

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE

EL-HARRACH – ALGER

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة

الحراش- الجزائر

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat
en Sciences Agronomiques

Spécialité : Science du sol

THEME

**Cartographie et prédiction de la salinité des sols par
induction électromagnétique. Application aux sols sableux
de la région de R'Mel (Hodna-Algérie)**

Présentée par : Iddir Mohamed El-Amine

Devant le jury :

Président du jury : M. DAOUD Y. Professeur

Directeur de thèse : M. DJILI K. Professeur

Examineurs : M. DJAMAI R. Professeur

M. BENSLAMA M. Professeur

Année Universitaire : 2020-2021

Remerciements

Je remercie en premier lieu **Allah** le tout puissant de m'avoir accordé la force et le courage pour mener à terme ce travail.

Avant de présenter les résultats de mon travail, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Ma gratitude et mes remerciements les plus profonds vont à mon Directeur de thèse, Monsieur **Djili kaddour**, professeur à l'ENSA d'Alger, pour avoir accepté de diriger cette thèse, pour sa disponibilité et ses orientations tout au long de l'élaboration de ce travail.

J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur **DAOUD Youcef**, professeur à l'ENSA d'Alger, pour avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Mes plus vifs remerciements vont à Messieurs **DJAMAI Rachid** et **BENSLAMA Mohamed**, professeurs à l'université de Annaba pour avoir accepté de juger ce travail et de participer à ce jury.

Je tiens également à remercier mes amis **Redouane, Samir, Ouahab** et **Yacine** pour leur aide tout au long de ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

ملخص

إن الهدف من هذه الدراسة هو (1) إمكانية استعمال الحث الكهرومغناطيسي للكشف عن التباينات المكانية والزمانية لملوحة التربة على مستوى الحقول الزراعية (2) تقييم مدى جودة التنبؤ عن الإيصالية الكهربائية (I_k) المقاسة في الموقع باستعمال معادلات معايرة المنجزة خارج الموقع بين الإيصالية الكهربائية المقاسة مخبريا و الإيصالية الكهرومغناطيسية (I_{كه}) المقاسة بجهاز EM38. تم اجراء الدراسة على اربعة مواقع A، B، C و D من منطقة الرمل الواقعة جنوب شط الحضنة والتمتيزة بمناخ جاف، قوام رملي وبشدة الملوحة، حيث تعتمد في زراعتها على مياه السقي. تم اجراء هذه الدراسة على مدى أربعة سنوات موزعة حسب أربعة مواسم (فيفري 2008، فيفري 2009، نوفمبر 2009 و نوفمبر 2011). من خلال دراسة المقاطع الخطية فقد تبين أن الترب المعنية تمتاز بقوام رملي، محتوى منخفض من الكلس والجبس، قلوية، قليلة إلى متوسطة الرطوبة ومالحة إلى ذات ملوحة مفرطة، مع وجود تباين مكاني و زمني جد مرتفع لكل من الملوحة والرطوبة. كما أظهرت النتائج أن تأثير مختلف خواص التربة على الإيصالية الكهرومغناطيسية يكون مرتبا على نحو إك < الرطوبة % < الطين + السلت % < الكلس % < الجبس % < الأس الهيدروجيني. استنادا إلى هذه النتائج يمكن اعتبار أن الإيصالية الكهربائية العامل الأكثر هيمنة على تباينات الإيصالية الكهرومغناطيسية. من جهة أخرى فقد مكنتنا الخرائط المنجزة من تحديد التباينات الزمانية والمكانية للملوحة بصفة عالية الدقة مع اظهار مدى تأثير مواسم القياس على اختلاف مستويات هذه الخاصية. كما أظهرت النتائج إمكانية استخدام معادلات المعايرة المنجزة داخل الموقع لتقدير ملوحة التربة خارجه (ارتيابات مقبولة بالنسبة لأغلب المعادلات) وذلك في الأوساط المشابهة لمنطقة الدراسة. توجي هذه النتائج إلى أن معادلات المعايرة المتحصل عليها في مناطق محدودة يمكن تعميمها على مناطق أوسع بشرط أن يبقى الوسط البيدولوجي متجانسا إلى حد ما.

الكلمات المفتاحية: شط الحضنة - ملوحة التربة - الإيصالية الكهرومغناطيسية - المعايرة المستقرة خارجيا

Abstract

This research has two main objectives (1) the characterization of spatio-temporal variability of soil salinity by measuring apparent electrical conductivity (CE) using Electromagnetic Induction (EM) at a field scale and (2) evaluate the quality of in situ estimation salinity by using the ex situ calibration equations between the EC measured in laboratory and EM measured by EM38. A field experiment was conducted on four sites (A, B, C and D) located in R'Mell region at the south of chott El Hodna, the climate is arid and agriculture is dependent on irrigation. The survey has been done for four consecutive years (February 2008, February 2009, November 2009, and November 2011). Transects analysis of soil shows that these soils are sandy, low in calcium carbonate and high in gypsum, alkaline, saline to extremely saline. The results show high spatio-temporal variability of soil salinity and water content. The different parameter of soil impact EM measurement in the order $EC_{eq} > \text{Water content\%} > \text{Clay+Silt \%} > \text{CaCO}_3\% > \text{Gypsum\%} > \text{pH}$. This result suggests that the soil salinity is considered as the dominant parameter influencing EM variations. The soil salinity maps obtained through kriging have allowed depicting the Spatio-temporal variability of soil salinity and highlighting the season effect on the increase or decrease of soil salinity. Moreover, The results show that using the calibration equation for predicting EC is possible in the study area with Errors of prediction in an acceptable range for the majority of the equation ($0,02 \text{ dS/m} < \text{Error} < 0,87 \text{ dS/m}$). Hence, these results mean that the calibration equation obtained in a small area can be generalized to wider areas provided the pedological context is fairly homogeneous.

Key Words: Chott El Hodna - Soil salinity - Electromagnetic induction Extrapolated calibration - EM38

Résumé

Cette recherche a pour objectifs (1) d'utiliser la conductivité électromagnétique (EM) pour caractériser la variabilité spatio-temporelle de la salinité des sols à l'échelle de la parcelle et (2) d'estimer la qualité de la prédiction de la conductivité électrique (CE) in situ par utilisation des équations d'étalonnage établies ex situ entre CE mesurée au laboratoire et EM mesurée par l'EM38. L'expérimentation a été menée dans quatre sites A, B, C et D situés dans la région du R'mell au sud du chott El Hodna en milieu aride, sableux et salé dans lequel l'agriculture est tributaire de l'irrigation. Cette recherche a été réalisée durant quatre années et en quatre campagnes de mesures (février 2008, février 2009, novembre 2009 et novembre 2011). L'analyse des transects a montré que les sols des quatre sites sont sableux, peu pourvus en calcaire et en gypse, alcalins, peu à moyennement humides et salins à excessivement salins. Les résultats ont montré que la salinité et l'humidité présentent une très forte variabilité spatio-temporelle. Les différents paramètres pédologiques impacte la EM dans l'ordre $CE_{eq} > H\% > A+L\% > CaCO_3\% > Gypse\% > pH$. Ce résultat suggère que la salinité du sol est considérée comme le paramètre le plus dominant sur les variations de EM. Les cartes d'isovaleurs de la salinité ont permis de décrire finement la variabilité spatio-temporelle de ce paramètre et de mettre en évidence l'impact de l'effet 'période de mesure' sur l'augmentation ou la diminution de la salinité. Les résultats ont montré également que l'utilisation des équations établies in situ pour la prédiction de la salinité ex situ est possible et satisfaisante dans ce genre de milieu avec des erreurs globalement acceptables pour la majorité des équations d'étalonnages ($0,02 \text{ dS/m} < \text{erreurs absolues} < 0,87 \text{ dS/m}$). Ce résultat signifie que les équations d'étalonnage obtenues dans un secteur restreint peuvent être généralisées à des zones plus larges, à condition que le contexte pédologique reste assez homogène.

Mots clé : Chott El Hodna - Salinité du sol - Conductivité électromagnétique -Etalonnage extrapolé - EM38

Liste des abréviations

CE	Conductivité électrique
EC1:5	Conductivité électrique de l'extrait aqueux sol/eau : 1/5
CEes	Conductivité électrique de l'extrait de pate saturée
CEeq	Conductivité électrique équivalente à CEes
CEp	Conductivité électrique prédite
CEc	Conductivité électrique calculée
CEa	Conductivité Electrique apparent
EM	Conductivité électromagnétique
EMv	Conductivité électromagnétique en mode vertical
EMh	Conductivité électromagnétique en mode horizontal
Hsat%	Humidité pondérale du sol à saturation
ACP	Analyse en composante principale
RLS	Régression linéaire simple
RLM	Régression linéaire multiple
F8	Campagne de mesures (février 2008)
F9	Campagne de mesures (février 2009)
N9	Campagne de mesures (novembre 2009)
N11	Campagne de mesures (novembre 2011)
TA	Transect du site A
TB	Transect du site B
TC	Transect du site C
TD	Transect du site D
Δ EM	EMh - EMv
ET	Ecart type
Moy	moyenne arithmétique
Méd	La médiane
CV %	Coefficient de variation
1er Quar	Le premier quartile (25e percentile)
3ème Quar	Le troisième quartile (75e percentile)
Obs	Observation
WGS 84	World Geodetic System 1984

Liste des figures

Figure 1-1. Principe de fonctionnement de la conductimétrie électromagnétique	7
Figure 1-2. Conductimètre électromagnétique EM38 selon le mode vertical (V)(haut) et horizontal (H) (Bas)	10
Figure 1-3. Réponse du EM38 en fonction de la profondeur du sol	11
Figure 2-1. Situation géographique de la zone d'étude	16
Figure 2-2. Diagramme ombrothermique de Gaussen (1995 -2014)	17
Figure 2-3. Extrait de la carte géologique du Hodna	18
Figure 2-4. Carte des sols du Hodna	19
Figure 2-5. Site A (parcelle cultivée en maraîchage	20
Figure 2-6. Site B (parcelle cultivée en maraîchage et arboriculture).....	21
Figure 2-7. Site C (parcelle cultivée en Arboriculture).....	22
Figure 2-8. Site D (sols non cultivés)	23
Figure 2-9. Localisation des sites d'études	24
Figure 2-10. Dispositif d'échantillonnage.....	27
Figure 2-11. Organigramme de la méthodologie.....	31
Figure 3-1. Profil 1	33
Figure 3-2. Profils salin du site A.....	35
Figure 3-3. Profil 2	36
Figure 3-4. Profil salin du site B.....	37
Figure 3-5. Profil 3	38
Figure 3-6. Profil salin du site C.....	40
Figure 3-7. Profil 4	41
Figure 3-8. Profil salin du site D	42
Figure 3-9. Distributions verticales et latérales des taux de CaCO_3 dans TA, TB, TC et TD.....	46
Figure 3-10. Distributions verticales et latérales des taux de gypse dans TA, TB, TC et TD.....	48
Figure 3-11. Distributions verticales et latérales des taux de sables dans TA, TB, TC et TD	50

Figure 3-12. Distributions verticales et latérales des valeurs du pH dans TA, TB, TC et TD	52
Figure 3-13. Distributions verticales et latérales des de l'humidité pondérale dans TA.....	55
Figure 3-14. Distributions verticale et latérale de H % pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site A)	56
Figure 3-15. Distributions verticales et latérales des de l'humidité pondérale dans TB.....	58
3-16. Distributions verticale et latérale de H % pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site B).....	59
Figure 3-17. Distributions verticales et latérales des de l'humidité pondérale dans TC	61
Figure 3-18. Distributions verticale et latérale de H % pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site C).....	62
Figure 3-19. Distributions verticales et latérales des de l'humidité pondérale dans TD.....	65
Figure 3-20. Distributions verticale et latérale de H % pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site D)	66
Figure 3-21. Distributions verticales et latérales des de CEEq dans TA	69
Figure 3-22. Distributions verticale et latérale de CEEq pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site A)	70
Figure 3-23. Distributions verticales et latérales des CEEq dans TB	72
Figure 3-24. Distributions verticale et latérale de CEEq pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site B).....	73
Figure 3-25. Distributions verticales et latérales des CEEq dans TC	76
Figure 3-26. Distributions verticale et latérale de CEEq pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site C).....	77
Figure 3-27. Distributions verticales et latérales des CEEq dans TD	79
Figure 3-28. Distributions verticale et latérale de CEEq pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site D)	80
Figure 4-1. Distribution des différents paramètres pédologiques étudiés et de l'EMh sur les 2 plans factoriels (F1-F2 et F-F3) (0-90 cm).....	89

Figure 4-2. Distribution des différents paramètres pédologiques étudiés et de l'EMv sur les 2 plans factoriels (F1-F2 et F-F3) (0-150 cm).....	90
Figure 4-3. Parcelle irriguée à saturation située dans le site B.....	91
Figure 4-4. Dispositifs d'échantillonnage de la parcelle irriguée à saturation	92
Figure 4-5. Distribution des EMv et EMh dans TA pour les quatre campagnes de mesures.....	95
Figure 4-6. Distribution de Emv et de EMh dans TB pour les quatre campagnes de mesures	96
Figure 4-7. Distribution de Emv et de EMh dans TC pour les quatre campagnes de mesures	96
Figure 4-8. Distribution de EMv et de EMh dans TD pour les quatre campagnes de mesures.....	97
Figure 4-9. Evolution saisonnière des profils salins EM du site A	99
Figure 4-10 Evolution saisonnière des profils salins EM du site B.....	100
Figure 4-11. Evolution saisonnière des profils salins EM du site C.....	101
Figure 4-12. Evolution temporelle des profils salins EM du site D	102
Figure 4-13. Fréquences de CEp du site A.....	110
Figure 4-14. Fréquences de CEp du site B	110
Figure 4-15. Fréquences de CEp du site C	111
Figure 4-16. Fréquences de CEp du site D.....	111
Figure 4-17. Semivariogrammes ajustés du site A (0 -150 cm).....	113
Figure 4-18. Semivariogrammes ajustés du site A (0 -90 cm)	113
Figure 4-19. Semivariogrammes ajustés du site Site B (0 -150 cm).....	114
Figure 4-20. Semivariogrammes ajustés du site B (0 -90 cm)	114
Figure 4-21. Semivariogrammes ajustés du site C (0 -150 cm)	115
Figure 4-22. Semivariogrammes ajustés du site C (0 -90 cm)	115
Figure 4-23. Cartes d'isovaleurs du site A Site A (0 -90 cm).....	118
Figure 4-24. Cartes d'isovaleurs du site A Site A (0 -150 cm).....	118

Figures 4-25. Superficies% des classes de salinité des cartes du site A.....	119
Figures 4-26. Ecart absolu entre les différentes périodes des superficies% des classes de salinité des cartes du site A.....	119
Figure 4-27. Cartes d'isovaleurs du Site B (0 -90 cm).....	120
Figure 4-28. Cartes d'isovaleurs du Site B (0 -150 cm).....	120
Figures 4-29. Superficies% des classes de salinité des cartes du site B	121
Figures 4-30. Ecart absolu entre les différentes périodes des superficies% des classes de salinité des cartes du site B	121
Figure 4-31. Cartes d'isovaleurs du Site C (0 -90 cm).....	122
Figures 4-32. Cartes d'isovaleurs du Site C (0 -150 cm).....	122
Figures 4-33. Superficies% des classes de salinité des cartes du site C	123
Figures 4-34. Ecart absolu entre les différentes périodes des superficies% des classes de salinité des cartes du site C.....	124
Figure 5- 1. Courbes des CE1 .5 mesurées dans le site A et des CEc calculées par les cinq équations du modèle RLS.....	132
Figure 5-2. Cartes d'isovaleurs de salinité du site A obtenues par les équations A, B, C, D et G du modèle RLS	135

Liste des tableaux

Tableau 2-1. Données climatiques de la station de Boussaâda (1995-2014)	17
Tableau 2-2. Superficies des sites A, B et C selon la campagne de mesures	26
Tableau 3-1. Résultats d'analyses chimiques des eaux d'irrigation des deux forages	32
Tableau 3-2. Résultats des analyses du profil 1	34
Tableau 3-3. Résultats analytique du profil 2	37
Tableau 3-4. Résultats analytiques du profil 3	39
Tableau 3-5. Résultats analytiques du profil 4	42
Tableau 3-6. Paramètres statistiques des taux de CaCO ₃ dans TA, TB, TC et TD	45
Tableau 3-7. Paramètres statistiques des taux de gypse dans TA, TB, TC et TD	47
Tableau 3-8. Paramètres statistiques des taux de sable dans TA, TB, TC et TD	49
Tableau 3-9. Paramètres statistiques du pH dans TA, TB, TC et TD	51
Tableau 3-10. Paramètres statistiques de H % dans TA	54
Tableau 3-11. Paramètres statistiques de H % dans TB	57
Tableau 3-12. Paramètres statistiques de H % dans TC	60
Tableau 3-13. Paramètres statistiques de H % dans TD	64
Tableau 3-14. Paramètres statistiques de CE dans TA	68
Tableau 3-15. Paramètres statistiques de CE dans TB	71
Tableau 3-16. Paramètres statistiques de CE dans TC	74
Tableau 3-17. Paramètres statistiques de CE dans TD	78
Tableau 4-1. Valeurs de la distribution de la variance selon les différents axes factoriels pour les deux couches du sol	88
Tableau 4-2. Corrélations entre les différents paramètres étudiés et les facteurs	89
Tableau 4-3. Matrice de corrélations entre les EM _v et EM _h et les différents paramètres pédologiques étudiés	91
Tableau 4-4. Matrice de corrélations entre EM _v et EM _h et celles de la CE _{1.5} et l'humidité pondérale	93
Tableau 4-5. Paramètres statistique de EM	93

Tableaux 4-6. Ecart minimal et maximal des entre EMv et EMh du site A	99
Tableaux 4-7. Ecart minimal et maximal des entre EMv et EMh du site B	100
Tableaux 4-8. Ecart minimal et maximal des entre EMv et EMh du site C	101
Tableaux 4-9. Ecart minimal et maximal des entre EMv et EMh du site D	102
Tableau 4-10. Paramètres RLS1 et RLS2 des quatre sites d'étude pour les quatre campagnes de mesure.....	106
Tableau 4-11. Test de Wilcoxon entre CEEq et CEp	106
Tableau 4-12. Paramètres statistiques de CEp du site A	107
Tableau 4-13. Paramètres statistiques de la CEp du site B	108
Tableau 4-14. Paramètres statistiques de la CEp du site C	109
Tableau 4-15. Paramètres statistiques de CEp du site D	109
Tableau 4-16. Caractéristiques des semivariogrammes des sites A, B et C.....	116
Tableau 5-1. Caractéristiques moyennes des sols étudiés	128
Tableau 5-2. Paramètres des cinq équations d'étalonnages du modèle RLS	129
Tableau 5-3. Paramètres des cinq équations d'étalonnage du modèle RLM1	129
Tableau 5-4. Paramètres des cinq équations d'étalonnage du modèle RLM2	129
Tableau 5-5. Caractéristiques statistiques des CE _{1,5} , CEc (RLS), CEc (RLM 1) et CEc (RLM2)	130
Tableau 5-6. Coefficients de corrélation r entre les CE _{1,5} et les CEc calculées par les équations A, B, C et D des trois modèles RLS, RLM1 et RLM2	130
Tableau 5-7. Tests de sign et de Wilcoxon entre CE _{1,5} et CEc calculées par les modèles RLS et RLM	131
Tableau 5-8. Tests de sign et de Wilcoxon entre les CEc calculées par les modèles RLS, RLM1 et RLM2.....	131
Tableau 5-9. Moyennes et bornes inférieures et supérieures des différences absolues entre CEc calculées par le modèle RLS, RLM1 et RLM2	132
Tableau 5-10. Statistiques descriptive des différences absolues entre les conductivités électriques mesurées et celles calculées par les différentes équations du modèle RLS	134

Tableau 5-11. Tests de sign et de Wilcoxon entre les valeurs de la $CE_{1.5}$ du site A et la CEC calculées par les équations du modèle RLS au niveau du site A	134
Tableau 5-12. Superficies des classes de salinité des cartes A, B, C, D, et G	136
Tableau 5-13. Taux d'erreur de l'estimation des superficies des cartes B, C et D par rapport à la superficie de la carte A	137

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Principe et application de l'induction électromagnétique en science du sol	5
1. L'induction électromagnétique	5
2. Les propriétés pédologiques qui influencent EM	7
3. Principe de fonctionnement de l'EM38	10
4. Mesures de la salinité du sol par induction électromagnétique	12
Chapitre II : Matériel et méthodes	15
1. Le contexte de l'étude.....	15
2. Choix des sites d'étude	19
3. Méthodologie adoptée	24
3.1. Expérimentation sur terrain	25
3.2 Traitements statistiques et géostatistiques des données	28
3.3. Méthode d'analyses des échantillons du sol	29
3.4. Conversion des mesures CE1/5 en CE (extrait saturé)	30
Chapitre III : Les sols et les eaux de la zone d'étude	32
1. Les eaux d'irrigation	32
2. Caractérisation des profils pédologiques	33
3. Caractérisation analytique des sols et évolution spatio-temporelle de CE des quatre transects	44
3.1. Caractérisation physico-chimiques des échantillons prélevés au niveau des transects	44
3.2. Caractérisation de la salinité des échantillons prélevés au niveau des transects	67
Chapitre IV : Evaluation de la salinité du sol par induction électromagnétique	87
1. Effet des différents paramètres du sol sur EM	87
1. 1. Résultats de l'ACP.....	88
1. 2. Les tests de corrélation simples	90
2. Analyse de EM des transects	93

3. Dynamique saisonnière des profils EM.....	97
4. Cartographie spatio-temporelle de la salinité par EM.....	104
4.1. Etalonnage de EM	104
4.2. Validation des équations d'étalonnage	105
4.3. Analyse statistique de CEp	107
4.4. Cartographie en courbes d'isovaleur de la CEp	111
Chapitre V: Prédiction de la salinité du sol par extrapolation d'un modèle d'étalonnage de EM.....	126
1. Caractéristiques des sols étudiés.....	128
2. Choix du modèle d'étalonnage	129
3. Prédiction de la salinité des sols par le modèle RLS	132
4. Cartographie de la salinité par le modèle RLS	134
Conclusion générale	138
Références bibliographiques.....	142
Annexes.....	154

Introduction générale

La salinisation des sols est un problème majeur à l'échelle du globe. Elle affecte environ 400 millions d'ha et menace gravement une surface équivalente (FAO, 2005 ; Legros, 2009). Une bonne partie du phénomène de salinisation se localise dans les terres arides et semi arides, du fait que le processus de salinisation est plus marqué par des températures élevées durant presque toute l'année, du drainage restreint et de la faiblesse des précipitations qui sont insuffisantes pour lixivier les sels solubles du sol (FAO, 2005). Dans ces milieux, l'irrigation est vitale pour la production agricole, mais sa mauvaise utilisation peut engendrer des effets négatifs sur la qualité des sols en augmentant la salinité du sol (Lal et Stewart, 1990 ; Djili et al., 2003) et constituerait donc un problème majeur pour la durabilité des terres irriguées (Bouksila et al., 2012). Environ 25% des zones irriguées dans le monde sont affectés par la salinité et la saturation en eau (Rhoades, 1992). Le régime hydrique du sol joue un rôle important, puisqu'il détermine les changements de phases observés dans le sol et conditionne l'infiltration de l'eau (Bauder et al., 2007). Le processus de salinisation peut se développer lors d'un mauvais drainage qui induit des transferts et des accumulations locales de sels ou qui redistribue dans le profil des sels hérités (Adam, 2011). La présence des sels solubles dans l'eau d'irrigation et le pouvoir évaporateur de l'air dans les zones irriguées conduisent souvent à la salinisation des sols irrigués et particulièrement en zones arides et semi-arides (Lahlou et al., 2002).

L'étude du fonctionnement salin des sols à l'échelle parcellaire est un véritable challenge pour les spécialistes. De ce fait, la bonne gestion de l'agriculture irriguée nécessite une bonne caractérisation de l'évolution temporelle et spatiale de ce phénomène (Corwin et Lesh, 2003). Or, les méthodes conventionnelles de mesure de la salinité par le biais de la conductivité électrique (CE) des extraits saturés ou dilués ne peuvent répondre à une telle exigence sur les plans spatial et temporel. Elles ne fournissent, en effet que des informations ponctuelles sur les teneurs en sel du sol et elles sont donc peu représentatives du milieu (Job et al., 1987 ; McKenzie et al., 1989). De même, elles nécessitent souvent de nombreux prélèvements de volumes de sol d'où leur caractère destructif. En plus, cette méthode est longue et coûteuse, et demande des efforts remarquables d'où la nécessité de développer des méthodes plus rentables pour une caractérisation spatiale efficace et rapide de la salinité du sol. Ainsi, les méthodes géophysiques développées in situ se sont avérées bien adaptées à cette problématique, en particulier par la conductivité électromagnétique qui appréhende la salinité sur un grand volume de sol (Corwin et Lesch, 2005b ; Amezketa, 2007). Ces méthodes

récentes appliquées à la surface du sol permettent une acquisition rapide et exhaustive d'informations spatialisées sur le fonctionnement du sol, de façon non intrusive. Elles permettent aussi de réaliser de très nombreuses mesures réparties tant dans l'espace que le temps.

Le succès de cette méthode non destructrice du sol est dû au fait qu'elle offre un jeu de données plus important que la méthode conventionnelle qui s'appuie sur l'extrait de pate saturée. Utilisées généralement en valeurs relatives, les mesures électromagnétiques peuvent être étalonnées par rapport à des méthodes d'extraction de la solution du sol et des mesures de CE au laboratoire (Corwin et Rhoades, 1984 ; McKenzie et al., 1989). Cependant, la qualité de l'estimation des niveaux de salinité à partir des lectures de la EM est fortement tributaire des équations d'étalonnage qui relient CE des extraits du sol aux conductivités électriques apparentes (CEa) (Triantafilis et al., 2000). Ainsi, de nombreux modèles d'étalonnage de CE aux EM ont été utilisés (Rhoades et Corwin, 1981 ; McKenzie et al., 1989 ; Rhoades et al., 1989 ; Lesch et al., 1995). Dans ce sens, López Bruna et Herrero (1996) ont montré que les modèles linéaires simples donnent généralement des résultats suffisamment précis. Cependant, l'utilisation de ces modèles exige que le paramètre étudié soit le plus dominant par rapport aux autres paramètres pédologiques (Cook et al., 1989 ; Sudduth et al., 2005 ; Viscarra Rossel et al., 2011 ; Kuang et al., 2012). Toutefois, d'autres travaux se sont appuyés sur des modèles non linéaires pour minimiser les erreurs d'estimation de CE. Ainsi, Johnston et al. (1997) ont montré que certains biais sont dus essentiellement aux variations de l'humidité et de la texture dans le volume exploré du sol. De même, d'autres paramètres pédologiques tels que le type d'argile (Williams et Hoey, 1987; Brus et al., 1992), la CEC (McBride et al., 1990), la matière organique, la densité apparente et les cations et anions échangeables ou solubles (Hedley et al., 2004 ; Jung et al., 2005 ; Sudduth et al., 2005) peuvent influencer la qualité du modèle utilisé. Ainsi, il s'avère que l'obtention d'un bon étalonnage de CE par rapport à EM est tributaire de l'homogénéité verticale et spatiale des paramètres pédologiques des sols étudiés. Dans ce sens, de nombreux travaux (De Jong et al., 1979 ; Corwin et Rhoades, 1984 ; Montoroi, 1994 ; Ceuppens et Wopereis, 1999 ; Barbiéro et al., 2000) ont mis en évidence l'intérêt de cette approche pour une meilleure connaissance des sols salés. Cependant, cette approche colporte encore de fortes incertitudes sur la manière d'évaluer et de prédire la salinisation des sols irrigués. Deux types de raison expliquent ces difficultés persistantes :

- La complexité du phénomène : La salinisation est la résultante de plusieurs mécanismes qui se produisent dans les sols cultivés, notamment des processus de transfert d'eau et de solutés des processus géochimiques (Adam, 2011). Ces mécanismes ont été individuellement très étudiés, mais la compréhension de leurs interactions reste très difficile à appréhender.

- La grande variabilité des manifestations du phénomène de salinisation qui sont très variables dans le temps et l'espace. En conséquence, l'évolution de la salinisation est souvent spécifique du milieu et des échelles de temps et d'espace étudiées (Condom, 2000). Cela rend difficile le transfert des résultats d'un contexte à un autre.

Dans ce sens, les sols du chott El-Hodna offrent un bon exemple d'un système pédologique à forte variabilité spatiale de la salinité conjuguée, en plus, à une diversité des cultures et de l'irrigation. L'environnement climatique y est agressif, l'eau est rare et le drainage est souvent déficient. En s'appuyant sur des sols sableux et très salés situés au sud du chott, dans la région de R'mel, la présente recherche porte sur l'utilisation de EM pour caractériser et suivre la dynamique saisonnière et annuelle de la salinité du sol. Pour ce faire, deux approches complémentaires ont été mises en œuvre:

- Etudier et cartographier la variabilité spatio-temporelle de la salinité des sols par les méthodes électromagnétique. Nous cherchons à décrire l'extension spatiale et saisonnière de la salinité par l'utilisation de ces méthodes non intrusives qui permettent d'accroître les densités d'échantillonnage et de répéter les mesures dans le temps.

- Evaluer la qualité de l'estimation de la salinité in situ par utilisation des équations d'étalonnage établies ex situ entre CE et EM mesurée par le Geonics EM38. Ceci permettra d'évaluer la possibilité de généraliser les équations d'étalonnage réalisées dans une zone localisée à une zone plus étendue.

Pour répondre aux objectifs de cette recherche, le présent document a été structuré en cinq chapitres:

- Le premier chapitre est une description de la méthode géophysique mise en œuvre et qui est l'utilisation de EM par EM38. L'analyse bibliographique a porté sur les fondements théoriques de cette méthode et sur la description de ses principaux paramètres d'influence et son application en science du sol.
- Le deuxième chapitre est réservé à la présentation de la région d'étude en insistant sur les caractéristiques principales du paysage, du climat, de la géologie, de la végétation

et des sols. C'est dans ce chapitre que sont présentés les détails des principales approches méthodologiques utilisées.

- Le troisième chapitre est une caractérisation morpho-analytique des propriétés des sols étudiés.
- Le quatrième chapitre porte sur la quantification des variations spatiales et temporelles de la salinité des sols par suivi électromagnétique couplé aux méthodes géostatistiques.
- Le cinquième chapitre consiste à tester et à évaluer la qualité de l'estimation de CE in situ par utilisation des équations d'étalonnage de EM établies ex situ. Ceci permettra d'évaluer la possibilité de généraliser les équations d'étalonnage réalisées dans un secteur restreint à un secteur plus étendu.

Les résultats obtenus seront synthétisés et discutés. Cette thèse se termine par une conclusion générale qui met en relief les principaux résultats obtenus et les perspectives de recherches à entreprendre dans ce domaine.

Chapitre I : Principe et application de l'induction électromagnétique en science du sol

Dans ce chapitre, nous présentons le principe de fonctionnement des appareils électromagnétiques et nous citons les paramètres pédologiques qui influencent la conductivité électromagnétique (EM). Pour terminer, une synthèse bibliographique des principaux travaux en science du sol concernant l'étalonnage de EM sera présentée.

Introduction

EM est un paramètre géophysique fréquemment utilisé par les pédologues pour caractériser la salinité des sols, la minéralisation de la solution du sol ou de l'eau des aquifères (De Jong et al., 1979). Les méthodes électromagnétiques sont appliquées pour mesurer EM (CEa) du sol et du sous-sol. On parle de CEa de surface « near surface » pour des profondeurs du sol de 0 à 1,5 mètres (McNeill, 1980). Dans la littérature, les expressions CEa ou EM sont utilisées. Il semble que la préférence de l'une ou de l'autre des expressions dépende de l'origine scientifique des auteurs (Besson, 2007). L'expression de CEa reste toutefois la plus utilisée (Besson, 2007). Dans la présente étude, nous utilisons indifféremment les deux termes pour faire référence au même concept relatif à la mesure de la conductivité par induction électromagnétique. Les méthodes électromagnétiques sont fréquemment utilisées dans plusieurs domaines tels que la géologie (Toé, 2004 ; Descloitres et al., 2007), la pédologie (Johnston et al., 1997 ; Jung et al., 2006), l'hydrogéologie (Chalikakis, 2006), l'archéologie (Chávez et al., 2001 ; Martino et al., 2006) et la pétrologie (Pommier et Garnero, 2014) entre autres. Ces méthodes mettent en œuvre des fréquences du champ électrique ou électromagnétique très diverses et n'ont pas la même capacité d'investigation (Rhoades et al., 1999). Les pédologues s'intéressent particulièrement à ces méthodes pour leur caractère non destructif et leur capacité à intégrer le milieu dans ses trois dimensions (Besson, 2007).

1. L'induction électromagnétique (EM)

EM est un paramètre utilisé en prospection géophysique comme en physique, décrit un phénomène qui combine les champs électriques et magnétiques. La propagation d'une onde électromagnétique ou la conduction d'un courant électrique dans un sol dépend de ses propriétés électriques et magnétiques, telles que la conductivité électrique (CE), la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique (Besson, 2007). Ces propriétés sont mises en relation avec le champ électromagnétique par les équations de Maxwells. Son fonctionnement est basé sur l'utilisation de deux dipôles électromagnétiques correspondant à deux bobines ou spires espacées d'une distance inter-spires « S », l'une étant émettrice et

l'autre réceptrice, où les champs électromagnétiques sont générés et détectés à l'intérieur de bobines dans lesquelles circulent des courants alternatifs. Lorsque la spire primaire (émettrice) (SP) est parcourue par un courant électrique de basse fréquence F, elle produit un champ magnétique primaire Hp de même fréquence qui crée dans le sol supposé homogène des courants induits (courants de Foucault) (Michot, 2003). Ces courants produisent à leur tour un champ magnétique secondaire de même fréquence qui se superpose au champ magnétique primaire et qui est mesuré à l'aide d'une spire secondaire (réceptrice) (SS) (Job et al., 1987) (Figure 1-1). L'amplitude et la phase du champ secondaire sont différentes de celles du champ primaire en raison de la variation des propriétés du sol (taux d'argile, teneur en eau, salinité...), de la distance inter-bobine et de leur orientation, de la fréquence du courant et de la distance au-dessus de la surface du sol (Hendrickx et kachanoski, 2002 ; Corwin et Lesch, 2003). Le rapport entre le champ magnétique secondaire mesuré et le champ primaire émis est proportionnel à EM du sol et donne directement accès à son inverse, la résistivité électrique (Michot, 2003). Selon McNeill (1980), celle-ci est égale à :

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 S^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \dots \dots \dots eq (1)$$

Hs : champ magnétique secondaire à la bobine réceptrice (A.m⁻¹)

Hp : est le champ magnétique primaire à la bobine émettrice (A.m⁻¹)

ω: 2πf

f : fréquence (Hz)

μ₀ : perméabilité magnétique du vide en henry par mètre (H. m⁻¹)

S : distance inter bobine (m)

σ_a : EM du sol (S.m⁻¹)

La profondeur de pénétration du champ électromagnétique ou effet de peau « δ », elle provoque la décroissance de la densité de courant à mesure que l'on s'éloigne de la périphérie du conducteur (Telford, 1982). Elle est donnée par la relation :

$$\delta = x = \sqrt{\frac{2}{\mu \cdot \omega \cdot \sigma}} \dots \dots \dots eq(2)$$

$$\mu = \mu_0 (1 + Xm) \dots \dots \dots eq(3)$$

Avec Xm susceptibilité magnétique du milieu (sans dimension) et μ perméabilité du milieu.

Pour les milieux non magnétiques, Xm est nul μ = μ₀.

La profondeur de pénétration du champ dépend donc essentiellement de la résistivité du sol traversé et de la fréquence F du champ émis.

Le rapport HS / HP eq (1), pour une même position initiale de spire, dépend de la géométrie des lignes de courant dans le sol et donc du volume exploré et de la conductivité propre du sol (Job et al., 1987). Cette conductivité dépend à son tour des différents paramètres du sol influençant EM du sol (CE de la solution du sol (salinité), texture, teneur en eau, porosité...) (McNeill, 1992 ; Rhoades et al., 1999).

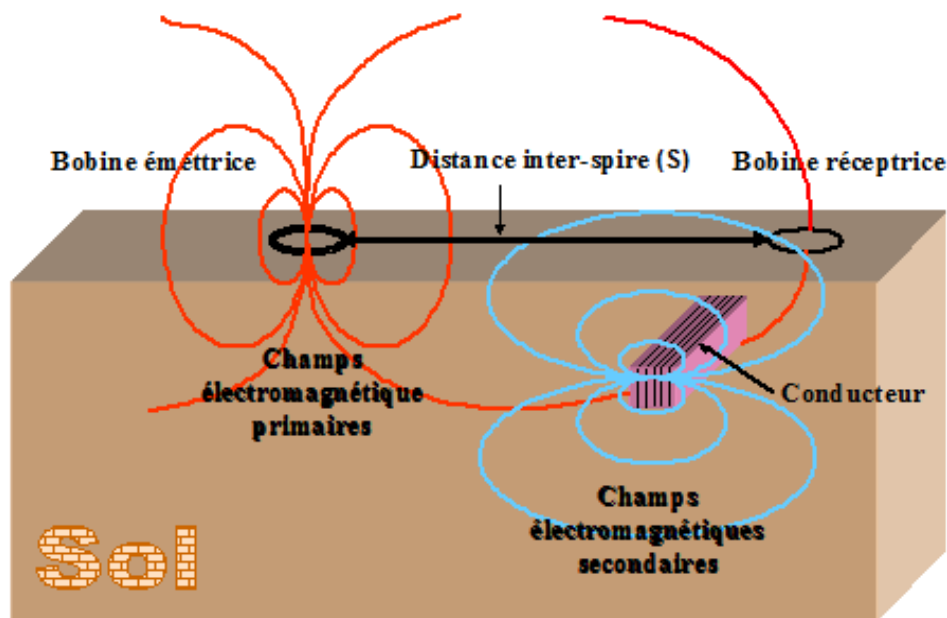


Figure 1-1. Principe de fonctionnement de la conductimétrie électromagnétique (Iddir, 2006)

2. Les propriétés pédologiques qui influencent EM

Historiquement, c'est le problème de la salinisation du sol qui a incité les chercheurs à développer depuis une quarantaine d'années la mesure de EM (De Jong et al., 1979 ; Rhoades et Corwin, 1981 ; McKenzie et al., 1989 ; McBride et al., 1990 ; Jung et al., 2006 ; Kuang et al., 2012). Les recherches sont alors essentiellement orientées sur l'évaluation de la salinité. Le développement d'équipements mobiles de mesure de EM a permis d'économiser du temps et d'améliorer la gestion des parcelles cultivées (Sudduth et al., 2001). Parallèlement, d'autres applications de la mesure de EM du sol ont été développées, la mesure de EM devenant alors une mesure indirecte de nombreux paramètres physico-chimiques du sol, tels que l'humidité du sol, le taux d'argile, la capacité d'échange cationique, la matière organique et la densité apparente (Williams et Hoey, 1987 ; Brus et al., 1992 ; McBride et al., 1990 ; Abu-Hassanein et al., 1996 ; Hedley et al., 2004 ; Jung et al., 2005 ; Sudduth et al., 2005). L'influence de ces paramètres sur EM du sol sont largement décrits dans la bibliographie (Rhoades et Corwin, 1981 ; McNeill, 1980 ; Abu-Hassanein et al., 1996 ; Michot, 2003 ; Besson, 2007).

2.1. La composition ionique de la solution du sol

Dans les sols, CE est principalement de type électrolytique, elle est liée directement à la concentration électrolytique et au déplacement des ions dans la solution du sol (Michot, 2003). La CE concerne les charges électriques libres en solution (charge électrolytique). Un électrolyte est un composé qui se dissout en se dissociant en ions, porteur de charges rendant ainsi la solution conductrice (Besson, 2007).

La relation entre CE des sols et EM a fait l'objet de nombreuses études (De Jong et al., 1979 ; Rhoades et al., 1999 ; Hendrickx et al., 2002). De nombreuses études visent à étudier la variabilité spatiale de la salinité à l'échelle parcellaire (Rhoades et Corwin, 1981 ; Corwin et Rhodes, 1982 ; Corwin et lesch, 2005a). La relation entre CE du sol et EM est analysée par des modèles de régression linéaire (De Jong et al., 1979 ; Abdel Ghany et al., 2000 ; Nogués, et al., 2006 ; McLeod et al., 2010 ; Herrero et al., 2011) et multiple (Rhoades et corwin, 1981 ; Rongjiang et Jingsong, 2010) et elle est extrapolée par la suite sur l'ensemble de la parcelle. Cependant, l'utilisation de ces modèles exige que le paramètre étudié (CE de la solution du sol) soit le plus dominant par rapport aux autres paramètres pédologiques (Cook et al., 1989 ; Sudduth et al., 2005 ; Viscarra Rossel et al., 2011 ; Kuang et al., 2012).

2.2. La teneur en eau du sol

La teneur en eau du sol ou humidité du sol est une variable qui évolue dans l'espace et dans le temps. La teneur en eau est l'un des principaux paramètres à contrôler dans les études géophysique électrique.

- Elle représente le solvant responsable de la dissolution et dissociation en ions des solutés.
- Elle contrôle la concentration ionique de la solution du sol et a donc un impact direct sur l'intensité de charges électriques.
- Elle est le principale responsable du déplacement des charges électriques dans l'ensemble du milieu.

De nombreux travaux (Job et al., 1987 ; Montoroi et al., 1997 ; Corwin et Lesch, 2003 ; Sudduth et al., 2005) ont mis en évidence des corrélations significatives entre les mesures de EM et l'humidité du sol. D'autres auteurs (Besson, 2007) ont montré que, sur des sols à texture hétérogène, la teneur en eau explique 96% de la variation de EM. Par ailleurs, Fukue et al. (1999) ont révélé une diminution brutale de EM à partir d'une teneur en eau supérieure à 10% dans des sols argileux. Michot (2003) a trouvé le même résultat avec une étude menée sur des sols argilo-limoneux. D'autres études (Auerswald et al., 2001 ; Daglarad et al., 2001)

ont montré que la corrélation entre EM et la texture du sol est accentuée lorsque la teneur en eau du milieu est la plus élevée.

La variation de la teneur en eau peut aussi avoir une influence indirecte sur EM en modifiant les échanges anioniques, la salinité de la solution du sol, ou en entraînant une redistribution des particules solides (Besson, 2007).

2.3. La température du sol

La température de la solution du sol a une importante influence sur CEa (Lesch et al., 1992). Son influence est principalement due à son effet sur la viscosité des liquides qui affecte directement la mobilité électrique. L'augmentation de la température provoque une augmentation du degré de dissociation des sels présent dans la solution, une diminution de la viscosité de l'eau et donc une augmentation de la mobilité des ions présents (Michot, 2003).

2.4. La texture du sol

Les particules argileuses sont électronégatives et influencent donc CE globale à travers les interfaces eau-surface du colloïde. La concentration ionique totale au voisinage de la surface de la particule argileuse est plus élevée que celle de l'eau des pores. La conduction électrique dans les sols argileux se concentre dans les pores et à la surface des particules argileuses chargées électriquement (Rhoades et al., 1976 ; Urish, 1981 ; Michot, 2003), par contre dans les sols sableux elle apparaît initialement dans le liquide contenu dans les pores (Jackson, 1975).

De nombreux auteurs (Fukue et al., 1999 ; Dalgaard et al., 2001) ont montré que les argiles du sol provoquent une augmentation de CEa surtout quand la conductivité de la solution des sols est faible.

2.5. La structure du sol

De nombreuses études ont montré l'effet de l'arrangement des particules du sol sur CEa (Abu-Hassanein et al., 1996 ; Saarenketo, 1998, Richard et al., 2005). Ces travaux ont montré que l'influence de la teneur en eau sur CEa des échantillons les plus compactés est relativement restreinte par rapport aux échantillons les moins denses.

La variation de CEa est liée à la modification de la porosité du sol (diminution de la porosité structurale au profit de la porosité texturale) ce qui engendre une augmentation de la capacité en eaux dans les sols compactés (Richard et al., 2001).

3. Principe de fonctionnement de EM38

Le EM38 (Geonics Ltd, Canada) est un conductimètre portable, à faible induction, constitué essentiellement de deux bobines d'induction espacées de 1 m. L'excitation est de 14.6 kHz et la précision de mesure de EM et de 0.1 ms/m. EM38 peut être utilisé selon deux configurations (figure 1-2) :

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



Figure 1-2. Conductimètre électromagnétique EM38 selon le mode vertical (V) (haut) et horizontal (H) (Bas)

3.1. Réponse du EM38 en fonction de la profondeur

La mesure de la salinité du sol avec EM38 est basée sur la mesure des dipôles des deux positions en même temps à fin d'évaluer qualitativement la distribution de la salinité dans le profil. La figure 1-3 montre la réponse du conductimètre en fonction de la profondeur. En mode vertical de dipôle, la sensibilité de l'appareil atteint le maximum entre 0,3 et 0,6 m et diminue ensuite progressivement vers la profondeur. En mode horizontal, la réponse est plus élevée en surface et diminue ensuite vers la profondeur (McKenzie et al., 1989 ; Sudduth et al., 2001). Selon Corwin et Rhoades (1984) et Job et al. (1987), cette différence dans la sensibilité peut être utilisée comme étant une méthode rapide pour déterminer si la couche superficielle du sol est plus conductrice que la couche profonde ou non. En d'autres termes, si EM en mode horizontal (EM_h) est supérieure à celle en mode vertical EM_v , on se trouve au-dessus d'un profil salin décroissant avec la profondeur, situation indiquant une concentration des sels en surface. Dans le cas contraire, il s'agit d'un profil salin croissant avec la profondeur

où les sels se sont accumulés. Si $EM_h = EM_v$, on est alors devant un profil salin uniforme. La comparaison entre EM_h et EM_v est donc une première possibilité d'interprétation des résultats.

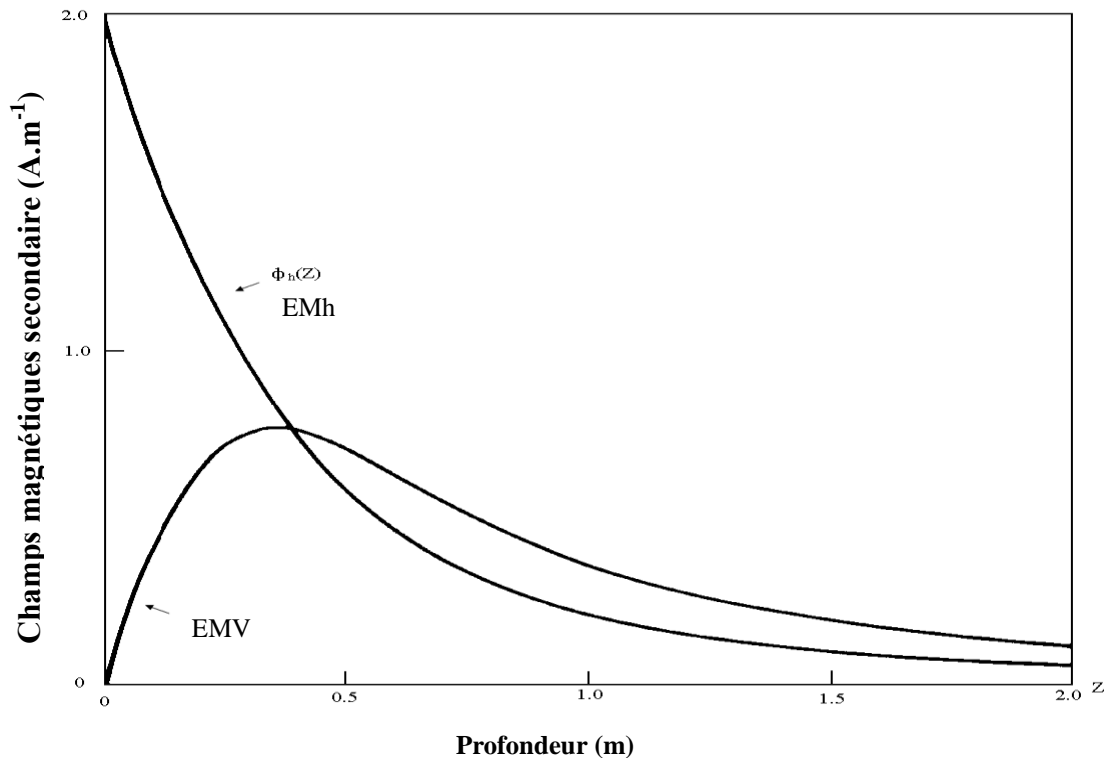


Figure 1-3. Réponse du EM-38 en fonction de la profondeur du sol (McNeill, (1980))

3.2. Avantages et inconvénients de l'appareil

La méthode par induction électromagnétique permet des mesures rapides, à faible coût et ne nécessite pas de contact direct avec le sol. EM38 ont une profondeur d'investigation de 0 à 0.75 m et de 0 à 1.5 m selon que la position est V ou H. Ces caractéristiques expliquent l'intérêt de la méthode pour l'étude des sols salés. Néanmoins, ces méthodes ont de nombreux inconvénients :

- La profondeur d'investigation ne peut varier qu'en fonction de la distance séparant les bobines réceptrices ou émettrices ou en fonction de leur orientation.
- Dans un environnement difficile, comme c'est généralement le cas en milieu naturel, les variations de température ou de l'humidité peuvent provoquer une dérive non négligeable de l'appareillage et une grande instabilité du signal mesuré.
- Les mesures sont fortement influencées par la présence éventuelle de pièces métalliques à proximité. L'utilisation de cette appareil exige qu'il soit loin de tout objet métallique à une distance au minimum de 1.5 m.

