ) mesurée en ($\Omega.m$) est égale à l'inverse de sa conductivité électrique ($\rho = 1/\sigma$), elle est donc définie par la capacité d'un matériau de 1 m de long à limiter le passage du courant électrique. La résistivité électrique d'un sol est influencée par plusieurs facteurs répartis entre les variables intrinsèques pérennes telles que la texture, la structure, la pierrosité et la carbonatation du sol et les variables d'états diachroniques comme la teneur en eau, la température et la concentration saline de la solution du sol (Goulet et Barbeau, 2004).

La méthode de résistivité électrique consiste à utiliser un dispositif désigné sous le nom de "Wenner" (Corwin et Lesch, 2003 ; Corwin et Lesch, 2005). Il contient quatre électrodes équidistantes espacées en ligne droite et insérées à quelques centimètres dans le sol, avec deux électrodes externes de "courant" ou de "transmission", et deux électrodes internes de "potentiel" ou de "réception" (Corwin et Lesch, 2005 ; Douaik, 2005). Les électrodes de transmission envoient un courant électrique constant tandis que les électrodes de réception sont utilisées pour mesurer le potentiel d'écoulement du courant. La profondeur de pénétration du courant est fonction de la distance inter-électrodes.

La résistivité électrique est une méthode bien adaptée aux applications de terrain parce que le volume de sol considéré pour la mesure est grand et réduit l'influence de la variabilité à l'échelle locale. C'est une méthode flexible sur le terrain où la profondeur et le volume de mesure peuvent facilement être changés en modifiant la distance entre les électrodes (Corwin et Lesch, 2003). Cependant, cette méthode est envahissante et elle exige un bon contact entre

le sol et les quatre électrodes. De ce fait, elle fournit des mesures moins fiables dans certaines conditions (sols secs ou pierreux) (Corwin et Lesch, 2005).

2.2.La réflectométrie TDR (Time Domain Reflectometry)

La mesure de la CEA par le réflectomètre TDR est basée sur la vitesse de propagation et la réflexion d'une impulsion électromagnétique envoyée par le dispositif le long des lignes de transmission. La constante diélectrique et l'impédance du milieu (le sol) peuvent être mesurées une fois que les lignes de transmission sont placées à l'intérieur du sol. Le premier paramètre (la constante diélectrique) est fonction de la teneur en eau du sol tandis que le second paramètre (l'impédance du milieu) résulte d'une atténuation du signal qui peut être liée à la CEA (Douaik, 2005). Comme avantages, le TDR est de nature non envahissante, et peut être employé pour mesurer simultanément la teneur en eau et la conductivité électrique du sol (Douaik, 2005 ; Corwin et Lesch, 2003). L'inconvénient de cette technique est du au fait que l'analyse devient progressivement inexacte à cause de l'atténuation du signal qui est proportionnel à la longueur de la sonde, au taux et type d'argile et à la teneur en eau (Scott et Dani, 2004).

2.3.L'Induction électromagnétique

La salinité peut être mesurée par la méthode d'induction électromagnétique. Cette méthode est conçue pour être particulièrement utile pour la mesure de la salinité des sols dans un contexte géospatial (Corwin et Lesch, 2003) et temporel du fait que :

- les mesures peuvent être prises très rapidement quand on se déplace d'un endroit à un autre,
- la grande densité des mesures réduit la variabilité spatiale locale,
- les mesures peuvent être effectuées dans les sols relativement secs ou pierreux, parce qu'aucun contact n'est nécessaire entre le sol et le dispositif.

2.3.1. Principe de mesure

La mesure se fait en plaçant le dispositif sur le terrain et en enregistrant les lectures des compteurs. Le dispositif comprend deux bobines électriques situées à ses deux extrémités, l'une transmettrice (Tx) et l'autre réceptrice (Rx). La bobine transmettrice induit un champ magnétique primaire (H_p) qui crée des boucles de courant électriques circulaires dans le sol. L'importance de ces boucles est proportionnelle à la conductivité électrique de la couche du

sol. Chaque boucle de courant produit un champ électromagnétique secondaire (H_s) proportionnel à la valeur du courant de la boucle. Le champ secondaire est superposé au champ primaire, et les deux sont arrêtés, amplifiés, puis mesurés par la bobine réceptrice de l'instrument. (Figure 1). L'amplitude et la phase du champ secondaire diffèrent de celles du champ primaire en raison de certaines propriétés du sol (taux d'argile, teneur en eau, et salinité), de la distance inter-bobines et de leur orientation, de la fréquence du courant, et de la distance au dessus de la surface de sol (Corwin et Lesch, 2005).

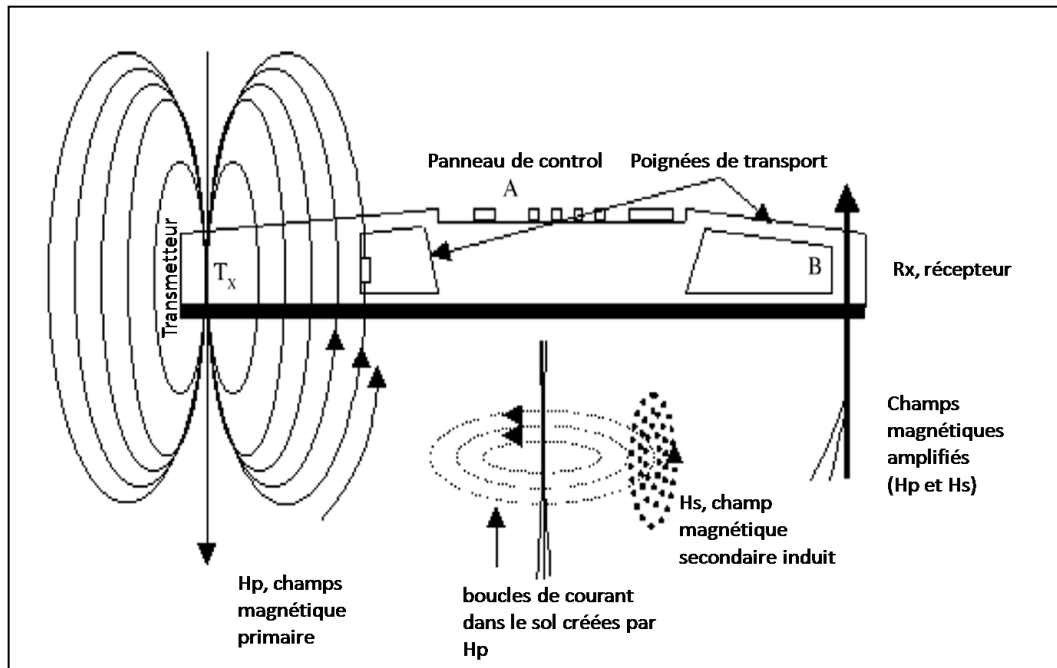


Figure1: Principe de fonctionnement du conductivimètre électromagnétique (Lesch, et *al.*, 2005)

L'induction électromagnétique s'utilise en place sans perturbation du sol ni prélèvement d'échantillon. L'appareil est simplement posé sur le sol ou maintenu horizontalement à une certaine hauteur. Il n'y a donc pas de problème de contact sol-sonde, et la mesure est immédiate (Job et *al.*, 1987).

Bien que la profondeur de la pénétration de la mesure par EM puisse être changée en soulevant l'instrument au-dessus de la surface de sol, il reste néanmoins difficile de déterminer la profondeur et le volume du sol concernés par la mesure (Corwin et Lesch, 2003).

2.3.2. Le conductivimètre EM38, Géonics LTD

L'EM38 (Geonics Ltd, Canada) est un dispositif commercial conçu pour mesurer la salinité des sols. La profondeur d'exploration – dans un profil homogène – tend jusqu'à 1,5 ou 2 m en

mode vertical et à 0,75 ou 1 m en mode horizontal (Lesch et *al.*, 2005). La distance interspirales est de 1 m et il fonctionne à une fréquence de 13,2 kHz. Il est alimenté par une batterie de 9 V et lit la CE directement (Rhoades, 1993 ; Rhoades et *al.*, 1999).

2.3.3. Positions et réponses de l'EM38 en fonction de la profondeur

L'EM38 est conçu pour être placé dans une position verticale ou horizontale. La mesure de la salinité du sol avec cet appareil se base sur la mesure des dipôles des deux positions en même temps à fin d'évaluer qualitativement la distribution de la salinité dans le profil. Si l'axe des dipôles est parallèle à la surface du sol, la position de l'appareil est **horizontale**; si l'axe est perpendiculaire à la surface du sol, la position est **verticale** (figure 2).

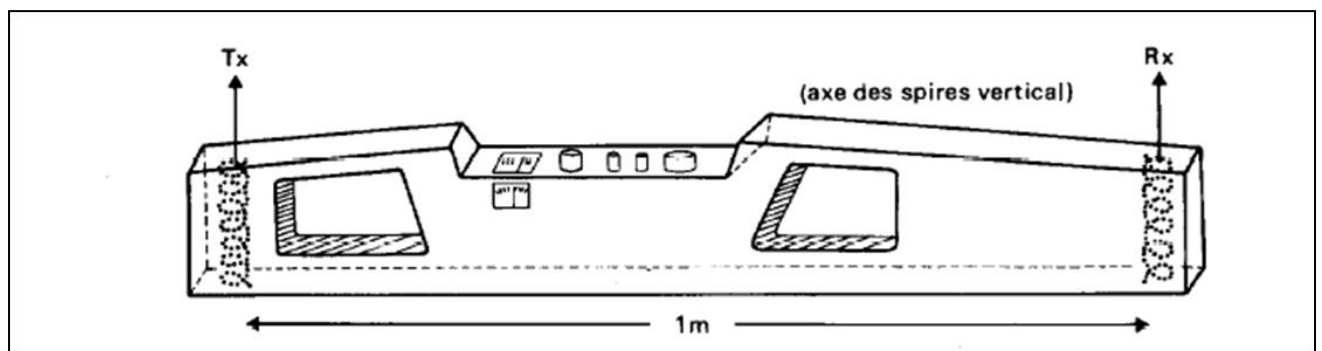


Figure 2: Position des dipôles par rapport à l'appareil (Job et *al.* 1987)

Les variations de la salinité dans le profil du sol influencent la mesure de la CEa. La réponse d'une couche élémentaire de sol homogène d'épaisseur (z), dans les deux modes horizontal et vertical, change avec la profondeur. En mode horizontal (EMh), les intervalles de profondeur 0 à 0,3; 0,3 à 0,6; 0,6 à 0,9 et 0,9 à 1,2 m contribuent à environ 43, 21, 10 et 6 %, respectivement alors qu'en mode vertical (EMv) les pourcentages correspondants sont de 17, 21, 14 et 10 % respectivement (figure 3).

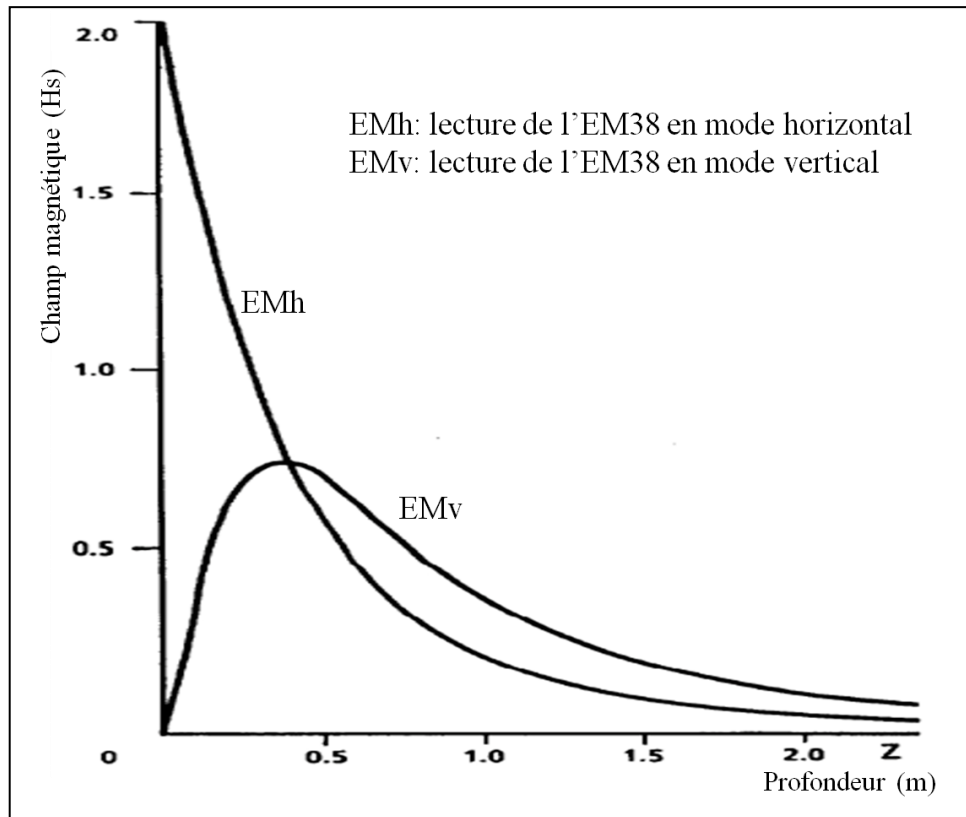


Figure 3: Réponses de l'EM38 en fonction de la profondeur (Job et *al.*, 1987)

Vue l'importance relative des lectures EMh et EMv à un point dans l'espace, il est possible de déterminer la forme générale du profil de salinité. Lorsque $EMh > EMv$ on se trouve dans un profil salin décroissant avec la profondeur, situation indiquant une concentration des sels en surface. Dans le cas contraire il s'agit d'un profil salin croissant en profondeur, où les sels se sont accumulés (Job et *al.*, 1987 ; Rhoades et *al.*, 1999).

2.3.4. Influence des paramètres pédologiques sur la CEa

Plusieurs paramètres peuvent influencer la salinité des sols. Malgré que dans les sols salins la salinité est le facteur dominant de la valeur de la CEa, il est nécessaire de connaître les autres facteurs qui l'influencent pour interpréter convenablement les résultats donnés à partir de la mesure de ce paramètre. Pour comprendre l'effet des paramètres pédologiques sur la CEa, Rhoades et *al.* (1989) ont formulé l'équation suivante:

$$ECa \text{ (dS. m}^{-1}\text{)} = \frac{(\theta_{ss} + \theta_{ws})^2 \cdot EC_{ws} \cdot EC_{ss}}{(\theta_{ss} \cdot EC_{ws}) + (\theta_{ws} \cdot EC_s)} + (\theta_w - \theta_{ws}) \cdot EC_{wc} \dots (1)$$

Où

$$\theta_w = \theta_{ws} + \theta_{wc}$$

$$\theta_{ws} = 0,639\theta_w + 0,011$$

$$\theta_w = (PW + \rho b)/100$$

$$\theta_{ss} = \rho b/2,65$$

$$EC_{ss} = 0,019(SP) - 0,434$$

$$EC_w = EC_{ws} = EC_{wc}$$

EC_{sc} est négligeable

$$EC_w = \left[\frac{(CE_{ps} \cdot \rho b \cdot SP)}{100 \cdot \theta_w} \right] \dots (2)$$

PW: Humidité pondérale (%);

ρb: densité apparente ;

CE_{ps}: conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (dS.m⁻¹);

SP: taux de saturation (%);

θ_w: Teneur en eau volumique totale (cm³/cm³)

En remplaçant l'équation (2) dans l'équation (1) on obtient une formule de la CEa qui indique que ce paramètre dépend des propriétés physiques et chimiques suivantes: (a) salinité, (b) teneur en eau, (c) taux de saturation, et (d) densité apparente. Le taux de saturation et la densité apparente dépendent du taux d'argile.

La CEa peut être également affectée par la texture (Rhoades, 1981 ; McKenzie et *al.*, 1989 ; Corwin et Lesch, 2003 ; Amezket, 2007), la porosité (Bennett et George, 1995), la température (McKenzie et *al.*, 1989 ; Bennett et George, 1995), la compaction et la matière organique (Corwin et Lesch, 2005) et par la CEC (Rhoades, 1981).

2.3.5. Etalonnage de la CEa mesurée par l'EM38

Les mesures de la CEa doivent être calibrées aux valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (établissement d'une équation de régression de type CE_{ps} = f(CEa)). Des équations linéaires ont été développées pour la conversion des lectures de l'induction électromagnétique.

Rhoades et Corwin (1981) ont développé une approche d'étalonnage basée sur la régression multiple entre CE_{ps} d'un intervalle de profondeur du sol avec CEa mesurée à différents niveaux au dessus du sol (CE_{ps z(cm)} = aEMz₁ + bEMz₂ + cEMz₃ + ... + xEMz_n). Job et *al.* (1987) ont trouvé une méthode simple en étalonnant les résultats de la CEa en mode horizontal et en mode vertical par rapport à la conductivité électrique de l'extrait au dixième (CE 1/10) à partir des échantillons prélevés tous les 10 centimètres jusqu'à 175 cm. Les

équations d'étalonnage sont de type $(CE(1/10) = aEMh + b)$; $(CE(1/10) = aEMv + b)$. Ils ont trouvé une corrélation meilleure en mode vertical. McKenzie et *al.* (1989) ont établi des équations linéaires pour convertir des lectures de l'EM38 en valeurs de CE_{ps} pour diverses conditions de température, de texture et d'humidité. Les auteurs ont constaté que les corrections de la température sont essentielles pour des conversions précises en CE_{ps} . Ils ont noté également que la variabilité de la conversion de la CEa en CE_{ps} était plus grande pour les sols de texture grossière que pour ceux de texture moyenne ou fine. Ainsi ils ont trouvé que les meilleures équations de calibrage peuvent être obtenues si l'humidité du sol est supérieure à 30%. Bennett et George (1995) ont étalonné les lectures de l'EM38 de deux sites représentant deux gammes de texture différentes (sableuse et argileuse) avec CE_{ps} des échantillons prélevés tous les 25 cm jusqu'à 100 cm de profondeur. Ils ont trouvé une bonne corrélation à l'intervalle '75 - 100 cm' de profondeur dans le site des textures sableuses, et à '25 - 75 cm' dans le site des textures argileuses. Herrero et *al.* (2003) ont étalonné les lectures de l'EM38 avec des équations de régression entre EMh et EMv et les mesures de CE_{ps} d'un intervalle de profondeur du sol, ensuite ils ont choisi les meilleures équations présentant le R^2 le plus élevé. Les équations sont de type $(CE_{ps} z(cm) = aEMh + b)$; $(CE_{ps} z(cm) = aEMv + b)$. Iddir (2006) a étalonné les lectures de l'EM38 verticales avec CE_{ps} des échantillons prélevés tous les 25 cm jusqu'à 100 cm, en utilisant l'approche d'étalonnage affectée par Rhoades et Corwin (1981). Amezketa (2007) a estimé la CE_{ps} du sol de 0 à 90 cm, avec un intervalle de 30 cm, par l'application de la régression linéaire multiple, à partir des lectures de l'EM38 en mode horizontal et vertical en tenant compte de la texture, la teneur en eau et du taux de saturation. Le modèle de régression proposé est de type $\ln(CE_{ps}) = b_0 + b_1(\ln EMh) + b_2(\ln EMv) + b_3(x) + b_4(y)$. Abdelhafid (2010) a transformé les mesures de l'EM38 en mode horizontal en CE_{ps} pour des intervalles de profondeur compris entre 0 et 35 cm et 35 et 70 cm à travers des régressions simples de type $(CE_{ps} z(cm) = aEMh + b)$.

Chapitre III: Cartographie de la salinité

La cartographie constitue une méthode efficace pour analyser et représenter l'organisation de la salinité du sol dans l'espace. Aujourd'hui, plusieurs techniques modernes jouent un rôle important dans l'évaluation et la cartographie de la salinité, notamment la télédétection et la géostatistique. La télédétection permet d'obtenir de l'information sur la surface de la terre sans contact direct avec celle-ci en mesurant la réflectance des sols. Dans ce contexte, plusieurs auteurs ont cartographié la salinité des couches de surface des sols par l'acquisition d'images satellitaires (Al-Khaier, 2003 ; Khan *et al.*, 2005 ; Douaoui et Hartani, 2006 ; Bannari *et al.*, 2008 ; Dehni et Lounis, 2012). L'utilisation de la télédétection dans la cartographie de la salinité fournit des résultats rentables, efficaces et rapides. Toutefois, il est important de noter que cette technique comporte des inconvénients liés au comportement spectral des types de sels, la distribution spatiale des sels sur la surface du terrain, les changements temporels de la salinité, l'interférence de la végétation, et les confusions spectrales avec d'autres surfaces de terrain (Metternicht et Zinck, 2003).

La délimitation des unités cartographique se base sur des critères cartographiques, notamment les observations ponctuelles, et les variations liées au sol, telles que la topographie et l'état de surface du sol (Gascuel *et al.*, 1993). L'estimation spatiale dans la cartographie se base sur la typologie et la localisation des unités cartographiques où la continuité entre elles n'est pas prise en compte. Dans ce cas, le sol est alors considéré comme un ensemble d'unités indépendantes pour l'estimation spatiale. Face à cet inconvénient, les chercheurs ont fait appel à la géostatistique comme une technique utile pour la distribution spatiale.

1. La géostatistique

Selon Mathéron (1970), la géostatistique est définie comme étant l'étude des phénomènes qui se déploient dans l'espace et y manifestent une certaine structure, qui sont appelés variables régionalisées. Alors que Hengl (2009) la définit comme étant une branche des statistiques qui se spécialise dans l'analyse et l'interprétation des données de référence dans l'espace (et dans le temps). Elle est, de ce fait, employée pour analyser les paramètres spatiaux continus et inhérents.

La géostatistique est devenue un outil efficace pour l'étude de l'évaluation spatiale d'incertitude et de risque (Goovaerts, 1999 In Guagliardi *et al.*, 2012). Basée sur la continuité spatiale de la couverture pédologique, par la notion de structure spatiale, elle semble

privilégier les relations de voisinage entre les observations pour effectuer des estimations spatiales (Gascuel et *al.*, 1993).

Le but de la géostatistique est de déterminer l'organisation spatiale d'un phénomène. La principale différence entre la géostatistique et les statistiques classiques est due au fait que la première permet la modélisation directe de la corrélation des données spatiale. Ceci est obtenu par le calcul du variogramme qui agit en tant que résumé de toute information de la structure d'une fonction aléatoire.

2. Eléments de la géostatistique

Les méthodes de la géostatistique se basent sur l'analyse de la structure spatiale d'une variable dans l'espace géographique en étudiant :

- La structure spatiale de la variable concernée par le variogramme (variographie),
- L'estimation spatiale par la méthode d'interpolation associée.

2.1. Analyse de la structure spatiale

L'analyse de la structure spatiale constitue la première étape dans l'étude géostatistique, elle nous renseigne sur la structure de la variabilité spatiale de la variable considérée en reposant sur la théorie des variables régionalisées (Mathéron, 1965). L'information structurale de la variable considérée est résumée par le variogramme (figure 4).

2.1.1. Variable régionalisée

Cette notion est proposée par Matheron (1965) pour qualifier toute variable se déployant dans l'espace (et ou dans le temps), et y manifestant une certaine structure, et qui présente un caractère à la fois structuré (échelle régionale) et chaotique (fluctuations locales). Rivoirard (1995) l'a définie comme étant toute variable qui évolue à l'intérieur d'un certain champ de l'espace, et qui est définie dans les deux ou les trois dimensions de l'espace.

2.1.2. Variogramme

Le variogramme est un outil particulier qui mesure la structure spatiale. Il décrit comment la variance d'une propriété mesurée en deux points varie en fonction de la distance entre ces points (Gascuel et *al.*, 1993). Ce formalisme permet d'exprimer de manière statistique la continuité de la couverture pédologique.

L'équation suivante définit le semi-variogramme, appelé couramment variogramme $\gamma(h)$, où $N(h)$ est égale au nombre de points échantillonnés séparés par une distance (h) , $z(x_i)$ est égale à la valeur de la propriété mesurée au points (x_i) , et $z(x_i + h)$ est la valeur de la propriété mesurée au point $(x_i + h)$.

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

2.1.2.1. Propriétés du variogramme

La représentation graphique du variogramme (figure 4) montre la variation du semi-variogramme en fonction de la distance (h) , elle se caractérise par trois paramètres, l'effet pépité, le palier et la portée.

a. L'effet de pépité (Nugget Effect)

C'est le comportement à l'origine du variogramme ou bien le comportement aux très courtes distances. Il représente la variation entre deux mesures effectuées à des emplacements très proches. Il reflète les erreurs d'échantillonnage et la variabilité à petite échelle (Guagliardi et *al.*, 2012).

b. Le palier (Sill)

Il renseigne sur les plus grands écarts qui se présentent entre deux observations, au delà de cette limite, le variogramme se stabilise. Il nous indique l'absence complète de structuration spatiale des valeurs (Wackernagel, 1993)

c. La portée (Range)

C'est la distance à laquelle le variogramme atteint le palier. Autrement dit c'est la distance où deux observations ont le maximum de variance.

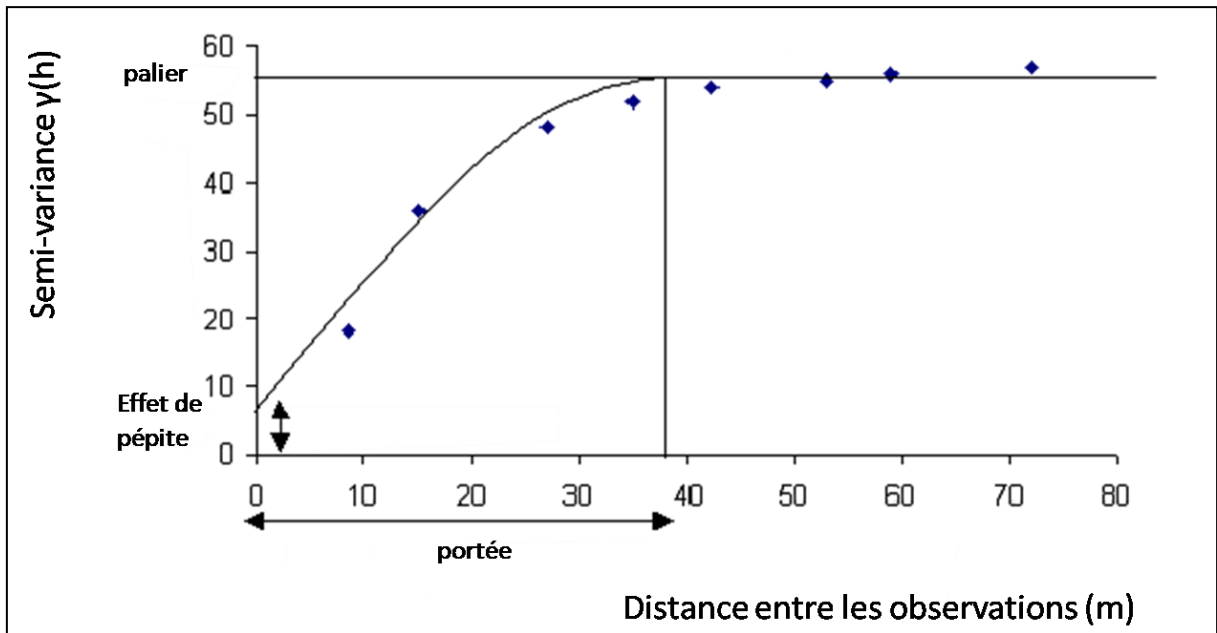


Figure 4: Propriétés du variogramme théorique

2.1.2.2. Ajustement du variogramme

Le variogramme expérimental est utile pour explorer les données, mais il n'est pas adéquat pour répondre aux questions de prédiction. C'est pourquoi les méthodes géostatistiques modélisent le variogramme expérimental par des fonctions mathématiques. Cette étape constitue la modélisation ou l'ajustement du variogramme qui est la partie essentielle du krigeage. L'ajustement du variogramme se fait en utilisant une fonction mathématique (variogramme théorique ou modèle du variogramme). Le variogramme ajusté fournit des informations sur la structure spatiale, ainsi que sur les paramètres d'entrée pour l'interpolation par krigeage.

2.2. Krigeage

Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale issue de la géostatistique. Il est basé sur la minimisation de l'erreur moyenne de la somme des valeurs de prélèvement (Li et al., 2012). Son objectif est d'estimer la variable régionalisée concernée dans des endroits non échantillonnés (Yao et Ming, 2010).

Les principales méthodes d'estimation géostatistiques pour les variables quantitatives sont le krigeage ordinaire, le krigeage universel et le krigeage disjonctif. Dans le cas de champs multivariés on a recours au krigeage avec dérive externe, au cokrigeage ou au cokrigeage disjonctif.

3. Application de la géostatistique à la cartographie de la salinité

La géostatistique s'applique dans plusieurs domaines. Lors des trois dernières décennies, elle a fait l'objet de plusieurs études en science du sol. Boivin et *al.* (1988) confirment que pour divers types de sols salés, l'emploi du conductimètre électromagnétique couplé à un traitement numérique de type géostatistique aboutit à tracer des cartes estimées et interpolées par krigeage en produisant un document fiable, reproductible dans le temps et dont l'erreur d'estimation est maîtrisable. Avec l'application des méthodes géostatistiques, Lesch et *al.* (1992) ont tracé des modèles spatiaux de la salinité du sol à l'échelle de la parcelle à partir des lectures en surface de l'induction électromagnétique en réduisant sensiblement le nombre d'échantillons. De même, Barbiéro et *al.* (2001) ont étudié la distribution spatiale de la salinité dans la vallée du Sénégal pour comprendre sa variabilité et pour décrire la structure et l'arrangement spatial de ce paramètre en utilisant l'EM38. Triantafilis et *al.* (2001) et Triantafilis et *al.* (2004) ont comparé plusieurs modèles géostatistiques afin de déterminer une approche optimale pour une meilleure estimation de la salinité à partir des données de l'EM38 dans la vallée de Namoi en Australie. Ehsani et *al.* (2005) ont utilisé les techniques de géostatistiques pour établir une relation entre la conductivité électrique, l'altitude, la densité de semis et le rendement. Yang and Yao (2007) ont appliqué plusieurs approches géostatistiques et ont étudié la similitude spatiale des données de l'EM38 de divers nombres d'échantillons pour déterminer la méthode d'estimation optimale. Wang et *al.* (2008) ont appliqués des statistiques classiques, le système d'information géographique (SIG) et la géostatistique pour estimer l'évolution spatiale de la salinité et son rapport avec la dynamique des eaux souterraines dans une oasis d'une région de la Chine. Zheng et *al.* (2009) ont exploré la variabilité spatiale et temporelle de la salinité du sol en utilisant des données in-situ de la conductivité électrique, et en appliquant la géostatistique pour analyser les données, et le krigeage pour tracer les modèles spatiaux de la CE.

En Algérie Iddir (2006) a appliqué la géostatistique pour caractériser la variabilité spatiale de la salinité des sols d'une parcelle de la plaine de la Macta en réalisant des cartes de salinité obtenues par krigeage. De même, Abdelhafid (2010) a réalisé des cartes d'isovaleurs de la salinité du périmètre de la Mina, estimée par krigeage ordinaire, régression krigeage et cokrigeage. Douaoui et Lepinard (2010) ont cartographié la salinité en appliquant le krigeage ordinaire en tenant compte d'un variogramme ajusté par un modèle sphérique. Une autre étude a été faite par Khacheba (2011) pour estimer la salinité du sous bassin de Sidi Rached

par krigeage, après avoir modélisé les variogrammes expérimentaux des CEa horizontales et verticales et des CE_{ps} des horizons de surface.

Deuxième partie : Matériel et méthodes

Chapitre I: Le Milieu naturel

1. Site d'étude

Le site d'étude représente l'ancienne délimitation (1942) de la station expérimentale de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRAA) à Hmadna (Relizane) dans la plaine du Bas-Chélif (figure 5). Il se situe entre l'oued Chélif au nord et l'autoroute est-ouest au sud et couvre une surface de 267,4 ha (figure 6). La station est comprise entre 0,73602 et 0,7551 de longitude Est, et entre 35,923 et 35,9445 de latitude Nord en degré décimal (WGS 84).



Figure 5: Carte de la situation géographique du site d'étude (épingle en jaune)

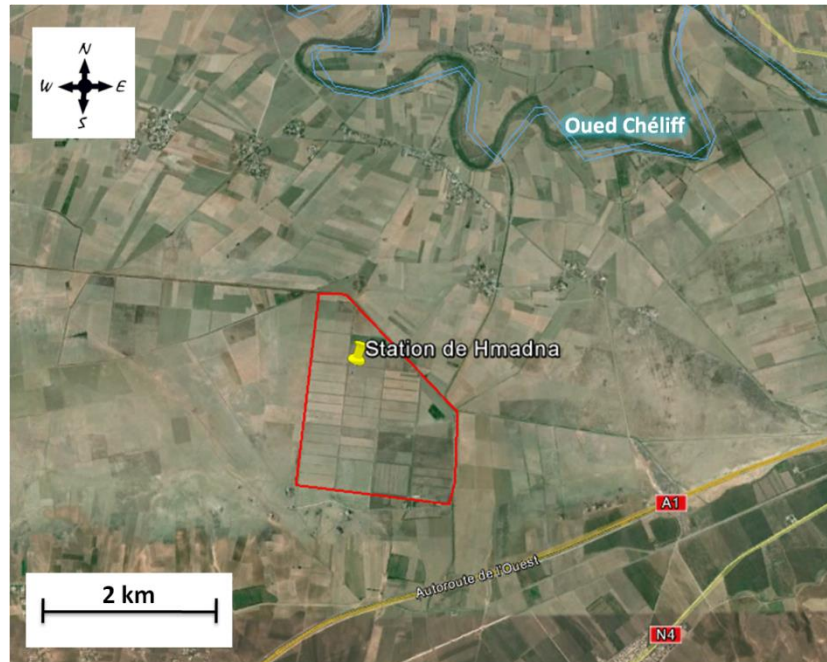


Figure 6: Situation géographique de la station de Hmadna

2. Climat

Le climat de la région de Hmadna est spécifique, contrasté, caractérisé par des étés très chauds et des températures basses en hiver. D'après la carte des étages bioclimatiques du bassin du Chélif (figure 7), l'étage bioclimatique de la région de Hmadna est aride (indiqué dans la figure 7 en point rouge). Selon l'INSID (2005), l'évapotranspiration potentielle annuelle de la région est de l'ordre de 1600 mm/an.

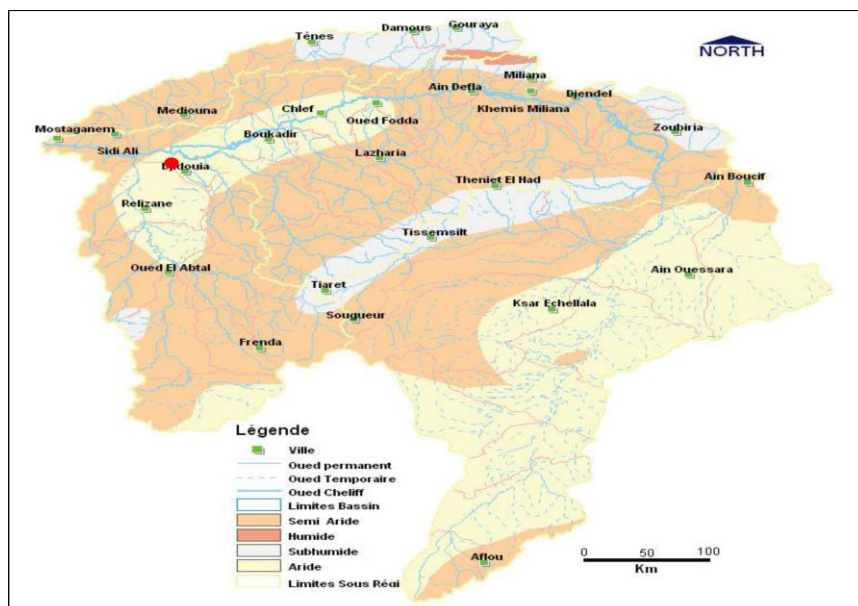


Figure 7: Carte des étages bioclimatiques du bassin de Chélif

Le tableau I représente les précipitations moyennes mensuelles de la région de Hmadna, calculée sur une période allant de 1985/86 à 2010/11.

Tableau I. Précipitations moyennes mensuelles (1985/86 à 2010/11)
Station INRAA Hmadna Relizane

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	P. Ann. (mm)
P moy. (mm)	16,2	32,3	49,2	35	39,2	34,9	28,8	31,8	22,9	4,2	1,3	3,4	299,2

L'analyse du tableau I montre que le mois de novembre est celui le plus pluvieux avec 49,2 mm, alors que la faible pluviosité est enregistrée durant le mois de juillet avec une pluviométrie égale à 1,3 mm. La pluviométrie totale annuelle est de 299,2 mm, dont 92% a été enregistré entre octobre et mai. En général, le climat de la région de Hmadna est caractérisé par une faible pluviosité répartie avec une grande irrégularité durant toute l'année. Les températures moyennes mensuelles de la région de Hmadna, enregistrées durant la période 1993/94 à 2010/11, sont mentionnées dans le tableau II.

Tableau II. Températures moyennes mensuelles (1993/94 à 2010/11)
Station INRAA Hmadna Relizane

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T min.	17,1	13,7	8,9	5,9	05	5,5	07	9,3	13,8	18,2	21,7	21,6
T max.	32,5	28,1	21	17,4	16,5	19,1	22,1	24,8	29,5	34,8	38,3	38,7
T Moy. (°C)	24,9	21	14,8	11,7	10,5	12,1	14,5	17	21,6	26,4	30	30

Ce tableau montre que le régime thermique de la région est caractérisé par des températures élevées en été et relativement basses en hiver. La température minimale enregistrée est de 5°C en janvier et la température maximale est de 38,7 °C en août. Les températures moyennes les plus élevées sont enregistrées durant les mois de juillet et août, ou elles atteignent un maximum de 30 °C, ce qui correspond à une forte évapotranspiration et une remontée capillaire de la nappe. Les basses températures se manifestent aux mois de janvier avec une température moyenne de 10,5 °C.

Le diagramme ombrothermique de la station de Hmadna, présenté dans la figure 8, montre une période de sécheresse qui s'étale du mois d'avril vers le mois d'octobre.

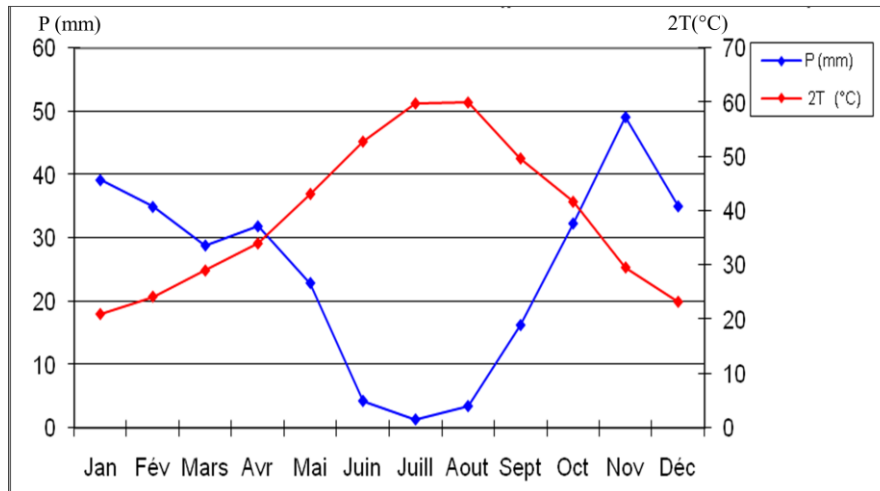


Figure 8: Diagramme ombrothermique de la station climatique de Hmadna (1993-2011)

3. Géologie du site d'étude

La plaine du Bas-Chéliff, où se trouve le site d'étude, est un synclinal ou une dépression intertelliennne comblée d'alluvions du Quaternaire et traversée par le lit de l'oued Chéliff. Elle est bornée au nord et au sud par les collines du Dahra et de l'Ouarsenis de l'âge Miocène et Pliocène (Tertiaire), à partir desquelles proviennent les alluvions qui la composent. Les matériaux originaires qui constituent les alluvions de la plaine du Bas-Chéliff sont principalement des argiles et des limons souvent à caractères salins. Selon Durand (1956), le site d'étude est situé dans une surface de remblaiement formée d'alluvions récentes, grises, argileuses, plus ou moins salées et généralement imperméables.

4. Hydrologie et hydrogéologie

Les périmètres irrigués de la plaine du Bas-Chéliff, y compris celui de Hmadna, sont alimentés par des eaux superficielles et des eaux souterraines. Les eaux superficielles sont constituées essentiellement par le barrage de Gargar (sur l'oued Rhiou) et la retenue de la Merdjet Sidi Abed qui est alimentée par l'oued Chlef.

Les eaux souterraines sont très exploitées vue la demande en eau pour l'irrigation. Il existe deux types de nappes:

- Des nappes superficielles alimentées par la pluie, l'excès d'eau d'irrigation, et par remontée verticale à partir de la nappe profonde ;

- Des nappes de profondeur alimentées par les écoulements souterrains près des limites latérales de la vallée, ou par les cours d'eau d'affluents de l'oued Chlef, ainsi que les formations aquifères latérales.

5. Drainage

Le réseau de drainage dans le site de Hmadna est composé de 2 types de systèmes de drainage (figure 9). Le premier est un ancien système de drainage à ciel ouvert installé durant les années 1946-1947, et le deuxième est un nouveau système de drainage souterrain installé en 2001. Il est utile de noter que le nouveau système de drainage ne couvre qu'une petite partie qui se trouve au sud-est du site de Hmadna.

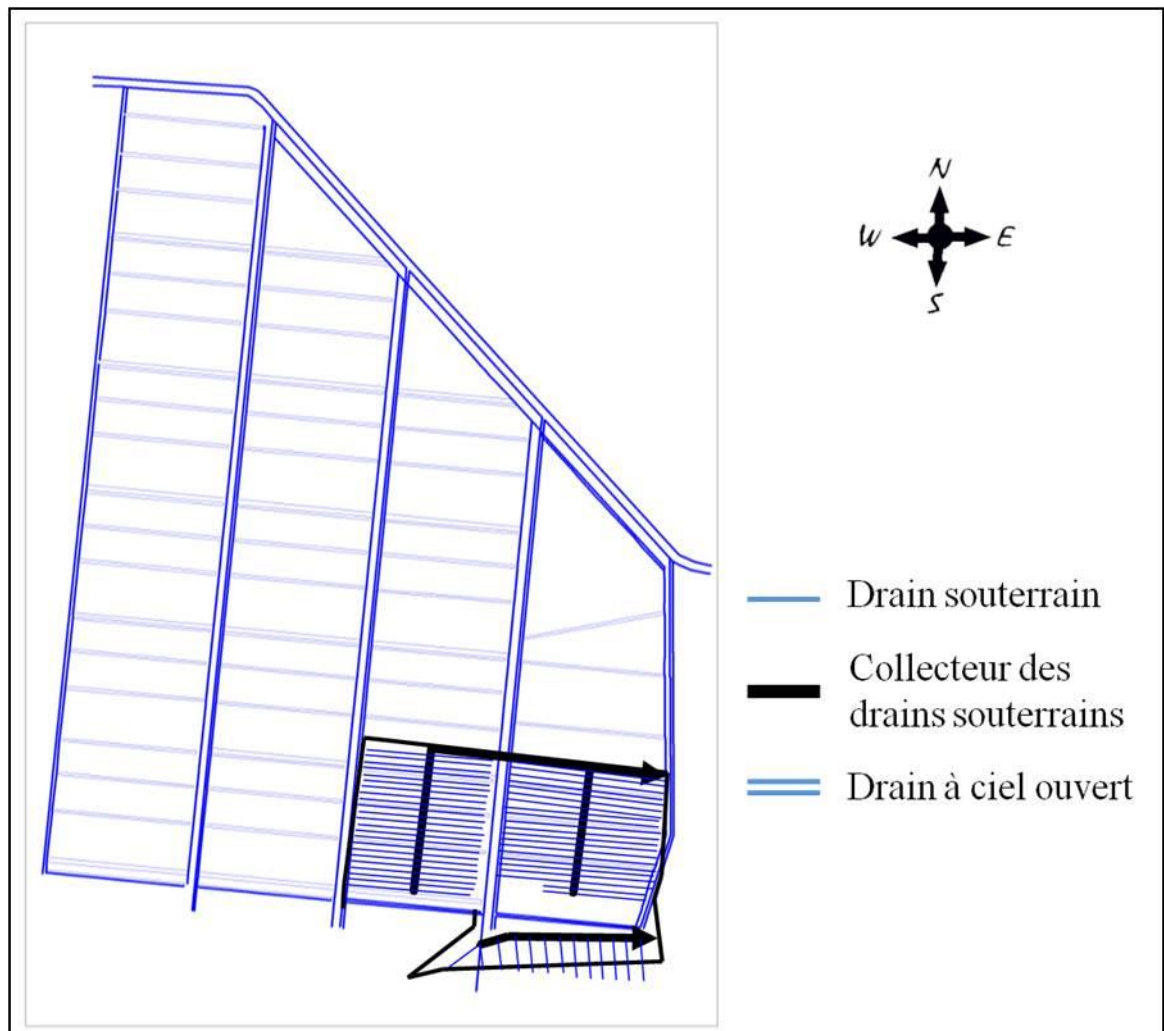


Figure 9: Schéma des réseaux de drainage

6. Pédologie

Les travaux réalisés par Durand (1956) ont montré que les sols du site de Hmadna sont tous des solontchaks solonetz à caractère sodique magnésique et calcique (figure 10). Ils présentent pour la grande majorité une texture très fine en surface et des textures à dominance limoneuse dans les horizons sous-jacents. L'analyse des résultats morphologiques et analytiques fait par Hadj Miloud (2010) sur un profil situé dans la station de Hmadna a montré qu'il correspond à : Hypersalic Vertic Gleyic Solonchak (Sodic, Chloridic, Clayic), selon la classification mondiale de la WRB (2006).

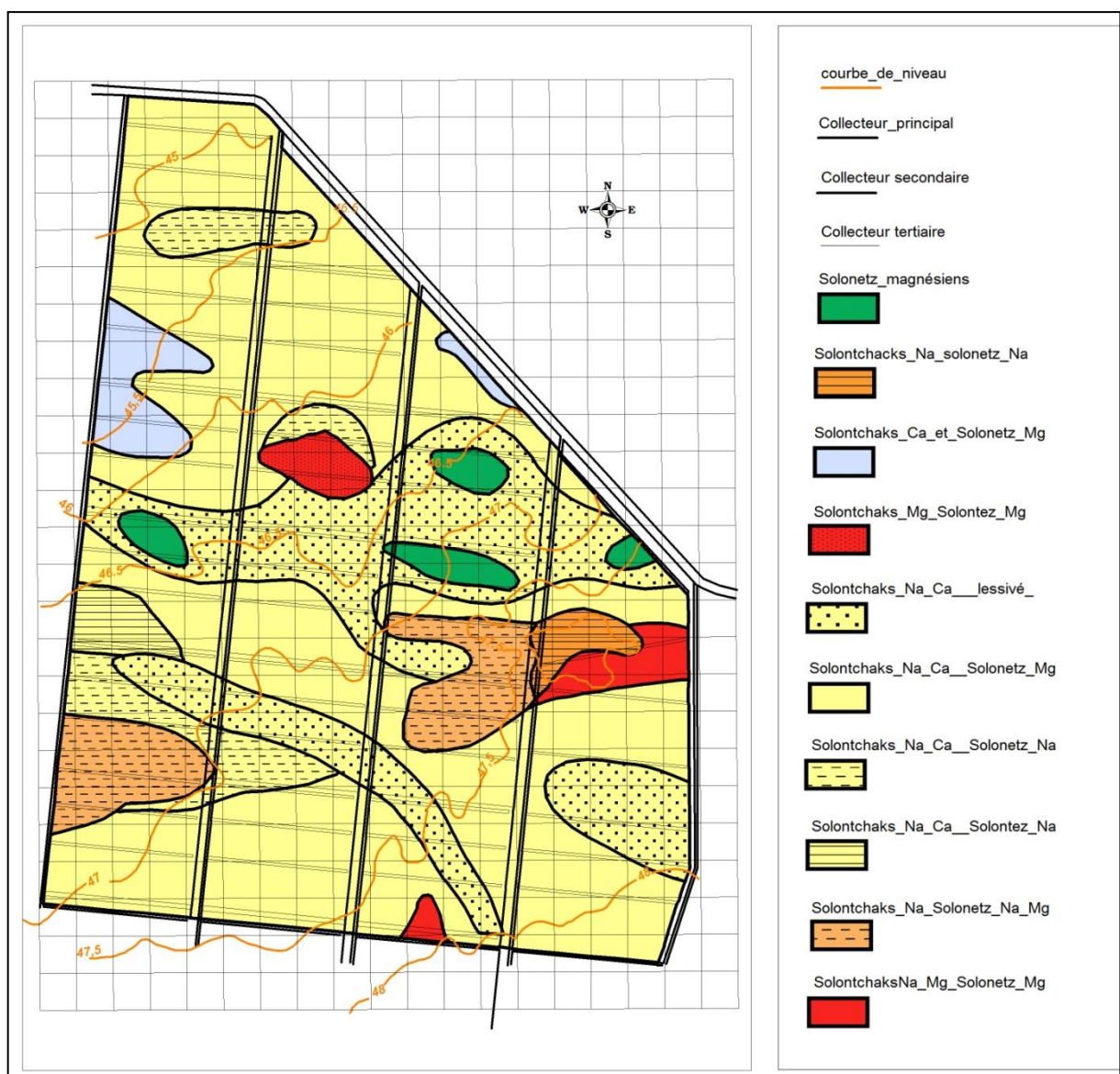


Figure 10: Carte des sols du site de Hmadna (Durand, 1956)

CHAPITRE II: Méthodologie de travail

L'objectif de cette recherche est une caractérisation de l'état actuel de la salinité des sols de la zone de Hmadna à partir des mesures de l'induction électromagnétique de l'EM38. La démarche adoptée dans ce travail s'articule autour des points suivants:

- Mesure de la conductivité électromagnétique (CEM) par l'EM38.
- Prélèvement des échantillons de sol.
- Caractérisation des échantillons et mesure des différents paramètres étudiés.
- Traitements des données.
- Etalonnage de la conductivité électromagnétique.
- Analyses géostatistiques.

1. Mesure de la conductivité électromagnétique

Sur une superficie de 267,4 hectares, à l'aide de l'EM38 « Géonics Ltd. », nous avons mesuré la conductivité de 317 points situés aux nœuds d'une grille d'un pas d'étude de 25 à 50 m (figure 11). Les mesure électromagnétiques sur les 317 points ont été effectuées pour cinq (05) niveaux de profondeur en position verticale [0 à 30 cm (EMv1) ; 0 à 60 cm (EMv2) ; 0 à 90 cm (EMv3) ; 0 à 120 cm (EMv4) ; 0 à 150 cm (EMv5)], et pour trois (03) niveaux de profondeur en position horizontale [0 à 30 cm (EMh1) ; 0 à 60 cm (EMh2) ; 0 à 90 cm (EMh3)]. Les mesures ont été réalisées en mai 2012.

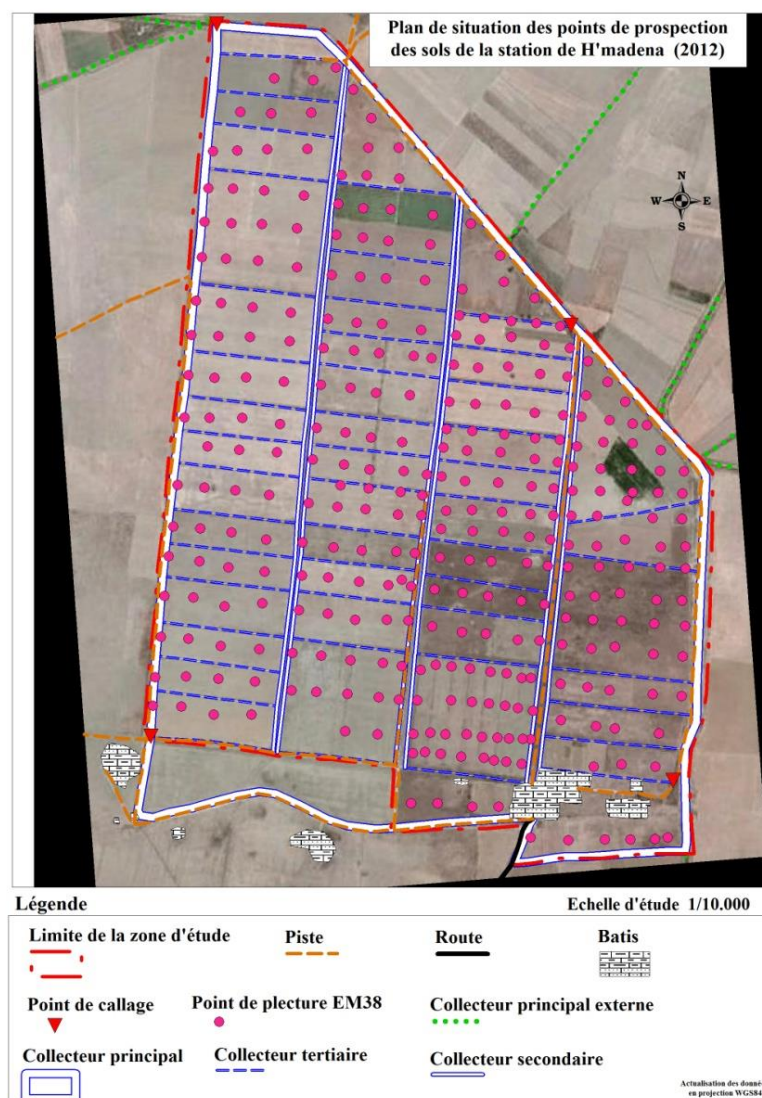


Figure 11: Localisation des mesures électromagnétiques

2. Prélèvement des échantillons de sol

Sur la base des 317 mesures effectuées par l'EM38, nous avons choisi trente sept (37) profils représentatifs de la salinité du site d'étude. Au niveau de chaque profil, nous avons effectués des prélèvements d'échantillons à la tarière (figure 12) sur cinq niveaux de profondeur correspondant aux couches 0 cm – 30 cm (H1), 30 cm – 60 cm (H2), 60 cm – 90 cm (H3), 90 cm – 120 cm (H4) et 120 cm – 150 cm (H5). Au total, 185 échantillons du sol ont été prélevés.

Le choix des sondages a été fait en fonction de la variation des gammes des lectures de l'EM38 (de la plus faible à la plus élevée) pour une homogénéisation optimale de leur représentation spatiale.