4. Mesures de la salinité du sol par induction électromagnétique

La méthode électromagnétique est largement utilisée pour cartographier et diagnostiquer la variabilité spatiale de la salinité du sols aux échelles variant de la parcelle au paysage (De Jong et al., 1979 ; Cameron et al., 1981 ; Williams et Hoey, 1987 ; Job et al., 1987 ; Boivin et al., 1988 ; Lesch et al., 1992 ; Rhoades, 1992 ; Cannon et al., 1994 ; Montoroi, 1999).

Cependant, cette méthode a ses limites, les résultats ayant tendance à être à la fois dépendants du temps et des spécificités du site étudié et peuvent varier en fonction des interactions complexes entre les propriétés du sol (Lesch et al., 1998).

L'emploi de EM pour la mesure de la salinité a débuté par les travaux de De Jong et al. (1979), qui ont établi des relations linéaires entre EM mesurée par EM31 et CE mesurée sur des extraits de pates saturées pour une profondeur du sol de 2 m.

McNeill (1980) a été parmi les premiers chercheurs qui ont décrit comment la méthode électromagnétique peut être utilisée pour évaluer la salinité du sol. Il a présenté les bases théoriques de l'utilisation des conductimètres électromagnétiques pour cartographier la variation latérale de la salinité.

Le succès du développement d'utilisation de EM pour l'évaluation de CE du sol revient aux travaux effectués par Rhoades et Corwin (1981) qui ont obtenues des modèles de régression multiple entre EM mesurée à différents niveaux au-dessus du sol et CE des extraits saturés (CEes) mesurée pour différents intervalles de profondeur du sol ($CEes\ z(cm) = aEMz1 + bEMz2 + cEMz3 + \dots + xEMzn$). Cette approche a été améliorée par la suite par Corwin et Rhoades (1982 ; 1984) qui ont établies des régressions co-linéaires entre EMv et EMh d'une part et la CEes d'autre part ($CEes\ z1 = x\ EMmv\ z2 + y\ EMhz2$). Ces travaux ont subi par la suite plusieurs améliorations supplémentaires, ainsi de nombreux modèles ont été proposés pour prédire la salinité du sol à partir des mesures de EM. Parmi elles, nous citons:

- Les travaux de Lesch et al. (1992) qui ont établi des régressions non linéaires entre les mesures électromagnétiques en mode verticale et horizontale et CEes. Les équations établies sont de type :

$$\ln(ECz) = x1 \ln(EMh) + x2[\ln(EMH) - \ln(EMv)] + y$$

- McKenzie et al. (1989) et Slavich et Petterson (1990) ont établi des relations de régressions linéaires entre EM et CEes, tout en considérant l'effet des autres paramètres pédologiques (Humidité, texture et température) dans les équations d'étalonnage.

- Job (1992) a établi des relations linéaires entre CEes et EM en mode horizontale, tous en introduisant l'humidité dans les équations d'étalonnage. Pour éviter la co-linéarité entre EM et l'humidité du sol, les EM ont été converties en EMh de référence (EM mesurée à humidité du sol à la capacité au champ). Les équations établies sont de type :

$$CEes = aEMh(\theta_2) + b, EMh(\theta_2) = EMh(\theta_1) + \delta(\theta_2 - \theta_1)$$

où EM (θ_2) : EM mesurée à la capacité au champ et EM(θ_1) est mesurée à l'humidité relative du sol et δ paramètre empirique qui dépend du type du sol.

- Corwin et Lesch (2003) ont développé des modèles d'étalonnage de type régression linéaire multiple (RLM). Le Modèle RLM inclus CEes, EM et les coordonnées des emplacements des sondages. Les équations établis sont de type :

$$\ln CEes = \beta_0 + \beta_1(Z1) + b_2(Z2) + b_3X + b_4Y$$

Où Z1 et Z2 représentent les lectures EM38, et X et Y représentent les coordonnées spatiales des sites de mesures de EM38

- Triantafilis et al. (2000) ont développé un modèle qui relie le profil salin de CEes et EM, le modèle proposé est de type :

$$y = \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{1 + \exp[\alpha_4(\alpha_3 - x)]}$$

Où : y est une équation de type CEes = f(EM), x est la profondeur du sol et α_1 , α_2 , α_3 et α_4 sont les paramètres de la fonction de la courbe du profil salin.

En Algérie, l'utilisation des méthodes électromagnétiques pour la prédiction de la salinité n'a débuté que depuis le milieu des années 2000 (Iddir, 2006 ; Mahdi, 2008 ; Abdelhafid, 2010 ; khacheba, 2011; Saoud, 2014 ; Gacem, 2015 ; Berkal, 2016).

Iddir (2006), Mahdi (2008) et Saoud (2014) ont réalisé des comparaisons entre deux modèles d'étalonnage de EM, l'un basé sur la régression linéaire simple (De Jong et al., 1979) et l'autre modèle celui proposé par Rhoades et Corwin (1981). L'utilisation de ces deux modèles d'étalonnage a abouti pratiquement aux mêmes résultats avec des coefficients de détermination hautement significatifs.

Abdelhafid (2010), a réalisé une comparaison entre le modèle de la régression linéaire simple (RLS) et un modèle RLM établi entre CEes d'une part et EM et l'humidité pondérale d'autre part. Les résultats obtenus ont abouti à des coefficients de déterminations statistiquement hautement significatifs.

Berkal (2016) quant à lui, il a utilisé le modèle proposé par Corwin et lesch (2003) sur des sols sableux de la région d'Ouargla. Les résultats obtenus ont abouti à des coefficients de déterminations statistiquement significatifs.

Conclusion

L'abondance et la diversité des travaux de recherches réalisés jusque-là sur le comportement électromagnétique des sols soulignent la difficulté à décrire et à modéliser EM pour l'étude de CE du sol. Les sols sont des milieux complexes et variables dans l'espace et dans le temps. Les paramètres du sol susceptibles de modifier la réponse des appareils électromagnétiques sont multiples et présentent des interactions particulièrement complexes, ce qui rend l'interprétation du signal électromagnétique très délicate. Cette difficulté de modélisation de EM des sols n'exclue pas, pour autant l'utilisation de ces méthodes pour la caractérisation de la salinité du sol et des autres paramètres pédologiques. De ce fait, les spécialistes des sciences du sol considèrent la technique électromagnétique comme un outil idéal pour la caractérisation non destructive et exhaustive des sols et de leurs paramètres.

Chapitre II : Matériel et méthodes

Ce chapitre est une présentation de la région d'étude, du protocole expérimental et de la méthodologie utilisée pour l'étude de la variabilité spatiotemporelle de la salinité des sols.

1. Le contexte de l'étude

La présente étude a été réalisée dans la région du R'Mell qui fait partie du bassin versant du Hodna. Elle se situe au sud du chott El-Hodna, à environ 150 km au sud de la côte méditerranéenne (Golfe de Bejaïa) et elle se répartie sur les commune de Maarif, Khoubana (Zone d'étude), Mcif et Metkaouak (Figure 2-1).

L'expérimentation a été menée dans la commune de Khoubana (wilaya de M'sila) qui est délimitée par les communes de Chellal au nord, El Houamed au sud, M'cif à l'est et Maarif à l'ouest. De par sa situation, cette zone est représentative de la région du R'mel. Elle est, du point de vue floristique, dominée par une végétation halophile représentée essentiellement par *Artochneum indicum* et *Limonia strumguynioanum* auxquelles sont associées selon les endroits *Bassia muricata*, *Frankenia thymifolia*, *Salsola Foetida*, *Salsola vermiculata*, *Juncus acutus*, *Artemisia herba alba*, *Retama retam*, *Atriplex halimus* et *Limoniastrum guynioanum*.

1.1. Le climat

Les données climatiques utilisées sont celles de la station météorologique de Boussaâda qui est la station la plus proche. Les données climatiques utilisées concernent les moyennes mensuelles de 20 ans de mesures effectuées entre 1995 et 2014 (Tableau 2-1).

Le tableau 2.1 indique que la pluviométrie annuelle est faible (165,7 mm) et irrégulièrement répartie dans l'année. La pluviométrie mensuelle moyenne oscille entre 3,9 mm (juillet) et 22,9 mm (septembre). Il indique aussi que juillet est le mois le plus chaud avec une moyenne de 33,5°C et une moyenne des maximas de 39,8°C. L'amplitude thermique entre la moyenne des maximas (39,8°C) et la moyenne des minimas (24,5°C) de ce mois est de 15,3°C. Janvier est le mois le plus froid avec une moyenne de 10,2°C et une moyenne des minimas de 4,3°C. L'amplitude thermique entre les moyennes des maximas (14,9°C) et des minimas (4,3°C) de ce mois est de 10,6°C. L'évapotranspiration annuelle (ETP = 1086 mm) et mensuelle (ETP moyen = 90 mm) sont très élevées dans cette région. L'évapotranspiration moyenne mensuelle maximale est enregistrée en juillet (ETP = 234,77mm) qui est d'ailleurs le mois le

Tableau 2-1. Données climatiques de la station de Boussaâda (1995-2014)

Mois	Température (°C)			Précipitation (mm)	ETP (mm)
	Moyenne	Maximale	Minimale		
Janvier	10,2	14,9	4,3	13,2	11,57
Février	11,5	16,8	5,0	6,3	11,35
Mars	15,3	20,8	8,3	14,1	34,09
Avril	19,0	24,5	11,3	18,7	54,00
Mai	24,1	29,8	16,0	16,7	112,54
Juin	29,7	35,7	20,8	9,7	168,08
Juillet	33,5	39,8	24,5	3,9	234,77
Août	32,4	38,6	23,8	11,1	215,56
Septembre	26,9	32,4	19,7	22,9	125,67
Octobre	21,6	27,0	14,6	22,1	73,54
Novembre	14,9	19,7	9,0	11,5	30,85
Décembre	10,6	15,2	5,0	15,4	14,14
Moyenne	20,8	26,3	13,5		90,51
Total				165,7	1086,12

Le diagramme ombrothermique de Gausson (Figure 2-2) indique que le climat de la région est sec durant toute l'année mais avec des degrés différents.

Selon le quotient d'Emberger ($Q = 3,43 / (P / (M - m))$) (p = précipitation moyenne annuelle en mm ; M et m représentent respectivement la moyenne des températures maxima et minima) le climat de la région d'étude est de type saharien à hiver tempéré. Le climat de la région d'étude se caractérise donc par un déficit hydrique annuel important du à une faible pluviométrie et à une ETP forte. Ces conditions favorisent la remontée capillaire qui peut accentuer le phénomène de salinisation des sols selon les conditions de la station.

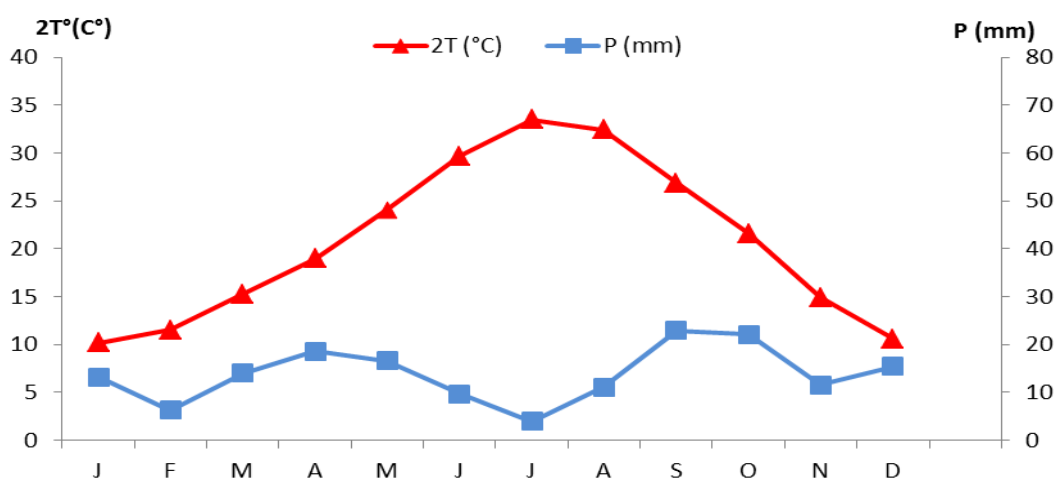


Figure 2-2. Diagramme ombrothermique de Gausson (1995 -2014)

1.2. Géologie et géomorphologie

La région du R'mel (sable en arabe) se distingue par sa nature sableuse, elle offre un paysage ondulé, caractérisé par des dunes de sable, des dépôts alluviaux récents et par quelques collines rocheuses avec une altitude qui varie entre 400 et 450 m.

Le R'mel est un vaste ensemble de plis qui se sont produits au début du tertiaire et qui ont continué à évoluer jusqu'à une date récente. Cet ensemble est formé de calcaire, marnes et par des grès du Jurassique et du Crétacé. L'altération et l'érosion des grès barrémiens et albiens qui affleurent sont à l'origine de ces dunes de sable (Boyadgiev, 1975). Selon la carte géologique du Hodna (Figure 2-3), la région d'étude appartient au cénozoïque quaternaire qui est représenté par d'anciennes alluvions et des sédiments fins.

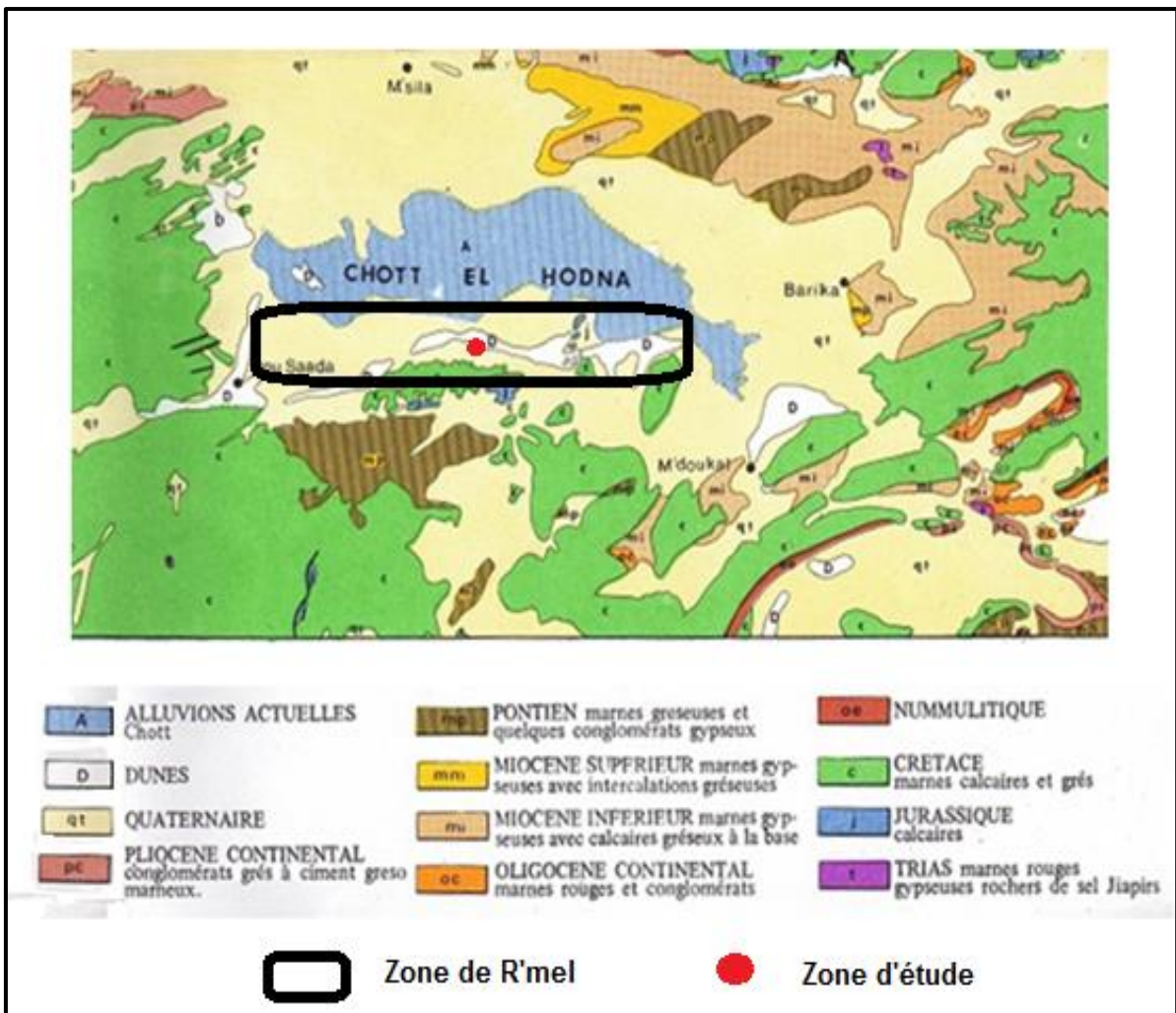


Figure 2-3. Extrait de la carte géologique du Hodna (Le Houérou et Claudin, 1972)

1.3. Les sols

Les sols du bassin versant du Hodna ont fait l'objet d'une cartographie au 1/800000^{ème} (Boyadgiev, 1975) (Figure (2-4)). D'après la carte des sols, la région de R'mel se caractérise principalement par la présence des sols halomorphes, des sols hydromorphes et des sols minéraux bruts éoliens. Ces sols se caractérisent par une texture sableuse à caractères salins, calcaires ou gypseux. Ils sont soumis parfois à l'effet de la nappe phréatique et à l'érosion éolienne.

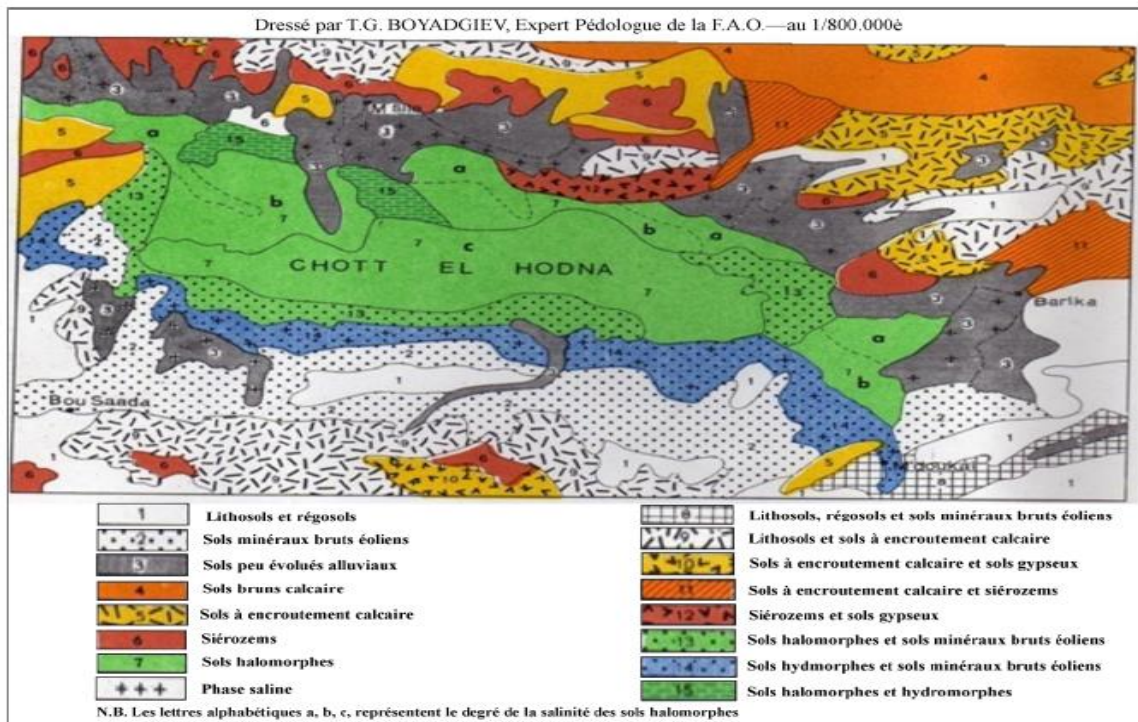


Figure 2-4. Carte des sols du Hodna (Boyadgiev, 1975)

2. Choix des sites d'étude

Cette recherche a été réalisée sur quatre sites (A, B, C, D) représentatifs des pratiques agricoles de la zone d'étude (Figures 2-5, 2-6, 2-7 et 2-8). Le site A se situe sur des sols sporadiquement cultivés en maraîchage et irrigués par submersion (planche). Le site B comporte des cultures maraîchères et de l'arboriculture régulièrement irriguées par planche. Le site C est une jeune plantation arboricole irriguée par le système goutte à goutte. Le site D est une jachère de plusieurs années. L'irrigation se fait à partir de deux forages (Eau1 et Eau2) d'une soixantaine de mètres de profondeur réalisés en 1986 (Figure 2-9). Le choix des quatre sites a été effectué selon la diversité des situations agricoles (sols cultivés ou non ; types

d'irrigation) ce qui implique probablement des fonctionnements hydrodynamiques des sols différents.



Figure 2-5. Site A (parcelle cultivée en maraîchage)



Figure 2-6. Site B (parcelle cultivée en maraîchage et arboriculture)



Figure 2-7. Site C (parcelle cultivée en Arboriculture)



Figure 2-8. Site D (sols non cultivés)



Figure 2-9. Localisation des sites d'études

3. Méthodologie adoptée

La démarche méthodologique s'articule autour de trois axes, (a) la caractérisation des sols étudiés, (b) la cartographie spatio-temporelle de la salinité et (c) l'analyse méthodologique de la validité d'extrapolation des équations d'étalonnage de EM dans l'espace.

a. La caractérisation des sols de la zone d'étude : Pour ce faire, nous avons réalisé dans chacun des quatre sites un profil pédologique sur lequel nous avons effectué une étude morphologique et des prélèvements de sol en vue d'analyses au laboratoire.

b. La cartographie spatio-temporelle de la salinité à l'échelle de la parcelle : Il s'agit de décrire l'extension spatiale et saisonnière de la salinité par utilisation des méthodes géophysiques. Ces dernières sont non destructives et elles permettent de réaliser une grande densité de mesures et de les répéter dans le temps. La méthode géophysique retenue est la mesure de EM par induction électromagnétique en utilisant l'EM38 (Geonics Ltd, Canada). Les résultats obtenus ont été traités par les méthodes géostatistiques.

c. L'analyse méthodologique de la validité d'extrapolation des équations d'étalonnage de EM dans l'espace: Il s'agit ici de tester et d'évaluer la qualité de l'estimation de la salinité in situ par utilisation des équations d'étalonnage de EM établies ex situ. Cette démarche permettra d'évaluer la possibilité de généraliser (ou d'extrapoler) les équations d'étalonnage réalisées dans un secteur restreint à un secteur plus étendu.

3.1. Expérimentation sur terrain

Le travail de terrain a été mené en trois étapes principales :

- Caractérisation des sols de la zone d'étude
- Prospection géophysique
- Prélèvement des échantillons du sol

3.1.1. Caractérisation des sols de la zone d'étude

Sur la base d'une prospection pédologique à la tarière qui a mis en évidence l'homogénéité texturale du sol et la présence d'une couche imperméable appelée localement DEBDEB, située à différentes profondeurs (tableau 1- annexe 8). Nous avons réalisé une étude morpho analytique d'un profil pédologique représentatif dans chaque site d'étude. Une fosse pédologique a été de ce fait creusée sur chaque site d'étude (profil 1: site A, profil 2: site B, profil 3: site C et profil 4: site D) (Figure 2-9). Les quatre profils ont été décrits, échantillonnés et analysés au laboratoire. La description des profils a été effectuée en juin 2011. Les analyses du sol effectuées au laboratoire pour caractériser les profils sont la texture, le pH, le calcaire total, le gypse, la $CE_{1.5}$ et le bilan ionique de la solution du sol.

3.1.2. Prospection géophysique

Il s'agit de la caractérisation de la salinité du sol par la méthode électromagnétique en utilisant l'EM38. L'appareil a été posé directement sur le sol pour mesurer CEa sur une profondeur de 150 cm en mode vertical (EMv) et une profondeur de 75 cm en mode horizontal (EMh). Cette étape nécessite la collecte de deux types de mesures électromagnétiques :

- des mesures électromagnétiques d'étalonnage effectuées pour la réalisation des équations d'étalonnage entre ces mesures et les mesures de la salinité au laboratoire.
- des mesures électromagnétiques à étalonner effectuées pour la cartographie de la salinité du sol sur l'ensemble des sites d'études.

a. Mesures électromagnétiques d'étalonnage

Dans chaque site d'étude, des mesures électromagnétiques ont été effectuées par EM38 en EMv et en EMh selon quatre transects orientés sud-nord correspondant au gradient ascendant de salinité. Au total, 41 mesures ont été réalisées dont 13 sur le transect TA (site A) (365 m de longueur), 7 sur le transect TB (site B) (256 m de longueur), 10 sur le transect TC (site C) (192 m de longueur) et 11 sur le transect TD (site D) (698 m de longueur) (Figure 2-10 et tableaux 1 à 4 - Annexe 2).

b. Mesures électromagnétiques à étalonner

Les mesures électromagnétiques à étalonner ont été effectuées d'une façon systématique aléatoire sur l'ensemble des sites A, B et C avec des superficies qui varient entre 0,7 et 3,1 ha selon le site d'étude et la campagne de mesure considérée (tableau 2-2, figure 2-10).

Tableau 2-2. Superficies des sites A, B et C selon la campagne de mesures

	Superficies (ha)		
	Site (A)	Site (B)	Site (C)
F-08	2,83	2,53	0,74
F-09	2,75	2,85	0,79
N-09	3,01	3,12	0,95
N-11	2,92	3,26	0,96

L'exception faite pour le site D s'explique par sa particularité par rapports aux autres sites. En effet, le site D n'est pas une parcelle cultivée et délimitée. De ce fait, il n'est pas concerné par la cartographie de la salinité. Les mesures électromagnétiques ont été géoréférencées à l'aide d'un GPS selon le système WGS 1984 (UTM zone 31N). Les données de EM acquises ont fait l'objet d'un traitement statistique et géostatistique.

3.1.3. Prélèvement du sol

Chaque mesure électromagnétique d'étalonnage a été accompagnée par un prélèvement d'échantillons de sols à la tarière par incrément de 30 cm jusqu'à une profondeur de 150 cm (profondeur d'investigation de l'EM38 en mode vertical). Au total, 205 échantillons de sol ont été prélevés dont 65 sur le site A, 35 sur le site B, 50 sur le site C et 55 sur le site D) (Figure 2-10).

Le suivi spatio-temporel de la salinité a été réalisé sur quatre campagnes de mesures électromagnétiques et de prélèvements d'échantillons du sol en vue d'analyses au laboratoire. La première campagne a été réalisée en février 2008, la deuxième en février 2009, la

troisième en novembre 2009 et la quatrième en novembre 2011. Le choix des périodes de mesures a été effectué pour mettre en évidence :

- Les variations annuelles de la salinité du sol.
- Les variations saisonnières de la salinité du sol entre la fin de la période considérée comme humide (février 2008 et février 2009) et la fin de la période sèche (novembre 2009 et novembre 2011).

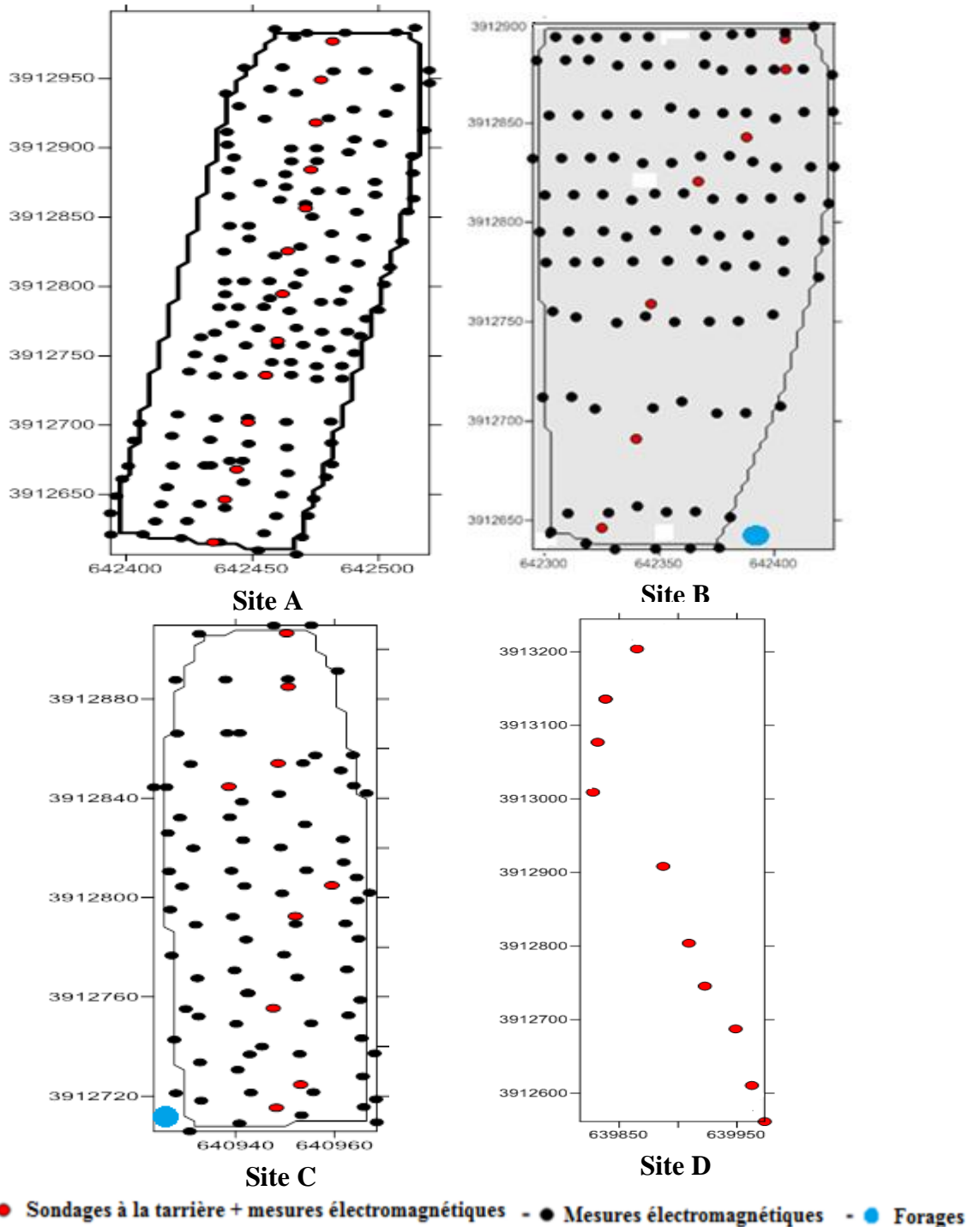


Figure 2-10. Dispositif d'échantillonnage

3.2 Traitements statistiques et géostatistiques des données

3.2.1. Traitements statistiques

Les statistiques ont été utilisées pour appuyer et décrire d'une façon synthétique les données des différents paramètres du sol étudiés. Ces statistiques ont été réalisées en utilisant les logiciels Excel avec son complément XLSTAT 5.03, Micoral Origine 6.0 et Statistica 6.1. Dans un premier temps, nous avons effectué les statistiques descriptives en se basant sur les tendances centrales et de dispersion des paramètres étudiés (chapitres III, IV et V).

Dans un deuxième temps, nous avons effectué des comparaisons de moyennes pour étudier l'effet périodes de mesure sur la variabilité de la salinité et de l'humidité du sol au niveau des transects (chapitre III).

Dans un troisième temps, nous avons réalisé des analyses de corrélations linéaires simples et une analyse en composante principale (ACP) entre les valeurs de EM et les paramètres pédologiques mesurés. L'objectif recherché ici est d'identifier l'influence des différents paramètres pédologiques sur la réponse de EM (chapitre IV).

Dans un quatrième temps, nous avons effectué des modèles de régression linéaire simple et multiple pour l'étalonnage de EM. Le premier modèle, qui se base sur des équations de régression linéaire simple (chapitres IV et V), considère que seule CE est responsable de la variation de EM ($CE = f(EM)$) (De Jong et al., 1979 ; Job et al., 1987 ; Herrero et al., 2003 ; Feikema et Baker, 2011). Le deuxième modèle se base sur des équations de régression linéaire multiple (chapitre V) et il considère qu'en plus de CE, d'autres paramètres pédologiques peuvent significativement influencer les valeurs de EM ($CE = f(EM, \text{Gypse}\%, \text{CaCO}_3\%, \text{H}\%, \text{pH}, \text{fractions granulométrique}\%)$) (Job 1992). Par la suite, nous avons réalisé des tests non paramétriques (test de sign et de Wilcoxon) pour la validation des équations d'étalonnage de EM (chapitres IV et V). Ces tests révèlent si les différences entre les valeurs de CE mesurées et celles estimées par les équations d'étalonnage sont significatives ou non. Ce test est choisi du fait qu'il permet de réaliser des comparaisons appariées entre deux populations sans tenir compte des conditions de normalité, d'égalité des variances et de linéarité des populations étudiées (Dagnélie, 1982).

3.2.2. Traitements géostatistiques

La méthode géostatistique est une méthode optimale et non biaisée qui s'appuie sur le degré de similarité entre les valeurs (Mathéron 1963). Elle est utilisée dans plusieurs travaux qui traitent la variabilité spatiale des données de la salinité du sol mesurées par EM (Hendrickx et

al., 1992 ; Camara et Cluis, 1992 ; Hoogerwerf et al., 1992 ; Lesch et al., 1995 ; Cetin et Kirda, 2003 ; Li et al., 2007 ; Triantafilis et al., 2001 ; Amezketta, 2007).

La mise en œuvre des traitements géostatistiques permet d'affiner la connaissance de la variabilité spatiale des données de EM. Ces méthodes se basent sur l'analyse de la structure spatiale du paramètre étudié et se réfèrent à la théorie de la variable régionalisée (Mathéron, 1963). Ils ont pour but de connaître l'organisation de la structure spatiale d'un phénomène. Ces traitements consistent en :

- une analyse variographique de la structure spatiale d'une propriété donnée et
- une cartographie des propriétés étudiées par krigeage.

La structure spatiale de la salinité a été réalisée par analyse variographique et l'interpolation a été effectuée par le krigeage ordinaire.

Dans cette étude, nous avons utilisé le logiciel Surfer 11 (Golden Software) pour l'approche géostatistique. Il permet à la fois d'étudier la structure spatiale par la réalisation de semivariogrammes et d'interpoler par krigeage les données irrégulières des points de mesures géoréférenciés et situées aux nœuds d'une grille régulièrement espacée.

3.3. Méthode d'analyses des échantillons du sol

Les échantillons prélevés ont été séchés à l'air libre, broyés et tamisés à 2mm, et analysés au laboratoire, avec trois répétitions.

3.3.1. Analyses du sol

Les analyses du sol effectuées concernent l'ensemble des échantillons du sol prélevé pour les quatre sites d'études et durant les quatre campagnes de mesures. Rappelons que les prélèvements des échantillons de sols ont été effectués à la tarière par incrément de 30 cm jusqu'à une profondeur de 150 cm. Au total, 820 échantillons de sol ont été prélevés durant les quatre campagne de mesures, dont 65 x 4 sur le site A, 35 x 4 sur le site B, 50 x 4 sur le site C et 55 x 4 sur le site D.

a- Caractérisation des sols

Les analyses de caractérisation des sols concernent seulement les 205 échantillons prélevés lors de la première campagne de mesure (février 2008). Les analyses réalisées sont :

- La texture du sol par tamisage.
- Le pH (1:2,5) : Méthode électrométrique.
- Le taux de gypse : Méthode gravimétrique: attaque du gypse par une solution de carbonate d'ammonium. Les sulfates qui en résultent sont précipités par une solution de chlorure de baryum sous forme de sulfate de baryum.
- Le calcaire total : Méthode volumétrique au calcimètre de Bernard.
- l'humidité à saturation (Hsat) : Méthode gravimétrique.

B- Suivi spatiotemporel

Les analyses effectuées concernent les échantillons prélevés à la tarière et pour les quatre campagnes de mesures.

- L'humidité pondérale (H%) : Méthode gravimétrique.
- La conductivité électrique des extraits aqueux 1:5.

2.3.2. Analyses de la solution du sol

Le bilan ionique a été effectué sur des extraits aqueux 1:5. Seuls les données des échantillons issus des quatre profils étudiés sont exploités dans le cadre de cette recherche. Cette analyse a concerné les ions suivants :

- Les chlores : Méthodes titrimétrique au AgNO_3
- Les sulfates : Méthode colorimétrique au glycérol
- Le carbonate et les bicarbonates : Méthode titrimétrique dosage par une solution acide (H_2SO_4)
- Ca, Mg, K, et Na : Dosage par absorption atomique.

3.4. Conversion des mesures $\text{CE}_{1:5}$ en CE (extrait saturé)

Tous les échantillons du sol prélevés ont une texture sableuse (Tableau 3-8) d'où une difficulté pour confectionner une pâte saturée qui est la méthode de référence (USSS, 1954) pour l'analyse de certains paramètres du sol comme la mesure de la conductivité électrique. La mesure de la salinité par la $\text{CE}_{1:5}$ est probablement sous-estimées en raison de la faible teneur en eau disponible pour diluer les sels (taux de sables >70%) comparativement aux sols de texture plus fine (Shaw, 1999 ; Sumner et Naidu, 1998). Pour faire face à ce problème, nous avons utilisé un facteur de conversion pour obtenir des valeurs de CE proches de celles

que nous pourrions obtenir sur des extraits saturés. Le passage de l'extrait saturé vers l'extrait 1:5 nécessite une dilution d'un facteur $f = 500\%/H_{sat}\%$ (Agricultural Compendium, 1989).

$$CE_{es} = f(CE_{1:5})$$

Avec :

CE_{es} : Conductivité électrique de l'extrait saturé ;

$CE_{1:5}$: Conductivité électrique de l'extrait dilué (1/5) (soit 500 g d'eau pour 100g de sol) ;

$H_{sat}\%$: Humidité à saturation (tableau 1 à 4 - annexe 1) ;

En appliquant ce facteur de conversion (f), nous obtenons des gammes de CE équivalentes (CE_{eq}) à celles mesurées sur pâtes saturées.

La figure 2-11 illustre et synthétise la méthodologie du travail employée (échantillonnage, travail de terrain et les traitements des données).

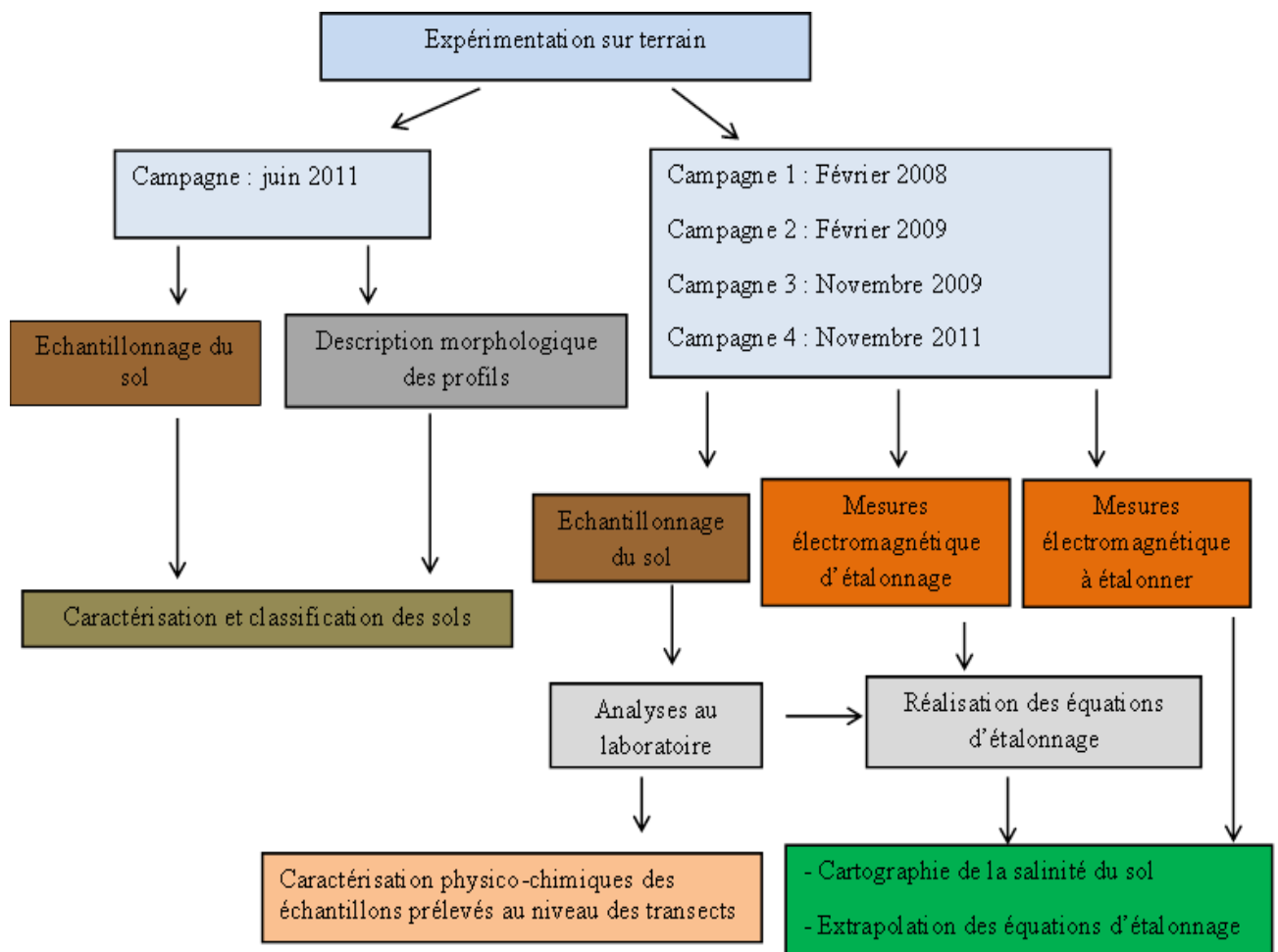


Figure 2-11. Organigramme de la méthodologie adoptée

Chapitre III : Les sols et les eaux de la zone d'étude

Dans ce qui suit, nous présentons les caractéristiques physico-chimiques des eaux d'irrigation et les caractéristiques morphologiques et analytiques des sols des sites étudiés.

1. Les eaux d'irrigation

L'irrigation des sols est assurée par les eaux de deux forages, l'un situé dans le site B et l'autre dans le site C. Le forage situé dans le site B est utilisé pour l'irrigation des sites A et B. Le forage situé dans le site C n'est utilisé que pour l'irrigation de ce site.

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux d'irrigation et leur variation temporelle sont résumées dans le tableau 3-1.

Tableau 3-1. Résultats d'analyses chimiques des eaux d'irrigation des deux forages

	CE (dS/m)	pH	Ca ⁺² (méq/l)	Mg ⁺² (méq/l)	Na ⁺ (méq/l)	K ⁺ (méq/l)	SO4 ⁻² (méq/l)	Cl ⁻ (méq/l)	HCO3 ⁻ (méq/l)
F8									
Eau 1	0,15	7,64	1,78	0,082	6,698	0,067	2,6	2,00	1,51
Eau 2	0,23	7,22	3,026	0,079	5,75	0,023	1,88	3,8	1,95
F9									
Eau 1	0,19	7,32	3,00	0,084	5,35	0,018	1,7	2,2	1,8
Eau 2	0,22	7,56	3,54	0,096	6,22	0,029	1,7	3,6	1,8
N9									
Eau 1	0,22	7,66	2,99	0,022	7,88	0,022	3,33	4,22	1,12
Eau 2	0,17	7,55	3,89	0,035	6,89	0,045	2,22	4,79	1,88
N11									
Eau 1	0,13	7,45	2,55	0,065	5,22	0,078	3,33	3,89	1,96
Eau 2	0,20	7,57	2,78	0,072	6,22	0,012	3,33	3,02	1,22

Le diagramme de classification de ces eaux (USSL, 1954) (figure 1 : annexe 7) révèle qu'elles appartiennent à la classe S1C1 avec un faible risque de salinisation et d'alcalinisation et ce, quelle que soit la campagne de mesure. Ceci signifie que leurs caractéristiques physico-chimiques sont restées relativement stables dans le temps.

L'utilisation de ces eaux est donc sans risque pour l'agriculture et elle peut même provoquer une diminution de la salinité de ces sols qui sont tous sableux (tableau 3-8) et donc très filtrants. L'irrigation de ces sols par ces eaux engendre une lixiviation des sels solubles et leur accumulation dans la partie inférieure du profil. En l'absence d'un drainage efficace, les sels accumulés en bas du profil remonteront en surface par capillarité lors des périodes chaudes et

de déficit hydrique. Ce résultat rejette donc l'hypothèse qui estime que l'eau d'irrigation serait à l'origine de la salinisation du sol, du moins dans le contexte de notre étude. Au contraire, ces eaux d'irrigation peuvent contribuer à la diminution de la salinité en véhiculant une partie des sels qui composent la solution du sol.

2. Caractérisation des profils pédologiques

2.1. Le site A

Le site A est une parcelle labourée, cultivée (culture maraichère) et irriguée par planches. La pente, de direction sud-nord, est très faible (< 2 %). Elle se caractérise par de nombreuses plages d'efflorescences salines blanchâtres.

Le site A est caractérisé par le profil 1 (figure 3-1). Ce profil se localise comme suit :

- Longitude = 4° 34' 6,3''
- Latitude = 35° 20' 55,0''
- Altitude = 381,9 m

2.1.1. Description morphologique du profil 1



Figure 3-1. Profil 1

0-15 cm : peu humide, brun jaune 10YR6/4, texture sableuse, structure particulaire, peu organique, faible activité biologique, racines peu abondantes, compact, friable, peu poreux, forte effervescence à HCl, transition régulière et peu nette.

15-53 cm : peu humide, brun jaune clair 10YR6/6, texture sableuse, structure particulaire, compact, forte effervescence à HCl, racines très peu abondantes, friable, transition régulière et peu nette.

53-75 cm : humide, brun jaune 10YR6/4, texture sableuse, structure particulaire, moyennement compact, effervescence moyenne à HCl, racines très peu abondantes, friable, transition nette et régulière.

>75 cm : très humide (saturé), brun 2.5Y7/3, texture

sableuse, structure massive, très compact, pas d'effervescence à HCl, absence de racine, non friable, taches de réduction généralisées.

2.1.2. Résultats des analytiques du profil 1

Les résultats des analyses du profil 1 sont consignés dans le tableau 3-2.