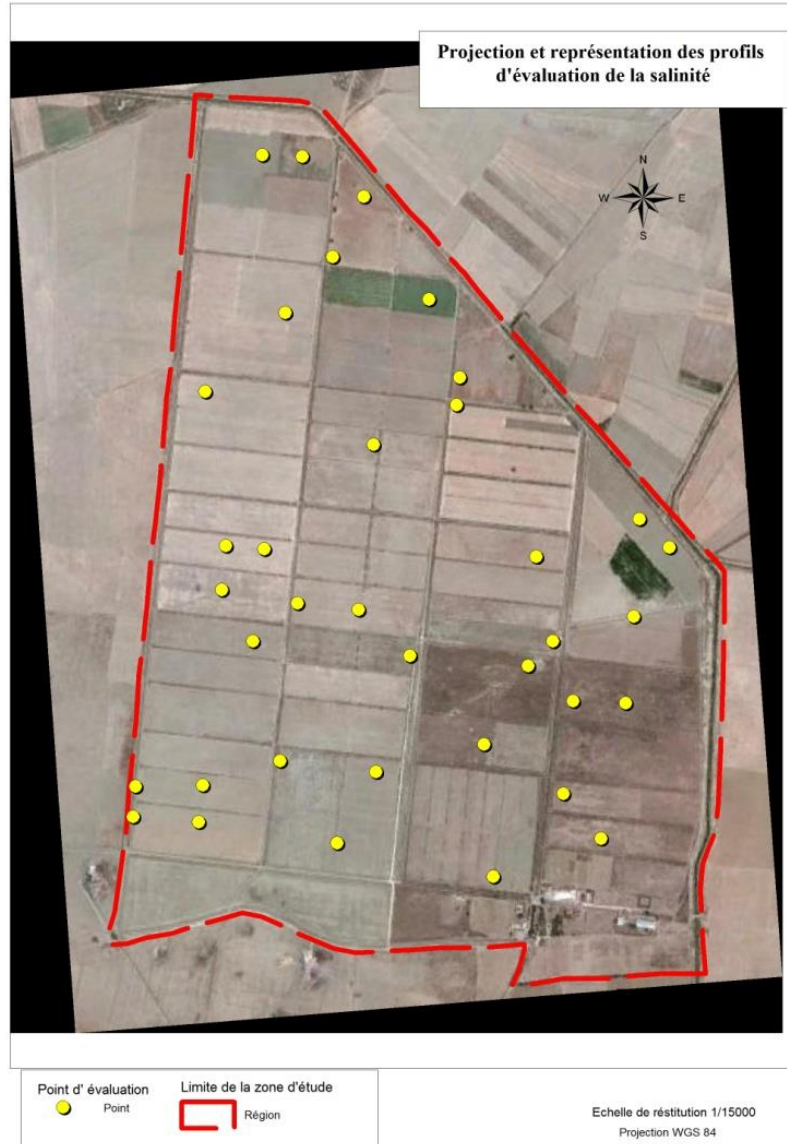


Figure 12: Localisation des échantillons prélevés

3. Caractérisation des échantillons et mesure des différents paramètres étudiés

Les échantillons prélevés sont d'abord séchés à l'air libre, broyés et tamisés à 2 mm avant d'être analysés. Ils sont utilisés pour réaliser les analyses suivantes:

3.1. Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CE_{ps})

C'est la méthode de référence internationale qui a été mise au point par l'USSL (Richards, 1954). Pour extraire la solution, on met le sol à saturation par malaxage avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre le point de saturation. Cette méthode permet de se rapprocher de la réalité agronomique, l'humidité étant à proximité de la capacité de rétention la plus favorable pour la plante.

3.2.pH de l'extrait de pâte saturée (pH_{ps})

La solution extraite de la pâte saturée est destinée pour la mesure du pH_{ps}.

3.3.Calcaire total

La teneur en carbonate de calcium (CaCO₃) dans le sol est déterminée par la méthode volumétrique avec le Calcimètre de Bernard.

3.4.Gypse

La détermination du taux de gypse se fait par attaque puis précipitation par le chlorure de baryum.

3.5.Granulométrie

L'analyse granulométrique est réalisée par la méthode internationale à la pipete de Robinson. Elle permet de déterminer la texture du sol en séparant les fractions granulométriques. Il s'agit des argiles (0 à 2 μm), des limons (2 à 50 μm), des sables (50 à 2000μm).

3.6.Humidité pondérale

L'humidité pondérale est déterminée par le rapport de l'eau contenue dans un échantillon du sol au poids du même échantillon après dessiccation à 105°C pendant 24 h. $H_p (\%) = \frac{M_e}{M_s} \times 100$

Avec: H_p : humidité pondérale ; M_e : poids d'eau contenu dans un échantillon de sol (gr) ; M_s : poids de l'échantillon sec (gr).

4. Traitement des données

Le traitement des données a porté sur les traitements statistiques de tendance centrale et de dispersion, les corrélations, la comparaison des moyennes, l'étalonnage de la conductivité électromagnétique et les analyses géostatistiques.

4.1.Traitements statistiques

Les résultats obtenus des paramètres étudiés sont destinés aux analyses statistiques suivantes :

- statistiques descriptives,
- profils de distribution,
- tests de corrélation,
- comparaison des moyennes,

Les logiciels utilisés pour les traitements statistiques dans notre étude sont XLSTAT 10, STATISTICA 6, et ORIGIN 8.1.

4.1.1. Statistiques descriptives

Dans ce travail, les statistiques descriptives utilisées sont les suivantes:

4.1.1.1.Moyenne arithmétique

C'est l'un des indicateurs de position et de tendance centrale, correspond à la somme des valeurs des individus divisée par le nombre des individus. La moyenne est fonction de toutes les observations mais elle est sensible aux valeurs extrêmes. Elle est donnée par la formule suivante:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

4.1.1.2.Médiane

C'est la valeur qui partage la distribution triée des valeurs en deux groupes d'effectifs égaux, c'est un indicateur de position insensible aux variations des valeurs extrêmes de la variable.

4.1.1.3.Minimum et maximum

Ce sont des indicateurs de dispersion. Ils s'agit des valeurs extrêmes d'une distribution, la différence entre les deux, représente "l'étendue" .

4.1.1.4.Quartiles

Ce sont les trois (03) valeurs qui divisent la distribution triée en quatre (04) parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/4 de l'échantillon de la population.

- 1^{er} quartile: sépare 25% des valeurs les plus faibles et 75% des valeurs les plus élevées
- 2^{ème} quartile est la médiane
- 3^{ème} quartile: sépare 75% des valeurs les plus faibles et 25% des valeurs les plus élevées

La différence entre le 1^{er} et le 3^{ème} quartile s'appelle "espace interquartile"; c'est un indicateur de dispersion.

4.1.1.5. Variance et écart-type

La variance correspond à la moyenne arithmétique des carrés des écarts à la moyenne. C'est un indicateur de dispersion qui caractérise l'écart de l'ensemble des valeurs ; elle est donnée par la formule suivante:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

L'écart-type est la racine carrée de la variance. L'avantage de ce paramètre, contrairement à la variance, est de s'exprimer dans les mêmes unités que la moyenne.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

4.1.1.6. Coefficient de variation

C'est un indicateur de dispersion qui est calculé en divisant l'écart-type par la moyenne. Il permet de comparer facilement la dispersion des variables différentes. On exprime ce paramètre souvent en pourcentage :

$$CV(\%) = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100$$

4.1.2. Profils de distribution

Les profils de distribution permettent de visualiser la distribution verticale des paramètres étudiés au niveau des couches d'étude.

4.1.3. Tests de corrélation

Il s'agit de rechercher les relations pouvant exister entre la CE_{ps} et les différents paramètres pédologiques étudiés. L'appréciation de cette relation se fait à l'aide du coefficient de corrélation « r », qui est la racine carrée de R^2 , et le niveau de signification p.

4.1.4. Comparaison des moyennes

Ce calcul statistique est réalisé grâce au test de « Student ». Il a pour but d'évaluer statistiquement les différences pouvant exister entre deux valeurs de la CE calculée et celles de la CE_{ps} , afin d'argumenter la validité des ces deux valeurs.

4.2. Etalonnage de la conductivité électromagnétique

Les lectures électromagnétiques obtenues par l'appareil Géonics EM38 doivent être transformées en fonction des valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée

relatives aux échantillons de sols des sondages de référence (37 profils). L'étalonnage se fait par établissement des équations de régressions linéaires simples et multiples en tenant compte les mesures de l'EM38 en mode vertical (EMv) et les valeurs de CE_{ps} pour les cinq (05) intervalles de profondeur. Ensuite, l'équation d'étalonnage la plus significative sera choisie.

4.3. Analyses géostatistiques

L'analyse géostatistique de la salinité des sols de Hmadna permet une caractérisation efficace de l'état actuel de la salinité. Elle comprend deux étapes essentielles, l'étude variographique et l'interpolation par krigeage pour dessiner les cartes d'isovaleurs de la salinité.

Dans cette étude, le logiciel Surfer 11 (Golden Software), est celui adopté pour la géostatistique. Il permet de réaliser des modèles numériques de terrain (MNT) à partir des données récoltées sur le terrain (Golden Software, 2011). Le principe de Surfer est de créer des grilles qui vont interpoler des données irrégulières des points x, y, z afin de les ordonner. Le Surfer offre également la possibilité de mesurer la structure spatiale en utilisant le variogramme expérimental.

4.3.1. Etude variographique

L'étude variographique par Surfer comprend quatre étapes essentielles:

- La première étape consiste à créer le variogramme brut, ou omnidirectionnel qui est caractérisé par une direction 0 et un angle de tolérance de 90° ,
- La deuxième étape permet de modéliser le variogramme omnidirectionnel, c'est-à-dire ajuster le variogramme à un modèle théorique, en sélectionnant ses paramètres (palier, portée, effet de pépité),
- La troisième étape consiste à trouver l'anisotropie du variogramme directionnel
- La dernière étape permet d'ajuster l'anisotropie du variogramme directionnel pour affiner le modèle.

Généralement, l'anisotropie peut être présentée sous la forme d'une ellipse. Celle-ci est déterminée par la longueur de ses deux axes orthogonaux, et par l'angle d'orientation. Dans le Surfer, les longueurs des axes sont appelées rayon 1 et rayon 2 (Golden Software, 2011), et l'angle d'orientation est défini en sens antihoraire depuis l'axe positif des abscisses vers le

rayon 1 (figure 13). Le rapport d'anisotropie peut être déterminé en calculant le rapport entre rayon 1 et rayon 2 des deux axes de l'ellipse.

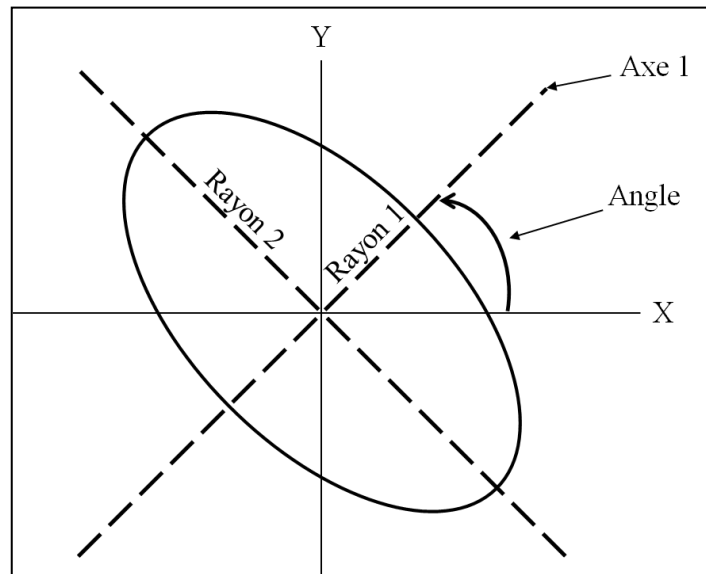


Figure 13 : Schéma descriptif de l'angle d'anisotropie

Dans le cas de notre étude, la recherche d'une anisotropie s'effectue quand on fait des rotations antihoraires chaque 15° avec une tolérance angulaire de 30° .

4.3.2. Le krigeage

Une fois que le variogramme est établi et ajusté à un modèle théorique, nous passons vers l'étape suivante qui est l'interpolation spatiale par krigeage. Il s'agit en fait d'une interpolation des valeurs des points de mesure situées aux nœuds d'une grille régulièrement espacés.

4.3.3. Transformation des coordonnées

Les coordonnées des points sont définies en longitude/latitude de la projection WGS84. C'est un système géodésique dont l'unité est exprimée en degré décimal. Toutefois, dans le but de faciliter le calcul des distances et des surfaces sur les cartes, on doit transformer l'unité de mesure en mètre. De ce fait, le système géodésique sera transformé en UTM algérien (31 N).

Troisième partie. Résultats et discussions

Cette partie, organisée en trois chapitres, est consacrée à la présentation et à la discussion des résultats. Dans le premier chapitre nous présentons les caractéristiques des paramètres pédologiques étudiés, y compris ceux relatifs à la mesure de la salinité. Le deuxième chapitre est réservé à la recherche des équations d'étalonnage des lectures électromagnétiques CEM en fonction de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée CE_{ps} . Enfin, l'analyse spatiale de la salinité et sa cartographie seront présentées dans le troisième chapitre.

Chapitre I : Caractéristiques des sols étudiés

Dans ce chapitre, nous présentons une description statistique des données du sol relatives à la texture, à l'humidité pondérale (H_p %), au taux de calcaire total, au pH de l'extrait de pâte saturée (pH_{ps}), au taux de gypse total, à la CE de l'extrait de pâte saturée (CE_{ps}) et, enfin, aux lectures électromagnétiques (CEM).

Les analyses ont été effectuées sur 185 échantillons provenant de 37 sondages réalisés sur cinq (05) niveaux de profondeurs correspondant aux couches 0 cm – 30 cm (H1), 30 cm – 60 cm (H2), 60 cm – 90 cm (H3), 90 cm – 120 cm (H4) et 120 cm – 150 cm (H5).

1. La texture

Les résultats de la texture sont présentés dans le tableau IV et dans les figures 14 15 16 et 17.

1.1.L'argile

L'observation du tableau IV révèle que les valeurs minimales des taux d'argile oscillent entre 5 et 16 % et que les valeurs maximales se situent entre 67 et 74 % selon la couche de sol considérée. Les écarts entre les valeurs minimales et maximales des taux d'argile au sein d'une même couche sont assez forts. Ces écarts sont bien illustrés par les profils argileux des minima et des maxima (figure 15) et par les valeurs des coefficients de variation qui se situent au environ de 30 % dans les couches de surface et de 40 % dans les autres couches. Ce résultat traduit une assez forte variabilité spatiale de ce paramètre dans les sols étudiés. Cependant, il est utile de remarquer que les valeurs moyennes de ce paramètre sont homogènes dans le profil, elles sont comprises entre 42 et 48 % d'argile. Le profil argileux

moyen, illustré par la figure 15, montre bien cette homogénéité de la distribution des taux d'argile dans le profil et le caractère argileux des sols étudiés. Ce résultat est bien illustré par la figure 14 qui révèle que la quasi-majorité des couches de sol étudiées sont argileux à argilo-limoneux.

1.2. Le limon

Les taux de limon varient entre 4 % et 83 % (tableau IV). Ce résultat traduit une assez forte hétérogénéité spatiale de ce paramètre ($15 \% < CV < 30 \%$), en particulier dans les couches profondes. Les profils limoneux des minima et des maxima (figure 16) illustrent parfaitement cette hétérogénéité. Toutefois, il faut remarquer que 70 % environ des échantillons ont des taux de limon qui dépassent les 30 %, ce qui dénote une certaine richesse des sols en cet élément. De même, les valeurs moyennes des taux de limons, qui sont d'ailleurs très proches de celles des médianes, varient entre 34 % et 37 % ce qui signifie que le profil limoneux moyen est très homogène comme illustré par la figure 16. Ce caractère limoneux de ces sols est bien mis en évidence par la figure 14 qui montre que la majorité des classes texturales contiennent des quantités appréciables de limons (Clay, Silty clay, Clay loam et Loam).

1.3. Le sable

Le tableau IV révèle que la fraction sableuse est la fraction texturale qui varie le plus dans les sols étudiés. En effet, les taux de sable varient d'environ 0,4 % à plus de 87 % avec des CV compris entre 74 % et 100 %, d'où une forte variabilité spatiale de ce paramètre. Ce résultat est bien confirmé par les statistiques qui montrent que 25 % des échantillons contiennent environ moins de 5 % de sable et que 25 % des autres échantillons en contiennent des taux supérieurs à des taux compris entre 23 % et 32 % selon la couche de sol considérée. Les profils sableux des minima et des maxima de la figure 17 illustrent cette forte variabilité spatiale des taux de sable des sols étudiés. Cependant, le profil sableux moyen est homogène ($13 \% < \text{sable} < 20 \%$). Cependant, la figure 14 révèle que la texture d'environ moins de 20 échantillons est dominée par le sable (sandy clay à sand).

Au total, nous pouvons dire que quelle que soit la fraction granulométrique considérée, celle-ci varie assez fortement dans l'espace et dans le profil. Cette variation est dans l'ordre Sable > Argile > Limon. De même, il ressort que la texture est dominée par la fraction argileuse qui est suivie par la fraction limoneuse et en dernier par la fraction sableuse. Les classes texturales dominantes sont dans l'ordre Clay > Silty Clay > Clay loam > Loam. Les fractions

Sandy sont très peu représentées. Les profils texturaux moyens sont homogènes et se situent dans l'ordre profil argileux (42 % < argile < 48 %) > profil limoneux (34 % < limon < 37 %) > profil sableux (13 % < sable < 20 %).

Tableau IV. Statistiques descriptives de la granulométrie des 5 couches du sol

Statistique	H1			H2			H3			H4			H5		
	A1 (%)	L1 (%)	S1 (%)	A2 (%)	L2 (%)	S2 (%)	A3 (%)	L3 (%)	S3 (%)	A4 (%)	L4 (%)	S4 (%)	A5 (%)	L5 (%)	S5 (%)
Nb. d'échantillons	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
Minimum	5,71	20,59	1,21	16,06	23,43	1,62	8,69	3,63	0,55	9,70	3,95	0,38	6,46	11,41	0,40
1er Quartile	40,35	32,62	8,79	38,13	30,08	5,01	30,35	28,40	5,83	29,09	33,33	5,71	29,70	29,75	5,45
Médiane	51,26	34,00	15,11	51,36	36,10	10,30	47,73	36,22	11,84	43,89	38,84	13,78	46,06	36,07	10,56
Moyenne	48,15	34,24	17,66	48,98	37,64	13,59	44,94	34,34	20,82	42,21	37,57	20,22	43,22	37,17	19,60
3ème Quartile	57,32	37,58	23,17	59,04	41,75	23,66	57,22	40,63	29,02	58,28	41,52	30,01	57,22	44,77	32,03
Maximum	68,37	47,85	69,28	73,94	63,90	37,52	74,95	49,97	87,67	67,27	82,71	72,47	70,10	78,63	71,95
Ecart-type	12,32	5,03	13,06	13,98	9,49	10,61	16,98	10,01	20,75	17,39	11,42	18,74	17,58	11,30	18,72
CV (%)	26	15	74	29	25	78	38	29	100	41	30	93	41	30	95

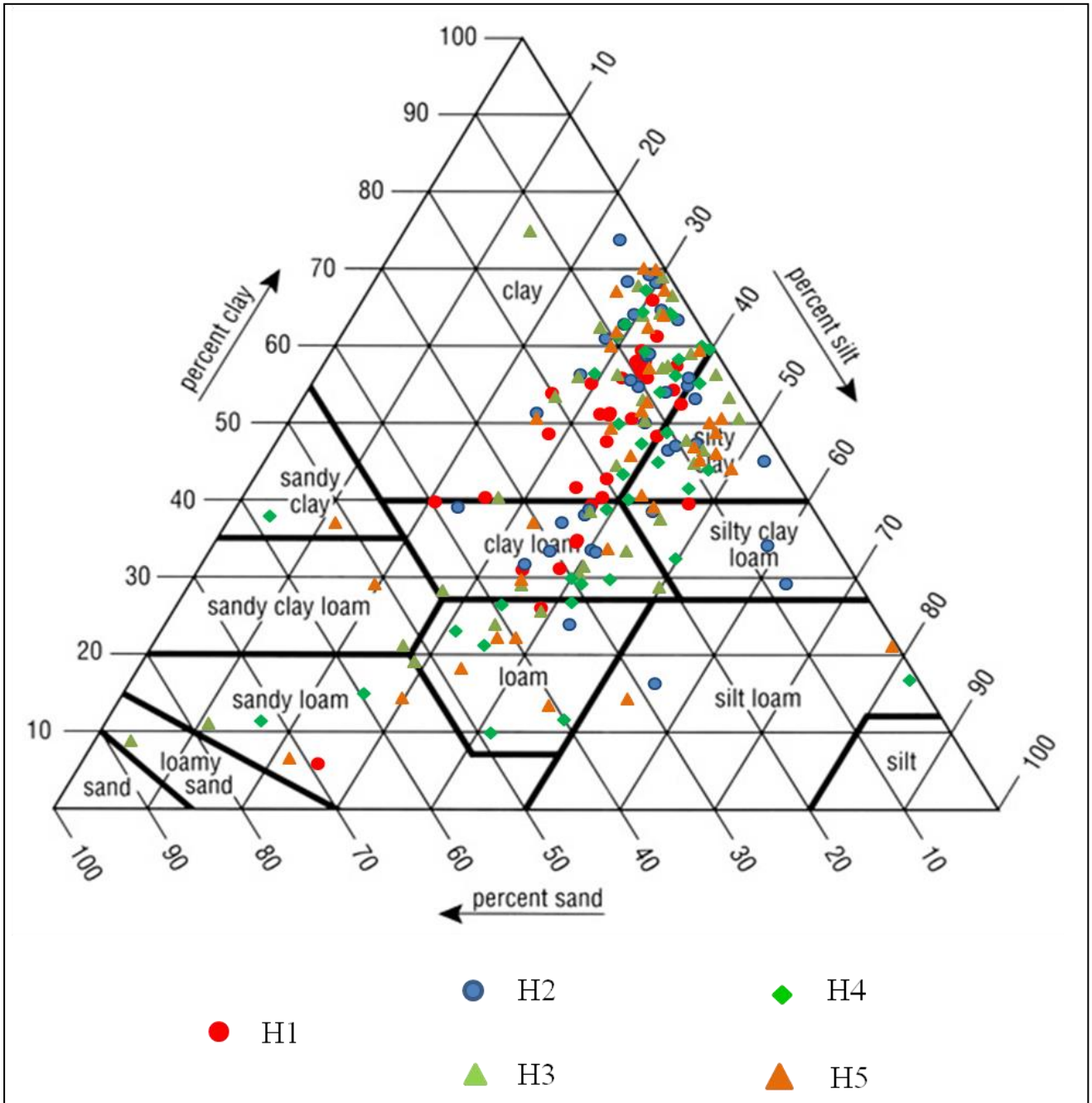


Figure 14: Diagramme textural des sols de Hmadna

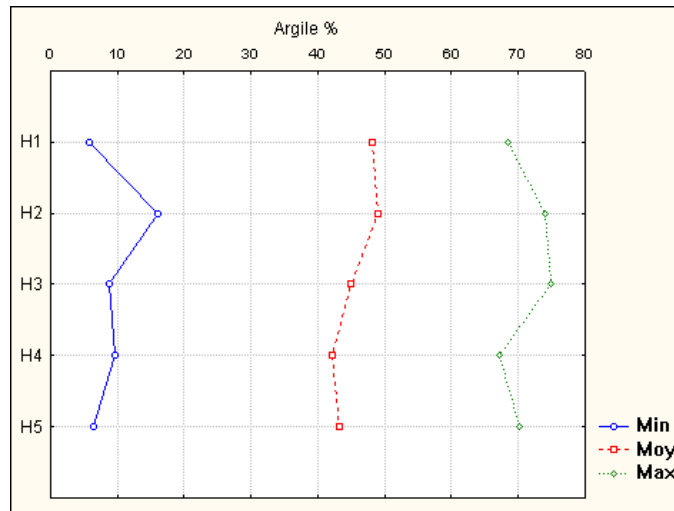


Figure 15: Profils d'argile

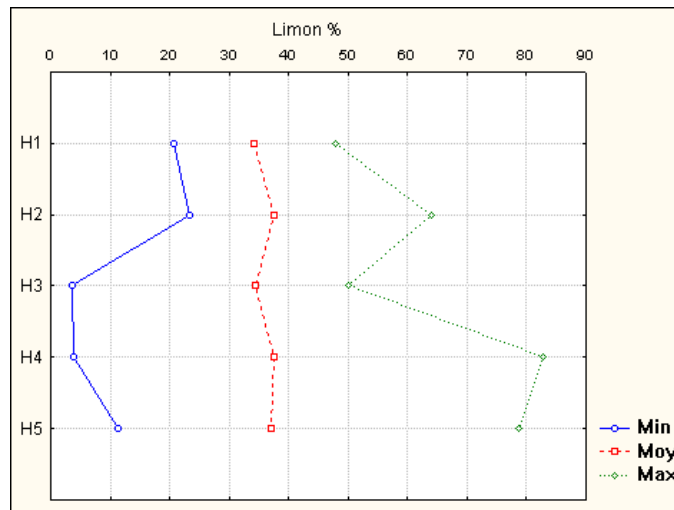


Figure 16: Profils de limon

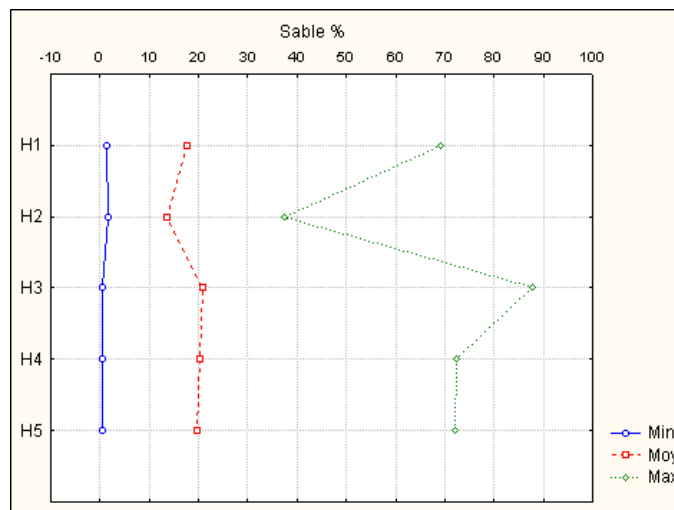


Figure 17: Profils de sable

2. L'humidité pondérale (Hp%)

Les résultats relatifs à Hp % sont présentés dans le tableau V.