Tableau 3-2. Résultats des analytiques du profil 1

Caractéristiques	Horizons			
	0-15 cm	15-53 cm	53-75 cm	> 75 cm
Profondeur (cm)				
Sable (%)	72,33	88,15	83,96	86,33
A + L (%)	27,67	11,85	16,04	13,67
CaCO₃ (%)	3,6	3,5	2,7	3,0
Gypse (%)	9,8	6,3	15,2	9,3
pH	8,2	8,1	8,2	8,6
CE_{1:5} (dS/m)	3,8	2,5	2,6	2,6
Bilan ionique de l'extrait aqueux 1:5 (méq/l)				
Ca⁺²	24,02	15,79	13,96	16,35
K⁺	1,63	1,24	0,98	0,75
Mg⁺²	4,03	3,54	2,6	2,62
Na⁺	4,44	2,32	2,3	2,62
Cl⁻	16,58	12,88	9,33	9,33
HCOO⁻	0,4	0,5	0,4	0,4
SO₄⁻²	15,33	11,62	12,33	14,39

Tous les horizons du profil 1 sont sableux (taux de sables > 70%). La structure de ce sol est particulière pour les trois premiers horizons ce qui dénote son caractère psammophile. Le taux de calcaire est relativement faible (CaCO₃ ≈ 3 %) (Baize, 1988) et sa répartition dans le profil est homogène. La décroissance de l'intensité de l'effervescence à l'HCl serait liée aux taux d'humidité qui augmentent du haut vers le bas. Le pH est alcalin et constant dans le profil (8,1 < pH < 8,6). Le sol est modérément gypseux (6 % < Gypse% < 15 %) (Barzanji, 1973) avec une légère accumulation entre 50 et 75 cm de profondeur. En revanche, ce sol est marqué par une forte salinité (CE_{1:5} > 2,5 dS/m) qui le classe parmi les sols extrêmement salés (Shaw, 1988). Le profil salin est de type ascendant (figure 3-2) avec un maximum de salinité dans l'horizon de surface (CE = 3,8 dS/m) provoquée probablement par la remontée capillaire du fait de la très forte évapotranspiration. Ce type de profil salin concorde bien avec

la présence des efflorescences salines sur la surface du sol. La présence de taches de réduction dans les horizons de profondeur (75 cm de profondeur) suggère une saturation plus ou moins prolongée en bas du profil. Le faciès chimique global de ce sol est de type chloruré sulfaté calcique et magnésique. Ce sol est classé comme un Gypsic Aquisalid (Soil Survey Staff, 1999) et comme un Arenic Gleyic Solonchaks (IUSS Working Group WRB, 2014).

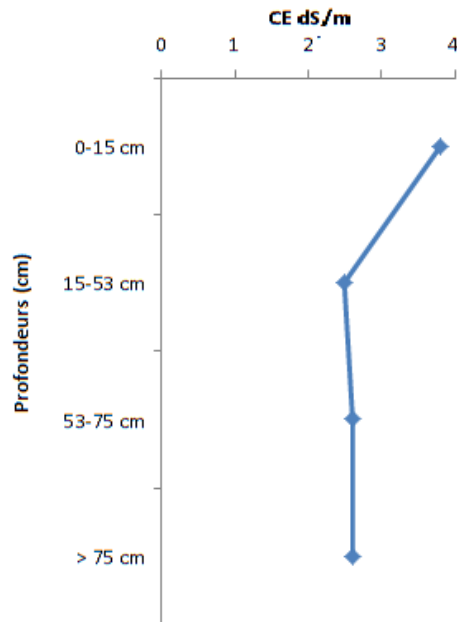


Figure 3-2. Profils salin du site A

2.2. Le site B

Le site B est une parcelle labourée, cultivée (culture maraichère) et irriguée par planches. La pente, de direction sud-nord, est très faible (< 2 %). Elle se caractérise par la présence de nombreuses plages d'efflorescences salines blanchâtres.

Le site B est représenté par le profil 2 (figure 3-3). Ce profil se localise comme suit :

- Longitude = 4° 34' 0,5''
- Latitude = 35° 20' 57,2''
- Altitude = 397,6 m

2.2.1. Description morphologique du profil 2

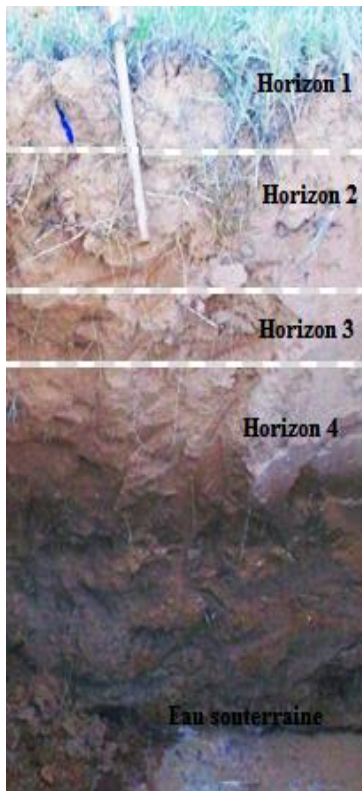


Figure 3-3. Profil 2

0-21 cm : peu humide, brun jaune clair 10YR6/8, texture sableuse, structure particulaire, trace de matière organique, très faible activité biologique, racines très peu abondantes, compact, friable, peu poreux, forte effervescence à HCl, transition régulière et peu nette.

21-72 cm : humide, brun jaune clair 10YR6/8, texture sableuse, structure particulaire, peu compact, absence de racines, friable, forte effervescence à HCl, transition régulière et peu nette.

72-83 cm : très humide, brun clair 10YR7/4, texture sableuse, structure massive, compact, peu friable, effervescence moyenne à HCl, transition nette continue.

> 83 cm : Très humide (saturé), brun clair 10YR7/4, texture sableuse, structure massive, très compact, pas d'effervescence à HCl, absence de racine, non friable.

2.2.2. Résultats des analyses du profil 2

Les résultats des analyses du profil 2 sont consignés dans le tableau 3-3.

La texture du sol est partout sableuse dans le profil (sables % > 72). La structure de ce sol est particulaire et devient massive au-delà de 72 cm de profondeur. Ce changement structural coïncide avec l'hydromorphie observée au niveau des horizons de profondeurs. Le pH varie entre 8,3 et 8,7 ce qui signifie que ce paramètre est peu variable dans le profil. La gamme du pH correspond à une réaction alcaline du sol. Le taux de calcaire est relativement faible ($2,3\% < \text{CaCO}_3\% < 4,6\%$) (Baize, 1988) et varie peu dans le profil. La décroissance de l'intensité de l'effervescence à l'HCl est éventuellement liée aux taux d'humidité qui augmentent du haut vers le bas. En effet, le sol est de plus en plus humide du haut vers le bas où il devient franchement saturé à partir de 80 cm de profondeur. Le sol est peu gypseux ($0,7\% < \text{Gypse}\% < 2,7\%$). En outre, ce sol est caractérisé par une salinité très élevée ($\text{CE}_{1,5} > 2,5 \text{ dS/m}$) qui le classe parmi les sols extrêmement salés (Shaw, 1988). Le profil salin est de type concave (figure 3-4) et il se caractérise par un minimum de salinité dans sa partie médiane, le maximum étant observé au niveau de l'horizon de surface ($\text{CE}=3,6 \text{ dS/m}$) qui

concorde bien avec la présence des efflorescences salines à la surface du sol. Cette accumulation serait due à l'évaporation de la solution du sol conjuguée à la remonté capillaire. Le faciès chimique global est de type chloruré sulfaté calcique et magnésique.

Ce sol est classé comme un Typic aquisolid (Soil Survey Staff, 1999) et Arenic Gleyic Solonchaks (IUSS Working Group WRB, 2014).

Tableau 3-3. Résultats analytique du profil 2

Caractéristiques	Horizons			
	0-21 cm	21-72 cm	72-83 cm	> 83 cm
Profondeur (cm)	0-21 cm	21-72 cm	72-83 cm	> 83 cm
Sable (%)	80,32	75,33	77,32	72,33
A + L (%)	19,68	24,67	22,68	33,79
CaCO ₃ (%)	3,3	4,6	3,4	2,3
Gypse (%)	0,7	0,8	2,7	0,9
pH	8,7	8,7	8,3	8,5
CE _{1:5} (dS/m)	3,6	3,0	2,9	3,1
Bilan ionique extrait aqueux 1:5 (méq/l)				
Ca ⁺²	16,55	11,62	11,85	15,85
K ⁺	1,32	1,63	1,43	1,63
Mg ⁺²	0,48	0,98	0,64	1,71
Na ⁺	1,01	1,96	1,87	1,812
Cl ⁻	13,55	12,33	11,44	11,77
HCOO ⁻	0,4	0,5	0,4	0,5
SO ₄ ⁻²	17,33	16,45	14,53	16,29

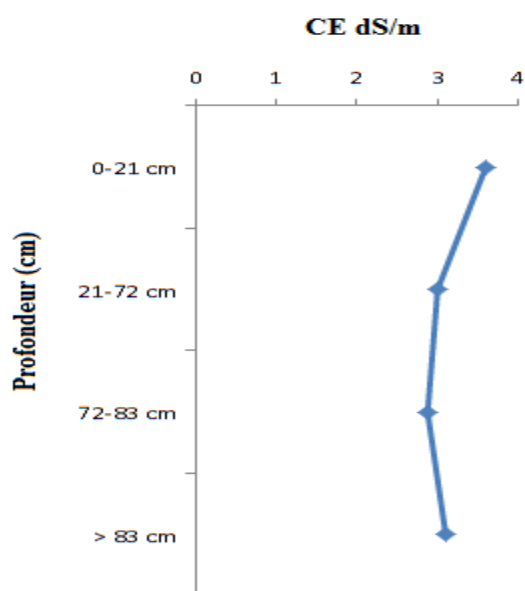


Figure 3-4 : Profil salin du site B

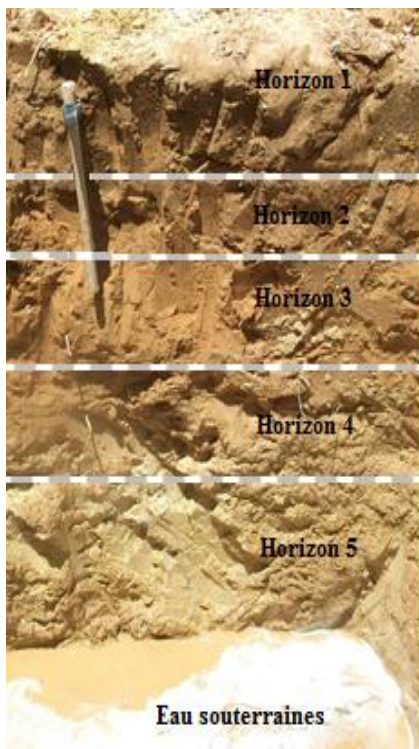
2.3. Le site C

Le site C est une parcelle cultivée (arboriculture fruitière) et irriguée par le système du goutte à goutte. La pente, de direction sud-nord, est très faible (< 2 %). Ce site se caractérise par la présence d'une dense végétation de mauvaises herbes et de plantes hydrophiles.

Le site C est caractérisé par le profil 3 (figure 3-5). Ce profil se localise comme suit :

- Longitude = 4° 33' 4,1''
- Latitude = 35° 20' 56,5''
- Altitude = 397,3 m

2.3.1. Description morphologique du profil 3



0-21 cm : Sec, brun jaune 10YR6/4, texture sableuse, structure particulaire, peu organique, absence d'activité biologique, racines très abondantes, non compact, très friable, peu poreux, vive effervescence à HCl, transition régulière nette.

21-63 cm : peu humide, brun jaune clair 10YR6/8, texture sableuse, structure particulaire, peu organique, absence d'activité biologique, vive effervescence à HCl, racines moyennement abondantes, friable, transition régulière et nette.

63-90 cm : humide, brun 10YR5/6, texture sableuse, structure massive, absence de matière organique, absence d'activité biologique, racines abondantes, peu compact, friable, peu poreux, vive effervescence à HCl, transition régulière et peu nette.

Figure 3-5. Profil 3

90-122 cm: très humide, brun jaune clair 10YR6/3, texture sableuse, structure massive, absence de matière organique, absence d'activité biologique, racines très peu abondantes, peu compact, moyennement friable, poreux, vive effervescence à HCl, transition peu nette.

> 122 cm : très humide (saturé), jaunâtre 10YR7/4, texture sableuse, structure massive, absence de matière organique, absence d'activité biologique, absence de racine, très compact, non friable, non poreux, vive effervescence à HCl.

2.3.2. Résultats des analyses du profil 3

Les résultats des analyses du profil 3 sont consignés dans le tableau 3-4.

Tableau 3-4. Résultats analytiques du profil 3

Caractéristiques	Horizons				
	0-21 cm	21-63 cm	63-90 cm	90-122 cm	> 122 cm
Profondeur (cm)					
Sable (%)	89,23	83,25	80,25	82,33	79,69
A + L (%)	10,77	16,75	19,75	17,67	20,31
CaCO ₃ (%)	4,7	4,2	5,3	12,3	14,2
Gypse (%)	0,1	0,3	0,2	0,3	2,3
pH	8,1	8,4	8,2	8,3	8,0
CE _{1:5} (dS/m)	0,1	0,3	0,7	0,5	2,4
Bilan ionique extrait aqueux 1:5 (méq/l)					
Ca ⁺²	3,55	6,52	6,91	5,98	9,33
K ⁺	0,61	0,33	0,34	0,75	0,75
Mg ⁺²	0,11	0,13	0,09	0,15	0,53
Na ⁺	0,50	0,36	0,55	0,55	1,26
Cl ⁻	0,78	0,66	0,75	0,99	1,22
HCOO ⁻	0,5	0,7	1	0,9	0,6
SO ₄ ⁻²	3,99	5,98	5,12	5,62	7,33

La texture du sol est sableuse sur tout le profil (taux de sables > 75%). La structure de ce sol est particulière pour les deux horizons de surface ce qui dénote son caractère psammophile. Le taux de gypse est relativement faible (Gypse < 3%) (Barzanji, 1973). Le pH est alcalin et constant dans le profil (8,1 < pH < 8,4). Le sol est peu à modérément calcaire (4,2 % ≤ CaCO₃ ≤ 14,2%) (Baize, 1988) avec une légère accumulation dans les horizons de profondeurs (profondeur > 90 cm). L'intensité de l'effervescence à l'HCl concorde bien avec les taux de CaCO₃%. Concernant la CE qui est une indication de la salinité d'un sol, les horizons du profil 3 présentent des gammes de CE comprises entre 0,1 dS/m (non salin) et 2,4 dS/m (très salin) (Shaw, 1988). Le profil salin global est de type descendant (figure 3-6) avec un maximum de salinité dans les horizons de profondeur due probablement à une lixiviation des sels provoquée par les eaux d'irrigation ou éventuellement à l'eau de la nappe qui serait salée.

Le faciès chimique dominant est de type chloruré sulfaté calcique et magnésique.

Le sol de ce site est classé comme étant un Calcic Aquisalid (Soil Survey Staff, 1999) et de type Arenic Gleyic Solonchaks (IUSS Working Group WRB, 2014).

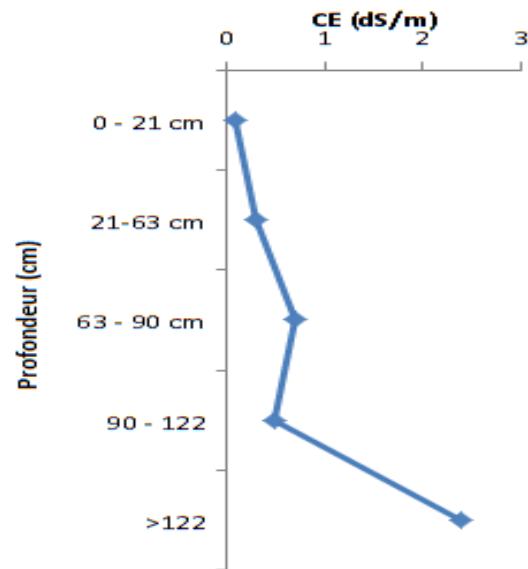


Figure 3-6. Profil salin du site C

2.4. Le site D

Le site D est une parcelle non cultivé (jachère de plusieurs années) avec la présence d'une végétation d'halophytes. La pente, de direction sud-nord, est très faible (< 2 %).

Le site D est caractérisé par le profil 4 (figure 3-7). Ce profil se localise comme suit :

- Longitude = $4^{\circ} 32' 21,3''$
- Latitude = $35^{\circ} 20' 59,0$
- Altitude = 405,6 m

2.4.1. Description morphologique du profil 4



Figure 3-7. Profil 4

0-30 cm : frais, brun jaune clair 10YR6/4, texture sableuse, structure particulaire, peu compact, très peu organique, très faible activité biologique, racines très peu abondantes, friable, très peu poreux, faible effervescence à HCl, transition régulière nette.

30-48 cm : humide, brun jaune clair 10YR6/8, texture sableuse, structure particulaire, peu compact, absence de racines, absence de matière organique, poreux, effervescence à HCl moyenne, friable, 10YR6/8, transition régulière et peu nette.

48-72 cm: très humide, brun jaune clair 10YR6/6, texture sableuse, structure massive, compact, absence de racines, absence de matière organique, vive effervescence à HCl, peu friable, transition régulière et peu nette.

> **72 cm** : saturé, texture sableuse, jaunâtre 10YR7/4, structure massive, très compact, absence de racines, absence de matière organique, vive effervescence à HCl, très peu friable.

2.4.2. Résultats des analyses du profil 4

Les résultats des analyses du profil 4 sont consignés dans le tableau 3-5.

La totalité des horizons du profil 4 sont de texture sableuse (sables% > 72%). La structure de ce sol est particulaire pour les deux horizons de surface et massive pour les horizons de profondeur. Le taux de calcaire est relativement faible ($2,3\% < \text{CaCO}_3\% < 4,4\%$) (Baize, 1988) et sa répartition dans le profil est homogène. Le pH est alcalin et constant dans le profil ($8,3 < \text{pH} < 8,6$). Le sol est peu gypseux ($1,9\% < \text{Gypse}\% < 4,1\%$) (Barzanji, 1973). Il se caractérise aussi par un fort gradient d'humidité du haut vers le bas où il devient très saturé. La nappe d'eau se situe à environ 70 cm de profondeur. Les horizons du profil 4 ont des CE supérieures à 2,9 dS/m qui les classent parmi les sols extrêmement salés (Shaw, 1988). Le profil salin est de type convexe (figure 3-8) avec un maximum de salinité observé au niveau

de l'horizon médian provoqué par la remonté capillaire vers les horizons de moyenne profondeur. Le faciès chimique global est de type chloruré sulfaté calcique et magnésique.

Le sol de ce site est un Typic Aquisalid (Soil Survey Staff, 1999) et de type Arenic Gleyic Solonchaks (IUSS Working Group WRB, 2014).

Tableau 3-5. Résultats analytiques du profil 4

Caractéristiques	Horizons			
	0-30 cm	30-48 cm	48-72 cm	> 72 cm
Sable (%)	75,36	76,53	72,33	82,33
A + L (%)	24,64	23,47	27,67	17,67
CaCO ₃ (%)	2,3	2,4	4,4	3,2
Gypse (%)	1,9	2,3	3,3	4,1
pH	8,3	8,6	8,6	8,6
CE _{1:5} (dS/m)	4,7	5,7	4,2	2,9
Bilan ionique extrait aqueux 1:5 (méq/l)				
Ca ⁺²	22,33	23,44	28,33	24,56
K ⁺	1,62	2,17	0,89	1,10
Mg ⁺²	4,89	5,22	3,52	6,78
Na ⁺	2,52	2,011	2,32	2,33
Cl ⁻	11,42	11,32	10,55	11,66
HCOO ⁻	0,1	0,3	0,15	0,1
SO ₄ ⁻²	18,32	19,66	22,35	22,78

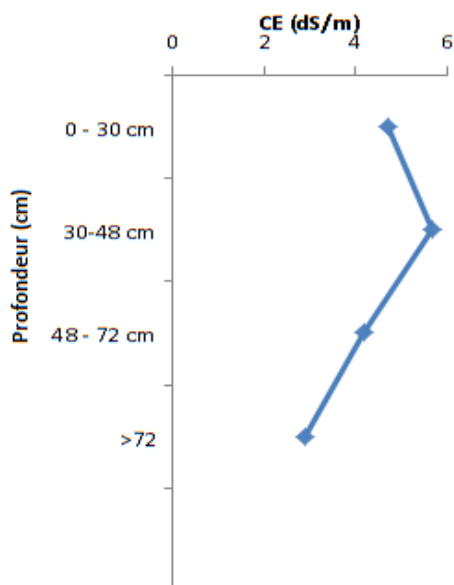


Figure 3-8. Profil salin du site D

Globalement, les sols des sites étudiés se caractérisent par une texture sableuse. Cette caractéristique favorise la percolation des eaux d'irrigation et des pluies (forte perméabilité hydraulique, faible capacité de rétention des eaux) avec des conséquences sur la dynamique des sels solubles. La surface du sol est recouverte d'un voile blanc correspondant à des efflorescences salines provoquées par la remontée capillaire dans ce milieu fortement évaporant. La végétation naturelle est composée d'halophytes qui colonisent particulièrement les espaces non cultivés. Ces résultats dénotent le caractère salin des sols de ce milieu. En effet, les résultats ont révélé que les profils 1, 2 et 4 sont très salins avec des CE supérieures à 2,5 dS/m dans l'ensemble du profil. Le profil 3, quant à lui, il est relativement peu salin en surface et en subsurface (CE inférieure à 0,8 dS/m pour les quatre premiers horizons) et il devient très salin en profondeur (CE = 2,4 dS/m pour l'horizon de profondeur). Les profils salins des quatre horizons ont des allures différentes liées probablement à la particularité de chaque site concernant les pratiques agricoles (types de cultures et méthodes d'irrigation). La structure du sol est particulière dans la partie supérieure des sols et elle se compacte avec la profondeur pour devenir massive. Ce changement structural serait lié aux fortes humidités associées à la présence d'association des sels gypso-calcaires dans les horizons de profondeurs. Les taux de gypse sont faibles sur l'ensemble des profils (Gypse % < 10%) excepté pour l'horizon 3 du profil 1 où il atteint 15,2%. Les taux de calcaire total sont relativement faibles sur l'ensemble des profils sauf dans le profil 3 au niveau des deux derniers horizons où il atteint un maximum de 14,2%. Les résultats des analyses de la solution du sol révèlent la prédominance des associations ioniques sulfatées calciques qui témoignent de l'abondance du gypse dans ce milieu. Dans les profils étudiés, la présence d'une nappe d'eau peu profonde serait responsable de la dissolution continue des accumulations gypseuses. Elle provoque à la fois une diminution des teneurs en gypse et une augmentation de la CE de la solution du sol.

3. Caractérisation analytique des sols et évolution spatio-temporelle de CE des quatre transects

On sait que la EM est liée à de nombreux paramètres du sol tels que la CE, l'humidité, la granulométrie, le pH, le calcaire et le gypse entre autres. L'étude des transects A, B, C et D nous renseigne sur la variabilité spatiale des paramètres pédologiques des parcelles qu'ils représentent. CE, qui est le principal paramètre lié à la EM, fera l'objet d'une présentation à part. Les analyses ont été effectuées sur des échantillons prélevés de 5 couches de sols de 30 cm d'épaisseur situées entre la surface du sol et 150 cm de profondeur. Nous rappelons que le nombre total d'échantillons étudiés lors de chaque campagne de mesures est de 205 échantillons par campagne avec 65 en site A, 35 en site B, 50 en site C et 55 en site D.

3.1. Caractérisation physico-chimiques des échantillons prélevés au niveau des transects

Nous avons considéré que les taux de calcaire, les taux de gypse, la texture et le pH varient peu dans le temps, surtout dans les milieux secs. Aussi, leur caractérisation n'a fait l'objet ici que d'une seule mesure réalisée lors de la première campagne de mesures. Par contre, l'humidité des sols, qui dépend fortement de l'irrigation et des événements pluviaux, ainsi que la salinité qui est un paramètre très variable, ont fait l'objet de quatre campagnes de mesures.

3.1.1. Le calcaire

Les résultats mentionnés dans le tableau 3-6 montrent que les taux de CaCO_3 oscillent entre moins de 1 % pour les plus faibles valeurs et environ 17% pour les plus fortes avec des écarts moyens (plage) de l'ordre de 4 % de CaCO_3 en TA, 7 % en TB et TC et de 9 % en TD. En se basant sur les valeurs moyennes de CaCO_3 par couche, il s'avère que les différences des taux moyens de calcaire dans le profil sont de l'ordre de 1 % en TA, 4 en TB, 3 % en TC et de 2 en TD. En considérant les taux moyens de CaCO_3 qui se situent entre 3 % et 6 %, ces résultats suggèrent que le profil calcaire moyen des 4 transects est globalement homogène. Les résultats mentionnés dans le tableau 3-6 montrent, qu'en réalité, les taux de CaCO_3 sont variables à très variables dans l'espace quels que soient le transect et la couche du sol considérés ($23 < \text{CV} \% < 105$). Cette différence de distribution du CaCO_3 dans l'espace est illustrée par la figure 3-9 qui révèle une légère décroissance des taux de calcaire du sud vers le nord de TA et que les plus faibles valeurs se localisent au milieu des transects B et C. La distribution latérale du CaCO_3 dans TD est sinusoïdale avec une nette excroissance au milieu du transect au niveau de l'observation 6 pour les couches H2, H3 et H4.

Tableau 3-6 : Paramètres statistiques des taux de CaCO₃ dans TA, TB, TC et TD

Transects	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	ET	CV %
TA-CaCO ₃	0 - 30	2,6	0,4	5,4	5,0	1,7	65
	30 - 60	2,7	0,6	4,9	4,3	1,4	53
	60 - 90	2,6	0,3	4,3	3,9	1,4	53
	90 - 120	2,4	0,4	4,9	4,4	1,4	58
	120 - 150	2,1	0,4	4,0	3,6	1,4	67
	Moy	2,5	0,4	4,7	4,2	1,5	59
TB-CaCO ₃	0 - 30	5,7	3,1	7,1	4,0	1,4	25
	30 - 60	7,1	4,0	11,0	7,1	2,7	39
	60 - 90	8,6	2,6	14,1	11,5	4,2	49
	90 - 120	5,5	0,4	7,9	7,5	3,0	54
	120 - 150	5,1	2,2	6,6	4,4	1,6	32
	Moy	6,4	2,5	9,3	6,9	2,6	40
TC-CaCO ₃	0 - 30	4,8	0,4	6,2	5,7	1,6	34
	30 - 60	4,5	3,1	7,1	4,0	1,0	23
	60 - 90	4,6	2,6	8,8	6,2	1,8	38
	90 - 120	7,4	2,2	11,5	9,3	3,2	44
	120 - 150	7,4	2,2	11,5	9,3	3,2	44
	Moy	5,7	2,1	9,0	6,9	2,2	37
TD-CaCO ₃	0 - 30	2,8	0,9	9,7	8,8	2,6	91
	30 - 60	3,4	1,8	7,9	6,2	2,0	59
	60 - 90	4,1	1,3	16,8	15,4	4,4	105
	90 - 120	4,4	1,3	11,9	10,6	3,3	76
	120 - 150	2,9	1,3	7,1	5,7	1,7	59
	Moy	3,5	1,3	10,7	9,3	2,8	78

Par ailleurs, la figure 3-9 montre aussi que quelle que soit le transect considéré, les profils en long de la distribution latérale des différentes couches ne sont jamais parallèles et se recoupent et s'inversent fréquemment avec des écarts plus ou moins important au sein d'une même observation. Ce résultat signifie que les parcelles A, B, C et D se caractérisent par une légère variabilité spatiale de leurs profils calcaires et que la distribution du CaCO₃ ne serait pas liée à une quelconque dynamique de cet élément dans le profil.

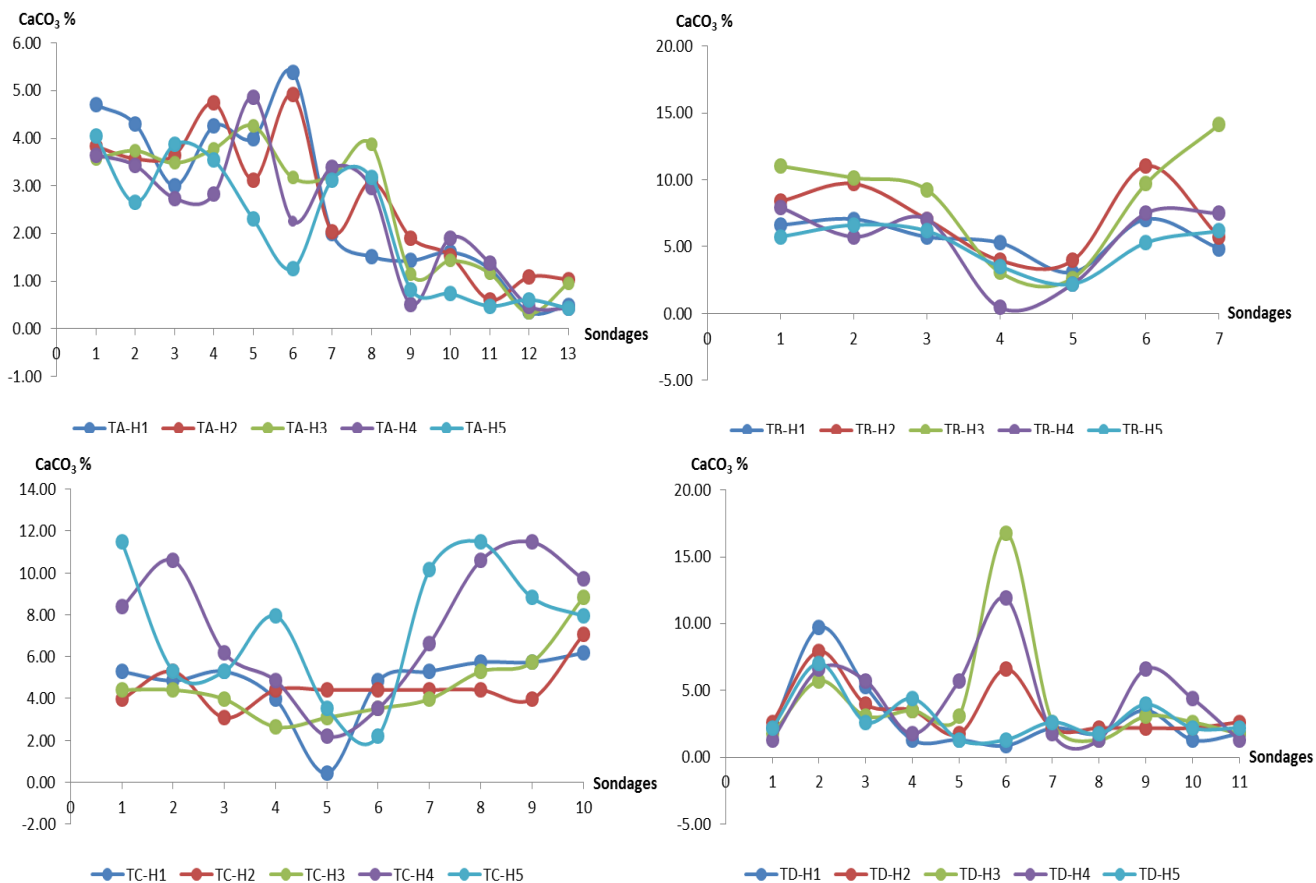


Figure 3-9. Distributions verticales et latérales des taux de CaCO_3 dans TA, TB, TC et TD

Conclusion

Les résultats ont montré que les sols étudiés sont peu pourvus en calcaire ($2,5 < \text{CaCO}_3$ moyenne % $< 6,4$) et peuvent être par endroits calcaires à très calcaires comme c'est le cas de la couche médiane de TB et TD ($\text{CaCO}_3 > 14\%$). Les résultats montrent aussi que la distribution du CaCO_3 est très variable quels que soit le site d'étude et la couche du sol considérés ($23\% < \text{CV} < 105\%$). Les résultats révèlent que le niveau de calcaire diminue dans l'ordre $\text{TB} > \text{TC} > \text{TD} > \text{TA}$. La forte variabilité de ce paramètre influencera probablement la prospection du sol par la méthode électromagnétique.

3.1.2. Le gypse

Les résultats des analyses (tableau 3-7) indiquent que le gypse est partout présent quels que soient la couche de sol et le transect considérés. Ses teneurs varient de l'état de trace jusqu'à des maximum d'environ 5 % en TA, 28 % en TB, 12 % en TC et 18 % en TD qui correspondent sensiblement aux plus grands écarts entre les valeurs des minima et des maxima (plage). Toutefois, les valeurs moyennes des taux de gypses sont de l'ordre de 1 % dans les couches de TA, elles varient entre 3 % et 12 % dans celles de TB. Le gypse est

moyennement présent dans TB ($\approx 3\%$) mais avec une nette augmentation de ses taux à partir de 60 cm de profondeur (Gypse $> 7\%$). Dans TC, les taux moyens de gypse, qui sont à l'état de traces ($< 1\%$) dans les quatre premières couches, augmentent subitement à partir de 120 cm de profondeur pour atteindre 2%. Ces résultats suggèrent que le gypse se trouve généralement à l'état de trace dans TA et TC mais avec une très légère augmentation à partir de 120 cm de profondeur pour ce dernier. Dans TD, le profil gypseux moyen est relativement homogène avec des taux qui se situent entre 3 et 6%. L'ensemble de ces résultats suggèrent que les taux de gypse, même si parfois ils sont très faibles, sont très variables dans l'espace quels que soient le transect et la couche de sol considérés ($53 < CV\% < 206$). Cette variabilité latérale et verticale est illustrée par la figure 3-10 qui révèle une forte hétérogénéité des taux de gypse aussi bien dans le profil (écartement entre les courbes au niveau d'un point d'observation) que dans l'espace (différences d'amplitudes entre les observations). De même, cette figure montre clairement que les courbes ne sont pas parallèles entre elles et qu'elles se chevauchent ce qui signifie que le profil gypseux est en réalité hétérogène le long des transect.

Tableau 3-7. Paramètres statistiques des taux de gypse (%) dans TA, TB, TC et TD

Transect	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	ET	CV %
TA-Gypse	0 - 30	0,49	0,04	1,31	1,27	0,44	90
	30 - 60	1,09	0,03	3,77	3,74	1,24	114
	60 -90	1,22	0,05	4,68	4,63	1,30	106
	90 -120	1,14	0,08	4,78	4,69	1,28	112
	120 - 150	1,12	0,11	2,87	2,76	0,82	73
	Moy	1,0	0,1	3,5	3,4	1,0	100
TB-Gypse	0 - 30	3,66	0,40	11,82	11,42	3,84	105
	30 - 60	3,05	0,15	8,49	8,34	3,08	101
	60 -90	7,46	0,30	17,09	16,80	5,79	78
	90 -120	11,70	0,49	27,31	26,82	11,09	95
	120 - 150	10,35	0,84	21,67	20,83	7,96	77
	Moy	7,2	0,4	17,3	16,8	6,4	100
TC-Gypse	0 - 30	0,39	0,02	1,62	1,61	0,50	130
	30 - 60	0,26	0,01	0,89	0,87	0,33	130
	60 -90	0,28	0,01	1,71	1,70	0,58	206
	90 -120	0,48	0,01	2,38	2,36	0,96	200
	120 - 150	2,45	0,01	12,21	12,20	4,08	166
	Moy	0,8	0,01	3,8	3,7	1,3	200
TD-Gypse	0 - 30	3,40	0,01	12,66	12,65	3,70	109
	30 - 60	6,33	0,11	17,74	17,63	6,57	104
	60 -90	4,74	0,12	12,88	12,76	3,68	78
	90 -120	4,90	0,12	11,45	11,33	3,82	78
	120 - 150	4,41	2,50	9,24	6,75	2,34	53
	Moy	4,8	0,6	12,8	12,2	4,0	100

En fin, la figure 3-10 montre que les taux de gypse se distribuent différemment selon le transect considéré. En effet, ces taux sont très faibles et homogènes dans la partie amont de TA (observations 1 à 4) pour devenir par la suite relativement plus hétérogènes. Dans TB, les taux de gypse sont relativement plus forts et se distribuent d'une façon sinusoïdale le long du transect, les couches H3, H4 et H5 étant les plus pourvues en cet élément. La partie amont de TB (observations 1 et 2) enregistre les plus faibles taux de gypse qui se distribue d'une façon homogène dans le profil. Les taux de gypse sont faibles dans TC (Gypse % < 1) sauf dans la couche H5 qui enregistre un fort taux à l'aval du transect. En ce qui concerne TD, les taux de gypse sont relativement constants à l'amont et au milieu du transect, mais deviennent relativement forts dans sa partie aval.

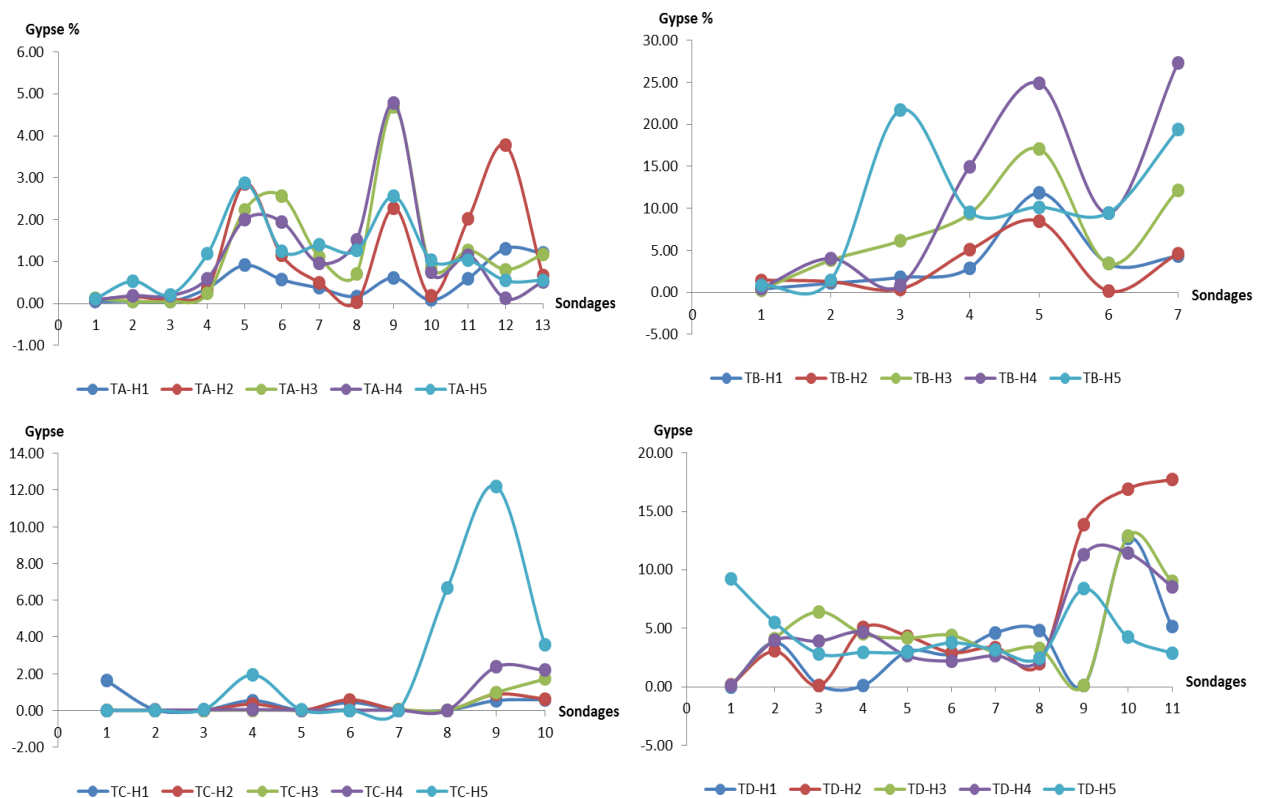


Figure 3-10. Distributions verticales et latérales des taux de gypse dans TA, TB, TC et TD

Conclusion

Les résultats montrent que les sols étudiés sont en général très peu pourvus en gypse ($0,8\% < \text{gypse\% moyen} < 7\%$) et peuvent être par endroits très gypseux, certains échantillons pouvant atteindre des teneurs qui avoisinent $\approx 20\%$ (sondages 7 site B et 11 site D). L'ensemble des résultats montrent aussi que les taux de gypse sont très variables dans l'espace et ce quels que soit le site et la couche du sol considérés. Cette variabilité du taux de gypse pourrait influencer probablement la prospection du sol par le biais du EM38.

3.1.3. Le sable

Les résultats du tableau 3-8 indiquent que toutes les couches du sol, quel que soit le transect considéré, sont toutes très sableuses. En effet, les taux de sable varient entre un minimum de 60 % enregistré en TA-H2 et un maximum de 99 % dans TC-H3. Ce résultat suggère que les différentes couches appartiennent aux classes texturales Loamy Sand à Sand en passant par la classe Sandy Loam selon le triangle des textures (Soil survey staff ; 2014). Ce résultat est conforté par les moyennes générales des taux de sables qui sont de l'ordre de 77 % en TA, 80 % en TB, 88 % en TC et 79 % en TD. Dans le détail, il apparait que TC est plus sableux que les autres transects. Même si les écarts (plage) entre les minima et les maxima sont relativement importants (13 à 29 %), nous pouvons considérer que les taux de sables varient faiblement au sein d'une même couche comme le confirme les CV qui sont tous inférieurs à 11 %.

Tableau 3-8. Paramètres statistiques des taux de sable dans TA, TB, TC et TD

Transects	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	ET	CV %
TA-Sable	0 - 30	79,00	71,62	87,68	16,06	5,19	7
	30 - 60	75,67	60,99	86,87	25,88	7,79	10
	60 -90	75,45	66,37	86,79	20,42	6,96	9
	90 -120	78,33	70,10	87,32	17,21	5,42	7
	120 - 150	77,31	66,65	88,86	22,21	7,93	10
	Moy	77	67	88	20	7	9
TB-Sable	0 - 30	78,33	67,53	85,58	18,05	6,09	8
	30 - 60	81,09	74,55	88,12	13,57	4,20	5
	60 -90	79,18	73,76	84,02	10,26	3,84	5
	90 -120	79,78	70,28	89,65	19,37	6,44	8
	120 - 150	81,91	70,31	90,69	20,38	7,00	9
	Moy	80	71	88	16	6	7
TC-Sable	0 - 30	87,24	69,25	98,74	29,49	9,03	10
	30 - 60	88,04	79,17	94,19	15,02	4,92	6
	60 -90	90,23	76,16	99,39	23,23	6,89	8
	90 -120	87,53	79,41	92,78	13,37	5,17	6
	120 - 150	85,24	75,97	93,08	17,11	5,38	6
	Moy	88	76	96	20	6	7
TD-Sable	0 - 30	81,76	71,26	96,52	25,26	7,68	9
	30 - 60	79,76	70,03	95,76	25,73	8,89	11
	60 -90	77,83	70,24	94,38	24,14	7,60	10
	90 -120	75,39	67,93	95,73	27,80	7,56	10
	120 - 150	79,22	67,86	96,45	28,59	8,27	10
	Moy	79	69	96	26	8	10

La figure 3-11 révèle que quel que soit le transect considéré, la distribution latérale des taux de sable est sinusoïdale avec des courbes qui s'entrecroisent. Cette observation signifie que les taux de sable se distribuent d'une façon hétérogène aussi bien de l'amont vers l'aval que du haut vers le bas du profil au sein d'un même transect. Cette figure montre aussi que les taux de sable se distribuent dans une gamme de variation relativement constante d'amont en aval en TA, TB et TC d'où cette direction approximativement horizontale. Dans TD, les taux de sable diminuent de l'amont vers l'aval dans la première partie du transect (de l'observation 1 à l'observation 5) pour se stabiliser ensuite entre des limites relativement constantes jusqu'à la fin du transect.

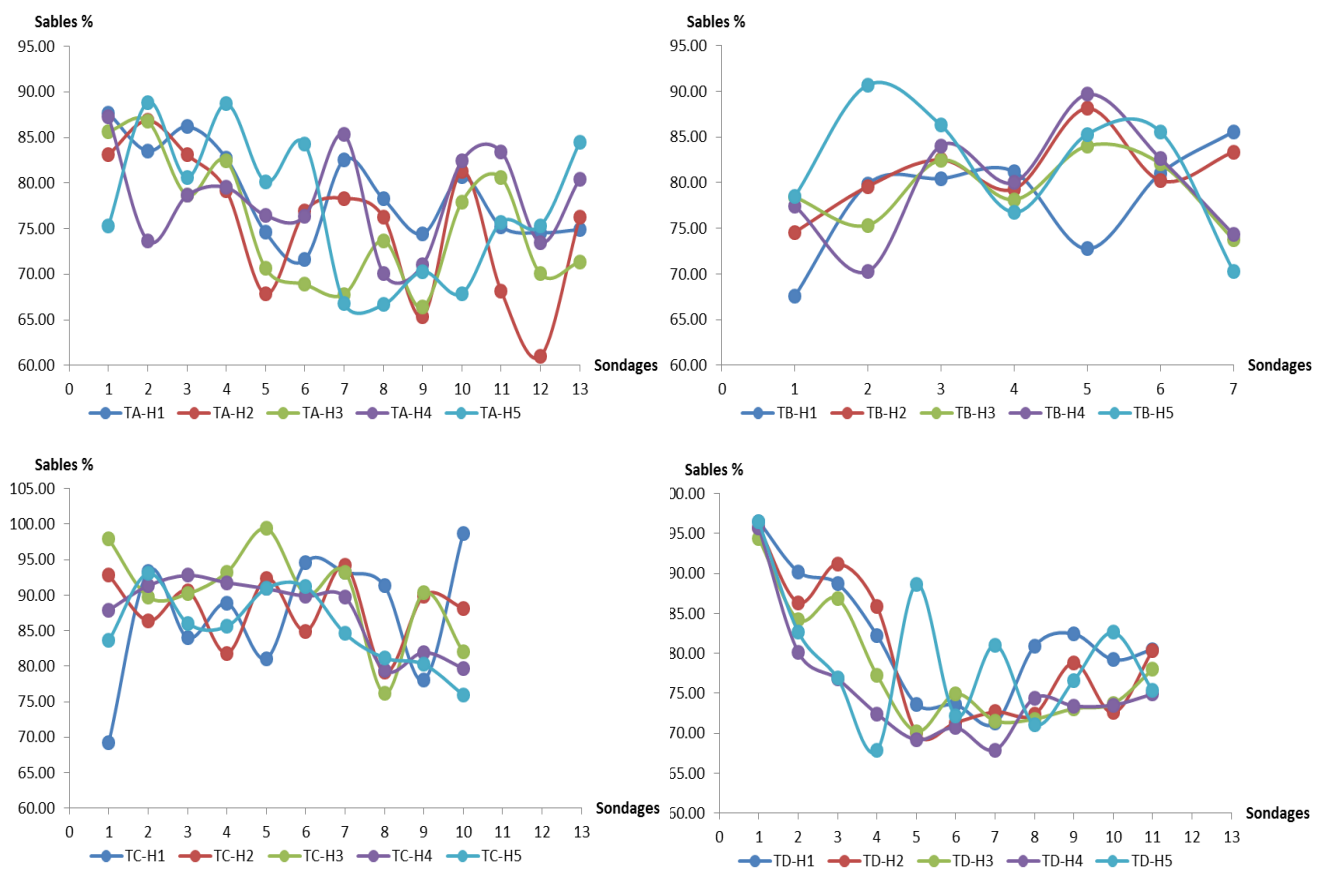


Figure 3-11. Distributions verticales et latérales des taux de sables dans TA, TB, TC et TD

Conclusion

Les résultats montrent que les sols des sites étudiés se caractérisent par une texture sableuse. Les taux de sables sont élevés au niveau des quatre sites d'étude ce qui donne à nos sols une texture Loamy Sand à Sand en passant par la classe Sandy Loam (Soil Survey Staff, 2014). Les résultats ont montré que la texture présente une faible variabilité quel que soit le site d'étude et la couche du sol considérés. Cette homogénéité de la texture présente au niveau des

quatre sites d'étude va minimiser éventuellement l'impact de la texture sur la mesure de la salinité par la méthode électromagnétique.

3.1.4. Le pH

Les résultats mentionnés dans le tableau 3-9 montrent que les pH de toutes les couches de sol sont alcalins. La valeur minimale absolue est observée en TA (pH = 7,53) et la maximale en TC (pH = 9,2). Les pH moyens des couches d'un même transect sont tous supérieurs à 8,2 avec une moyenne égale à 8,39 en TA, 8,44 en TB, 8,67 en TC et à 8,58 en TD ce qui dénote le caractère fortement alcalin du milieu d'étude. Même si sur le plan statistique la variabilité spatiale de ce paramètre est très faible ($2 < CV \% < 5$), l'étendue, qui avoisine l'unité dans la majorité des cas ($0,49 < \text{plage} < 1,34$), révèle des changements importants de l'alcalinité des sols aussi bien au sein d'une même couche que entre couches d'un même transect. Cette variabilité est illustrée par la figure 3-12, qui montre que toutes les courbes sont sinusoïdales et qui traduisent la variation latérale au sein des transects.

Tableau 3-9. Paramètres statistiques du pH dans TA, TB, TC et TD

Transects	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	ET	CV %
TA-pH	0 - 30	8,55	8,25	8,96	0,70	0,21	2
	30 - 60	8,50	7,98	8,97	0,99	0,29	3
	60 -90	8,36	7,75	8,69	0,94	0,22	3
	90 -120	8,30	7,53	8,78	1,26	0,28	3
	120 - 150	8,24	7,82	8,60	0,78	0,21	3
	Moy	8,39	7,87	8,80	0,93	0,24	3
TB-pH	0 - 30	8,42	8,20	8,69	0,49	0,17	2
	30 - 60	8,42	8,17	8,94	0,77	0,29	3
	60 -90	8,44	8,24	8,79	0,55	0,19	2
	90 -120	8,51	8,33	8,82	0,49	0,17	2
	120 - 150	8,39	8,07	8,70	0,63	0,22	3
	Moy	8,44	8,20	8,79	0,59	0,21	2
TC-pH	0 - 30	8,53	7,74	9,08	1,34	0,46	5
	30 - 60	8,77	7,98	9,20	1,22	0,38	4
	60 -90	8,80	7,99	9,25	1,26	0,43	5
	90 -120	8,77	7,95	9,19	1,24	0,39	4
	120 - 150	8,49	7,84	9,01	1,17	0,41	5
	Moy	8,67	7,90	9,15	1,25	0,41	5
TD-pH	0 - 30	8,55	8,17	8,93	0,76	0,27	3
	30 - 60	8,73	8,27	9,12	0,85	0,28	3
	60 -90	8,64	8,25	9,12	0,87	0,27	3
	90 -120	8,55	8,20	9,01	0,81	0,26	3
	120 - 150	8,44	8,06	8,95	0,89	0,27	3
	Moy	8,58	8,19	9,03	0,84	0,27	3

La figure 3-12 montre aussi que les écarts de pH au sein d'une même observation varient d'un point à un autre au sein d'un même transect et traduisent donc la variabilité verticale au sein d'un même transect. Cette figure montre aussi que la gamme de variation du pH suit un intervalle horizontal mais avec des valeurs plus fortes à l'amont de TA que dans le reste du transect. Il y aurait une légère tendance à l'augmentation des pH de l'amont vers l'aval dans TB et une tendance à la diminution en TD. TC révèle une chute relativement importante à l'aval du transect.

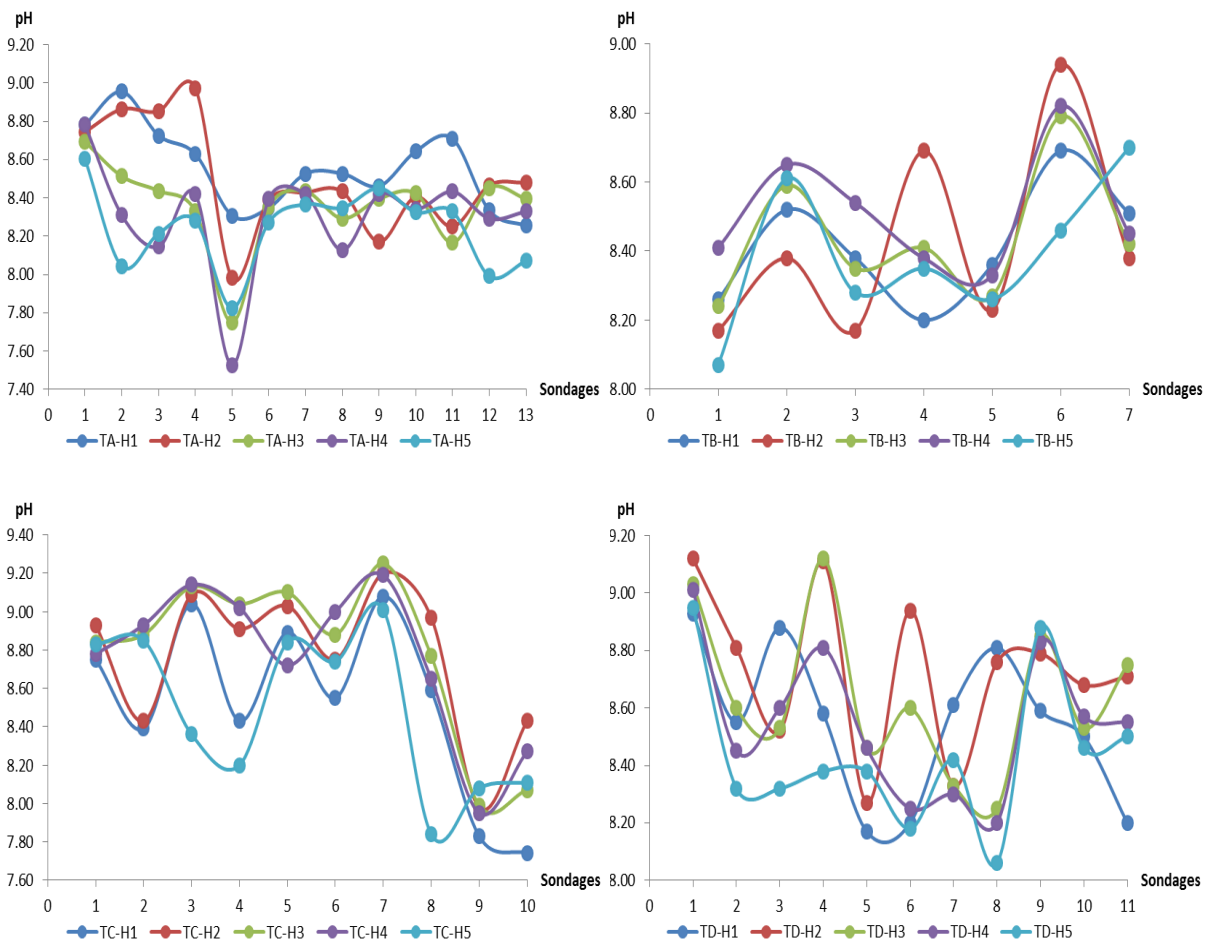


Figure 3-12. Distributions verticales et latérales des valeurs du pH dans TA, TB, TC et TD

Conclusion

Les résultats ont montré que la réaction du sol est dans l'ensemble légèrement à très alcaline. Les valeurs du pH sont généralement supérieures à 8 avec une valeur moyenne qui oscille entre 8,2 et 8,8. Les valeurs du pH présentent des niveaux de variabilité très faibles quel que soit le site d'étude et la profondeur du sol considérés ($CV < 5\%$) ce qui traduit une faible influence du pH sur les mesures électromagnétiques.

3.1.5. L'humidité

L'humidité du sol peut être provoquée par les événements pluvieux, l'irrigation, les écoulements d'eau latéraux ou par la remontée capillaire en présence d'une nappe phréatique peu profonde. De ce fait, l'humidité du sol est donc un paramètre qui varie aussi bien dans l'espace (variations latérale et verticale) que dans le temps. La variation de ce paramètre et sa dynamique peut influencer la salinité des sols et les mesures de la EM. C'est pourquoi, pour chaque couche du sol de chaque transect, nous avons réalisé quatre campagnes de mesures de ce paramètre, deux campagnes à la fin de la saison humide (Février) et les deux autres à la fin de la saison sèche (Novembre). De cette façon, il devient aisé d'analyser la variation spatiale (verticale et latérale) et temporelle des taux d'humidité au sein de chaque transect. Dans ce qui suit, nous présentons successivement les résultats obtenus pour les transects TA, TB, TC et TD.

3.1.5.1. Analyse de la variabilité spatiale et temporelle de H % dans TA

Les résultats mentionnés dans le tableau 3-10 montrent que les plus faibles minima de H % sont enregistrés dans les trois premières couches de surface alors que les plus forts maxima le sont dans les 4ème et 5ème couches et ce quelle que soit la période considérée. Ce résultat suggère que les couches de profondeur sont plus humides que celles du haut du profil, résultat confirmé par le profil hydrique moyen qui est toujours descendant. Les résultats montrent aussi que les écarts (plage) d'humidité au sein d'une même couche de sol peuvent être assez importants (18 % à 44 %) ce qui signifie qu'une même couche peut être sèche à un endroit et humide dans un autre. Cette variabilité est bien illustrée par les CV % qui sont tous très forts ($37 < CV \% < 87$). Cependant, il y a lieu de remarquer que les plus forts CV % sont enregistrés dans les horizons de surface (54 % à 87 %) et les plus faibles dans les horizons de profondeur (37 % à 45 %). Ce résultat signifie que les couches de surface sont sujets à un dessèchement/humectation nettement plus hétérogène que celui des couches de profondeur.

La figure 3-13 montre également, à quelques exception près, qu'il existe un gradient positif des taux d'humidité du haut vers le bas du profil et ce quel que soit le point et la période considérés, les différentes courbes étant plus ou moins parallèles les unes aux autres. Il y a lieu de remarquer que l'amont de TA représenté par les observations numéro un à quatre est nettement moins humide que dans le reste du transect. Ce phénomène est dû au fait que les observations numéro 4 et numéro 5 sont séparées par une route communale avec probablement une différence d'utilisation agricole des terres de part et d'autre de cette route.

Il y a lieu de remarquer aussi la grande similitude du comportement des profils hydriques latéraux des différentes campagnes de mesures au sein de TA ce qui signifie que la période de mesures impacte très peu les taux d'humidité au sein des différentes couches.

Cette observation est confortée par les résultats du tableau 3-10 qui indiquent que les valeurs des différents paramètres statistiques moyens sont, à quelques détails près, très similaires entre eux et ce quelle que soit la campagne considérée. Ce résultat suggère donc que l'effet temps n'aurait qu'un impact limité sur la variation de H % de TA.

Tableau 3-10. Paramètres statistiques de H % dans TA

Transects	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	ET	CV %
TA-F8	0 - 30	15	4	34	30	8	54
	30- 60	18	5	32	27	9	52
	60 -90	19	6	27	21	8	42
	90 - 120	33	10	51	41	15	45
	120 - 150	36	16	53	37	14	37
	Moy	24	8	39	31	11	46
TA-F9	0 - 30	17	4	48	44	13	76
	30- 60	17	6	28	23	8	48
	60 - 90	20	6	30	24	8	41
	90 - 120	33	8	51	43	15	45
	120 -150	36	16	53	37	14	38
	Moy	24	8	42	34	11	50
TA-N9	0 - 30	14	3	41	38	12	87
	30- 60	17	5	24	20	7	44
	60 - 90	18	6	28	22	8	47
	90 - 120	32	6	51	44	16	49
	120 - 150	36	11	53	42	14	40
	Moy	23	6	39	33	12	53
TA-N11	0 - 30	11	5	38	33	8	76
	30- 60	15	6	24	18	6	41
	60 - 90	18	8	31	24	7	40
	90 - 120	32	7	51	44	16	50
	120 - 150	35	9	53	44	16	45
	Moy	22	7	39	32	11	50

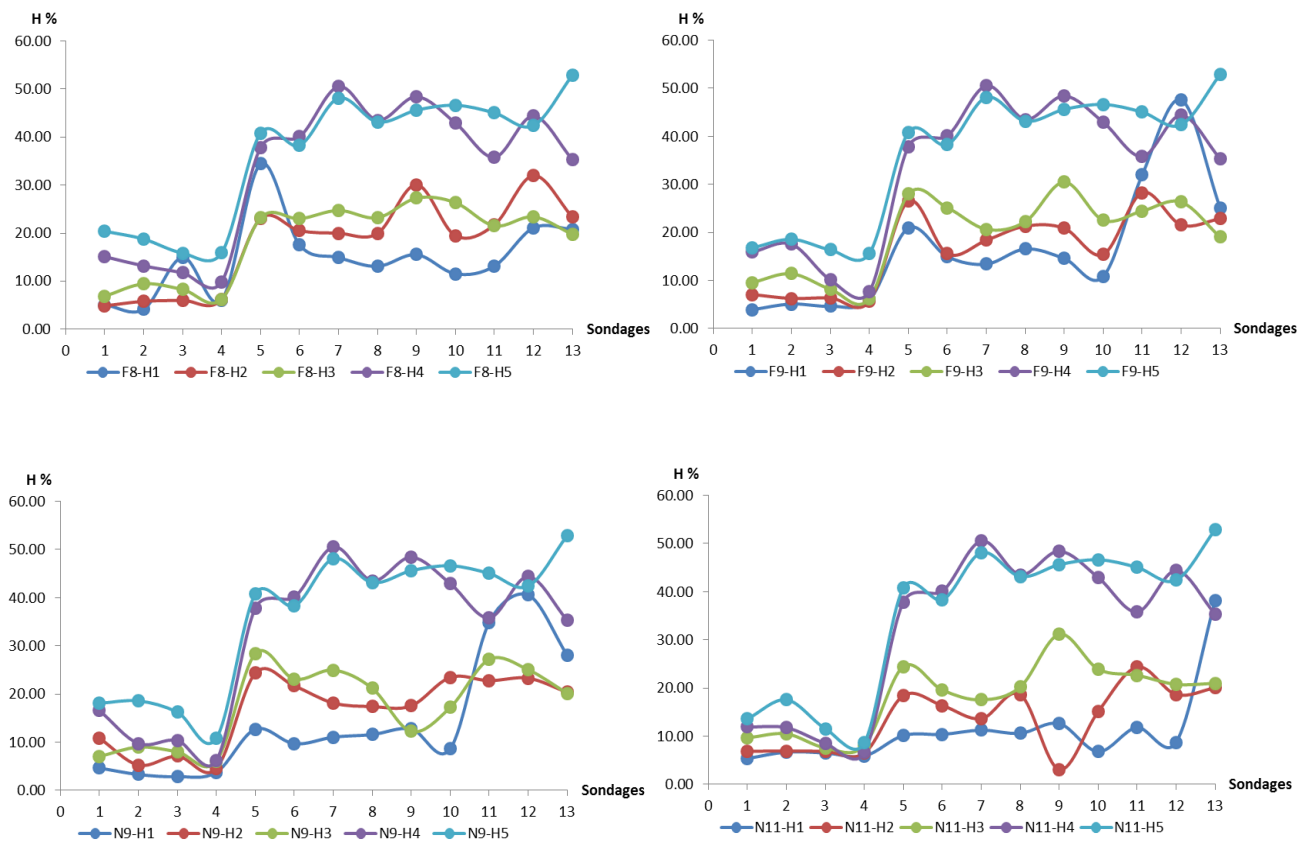


Figure 3-13. Distributions verticales et latérales des de l'humidité pondérale dans TA

Pour mettre en évidence l'effet temps, nous avons calculé pour chaque couche du sol les écarts entre les taux d'humidité des quatre campagnes prise deux à deux pour chaque point d'observation. Ceci aboutit donc au calcul de 6 écarts par couche de sol (tableau 1 à 5 - annexe 3). Nous avons également réalisé des profils de la distribution verticale et latérale de H % pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 21 (annexe 3) et illustrés par la figure 3-14. Les résultats indiquent que les plus grands écarts entre les taux d'humidité (0 % à 39 %) sont enregistrés au niveau de H1 avec des écarts moyens qui se situent entre 3 % (F9-N9) et 8 % (F8-F9 et F9-N11). Ces écarts moyens varient entre 2 % et 4 % en H2 et H3, ils sont de l'ordre de 1 % en H4 et se situent entre 0 % et 1 % en H5. Ces résultats signifient que l'humidité des horizons de surface serait plus impactée par rapport à celle des horizons de profondeur. Ce phénomène est illustré par la figure 3-14 qui montre que les amplitudes de variation sont assez larges dans la couche H1, en particulier en certains points d'observation (5, 11 et 12). Cette amplitude devient de plus en plus étroite en H2 et H3, pour devenir pratiquement nulle (superposition des courbes entre elles) en H4 et H5. Ce résultat signifie que l'humidité des couches de profondeur est insensible aux variations saisonnières. Cependant les statistiques indiquent que

les différences des moyennes (paires) sont toutes statistiquement non significatives sauf pour les couples F8-N11(H1), F9-N9 (H2) et F9-N11(H2) dans lesquels la différence est significative ($p < 0,05$).



Figure 3-14. Distributions verticale et latérale de H % pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site A)

3.1.5.2. Analyse de la variabilité spatiale et temporelle de H % dans TB

Le tableau 3-11 montre que les profils hydriques moyens de TB pour les quatre périodes de mesures sont tous descendants. Ce résultat signifie que les horizons de profondeur sont plus humides que ceux de surface ou de subsurface. Ce résultat est conforté par les profils hydriques des minima et des maxima qui sont également descendants avec une nette augmentation des taux d'humidité en H4 et H5 par rapport aux trois couches de surface. Le

tableau 3-11 montre également que les résultats obtenus lors des quatre campagnes de mesures sont très similaires (moyenne par horizon, moyenne par profil, minima, maxima) ce qui suppose que la période de mesure aurait peu d'effet sur l'humidité du sol. Toutefois, les écarts d'humidité (plage) au sein d'une même couche (4 % < écarts < 28 %) peuvent être plus ou moins grands. Ceci signifie qu'une même couche du sol peut être sèche en un endroit et humide en un autre. Les CV % qui sont assez forts (CV % moyen > 26 %) traduisent cette hétérogénéité de H % et sa variabilité latérale.

Tableau 3-11. Paramètres statistiques de H % dans TB

Transects	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	ET	CV %
F8-TB	0 - 30	13	4	25	21	6	51
	30 - 60	17	12	24	12	4	25
	60 - 90	20	18	21	4	2	8
	90 - 120	31	21	43	22	9	30
	120 - 150	38	24	49	25	10	26
	Moy	24	16	32	17	6	28
F9 - TB	0 - 30	15	7	25	18	5	36
	30 - 60	18	13	23	10	3	19
	60 - 90	20	19	23	4	2	9
	90 - 120	31	16	43	28	10	33
	120 - 150	36	23	49	26	11	32
	Moy	24	15	33	17	6	26
N9 - TB	0 - 30	14	6	23	17	6	45
	30 - 60	16	10	21	10	3	20
	60 - 90	20	16	27	11	4	18
	90 - 120	32	21	43	22	9	27
	120 - 150	35	23	49	26	11	32
	Moy	23	15	33	17	7	29
N11 - TB	0 - 30	15	9	21	13	5	34
	30 - 60	17	12	23	11	4	21
	60 - 90	30	15	41	25	11	37
	90 - 120	31	19	43	25	10	32
	120 - 150	35	22	49	27	11	32
	Moy	26	15	35	20	8	31

Ces résultats sont illustrés par la figure 3-15 qui met en évidence une forte similitude de la distribution verticale et latérale des taux d'humidité dans TB des quatre périodes de mesures, les couches du sol devenant de plus en plus humides en profondeur avec des écarts assez marqué au milieu et à l'aval du transect.

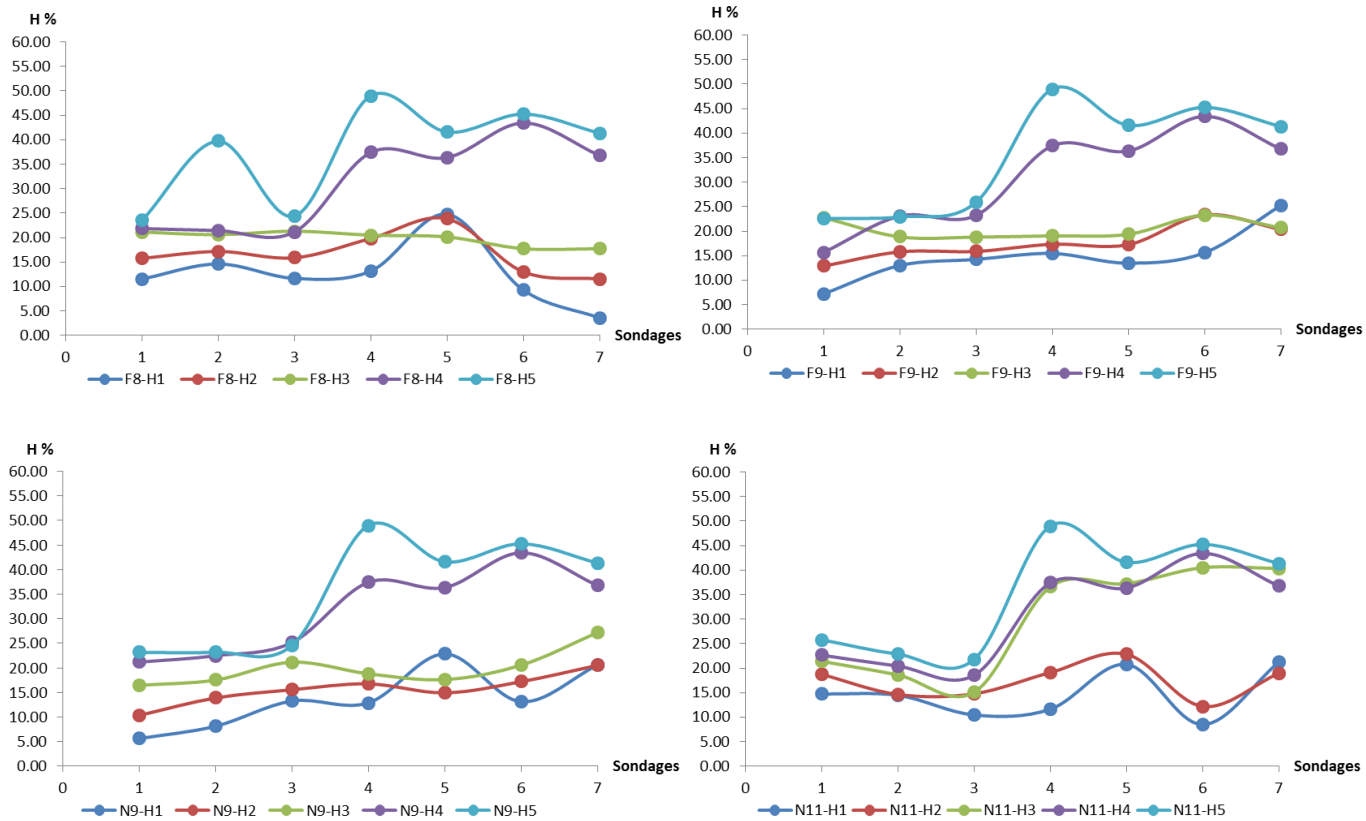


Figure 3-15. Distributions verticales et latérales des de l'humidité pondérale dans TB

Comme pour TA, nous avons calculé pour chaque couche du sol de TB les écarts en valeurs absolues entre les taux d'humidité des quatre campagnes de mesures prises deux à deux pour chaque point d'observation. Nous avons aussi réalisé des profils de la distribution verticale et latérale de H % pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures. Les résultats sont indiqués dans les tableaux 6 à 10 de l'annexe 3 et illustrés par la figure 3-16. D'une façon générale, les écarts d'humidité au sein d'un même point d'observation ou les écarts moyens de la totalité des observations décroissent dans le sens $H1 > H2 > H3 > H4 > H5$. Ce résultat signifie que les couches de surfaces sont nettement plus sensibles aux variations de l'humidité que les couches de profondeur. Ceci est bien illustré par la figure 3-16 qui montre que les couches H4 et H5 des quatre campagnes se superposent et que l'amplitude de variation de H1 est plus grande que celle de H2 et H3. Cependant, la couche H3 de la campagne N11 se démarque des autres campagnes par ses taux d'humidité exceptionnellement plus élevés avec des écarts pouvant atteindre 23 % en certains points. D'ailleurs, la comparaison des moyennes a révélé que toutes les différences ne sont pas statistiquement significatives sauf pour H3 (N9 -N11) (tableau 21 - annexe 3).

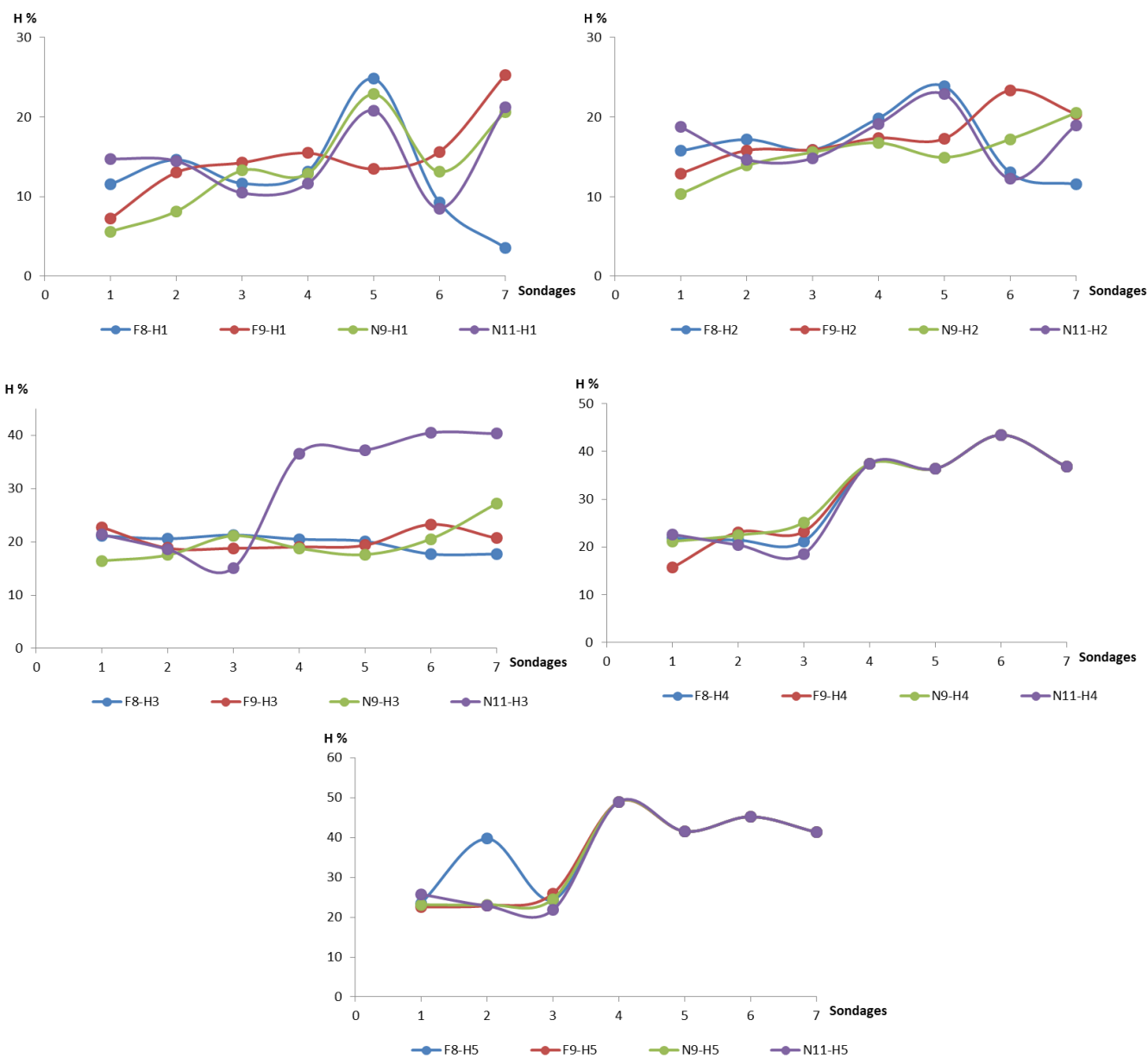


Figure 3-16. Distributions verticale et latérale de H % pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site B)

3.1.5.3. Analyse de la variabilité spatiale et temporelle de H % dans TC

Il y a lieu de remarquer que les H % moyens par couche de sol ou par transect sont nettement plus bas que ceux des transects TA, TB et TD. Les résultats du tableau 3-12 révèlent que tous les profils hydriques moyens de toutes les périodes de mesures sont descendants ce qui signifie que les couches de profondeur sont plus humides que celles de surface. Ce résultat est conforté par les plus forts maxima qui sont toujours enregistrés dans les couches situées entre 90 cm et 150 cm de profondeur ($H \% > 43 \%$). Par ailleurs, les résultats montrent aussi que H % est très variable au sein d'une même couche du sol. Cette variabilité de H % est

nettement plus marquée dans les deux couches profondes (70 % < CV % < 141 %) par rapport aux trois couches de surface (26 % < CV % < 69 %). Ainsi, une même couche du sol peut être très sèche en un endroit et très humide en un autre avec des écarts d'humidité de l'ordre de 40 % dans les couches de profondeur et ce quelle que soit la période des mesures. Ces écarts peuvent être parfois faibles (4 à 5 %) dans la couche de surface (0 – 30 cm) lors des périodes F8, N9 et N11 ce qui traduit une certaine homogénéité de H % dans cette couche du sol.

Tableau 3-12. Paramètres statistiques de H % dans TC

Transects	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	ET	CV %
F8 - TC	0 - 30	4	2	7	4	2	37
	30 - 60	5	2	9	6	2	38
	60 - 90	7	4	14	10	3	37
	90 - 120	11	2	45	43	16	141
	120 - 150	13	4	43	39	16	121
	Moy	8	3	23	20	8	92
F9 - TC	0 - 30	7	2	18	16	5	69
	30 - 60	8	4	15	12	4	52
	60 - 90	11	6	19	13	4	38
	90 - 120	13	3	45	42	15	119
	120 - 150	13	4	43	39	15	113
	Moy	11	4	28	24	9	83
N9 - TC	0 - 30	3	2	7	5	1	44
	30 - 60	11	6	22	16	6	49
	60 - 90	16	6	26	20	5	34
	90 - 120	14	5	45	40	15	103
	120 - 150	14	4	43	39	15	104
	Moy	12	5	29	24	8	71
N11 - TC	0 - 30	5	3	9	5	2	33
	30 - 60	16	9	25	16	5	31
	60 - 90	19	12	26	14	5	26
	90 - 120	18	3	45	42	13	70
	120 - 150	18	8	43	35	13	71
	Moy	15	7	29	22	8	49

Ces résultats sont illustrés par la figure 3-17 qui donne une image réelle de la distribution verticale et latérale de H % de chaque couche du sol de TC pour les quatre périodes de mesures. Ainsi, il s'avère que H % des couches H4 et H5 augmentent d'une façon brutale à l'aval de TC passant d'une humidité de l'ordre de 10 % entre les points 1 à 8 à environ 40 % au niveau des points 9 et 10.

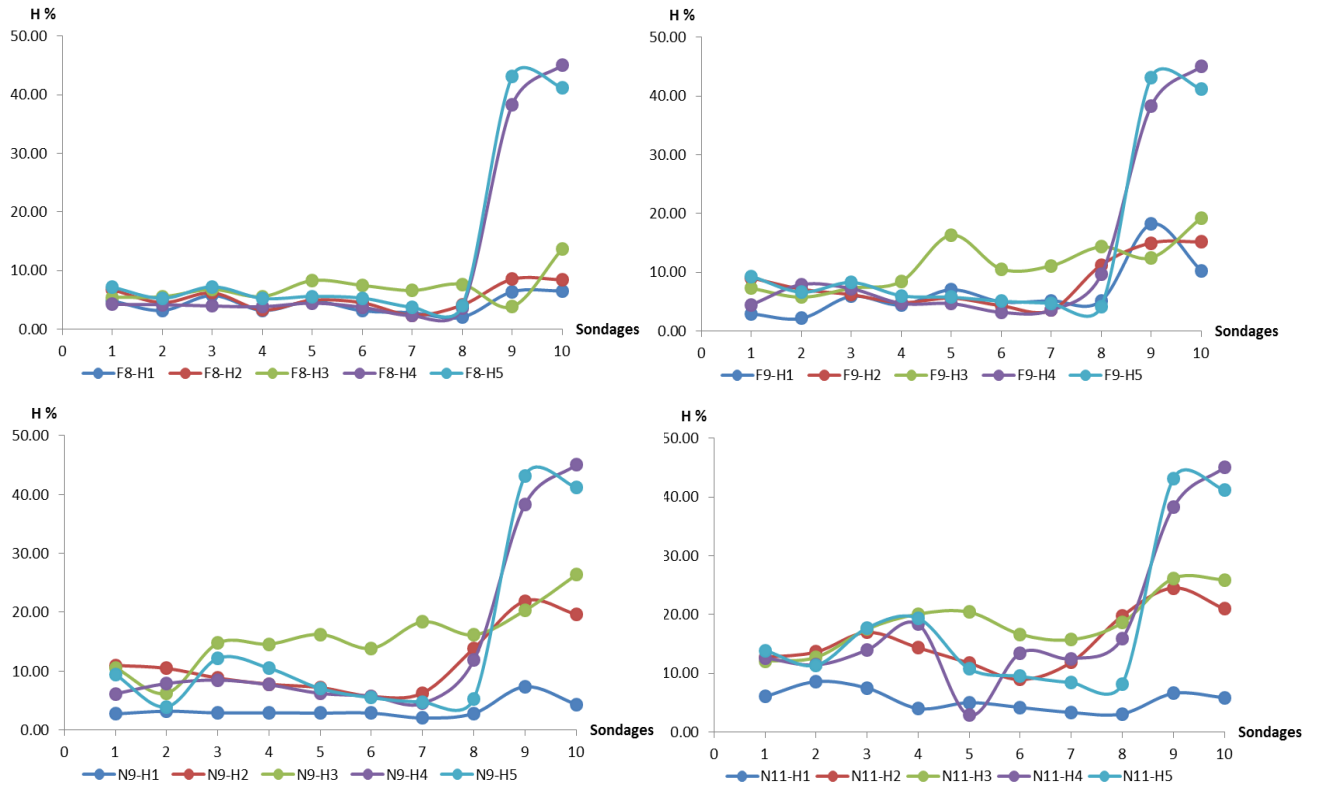


Figure 3-17. Distributions verticales et latérales des de l’humidité pondérale dans TC

Cette figure montre aussi que d’une façon globale, cette tendance est suivie pour les H % des couches H2 et H3 mais avec une acuité moindre. En revanche, H % de la couche H1 sont relativement homogène le long du transect et pour les quatre périodes de mesures. De ce fait, nous pouvons conclure que TC est nettement plus humide dans sa partie aval par rapport à ses parties amont et médiane. En ce qui concerne la variabilité verticale, cette figure montre que les amplitudes de variation de H % entre les couches de TC deviennent de plus en plus grandes dans le sens $N11 > N9 > F9 > F8$ ce qui suppose que l’humidité du profil augmente aussi dans ce sens. En effet, en se basant sur les taux moyens de H % de TC de chaque période (tableau 3-12), il s’avère que l’humidité moyenne du sol croît dans le sens F8 (H % = 8 %), F9 (H % = 11 %), N9 (H % = 12 %) et N11 (H % = 15 %).

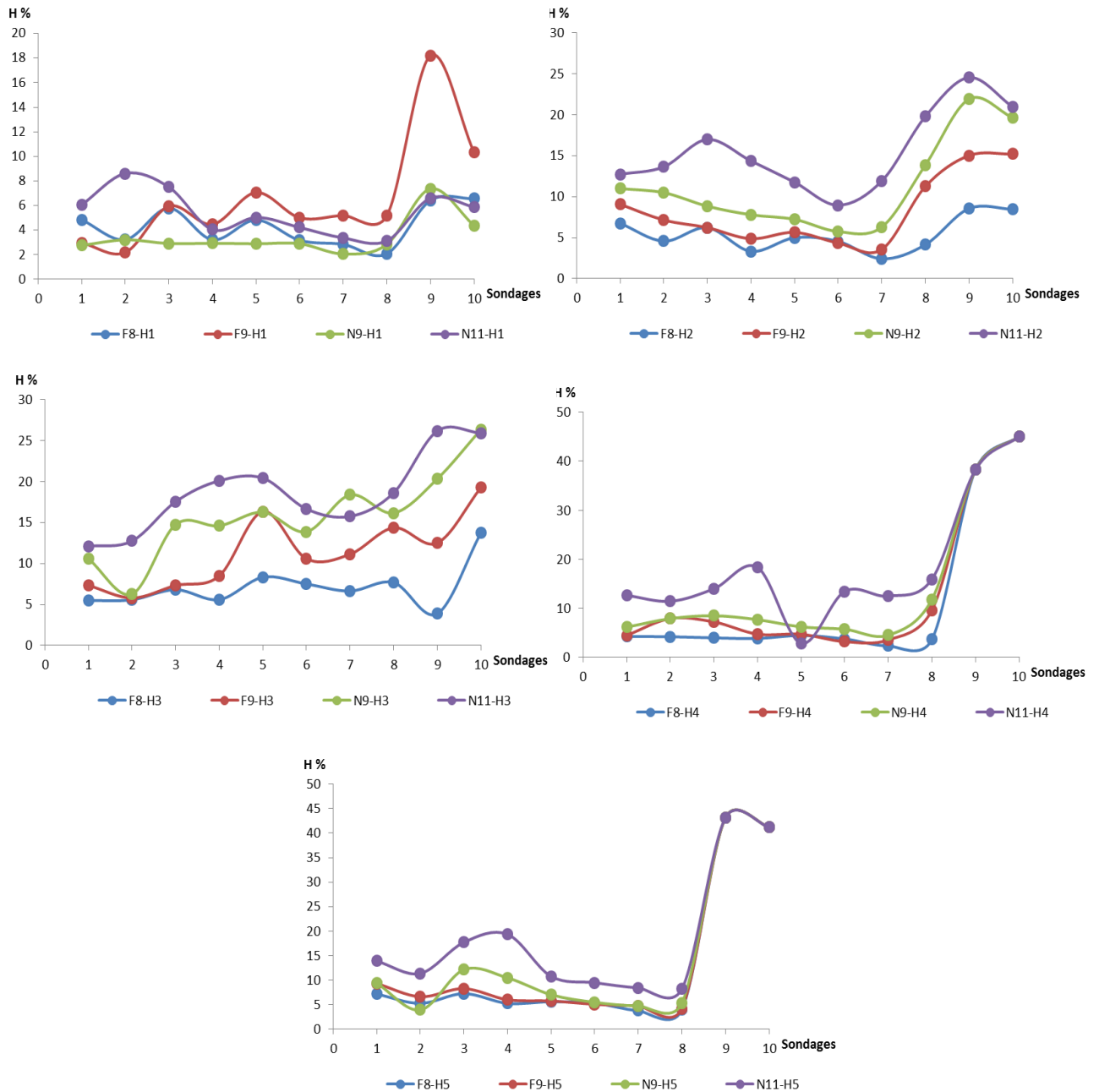


Figure 3-18. Distributions verticale et latérale de H % pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site

Pour mettre en exergue ces résultats, nous avons calculé les écarts en valeurs absolues entre les H % des quatre périodes de mesures pour chaque point de chaque couche de TC (tableaux 11 à 15 - annexe 3), comparé leurs moyennes (tableau 21 – annexe 3) et illustré leurs distributions par la figure 3-18. Les résultats obtenus montrent une grande disparité entre les écarts d'humidité selon le point d'observation, la couche de sol et la paire de périodes considérés. Ces écarts d'humidité varient entre 0 % et 16 % ce qui signifie que les H % sont différemment impactés par la saison selon la couche et le point considéré. Les écarts absolus

moyens de H % entre deux périodes de mesures varient entre 1 % et 3 % pour H1, 3 % et 10 % pour H2, 3 % et 11 % pour H3, 1 % et 7 % pour H4 et 1 % et 6 % pour H5. Bien que ces écarts soient relativement faibles, les différences des moyennes entre deux périodes de mesures sont dans la majorité des cas statistiquement significatives pour les couches H3 et H4 et à un moindre degré pour les couches H2 et H5. L'ensemble de ces résultats est explicité par la figure 3-18 qui révèle trois types de comportements :

- Les écarts des taux d'humidité entre les différentes périodes de mesures au sein de H1 sont peu importants et les courbes de distribution de H % sont très proches les unes des autres et se recoupent par endroits. Ceci signifie que la période de mesure a peu d'impact sur H % de H1.
- Les écarts des taux d'humidité entre les différentes périodes de mesures au sein de H2 et H3 sont relativement importants et les courbes de distribution des H % sont parallèles entre elles avec $H \% N11 > H \% N9 > H \% F9 > H \% F8$.
- Les écarts des taux d'humidité entre les différentes périodes de mesures au sein de H4 et H5 sont assez faibles à l'amont et au milieu de TC avec des courbes de distribution parallèles et toujours dans l'ordre $H \% N11 > H \% N9 > H \% F9 > H \% F8$. Les quatre courbes se superposent dans la partie aval de TC ce qui signifie que les H % sont restés stables dans cette partie du transect.

3.1.5.4. Analyse de la variabilité spatiale et temporelle de H % dans TD

Les résultats (tableau 3-13) montrent que le profil hydrique moyen de TD est toujours descendant et ce quelle que soit la période de mesure considérée. Comme pour les autres transects, les plus fortes valeurs des maxima de H % sont enregistrées dans les couches H4 et H5 ($53 \% < H \% < 56 \%$). Ces résultats suggèrent que TD est plus humide en profondeur qu'en surface. De même, le tableau 3-13 montre que les minima de H %, tous les horizons et périodes confondus, varient entre 1 % et 5 % avec des plages qui se situent entre 27 % et 54 %. Ce résultat signifie que chaque couche du sol peut être très sèche en un endroit et très humide en un autre, ce qui dénote une forte variabilité spatiale de ce paramètre ($42 \% < CV \% < 73 \%$). Il y a lieu de noter que les valeurs des paramètres statistiques moyens des quatre périodes sont assez proches les unes des autres ce qui signifie que le facteur temps n'a eu qu'un effet très limité sur l'humidité du sol.

Tableau 3-13. Paramètres statistiques de H % dans TD

Transects	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	ET	CV %
F8 - TD	0 - 30	13	1	34	32	10	72
	30 - 60	19	2	30	28	11	57
	60 - 90	22	3	41	38	10	47
	90 - 120	32	2	56	54	19	58
	120 - 150	30	2	53	51	17	57
	Moy	23	2	43	41	13	58
F9 - TD	0 - 30	16	2	35	33	11	73
	30 - 60	21	3	38	35	13	61
	60 - 90	30	4	46	41	17	55
	90 - 120	35	5	56	51	16	47
	120 - 150	35	5	53	47	15	42
	Moy	27	4	46	42	14	56
N9 - TD	0 - 30	13	2	29	27	8	66
	30 - 60	20	3	35	33	11	58
	60 - 90	31	3	46	42	16	50
	90 - 120	34	2	56	54	17	51
	120 - 150	32	1	53	51	16	51
	Moy	26	2	44	41	14	55
N11 - TD	0 - 30	16	3	36	33	11	70
	30 - 60	20	4	37	34	11	54
	60 - 90	21	5	42	37	12	54
	90 - 120	32	3	56	53	20	61
	120 - 150	29	2	53	51	17	59
	Moy	24	3	45	42	14	60

Ces résultats sont illustrés par la figure 3-19 qui révèle que, quelle que soit la période considérée, TD se caractérise par une forte variabilité latérale et verticale de ses taux d'humidité. En effet, cette figure montre que toutes les courbes de distribution de H % sont plus ou moins sinusoïdales avec une légère tendance à l'augmentation de l'humidité de l'amont vers l'aval de ce transect. De même, cette figure met en évidence que les écarts de H % entre couches au niveau d'une même observation sont nettement plus grands au milieu et à l'aval de TD par rapport à l'amont. En fin, cette figure révèle qu'à quelques exceptions près, H % augmentent dans le sens $H \% H1 < H \% H2 < H \% H3 < H \% H4 < H \% H5$ pour toutes les périodes de mesures.

Pour mettre en évidence l'effet temps, nous avons calculé les écarts en valeurs absolues entre les H % des quatre périodes de mesures pour chaque point d'observation de chaque couche de TD (tableaux 16 à 20- annexe 3) et comparé leurs moyennes (tableau 21 - annexe 3) et nous avons illustré leurs distributions spatiale par la figure 3-20.

Les résultats obtenus montrent une grande disparité entre les écarts d'humidité selon le point d'observation, la couche de sol et la paire de périodes considérés. Ces écarts d'humidité varient dans une large fourchette de 0 % et 25 % ce qui signifie que les H % sont différemment impactés par la saison selon la couche et le point considéré. Les écarts absolus moyens de H % entre deux périodes de mesures varient entre 3 % et 4 % pour H1, 3 % et 5 % pour H2, 2 % et 11 % pour H3, 1 % et 3 % pour H4 et 2 % et 6 % pour H5. Malgré ces faibles écarts, les différences des moyennes entre deux périodes de mesures sont, dans certains cas, statistiquement significatives surtout pour la couche H3.

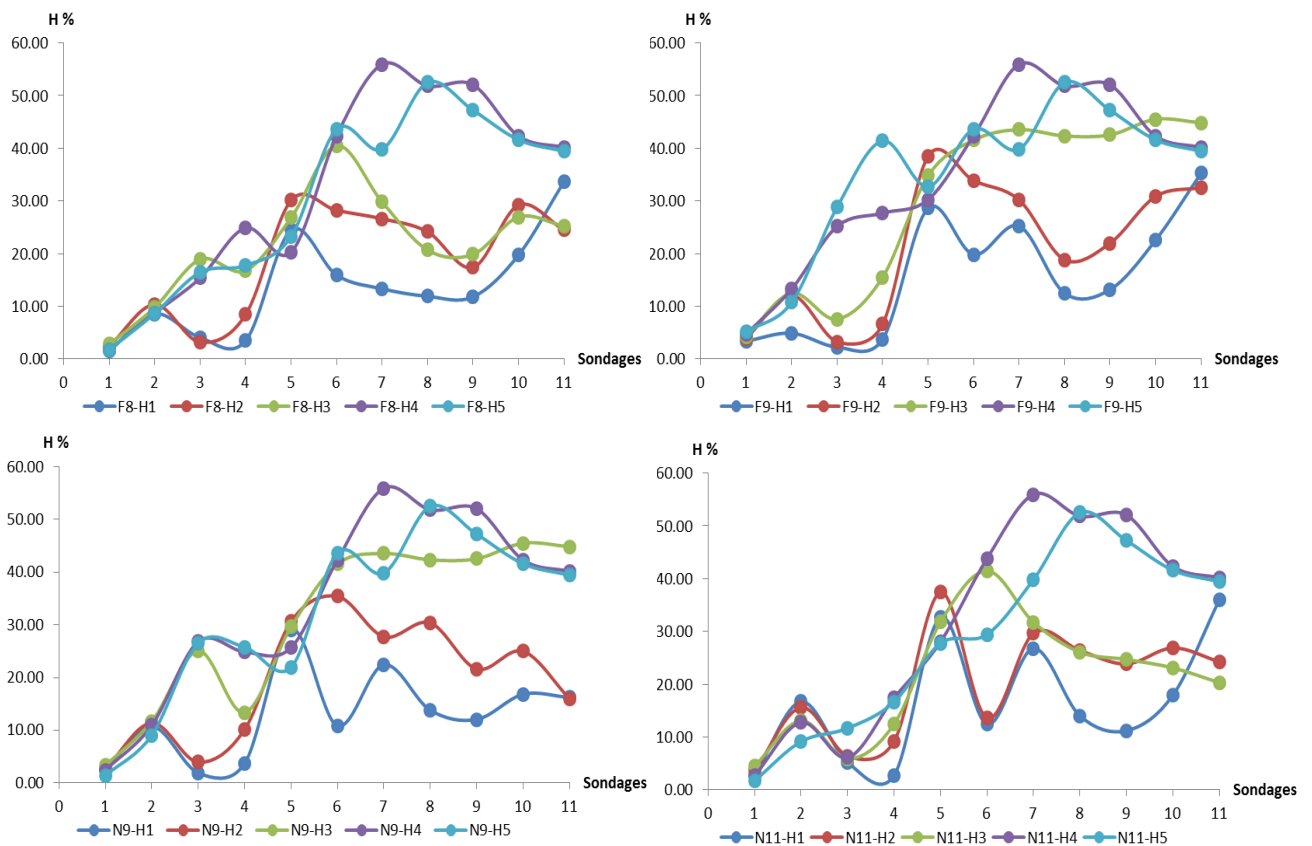


Figure 3-19. Distributions verticales et latérales des de l'humidité pondérale dans TD

L'ensemble de ces résultats est explicité par la figure 3-20 qui révèle trois types de comportements :

- D'une façon globale, les écarts entre les différentes périodes de mesures sont peu importants dans la couche H1.
- Dans la couche H2, les écarts sont faibles dans la première moitié de TD puis deviennent assez forts dans la deuxième partie selon le couple considéré.