Tableau V. Statistiques descriptives de Hp%

Statistique	H1	H2	H3	H4	H5
Nombre d'échantillons	37	37	37	37	37
Minimum	5,71	7,55	8,58	6,74	8,75
1er Quartile	8,46	11,87	13,78	15,42	15,52
Médiane	9,94	15,46	17,64	19,09	19,12
Moyenne	10,09	15,13	17,46	18,14	18,95
3ème Quartile	12,07	18,44	21,67	21,63	22,21
Maximum	14,85	21,92	24,23	26,63	30,85
Variance	6,26	15,50	21,08	22,71	25,31
Ecart-type	2,50	3,94	4,59	4,77	5,03
CV (%)	25	26	26	26	27

En fonction de la couche de sol considérée, le tableau V montre que les taux d'humidité varient entre 6 % et 9 % pour les valeurs minimales et entre 15 et 31 % pour les valeurs maximales. Ceci traduit une variabilité spatiale moyenne à forte de ce paramètre dans les sols étudiés ($CV \approx 25\%$). Les écarts entre les minima et les maxima sont assez importants et augmentent selon la profondeur. Ils sont d'environ 10 % en surface et de 22 % en profondeur. Les profils hydrique des minima et des maxima (figure 18) illustrent bien ce résultat et montrent, en plus, que les couches profondes sont plus humides que celles de surface. Par ailleurs, le profil hydrique moyen confirme cette tendance et montre que les taux d'humidité augmentent selon la profondeur du sol. Ces taux d'humidité sont de l'ordre de 10 % en surface et 18 % en profondeur, soit un écart moyen d'humidité entre le haut et le bas du profil de 8 % environ. Ce résultat signifie que lors de la période de prélèvement des échantillons, le sol était plus humide en bas qu'en haut. Ce phénomène ne peut être expliqué que par la connaissance du régime hydrique de la zone d'étude (présence d'une nappe superficielle à faible profondeur, remontée capillaire, drainage...) et des événements météorologiques (pluies, températures et vents) qui ont prévalu avant et pendant l'échantillonnage.

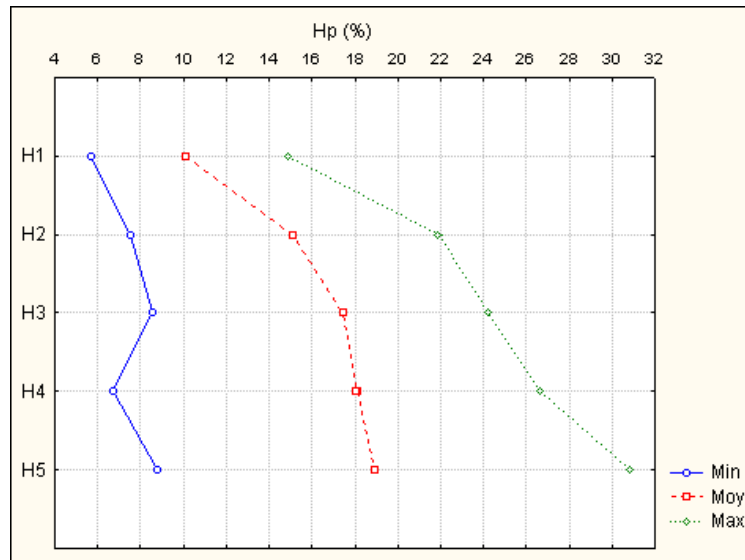


Figure 18 : Profils d'Hp (%)

3. pH_{ps}

Le tableau VI présente les données relatives au pH de l'extrait de pâte saturée (pH_{ps}). Les résultats indiquent que tous les échantillons sont neutres à très basiques avec des valeurs extrêmes qui se situent entre 7,10 et 8,85. Les valeurs moyennes du pH_{ps} , quant à elles, varient entre 7,96 et 7,57. Ce résultat signifie que le pH_{ps} moyen des sols étudiés est homogène. Ce résultat est confirmé par les CV qui sont tous très faibles ($CV < 5\%$) malgré que l'écart entre les deux valeurs extrêmes est supérieur à l'unité qui, sur le plan pédologique, représente un très grand écart. La figure 19 montre que les écarts sont plus grands en surface qu'en profondeur et que le profil moyen des pH_{ps} est décroissant.

Tableau VI. Statistiques descriptives de pH_{ps}

Statistique	H1	H2	H3	H4	H5
Nb. d'échantillons	37	37	37	37	37
Minimum	7,10	7,23	7,10	7,14	7,15
1er Quartile	7,71	7,55	7,52	7,37	7,44
Médiane	7,94	7,77	7,65	7,54	7,59
Moyenne	7,96	7,77	7,68	7,57	7,59
3ème Quartile	8,20	8,02	7,75	7,71	7,71
Maximum	8,85	8,64	8,41	8,14	8,07
Variance	0,16	0,11	0,09	0,06	0,04
Ecart-type	0,39	0,33	0,29	0,24	0,20
CV (%)	5	4	4	3	3

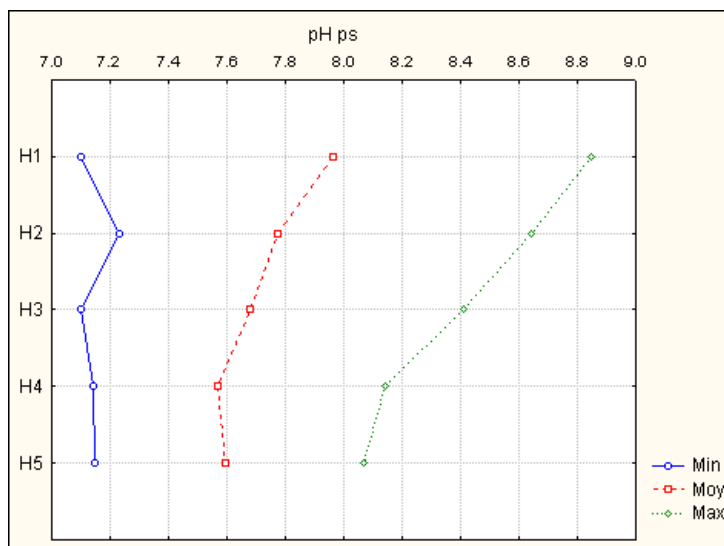


Figure 19 : Profils de pH_{ps} (%)

4. Le calcaire total (%)

Le tableau VII montre que les taux de calcaire extrêmes se situent entre 8 % pour les minima et 15 à 18 % pour les maxima. Les taux moyens de calcaire varient très peu dans le profil, ils sont compris entre 12 et 13 %. Ces résultats suggèrent que les sols étudiés sont moyennement pourvus en calcaire et que la distribution de ce paramètre est homogène dans l'espace et dans le profil. En effet, les faibles valeurs des CV (< 18 %) et l'allure des trois profils calcaires de la figure 20 le confirment.

Tableau VII. Statistiques descriptives du calcaire (%)

Statistique	H1	H2	H3	H4	H5
Nb. d'observations	37	37	37	37	37
Minimum	8,49	8,49	8,91	8,91	8,06
1er Quartile	11,03	11,03	11,88	11,46	12,31
Médiane	11,88	12,31	12,73	13,16	14,00
Moyenne	11,80	12,38	13,15	13,35	13,33
3ème Quartile	12,73	14,00	14,43	14,43	14,86
Maximum	15,28	16,98	18,25	18,25	17,40
Variance	2,19	4,48	5,03	5,56	5,53
Ecart-type	1,48	2,12	2,24	2,36	2,35
CV (%)	13	17	17	18	18

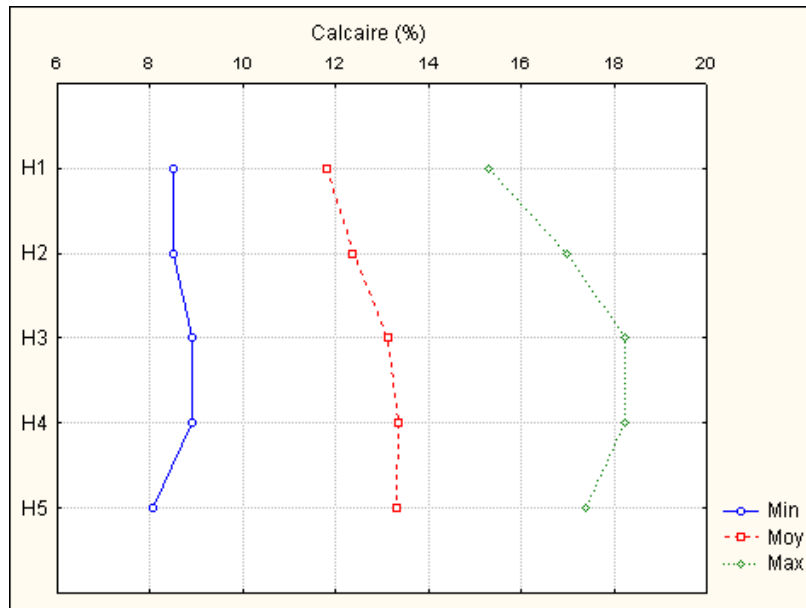


Figure 20 : Profils de calcaire (%)

5. Le gypse (%)

Les résultats (tableau VIII) révèlent que les sols étudiés sont très faiblement gypseux. En effet, les taux extrêmes des taux de gypse varient de l'état de trace (< 1 %) à environ 5 %. Les taux moyens en cet élément, qui sont de l'ordre de 2 %, sont constants dans le profil comme illustré par la figure 21. Toutefois, ces taux de gypse, malgré leurs faibles teneurs dans le sol, varient fortement dans l'espace comme indiqué par les CV qui avoisinent les 60 %.

Tableau VIII. Statistiques descriptives du gypse (%)

Statistique	H1	H2	H3	H4	H5
Nb. d'échantillons	37	37	37	37	37
Minimum	0.15	0.35	0.44	0.38	0.23
1er Quartile	1.41	1.68	1.32	1.34	1.17
Médiane	2.27	2.60	2.14	2.39	2.30
Moyenne	2.47	2.94	2.86	2.82	2.65
3ème Quartile	2.93	4.72	4.79	4.30	4.02
Maximum	5.39	5.59	5.28	5.35	5.49
Variance	2.31	2.82	2.91	2.56	2.70
Ecart-type	1.52	1.68	1.71	1.60	1.64
CV (%)	61	57	60	57	62

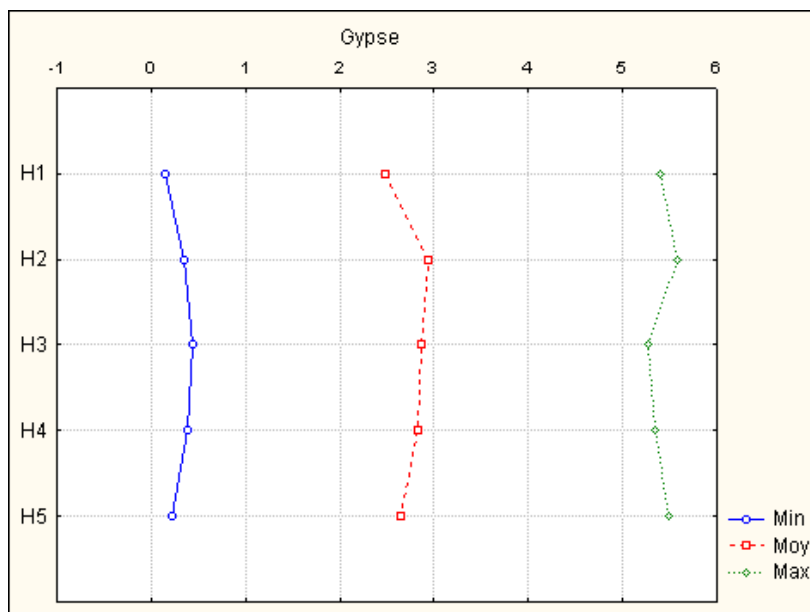


Figure 21 : Profils du gypse

6. La CE_{ps} ($dS.m^{-1}$)

Les données relatives à la CE_{ps} sont compilées dans le tableau IX et illustrées par la figure 22.

Tableau IX. Statistiques descriptives de CE_{ps} ($dS.m^{-1}$)

Statistique	H1	H2	H3	H4	H5
Nb. d'échantillons	37	37	37	37	37
Minimum	1,09	3,54	3,69	4,19	4,96
1er Quartile	3,46	11,36	14,64	17,63	18,78
Médiane	7,47	16,04	20,17	23,72	23,35
Moyenne	12,46	21,81	25,91	26,34	26,31
3ème Quartile	15,81	27,26	33,04	33,62	31,94
Maximum	70,24	66,23	72,76	79,48	70,98
Variance	193,33	242,34	246,12	221,10	176,80
Ecart-type	13,90	15,57	15,69	14,87	13,30
CV (%)	112	71	61	56	51

Le tableau IX révèle que les valeurs minimales de la CE_{ps} varient entre $1 dS.m^{-1}$ en surface et $5 dS.m^{-1}$ en profondeur. Ce résultat suggère que les sols étudiés peuvent être par endroits peu salés à non salés dans les trois couches de surface, c'est-à-dire entre 0 et 90 cm de profondeur. Au-delà de cette profondeur, tous les sols étudiés deviennent salés ($CE_{ps} > 4 dS.m^{-1}$). Ce résultat est bien illustré par le profil salin des minima (figure 22) dont l'allure est descendante. En ce qui concerne les valeurs maximales de la CE_{ps} , le tableau IX indique qu'elles varient

entre 70 et 79 dS.m^{-1} . Ceci signifie que la salinité peu être excessive dans les sols étudiés et ce, quelle que soit la couche de sol considérée. Les grands écarts entre les profils salins des minima et des maxima mettent en évidence la grande variabilité spatiale de ce paramètre, variabilité que confirment d'ailleurs les CV qui sont tous très forts ($> 50\%$) et qui atteignent même plus de 110 % en surface.

Le profil salin moyen suggère que le sol moyen de cette zone est partout salé et que la salinité augmente avec la profondeur. En effet, la CE_{ps} moyenne qui est de 12 dS.m^{-1} en surface passe à 26 dS.m^{-1} en profondeur. Le profil salin moyen est donc de type descendant comme illustré par la figure 22. Les valeurs des médianes qui se situent toutes au-dessous des valeurs des moyennes suggèrent une certaine dissymétrie des données de la CE_{ps} avec un léger avantage au profit des faibles valeurs.

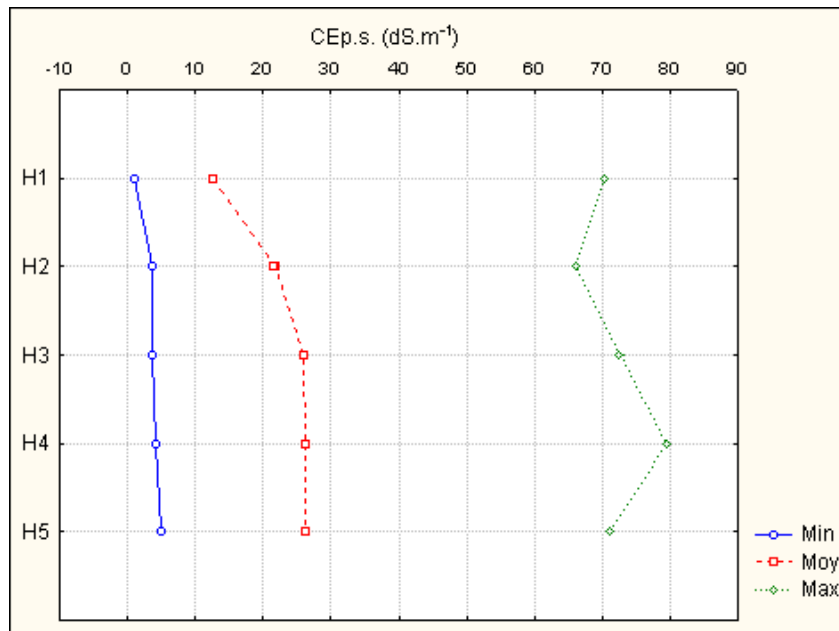


Figure 22 : Profils de CE_{ps}

7. La CEM

Les lectures électromagnétiques ont été effectuées pour cinq (05) niveaux de profondeur en position verticale [0 à 30 cm (EMv1) ; 0 à 60 cm (EMv2) ; 0 à 90 cm (EMv3) ; 0 à 120 cm (EMv4) ; 0 à 150 cm (EMv5)], et pour trois (03) niveaux de profondeur en position horizontale [0 à 30 cm (EMh1) ; 0 à 60 cm (EMh2) ; 0 à 90 cm (EMh3)]. Les figures 23 et 24 schématisent les deux positions.

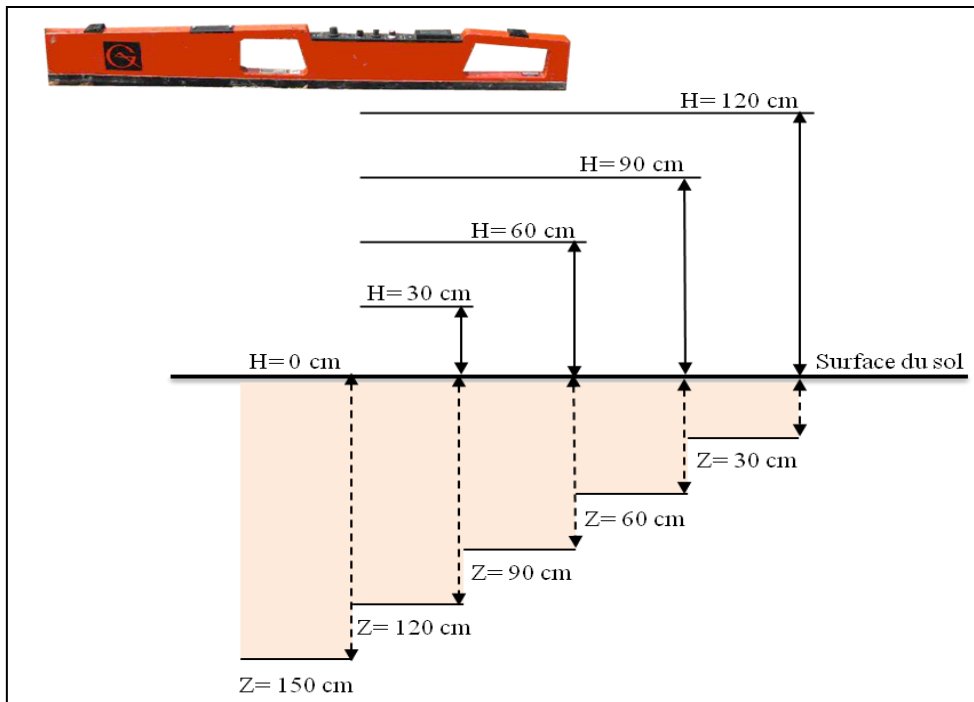


Figure 23 : Prospection électromagnétique en position verticale

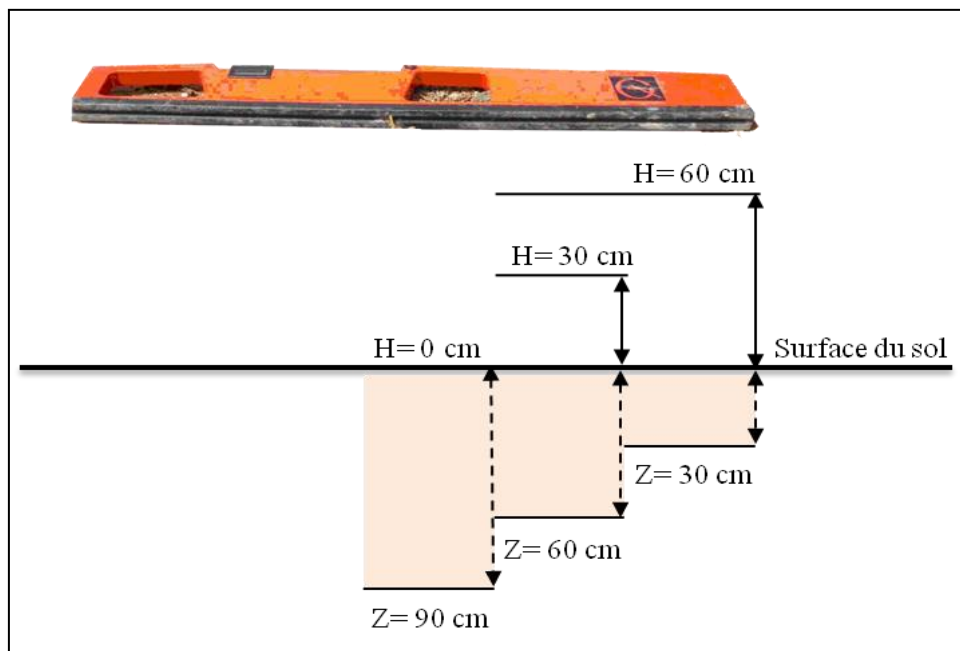


Figure 24 : Prospection électromagnétique en position horizontale

Les résultats de la CEM sont compilés dans le tableau X et illustrés par les figures 25 et 26.

Tableau X. Résultats statistiques des lectures de l'EM 38

Statistique	EMh1	EMv1	EMh2	EMv2	EMh3	EMv3	EMv4	EMv5
Nb. de lectures	317	317	317	317	317	317	317	317
Minimum	22	27	31	40	51	44	57	70
1er Quartile	60	59	94	82	139	107	146	207
Médiane	83	80	125	109	193	147	200	282
Moyenne	87,41	81,51	137,61	113,69	216,37	152,70	213,91	300,03
3ème Quartile	106	100	167	138	266	187	263	366
Maximum	264	195	463	281	828	416	617	882
Ecart-type	38,13	29,16	63,89	41,08	113,16	59,89	91,05	132,53
CV (%)	44	36	46	36	52	39	43	44

Les résultats du tableau X montre que pour la gamme des lectures horizontales les valeurs obtenues varient entre 22 et 264 pour EMh1, entre 31 et 463 pour EMh2, et entre 51 et 828 pour EMh3. Pour la gamme des lectures verticales, les lectures varient entre 27 et 195 pour EMv1, entre 40 et 281 pour EMv2, entre 44 et 416 pour EMv3, entre 57 et 617 pour EMv4, et enfin entre 70 et 882 pour EMv5.

L'observation des résultats par couches révèle que pour les deux positions, la moyenne est supérieure à la médiane. En conséquence, la distribution des lectures semble être plus étalée vers les grandes valeurs. L'analyse des moyennes indique que les lectures EMh et EMv tendent à augmenter en fonction de la profondeur. Les profils salins sont donc descendants comme le montrent les figures 25 et 26.

Pour ce qui est de la variabilité, les CV % observés entre les lectures, pour chaque orientation, sont élevées à très élevées ($36\% < CV < 52\%$). Ceci peut être expliqué par le grand écart entre les valeurs minimales et les valeurs maximales. De plus, l'observation des figures 25 et 26 montre que l'étendue évolue progressivement vers la profondeur. Globalement, il est utile de noter que l'écart entre les lectures horizontales est plus marqué par rapports à celui des lectures verticales.

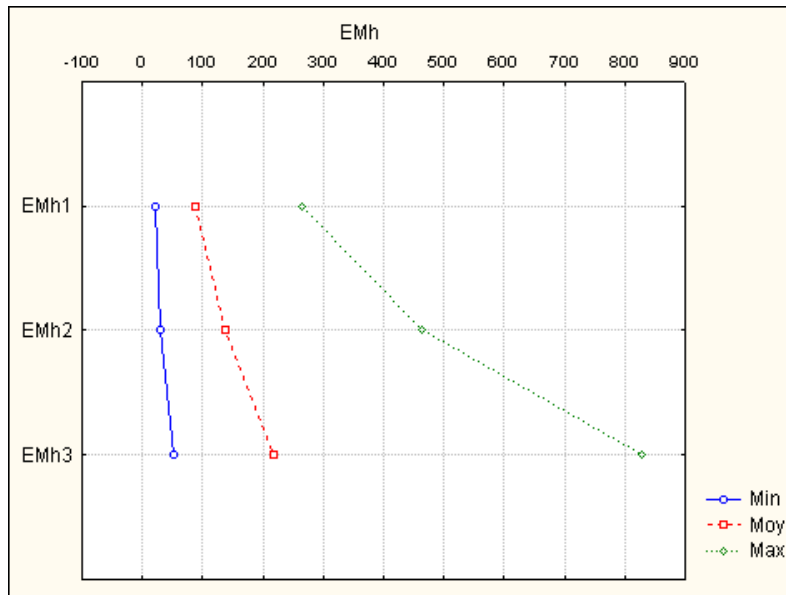


Figure 25 : Profils de l'EMh

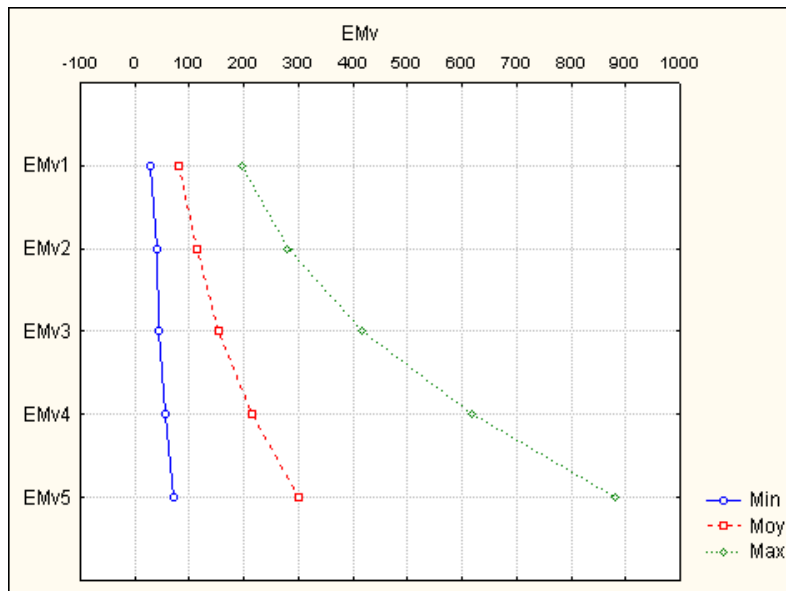


Figure 26 : Profils de l'EMv

La comparaison des lectures verticales et horizontales à partir de la surface du sol (Job et *al.* 1987), dans notre cas EMv5 et EMh3, suggère que le profil salin est descendant avec une accumulation des sels en profondeur. En effet, il ressort clairement que EMh3 (EMh3 moy.= 216,37) est inférieure à EMv5 (EMv5 moy.= 300,03).

8. Relations entre la CE_{ps} et les paramètres pédologiques étudiés

Les traitements sont réalisés sur la base des régressions simples entre la CE_{ps} et les huit (08) paramètres pédologiques étudiés (argile, limon, sable, calcaire, gypse, pH_{ps} , $pH_{1/2,5}$, l'humidité pondérale). Les résultats des régressions sont résumés dans le tableau XI.

Tableau XI. Matrice de corrélations entre CE_{ps} et les différents paramètres étudiés

Variables		A (%)	L (%)	S (%)	Calc.t (%)	Gypse(%)	pH_{ps}	Hp(%)	
CE_{ps} ($dS.m^{-1}$)	H1	r	0.023	-0.297	0.090	-0.058	-0.070	-0.406	0.228
		p	0.894	0.075	0.594	0.735	0.680	0.013	0.175
	H2	r	0.157	-0.090	-0.112	-0.153	0.026	-0.478	0.252
		p	0.353	0.597	0.508	0.366	0.879	0.003	0.133
	H3	r	0.183	-0.172	-0.065	-0.174	-0.350	-0.469	0.157
		p	0.277	0.309	0.702	0.302	0.034	0.003	0.354
	H4	r	-0.012	-0.019	0.023	-0.022	-0.268	-0.571	-0.036
		p	0.942	0.913	0.894	0.899	0.108	0.000	0.832
	H5	r	-0.004	-0.115	0.073	0.204	-0.113	-0.106	-0.219
		p	0.981	0.497	0.666	0.225	0.506	0.534	0.192

Les résultats indiquent que les seules relations statistiquement significatives de la CE_{ps} avec les paramètres pédologiques sont celles avec le pH_{ps} . Cependant, ces relations, même si elles sont significatives ($P < 0,05$), elles sont néanmoins faibles ($0,40 < r < 0,57$). Ce résultat est contraire à celui de Djili (2000), Saidi (2004), et Douaoui (2005) qu'ils ont trouvé une corrélation statistiquement significative positive mais reste faible, et à celui de Hadj Miloud (2010) qui n'a pas trouvé de corrélation significative.