- La couche H3 se caractérise dans la deuxième partie de TD par des écarts qui peuvent être très importants.
- Les couches H4 et H5 sont similaires et elles se caractérisent par des écarts moyens à forts dans la première partie du transect et par des écarts nuls (les courbes se confondent) dans la deuxième partie. Ceci veut dire que la période de prélèvement n'a aucun effet sur H % des couches H4 et H5 à l'aval de TD.

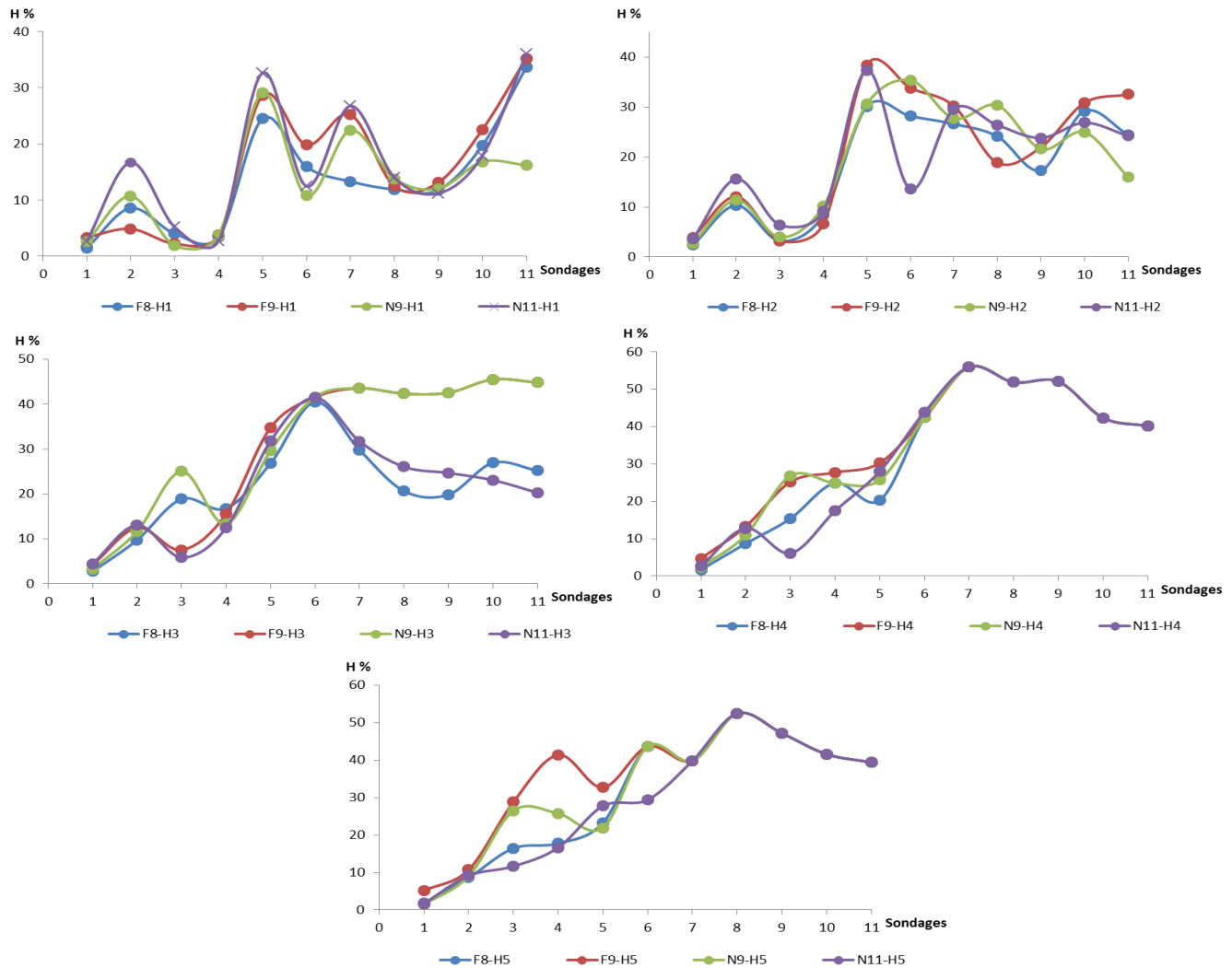


Figure 3-20. Distributions verticale et latérale de H % pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site D)

Conclusion

L'ensemble des résultats montrent que les taux d'humidité sont très hétérogènes quel que soit la campagne de mesure et la profondeur du sol considérées. A travers nos résultats, nous avons remarqué que les valeurs les plus faibles de ce paramètre sont enregistrées au niveau du site C dont la texture est la plus sableuse avec une moyenne d'humidité qui varie entre 3 et

19 %. Par contre, au niveau des autres sites, on enregistre des taux d'humidité relativement élevés avec une valeur moyenne qui oscillent entre 11 et 38%. Les résultats montrent également que quel que soit le site d'étude et quelle que soit la campagne de mesures, les profils hydriques sont de type descendants avec une hydromorphie qui affecte les horizons de profondeurs. Les résultats montrent aussi que les taux d'humidité présentent une variabilité spatiale et temporelle très élevée ce qui rend l'humidité l'un des facteurs les plus influençant sur la EM.

3.2. Caractérisation de la salinité des échantillons prélevés au niveau des transects

Il est bien connu que la salinité du sol est l'un des paramètres les plus variables dans l'espace et dans le temps. Aux grandes échelles, la variabilité de CE est fonction des conditions locales de la pédogenèse (microrelief, texture, qualité et profondeur d'une nappe d'eau...), des pratiques culturales (irrigation, drainage, amendement...) et des conditions climatiques (Remontée capillaire/infiltration en relation avec la pluviosité et l'ETP). Comme l'humidité, la variation de CE et sa dynamique peuvent influencer les mesures de la EM. De ce fait, pour chaque couche du sol de chaque transect, nous avons réalisé quatre campagnes de mesures de CE, deux campagnes à la fin de la saison humide (Février) et deux autres à la fin de la saison sèche (Novembre). Les résultats obtenus sont présentés successivement pour les transects TA, TB, TC et TD. Rappelons que les CE ont été mesurées sur des extraits aqueux 1:5 et converties en CEEq à la CEes (Chapitre III-paragraphe 3.4).

3.2.1. Evolution spatio-temporelle de CE dans TA

Les résultats indiqués dans le tableau 3-14 révèlent que les profils salins moyens sont tous très salés ($CE > 19$ dS/m) et ce quelles que soient les périodes de mesures et les profondeurs considérées. De même, les résultats indiquent aussi que la salinité moyenne de TA est très élevée pour les quatre périodes de mesures ($24,7$ dS/m $< CE < 31,5$ dS/m). Cependant, les résultats de ce tableau révèlent aussi que la couche du sol comprise entre 0 cm et 60 cm est parfois non salée. En effet, les valeurs minimales de CE dans cette tranche du sol sont comprises entre 1,3 dS/m et 3 dS/m selon la période de mesures considérée. Par ailleurs, les écarts de salinité au sein d'une même couche de sol varient entre 38,2 dS/m (TA-F8 couche 5) et 114,2 dS/m (TA-N11 couche 4) ce qui traduit une forte variabilité latérale de ce paramètre au sein d'une même couche du sol ($27 \% < CV < 113 \%$). Toutefois, il y a lieu de remarquer que cette variabilité de CE est beaucoup plus marquée dans les couches de surface par rapport aux couches de profondeur.

Tableau 3-14. Paramètres statistiques de CEEq dans TA

Transects	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	ET	CV %
TA-F8	0 - 30	28,9	2,3	69,1	66,8	22,5	78
	30 - 60	26,2	3,0	49,9	46,8	17,2	66
	60 - 90	27,7	6,3	57,6	51,3	15,5	56
	90 - 120	31,4	5,3	80,3	75,0	18,6	59
	120 - 150	30,5	10,7	48,9	38,2	8,3	27
	Moy	28,9	5,5	61,2	55,6	16,4	57
TA-F9	0 - 30	19,1	1,7	44,4	42,7	15,2	80
	30 - 60	22,3	2,6	51,7	49,1	15,4	69
	60 - 90	26,5	4,8	56,9	52,1	15,4	58
	90 - 120	28,3	6,9	74,2	67,4	18,2	64
	120 - 150	27,3	7,8	50,6	42,8	11,3	41
	Moy	24,7	4,8	55,6	50,8	15,1	62
TA-N9	0 - 30	31,2	1,9	76,4	74,5	30,4	97
	30 - 60	28,7	1,6	78,3	76,7	22,6	79
	60 - 90	30,5	5,9	58,7	52,9	17,8	58
	90 - 120	34,5	10,3	68,6	58,2	16,5	48
	120 - 150	32,6	7,8	47,1	39,3	11,7	36
	Moy	31,5	5,5	65,8	60,3	19,8	64
TA-N11	0 - 30	24,2	1,5	89,4	87,9	27,4	113
	30 - 60	28,3	1,3	74,9	73,6	26,0	92
	60 - 90	27,6	4,9	74,3	69,4	20,8	75
	90 - 120	31,7	1,5	115,7	114,2	29,5	93
	120 - 150	31,9	6,1	74,2	68,1	16,0	50
	Moy	28,7	3,1	85,7	82,6	23,9	85

Les figures 3-21 illustrent bien les résultats précédents et mettent en plus en évidence un gradient de salinité de l'amont vers l'aval de TA et ce pour toutes les couches de sol et toutes les périodes de mesures. Elles montrent également que les observations 1 à 4 des couches 1 et 2 sont les moins salées, voire parfois non salées. A quelques détails près, la salinité au sein des différentes couches du sol suit la même tendance, même si les courbes ne sont pas toujours parallèles et s'entrecoupent par endroits. Cependant, ces figures montrent que la couche 1 est la plus sinusoïdale et elle s'entrecoupe le plus fréquemment avec les autres courbes de salinité ce qui suggère que sa variabilité spatiale est la plus forte, résultat confirmé par le tableau 3-14.

Pour étudier l'effet temps sur la variation de la salinité, nous avons calculé les écarts en valeurs absolues entre les CE des quatre périodes de mesures effectuées sur chaque point d'observation de chaque couche de TA (tableaux 1 à 5 - annexe 4) et nous avons comparé statistiquement leurs moyennes (tableau 21 – annexe 4). Nous avons également illustré leurs distributions spatiales par la figure 3-22. De grandes différences sont observées entre les

écarts de salinité selon le point d'observation, la couche de sol et la paire de périodes considérés. Ces écarts de salinité varient entre 0 dS/m et 42,1 dS/m. Ce résultat suggère que CE est différemment impactée par la saison selon la couche et le point de mesure considérés. Les écarts absolus moyens de CE entre deux périodes de mesures varient entre 9,3 dS/m et 17,1 dS/m pour H1, 5,6 dS/m et 14 dS/m pour H2, 3,9 dS/m et 8,3 dS/m pour H3, 5,1 dS/m et 11,8 dS/m pour H4 et 4,9 dS/m et 10,3 dS/m pour H5. Même si sur le plan purement pédologique ces écarts de salinité sont importants, les différences des moyennes entre deux périodes de mesures sont dans la majorité des cas statistiquement non significatives sauf dans quatre cas uniquement H1(F8-F9), H1 (F9-N9), H3 (F9-N9) et H4 (F9-N9).

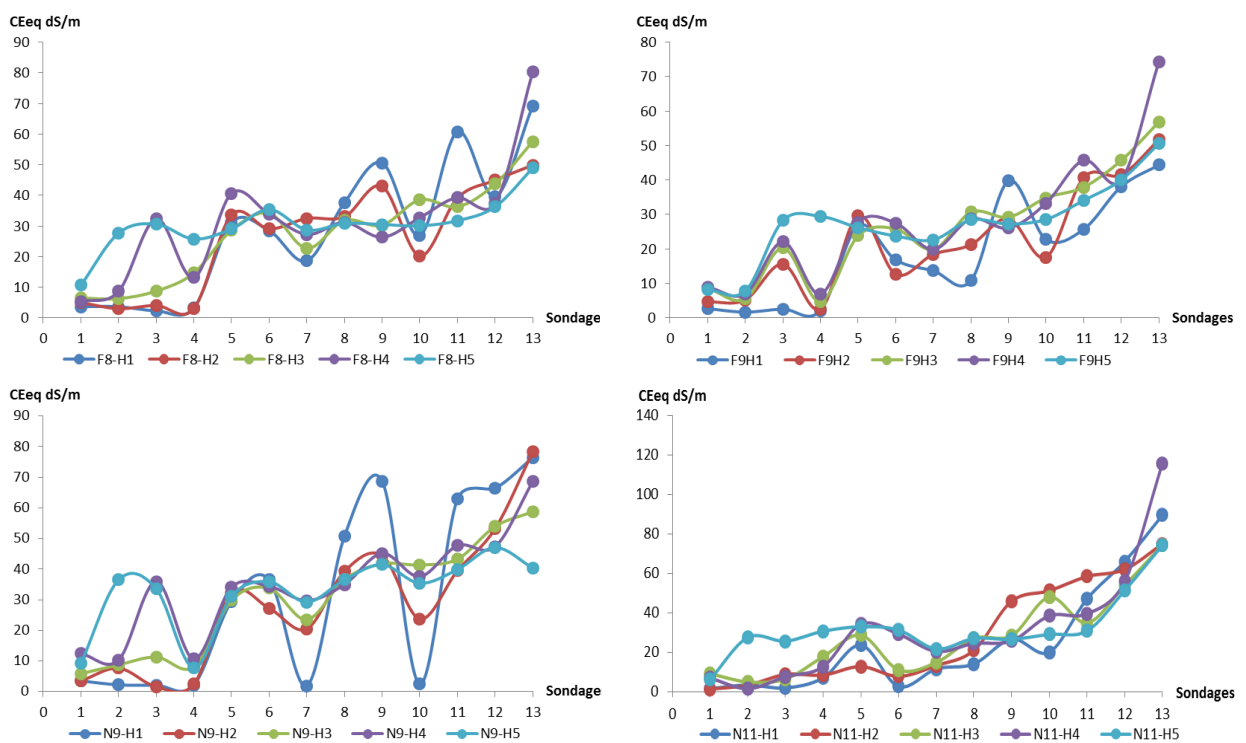


Figure 3-21. Distributions verticales et latérales de CEEq dans TA

En plus de ces résultats, la figure 3-22 fait ressortir ce qui suit :

- Quelle que soit la période des mesures, toutes les couches enregistrent la même tendance à l'augmentation de leur salinité de l'amont vers l'aval.
- La salinité à l'amont de TA, en particulier celle des deux premières observations, paraît insensible au facteur temps.
- Les écarts de salinité sont enregistrés dans l'ordre $H1 > H2 > H3 > H4 > H5$. Les courbes de salinité latérale sont très lâches en H1 puis elles se resserrent (se rapprochent l'une de l'autre) progressivement au fur et à mesure que la profondeur

augmente. Ce résultat signifie que la salinité des couches de profondeurs est moins sensible à l'effet saison que celle de surface.

- Dans la majorité des cas, les prélèvements TA-N9 sont plus salés que ceux des autres prélèvements.

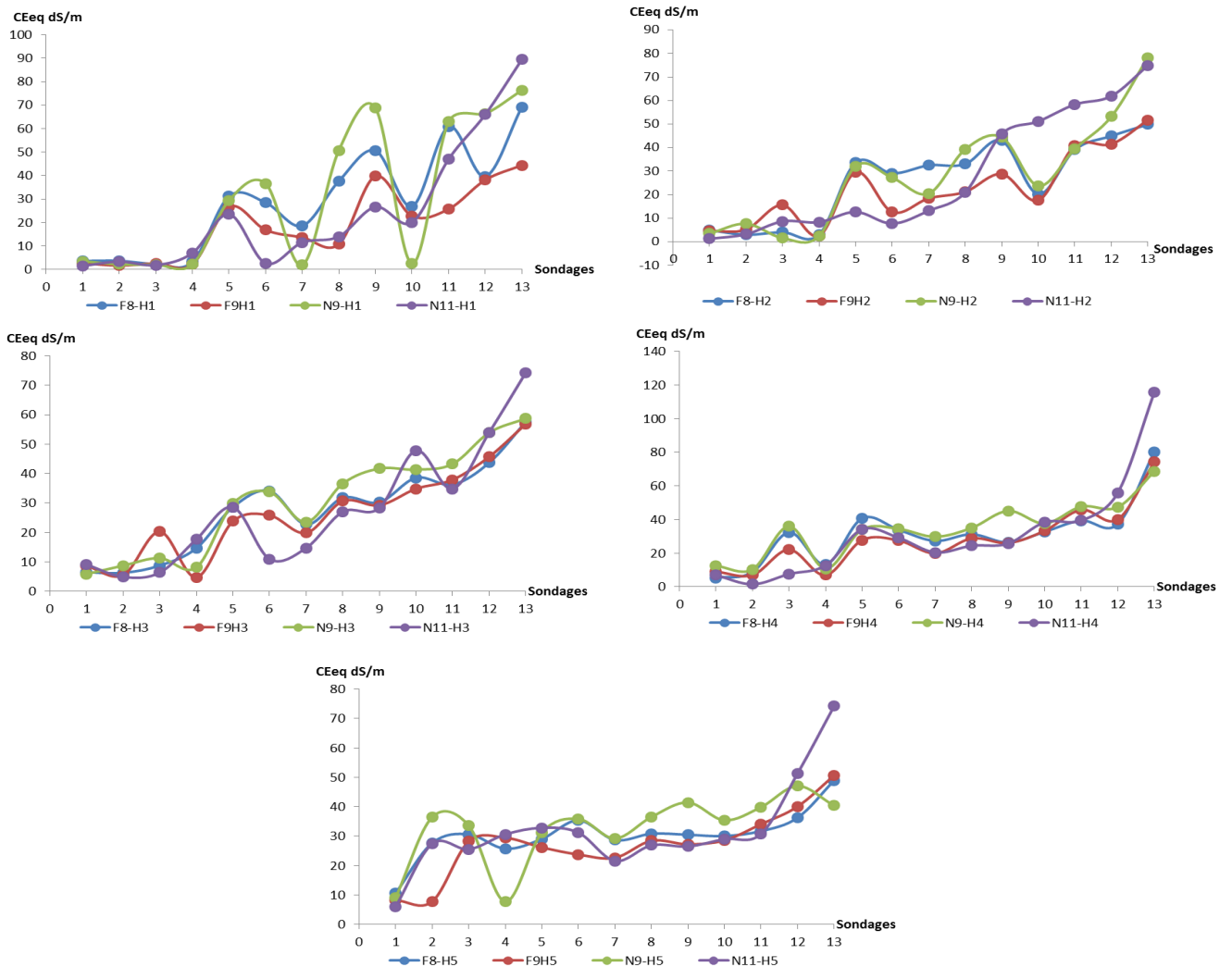


Figure 3-22. Distributions verticale et latérale de CEEq pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site A)

3.2.2. Evolution spatio-temporelle de CE dans TB

Les résultats (tableau 3-15) indiquent que le profil salin moyen de TB est très salé avec une CE comprise entre 22,9 dS/m et 45,7 dS/m pour les quatre périodes de mesures. La salinité moyenne de TB, toutes couches confondues, varie entre 26,3 dS/m (TB-N11) et 43,2 dS/m (TB-F8). Ces résultats suggèrent que TB est fortement salé et ce quelle que soit la période de mesure. Cependant, comparativement aux autres couches, la couche comprise entre 0 cm et 30 cm est relativement moins salée avec des CE minimales de l'ordre de 5,5 dS/m (TB-F9).

Néanmoins, les CE maximales sont parfois très fortes, elles sont comprises entre 36,5 dS/m (TB-N11 H5) et 75,4 dS/m (TB-N9 H3). Les différences de CE entre les valeurs maximales et les valeurs minimales (plage ou étendue) varient entre 12,1 dS/m (TB-F9 H4) et 59,2 dS/m (TB-F9 H1). Ceci signifie que la salinité est assez variable au sein d'une même couche et ce quelle que soit la période de mesure. Ce résultat est traduit par le CV qui varie de 12 % (TB-F9 H4) à 82 % (TB-F9 H1).

Tableau 3-15. Paramètres statistiques de CEEq dans TB

Transects	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	ET	CV %
TB-F8	0 - 30	37,0	21,0	49,2	28,2	11,9	32
	30- 60	46,8	40,2	57,6	17,4	6,4	14
	60 - 90	44,1	31,4	56,3	24,9	8,9	20
	90 - 120	45,7	26,4	60,0	33,6	10,0	22
	120 - 150	42,5	18,2	68,9	50,7	15,6	37
	Moy	43,2	27,4	58,4	31,0	10,6	25
TB-F9	0 - 30	24,0	5,5	64,7	59,2	19,6	82
	30- 60	30,7	16,2	57,2	41,0	12,6	41
	60 - 90	31,3	18,5	40,4	21,9	8,1	26
	90 - 120	34,4	26,4	38,5	12,1	4,2	12
	120 - 150	35,0	23,1	52,3	29,2	9,8	28
	Moy	31,1	18,0	50,6	32,7	10,9	38
TB-N9	0 - 30	34,1	9,8	60,1	50,3	16,9	50
	30- 60	37,9	24,0	51,0	27,0	9,6	25
	60 - 90	40,4	21,7	75,4	53,7	17,1	42
	90 - 120	38,8	31,8	49,6	17,9	6,6	17
	120 - 150	38,5	24,6	48,1	23,5	7,3	19
	Moy	37,9	22,4	56,9	34,5	11,5	31
TB-N11	0 - 30	22,9	6,8	57,5	50,7	16,6	73
	30- 60	24,7	6,0	46,3	40,3	14,3	58
	60 - 90	25,3	5,6	39,0	33,4	12,2	48
	90 - 120	29,1	17,9	39,4	21,6	8,5	29
	120 - 150	29,6	23,6	36,5	12,9	4,5	15
	Moy	26,3	12,0	43,7	31,8	11,2	45

Cette variabilité de CE est traduite par la figure 3-23 qui montre que les profils salins latéraux sont d'une façon globale sinusoïdaux et qui s'entrecoupent en plusieurs endroits de TB au sein de n'importe quelle période de mesures. Ce phénomène confirme la variabilité latérale de CE et indique aussi que l'augmentation ou la diminution de CE d'une couche ne s'accompagne pas toujours par l'augmentation ou la diminution de CE d'une autre couche au même point d'observation. Cependant, il y a lieu de remarquer que, par endroit de TB, les profils salins en long sont approximativement parallèles entre eux. Cette figure montre aussi que la salinité de TB varie au sein d'un intervalle de salinité mais sans aucune tendance à

l'augmentation ou à la diminution de l'amont vers l'aval. En fin, la figure 3-23 révèle que l'ordre de grandeur de CE des 5 couches du sol au sein d'une même observation varie d'une période de mesure à une autre. Ce résultat traduit un certain effet temps sur la salinité de TB.

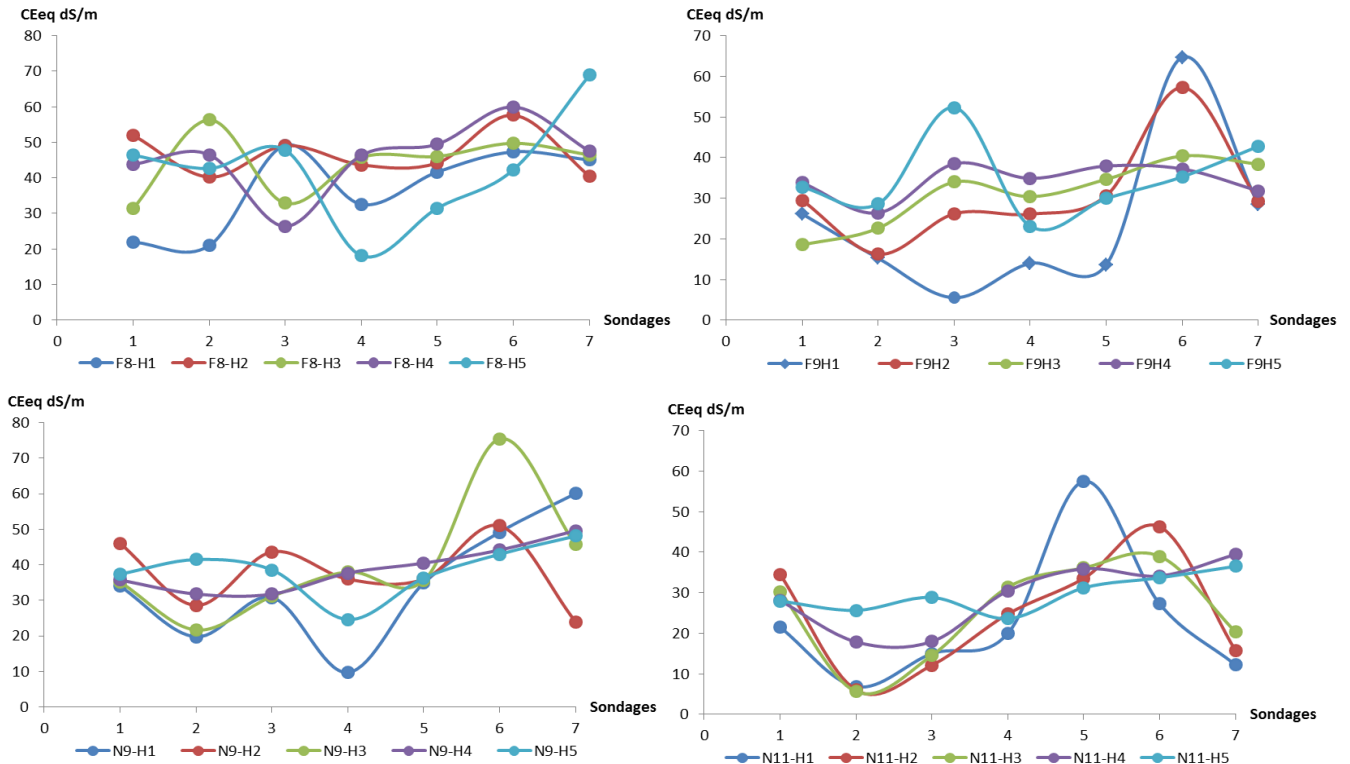


Figure 3-23. Distributions verticales et latérales des CEEq dans TB

Pour mettre en évidence cette variabilité de CE, nous avons calculé pour chaque point d'observation de chaque couche de TB les écarts en valeurs absolues entre les CE des quatre périodes de mesures (tableaux 6 à 10 - annexe 4). Nous avons aussi comparé statistiquement leurs moyennes (tableaux 21 – annexe 4) et nous avons illustré leurs distributions spatiales par la figure 3-24. Les résultats indiquent que les écarts sont très variables et qu'ils dépendent du point d'observation, de la couche de sol et de la paire de mesures comparée. Ainsi, ces écarts varient de 0,3 dS/m (observation 5, H5, (F8-N11)) à 43,8 dS/m (observation 5, H1 (F9-N11)). Les écarts moyens entre les paires (deux périodes de mesures) sont globalement décroissants du haut vers le bas du profil et ce quelle que soit la paire considérée. Ce résultat est bien illustré par la figure 3-24 qui montre que les profils salins latéraux sont très lâches en H1, puis se resserrent progressivement vers H2, H3, H4 et H5. Ce résultat signifie que la salinité des couches de surface est beaucoup plus impactée par le facteur temps que les couches de profondeur. Cependant, les statistiques ne mettent pas en relief ce résultat et indiquent que la différence des moyennes est statistiquement non significative pour toutes les paires de H1 à

l'inverse des autres couches. Ce résultat peut être aisément expliqué par le fait que les profils salins longitudinaux de H1 sont sinusoidaux et s'entrecroisent fréquemment entre eux, une perte de salinité en un point étant compensée par un gain en un autre point. En revanche, les profils salins des autres couches sont approximativement parallèles entre eux et donc les pertes de salinité ne seront pas, ou seront très peu, compensées par des gains. Au total, les moyennes de CE dans H1 seront peu différentes les unes des autres, ce qui n'est pas le cas dans les autres couches du sol. En réalité, le fait que les courbes de salinité ne se superposent pas, il y a un effet temps, plus l'écart entre une courbe et une autre est grand, et plus l'impact temps est important.

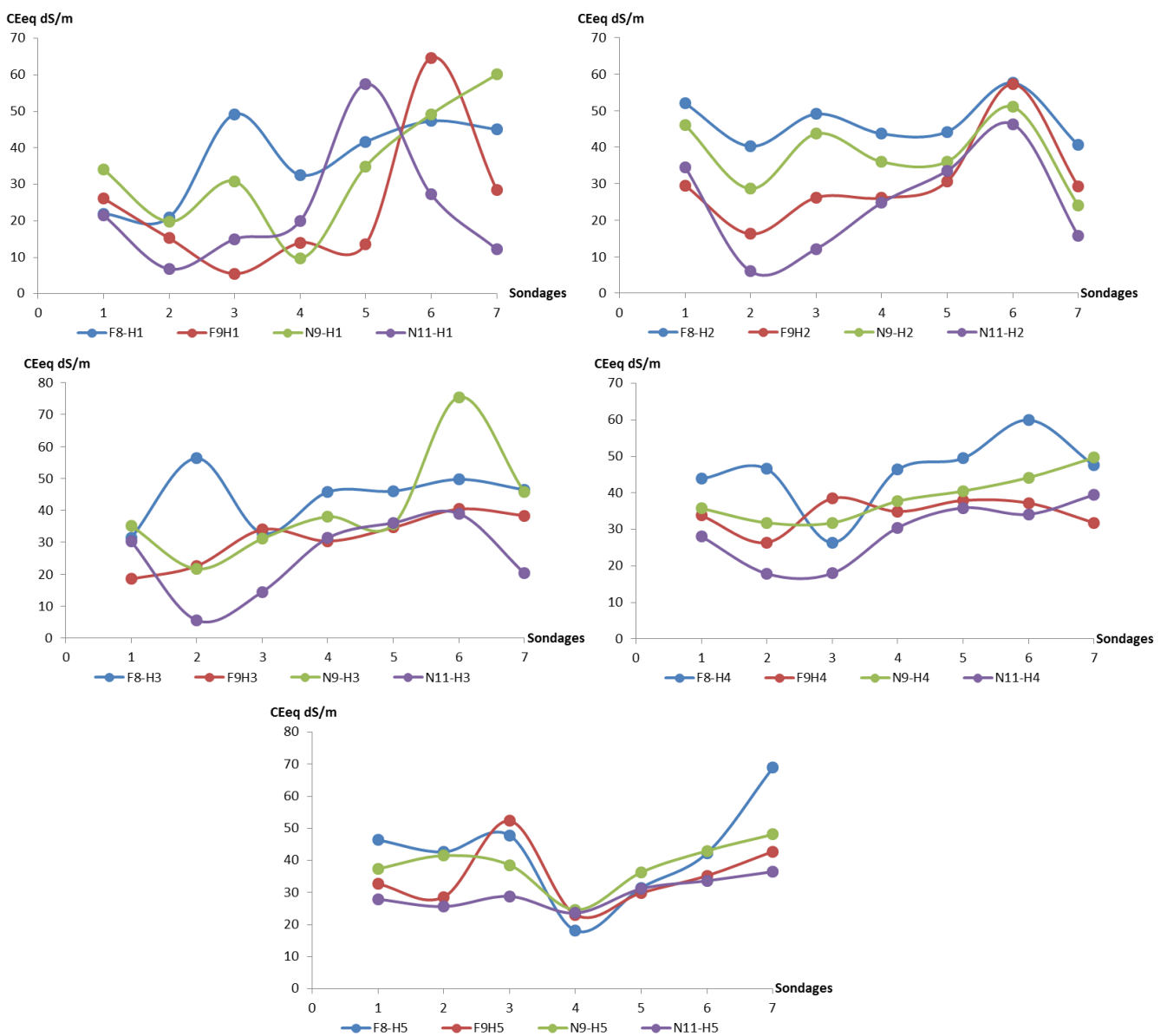


Figure 3-24. Distributions verticale et latérale de CEEq pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site B)

3.2.3. Evolution spatio-temporelle de CE dans TC

Comparativement aux autres transects, les résultats (tableau 3-16) révèlent que TC est relativement peu salé. En effet, CE du profil moyen de F8, F9 et F11 est inférieure à 9,8 dS/m dans la couche 0 – 120 cm. La salinité de la couche 120 – 150 cm y est légèrement plus forte ($9,8 \text{ dS/m} < \text{CE} < 14,5 \text{ dS/m}$) ce qui suggère un profil salin de type globalement descendant. Cependant, le profil moyen de TC est nettement plus salin en N9 quelle que soit la couche considérée ($14,9 \text{ dS/m} < \text{CE} < 23,2 \text{ dS/m}$). La salinité moyenne de TC est de 18,4 dS/m en N9. Cependant, le tableau 3-16 montre aussi que CE fluctue fortement au sein d'une même couche avec des valeurs minimales comprises entre 1,3 dS/m (TC-N11 H2) et 3,8 dS/m (TC-N9 H2) et des valeurs maximales comprises entre 9,4 dS/m (TC-N11 H2) et 63,1 dS/m (TC-N9 H3). Les valeurs de la plage, quant à elles, fluctuent entre 8,1 dS/m et 60 dS/m selon la couche de sol et la période de mesures. Ces résultats suggèrent que chacune des 5 couches du sol est par endroit non salée et dans d'autres endroits fortement salée. Cette forte variabilité longitudinale de CE est bien exprimée par les CV qui sont compris entre 46 % et 146 %.

Tableau 3-16. Paramètres statistiques de CEeq dans TC

Transects	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	ET	CV %
TC-F8	0 - 30	8,56	2,06	20,35	18,28	6,73	79
	30- 60	6,60	1,57	21,78	20,21	6,28	95
	60 - 90	8,29	1,55	32,90	31,35	11,73	142
	90 - 120	8,07	1,68	30,70	29,02	11,79	146
	120 - 150	14,59	2,11	29,97	27,86	13,01	89
	Moy	9,22	1,80	27,14	25,34	9,91	110
TC-F9	0 - 30	9,85	2,37	27,20	24,83	8,51	86
	30- 60	6,34	2,68	13,77	11,09	3,85	61
	60 - 90	7,14	3,05	19,21	16,16	5,63	79
	90 - 120	8,72	3,48	33,05	29,57	9,64	111
	120 - 150	13,66	2,74	40,21	37,48	15,65	115
	Moy	9,14	2,86	26,69	23,83	8,66	90
TC-N9	0 - 30	14,98	3,27	35,80	32,54	11,70	78
	30- 60	19,06	3,89	37,83	33,94	10,60	56
	60 - 90	23,25	2,48	63,19	60,71	17,97	77
	90 - 120	18,34	1,83	34,92	33,10	11,66	64
	120 - 150	16,84	2,40	29,97	27,57	12,32	73
	Moy	18,49	2,77	40,34	37,57	12,85	70
TC-N11	0 - 30	5,32	1,45	18,41	16,97	5,06	95
	30- 60	5,29	1,36	9,49	8,13	2,44	46
	60 - 90	4,96	1,91	12,00	10,10	2,77	56
	90 - 120	7,97	1,90	29,46	27,57	7,75	97
	120 - 150	9,85	2,05	32,74	30,69	9,88	100
	Moy	6,68	1,73	20,42	18,69	5,58	79

Ces résultats sont illustrés par la figure 3-25 qui montre en plus que CE à l'aval de TC est nettement plus forte qu'à son amont. Elle montre aussi que CE située entre les observations 1 et 8 est globalement faible en F8, F9 et N11 même si par endroits, H1 et H5 enregistrent parfois des pics assez forts. De même, cette figure illustre la forte salinité des différentes couches en N9 (CE > 14 dS/m) ce qui les distingue singulièrement des périodes F8, F9 et N11.

Les écarts absolus de CE entre les différentes périodes de mesures de chaque observation au sein de chaque couche de sol (tableaux 11 à 15 - annexe 4) sont extrêmement variables ce qui suggèrent une forte influence du facteur temps. Ces écarts varient entre 0 dS/m (F9-N11 obs4) et 23,7 dS/m (F9-N11 obs 5) en H1 avec des écarts moyens compris 3,8 dS/m (F8-N11) et 9,8 dS/m (N9-N11). Ces écarts varient entre 0,4 dS/m (F8-F9 obs 1) et 36,3 dS/m (F8-N9 obs 7) en H2, entre 0,2 dS/m (F8-N11 obs 1) et 58,5 dS/m (N9-N11 obs 9) en H3, entre 0,1dS/m (N9-N11 obs1) et 25,3 dS/m (F8-N9 obs5) en H4 et entre 0,1 dS/m (F8-N9 obs 4) et 29,3 dS/m (F9-N11 obs 8) en H5. Ces écarts de salinité qui sont parfois faibles et parfois très élevés signifient que les différentes observations sont affectées différemment par le facteur temps et que l'influence de ce dernier est différente selon la période considérée. Ce dernier point est mis en évidence par les écarts moyens qui varient entre 3,8 dS/m et 9,8 dS/m en H1, entre 2,5 dS/m et 14,1 dS/m en H2, entre 3,2 dS/m et 18,3 dS/m en H3, entre 2,5 dS/m et 13,1 dS/m en H4 et entre 5,6 dS/m et 8,5 dS/m en H5. Le facteur temps agit donc non seulement sur l'observation ponctuelle et sa période de mesure, mais aussi sur la position de la couche du sol dans le profil.

Pour quantifier ces résultats, nous avons comparé les moyennes (par paires) et nous avons évalué statistiquement leurs différences entre deux périodes de mesures (tableau 21 - annexe 4). Les résultats obtenus se résument comme suit :

- Toutes les différences de moyennes sont statistiquement non significatives en H5. Ce résultat signifie que la variation de CE dans la couche profonde du sol est peu sensible à l'effet temps.
- Les différences des moyennes de CE sont statistiquement non significatives entre F8 et F9 et entre F9 et N11 dans toutes les couches du sol.
- Les différences des moyennes de CE sont statistiquement significatives entre F8 et N9 et entre N9 et N11 pour les couches H1 à H4.

- Les différences des moyennes de CE sont statistiquement significatives entre F8 et N11 pour H1 et entre F9 et N9 pour H2, H3 et H4.

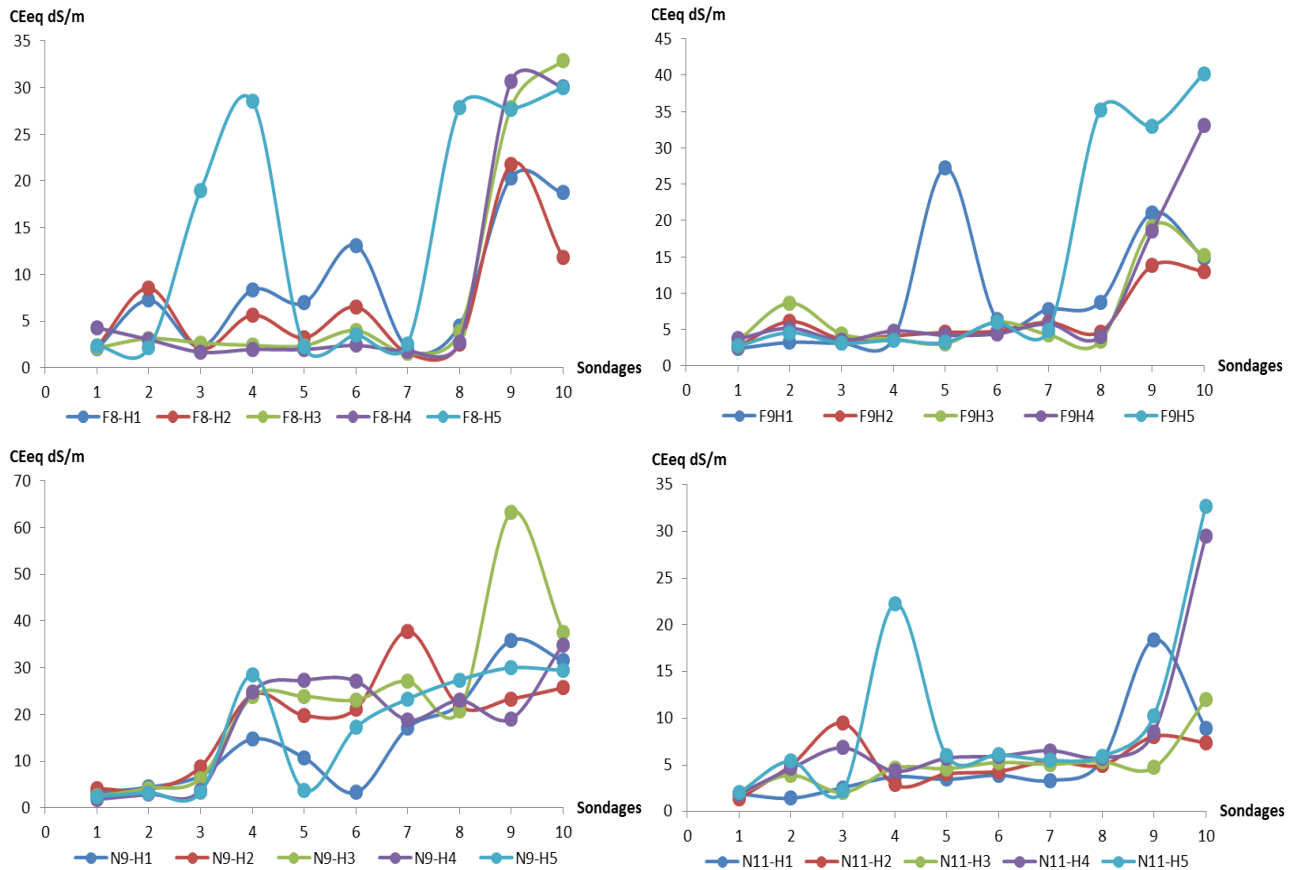


Figure 3-25. Distributions verticales et latérales des CEEq dans TC

Tous ces résultats sont illustrés par la figure 3-26 qui montre clairement que les différentes courbes ne superposent pas et qu'elles ne sont jamais parallèles entre elles. Ceci signifie qu'il existe un effet saison, mais que cet effet peut être plus ou moins intense au niveau de certaines observations par rapport à d'autres. Toutefois, cette figure montre clairement que CE est nettement fort en N9 par rapport aux autres périodes de mesure sauf en H5.

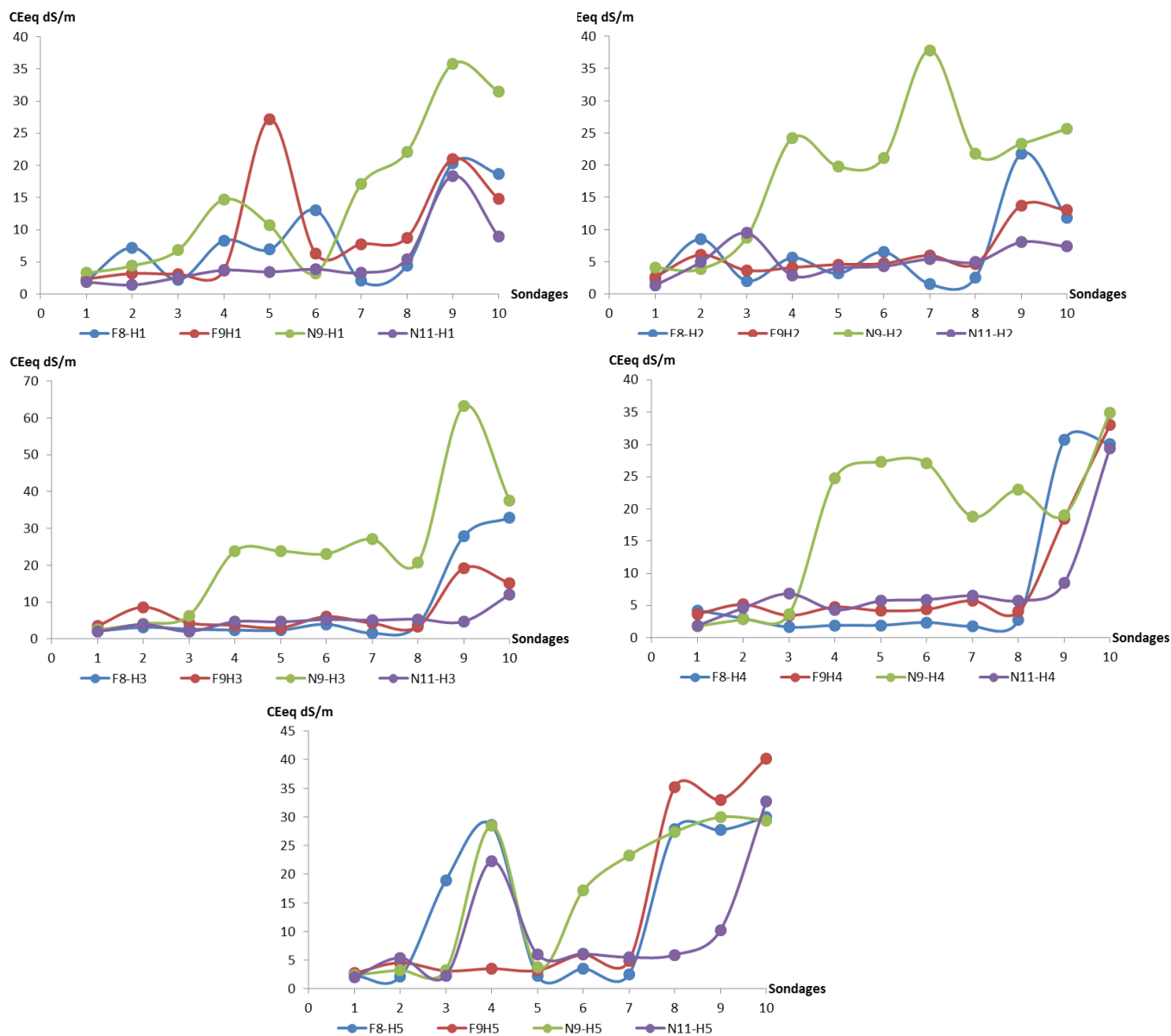


Figure 3-26. Distributions verticale et latérale de CEEq pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site C)

3.2.4. Evolution spatio-temporelle de CE dans TD

Il y a lieu de remarquer que la salinité moyenne de TD est extrêmement forte ($CE > 36,6$ dS/m) et ce quelles que soient la couche du sol et la période de mesures considérées (tableau 3-17). Le profil salin moyen est de type ascendant en F8, N9 et N11 et il est de forme irrégulière en F9. La salinité moyenne de ces profils salins moyens est comprise entre 40,3 dS/m et 49,4 dS/m ce qui dénote le caractère fortement salin de TD. Toutefois, les résultats du tableau 3-17 montrent que chacune des couches peut être par endroits non salée ($CE < 4$ dS/m) ou excessivement salée en d'autres ($CE > 58$ dS/m). Ce résultat est bien traduit par les

valeurs des étendues qui varient entre 40 dS/m et 115 dS/m en fonction de la couche du sol et de la période de mesures. Ceci dénote une forte variabilité latérale de CE qui est confirmée par des CV forts compris entre 32 % et 73 %.