9. Conclusion

Les résultats ont montré que la zone d'étude est caractérisée par une texture à prédominance argileuse et argilo-limoneuse, un taux d'humidité qui ne dépasse pas les 30%, un pH neutre à très basique, modérément calcaire (Calc. tot. $< 18,25\%$), un taux de gypse bas à moyen (gypse $< 5,59\%$). A propos de la salinité, les sols étudiés peuvent être par endroits peu salés à non salés dans les trois couches de surface (entre 0 et 90 cm), et à partir de la quatrième couche (entre 90 et 150 cm) tous les sols étudiés deviennent salés ($CE_{ps} > 4 dS.m^{-1}$). Les lectures électromagnétiques montrent une accumulation de sels en profondeur.

Le paramètre le plus homogène dans la zone d'étude est le pH_{ps} , qui présente un CV% faible, à l'inverse du gypse et de la CE_{ps} qui présentent une variabilité très élevée. En ce qui concerne le calcaire et l'humidité pondérale ils présentent une variabilité modérée.

Pour ce qui est de la distribution en profondeur, l'humidité pondérale, la CE_{ps} , et la CEM, présentent un profil descendant, par contre les trois fractions texturales, le pH_{ps} , le gypse, et le calcaire présentent un profil homogène.

Chapitre II : Etalonnage de la conductivité électromagnétique

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes étapes de calibration des valeurs de la conductivité électromagnétique (CEM) mesurées par l'EM38 dans les sols salés de la région de Hmadna. Le principe appliqué repose sur la transformation des mesures obtenues par cet appareil en fonction de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée d'échantillons de sols des sondages de références (37 profils).

Les différentes étapes adoptées sont les suivantes :

- Identification et essai des équations d'étalonnage,
- Choix de l'équation d'étalonnage à utiliser,
- Application de l'équation choisie et détermination de la conductivité calculée.

1. Identification et essai d'équations d'étalonnage

En utilisant des équations de régressions simples et multiples, on recherche l'équation qui permet de transformer les mesures de l'EM38 en mode vertical (EMv) en conductivité électrique des extraits de pâtes saturées du sol (CE_{ps}) pour cinq (05) intervalles de profondeur compris entre 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm, 90-120 cm, et 120-150 cm. Les mesures verticales ont été choisies à cause de leur grande capacité d'exploration qui peut atteindre 1,5 à 2 m de profondeur dans un profil homogène (Lesch et *al.*, 2005).

Le premier étalonnage est basé sur l'utilisation de la régression simple pour trouver la relation statistique entre les mesures électromagnétiques verticales et les valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée des cinq couches. La régression utilisée par Herrero et *al.* (2003) est réalisée sur les valeurs de la conductivité électrique mesurées (CE_{ps}) des cinq couches (variable expliquée) et les lectures électromagnétiques verticales de 0 à 150 cm (EMv5) (variable explicative).

Le deuxième étalonnage est basé sur les régressions multiples utilisées par Rhoades et Corwin (1981). Il consiste à relier les mesures verticales de l'EM38 des cinq couches (variables explicatives) avec la CE_{ps} pour chacune des cinq couches (variable expliquée).

Les deux types d'étalonnage ont permis d'aboutir aux relations linéaires présentées dans le tableau XII.

Tableau XII. Résultats des régressions linéaires

	Equations de régression	r	Sgn
Herrero et al. (2003)	$CE_{ps1} = 0,060EMv5 - 6,948$	0,782	***
	$CE_{ps2} = 0,065EMv5 + 0,764$	0,758	***
	$CE_{ps3} = 0,067EMv5 + 4,196$	0,776	***
	$CE_{ps4} = 0,057EMv5 + 7,867$	0,697	***
	$CE_{ps5} = 0,054EMv5 + 8,985$	0,730	***
Rhoades et Corwin (1981)	$CE_{ps1} = 0,268EMv1 - 0,460EMv2 + 0,064Emv3 + 0,129Emv4 + 0,025EMv5 - 3,131$	0,805	***
	$CE_{ps2} = 0,118EMv1 + 0,001EMv2 + 0,069Emv3 - 0,230Emv4 + 0,169EMv5 - 2,192$	0,787	***
	$CE_{ps3} = 0,266EMv1 - 0,128EMv2 + 0,144Emv3 - 0,223Emv4 + 0,140EMv5 + 0,185$	0,803	***
	$CE_{ps4} = 0,232EMv1 - 0,106EMv2 + 0,577Emv3 - 0,310Emv4 - 0,003EMv5 - 2,555$	0,750	***
	$CE_{ps5} = 0,248EMv1 - 0,090EMv2 + 0,397Emv3 - 0,231Emv4 + 0,011EMv5 + 0,642$	0,770	***

*** : très hautement significative

Les différentes équations présentées dans ce tableau définissent des relations très hautement significatives. Dans l'ensemble, pour les deux types d'étalonnage, ce sont les équations de régression de CE_{ps1} qui se caractérisent par les coefficients de corrélation les plus élevés ($r = 0,782$; $r = 0,805$), et celles de CE_{ps4} qui se caractérisent par les coefficients de corrélation les moins élevés ($r = 0,697$; $r = 0,750$). La comparaison entre les coefficients de corrélation des deux équations pour chaque niveau d'étude révèle que r (Rhoades et Corwin, 1981) sont supérieurs aux r (Herrero et al. 2003).

2. Choix de l'équation d'étalonnage

En appliquant les deux équations d'étalonnage, on obtient deux valeurs de CE calculée dans chaque point de mesure ($CE_{Rhoades \text{ et Corwin (1981)}}$ et $CE_{Herrero \text{ et al. (2003)}}$). Pour choisir l'équation d'étalonnage la plus significative, nous avons effectué deux tests statistiques: (i) le t-test de la comparaison des moyennes et (ii) le test de corrélation.

2.1. Test de comparaison de moyennes

Ce test permet de fournir les éléments nécessaires pour argumenter la validité des deux valeurs de la CE calculée ($CE_{Rhoades \text{ et Corwin (1981)}}$ et $CE_{Herrero \text{ et al. (2003)}}$) par rapport aux valeurs de la CE_{ps} . Ce test a montré qu'au niveau de signification 0,05, les différences des moyennes entre CE_{ps} et $CE_{Rhoades \text{ et Corwin (1981)}}$ ($t = -0,113$; $P = 0,910$) d'une part et entre CE_{ps} et $CE_{Herrero \text{ et al. (2003)}}$ ($t = -0,074$; $P = 0,941$) d'autre part sont non significatives. De même, la différence de moyennes entre $CE_{Rhoades \text{ et Corwin (1981)}}$ et $CE_{Herrero \text{ et al. (2003)}}$ ($t = -0,0931$; $P = 0,926$) est également non significative. Ce résultat signifie que les deux méthodes d'étalonnage (Rhoades et Corwin, 1981) et (Herrero et al. 2003) peuvent être utilisées pour l'évaluation de la CE calculée.

2.2. Test de corrélation

Les corrélations entre CE_{ps} , $CE_{\text{Rhoades et Corwin (1981)}}$ et $CE_{\text{Herrero et al. (2003)}}$ sont portées dans le tableau XIII.

Tableau XIII. Matrice de corrélation entre les différentes valeurs de la conductivité électrique

Variables		CE_{ps}	$CE_{\text{Rhoades et Corwin (1981)}}$	$CE_{\text{Herrero et al. (2003)}}$
CE_{ps}	R	1	0.807	0.777
	P	0	< 0.0001	< 0.0001
$CE_{\text{Rhoades et Corwin (1981)}}$	R	0.807	1	0.962
	P	< 0.0001	0	< 0.0001
$CE_{\text{Herrero et al. (2003)}}$	R	0.777	0.962	1
	P	< 0.0001	< 0.0001	0

D'après ce tableau, les coefficients de corrélations obtenus entre les trois paramètres sont tous très hautement significatifs ($p < 0,0001$). Ce résultat conforte celui du t-test et permet de conclure que les deux équations d'étalonnage peuvent être utilisées pour la prédiction de la CE. Cependant, le tableau XIII révèle aussi que la corrélation entre CE_{ps} et $CE_{\text{Rhoades et Corwin (1981)}}$ ($r = 0,807$) est plus forte que celle entre CE_{ps} et $CE_{\text{Herrero et al. (2003)}}$ ($r = 0,777$). De ce fait, nous concluons que l'équation de Rhoades et Corwin (1981) est celle qui prédit le mieux les valeurs de la CE et que c'est elle qui doit être utilisée dans le contexte de cette recherche.

3. Application de l'équation de Rhoades et Corwin (1981)

Dans cette étape nous avons réalisé l'étalonnage des lectures électromagnétiques de 317 points de mesure en fonction de la méthode de Rhoades et Corwin (1981). Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau XIV. Il est utile d'indiquer que nous avons rejeté les valeurs négatives. En effet, 12 valeurs négatives toutes situées en H1 ont été éliminées d'où 305 valeurs de CEC au lieu de 317.

Tableau XIV. Résultats statistiques de la CEC ($dS.m^{-1}$) selon les niveaux de profondeur

Statistiques	H1	H2	H3	H4	H5
Nombre	305	317	317	317	317
Minimum	0,023	2,799	5,597	0,846	6,910
1er Quartile	6,533	12,921	16,606	18,468	19,117
Médiane	10,505	18,653	22,925	24,759	25,025
Moyenne	11,889	19,581	23,604	24,898	25,132
3ème Quartile	15,805	24,590	28,569	29,975	29,991
Maximum	48,417	56,951	61,880	58,133	56,039
Variance	62,559	86,409	91,702	76,968	65,020
Ecart-type	7,909	9,296	9,576	8,773	8,063
CV (%)	67	47	41	35	32

Les résultats montrent que CE_c se situe entre 0,023 et 61,88 $dS.m^{-1}$. Ce résultat signifie l'existence d'une grande hétérogénéité de ce paramètre dans la parcelle et une forte amplitude entre les valeurs extrêmes de la CE_c . Le tableau XIV montre que plus de 75% des échantillons sont salins à extrêmement salins quelle que soit la couche de sol considérée. Les valeurs des moyennes oscillent entre 11,89 $dS.m^{-1}$ en surface et 25,13 $dS.m^{-1}$ en H5 et elles se rapprochent de celles des médianes. On remarque que la salinité moyenne augmente vers le bas du profil et que le profil salin moyen est descendant (figure 27). La variabilité de la CE_c est très élevée dans la première couche ($CV = 67\%$), élevée dans les trois couches sous-jacentes ($47\% < CV < 35\%$) et modérée au niveau de la dernière couche ($CV = 32\%$). Ce résultat exprime la forte variabilité de la salinité de la parcelle qui est beaucoup plus marquée en surface qu'en profondeur.

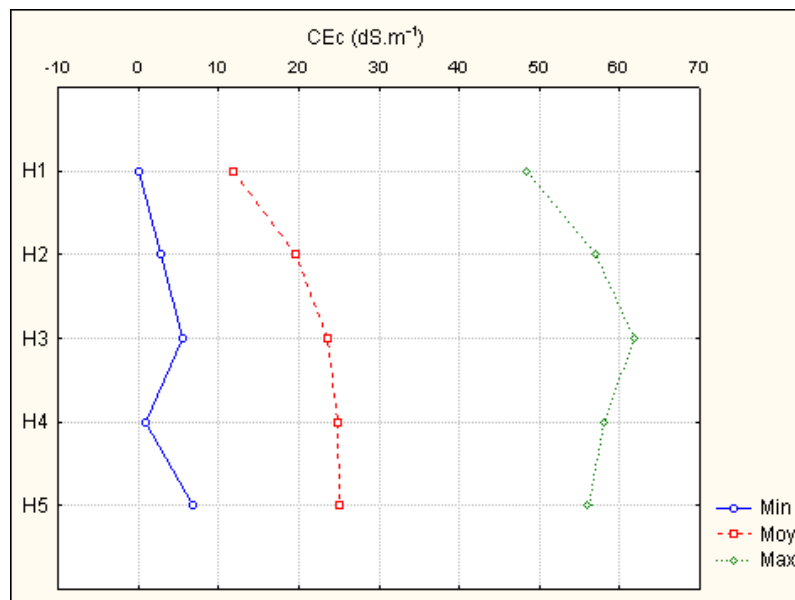


Figure 27 : Profils de CE_c ($dS.m^{-1}$)

La figure 28 montre que les profils moyens de CE_{ps} et de CE_c suivent la même allure, qu'ils sont très proches l'un de l'autre, et que la différence maximale observée entre eux ne dépasse guère les 2 $dS.m^{-1}$. Ce résultat confirme la bonne prédiction de la CE_c par les équations d'étalonnage.

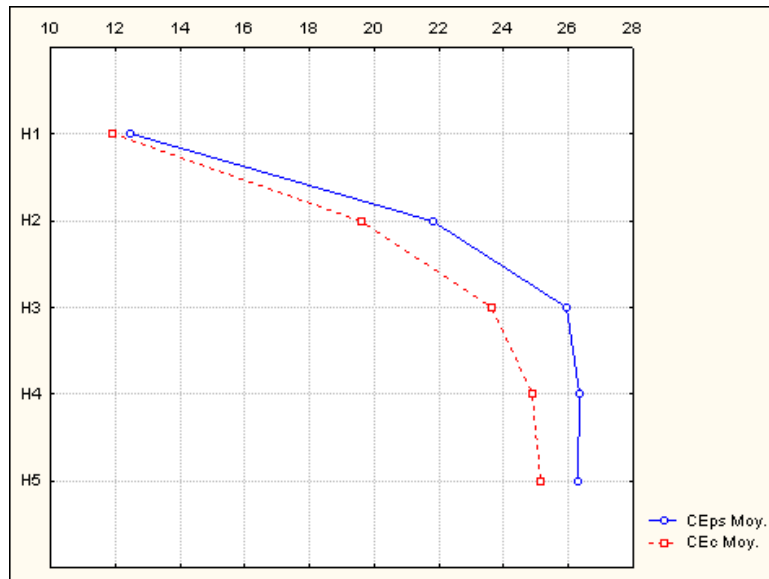


Figure 28: Comparaison entre profils moyens de CE_{ps} et CE_c

Chapitre III : Cartographie de la salinité

Après avoir obtenu les valeurs de la CEC des différentes couches, et pour dessiner les cartes d'isovaleurs relatives à chacune des couches, il est nécessaire de procéder à l'analyse de la structure spatiale de ce paramètre. Il s'agit en fait de rechercher le semivariogramme théorique qui s'ajuste le mieux au semivariogramme expérimental et qui sera utilisé pour estimer par krigeage les valeurs sur des points où le l'échantillonnage n'a pas pu être effectué.

L'évaluation spatiale de la salinité de la station d'étude a porté sur les valeurs de la CEC des cinq couches du sol [0 à 30 cm (CEc1) ; 30 à 60 cm (CEc2) ; 60 à 90 cm (CEc3) ; 90 à 120 cm (CEc4) ; 120 à 150 cm (CEc5)].

1. Etude variographique

Le variogramme est une statistique descriptive quantitative qui peut être graphiquement représentée en caractérisant la continuité spatiale de l'ensemble des données. L'étude variographique de la CEC selon les différentes couches comprend le variogramme expérimental ajusté à un modèle théorique. Elle a abouti aux résultats suivants :

1.1.La CEC1

La détection d'une anisotropie géométrique dans les variogrammes directionnels relatifs à la CEC1 montre que les directions de continuités maximales et minimales s'observent selon deux variogrammes (figure 29). Le premier variogramme est réalisé dans la direction de 15° relative à la portée maximale de 395 mètres. Le second variogramme est calculé dans la direction perpendiculaire à la première, équivalent à un angle de 105° , avec une portée minimale de 151,92 mètres. Le rapport d'anisotropie est égal au rapport de deux portées relatives aux deux variogrammes directionnels, il est alors de 2,6.

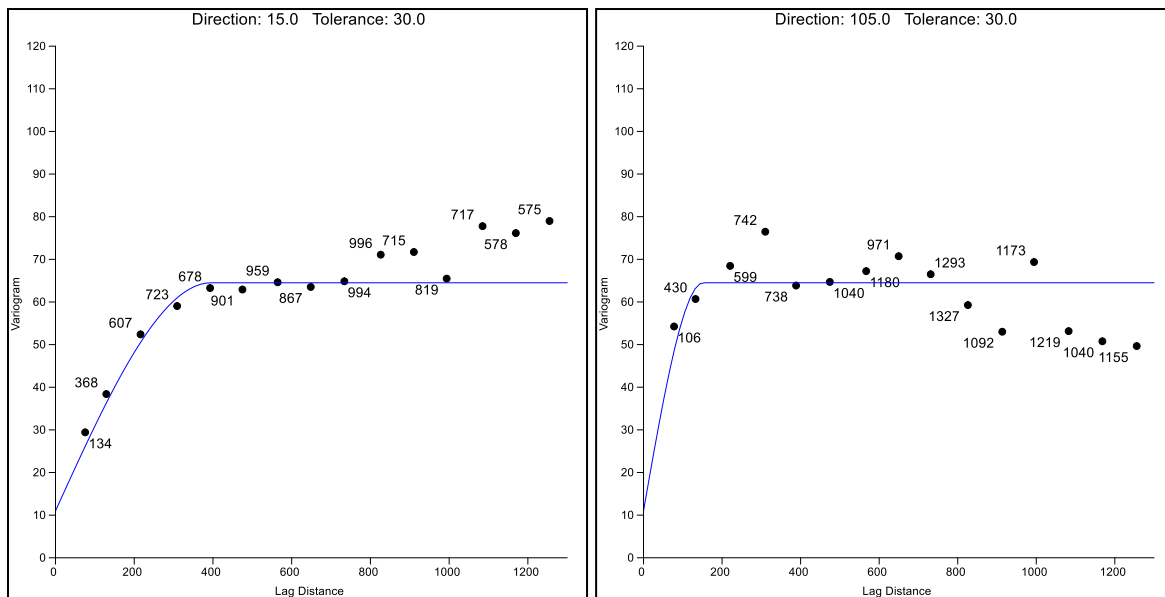


Figure 29: Variogrammes directionnels de CEC1

L'ajustement du variogramme expérimental de 15° a abouti à un modèle sphérique caractérisé par un effet de pépité de 10, un palier de 64,5 et une portée de 395 mètres.

D'après les résultats d'ajustement, il ressort l'existence d'une structuration spatiale caractérisée par un effet de pépité faible, qui représente 15,5% de la variabilité maximale. Ce dernier exprime soit des erreurs de mesures de la salinité, soit des variabilités spatiales existantes à une échelle plus petite que celle adoptée pour l'échantillonnage.

Les résultats montrent également, qu'en deçà de l'effet de pépité, il existe une corrélation spatiale entre les observations jusqu'à une distance de 395 m, au-dessus de laquelle il n'y a plus de corrélation entre les mesures.

1.2.La CEC2

Le calcul des variogrammes directionnels (figure 30), fait apparaître deux portées différentes relatives à deux directions orthogonales, une portée de 380 mètres pour la direction 15°, et une portée de 180,95 mètres pour la direction orthogonale 105°. Le rapport entre les deux portées fait ressortir l'existence d'anisotropie au sein de la parcelle. Le rapport d'anisotropie ajusté est égal à 2,1.

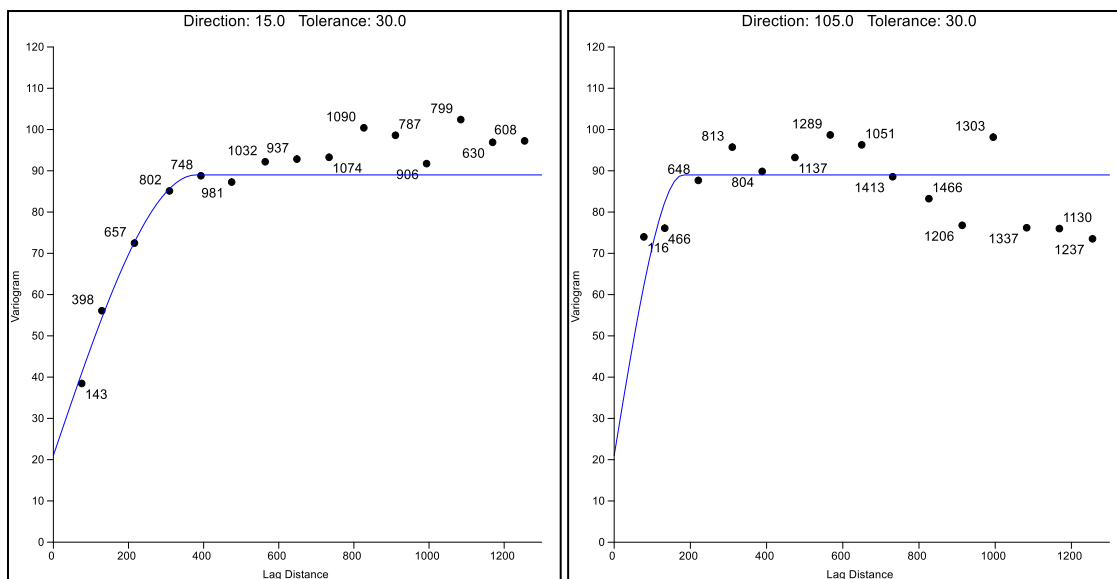


Figure 30: Variogrammes directionnels de CEC2

Le variogramme expérimental de 15° , ajusté à un modèle sphérique, est caractérisé par un effet de pépite de 20, un palier de 88 et une distance de 380 m.

L'ajustement du variogramme directionnel fait ressortir l'existence d'une structuration spatiale de la salinité caractérisée par un effet de pépite relativement élevé par rapport à celui de la première couche, il représente 22,7% de la variance spatiale maximale. Les résultats montrent également que les observations sont corrélées jusqu'à une distance de 380 m, distance au-delà de laquelle le variogramme atteint le palier et les observations ne sont plus liées spatialement les unes aux autres.

1.3.La CEC3

Les variogrammes directionnels analysés pour ce niveau de profondeur montrent que les directions de continuités maximales et minimales s'observent selon les deux directions orthogonales 15° et 105° (figure 31), avec une portée de 400 mètres et 190,5 mètres. Le rapport d'anisotropie est de 2,1.

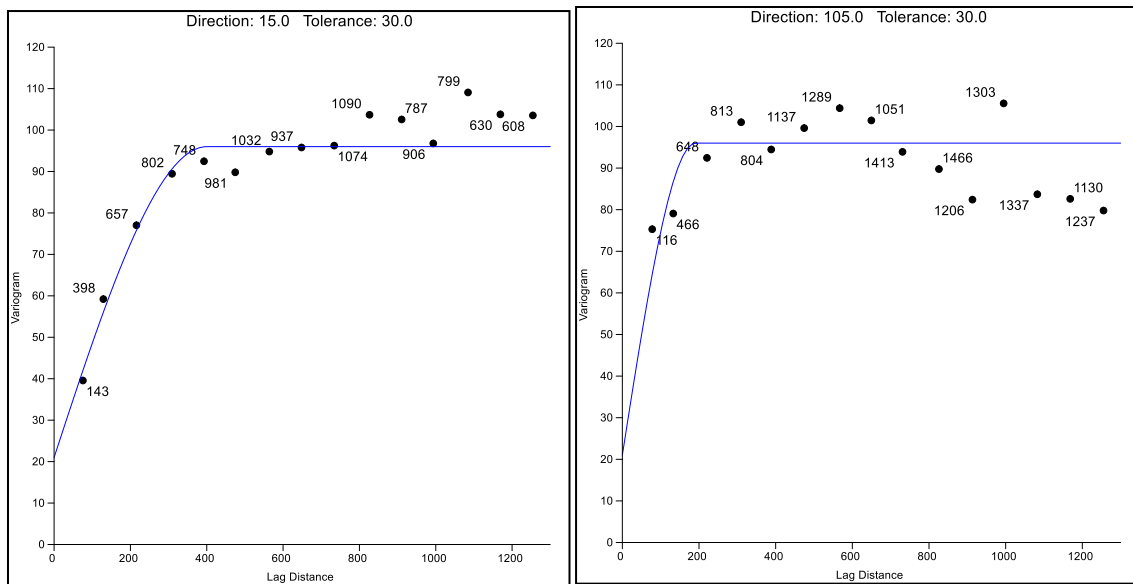


Figure 31: Variogrammes directionnels de CEC3

L'ajustement du variogramme expérimental relatif à la direction d'anisotropie 15° a conduit à un modèle sphérique, caractérisé par un effet de pépité de 20, un palier de 95, et une portée de 400 mètres.

Le résultat d'ajustement montre l'existence d'une structuration spatiale caractérisée par un effet de pépité qui représente 21% de la variabilité maximale. Le résultat montre également que les observations sont spatialement corrélées entre elles jusqu'à une distance de 400 m. La valeur élevée du palier indique une forte différence entre les mesures à grandes distances.

1.4.La CEC4

Le calcul des variogrammes dans les deux directions maximale et minimale (15° et 105°) (figure 32) fait ressortir un rapport d'anisotropie de 1,8 qui correspond au rapport entre les portées maximale (390 m) et minimale (216,7 m).

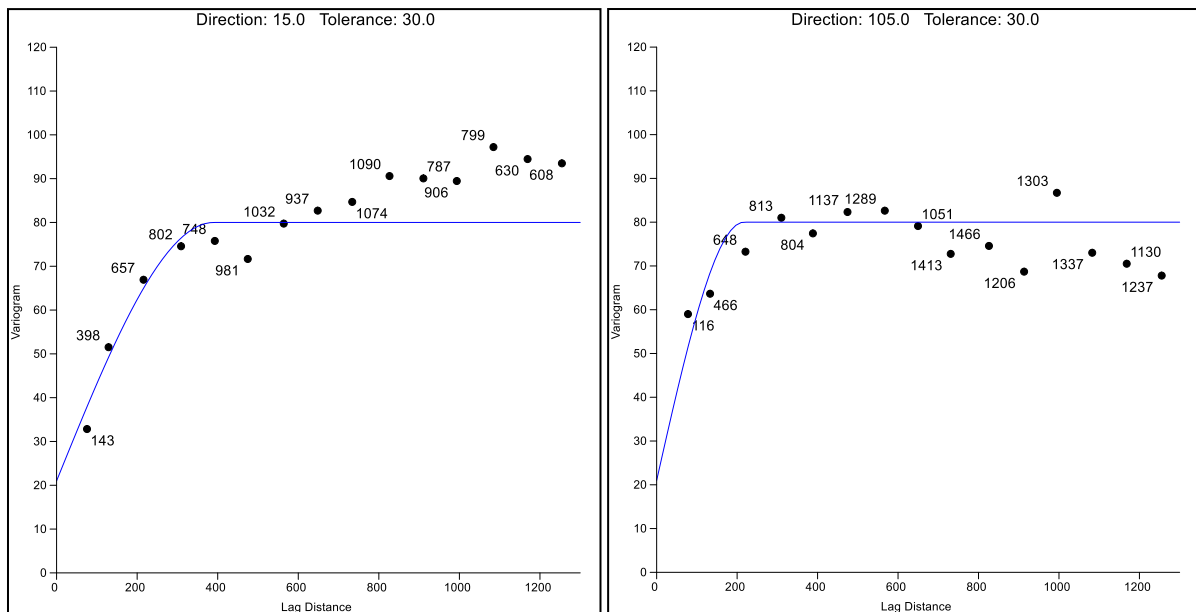


Figure 32: Variogrammes directionnels de CEC4

Le variogramme expérimental de l'angle d'anisotropie de 15° a été ajusté à un modèle sphérique, caractérisé par un effet de pépité de 20, un palier de 79, et une portée de 390 m.

L'ajustement du variogramme directionnel fait ressortir l'existence d'une structuration spatiale de la salinité au sein de la parcelle, caractérisée par un effet de pépité assez élevé, qui représente 25,3% de la variabilité maximale. L'ajustement montre également que la corrélation spatiale entre les observations est marquée jusqu'à une distance de 390 m, au-delà de cette distance le variogramme atteint le palier et les observations ne sont plus spatialement corrélées. Le palier de ce variogramme est relativement faible par rapport à celui du variogramme de la troisième couche.

1.5.CEC5

Les variogrammes directionnels analysés pour ce niveau de profondeur montrent que les directions de continuités maximales et minimales s'observent selon les deux directions orthogonales 15° et 105° (figure 33). Les valeurs de la portée maximale et minimale représentent 440 et 258,8 mètres respectivement, donnant ainsi un rapport d'anisotropie de 1,7.

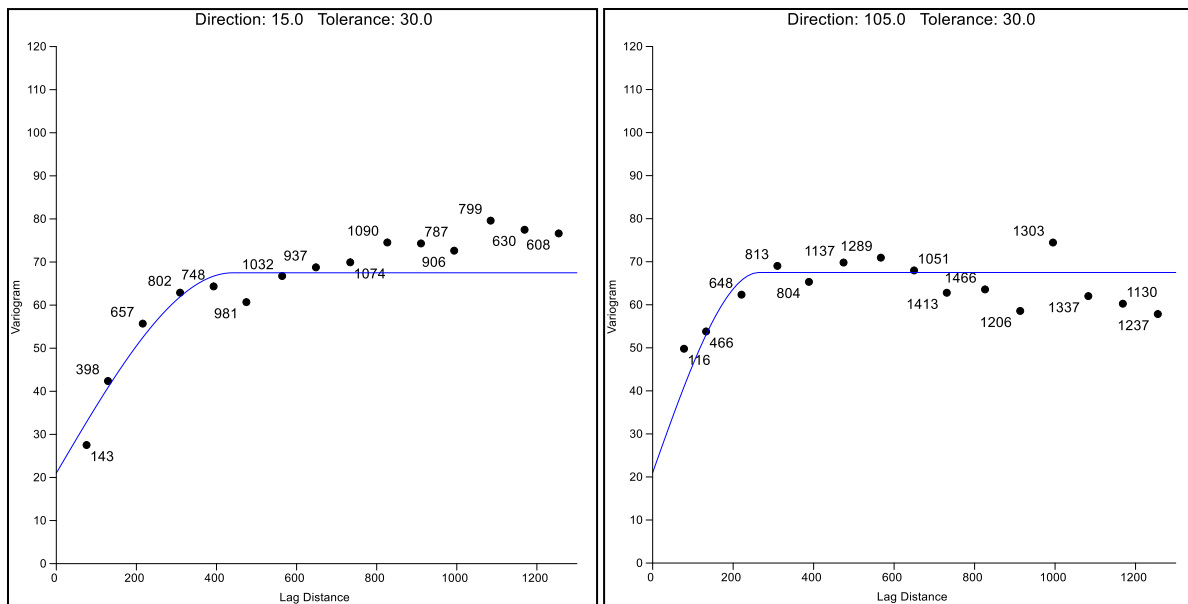


Figure 33: Variogrammes directionnels de CEC5

L'ajustement du variogramme expérimental, lié à la direction d'anisotropie 15° , a conduit à un modèle sphérique, caractérisé par un effet de pépite de 20, un palier de 66,5 à la distance de 440 mètres.

Cet ajustement a révélé l'existence d'une structure spatiale de la CEC caractérisée par un effet de pépite qui représente 30% de la variabilité maximale. De ce fait, la variabilité de la CEC au niveau de cette couche est forte à des distances courtes, mais reste limitée dans l'ensemble du domaine. Le résultat montrent également l'existence d'une corrélation spatiale entre les mesures jusqu'à une distance de 440 m, au-delà de laquelle il n'y a plus d'auto-corrélation.

Les variogrammes expérimentaux des différents niveaux d'étude ont été tous ajustés à des modèles sphériques qui sont des modèles types de la structure spatiale (Gascuel, et al., 1993). Ces variogrammes sont orientés vers la direction d'anisotropie de 15° . L'analyse des pourcentages de l'effet de pépite par rapport à la variabilité globale montre qu'ils se situent entre 15% en surface et 30% en profondeur, ce qui suggère une importante variabilité locale en profondeur. Les variogrammes montrent également que les valeurs de la portée sont toutes supérieures ou égales à 380 mètres, et les rapports d'anisotropie présentent une diminution en profondeur jusqu'à 1,7. Le rapport entre le palier et l'effet de pépite (De Groot et al., 2011) calculé dans chaque niveau d'étude indique une diminution en profondeur. En effet il débute par 6,45 pour la couche de surface et se termine par 3,33 en profondeur. De ce fait, on peut dire que la salinité dans les couches de surface est mieux structurée que dans les couches de profondeur.

2. Estimation spatiale de la CEC

L'estimation spatiale de la salinité par krigeage inclue les paramètres des variogrammes calculés pour les différentes couches. L'estimation spatiale de la CEC consiste à estimer la variabilité spatiale de la CEC dans des endroits non échantillonnés. Elle a été réalisée par la méthode d'interpolation relative au krigeage simple. Les cartes d'isovaleurs de chaque couche du sol ont été établies moyennant le logiciel Surfer 11.

L'interprétation des cartes de salinité de la station de Hmadna s'effectue en calculant les superficies en hectares et en pourcentages des différentes classes de salinité retenues par l'USSL (1954).

Les cartes d'isovaleurs de CEC des cinq couches sont représentées par les figures 34, 35, 36, 37, et 38. Les caractéristiques de ces figures sont indiquées dans le tableau XV.

Tableau XV. Superficies et pourcentages des différentes classes de salinité

	Non salin		Légèrement salin		Salin		Très salin		Extrêmement salin	
	ha	%	Ha	%	Ha	%	ha	%	ha	%
H1	0,58	0,22	10,5	3,93	65,1	24,3	151,7	56,7	39,5	14,8
H2	0	0	0	0	1,1	0,41	87,9	32,9	178,4	66,7
H3	0	0	0	0	0	0	36,4	13,6	231	86,4
H4	0	0	0	0	0	0	17,5	6,53	250	93,5
H5	0	0	0	0	0	0	8,03	3	259,4	97

L'analyse du tableau XV et la visualisation des cartes de salinité des cinq couches a révélé une variation du niveau de salinité d'une couche à une autre. La couche H1 englobe toutes les classes de salinité (non salin à extrêmement salin) avec une prédominance de la classe 'très salin' (56,7 %), les classes 'non salin' (0,22 %) et 'légèrement salin' (4 %) sont très peu représentées. En H2, la variabilité de la salinité est faible par rapport à la première couche. En effet, elle se situe entre 'salin' qui ne représente que 0,41 % et 'extrêmement salin' (66,7%). Les couches H3, H4, et H5 sont plus homogènes avec une salinité qui se situe entre 'très salin' et 'extrêmement salin'. Ici, la classe 'extrêmement salin' est prédominante avec un taux de recouvrement de 86,4 % en H3, 93,5 % en H4, et 97 % en H5. Ces résultats confirment la variabilité de CE_{ps} et de CEC, qui est beaucoup plus marquée en surface qu'en profondeur. Elles confirment également les profils moyens de CE_{ps} et de CEC qui sont descendants en profondeur.

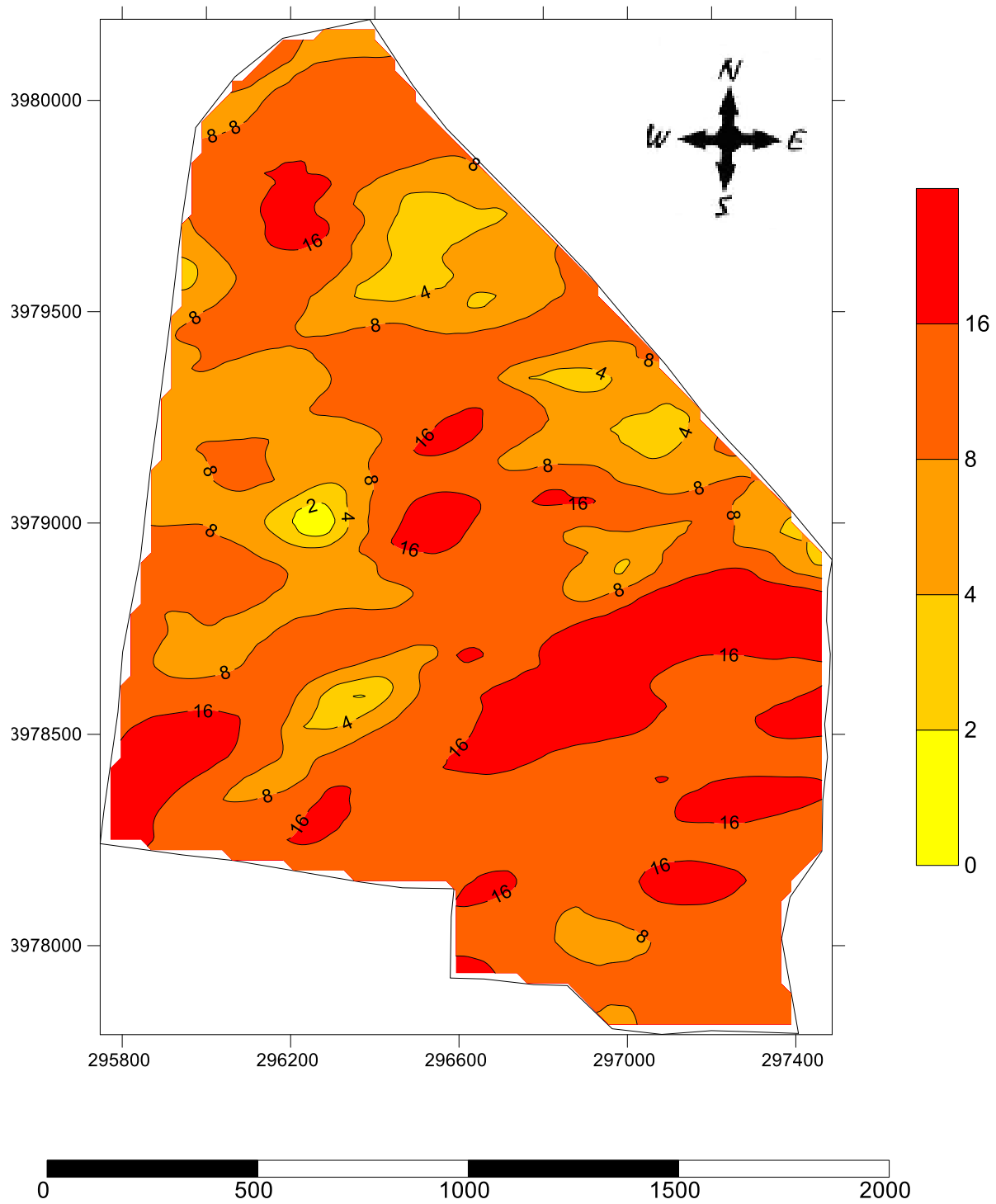


Figure 34: Carte d'isovaleurs de CEC de la couche H1

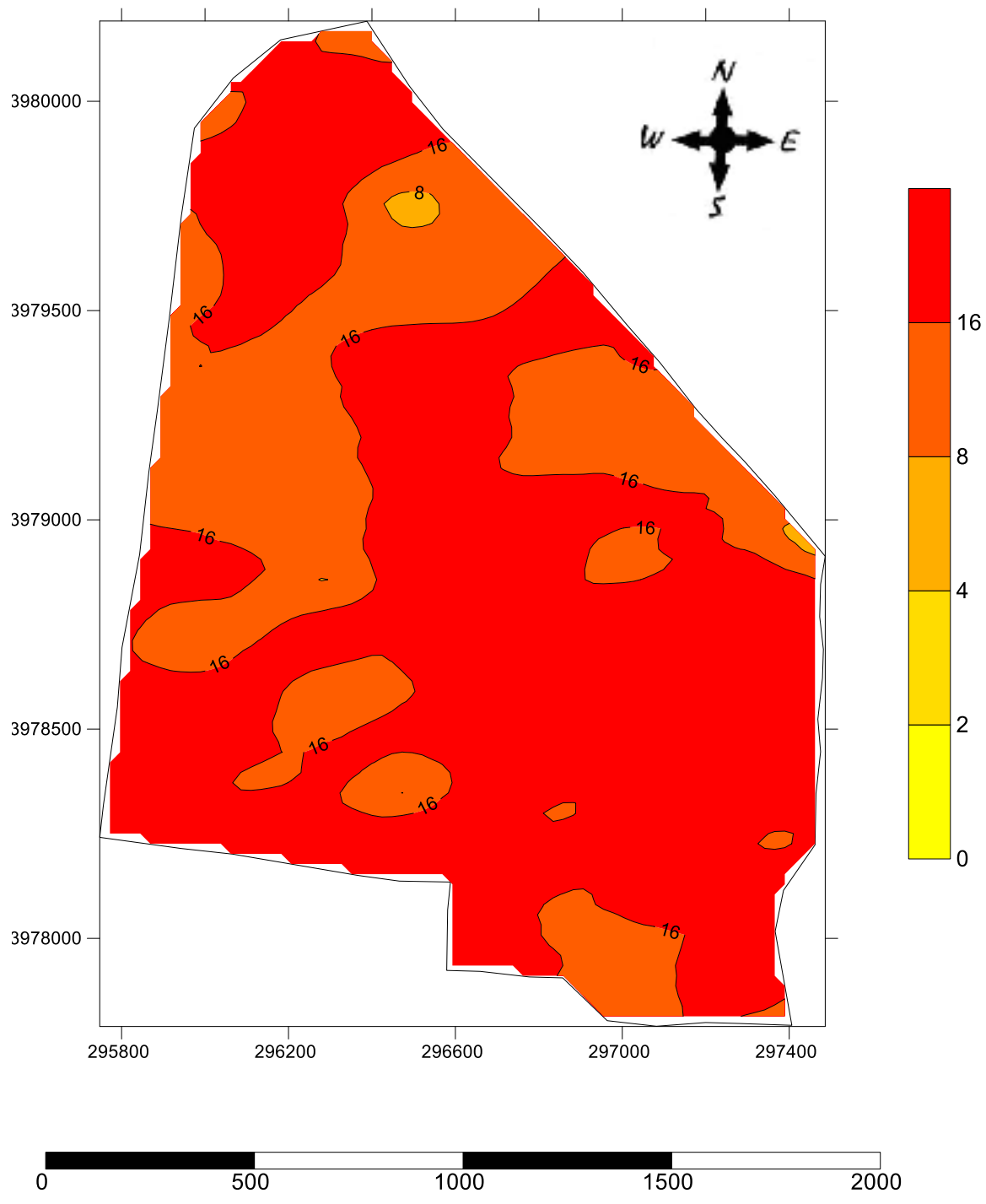


Figure 35: Carte d'isovaleurs de CEC de la couche H2

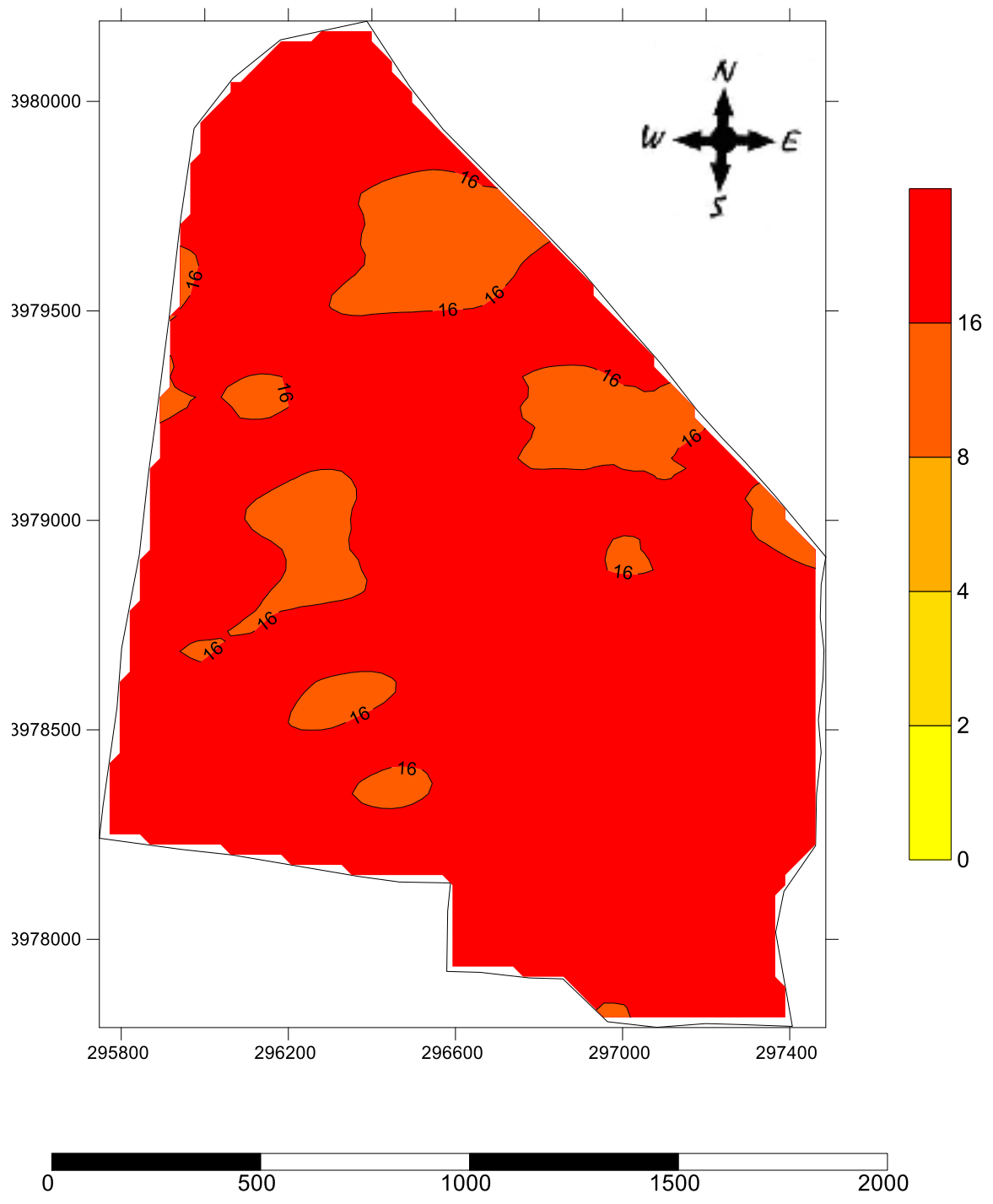


Figure 36: Carte d'isovaleurs de CEC de la couche H3

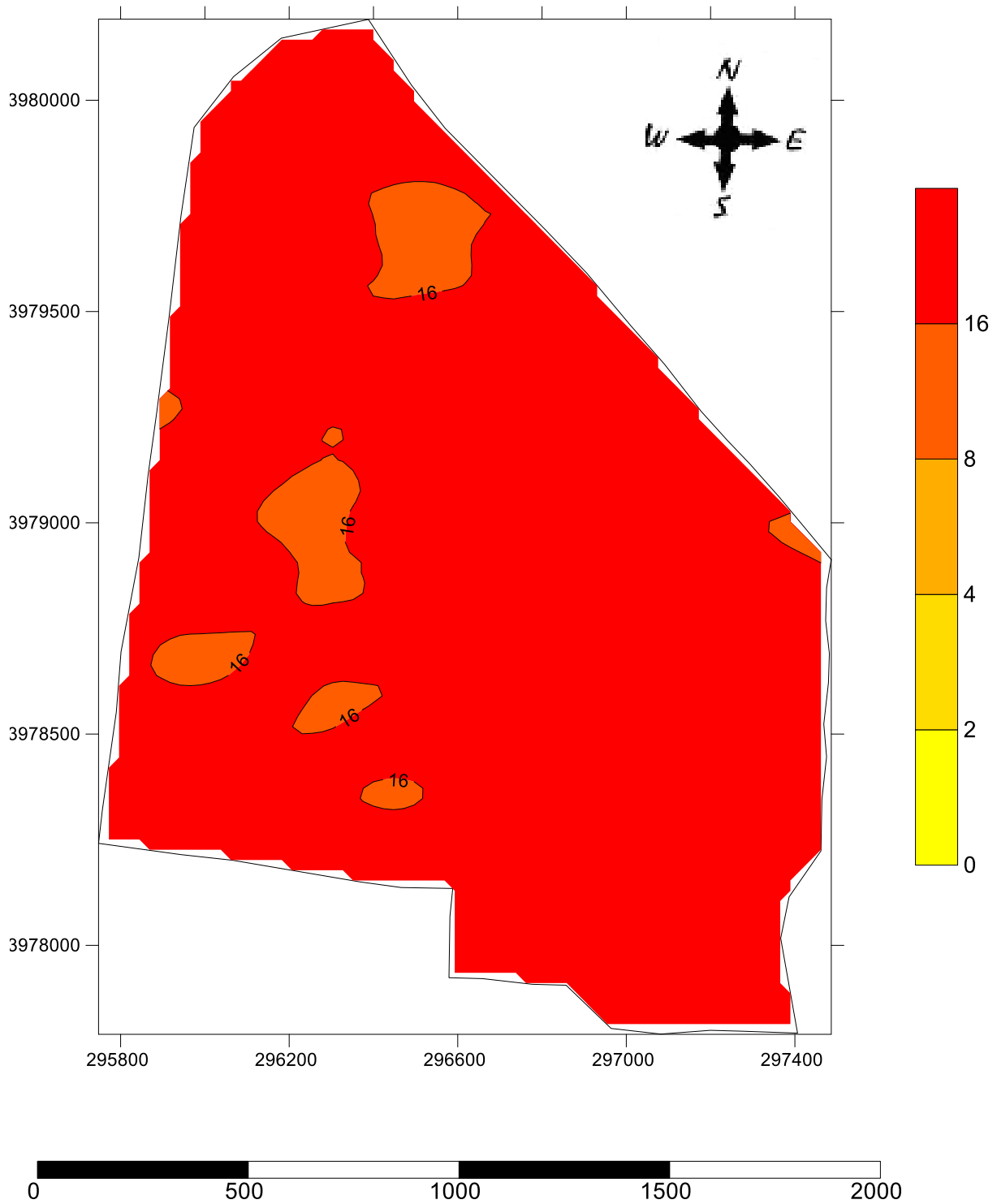


Figure 37: Carte d'isovaleurs de CEC de la couche H4

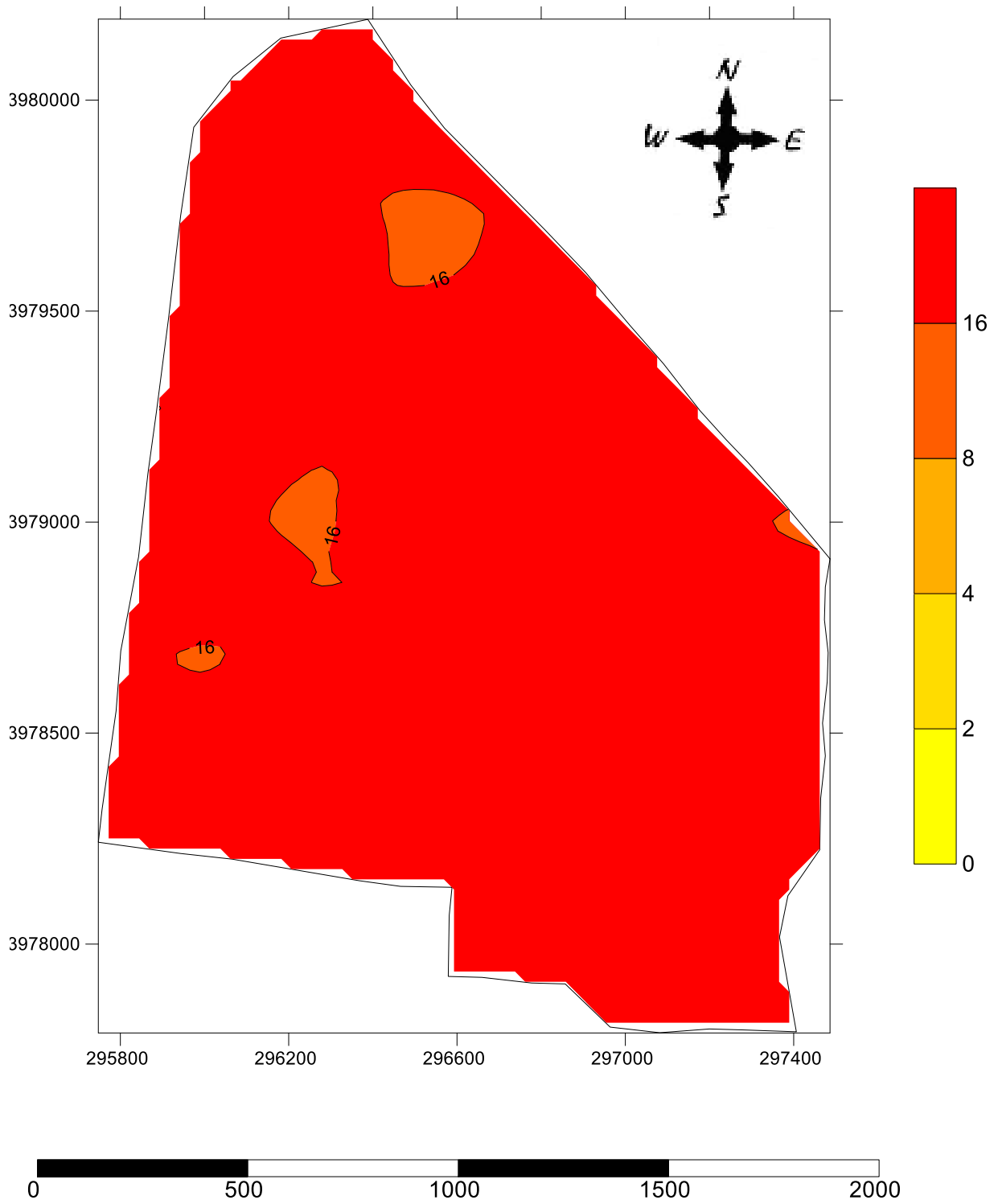


Figure 38: Carte d'isovaleurs de CEC de la couche H5

3. Qualité de l'estimation

Pour évaluer la qualité des cartes d'isovaleurs de la salinité, nous avons réalisé deux types de tests :

Le premier test consiste à calculer les erreurs moyennes de prédiction. Il s'agit, en fait, de calculer la différence moyenne entre les valeurs de la conductivité électrique mesurées (CE_{ps}) et les valeurs estimées (CEc) pour chaque niveau d'étude, en valeurs réelles et en valeurs absolues. Les résultats de ce test sont présentés dans le tableau XVI.

Le deuxième test consiste à calculer le pourcentage des CE_{ps} et CEc qui se situent dans leurs propres plages au sein des cartes d'isovaleurs de la salinité (Annexes I et II). Le premier calcul est effectué sur les trente sept points (37) relatifs aux valeurs mesurées (CE_{ps}), et le deuxième sur cinquante (50) points des valeurs prédites (CEc) représentant les différentes classes de salinité.