Tableau 3-17 : Paramètres statistiques de CEEq dans TD

Transects	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	ET	CV %
TD-F8	0 - 30	53,10	1,42	116,57	115,16	38,85	73
	30 - 60	55,76	4,69	99,73	95,04	30,89	55
	60 - 90	54,83	11,38	86,09	74,71	23,49	43
	90 - 120	40,54	18,44	58,51	40,07	12,86	32
	120 - 150	43,11	17,20	63,74	46,54	16,61	39
	Moy	49,47	10,63	84,93	74,30	24,54	48
TD-F9	0 - 30	46,35	3,04	115,52	112,48	41,50	90
	30 - 60	52,31	2,44	112,02	109,58	35,41	68
	60 - 90	49,81	2,86	91,08	88,22	27,94	56
	90 - 120	52,27	25,36	112,10	86,74	22,53	43
	120 - 150	45,25	27,09	72,48	45,39	14,60	32
	Moy	49,19	12,16	100,64	88,48	28,40	58
TD-N9	0 - 30	52,64	1,25	116,79	115,54	41,21	78
	30 - 60	47,93	2,10	100,98	98,88	31,61	66
	60 - 90	39,30	1,76	79,33	77,57	24,20	62
	90 - 120	37,10	0,89	66,20	65,32	21,48	58
	120 - 150	38,18	2,07	62,84	60,78	20,02	52
	Moy	43,03	1,61	85,23	83,62	27,71	63
TD-N11	0 - 30	44,82	1,52	81,58	80,06	28,89	64
	30 - 60	46,78	2,37	81,44	79,07	29,52	63
	60 - 90	38,79	1,89	72,37	70,48	26,13	67
	90 - 120	36,64	2,37	77,11	74,74	22,24	61
	120 - 150	34,69	2,62	61,09	58,48	18,56	54
	Moy	40,34	2,15	74,72	72,56	25,07	62

La figure 3-27 montre que les profils salins longitudinaux sont sinusoïdaux et qu'ils s'entrecoupent fréquemment le long de TD. Ce résultats confirme donc la forte variabilité latérale de CE mais indique aussi que le profil salin vertical se transforme considérablement le long de TD, passant d'un profil salin descendant vers un profil pseudo-ascendant avec toutes les variantes entre les deux. La figure 3-27 montre aussi une nette tendance à l'augmentation de CE de l'amont vers l'aval de TD et ce quelle que soit la période de mesures mais avec quelques différences de comportement de la salinité. Cette différence de comportement traduit l'impact de l'effet 'période de mesure' sur l'augmentation ou la diminution de la salinité.

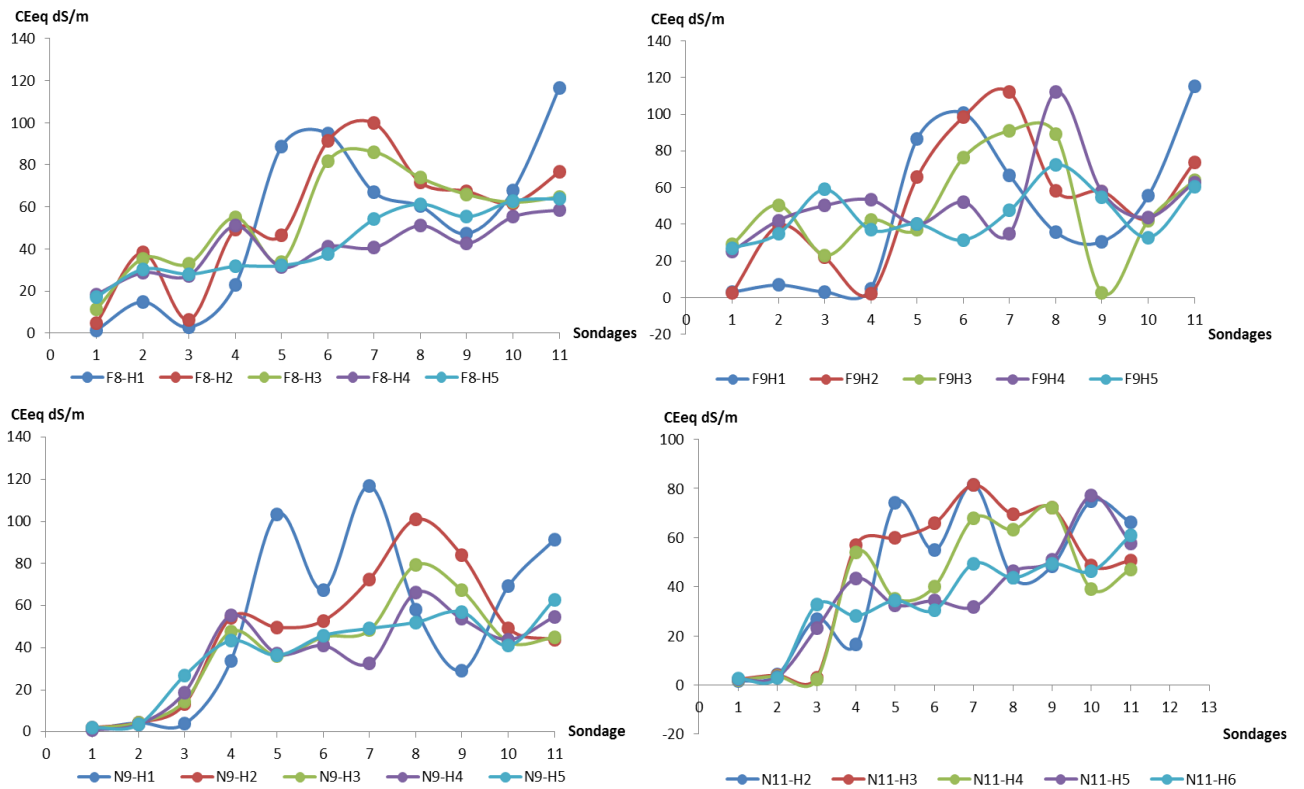


Figure 3-27. Distributions verticales et latérales des CEEq dans TD

Pour évaluer cette variabilité temporelle de CE, nous avons calculé pour chaque point d'observation de chaque couche de TD les écarts en valeurs absolues entre les CE des quatre périodes de mesures (tableaux - 16 à 20 annexe 4). Nous avons aussi comparé statistiquement leurs moyennes (tableaux - 21 annexe 4) et nous avons illustré leurs distributions spatiales par la figure 3-28. Les résultats révèlent que les écarts absolus de CE sont extrêmement variables entre les 11 observations de TD et ce quels que soient la couche du sol et le couple de périodes considérés. Ce résultat signifie que la période de mesure n'affecte pas les différents points d'observation de la même manière, l'effet du facteur local de la pédogenèse (micro-relief local, changement textural local ...) pouvant être prépondérant dans ces conditions. Par exemple, si nous considérons la couche H1, les écarts de CE entre les mesures effectuées entre F8 et N9 sont de l'ordre de 0,2 dS/m pour l'observation 1 et de l'ordre de 50 dS/m pour l'observation 7 (tableau 16 à 20- annexe 4). De même, les résultats montrent que les écarts au sein d'une même observation peuvent être très différents selon le couple de période de mesure considéré. A titre d'exemple et en considérant toujours la couche H1 et l'observation 7, les écarts varient entre 0 dS/m pour le couple F8-F9 et 50 dS/m pour les couples F8-N9 et F9-N9 ce qui traduit l'impact réel de la période de mesure. En considérant toutes les couches ensembles, les écarts absolus moyens de CE varient de 5,7 dS/m (N9-N11 H5) à 27,5 dS/m (F9-N9 H2). Cependant, malgré ces écarts absolus qui sont parfois très forts, les statistiques

(tableau 21 - annexe 4) montrent que les différences des moyennes de CE entre deux périodes de mesures sont dans la majorité des cas non significatives. En effet, seules les différences de moyennes entre F8 et F9 (H1), entre F8 et N9 (H3 et H5), entre F8 et N11 (H3 et H5), entre F9 et N9 (H4) et entre F9-N11(H4) sont statistiquement différentes ($p < 0,05$) ce qui suggère un impact significatif de la période des mesures sur la modification de CE.

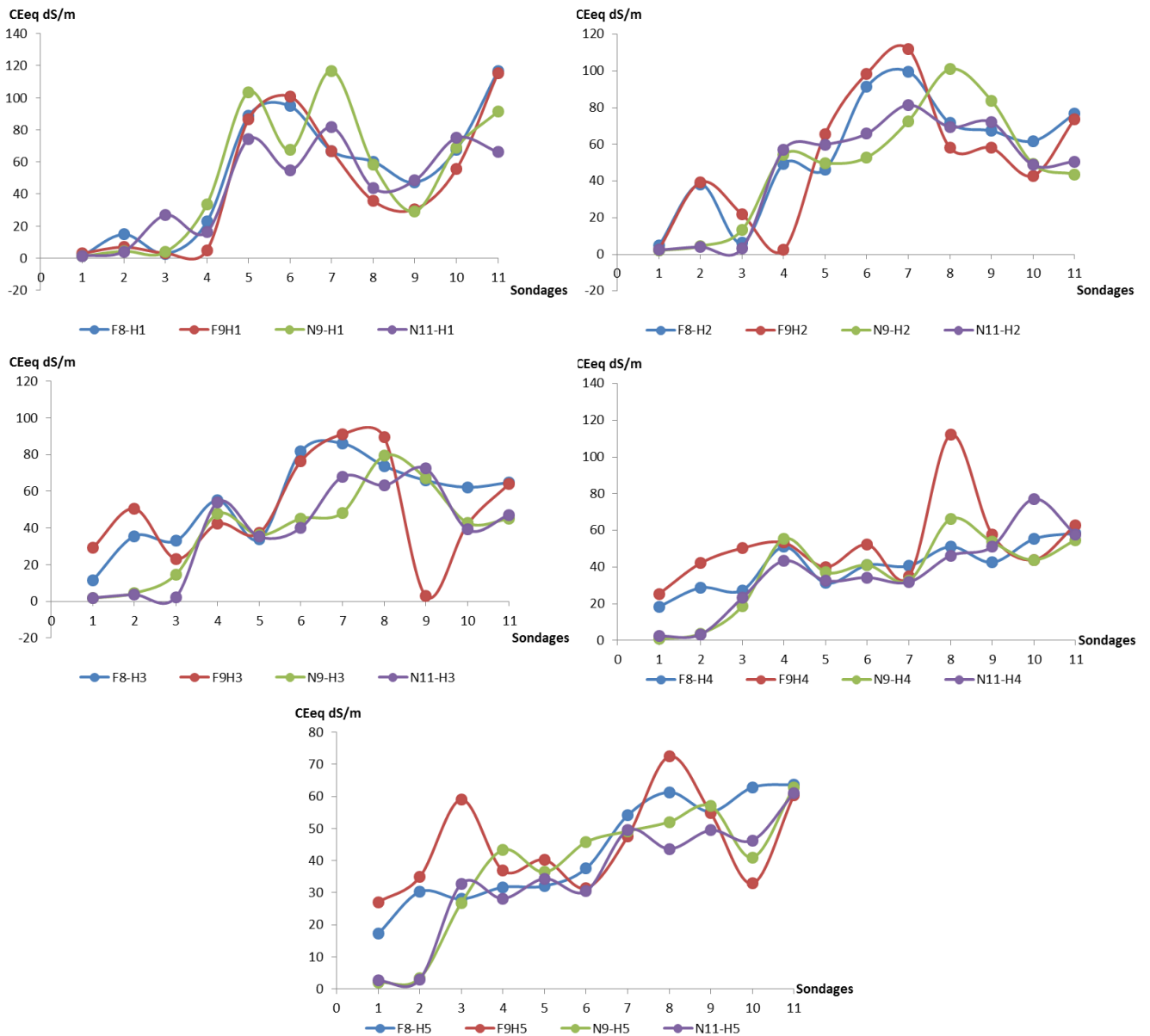


Figure 3-28. Distributions verticale et latérale de CEEq pour chaque couche de sol pour les quatre campagnes de mesures (site D)

La figure 3-28 met en évidence les résultats obtenus plus haut et matérialise d'une façon concrète l'impact de la période de mesures sur la variation de CE. En effet, cette figure met en exergue les points suivants :

- Quel que soit la couche considérée, les profils salins longitudinaux des quatre périodes de mesures ne se superposent pas. Ce résultat signifie qu'il existe bel et bien un effet temps sur la variation de CE.
- D'une façon globale, les quatre profils salins longitudinaux de chaque couche du sol sont, à quelques détails près, similaires. Cette ressemblance signifie que la salinité au sein de TD évolue approximativement d'une façon homogène de part et d'autre d'un profil salin longitudinal moyen.
- En considérant les profils salins longitudinaux deux à deux, nous remarquons qu'en certains points, les courbes sont très proches les unes des autres et en d'autres points elles y sont très éloignées. La variation de CE le long de TD n'est donc pas homogène et serait liée au point d'observation. C'est ce qui explique que les écarts de CE sont parfois faibles et parfois forts.
- Les différents profils salins, même s'ils ont approximativement la même allure, ils se recoupent souvent le long de TD. Ce résultat signifie que dans un même profil salin, CE a augmenté en certains points et a diminué en d'autres.

Conclusion

Les résultats montrent que les niveaux de salinité sont très hétérogènes et ce quelles que soient la campagne de mesure et la profondeur du sol considérées. En effet, les CE moyennes varient entre 4,96 dS/m et 55,76 dS/m ce qui suggère une forte variabilité de ce paramètre. Les résultats montrent aussi que CE diminue dans le sens $TD > TB > TA > TC$. Les résultats ont révélé également que les profils salins sont très variables et ce quel que soit le site d'étude et quelle que soit la campagne de mesures. Cette variabilité des profils salins serait liée à la pratique de l'irrigation et aux caractéristiques locales de la pédogenèse des sondages (microrelief, texture...) le long des transects étudiés. Ainsi, les fortes valeurs de la salinité et sa variabilité spatiale et temporelle très élevée rendraient CE comme étant l'un des facteurs les plus influents sur EM.

Discussion

Les analyses effectuées sur les principales caractéristiques physico-chimiques des sols révèlent que les sols sont généralement très sableux (sables% > 60%) avec une texture Loamy Sand à Sand (Soil Survey Staff, 2014). La texture des différents sites étudiés est donc homogène et présente une faible variabilité spatiale ($CV < 11\%$). Cette texture est favorable à l'infiltration de l'eau et aux transferts des solutés (Askri, 2002). Elle favorise donc la

lixiviation des sels par le biais de l'irrigation ou par les eaux des pluies lors des événements pluviaux.... De nombreuses études (Job et al., 1987 ; Corwin et Lesch, 2003) ont mis en évidence l'effet de la texture sur l'induction électromagnétique, mais en ce qui concerne notre cas, de par son homogénéité spatiale, la texture impacterait peu la modification des lectures électromagnétiques. Le pH des sols étudiés est dans l'ensemble légèrement à très alcalin, avec des valeurs du pH qui sont dans la majorité des cas supérieures à 8 avec une moyenne égale à 8,5. Les sols étudiés sont relativement peu à modérément calcaires (CaCO_3 moyenne $\approx 4\%$) avec des taux de CaCO_3 qui sont variables à très variables dans l'espace quels que soient le transect et la couche du sol considérés ($23 < \text{CV} \% < 105$). Cette variabilité engendre une certaine hétérogénéité spatiale des profils calcaires. Les quantités de gypse contenues dans les sols étudiés sont souvent inférieures à 5%, mais quelques profils ont des teneurs qui peuvent atteindre $\approx 20\%$ avec un gradient positif de l'amont vers l'aval et avec une évolution sinusoïdale probablement en relation avec les ondulations du micro relief originel. L'étude de l'humidité révèle que ce paramètre est très hétérogène ($26\% < \text{CV} < 92\%$) et ce quelles que soient le site d'étude et la campagne de mesures considérés. Cette hétérogénéité serait contrôlée par plusieurs facteurs comme les conditions climatiques (précipitation et évapotranspiration), l'irrigation, les caractéristiques physiques du sol (textures, perméabilité, infiltration et remontée capillaire) et la pente.

A travers ces résultats nous remarquons que les valeurs les plus faibles de l'humidité sont enregistrées au niveau du site C ($3\% < H < 19\%$) dont la texture est la plus sableuse. Par contre, au niveau des sites A, B et D, les taux d'humidité sont relativement élevés avec des valeurs moyennes qui oscillent entre 13 % et 38 %. Les résultats montrent également que H % varie différemment d'un site à l'autre et ce quelle que soit la période de mesures considérée. Ainsi, en regard de ses CV inférieurs à 52%, le site B présente un aspect moins hétérogène comparativement aux sites A ($37\% < \text{CV} < 87\%$), C ($26\% < \text{CV} < 141\%$) et D ($42\% < \text{CV} < 73\%$). Cette faible hétérogénéité de H % dans B serait liée à l'homogénéité de la texture du sol et du type d'irrigation par planche pratiquée en permanence dans ce site. Par ailleurs, l'ensemble des résultats montre que la distribution de l'humidité au niveau des différents transects augmente de l'amont vers l'aval. Cette distribution concerne plus particulièrement les couches de profondeur. Ceci serait dû au fait que la nappe soit moins profonde au niveau de la partie aval par rapport à la partie amont. Toutefois, cette tendance de distribution est moins marquée pour les couches de surface qui sont moins impactées par l'effet de la nappe. Ceci engendre des niveaux d'humidité plus faibles, qui sont contrôlés essentiellement par la prévalence climatique. En outre, la distribution verticale de l'humidité

montre que quel que soit le site d'étude et quelle que soit la campagne de mesures, les profils hydrique sont toujours de type descendant à cause de la présence d'une nappe peu profonde qui impacte le comportement hydrique des sols (voir chapitre 2). La présence de cette nappe explique les forts taux d'humidité des horizons de profondeur qui sont pratiquement à l'état de saturation. Cette hydromorphie est liée à la présence d'une couche gypso-calcaire (deb deb) peu perméable et qui serait responsable du mauvais drainage des eaux vers la profondeur des sols. L'étude de l'évolution temporelle de l'humidité entre les différentes campagnes de mesures a mis en évidence plusieurs situations distinctes. En effet, les résultats montrent que les sites A et B sont moins impactés par les variations temporelles de l'humidité. Cette homogénéité temporelle observée pour l'ensemble des campagnes est probablement liée à l'homogénéité de la texture et à celle de l'irrigation pratiquée au niveau de ces deux sites. Les résultats montrent également que le site C est impacté différemment selon la profondeur du sol considérée. En effet, la couche de surface (H1) est la moins impactée par le facteur temps comparativement au reste des autres couches. Ce résultat serait lié à l'irrigation au goutte à goutte pratiquée au niveau du site C et qui affecte principalement la couche de surface (H1). De même, les résultats ont montré que le site D est impacté différemment selon la couche du sol et la position du sondage considéré. Généralement, il semble que le facteur temps pour ce site impacte beaucoup plus la partie amont des couches H2 et H3 et la partie aval des couches H4 et H5.

L'étude de la salinité du sol et de sa variation dans les différents transects a montré que CE moyenne du sol est élevées à très élevées et ce quelles que soient la période d'étude et la profondeur du sol considérées ($5,32 \text{ dS/m} < \text{CE moyenne} < 55,76 \text{ dS/m}$). Ces valeurs moyennes de CE correspondent à des niveaux de salinité qui qualifient le sol de salin à très salin selon les normes de l'USSS (1954). Dans le détail, les résultats montrent que les plus fortes valeurs de CE sont enregistrées dans le site D ($\text{CE moyenne} > 34,69 \text{ dS/m}$) tandis que les plus faibles valeurs le sont dans C ($4,96 \text{ dS/m} < \text{CE moyenne} < 23,25 \text{ dS/m}$). En générale, les résultats montrent que la salinité du sol diminue dans le sens $\text{TD} > \text{TB} > \text{TA} > \text{TC}$. Cette différence entre ces niveaux de salinité serait due à la pratique agricole des différents sites d'études et aux types d'irrigation. En effet, l'analyse de la distribution de CE dans les transects a mis en évidence une dépendance claire de la pratique agricole sur l'intensité de la salinité. Ainsi, les résultats ont montré que la salinité des sols irrigués (sites A, B et C) présente des CE moins élevés dans les horizons de surface, notamment pour les sites irrigués par planches (Sites A et B). Par ailleurs, la distribution de CE dans les transects est très variable et ce quelles que soient la période de mesures et la profondeur d'investigation avec

quelques différences d'un site à l'autre. En effet, les plus fortes variations sont enregistrées dans le site C ($46\% < CV\% < 146$) et les plus faibles le sont en B ($12\% < CV\% < 82\%$). Ces faibles valeurs du CV enregistrées au niveau du site B sont dues probablement au fait que ce site est le plus exploité par l'agriculture, et donc il est fréquemment irrigué. Les variabilités de CE dans le site D garde le même ordre de grandeur traduisant ainsi une variabilité plus ou moins stable au niveau de ce site. Cette relative stabilité serait due probablement au fait que le site D est une jachère de longue date ce qui engendre un régime hydrique relativement plus stable par rapport aux autres sites. Les résultats ont montré aussi que les sondages situés à l'aval des sites A, C et D ont des niveaux de salinité plus élevés que ceux de l'amont. La faible salinité observée au sud (et donc à l'amont) des sites irrigués peut être expliquée par le fait que cette partie est plus proche de la source d'irrigation (forage d'eau). Cette partie reçoit donc un plus grand transfert d'eau, d'où un lessivage plus efficace des sels solubles qui seront entraînés vers les horizons les plus profonds et vers l'aval sous l'effet de la gravité et de la pente. Ainsi, l'effet de la topographie qui favorise la circulation de l'eau d'irrigation d'amont en aval est prépondérant dans la distribution spatiale de CE en entraînant les sels dans le même sens. Les résultats ont également mis en évidence une très grande variabilité verticale de CE et ce quels que soient le site d'étude et la position du sondage considérés. Ainsi, il s'avère que les profils salins ascendants concernent beaucoup plus les sondages situés dans les parties aval et centrale des sites cultivés (sites A, B et C), notamment ceux qui sont irrigués par planche (site A et B). Par contre, les profils salins descendants se concentrent beaucoup plus les sondages situés dans la partie amont des sites A, B et C et au niveau du site D. La forme du profil salin, ascendant ou descendant, est expliquée principalement par l'usage du sol étudié et notamment par le fait qu'il soit irrigué ou non. En effet, le processus dominant de la variabilité verticale de CE est lié à l'état hydrique des sols. Ainsi, lorsque les sols sont secs, les sels remontent en surface par capillarité ou s'accumulent par concentration dans la matrice du sol, s'ils sont humides sous effet d'irrigation ou de la pluie, les sels sont lixiviés en profondeur.

L'évolution temporelle de la salinité entre les différentes campagnes de mesures a mis en évidence plusieurs situations distinctes. Ainsi, les résultats montrent que les sites A et B sont moins impactés par les variations temporelles de la salinité par rapport au site C. Cette homogénéité temporelle observée pour l'ensemble des campagnes est probablement liée à l'homogénéité de la texture et à celle de l'irrigation pratiquée dans ces deux sites. Les résultats montrent également que le site C est impacté différemment selon la profondeur du sol considérée. En effet, la couche de surface (H1) est la moins influencée par le facteur temps

comparativement à l'ensemble des autres couches (H2, H3, H4 et H5). Ceci est du éventuellement au type d'irrigation pratiquée au niveau du site C (irrigation en goutte à goutte), qui affecte principalement la couche de surface (H1). De même, les résultats ont montré que le site D est impacté différemment selon la couche du sol et la position du sondage considérées. Généralement, il semble que le facteur temps influence beaucoup plus la partie amont des couches H2 et H3 ainsi que la partie aval des couches H4 et H5.

Globalement, ces résultats ont montré que la plupart des paramètres du sol étudiés peuvent probablement impacter la mesure de la salinité par EM. Ce résultat incite à réaliser une étude qui permettra de mettre en évidence les différents degrés d'influence de chacun de ces paramètres sur la EM.

Conclusion

Les quatre profils de sols étudiés sont tous très sableux et ils se caractérisent par une structure particulière dans les horizons de surface et une structure massive en profondeur. Les taux de calcaire et de gypse sont généralement faibles sur l'ensemble des profils ($\text{CaCO}_3 < 5\%$; Gypse % $< 10\%$). Ces taux peuvent atteindre exceptionnellement dans certains horizons des taux assez élevés ($\text{CaCO}_3 \approx 14\%$, gypse $\approx 15\%$). Ces sols se caractérisent aussi par la formation d'efflorescences salines en surface et par une végétation d'halophytes qui colonise principalement les espaces non cultivés. Ils sont très salés ($2,5 \text{ dS/m} < \text{CE} < 5,7 \text{ dS/m}$) dans les profils A, B et D et un peu moins salés dans le profil C ($0,1 \text{ dS/m} < \text{CE} < 2,4 \text{ dS/m}$). La solution du sol est dominée par des associations ioniques sulfatées calciques qui témoignent de l'abondance du gypse dans ce milieu. Ces sols sont des Arenic Gleyic Solonchaks (IUSS Working Group WRB, 2014) équivalents aux Gypsic Aquisalid (site A), Typic aquisalid (Sites B et D) et Calcic Aquisalid (Site C) de Soil Survey Staff (1999).

De la même manière, l'analyse séquentielle des quatre sites a confirmé le caractère très psammophile de ces sols avec des textures qui oscillent entre loamy sand et sand selon le triangle de texture de l'USDA (Soil Survey Staff, 2014). Elle confirme aussi que les sols étudiées sont peu pourvus en calcaire et en gypse ($2,5 < \text{CaCO}_3 \text{ moyenne } \% < 6,4$; $0,8\% < \text{gypse\% moyenne} < 7\%$) même si, par endroits, les taux de ces deux constituants peuvent être relativement forts ($\text{CaCO}_3 \approx 14\%$; Gypse $\approx 20\%$) ou faibles ($\text{CaCO}_3 < 0,5\%$; Gypse $< 0,8\%$). La forte variabilité spatiale de ces deux paramètres risque d'influencer les lectures de l'EM38. Le pH est dans l'ensemble alcalin avec des valeurs qui sont généralement supérieures à 8 ($7,53 < \text{pH} < 8,67$). La variabilité de ce paramètre est très faible quels que soient le site

d'étude et la profondeur de l'horizon considérés ($CV < 4\%$) ce qui laisse penser que le pH n'aurait qu'une très faible influence sur les mesures électromagnétiques.

Les résultats ont montré que les taux d'humidité sont très hétérogènes et ce quelles que soient la campagne de mesures et la profondeur du sol considérées. Les plus faibles valeurs de ce paramètre sont enregistrées dans le site C dont la texture est la plus sableuse. Par contre, au niveau des autres sites, on enregistre des taux d'humidité relativement élevés avec une valeur moyenne qui oscillent entre 11 et 38%. Les résultats montrent également que quel que soit le site d'étude et quelle que soit la campagne de mesures, les profils hydriques sont de type descendants avec des horizons de profondeurs saturés en eau. Les résultats montrent aussi que la variabilité spatiale et temporelle des taux d'humidité est très élevée ce qui rend ce paramètre l'un des facteurs les plus influençant sur la EM. De même, les résultats montrent que les niveaux de salinité sont très élevés ($5 \text{ dS/m} < CE \text{ moyenne} > 56 \text{ dS/m}$) et très hétérogènes ($12\% < CV < 146\%$) et ce quelles que soient la campagne de mesure et la profondeur du sol considérées. Comme pour l'humidité, les valeurs les plus faibles de CE sont enregistrées dans le site C et les valeurs les plus élevées le sont en D. Au total, il s'avère que les fortes amplitudes entre les valeurs les plus faibles et les valeurs les plus fortes de la salinité et de l'humidité des sols ainsi que leurs forte variabilité spatio-temporelle rendraient ces deux paramètres comme étant les facteurs les plus influençant sur les lectures électromagnétiques.

Chapitre IV : Evaluation de la salinité du sol par induction électromagnétique

Dans ce chapitre, nous étudions la variabilité spatiale et temporelle de CE par utilisation de la méthode électromagnétique. Comme il a été déjà évoqué dans le deuxième chapitre, les mesures de EM ont été effectuées par EM38 en modes EMv et EMh sur quatre transects (TA, TB, TC et TD) situés respectivement dans les quatre sites d'étude A, B, C et D. Chaque mesure EM a été accompagnée par un prélèvement d'un échantillon de sols à la tarière par incrément de 30 cm jusqu'à une profondeur de 150 cm. Au total, 205 échantillons de sol ont été prélevés dont 65 sur le site A, 35 sur le site B, 50 sur le site C et 55 sur le site D (figure 2-10). Quatre campagnes de mesures EM et de prélèvements du sol ont été réalisées en février 2008 et 2009 et en novembre 2009 et 2011).

La synthèse bibliographique effectuée précédemment (voir chapitre 1) met en exergue la multiplicité et la complexité de l'influence de nombreux paramètres pédologiques sur les lectures de EM. Cette multidépendance rend l'interprétation de la mesure électromagnétique délicate. De ce fait, et dans une première étape, il est indispensable (1) de discriminer les influences liées à certains paramètres du sol susceptibles d'influencer EM et (2) de confirmer ou infirmer la possibilité de caractériser la variabilité de CE par EM dans le contexte de cette étude. Dans une deuxième étape, il s'agira de vérifier la capacité de EM à cartographier et à réaliser un suivi spatiotemporel de CE du sol de la zone d'étude.

1. Effet des différents paramètres du sol sur EM

L'utilisation de EM pour cartographier CE nécessite au préalable la connaissance du degré de corrélation entre les variables pédologiques d'intérêt et EM. Dans ce sens, de nombreux auteurs ont démontré que les mesures de EM sont influencées par des paramètres pédologiques comme l'humidité du sol (Kachanoski et al., 1988 ; Robert et al., 2003 ; Hossain et al., 2010 ; Martini et al., 2017), la texture (Brus et al., 1992 ; Triantafilis et Lesch, 2005 ; Zhao et al., 2019), la CEC (Zhao et al., 2020), le calcaire (Bourenane et al., 1997 ; Corwin et al., 2006), le pH (Corwin et al., 2006) et le gypse (D'Emden et al., 2009 ; Hall et al., 2014) ce qui rend l'interprétation de CE par le biais de EM délicate.

Dans cette recherche, nous avons considéré les principaux paramètres du sol étudiés susceptibles d'impacter les lectures de EM. Les paramètres pris en considération sont CEEq, humidité % (H %), CaCO₃ %, Gypse %, pH et argile + limon % (A+L %). Il s'agit en fait de rechercher les corrélations entre ces paramètres et EM. Pour ce faire, nous avons réalisé deux matrices de corrélation entre EM et les sept paramètres du sol pris en considération:

- La première matrice concerne les lectures de EM en mode vertical EMv et les sept paramètres pédologiques des cinq niveaux de prélèvement pondérés pour une couche de sol de 150 cm.

- La deuxième matrice relie les lectures de EM en mode horizontale EMh aux sept paramètres pédologiques pondérés pour une couche de 90 cm.

Cette démarche est appliquée aux quatre transects réalisés sur les quatre sites d'étude mais uniquement que pour la première campagne de mesures (février 2008). Pour chacune de ces matrices, nous avons réalisé une analyse statistique pour déterminer le degré de liaison entre EMv ou EMh d'une part et les sept paramètres pédologiques retenus d'autre part. Les analyses statistiques ont été effectuées sur les 41 sondages réalisés sur les quatre transects. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur l'analyse en composantes principales (ACP) et sur des tests de corrélation linéaire simple.

1.1. Résultats de l'ACP

Les résultats de l'ACP sont mentionnés dans le tableau 4-1 qui montre que plus de 85% de la variance totale cumulée est exprimée par les axes F1, F2 et F3 aussi bien pour EMh que pour EMv. Ces axes sont donc suffisants pour traduire l'essentiel de l'inertie totale. Il est utile de remarquer que l'essentiel de cette variance, soit environ 56 %, est représentée par l'axe F1 pour les deux couches du sol. Il s'avère donc que les paramètres pédologiques retenus ont pratiquement le même impact dans les deux couches du sol.

Tableau 4-1. Valeurs de la distribution de la variance selon les différents axes factoriels pour les deux couches du sol.

Axes	Valeurs propres		Variabilité (%)		Variabilité cumulée %	
	0-90 cm	0-150 cm	0-90 cm	0-150 cm	0-90 cm	0-150 cm
F1	3,942	3,927	56,307	56,102	56,307	56,102
F2	1,115	1,141	15,933	16,300	72,240	72,402
F3	0,903	0,961	12,900	13,734	85,140	86,136
F4	0,544	0,481	7,770	6,879	92,910	93,015
F5	0,289	0,296	4,133	4,228	97,043	97,243
F6	0,129	0,110	1,846	1,575	98,889	98,818
F7	0,078	0,083	1,111	1,182	100,000	100,000

Le premier axe est formé par la contribution des variables H % ($r = 0,96$), CEEq ($r = 0,91$ et $0,90$), A+L % ($r = 0,87$), EM ($r = 0,81$ et $0,83$), pH ($r = -0,63$ et $-0,59$), Gypse ($r = 0,49$ et $0,60$) et CaCO_3 ($r = -0,39$ et $-0,27$) (tableau 4-2). Cet axe regroupe la CEEq, H % et A+L %

dans la partie positive. Les six paramètres sont donc bien corrélés avec l'EM. Les corrélations du gypse (0-90 cm), du pH (0-150 cm) et de CaCO₃ (0-90 cm) avec EM sont moins importantes par rapport à celles des autres paramètres (figures 4-1 et 4-2). Globalement, nous pouvons conclure que les variances de EM sont liées positivement à celles de CEeq, H %, A+L% et à moindre degré à celle du Gypse (0-90 cm) et elles sont liées négativement et à moindre degrés avec CaCO₃ (0-90 cm) et pH (0-150 cm).

Tableau 4-2. Corrélations entre les différents paramètres étudiés et les facteurs

Paramètres (0-150 cm)	F1	F2	F3	Paramètres (0-90 cm)	F1	F2	F3
Emv	0,81	-0,26	0,28	EMh	0,83	-0,27	0,02
CEeq	0,91	0,18	0,21	CEeq	0,90	0,08	0,26
H %	0,96	0,01	-0,09	H%	0,96	0,02	-0,06
CaCO ₃ %	-0,39	0,81	-0,20	CaCO ₃	-0,27	0,88	0,20
Gypse %	0,49	0,58	0,53	Gypse	0,60	0,07	0,69
pH	-0,63	-0,20	0,65	pH	-0,59	-0,50	0,46
A+L %	0,87	-0,07	-0,30	A+L	0,87	0,04	-0,33

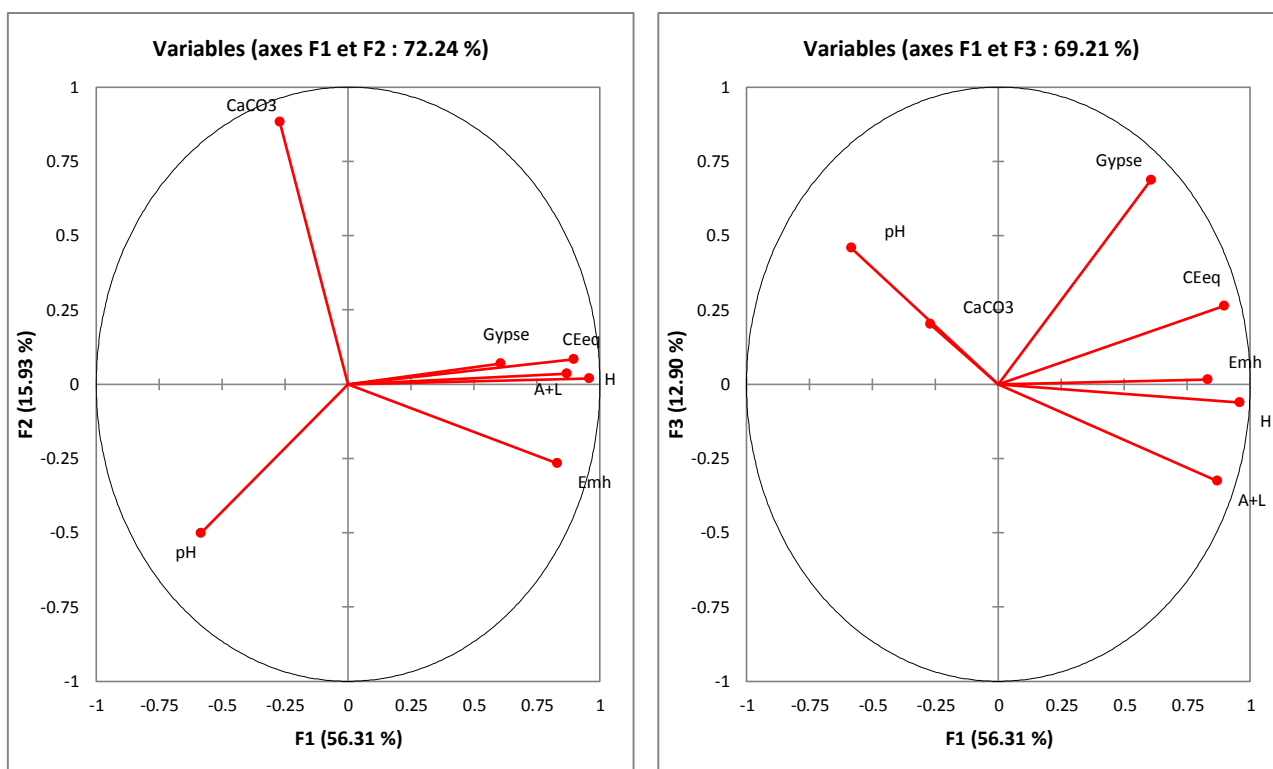


Figure 4-1. Distribution des différents paramètres pédologiques étudiés et de l'EMh sur les 2 plans factoriels (F1-F2 et F1-F3) (0-90 cm)

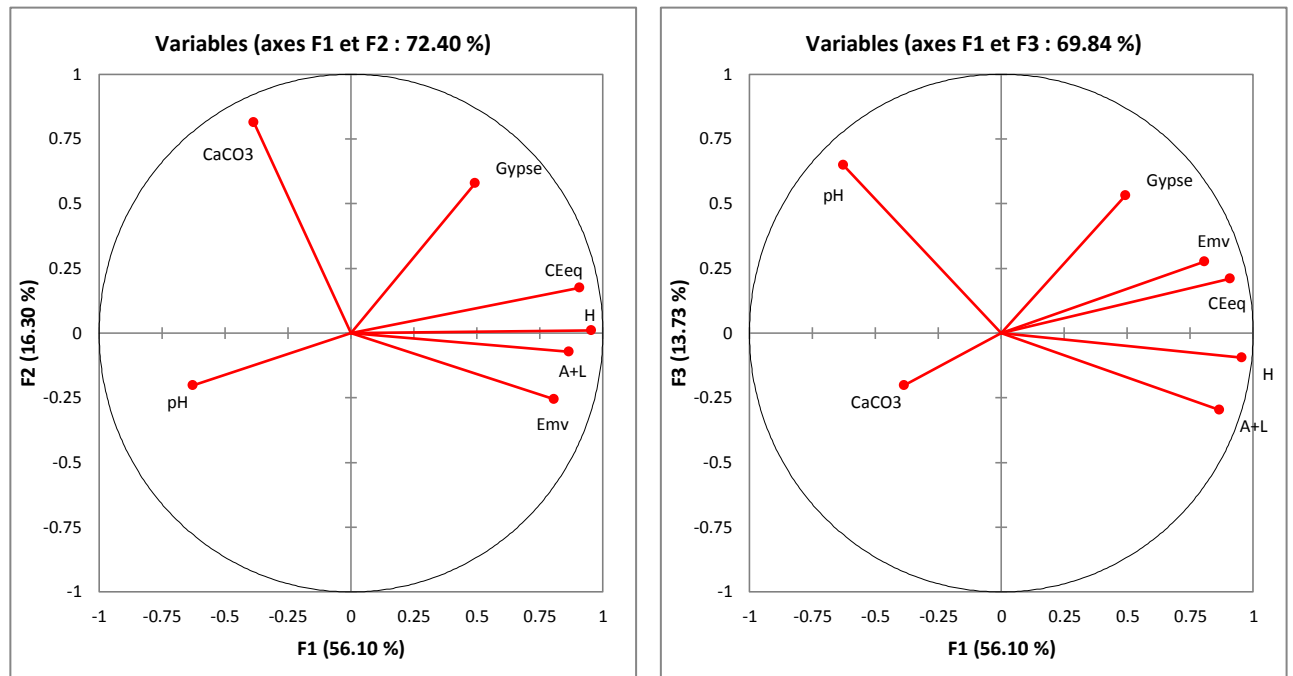


Figure 4-2. Distribution des différents paramètres pédologiques étudiés et de l'EMh sur les 2 plans factoriels (F1-F2 et F1-F3) (0-150 cm)

1. 2. Les tests de corrélation simples

Les résultats mentionnés dans le tableau 4-3 confirment ceux de l'ACP et indiquent que, excepté pour le pH et le gypse (0-150 cm), les corrélations entre les paramètres du sol et EM sont hautement à très hautement significatives. Les corrélations sont positives pour les couples EM-CEeq, EM-H%, EM-A+L et EM-Gypse, et elles sont négatives pour EM-CaCO₃. Ces résultats concordent avec ceux des différents travaux dans le domaine (Brus et al., 1992 ; Bourennane et al., 1997 ; Triantafilis et Lesch, 2005 ; Corwin et al., 2006 ; Hall et al., 2014 ; Zhao et al., 2019). Les corrélations les plus élevées concernent surtout CEEq, H % et A+L % ($r > 0,58$) ce qui suggère que ces paramètres sont les facteurs qui ont plus de poids sur les variations de EM par rapport au CaCO₃, gypse et pH ($r < 0,45$). Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Corwin et Lesch (2003), Johnson (2003a) et Robinson et al. (2004). De même, la matrice de corrélation (tableau 4-3) montrent que les corrélations entre EM et A+L % sont moins fortes ($0,58 < r < 0,65$) que celles obtenues avec CEEq et H % ($0,70 < r < 0,77$) à cause probablement de la faible teneur en argile qui est considérée comme l'élément granulométrique le plus conducteur qui influence le plus EM (Urish, 1981 ; Fukue et al., 1999 ; Allred et al., 2008). L'existence d'une corrélation hautement significative ($r > 0,69$) (tableau 1 - annexe 10) entre les fractions granulométriques d'une part et la salinité et

l'humidité du sol d'autre part suggère que les fractions granulométriques peuvent avoir un effet indirect sur EM.

Tableau 4-3. Matrice de corrélations entre les EMv et EMh et les différents paramètres pédologiques étudiés

Variabes	CEeq dS/m	H %	CaCO ₃ %	Gypse %	pH	A+L %
EMh	0,76***	0,73***	-0,35**	0,38**	-0,30	0,65***
EMv	0,77***	0,70***	-0,45***	0,30	-0,282	0,58***

*, **, *** Significatif à $P < 0,05$, $P < 0,01$, $P < 0,001$, respectivement

L'évaluation de l'effet de H % sur EM nécessite la mise au point d'un protocole expérimental qui permet de suivre la variation de EM à différents états d'humidité du sol. Pour ce faire, nous avons utilisé une parcelle de 15 m x 10 m située dans le site B que nous avons irriguée jusqu'à saturation (figure 4-3). Sur cette parcelle, nous avons réalisé douze profils EM en EMv et EMh situés aux nœuds d'une maille 5 m x 5 m (figure 4-4). Sur ces mêmes profils, nous avons prélevé à la tarière des échantillons de sol selon trois niveaux de profondeur (0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm). Nous avons considéré particulièrement la couche 0-90 cm du fait qu'elle représente la plus forte influence sur les mesures électromagnétiques, soit 74% de la réponse totale du signal de l'EM38 (Rhoades et Corwin, 1990). Par ailleurs, au-delà de cette profondeur, les sols étudiés sont pratiquement saturés en permanence par les eaux souterraines (voire chapitre 3).

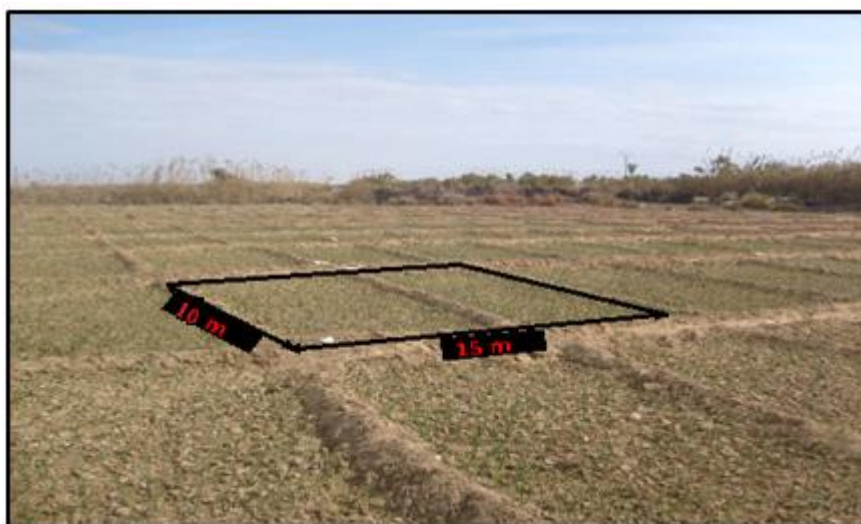


Figure 4-3. Parcelle irriguée à saturation située dans le site B

Sur les échantillons du sol prélevés, nous avons mesuré au laboratoire la $CE_{1:5}$ et l'humidité pondérale pour les trois niveaux de prélèvement. Ces mesures ont été par la suite pondérées pour une couche de sol de 0-90 cm. Nous avons suivi l'évolution de ces paramètres pour une durée de 5 jours (du 5 au 9 juin 2013) avec un intervalle régulier de 24 heures entre chaque prélèvement. La démarche a été menée comme suit :

- 5 juin, état sec (EM + prélèvements du sol) ;
- 6 juin irrigation de la parcelle à saturation, les mesures et les prélèvements du sol n'ont pas été effectués pour éviter l'entassement et la perturbation du sol ;
- 7 juin, 1 jour après irrigation (EM + prélèvements du sol) ;
- 8 juin, 2 jours après irrigation (EM + prélèvements du sol) ;
- 9 juin, 3 jours après irrigation (EM + prélèvements du sol).

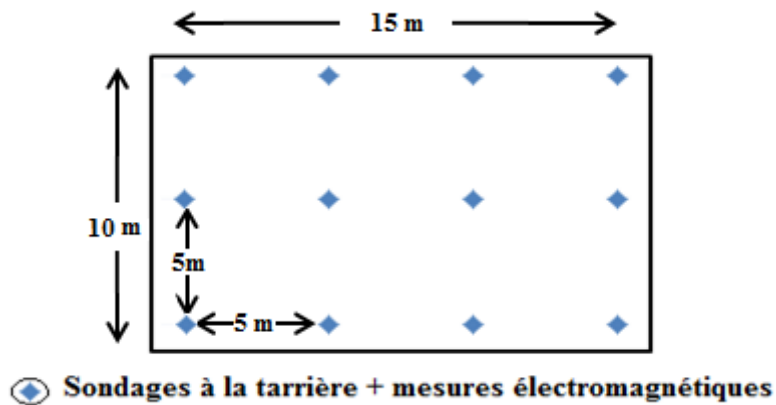


Figure 4-4. Dispositifs d'échantillonnage de la parcelle irriguée à saturation

L'influence de l'humidité (H %) et de CE sur EM est analysée à travers une matrice de corrélation de régression linéaire simple (tableau 4-4). Les résultats des tests de corrélation indiquent une très forte corrélation entre EM et $CE_{1:5}$ ($0,772 < r < 0,913$; $p < 0,001$), les plus fortes corrélations étant observées dans les sols à faibles teneurs en eau ($10,52 < H\% < 13,35$) (1 jours avant l'irrigation). Les corrélations entre H % et EM sont toutes significatives ($0,601 < r < 0,753$; $p < 0,05$), ce qui révèle une forte sensibilité du EM vis-à-vis des teneurs en eaux. Les résultats montrent aussi que les coefficients de corrélation établis entre EM et CE restent plus élevés par rapport à ceux établis entre EM et H%, ce qui démontre l'effet prédominant de la salinité sur EM.

Tableau 4-4 : Matrice de corrélations entre EMv et EMh et celles de la CE_{1:5} et l'humidité pondérale.