3.1.Le test 1

Le tableau XVI révèle que les erreurs moyennes réelles sont extrêmement faibles, elles sont toutes inférieures à 1 dS.m^{-1} . Ce résultat signifie que l'estimation moyenne des valeurs calculées est bonne et confirme donc celui obtenu auparavant. Toutefois, lors de ce calcul, la surestimation des valeurs de la CEc est compensée par leur sous-estimation. Cependant, pour se rapprocher de l'écart moyen réel entre la CE_{ps} et CEc , le calcul doit être effectué sur les valeurs absolues des erreurs de prédiction. Ce calcul (tableau XVI) a révélé que les erreurs moyennes sont de l'ordre de 6 à 7 dS.m^{-1} en fonction de la couche considérée.

Ce résultat est traduit graphiquement par les figures 1 2 3 4 et 5 (Annexe III). En effet, le nuage de points des CEc se situe de part et d'autre de la bissectrice montrant ainsi les valeurs surestimées (au-dessus de la bissectrice) et des valeurs sous estimées (au-dessous de la bissectrice) avec des distance qui sont plus ou moins étendues.

Tableau XVI. Erreurs moyennes réelles et absolues

	H1	H2	H3	H4	H5
Erreur moyenne réelle ($CE_{ps} - CEc$) (dS.m^{-1})	-0,13	0,03	0,15	0,20	-0,09
Erreur moyenne absolue $ CE_{ps} - CEc $ (dS.m^{-1})	6,42	7,53	7,07	7,21	6,37

3.2.Le test 2

Les résultats du test 2 sont compilés dans le tableau XVII. En se basant sur la CE_{ps} , les calculs indiquent une bonne prédiction dans 38 % des cas en H1, 54 % en H2, 73 % en H3, et 85 % en H4 et H5. La prédiction est nettement meilleure en profondeur qu'en surface.

Ce même test, mais effectué par la CEc , situe la fiabilité de l'estimation entre 76 % en surface et 90 % en profondeur. L'erreur de l'estimation de la CEc dans les cartes d'isovaleurs pourrait provenir de la méthode d'interpolation utilisée (krigeage) et au fait que les valeurs de la CEc ont été regroupées en classes de salinité. En ce qui concerne le test par la CE_{ps} , en plus des sources d'erreurs déjà citées, une troisième erreur pourrait être due aux équations d'étalonnage. En effet, nous pouvons améliorer ce score en tenant compte de l'erreur moyenne absolue.

Tableau XVII. Nombre et pourcentage des points mesurés et estimés dans les cartes

	H1		H2		H3		H4		H5	
	nombre	(%)	nombre	(%)	nombre	(%)	nombre	(%)	nombre	(%)
Total des points										
CE_{ps} (37)	14	38	20	54	27	73	32	86	31	84
CEc (50)	38	76	42	84	44	88	44	88	45	90

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'état de la salinité actuelle des sols de la zone de la station de recherche INRAA de Hmadna par induction électromagnétique de l'EM38. L'expérimentation est réalisée sur une superficie de 267,4 hectares. Les mesures électromagnétiques ont été effectuées sur 317 points situés aux nœuds d'une grille d'un pas d'étude de 25 à 50 m, pour cinq (05) niveaux de profondeur en position verticale, et pour trois (03) niveaux de profondeur en position horizontale. Trente sept (37) sondages choisis en fonction de la variation des gammes des lectures de l'EM38 ont été utilisés pour les besoins de l'étalonnage de la conductivité électrique de l'extrait de pate saturée. Les analyses ont été effectuées sur 185 échantillons provenant des 37 sondages réalisés sur cinq (05) niveaux de profondeurs correspondant aux couches 0 cm – 30 cm (H1), 30 cm – 60 cm (H2), 60 cm – 90 cm (H3), 90 cm – 120 cm (H4) et 120 cm – 150 cm (H5).

Les résultats obtenus montrent que la zone d'étude est caractérisée par une texture à prédominance argileuse à argilo-limoneuse. Les classes texturales dominantes sont dans l'ordre Clay > Silty Clay > Clay loam > Loam, et les fractions Sandy sont très peu représentées. Les profils texturaux moyens sont homogènes et se situent dans l'ordre profil argileux (42 % < argile < 48 %) > profil limoneux (34 % < limon < 37 %) > profil sableux (13 % < sable < 20 %). Les sols étudiés sont généralement peu humides (H% < 30%), neutre à très basiques, modérément calcaires (Calc. tot. < 18%) et peu pourvus en gypse (gypse < 5 %).

Les résultats ont montré que valeurs minimales et maximales de la salinité augmentent progressivement selon la profondeur. En effet, ces valeurs qui se situent entre 1 dS.m⁻¹ et 70 dS.m⁻¹ dans la couche de surface, elles se situent entre 5 dS.m⁻¹ et 71 dS.m⁻¹ dans la couche de profondeur. Ainsi, les sols étudiés sont tous salés à extrêmement salés en profondeur. Les lectures électromagnétiques verticales et horizontales ont confirmé ce résultat et ont révélé une accumulation de sels en profondeur. Les profils salins de la CE_{ps} et de la CEM sont par conséquent descendants.

Les équations de régression utilisées par Rhoades et Corwin (1981) et Herrero et *al.* (2003) pour étalonner la CEM ont aboutit à des relations très hautement significatives avec la CE_{ps}. Le test de corrélation entre les deux types d'étalonnage et la CE_{ps} montre que l'équation de Rhoades et Corwin (1981) était celle qui prédit le mieux les valeurs de la CE_{ps} dans le contexte de cette étude ($r = 0,807$; $p < 0,001$). Toutefois, l'erreur moyenne de l'estimation de

la CEC par cette équation est de l'ordre de moins de $0,2 \text{ dS.m}^{-1}$ pour les valeurs réelles et de 6 à 7 dS.m^{-1} pour les valeurs absolues.

Les variogrammes expérimentaux des 5 couches de sols ont été tous ajustés à des modèles théoriques sphériques, orientés vers la direction d'anisotropie de 15° . Les pourcentages de l'effet de pépite par rapport au palier se situent entre 15% en surface et 30% en profondeur ce qui indique une déstructuration spatiale plus forte en profondeur qu'en surface (micro régionalisation de la structure des données). Les valeurs de la portée sont toutes supérieures ou égales à 380 mètres, et les rapports d'anisotropie diminuent en profondeur passant de 2,6 à 1,7.

La cartographie de la salinité (CEC) en courbes d'isovaleurs a abouti aux résultats suivants :

- La couche de surface (0 – 30 cm) : La CEC au sein de cette couche varie entre $0,023 \text{ dS.m}^{-1}$ et 48 dS.m^{-1} . Cependant, les résultats indiquent une certaine hétérogénéité de la salinité au sein de cette couche. Ainsi, 0,22 % de la superficie appartient à la classe 'non salin', 4 % à la classe 'légèrement salin', 24 % à la classe 'salin', 57 % à la classe 'très salin', et 15 % à la classe 'extrêmement salin'.

- La couche deux (30 – 60 cm) : La CEC au niveau de cette couche varie entre 3 dS.m^{-1} et 57 dS.m^{-1} . La salinité au sein de cette couche est moins hétérogène par rapport à la première couche. En effet, elle présente 0,4 % à la classe 'salin', 33 % à la classe 'très salin', et plus de 66 % à la classe 'extrêmement salin'.

- La couche trois (60 – 90 cm) : La CEC varie entre 6 dS.m^{-1} et 62 dS.m^{-1} et les valeurs sont plus homogènes avec une salinité qui se situe entre 'très salin' (14 %) et 'extrêmement salin' (86 %).

- La couche quatre (90 – 120 cm) : La CEC dans cette couche varie entre 1 dS.m^{-1} et 58 dS.m^{-1} . Elle présente les mêmes classes de salinité trouvées dans la couche trois avec 6,5 % pour la classe 'très salin', et 93,5 % pour la classe 'extrêmement salin'.

- La dernière couche (120 – 150 cm) : La CEC au sein de cette couche varie entre 7 dS.m^{-1} et 56 dS.m^{-1} , avec un pourcentage de 3 % pour la classe 'très salin', et 97 % pour la classe 'extrêmement salin'.

En fin, la qualité de ces cartes d'isovaleurs de la CEC varie entre 38 % et 84 % sur la base de la CE_{ps} et de 76 % à 90 % sur la base de la CEC. Ce résultat suggère que ces cartes sont très fiables, en particulier celles des couches de profondeur.

La démarche adoptée a permis de réaliser une bonne estimation de l'état actuel de la salinité des sols avec une source d'erreur très acceptable dans le contexte pédologique et environnemental de cette étude. Aussi, il serait intéressant d'affiner les modèles mathématiques de prédiction de la salinité et de l'évaluation de la qualité des cartes de salinité et de les tester et les généraliser à un contexte plus large.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABBAS A., KHAN S., HUSSAIN N., HANJRA M. A., AKBAR S., 2011. Physics and Chemistry of the Earth, vol. 55-57, pp 43-52.

ABDELHAFID Y., 2010. Cartographie de la salinité des sols par induction électromagnétique. Cas de la zone est du périmètre irrigué de la Mina. Thèse de magister, ENSA, Alger, 102p.

AL-KHAIER, 2003. Soil salinity detection using satellite remote sensing. Master of science, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Netherlands, 61 p.

AMEZKETA E., 2007. Soil salinity assessment using directed soil sampling from a geophysical survey with electromagnetic technology: a case study. Spanish Journal of Agricultural Research, 5(1), pp 91-101.

ASSOCIATION FRANCAISE POUR L'ETUDE DU SOL, 2008. Référentiel Pédologique 2008. Ed. Quæ, Versailles Cedex, France, 405 p.

BANNARI A., GUEDON A., EL-HARTI A., ET ELGHMARI A., 2008. Détection de la salinité et de la sodicité, faibles et modérées, en milieu agricole irrigué à l'aide du capteur ALI de EO-1 : Cas de la plaine de Tadlat au Maroc. 5 p.

BARBIERO L., CUNNAC S., MANE L., LAPERROUSAZ C., HAMMECKER C., MAEGHT J. L., 2001. Salt distribution in the Senegal middle valley Analysis of a saline structure on planned irrigation schemes from N'Galenka creek. Agricultural Water Management, vol. 46, pp 201-213.

BEN HASSINE H., 2005. Effets de la nappe phréatique sur la salinisation des sols de cinq périmètres irrigués en Tunisie. Étude et Gestion des Sols, Vol.12, pp 281-300.

BENNETT D.L. ET GEORGE R.J., 1995. Using the EM38 to measure the effect of soil salinity on Eucalyptus globulus in south-western Australia. Agricultural Water Management 27, pp 69-86.

BOIVIN P., BRUNET D., JOB J.O., 1988. Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés : Une méthode rapide et fiable. Cahiers ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXIV, n° 1, pp 39-48.

BOIVIN P., HACHICHA M., JOB J. O., LOYER J. Y., 1989. Une méthode de cartographie de la salinité des sols : Conductivité électromagnétique et interpolation par krigeage. Science du Sol. Vol. 27 (1), pp 69-72.

BOUALLA N., BENZIANE A., DERRICH Z., 2012. Origine de la salinisation des sols de la plaine de M'léta (bordure sud du bassin sebkha Oran). Journal of Applied Biosciences, vol. 53, pp 3787-3796.

BOUMIA O., 2011. Interaction Fluridone et Salinité sur la germination des graines du Gombo (*Abelmoschus esculentus* L.). Thèse de magister, Université d'Oran, 142 p.

BRADAI A. DOUAOUI A., MARLET S., HARTANI T., BOUARFA S., 2011. La reconversion à l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation et ses risques dans la plaine du Bas-Cheliff. HTE, n° 148, pp 43-44.

C. P. C. S., 1967. Classifications des sols. INRA, Grignon, 96 p.

CETIN M., KIRDA C., 2003. Spatial and temporal changes of soil salinity in a cotton field irrigated with low-quality water. *Journal of Hydrology*. Vol. 272, pp 238–249.

CHESWORTH W., 2008. *Encyclopedia of Soil Science*, Ed. Springer Dordrecht, Berlin, 902 p.

CORWIN D.L., LESCH S.M., 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles and guidelines. *Agronomy Journal* 95, pp 455-471.

CORWIN D.L., LESCH S.M., 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, pp 11-43.

DADDI BOUHOUN M., BRINIS L., 2004. Etude de la dynamique des sels solubles dans un sol irrigué Gypso-Salin : cas d'une palmeraie de la cuvette de Ouargla. Colloque international « Terre et Eau », Annaba, pp 5-8.

DADDI BOUHOUN M., SAKER M., HACINI M., OULD EL HADJ M., BRINIS L., 2011. Effets de la remontée des eaux phréatiques sur la salinisation des sols dans les Ghouts à Oued Souf (Sud Est Algérien). *Annales des Sciences et Technologie*, vol. 3, pp 25-27.

DE GROOT A. V., VEENEKLAAS R. M., KUIJPER D. P. J., BAKKER J. P., 2011. Spatial patterns in accretion on barrier-island salt marshes. *Geomorphology*, vol. 134, pp 280-296.

DEHNI A., LOUNIS M., 2012. Remote Sensing Techniques for Salt Affected Soil Mapping : Application to the Oran Region of Algeria. *Procedia Engineering*, vol. 33, pp 188-198.

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

DJILI K., DAOUD Y., GAOUAR A., BELJOUZI Z., 2003. La salinisation secondaire des sols au Sahara : Conséquences sur la durabilité de l'agriculture dans les nouveaux périmètres de mise en valeur. *Sécheresse*, vol. 14, n° 4, pp 241-246.

DOUAIK A., 2005. Evaluation of the space-time variability of soil salinity : Bystatistical, geostatistical, and bayesian maximum entropy methods. Doctor (Ph.D.) thesis, Universitéit Gent, 211 p.

DOUAIK A., MEIRVENNEA M. V., TOTH T., 2005. Soil salinity mapping using spatio-temporal kriging and Bayesian maximum entropy with interval soft data. *Geoderma*, Vol. 128, pp 234- 248.

DOUAOUI A. HARTANI T., 2007. Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Actes du troisième atelier régional du projet Sirma, Nabeul, Tunisie, 5p.

DOUAOUI A., 2005. Variabilité spatiale de la salinité et sa relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chélif. Apport de la géostatistique et de la télédétection. Thèse de doctorat d'État, INA, Alger, 233 p.

DOUAOUI A., BENBOUALI E., GAOUAR A., 2001. Les facteurs intrinsèques de dégradation de la structure de surface des sols du Bas-Chélif. Annales de l'Institut National Agronomique - EI-Harrach, vol. 22, pp 27-47.

DOUAOUI A., HARTANI T., 2006. Application de la télédétection dans la connaissance et la cartographie de la salinité des sols de la plaine du Bas-Chélif. http://www.reseautd.cict.fr/alger/Articles_PDF_apres_correction_et_evaluation/A09_Douaoui_JAS09.pdf

DOUAOUI A., LEPINARD P., 2010. Cartographie de la salinité des sols de la plaine algérienne du Bas-Chélif. Géomatique Expert, n° 76, pp 36-41.

DURAND J., 1956. Les sols de la station d'étude des sols salins des Hamadena. France-Alger Editions, Paris, 29 p.

EHSANI M. R., DURAIRAJ C. D., WOODS S., SULLIVAN M., 2005. Potential Application of Electrical Conductivity (EC) Map for Variable Rate Seeding. Agricultural Engineering International. Vol. VII, pp 1-17.

ELDEIRY A. A., GARCIA L. A., 2010. Using a Geo-statistical Approach for Soil Salinity and Yield Management. Hydrology Days, pp 146-157.

FAO, 2006. World Reference Base for Soil Resources 2006 : A framework for international classification, correlation and communication. Rome, 128 p.

FAOUZI M., LARABI A., 2001. Problématique de la remontée, de la salinité et de la pollution par les nitrates des eaux de la nappe phréatique des Beni-Amir (Tadla, Maroc). Ingénieries, n° 27, pp 23-36.

GALLICHAND J., BUCKLAND G. D., MARCOTYES D., HENDRYET M. J., 1992. Spatial interpolation of soil salinity and sodicity for a saline soil in Southern Alberta. Canadian Journal of Soil Science. Vol. 72, pp 503-516.

GASCUEL-ODOUX C., WALTER C., VOLTZ M., 1993. Intérêt du couplage des méthodes géostatistiques et de cartographie des sols pour l'estimation spatiale. Science du sol, vol. 31, pp 193-213.

GAUGLIARDI I., CICCHELLA D., DE ROSA R., 2012. A Geostatistical Approach to Assess Concentration and Spatial Distribution of Heavy Metals in Urban Soils. Water Air Soil Pollut. Vol. 223, pp 5983-5998.

GOLDEN SOFTWARE, 2011. Logiciel de Surfer 11, Tutoriel.

GOULET E., BARBEAU G., 2004. Apports des mesures de résistivité électrique du sol dans les études sur le fonctionnement de la vigne et dans la spatialisation parcellaire. Congrès « Viticultural Terroir Zoning », Cape Town, Afrique du Sud. 8p.

HADJ MILOUD S., 2010. Morphologie et propriétés des solonchaks références de la Mina. Thèse de Magister, INA, Alger, 101p.

HENGL T., 2009. A Practical Guide to Geostatistical Mapping, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 270 p.

HERRERO J., BA A.A., ARAGUES R., 2003. Soil salinity and its distribution determined by soil sampling and electromagnetic techniques. *Soil Use Manag* 19, pp 119-126.

HOGG, T. J., HENRY, J. L., 1984. Comparison of 1:1 and 1:2 suspensions and extracts with the saturation extract in estimating salinity in Saskatchewan soils. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 64, pp 699-704.

IDDIR M. A., 2006. Evaluation de la salinité par induction électromagnétique : Exemple d'une parcelle cultivée de la plaine de la Macta (Wilaya de Mascara). Thèse de Magister, INA, Alger, 96p.

INSID, 2005. Problématique de la salinité dans le périmètre irrigué du Bas Cheliff : Besoins en formation, en recherche-développement et en transferts de technologies. 25 p.

IPTRID, 2006. Conférence électronique sur la salinisation: Extension de la salinisation et Stratégies de prévention et réhabilitation, 12p.

IRD, 2008. Les dossiers thématiques de l'Institut de recherche pour le développement. Les sols sont fragiles. 21p.

JOB J.O., LOYER J.Y., AILOUL M., 1987. Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. *Cahiers ORSTOM*, ser. Pédol., vol. XXIII, no 2, pp 123-131.

JUAN P., MATEU J., JORDAN M.M., MATAIX-SOLERA J., MELENDEZ-PASTOR I., NAVARRO-PEDRENO J., 2011. Geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil salinity. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 108, pp 62-72.

KHACHEBA R, 2011. Cartographie de la salinité du sol évaluée par induction électromagnétique « Géonics EM38 ». Cas du sous bassin de Sidi Rached. Thèse de Magister, ENSA, Alger, 94p.

KHAN N. M., RASTOSKUEV V. V., SATO Y., SHIOZAWA S., 2005. Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management*, vol. 77, pp 96-109.

KLOPPMANN W., BOURHANE A., ASFIRANE F., 2011. Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau, BRGM, Orléans, 123p.

LESCH S.M., CORWIN D.L., ROBINSON D.A., 2005. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, pp 351-378.

LESCH S.M., RHOADES J.D., LUND L.J., CORWIN D.L., 1992. Mapping soil salinity using calibrated electromagnetic measurements. *Soil Sci Soc Am J* 56, pp 540-548.

LI X., YANG J., LIU M., LIU G., YU M., 2012. Spatio-Temporal Changes of Soil Salinity in Arid Areas of South Xinjiang Using Electromagnetic Induction. *Journal of Integrative Agriculture*, vol. 8, pp 1365-1376.

LOYER, 1991. Classification des sols salés : les sols Salic. *Cahiers ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXVI, pp 51-61.

MAINA M. M., AMIN M. S. M., AIMRUN W., SANI I., 2012. Soil salinity assessment of Kadawa Irrigation of the Kano River Irrigation Project (KRIP). *Journal of Food, Agriculture & Environment*, Vol.10, pp 1028 -1034.

MARLET S., 2004. Evolution des systèmes d'irrigation et gestion de la salinité des terres irriguées. *Actes du Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée*, Rabat. 11 p.

MATHERON G., 1965. La théorie des variables régionalisées et son application à l'estimation des gisements miniers. *Ecole Nationale Supérieure des Mines, Paris*, 14 p.

MATHERON G., 1970. La théorie des variables régionalisées et ses applications. *Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau*, fasc. 5, *Ecole Nationale Supérieure des Mines, Paris*, 212 p.

MCKENZIE R.C., CHOMISTEK W., CLARK N.F., 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, pp 25-32.

METTERNICHT G.I., ZINCK J.A., 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Natural Resources Conservation Service, Washington*, 338 p.

PANSU M., GAUTHEYROU J., 2003. *Handbook of Soil Analysis : Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*. Ed. Springer, Berlin, 993 p.

PITTMAN J. J., KRESS M. W., ZHANG H., 2001. Comparison of Two Soil Salinity Extraction Methods. *Department of Plant and Soil Sciences, Oklahoma State University*, 9 p.

RHOADES J. D., 1981. Predicting bulk soil electrical conductivity versus saturation paste extract electrical conductivity calibrations from soil properties, *Soil Science Society American Journal*, vol. 45, pp 42-44.

RHOADES J.D., CHANDUVI F., LESCH S.M., 1999. Soil salinity assessment. Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 57*. FAO, Rome. 150 p.

RHOADES J.D., MANTEGHI N.A., SHOUSE P.J., ALVES W.J., 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. *Soil Science Society American Journal*, vol. 53, pp 433-439.

RHOADES, J. D., CORWIN, D. L., 1981. Determining soil electrical conductivity-depth relation using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Science Society American Journal* 45, pp 255-260.

RHOADES, J.D., 1993. Electrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity. *Advances in Agronomy*, 49, pp 201-251.

RIVOIRARD J., 1995. Concepts et méthodes de la géostatistique. Centre de géostatistique, Ecole des mines, Paris, 95 p.

S. HADJMILOUD, 2010. Morphologie et propriétés des Solonchaks références de la Mina. Thèse de magister, ENSA El-Harrach, Alger, 101p.

SAIDI D., 2004. Influence de la phase saline sur les propriétés physiques des matériaux argileux du Bas-Chélif. Thèse de doctorat d'Etat, INA El-Harrach, 181 p.

SAIDI D., LE BISSONNAIS Y., DUVAL O., DAOUD Y., HALITIM A., 2004. Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés physiques des sols de la plaine du Cheliff (Algérie). Étude et Gestion des Sols, Vol. 11, pp 81-92.

SCHNEIDER S., 2010. Estimation des paramètres hydrodynamiques des sols à partir d'une modélisation inverse de données d'infiltration et de résistivité électrique. Thèse de doctorat, université Paris-Sud 11, 145 p.

SCOTT B. J., DANI O., 2004. Frequency Domain Analysis for Extending Time Domain Reflectometry : Water Content Measurement in Highly Saline Soils. Soil Science Society American Journal, vol. 68, pp 1568-1577.

SOIL SURVEY STAFF, 2010. Keys to Soil Taxonomy, United States Department of Agriculture, 338 p.

SONMEZ S., BUYUKTAS B., OKTUREN F., CITAK S., 2008. Assessment of different soil to water ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in soil salinity studies. Geoderma, vol. 144, pp 361–369.

SUDDUTH K. A., DRUMMOND S. T., KITCHEN N. R., 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 31, pp 239-264.

TAMAZOUZT, 2013. Relation entre la conductivité électrique de l'extrait de pate saturée et la conductivité électrique des différents extraits dilués (1/1, 1/2,5, 1/5/, 1/10) des sols du Bas-Chélif « station de Hmadna ». master 2 Académique, Université de Sad Dahlab, Blida, 36 p.

TRANTAFILIS J., ODEHA I.O.A., WARRB B., AHMED M.F., 2004. Mapping of salinity risk in the lower Namoi valley using non-linear kriging methods. Agricultural Water Management 69, pp 203–231.

TRANTAFILIS J., ODEH I. O. A., MCBRATNEY A. B., 2001. Five Geostatistical Models to Predict Soil Salinity from Electromagnetic Induction Data Across Irrigated Cotton. Soil Science Society American Journal, vol. 65, pp 869-878.

RICHARDS L. A., 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA Agricultural Handbook 60, Washington, USA, p. 160.

VISCONTI F., MIGUEL DE PAZ J. M., RUBIO J. L., 2010. What information does the electrical conductivity of soil water extracts of 1 to 5 ratio (w/v) provide for soil salinity assessment of agricultural irrigated lands. Geoderma, vol. 154, pp 387-397.

WACKERNAGEL H., 1993. Cours de Géostatistique Multivariable. Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, 80 p.

WANG Y., DUNING X. YAN L. XIAOYU L., 2008. Soil salinity evolution and its relationship with dynamics of groundwater in the oasis of inland river basins : case study from the Fubei region of Xinjiang Province, China. *Environ Monit Assess*, 140, pp 291–302.

YANG, J.S., YAO, R.J., 2007. Comparison of interpolation approaches based on spatial variability of apparent soil electrical conductivity with an electromagnetic induction. *Trans. Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 23, n° 9, pp 50-57.

YAO R., YANG J., 2010. Quantitative evaluation of soil salinity and its spatial distribution using electromagnetic induction method. *Agricultural Water Management* 97, pp 1961-1970.

YAO R., YANG J., LIU G., 2007. Calibration of Soil Electromagnetic Conductivity in Inverted Salinity Profiles with an Integration Method. *Pedosphere* 17(2), pp 246-256.

YAZDI F. A., KHORSANDI F., 2002. Estimation of Saturated Paste Electrical Conductivity of Soils from 1:2 Soil/Water Ratio Electrical Conductivity in Yazd Province, Iran. *Proceedings of The Fourth International Iran & Russia Conference*, pp 534-540.

ZHANG H., SCHRODER J. L., PITTMAN J. J., WANG J. J., PAYTON M. E., 2005. Soil Salinity Using Saturated Paste and 1:1 Soil to Water Extracts. *Soil Science Society American Journal*, vol. 69, pp 1146-1151.

ZHENG Z., ZHANG F., MA F., CHAI X., ZHU Z., SHI J, ZHANG S., 2009. Spatiotemporal changes in soil salinity in a drip-irrigated field. *Geoderma* 149, pp 243-248.

ANNEXE I

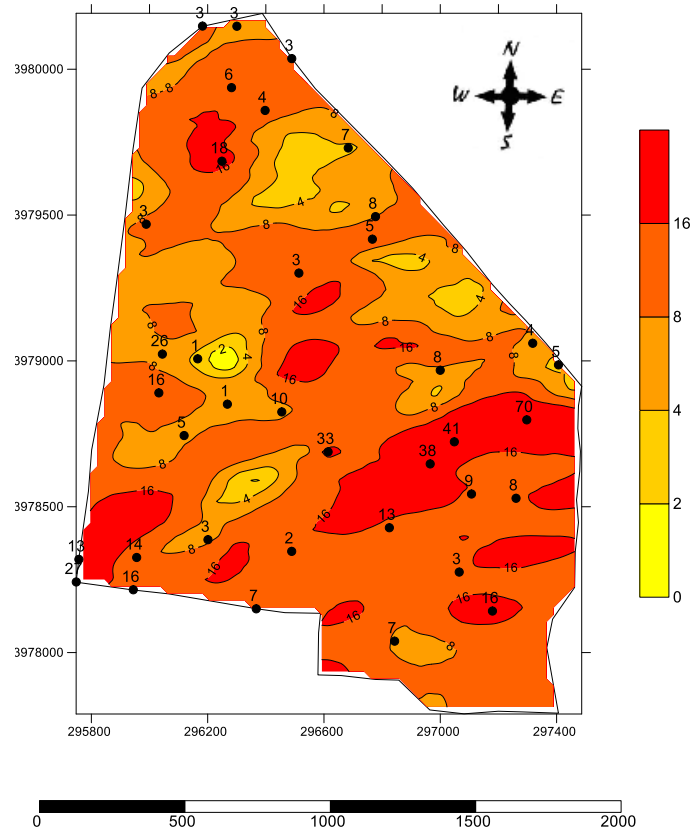


Figure 1: carte d'isovaleurs de H1 avec les points de CE_{ps} H1

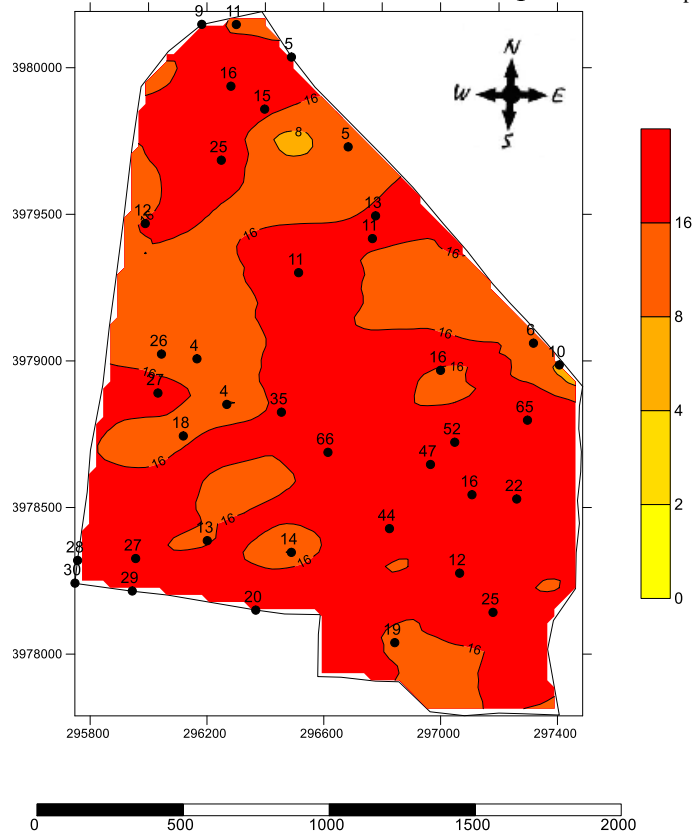


Figure 2: carte d'isovaleurs de H2 avec les points de CE_{ps} H2

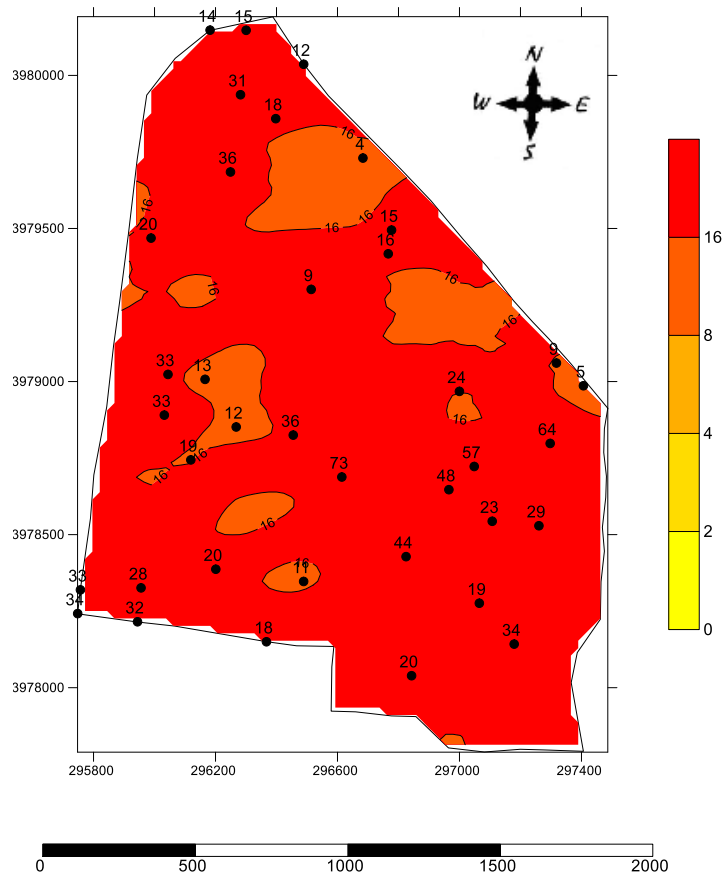


Figure 3: carte d'isovaleurs de H3 avec les points de CE_{ps} H3

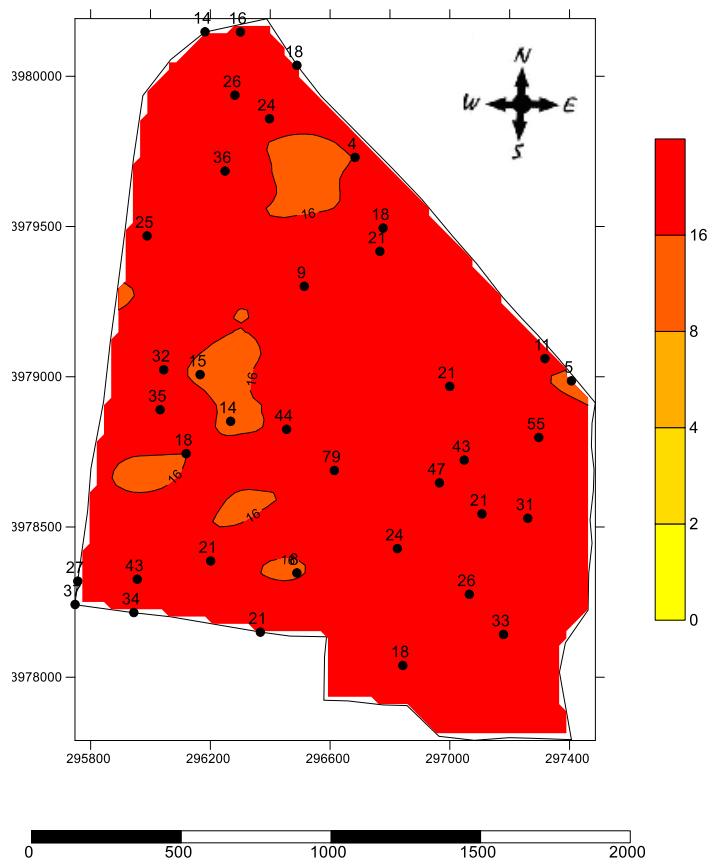


Figure 4: carte d'isovaleurs de H4 avec les points de CE_{ps} H4

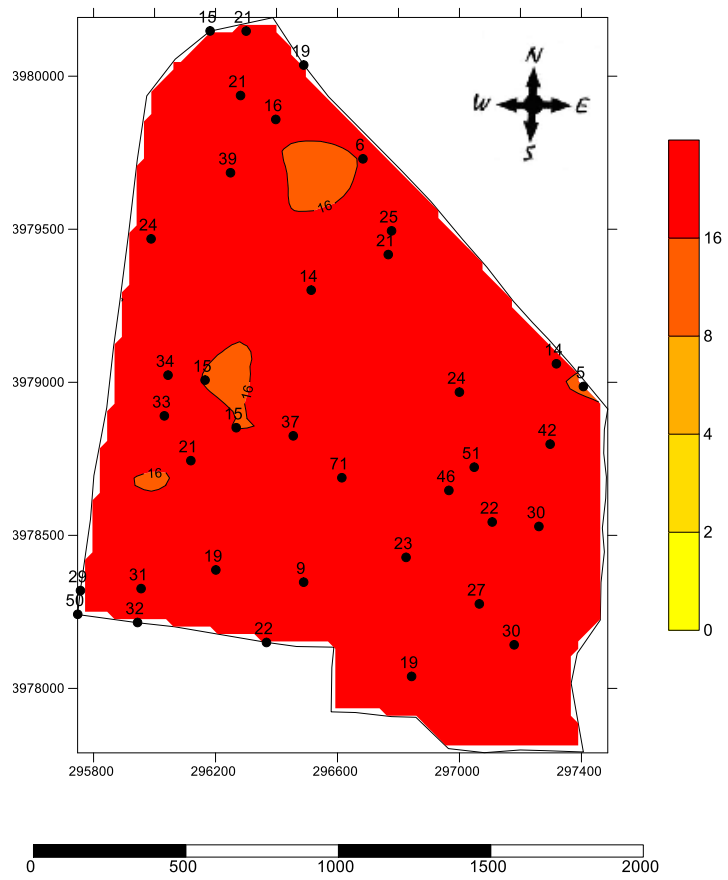


Figure 5: carte d'isovaleurs de H5 avec les points de CE_{ps} H5

ANNEXE II

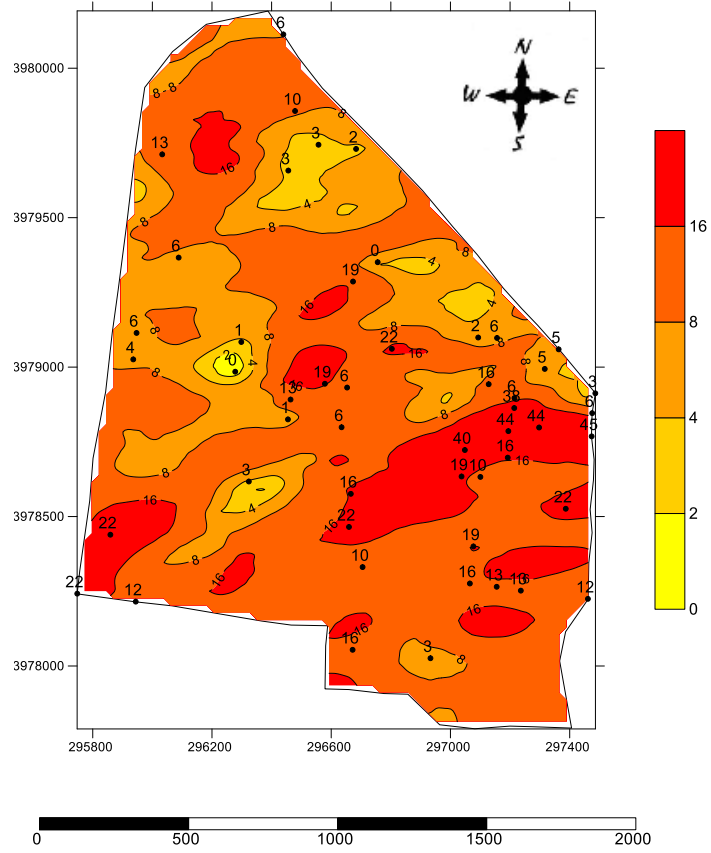


Figure 6: carte d'isovaleurs de H1 avec les points de CEC H1

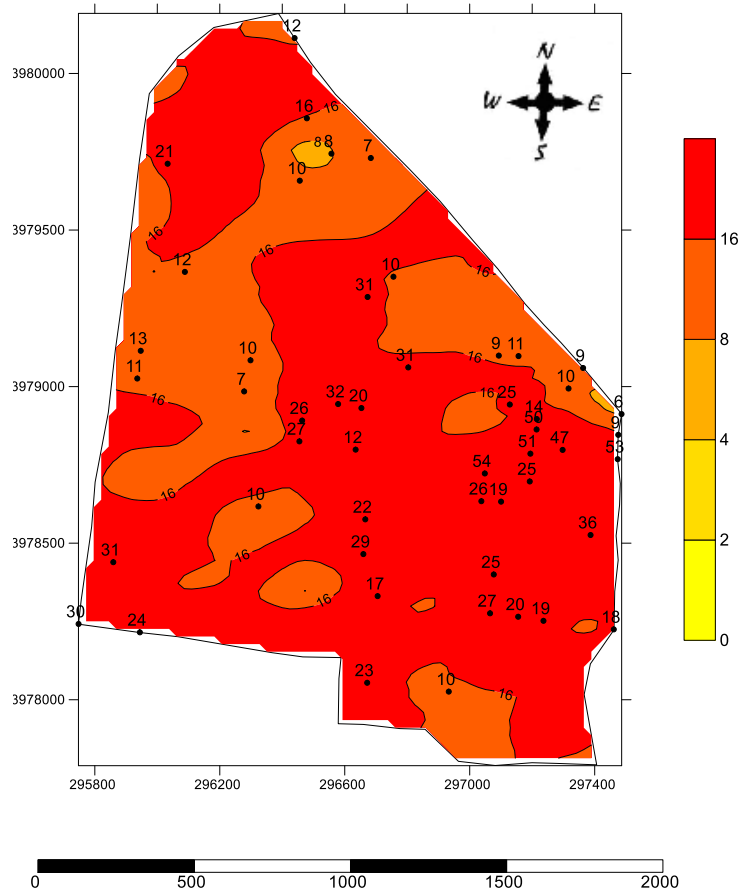


Figure 7: carte d'isovaleurs de H2 avec les points de CEC H2

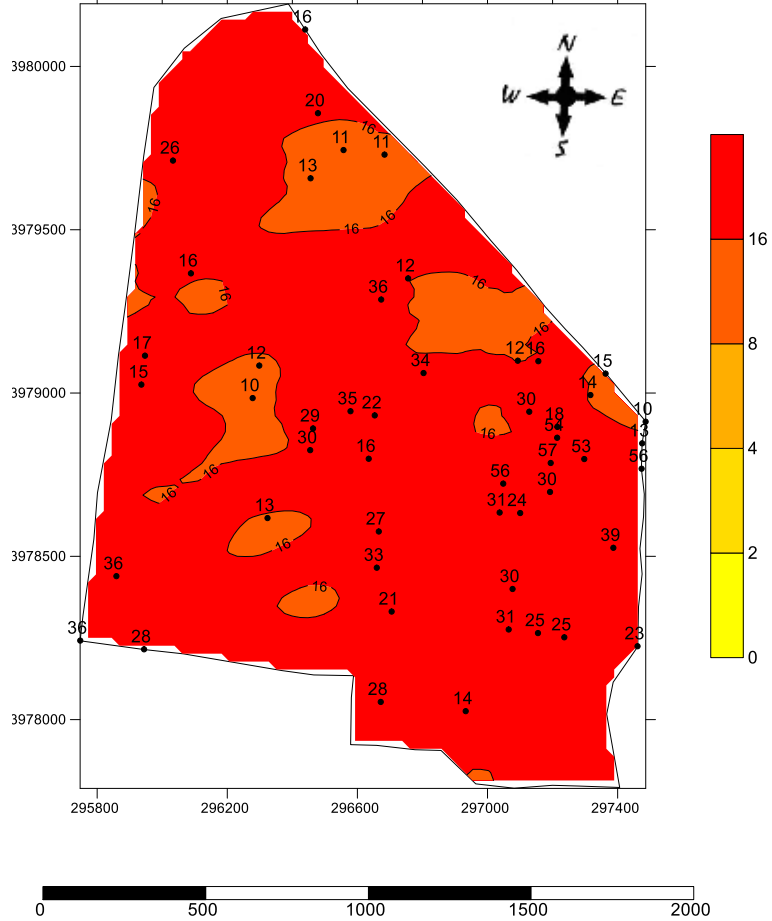


Figure 8: carte d'isovaleurs de H3 avec les points de CEc H3

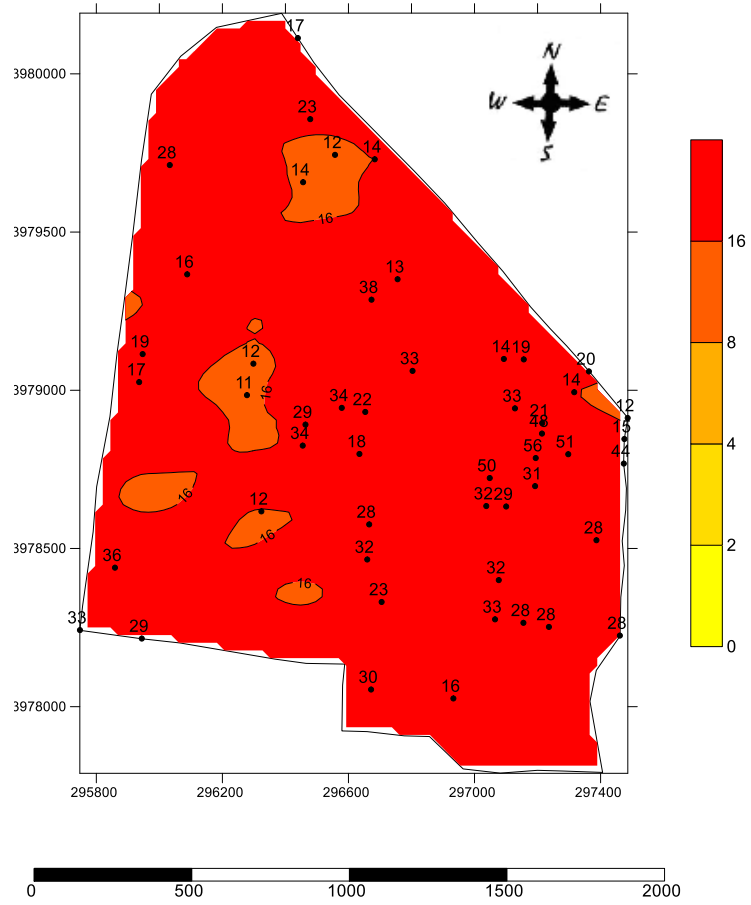


Figure 9: carte d'isovaleurs de H4 avec les points de CEc H4

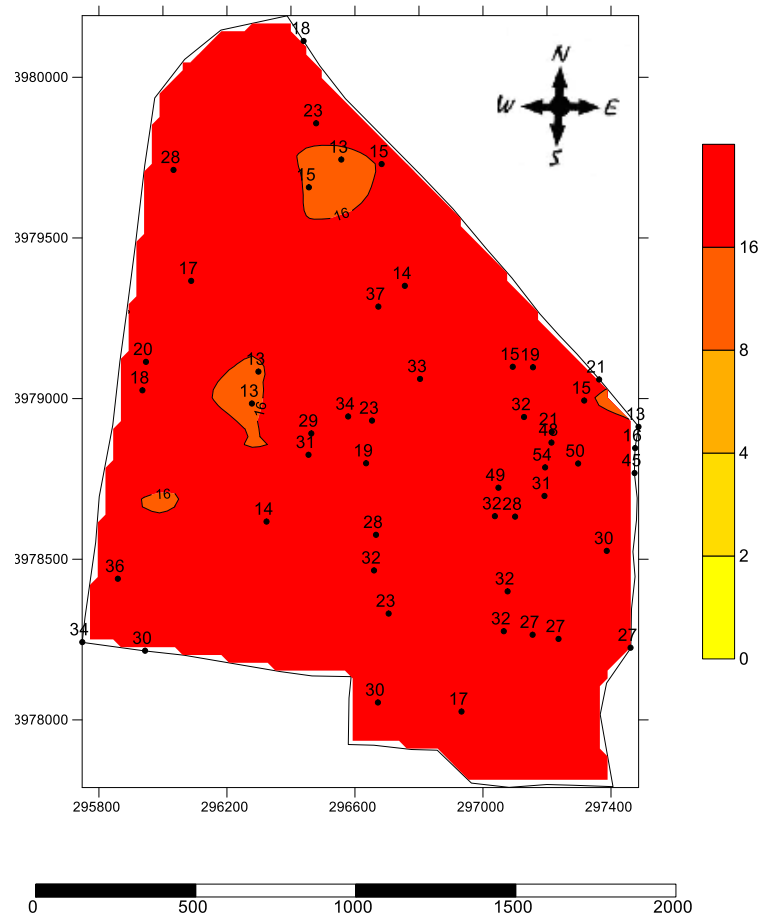


Figure 10: carte d'isovaleurs de H5 avec les points de CEC H5

ANNEXE III

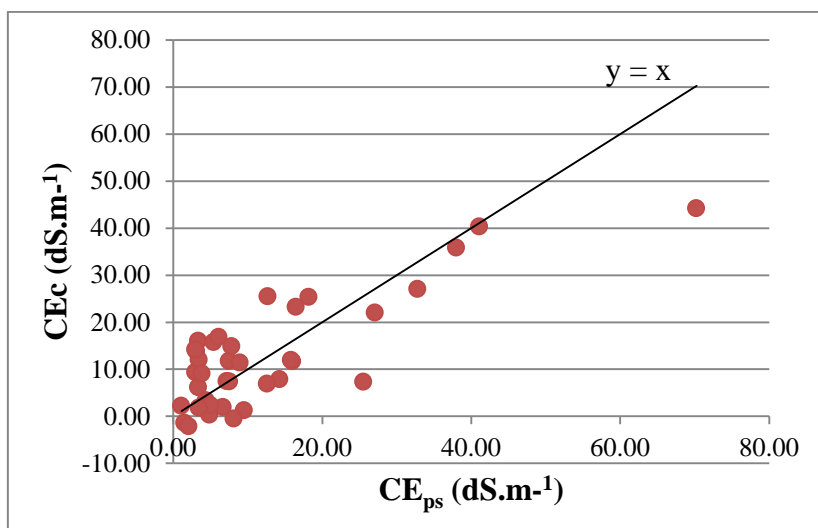


Figure 1: Nuage de points des valeurs estimées de H1

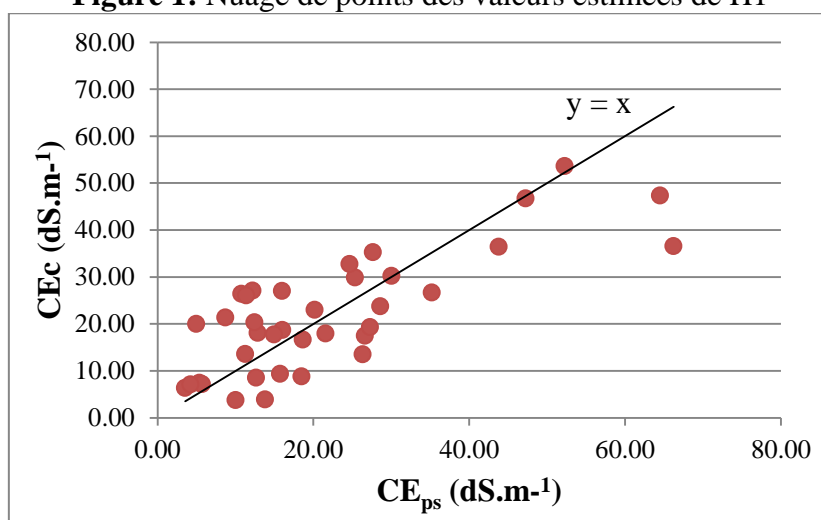


Figure 2: Nuage de points des valeurs estimées de H2

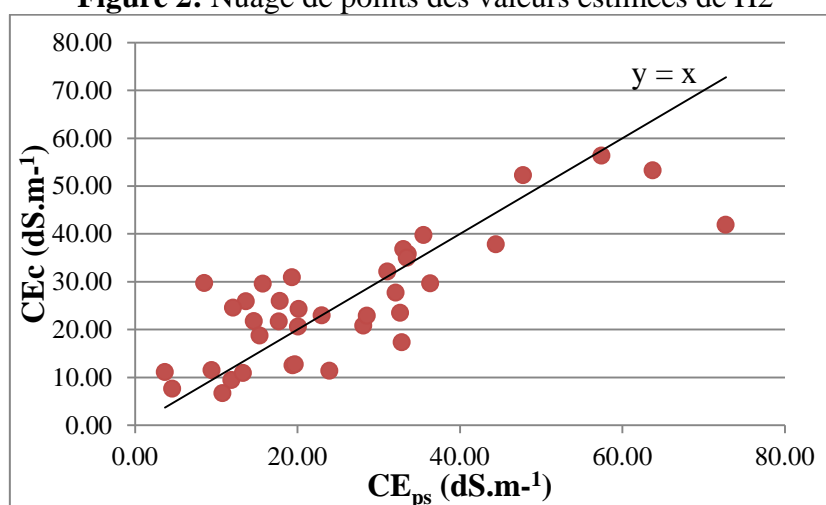


Figure 3: Nuage de points des valeurs estimées de H3

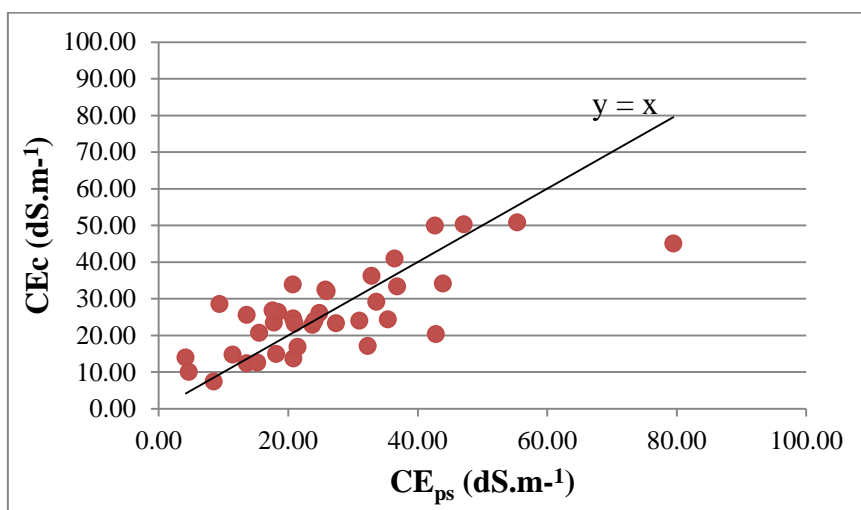


Figure 4: Nuage de points des valeurs estimées de H4

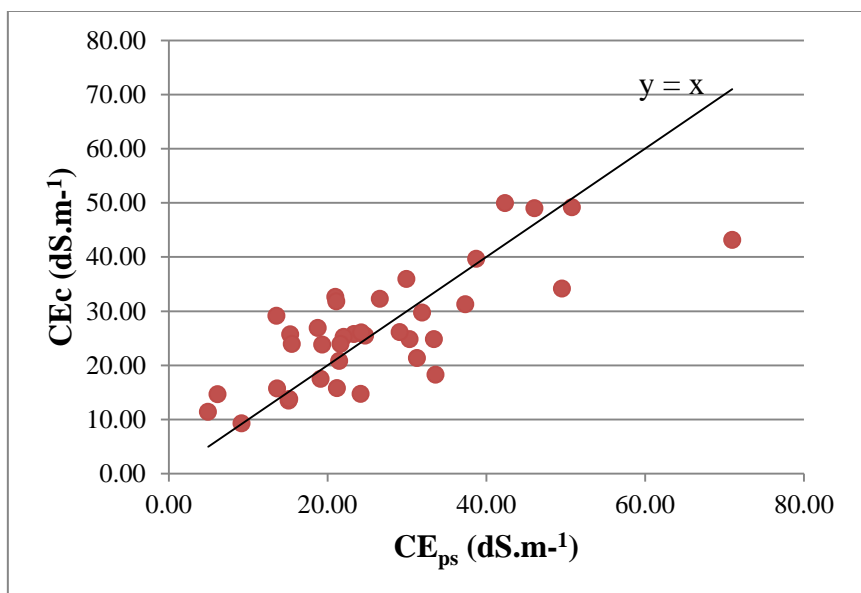


Figure 5: Nuage de points des valeurs estimées de H5