	5 juin		7 juin		8 juin		9 juin	
	CE _{1:5}	H%	CE _{1:5}	H%	CE _{1:5}	H%	CE _{1:5}	H%
EMv	0,871***	0,677**	0,827***	0,777**	0,776**	0,65*	0,820**	0,601*
EMh	0,913***	0,753**	0,772**	0,751**	0,828***	0,744**	0,876***	0,711**

*, **, *** Significatif à $P < 0,05$, $P < 0,01$, $P < 0,001$, respectivement

Les résultats indiquent que les valeurs de EM sont différemment influencées par les paramètres du sol. Il ressort aussi que CE, H % et A+L sont les facteurs qui ont le plus d'effet sur EM. Toutefois, les résultats révèlent que CE est le facteur du sol le plus déterminant ($0,772 < r < 0,913$; $p < 0,001$) dans la variation de EM. De ce fait, EM constitue un moyen suffisamment efficace pour l'estimation de CE du sol, sa cartographie et donc son suivi temporel dans la zone d'étude.

2. Analyse de EM des transects

Nous rappelons que les transects TA, TB, TC et TD ont été réalisés respectivement dans les sites A, B, C et D comme indiqué par la figure 2-10 du chapitre 2. Sur chacun de ces transects, nous avons effectué des mesures de EM en mode vertical (EMv) et en mode horizontal (EMh). Les résultats de ces mesures sont regroupés dans le tableau 4-5.

Tableau 4-5. Paramètres statistiques de EM

	TA		TB		TC		TD	
EM (dS/m)	moyenne ±ET	CV%	moyenne ±ET	CV%	moyenne ±ET	CV%	moyenne ±ET	CV%
F8 - EMv	178,3±164,8	92%	139,1±48,9	35%	34,3±15,1	44%	188,9±115,5	61%
F8 - EMh	175,5±187,9	107%	129,0±52,2	40%	24,3±13,9	57%	192,0±127,3	66%
F9 - EMv	160,2±107,5	67%	139,6±70,8	51%	52,9±22,7	43%	204,8±119,4	58%
F9 - EMh	150,8±100	66%	128,6±84,4	66%	35,0±23,3	67%	201,3±135,4	67%
N9 - EMv	211±207,3	98%	104,3±77,5	74%	42,0±13,8	33%	232,0±126,0	54%
N9 - EMh	209,4±246,4	118%	82,4±56,5	69%	29,9±8,4	28%	203,6±121,1	59%
N11-EMv	190,2±180,1	95%	229,4±98,7	43%	45,5±6,0	13%	251,9±150,6	60%
N11-EMh	184,3±198,7	108%	176,7±77,8	44%	29,2±7,0	24%	230,8±135,9	59%

F8 : février 2008 ; F9 : février 2009 ; N9 : novembre 2009 ; N11 : novembre 2011

Le tableau 4-5 indique que les valeurs moyennes de EMv et EMh diminuent dans le sens TD > TA > TB > TC ce qui suggèrent que le sol du site D est le plus conducteur et celui du site C en est le moins. En réalité, la majeure partie des sols étudiés est très conductrice du fait que 75% des EMv sont supérieures à 50 dS/m et 60% des EMh sont supérieures à 50 dS/m comme indiqué dans les tableaux 1 à 4 de l'annexe 2. La différence entre les sols se situe uniquement au niveau de leurs conductivités électromagnétiques.

En se basant sur les valeurs moyennes des transects, le tableau 4-5 révèle que, quel que soit le site étudié et quelle que soit la campagne de mesures, EMv moyen est toujours supérieure à EMh moyen. Ce résultat suggère que la tendance globale de la conductivité électromagnétiques des quatre sites étudiés est homogène et que les sols seraient plus conducteur en profondeur qu'en surface.

Les résultats montrent aussi que EM est très variable au sein d'un même transect et ce quelle que soit la campagne considérée. En effet, le CV varie entre 66 et 118 % dans TA, entre 35 et 74 % dans TB, entre 13 et 67 % dans TC et entre 54 et 67 % dans TD. Ce résultat indique une forte variabilité spatiale de EM quelle que soit la campagne de mesure considérée. Néanmoins, cette variabilité est parfois moins marquée comme c'est le cas de TC, surtout au niveau de la quatrième campagne de mesure (13 % < CV < 24 %). Il faut noter que les CV de EMv et EMh varient dans le même ordre de grandeur quels que soient le transect et la campagne de mesures. Ceci signifie que la dynamique des éléments conducteurs du sol en surface et en profondeur serait homogène.

La distribution des EM au niveau des transects A, B, C et D sont représentés par les figures 4-5 à 4-8.

- **Le site A** : la figure 4-5 illustre bien les résultats précédents et mettent, en plus, en évidence un gradient positif de EM de l'amont vers l'aval de TA pour les EMv et EMh et cela pour les quatre campagnes de mesures. Ce résultat concorde bien avec les résultats obtenus auparavant dans le chapitre 3 (figure 3-21 et 3-22) qui montrent une distribution similaire de C_{Eq} au niveau du transect, ce qui traduit une bonne estimation de la salinité par EM au niveau du site A.

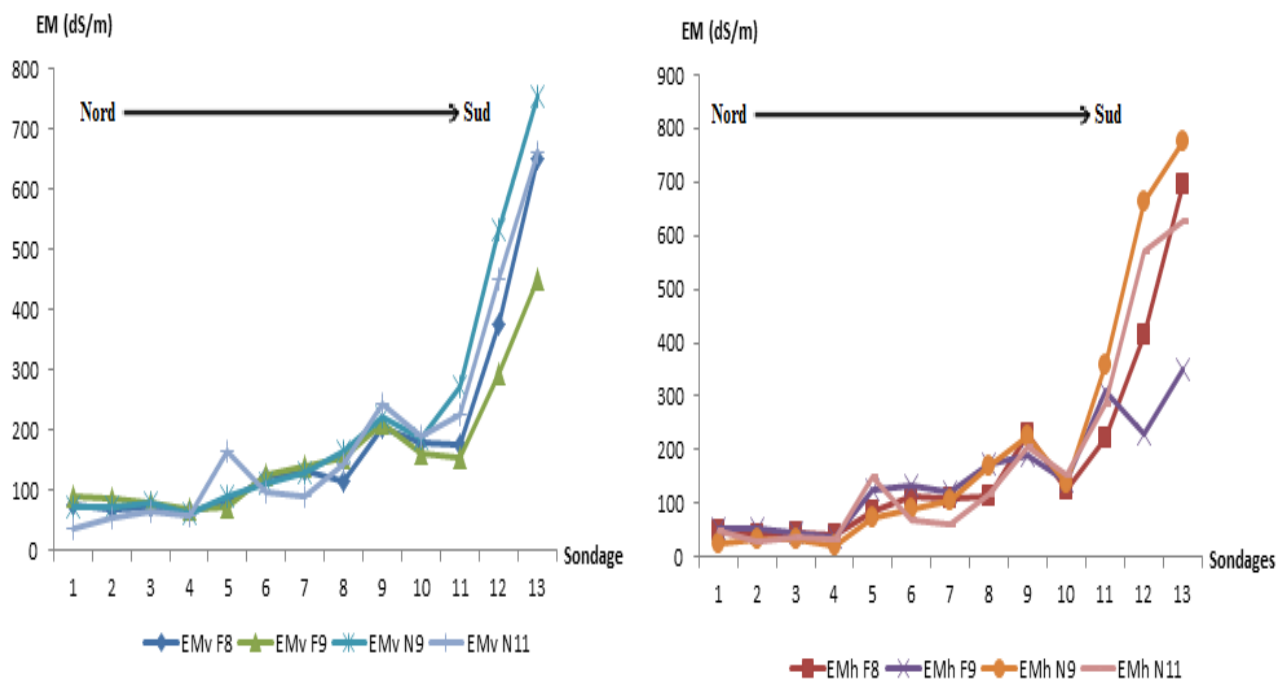


Figure 4-5. Distribution des EMv et EMh dans TA pour les quatre campagnes de mesures

- **Le site B** : la figure 4-6 révèle la présence d'une très forte variabilité latérale de EM au niveau de TB sans aucune tendance particulière à l'augmentation ou à la diminution de l'amont vers l'aval du transect. EMv et EMh se distribuent d'une manière analogue dans l'espace et dans le temps. Les différentes courbes de EM relatives aux quatre campagnes de mesures se distribuent d'une manière anisotrope dans la moitié amont du transect où elles s'entrecroisent en plusieurs endroits. Nous rappelons que c'est cette partie de la parcelle qui est la plus soumise à l'irrigation. Dans la moitié aval, les courbes ont pratiquement la même tendance et la même allure mais avec des écarts différents. Il est à noter également que les courbes sont relativement distantes les unes des autres ce qui met en évidence une forte variabilité temporelle de EM. Les résultats montrent aussi que, d'une manière globale, la distribution latérale de EMv et EMh dans TB est, à quelques détails près, similaire à celle de CEEq (figure 3-23 et 3-24). Ce résultat traduit une bonne concordance de distribution latérale entre EM et CEEq et suggère donc que EM serait un bon estimateur de la salinité du sol dans le site B.

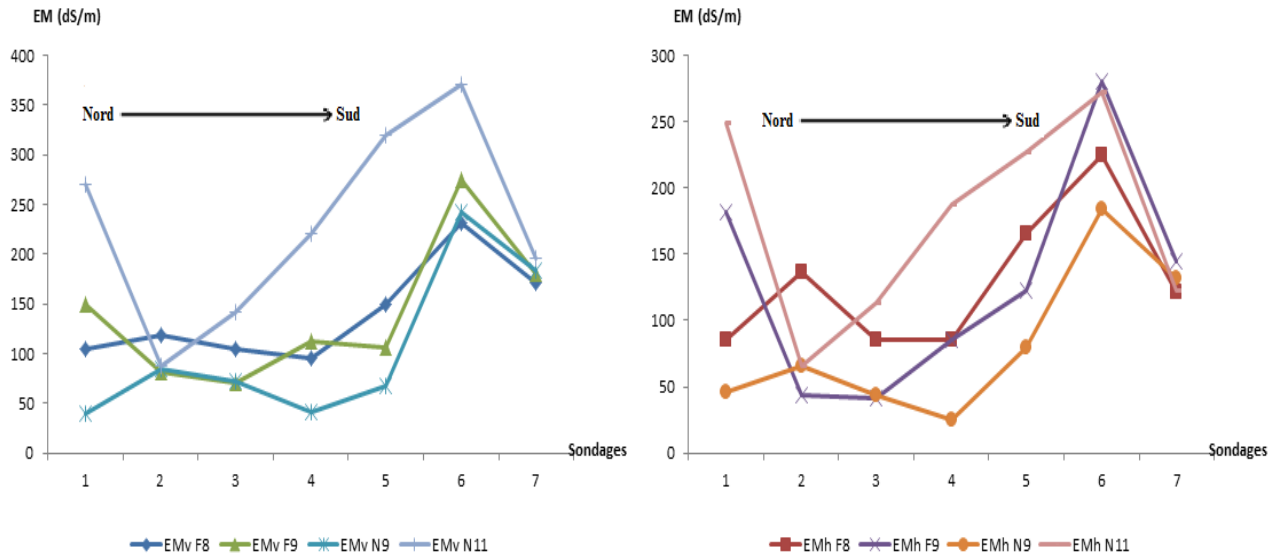


Figure 4-6. Distribution de EMv et de EMh dans TB pour les quatre campagnes de mesures

- **Le site C :** la figure 4-7 illustre les résultats précédents et met en évidence une variabilité de EM moins marquée par rapport aux autres sites surtout dans la partie amont de TC et cela pour les quatre campagnes de mesure. Cette figure montre que les distributions spatio-temporelles de EMv et EMh sont pratiquement analogues. Les résultats montrent aussi que les EM à l'aval de TC sont nettement plus fortes qu'à son amont et que leur distribution spatiale concorde bien avec de C_{Eeq} (figure 3-25 et 3-26). Cette concordance entre les deux résultats traduit la bonne estimation de CE par le biais de EM.

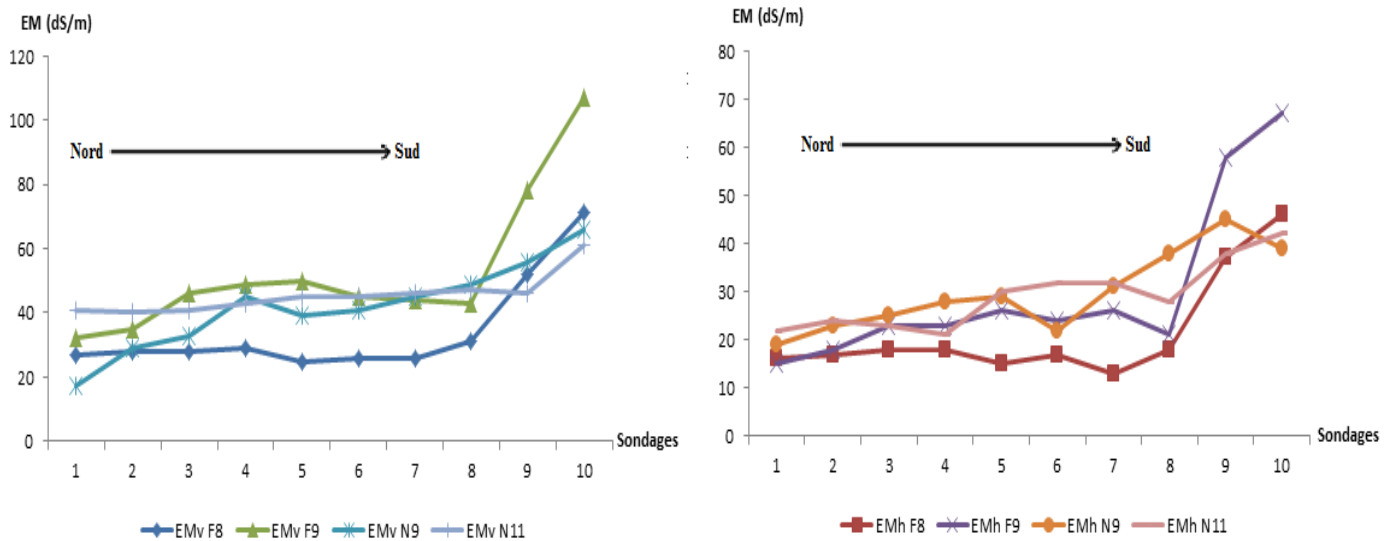


Figure 4-7. Distribution de EMv et de EMh dans TC pour les quatre campagnes de mesures

- **Le site D** : La figure 4-8 révèle une très grande variabilité latérale de EM dans TD avec un gradient de croissance de EM de l'amont vers l'aval en relation avec la pente. Les distributions spatio-temporelles de EMv et EMh sont pratiquement similaires. Les différentes courbes de EM relatives aux quatre campagnes de mesures s'entrecroisent en plusieurs endroits ce qui suppose un effet temps différent d'un point à un autre. Les forts écarts entre les valeurs de EM entre deux observations successives ou entre les valeurs d'une même observation mesurée à des périodes différentes suggèrent une forte variabilité spatio-temporelle de ce paramètre. Les résultats montrent également que la distribution latérale des EM présente des allures plus ou moins semblables à celles de la CEEq (figures 3-27 et 3-28) ce qui suggère que EM serait un bon estimateur de la salinité du sol dans le site D.

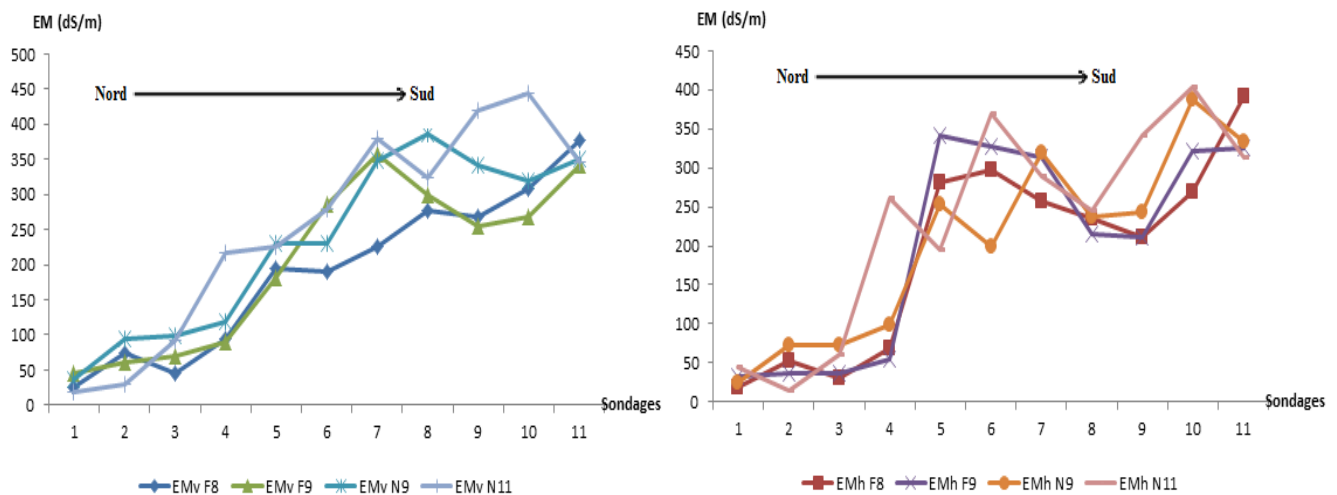


Figure 4-8. Distribution de EMv et de EMh dans TD pour les quatre campagnes de mesures

3. Dynamique saisonnière des profils EM

Les profils EM des transects TA, TB, TC et TD ont été déterminés sur la base des différences entre les valeurs de EM obtenues en mode horizontal et celles obtenues en mode vertical (McNeill, 1980 ; Corwin et Rhoades, 1984 ; Job et al., 1987). Trois cas peuvent se présenter :

- $EMh > EMv$: Ceci signifie que les éléments conducteurs du sol ont tendance à s'accumuler beaucoup plus en surface qu'en profondeur. Dans ce cas, le profil EM est de type ascendant ;
- $EMh < EMv$: Ce cas indique que les éléments conducteurs du sol s'accumulent plus en bas qu'en haut du profil. Le profil EM est alors de type descendant ;
- $EMh \approx EMv$: Cette situation indique que les éléments conducteurs s'accumulent d'une façon homogène dans le sol et le profil EM est alors uniforme.

Ainsi, nous pouvons considérer que plus la différence en valeur absolue entre EMh et EMv est grande, plus la différence de l'intensité du niveau de conductivité entre le haut et le bas du profil est grande. De ce fait, les profils EM peuvent être représentés en bâtonnets comme illustré par les figures 4-9 à 4-12. Les profils EM ascendants seront donc représentés selon les ordonnées positives et les profils descendants selon les ordonnées négatives. Cette représentation des profils EM a l'avantage d'illustrer l'intensité réelle de la différence entre EMh et EMv, mais elle a aussi l'inconvénient de masquer l'intensité réelle de la salinité et des autres paramètres conducteurs dans le profil.

- **Le site A** : Les types de profils salins sont illustrés par la figure 4-9 qui montre que le profil salin est assez variable dans l'espace et ce quelle que soit la campagne de mesures. En effet, pour une même campagne de mesures, le profil salin est tantôt ascendant et tantôt descendant et parfois il peut être uniforme. Ainsi, il s'est avéré que pour les quatre campagnes, 25 % des profils sont ascendants, 63,5 % sont descendants et 11,54 % sont uniformes. Les écarts de salinité (illustrés par les longueurs des bâtonnets) entre sondages d'une même campagne de mesures sont également très variables (tableau 4-6). Ce résultat traduit une variabilité spatiale de la salinité et une hétérogénéité des profils salins. La figure 4-9 met en évidence des différences notables entre profils salins du même sondage établis lors des différentes campagnes. En effet, les différences entre EMh et EMv varient entre -98 dS/m (F9 : Sondage 13) et 155 dS/m (F9 : Sondage 11). Le profil salin peut même s'inverser comme c'est le cas des sondages 1, 5, 6, 8, 9, 12 et 13. Ce résultat signifie que la campagne de mesure impacte le profil salin et la salinité du site A. Les résultats montrent aussi que la différence entre EMv et EMh du site A est nettement plus élevée dans sa partie aval par rapport à sa partie amont et médiane, ce qui traduit une très grande hétérogénéité verticale des EM dans la partie aval.

- **Le site B** : Les allures des profils salins sont représentées par la figure 4-10. L'analyse de cette figure indique que le type de profils salins est variable dans TB et ce quelle que soit la campagne de mesures. En effet, pour une même campagne de mesures, le profil salin est soit ascendant, soit descendant ou uniforme. Ainsi, il s'est avéré que pour les quatre campagnes, 17,9% des profils sont ascendants, 71,4% sont descendants et 10,7% sont uniformes. Les écarts de salinité (illustrés par les longueurs des bâtonnets) entre sondages d'une même campagne de mesures sont également très variables (tableau 4-7). Ce résultat traduit une certaine variabilité spatiale de la salinité et une hétérogénéité des profils salins. La figure 4-10 met en évidence des différences notables entre profils salins du même sondage établi lors des

différentes campagnes. En effet, les différences entre EMh et EMv varient entre -98 (N11 : sondage 6) et 32 dS/m et (F9 : sondage 1). Le profil salin peut même parfois s'inverser comme c'est le cas des sondages 1, 2, 5 et 6. Ce résultat signifie que la campagne de mesure impacte le profil salin et la salinité du site B. Par ailleurs, l'observation de la figure 4-10 montre que la différence entre les EMv et les EMh est plus élevée en aval qu'en amont. Cette différence très élevée concerne plus spécialement les sondages 7, 6 (N9 et N11) et 5 (N11). Ce résultat traduit une très grande hétérogénéité verticale de ce paramètre au niveau de la partie aval du site.

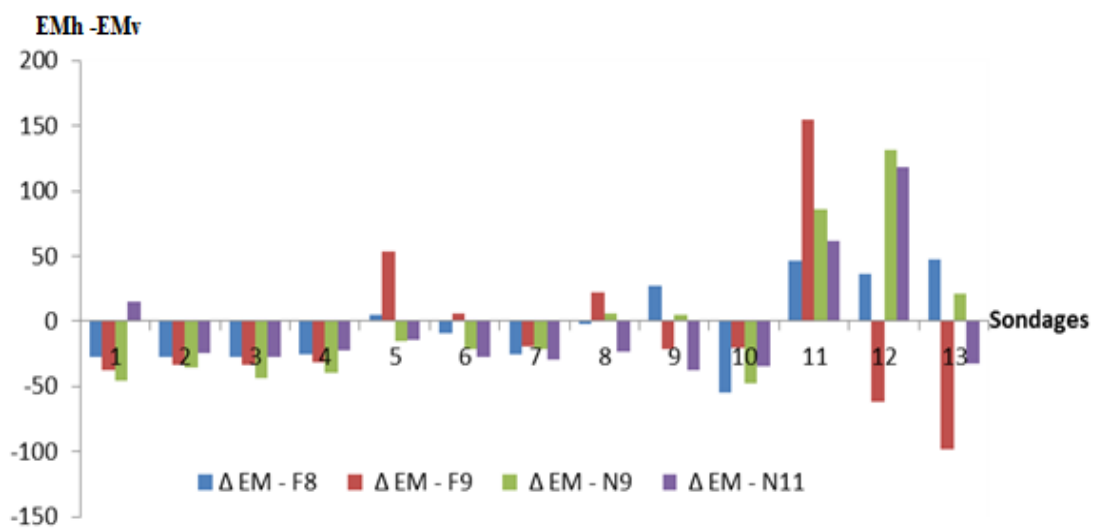


Figure 4-9. Evolution saisonnière des profils salins EM du site A

Tableaux 4-6. Ecart minimal et maximal des EM entre EMv et EMh du site A

	F8	F9	N9	N11
Ecart minimal (dS/m)	-55	-98	-48	-38
Ecart maximal (dS/m)	47	155	131	118

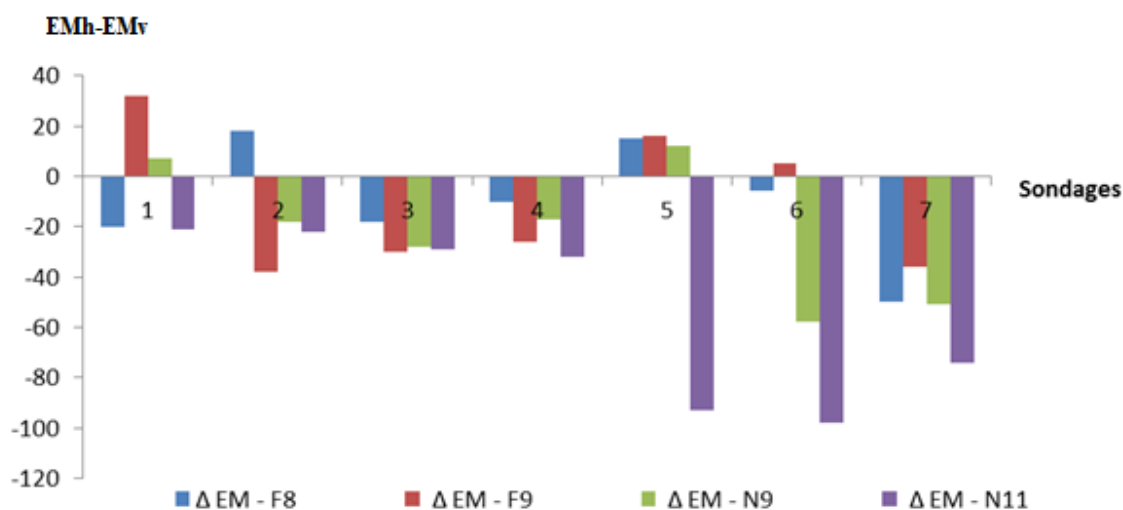


Figure 4-10. Evolution saisonnière des profils salins EM du site B

Tableaux 4-7. Ecart minimal et maximal des entre EMv et EMh du site B

	F8	F9	N9	N11
Ecart minimal (dS/m)	-50	-38	-58	-98
Ecart maximal (dS/m)	18	32	12	-21

- **Le site C** : Les types de profils salins sont illustrés par la figure 4-11 qui révèle que l'allure des profils salin est assez homogène dans l'espace et ce quelle que soit la campagne de mesures. La figure montre que tous les profils salins sont de type descendant excepté le sondage 1 de la troisième campagne (N11) qui est de type approximativement uniforme. Les écarts de salinité (illustrés par les longueurs des bâtonnets) entre sondages d'une même campagne de mesures sont également très variables (Tableau 4-8). Ce résultat engendre une certaine variabilité spatiale de la salinité. La figure 4-11 met en évidence des différences remarquables entre profils salins du même sondage établis lors des différentes campagnes. En effet, les différences entre EMh et EMv varient entre -40 dS/m (F9 : sondage 10) et 2 dS/m (N9 : sondage1). Ce résultat montre que la campagne de mesure n'a pas d'impact sur le type du profil salin, par contre son impact sur la salinité du sol reste très remarquable.

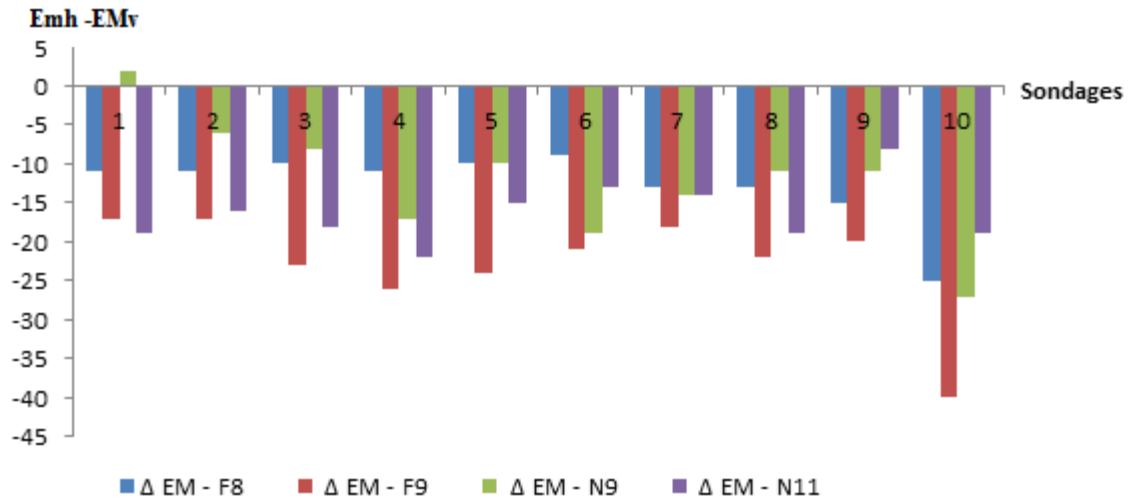


Figure 4-11. Evolution saisonnière des profils salins EM du site C

Tableaux 4-8. Ecart minimal et maximal des entre EMv et EMh du site C

	F8	F9	N9	N11
Ecart minimal (dS/m)	-25	-40	-27	-22
Ecart maximal (dS/m)	-9	-17	2	-8

- **Le site D** : Les types de profils salins sont illustrés par la figure 4-12 qui montre que le profil salin est assez variable dans l'espace et ce quelle que soit la campagne de mesures. En effet, pour une même campagne de mesures, le profil salin est soit ascendant, soit descendant ou uniforme. Ainsi, il s'est avéré que pour les quatre campagnes, 25 % des profils sont ascendants, 65,9 % sont descendants et 9,1 % sont uniformes. Les écarts de salinité (illustrés par les longueurs des bâtonnets) entre sondages d'une même campagne de mesures sont également très variables (Tableau 4-9). Ce résultat traduit une certaine variabilité spatiale de la salinité et une hétérogénéité des profils salins. La figure 4-12 met en évidence des différences notables entre profils salins du même sondage établis lors des différentes campagnes. En effet, les différences entre EMh et EMv varient entre -148 dS/m (N9 : sondage 8) et 161 dS/m (F9 : sondage 5). Le profil salin peut même parfois s'inverser comme c'est le cas des sondages 1, 4, 5, 6, 7, 10 et 11. Ce résultat signifie que la campagne de mesure impacte le profil salin et la salinité du site D. Les résultats montrent aussi que la différence entre EMv et EMh du site D est nettement plus élevée dans la partie médiane par rapport aux

parties amont et aval. Ce résultat traduit une très grande hétérogénéité verticale des EM dans la partie médiane.

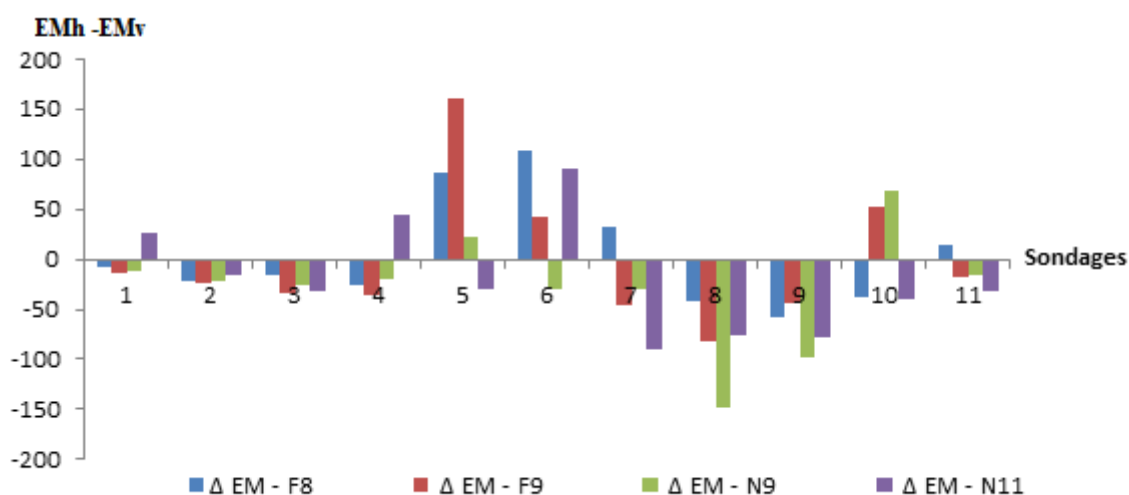


Figure 4-12. Evolution temporelle du profils salins EM du site D

Tableaux 4-9. Ecart minimal et maximal des entre EMv et EMh du site D

	F8	F9	N9	N11
Ecart minimal (dS/m)	-57	-83	-148	- 91
Ecart maximal (dS/m)	109	161	68	90

Discussion

Les résultats obtenus montrent que les valeurs moyennes de EM sont comprises entre 24 et 251 dS/m ce qui dénote le caractère très conducteur des sites d'étude mais aussi la forte variabilité de ce paramètre. Ces niveaux de conductivité très élevés sont en relation avec le caractère très salin des sols étudiés. De même, quelle que soit la campagne considérée, EM est très variable en A, B et D ($35\% < CV\% < 118\%$) pour les deux profondeurs considérées. Cette variabilité est moins élevée dans le site C ($13\% < CV\% < 67\%$) du fait qu'il se démarque des autres sites par une salinité relativement plus faible, une texture plus argileuse, une humidité moins élevée et par des taux de CaCO_3 un peu plus forts. Nous rappelons que ces trois derniers paramètres ont un fort impact sur la réponse de EM38 et qu'ils présentent des corrélations statistiquement hautement significatives avec EM (tableau 4-3). Ces résultats concordent avec ceux de Corwin et al. (2006) qui montrent que EM augmente avec l'augmentation du taux d'argile et de l'humidité et qu'elle diminue avec l'augmentation du

CaCO₃. Les résultats montrent aussi que les sites A, D et C présentent un gradient croissant de EM de l'amont vers l'aval qui est en relation avec le gradient de pente. Cette distribution de EM est en relation avec la distribution de la salinité (site A, C et D) et de l'humidité (site B et C) qui présente d'une manière générale la même tendance de distribution. Cette concordance de distribution entre EM d'une part et la salinité et l'humidité d'autre part, confirme les résultats obtenus auparavant et qui montrent que ces deux paramètres restent les facteurs les plus influençant sur les mesures électromagnétiques (paragraphe 4.1).

Les résultats montrent aussi que le profil EM est variable dans l'espace et ce quelle que soit la campagne de mesures. En effet, tous les sites étudiés se caractérisent par une dynamique saisonnière de la salinité marquée par une remontée ou une descente des sels dans le profil. Cette distribution de salinité s'explique principalement par la dynamique de l'humidité dans le sol qui modifie le profil salin en amplifiant ou en réduisant les différences de salinité entre les deux profondeurs considérées. En effet, cette dynamique d'humidité est liée probablement à la particularité de chaque site concernant les pratiques agricoles (types de cultures et méthode irrigations) et à la profondeur de la nappe.

En conclusion, les résultats obtenus suggèrent qu'il est possible d'étudier la variabilité spatiotemporelle de la salinité par utilisation de EM et de la cartographier avec une bonne précision dans la zone d'étude.

4. Cartographie spatio-temporelle de la salinité par EM

A ce niveau, il s'agira de tester la capacité de EM à cartographier et à réaliser le suivi spatiotemporel de la salinité du sol dans ce genre de milieu.

La démarche retenue comporte quatre étapes :

- Il s'agit d'abord de réaliser un modèle d'étalonnage de EM à partir des données pour lesquelles nous disposons à la fois des mesures de EM et des mesures de CEeq (figure 2-10).
- Par la suite, nous procédons à la validation du modèle de prédiction par utilisation des tests statistiques entre les valeurs mesurées (CEeq) et les valeurs prédites (CEp).
- Dans une troisième étape, nous appliquons le modèle d'étalonnage sur l'ensemble des sites pour convertir les EM en CEp.
- Pour terminer, nous utilisons les méthodes géostatistiques sur les valeurs de CEp obtenues à partir du modèle d'étalonnage pour dresser les cartes de salinité pour des couches de sols 0-90 cm et 0-150 cm des parcelles A, B et C.

4.1. Etalonnage de EM

Comme évoqué dans le chapitre II, les mesures de CE ont été effectuées sur cinq profondeurs du sol (0-30cm, 30-60cm ; 60-90 cm, 90-120 cm et 120-150 cm) de chacun des transects TA, TB, TC et TD (figure 2-10). Il s'agit de les corrélérer aux données de EM pour des couches de sols de 0-90 cm en position horizontale et de 0-150 cm en position verticale. Pour ce faire, les valeurs de CEeq ont été pondérées pour des couches de sols de 0-90 cm et de 0-150 cm. De ce fait il devient possible de trouver une relation mathématique entre CEeq et EM qui permettra de convertir EM en CEp. Pour ce faire, nous avons utilisé un modèle de régression linéaire simple (RLS) entre EM et CEeq tout en considérant que la salinité du sol est le seul facteur responsable de la variation de EM (De Jong et al., 1979 ; Job et al., 1987 ; Herrero et al., 2003). L'effet dominant de la salinité du sol sur EM ($r \geq 0.76$) et l'existence de gradients sud-nord de EM très marqué concordant parfaitement au gradient de CEeq (figures 3-21 à 3-28) masquent l'effet des autres paramètres pédologiques sur EM et minimisent leur impact. De ce fait, la cartographie de la salinité par ce modèle devient possible et suffisamment précise (Cook et al., 1989 ; Sudduth et al., 2005 ; Viscarra Rossel et al., 2011 ; Kuang et al., 2012). Pour ce faire, nous avons utilisé deux équations RLS qui relient EM à CEeq, l'une pour la couche du sol 0-90 cm et l'autre pour la couche 0-150 cm. Ces équations sont de types :

- $CEeq_{(0-150\text{ cm})} = a \text{ EM}_v + b \dots \dots \dots \text{RLS1}$

- $CEeq_{(0-90\text{ cm})} = a' \text{ EM}_h + b' \dots \dots \dots \text{RLS2}$

Avec :

EM_v : EM en mode vertical

EM_h : EM en mode horizontal.

CEeq₍₀₋₁₅₀₎: moyenne des CEEq pour les cinq niveaux de prélèvement (0-30 ; 30-60 ; 60-90 ; 90-120 ; 120-150 cm) pondérée pour une couche de 150 cm.

CEeq₍₀₋₉₀₎: moyenne des CEEq pour les trois niveaux de prélèvement du sol (0-30 ; 30-60 ; 60-90) pondérée pour une couche de 90 cm.

a, et, a', coefficients de régression

b et b' : constantes

Les paramètres des équations d'étalonnage qui relient CEEq aux EM par les modèles RLS1 et RLS2 sont présentés dans le tableau 4-10.

Le tableau 4-10 montre que les coefficients de corrélation r des cinq équations sont tous statistiquement significatifs ($p < 0,05$) à très hautement significatifs ($p < 0.001$) avec des r compris entre 0,77 et 0,98. Ce résultat signifie qu'au sein des quatre sites, CEEq est convenablement estimée par RLS quelle que soit la campagne de mesures. Ce résultat concorde avec celui de nombreux travaux dans le domaine (Job et al., 1987 ; Bennett et al., 1995 ; Herrero et al., 2003 ; Kaman., 2008 ; Feikema et Baker, 2011).

4.2. Validation des équations d'étalonnage

Nous avons utilisé le test de Wilcoxon pour la validation des équations d'étalonnage entre les valeurs de CEEq mesurées et CE_p prédites. Les CE_p sont obtenues par l'introduction des valeurs de EM_v et EM_h réalisées sur TA, TB, TC et TD dans les différentes équations d'étalonnage (Tableau 4 -11).

Les résultats (Tableau 4-11) montrent que les différences entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites sont toutes statistiquement non significatives ($p > 0,05$) ce qui traduit une bonne prédiction de la salinité par le biais des différentes équations. L'utilisation des

équations d'étalonnage permettra donc de transformer convenablement EM en CE_p. Les CE_p ainsi obtenues seront traitées par les méthodes statistiques et géostatistiques.

Tableau 4-10. Paramètres de RLS1 et RLS2 des quatre sites d'étude pour les quatre campagnes de mesures

F8				
	RLS 1	r	RLS 2	r
Site A	$CE_{eq(0-150)} = 0,077 EM_V + 15,48$	0,82***	$CE_{eq(0-90)} = 0,076 EM_H + 14,21$	0,81***
Site B	$CE_{eq(0-150)} = 0,102 EM_V + 29,02$	0,94**	$CE_{eq(0-90)} = 0,076 EM_H + 32,82$	0,77*
Site C	$CE_{eq(0-150)} = 0,537 EM_V - 9,187$	0,93***	$CE_{eq(0-90)} = 0,680 EM_H - 6,797$	0,94***
Site D	$CE_{eq(0-150)} = 0,169 EM_V + 17,63$	0,89***	$CE_{eq(0-90)} = 0,206 EM_H + 14,93$	0,92***
F9				
	RLS 1	r	RLS 2	r
Site A	$CE_{eq(0-150)} = 0,116 EM_V + 6,178$	0,87***	$CE_{eq(0-90)} = 0,137 EM_H + 2,031$	0,93***
Site B	$CE_{eq(0-150)} = 0,099 EM_V + 17,28$	0,87*	$CE_{eq(0-90)} = 0,127 EM_H + 12,34$	0,89**
Site C	$CE_{eq(0-150)} = 0,290 EM_V - 6,361$	0,91***	$CE_{eq(0-90)} = 0,254 EM_H + 0,126$	0,88***
Site D	$CE_{eq(0-150)} = 0,155 EM_V + 17,52$	0,88***	$CE_{eq(0-90)} = 0,193 EM_H + 10,58$	0,86***
N9				
	RLS 1	r	RLS 2	r
Site A	$CE_{eq(0-150)} = 0,070 EM_V + 15,88$	0,84***	$CE_{eq(0-90)} = 0,08 EM_H + 13,39$	0,87***
Site B	$CE_{eq(0-150)} = 0,097 EM_V + 27,85$	0,87*	$CE_{eq(0-90)} = 0,17 EM_H + 23,42$	0,85*
Site C	$CE_{eq(0-150)} = 0,760 EM_V - 13,38$	0,93***	$CE_{eq(0-90)} = 1,30 EM_H - 19,81$	0,90***
Site D	$CE_{eq(0-150)} = 0,170 EM_V + 2,68$	0,90***	$CE_{eq(0-90)} = 0,19 EM_H + 8,19$	0,81**
N11				
	RLS 1	r	RLS 2	r
Site A	$CE_{eq(0-150)} = 0,124 EM_V + 5,17$	0,98***	$CE_{eq(0-90)} = 0,115 EM_H + 5,46$	0,95***
Site B	$CE_{eq(0-150)} = 0,092 EM_V + 5,26$	0,96***	$CE_{eq(0-90)} = 0,155 EM_H - 3,12$	0,92**
Site C	$CE_{eq(0-150)} = 0,690 EM_V - 24,71$	0,91***	$CE_{eq(0-90)} = 0,326 EM_H + 4,31$	0,85**
Site D	$CE_{eq(0-150)} = 0,140 EM_V + 4,56$	0,96***	$CE_{eq(0-90)} = 0,163 EM_H + 5,86$	0,86***

*, **, *** Significatif à $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$, respectivement

Tableau 4-11. Test de Wilcoxon entre CE_{eq} et CE_p

Campagnes	Modèles	p (SiteA)	p (SiteB)	p (SiteC)	p (Site D)
F8	RLS 1	0,917	0,866	0,799	0,722
	RLS 2	0,917	0,735	0,878	0,929
F9	RLS 1	0,972	0,735	0,878	0,790
	RLS 2	0,972	0,612	0,799	1,000
N9	RLS 1	0,917	0,866	0,959	0,790
	RLS 2	0,917	0,735	0,878	0,722
N11	RLS 1	0,422	0,866	0,799	0,929
	RLS 2	0,917	0,310	0,386	0,859

* Significatif à $P < 0,05$

4.3. Analyse statistique de CEp

Nous présentons successivement les résultats obtenus pour les sites A, B, C, et D. Nous rappelons que les calculs statistiques sur CEp ont été effectués sur un effectif de 125 à 145 pour le site A, 105 à 126 pour le site B, 78 à 106 pour le site C et 25 pour le site D selon la campagne de mesures considérée.

- **Le site A** : Le tableau 4-12 présente les paramètres statistiques des CEp du site A pour les quatre campagnes de mesure.

Tableau 4-12. Paramètres statistiques de CEp du site A

	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	Méd	1 ^{er} Quar	3 ^{ème} Quar	ET	CV %
Site A- F8	0-90	24,6	16,0	75,8	59,7	21,5	18,1	27,4	10,3	42%
	0-150	26,2	15,9	69,4	53,4	24,0	21,1	27,4	9,3	35%
Site A- F9	0-90	22,9	6,3	48,0	41,8	22,0	14,9	31,1	10,2	45%
	0-150	23,4	7,2	45,5	38,3	23,5	18,4	27,8	6,7	29%
Site A- N9	0-90	24,1	15,7	63,9	48,1	23,0	18,2	27,6	7,1	29%
	0-150	27,2	18,3	63,4	45,1	26,5	23,1	29,8	5,5	20%
Site A- N11	0-90	20,2	11,3	142,2	130,9	16,3	13,5	21,4	14,7	73%
	0-150	22,8	5,2	123,0	117,9	18,4	14,7	25,8	15,5	68%

Les résultats mentionnés dans le tableau 4-12 montrent que CEp moyenne est très élevée ($20,2 < CEp < 27,2$ dS/m) pour toutes les périodes de mesures et dans les deux couches du sol. Ces résultats suggèrent que le site A est fortement salé durant toute l'année. Cependant, comparativement aux autres campagnes de mesures, la campagne N11 est relativement la moins salée avec des CEp moyennes inférieures à 23 dS/m et avec 50 % et 75 % de ses valeurs qui sont inférieures à 18,5 dS/m et 26 dS/m. Ces valeurs sont un peu plus fortes au sein des autres campagnes. Les résultats montrent aussi que les différences entre les valeurs minimales et maximales (plages) sont très élevées et varient entre 38,3 dS/m (F9 : 0-150 cm) et 130,9 dS/m (N11 : 0-90 cm). Ceci signifie que la salinité est assez variable au sein d'une même couche et ce quelle que soit la période de mesure. Ce résultat est traduit par le CV qui varie de 20 % (N9 0-150 cm) à 73 % (N11 0-90cm). Toutefois, il y a lieu de remarquer que cette variabilité de CEp est plus élevée pour la couche 0-90 cm que pour la couche de 0-150 cm. Ce résultat concorde bien avec les résultats obtenue auparavant pour les mesures de la CEEq et qui montrent que les plus grandes variations de ce paramètre sont observées au niveau des horizons de surface (tableau 3-14). Ce résultat traduit ainsi la bonne prédiction de la salinité par le biais des équations d'étalonnage obtenues par le modèle RLS

- **Le site B** : les paramètres statistiques des CEp du site B sont représentés dans le tableau 4-13.

Les résultats mentionnés dans tableau 4-13 révèlent que CEp moyenne, toutes couches confondues, est très élevée et varient entre 10,3 dS/m et 44,7 dS/m, ce qui dénote le caractère fortement salin du site B. Cependant, les résultats de ce tableau révèlent aussi que la campagne N11 est relativement moins salée par rapport aux autres campagnes. En effet, les valeurs de CEp de cette campagne sont comprises entre 2,9 dS/m et 34,6 dS/m, tandis que les valeurs médianes sont inférieures à 17 dS/m et que 75% des valeurs sont inférieures à 19 dS/m. Les résultats montrent aussi que les valeurs de la plage fluctuent entre 16,3 dS/m et 89,9 dS/m selon la couche de sol et la campagne de mesures considérée. Ceci signifie que la salinité est assez variable au sein d'une même couche et ce quelle que soit la période de mesure. Les résultats montrent aussi la particularité du site B qui présente des niveaux de variabilité moins élevés par rapport aux autres sites avec des CV qui varient de 10 % (F8 : 0-90cm) à 51 % (N11 : 0-90cm).

Tableau 4-13. Paramètres statistiques de CEp du site B

	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	Méd	1 ^{er} Quar	3 ^{ème} quar	ET	CV %
Site B- F8	0-90	40,4	36,5	52,8	16,3	38,8	37,7	41,5	3,9	10%
	0-150	41,1	30,2	57,3	27,0	39,2	37,7	42,6	5,2	13%
Site B- F9	0-90	25,6	17,8	84,9	67,1	21,6	19,7	26,9	10,5	41%
	0-150	30,6	24,0	61,1	37,1	27,3	26,0	30,1	8,1	26%
Site B- N9	0-90	46,3	29,4	119,2	89,9	42,7	36,7	50,8	14,9	32%
	0-150	44,7	33,9	76,7	42,8	41,4	38,3	48,8	9,1	20%
Site B-N11	0-90	10,3	2,9	34,6	31,6	9,6	6,4	12,9	5,3	51%
	0-150	17,0	7,6	34,2	26,6	16,1	14,3	18,6	4,2	25%

- **Le site C** : Le tableau 4-14 présente les paramètres statistiques des CEp du site C pour les quatre campagnes de mesure. Comparativement aux autres sites, les résultats révèlent que le site C est relativement peu salé surtout lors des deux premières campagnes de mesures. En effet, CEp moyenne est inférieure à 7,5 dS/m en F8 et F9 et elle est inférieure à 17 dS/m en N9 et N11. Les valeurs minimales varient entre 0,1 dS/m et 9,8 dS/m et les valeurs maximales varient entre 22,5 dS/m et 79,1 dS/m. Les quartiles indiquent que 50% des mesures sont inférieures à 16 dS/m et que 75% le sont à 19 dS/m. Les valeurs de la plage, quant à elles, sont comprises entre 12,7 dS/m et 78,1 dS/m selon la couche de sol et la période de mesures. Ceci signifie que la salinité est assez variable au sein d'une même couche et ce quelle que soit

la période de mesure comme indiqué par les CV qui varient de 16 % (N11 : 0-90cm) à 64 % (N9 : 0-90cm).

Tableau 4-14. Paramètres statistiques de la CEp du site C

	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	Méd	1 ^{er} Quar	3 ^{ème} Quar	ET	CV %
Site C- F8	0-90	7,2	3,4	27,2	23,8	6,1	4,8	7,5	4,1	57%
	0-150	8,4	3,2	28,9	25,8	7,5	6,4	8,9	4,3	51%
Site C- F9	0-90	6,2	2,7	23,5	20,8	5,7	5,0	6,7	2,8	45%
	0-150	6,6	0,1	28,5	28,4	6,2	4,5	7,7	4,2	63%
Site C- N9	0-90	15,1	1,0	79,1	78,1	14,0	8,8	18,9	9,6	64%
	0-150	14,6	7,1	29,9	22,8	14,7	11,7	16,8	4,2	29%
Site C- N11	0-90	16,2	9,8	22,5	12,7	15,4	14,4	18,2	2,5	16%
	0-150	14,3	2,9	29,8	26,9	13,9	9,8	18,8	6,0	42%

- **Le site D** : Le tableau 4-15 regroupe les paramètres statistiques des CEp du site D pour les quatre campagnes de mesure. Il y a lieu de remarquer que CEp moyenne de TD est extrêmement élevée (CE moyenne > 34,8 dS/m) quelles que soient la couche du sol et la période de mesures considérées (tableau 4-15). Ce tableau montre aussi que CEp fluctue fortement au sein d'une même couche avec des valeurs minimales comprises entre 6,8 dS/m (N11 : 0-150 cm) et 21,4 dS/m (F9 : 0-150 cm) et des valeurs maximales comprises entre 63,6 dS/m (N11 : 0-150 cm) et 310,6 dS/m (F8 : 0-90cm). Par ailleurs, les valeurs des quartiles indiquent que plus de 75% des valeurs du CEp sont supérieures à 15 dS/m tandis que 50% de ces valeurs sont supérieures à 36 dS/m, ce qui dénote le caractère hyper salin du site D. Les différences de CEp entre les valeurs maximales et les valeurs minimales varient entre 56,8 dS/m (F8 : 0-90cm) et 302,5 dS/m (F8 : 0-90cm) ce qui signifie que la salinité est très variable au sein d'une même couche de sol (38 % < CV < 60 %).

Tableau 4-15. Paramètres statistiques de CEp du site D

	Profondeurs	Moy	Min	Max	Plage	Méd	1 ^{er} Quar	3 ^{ème} Quar	ET	CV %
Site D- F8	0-90	121,1	8,2	310,6	302,5	141,4	59,1	155,0	72,3	60%
	0-150	96,6	10,1	218,9	208,8	95,5	55,5	134,1	57,3	59%
Site D- F9	0-90	51,5	11,7	95,6	83,9	62,4	23,3	70,0	25,7	50%
	0-150	49,7	21,4	80,8	59,4	52,9	30,0	65,5	19,0	38%
Site D- N9	0-90	52,5	14,6	104,1	89,4	57,4	32,8	65,9	23,4	45%
	0-150	42,7	11,2	83,9	72,7	45,1	30,6	55,7	18,2	43%
Site D- N11	0-90	40,7	7,5	81,6	74,1	46,6	15,1	55,4	22,4	55%
	0-150	34,8	6,8	63,6	56,8	36,5	19,6	46,5	17,4	50%

Ces résultats sont bien illustrés par les figures 4-13, 4-14 et 4-15 et 4-16 qui mettent, en plus, en évidence les distributions des fréquences de CEp selon les classes de salinité (USSSL, 1954) pour les quatre sites. Ces figures montrent que la classe des sols extrêmement salins (CEp >16 dS/m) est la plus représentée pour les sites A, B et D où elle dépasse les 50% du totale des mesures pour atteindre parfois les 100% en A et en B. Par contre, le site C est caractérisé par des niveaux de salinité moins élevés avec une prédominance de la classe des sols salins (4 dS/m < CEp < 8 dS/m) pour les deux premières campagnes de mesures, soit entre 60,92 et 74.71 % du totale des mesures.

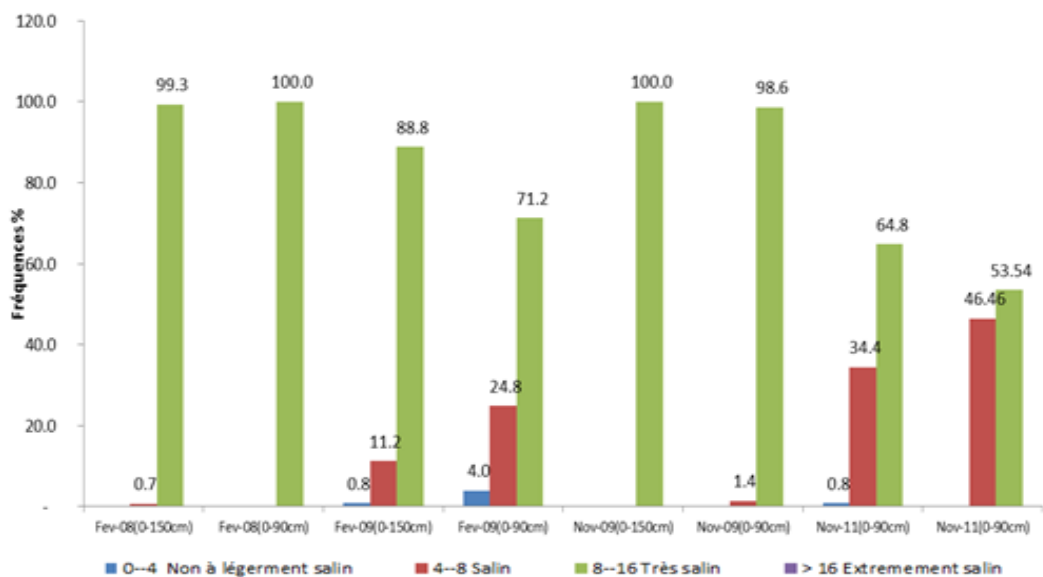


Figure 4-13. Fréquences de CEp du site A

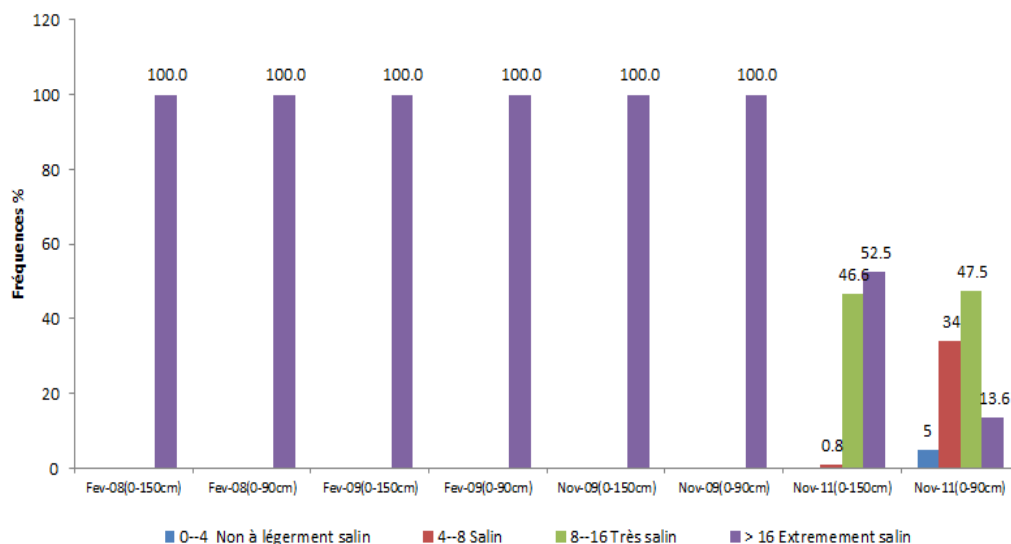


Figure 4-14. Fréquences de CEp du site B

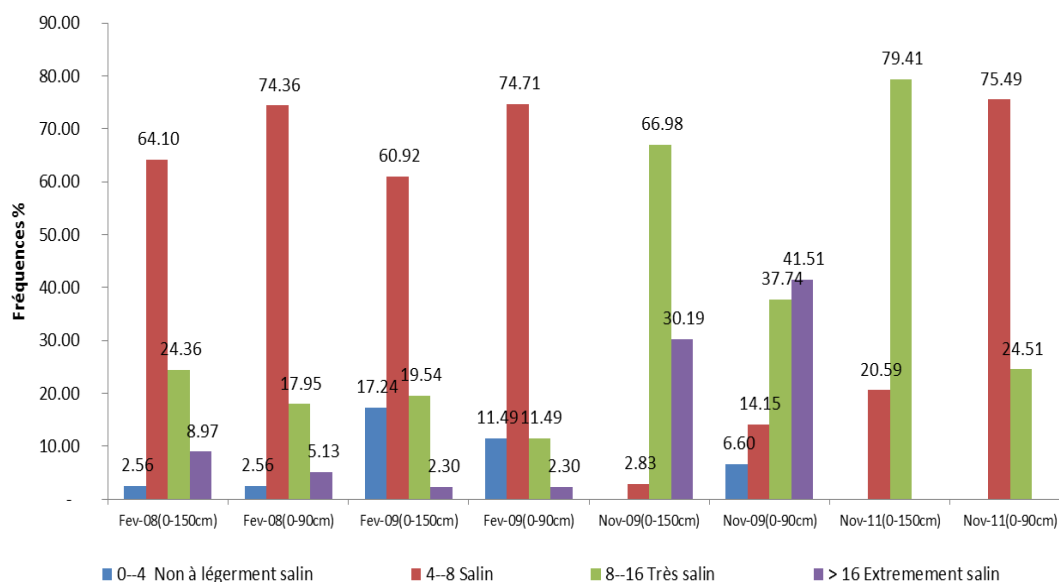


Figure 4-15. Fréquences de CEp du site C

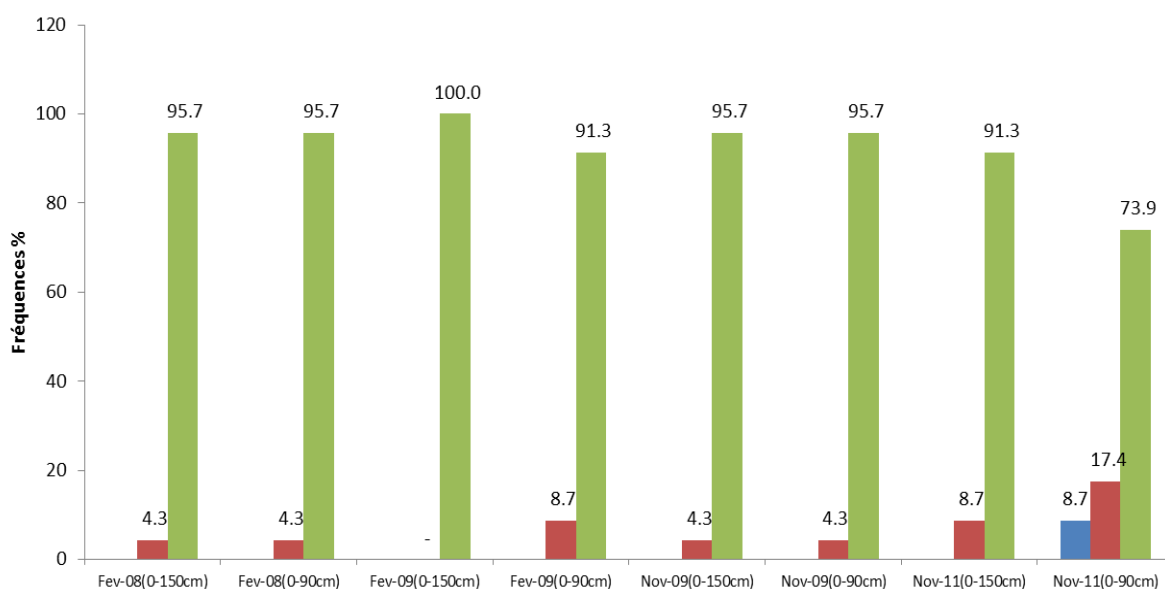


Figure 4-16. Fréquences de CEp du site D

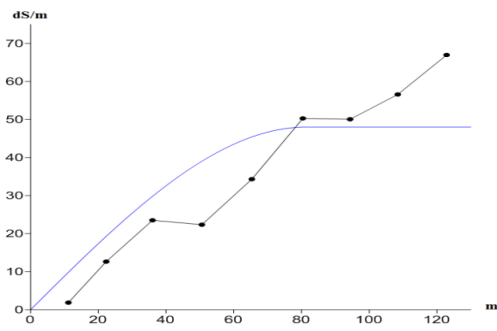
4.4. Cartographie en courbes d'isovaleur de la CEp

Dans cette étape, il s'agit d'estimer CEp en tout point non mesuré du secteur d'étude. Pour cela, des cartes d'isovaleurs seront dressées pour des profondeurs de 90 cm et 150 cm qui correspondent respectivement aux limites inférieures des EM en modes horizontal et vertical. Cette étude ne porte que sur les sites A, B et C qui sont des parcelles cultivées et délimitées. La réalisation des cartes d'isovaleurs nécessite de procéder d'abord à une analyse de la structure spatiale de CEp. Il s'agit, en fait, de construire des semivariogrammes

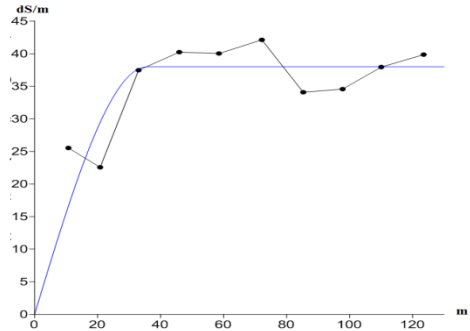
expérimentaux ajustés à des semivariogrammes théoriques qui seront ensuite modélisés et utilisés pour estimer par krigeage ordinaire les valeurs de CEp sur des points où la mesure n'a pas été effectuée.

4.4.1. Analyse de la structure spatiale

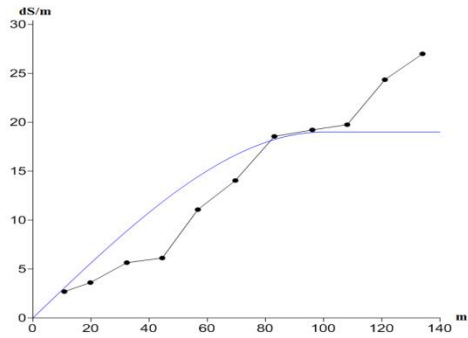
Les semivariogrammes réalisés pour les sites A, B et C sont illustrés par les figures 4-17 à 4-22 et leurs paramètres sont regroupés dans le tableau 4-16. Les figures montrent que les semivariogrammes expérimentaux sont clairement structurés et qu'ils sont adaptés à des modèles sphériques, à l'exception du site C qui est ajusté au modèle gaussien. Le meilleur ajustement du variogramme est assuré par la fonction Autofit du logiciel surfer. Cette fonction se base sur des calculs algorithmique proposée par Press et al. (1988). Les modèles mathématiques sphériques sont souvent très cités dans les études des sciences du sol (Carvalho et al., 2002 ; Molin et Faulin., 2013). Dans leurs travaux, Cetin et Krida (2003) ont adapté EM du sol à des modèles sphériques et gaussiens. Les semivariogrammes présentent une divergence dans leur dépendance spatiale avec des paliers qui varient entre 19 et 78 pour le site A, entre 10 et 170 pour le site B et entre 5,2 et 45,5 pour le site C, ce qui explique entre 19,8% et 246,7% de la variabilité totale ((palier/variance) %). Les semivariogrammes du site C (N9et N11) sont caractérisés par la présence d'une erreur aléatoire causée par un effet de pépite qui varie entre 0,5 et 10,5 et qui représentent respectivement 2% et 48% de la variabilité total ((effet de pépite/variance) %) avec une forte dépendance spatiale ((effet de pépite/palier) $\times 100 < 25\%$) (Cambardella et al., 1994). Les semivariogrammes montrent également que les valeurs de la portée varient d'un site à l'autre avec une valeur minimale de 20 m (site C, N11 : 0-150cm). Cette portée correspond à la valeur moyenne du pas de mesures de EM, ce qui traduit une bonne qualité d'interpolation.



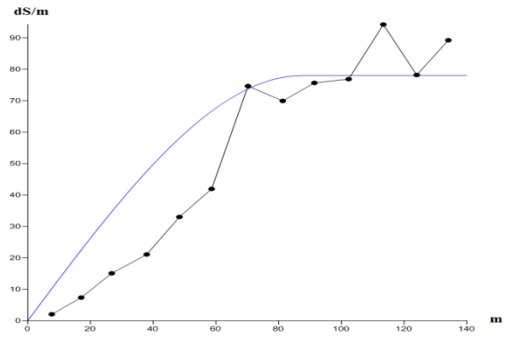
F8



F9

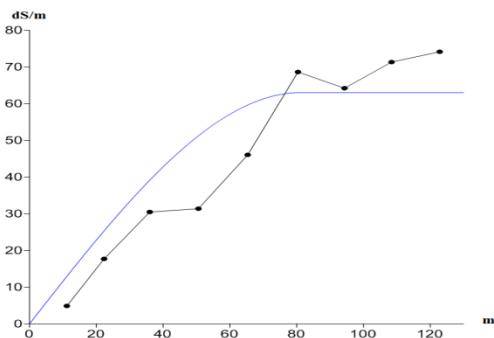


N9

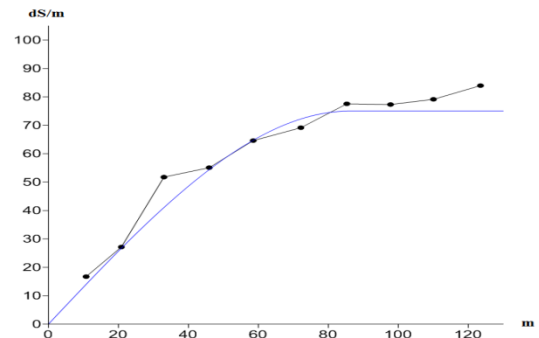


N11

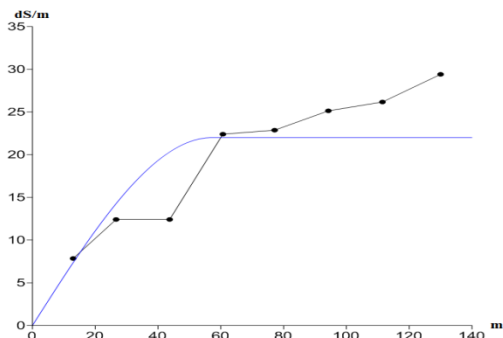
Figure 4-17. Semivariogrammes ajustés du site A (0 -150 cm)



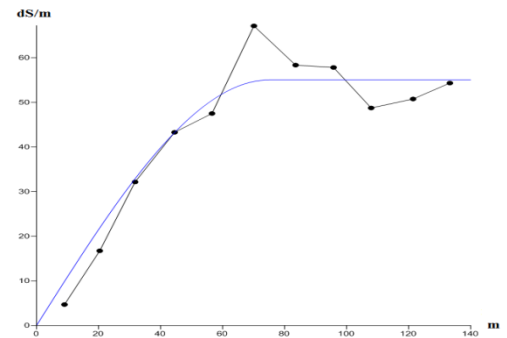
F8



F9



N9



N11

Figure 4-18. Semivariogrammes ajustés du site A (0 -90 cm)

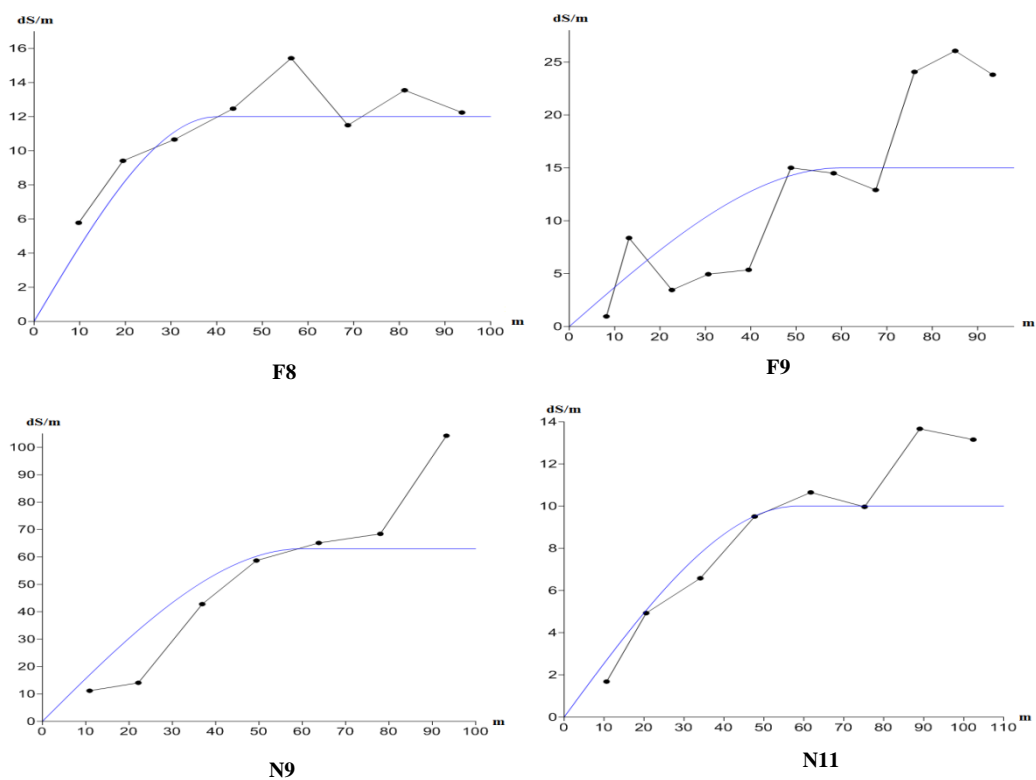


Figure 4-19. Semivariogrammes ajustés du site Site B (0 -150 cm)

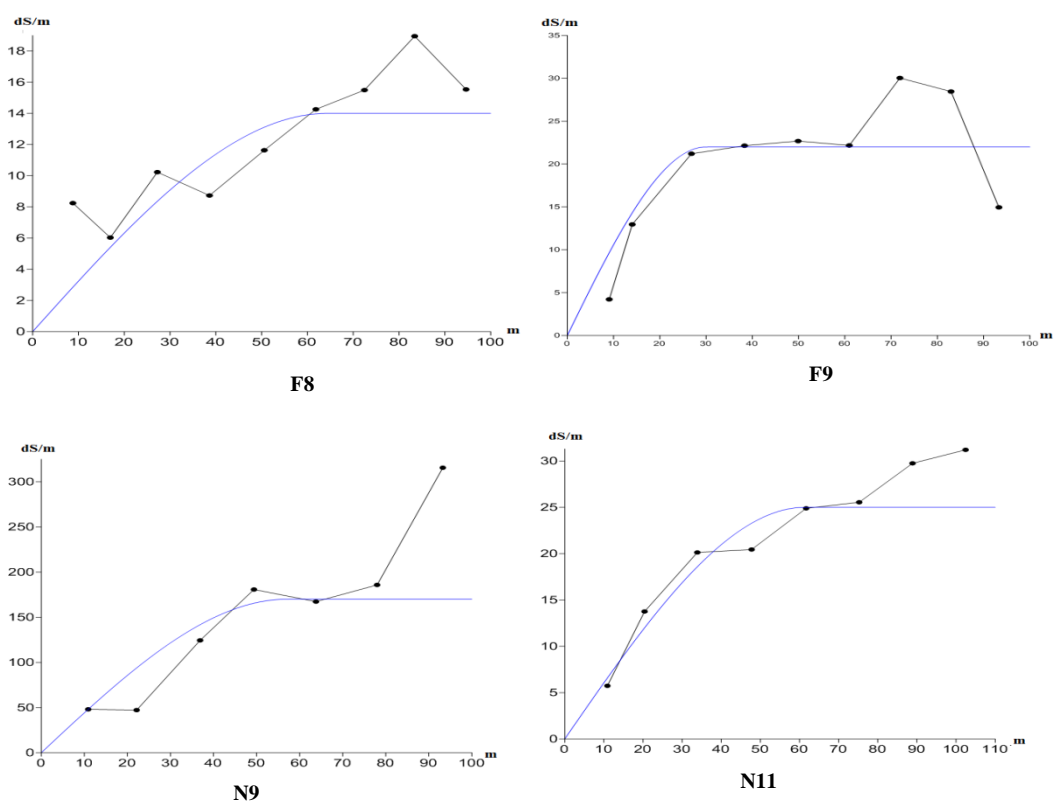
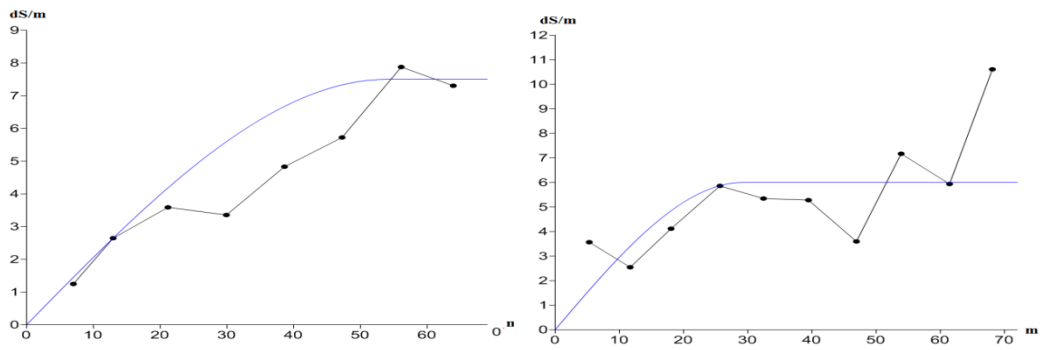
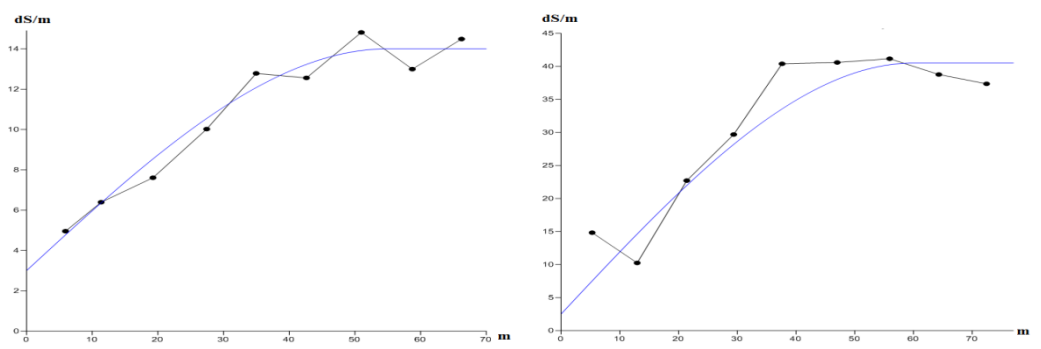


Figure 4-20. Semivariogrammes ajustés du site B (0 -90 cm)



F8

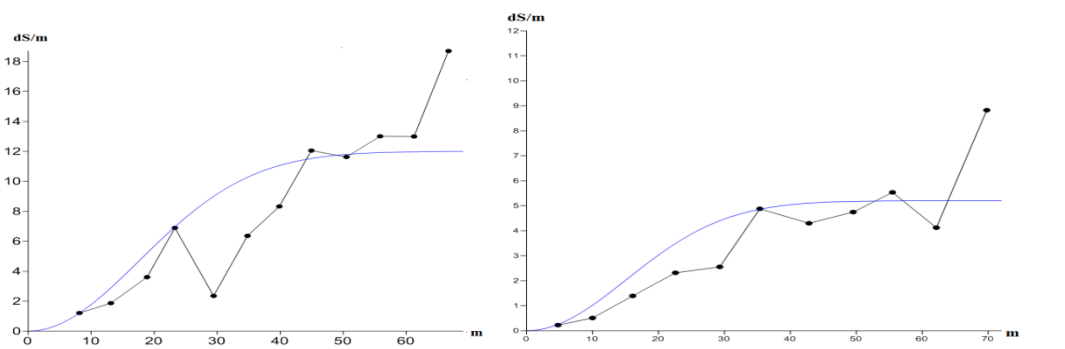
F9



N9

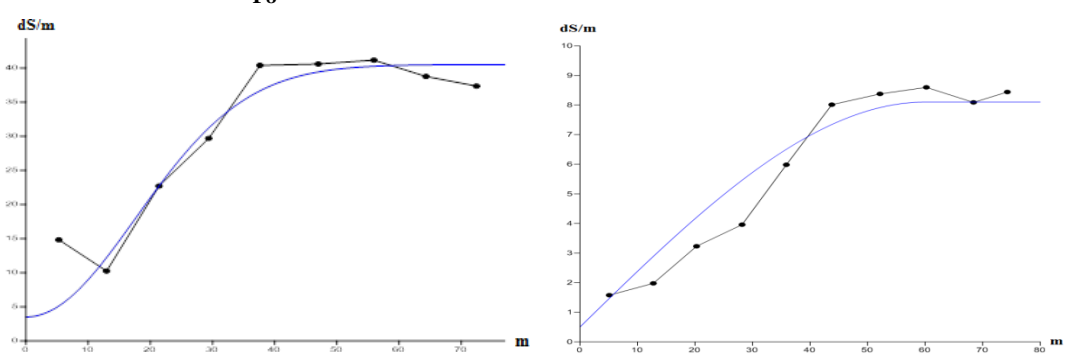
N11

Figure 4-21. Semivariogrammes ajustés du site C (0 -150 cm)



F8

F9



N9

N11

Figure 4-22. Semivariogrammes ajustés du site C (0 -90 cm)

Tableau 4-16. Caractéristiques des semivariogrammes des sites A, B et C

	Profondeur (0-150 cm)				Profondeur (0-90 cm)			
Site A	F9	F9	N9	N11	F9	F9	N9	N11
modèle	Sphérique							
Palier	48	38	19	78	63	75	22	55
Variance	86,41	45,08	30,41	239,42	106,95	105,03	50,40	215,34
(Palier/variance)%	55,5%	84,3%	62,5%	32,6%	58,9%	71,4%	43,7%	25,5%
Portée	81	35	100	87	81	86	57	75
Anisotropie	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8	0,5	0,7	0,6
Effet de pépite	0	0	0	0	0	0	0	0
(Effet de pépite /palier)%	0	0	0	0	0	0	0	0
Site B	Profondeur (0-150 cm)				Profondeur (0-90 cm)			
modèle	Sphérique							
Palier	12	15	63	10	14	22	170	25
Variance	26,57	65,46	82,98	17,61	15,12	110,99	220,87	28,06
(Palier/variance)%	45,2%	22,9%	75,9%	56,8%	92,6%	19,8%	77,0%	89,1%
Portée	40	60	60	58	64	30	57	61
Anisotropie	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,7	0,7
Effet de pépite	0	0	0	0	0	0	0	0
(Effet de pépite /palier)%	0	0	0	0	0	0	0	0
Site C	Profondeur (0-150 cm)				Profondeur (0-90 cm)			
modèle	Sphérique				Gaussien		Sphérique	
Palier	7,5	6	14	37	12	5,2	45,5	7,6
Variance	18,25	17,54	6,20	15	16,97	8,00	92,91	24
(Palier/variance)%	41,1%	34,2%	225,8%	246,7%	70,7%	65,0%	49,0%	31,7%
Portée	54	31	55	20	25	26	25	20
Anisotropie	0,5	0,8	0,6	0,6	0,8	0,7	0,8	0,4
Effet de pépite	0	0	3	3,5	0	0	10,5	0,5
(Effet de pépite/variance)%	0	0	48,39	23,33	0	0	11,3	2,08
(Effet de pépite /palier)%	0	0	21,4	9,5	0	0	23	6,6

4.4.2. Cartographie de la salinité

Les cartes d'isovaleurs issues de l'analyse géostatistique de CEp pour les sites A, B et C sont représentées par les figures (4-23, 4-24, 4-27, 4-28, 4-31 et 4-32). L'interpolation a été effectuée par krigeage ordinaire. Ce type de krigeage est largement utilisé pour caractériser et cartographier la variation spatiale de la salinité des sols (Lesch et al., 1998 ; Herrero et al., 2003 ; Adam et al., 2012). La réalisation des cartes et le calcul des superficies ont été établis par le logiciel Surfer 11. Les couleurs utilisées ont été choisies pour correspondre aux classes de salinité de l'USDA (USSS, 1954).

4.4.2.1. Analyse des cartes d'isovaleurs du site A

L'observation des cartes du site A (figures 4-23 et 4-24) rejoint les résultats obtenus précédemment (Chapitre 3 : figures 3-21 et 3-22) et confirme le gradient de salinité de l'amont vers l'aval et ce pour les deux couches de sol pendant toutes les périodes de mesures. En effet, les cartes révèlent l'existence d'une zone relativement la moins salée ($4 < CE < 24$ dS/m) au centre et à l'amont de la parcelle A quelle que soit la profondeur du sol et quelle que soit la campagne de mesure considérée. La salinité croît ensuite de façon très remarquable ($CE > 64$ dS/m) dans la zone aval, c'est à dire au nord du site d'étude. Cette distribution de la salinité concorde parfaitement avec la distribution spatiotemporelle de la CEEq au niveau des transects et à la distribution spatiale de EM (figures 3-21, 3-22 et 4-5). Les cartes obtenues révèlent également que, quelle que soit la campagne de mesures considérée, l'organisation spatiale de la salinité est toujours la même aussi bien dans la couche du sol 0-90 cm que dans la couche 0-150 cm, mais leurs amplitudes de variation suivant la direction du gradient de salinité est différente. En effet, dans le détail, on remarque que la salinité est beaucoup moins forte dans les campagnes N9 et N11 avec l'apparition des sols à $CE < 16$ dS/m, qui occupent entre 5,2% et 44,5% de la superficie totale du site A (figure 4-25 et tableau 1 - annexe 9). Par ailleurs, l'observation des cartes montre que la salinité au niveau de la couche 0-150 cm est plus élevée que celle observée au niveau de la couche 0-90 cm et cela quelle que soit la période de mesure. Ce résultat suggère que la salinité est plus forte en profondeur qu'en surface.

Pour évaluer la variabilité temporelle de la salinité, nous avons calculé les écarts en valeurs absolues entre les superficies d'occupation de chaque classe de salinité des quatre périodes de mesures (figure 4-26 et tableau 2- annexe 9).

Les résultats révèlent que les écarts absolus des superficies sont extrêmement variables et ce quels que soient la couche du sol et le couple de périodes considérés. Les écarts totaux varient entre 22% et 89% pour la couche 0-90 cm et entre 34% et 84% pour la couche 0-150 cm. Ce résultat suggère que quelle que soit la profondeur du sol considérée, la salinité du site A est très impactée par le facteur temps. Les résultats montrent aussi que l'évolution temporelle est moins marquée entre les campagnes F8-N9 pour les deux couches de profondeur et entre F9-N11 pour la couche de surface. Cette différence de la distribution spatiale de la salinité lors des différentes campagnes de mesures traduit l'impact de l'effet 'période de mesure' sur l'augmentation ou la diminution de la salinité.

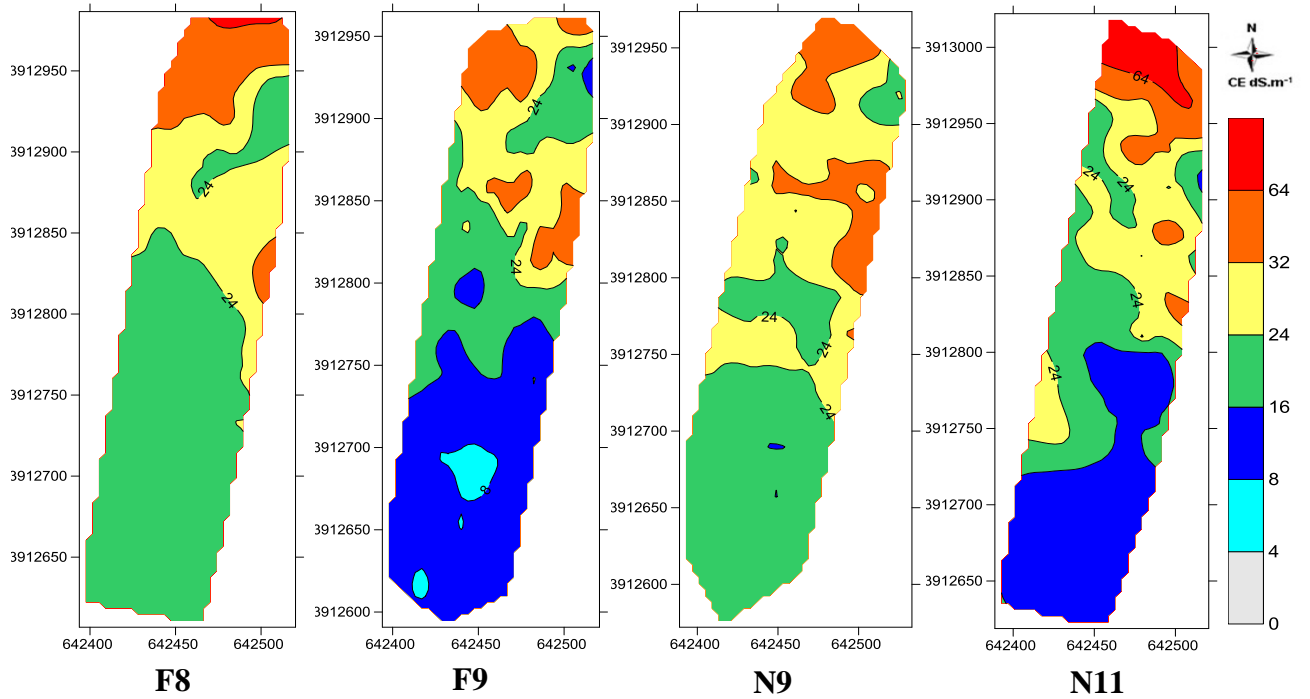


Figure 4-23. Cartes d'isovaleurs du site A Site A (0 -90 cm)

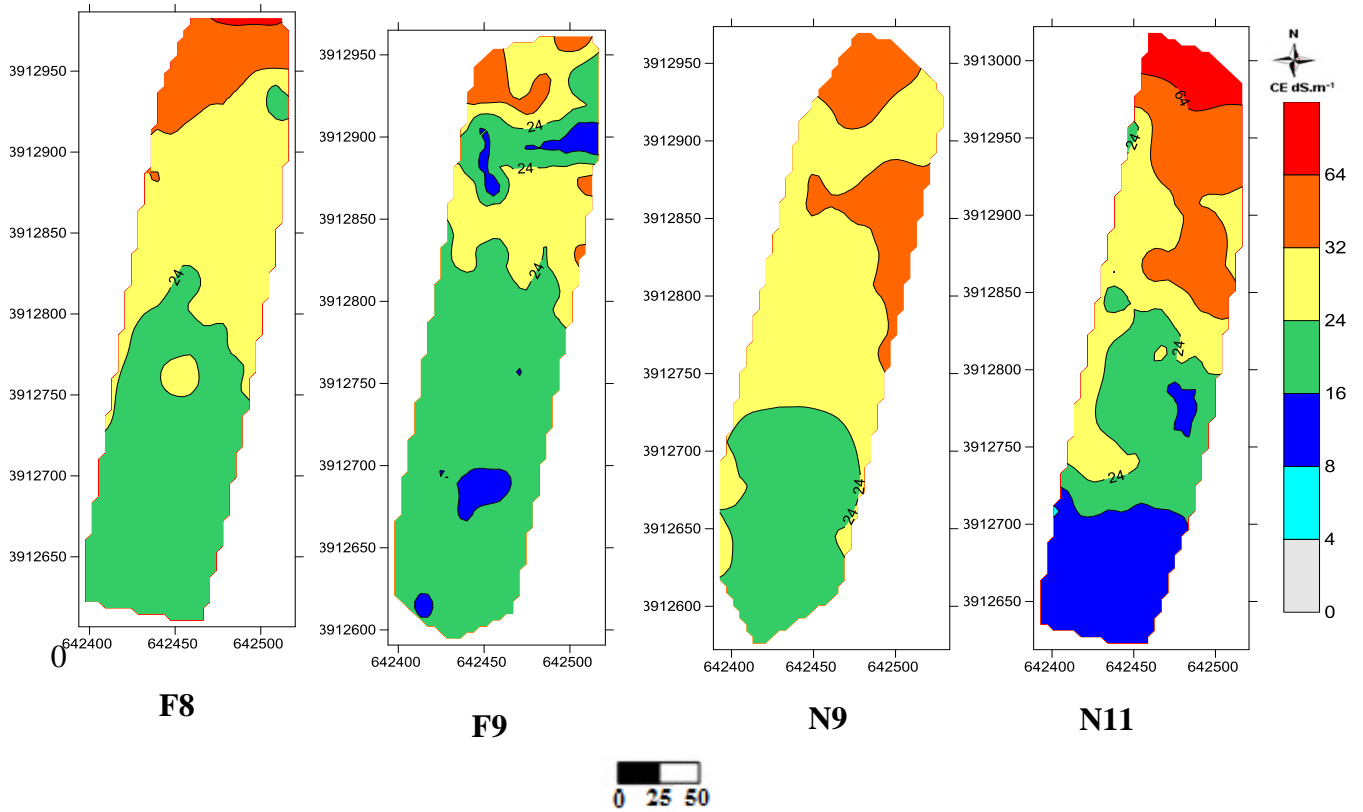
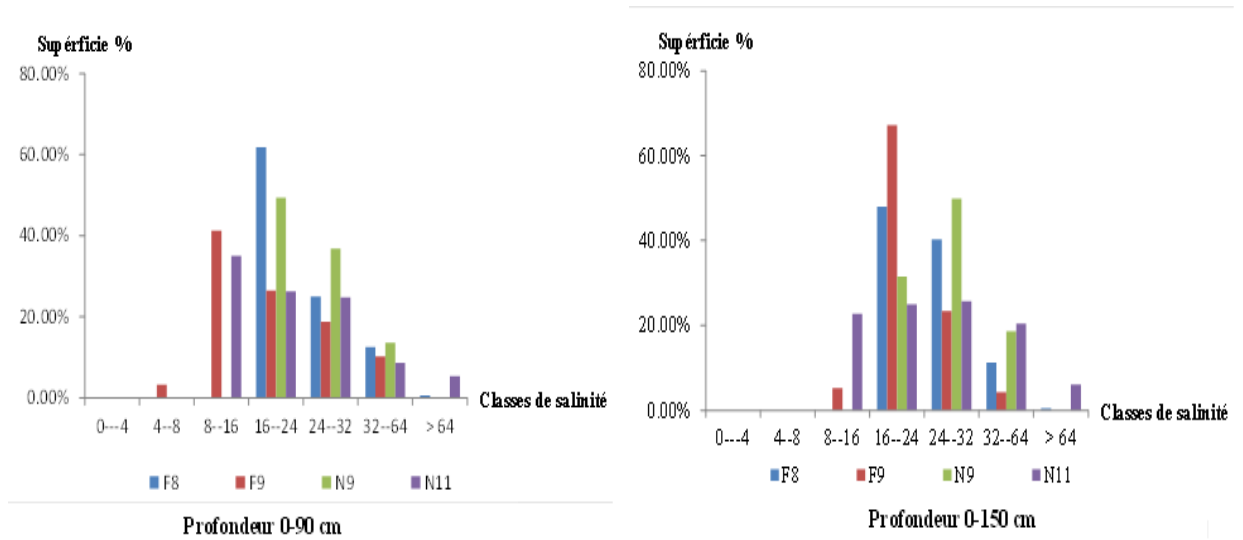
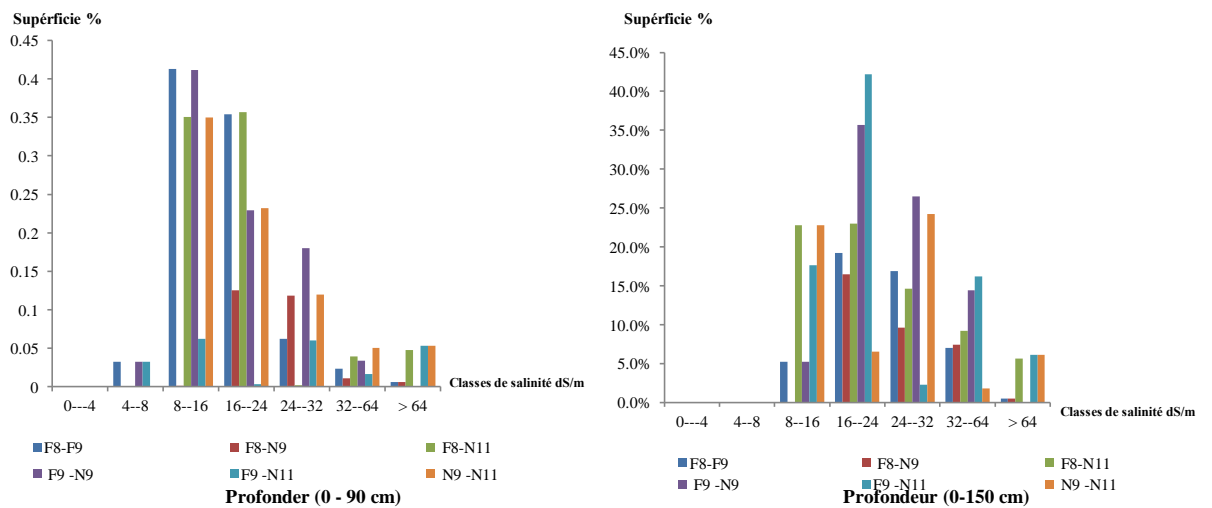


Figure 4-24. Cartes d'isovaleurs du site A Site A (0 -150 cm)



Figures 4-25. Superficies% des classes de salinité dans le site A



Figures 4-26. Ecart absolu entre les différentes périodes des superficies% des classes de salinité dans le site A

4.4.2.2. Analyse des cartes d'isovaleurs du site B

Comparativement aux autres sites, les cartes du site B (figures 4-27 et 4-28) présentent une certaine homogénéité spatiale quelle que soit la campagne de mesure et pour les deux niveaux de profondeur. Cette homogénéité concerne plus particulièrement la première et la troisième campagne. Ce résultat concorde bien avec les résultats obtenus précédemment (tableaux 3-11 et 4-13) qui montrent que le site B présente des niveaux de variabilité moins élevés par rapport aux autres sites. En effet, les cartes de F8 et N9 sont constituées principalement par les classes de CEp comprises entre 32 dS/m et 64 dS/m qui représentent plus de 89% de la

superficie totale (figure 4-29 et tableau 3- annexe 9). Les résultats révèlent aussi que les campagnes F9 et N11 sont relativement moins salées que celles de F8 et N9. De même, dans les cartes F9 et N11, les niveaux de salinité les plus faibles se situent essentiellement au sud de la parcelle avec un gradient de salinité qui ne reflète pas l'aspect habituelle de la zone d'étude.

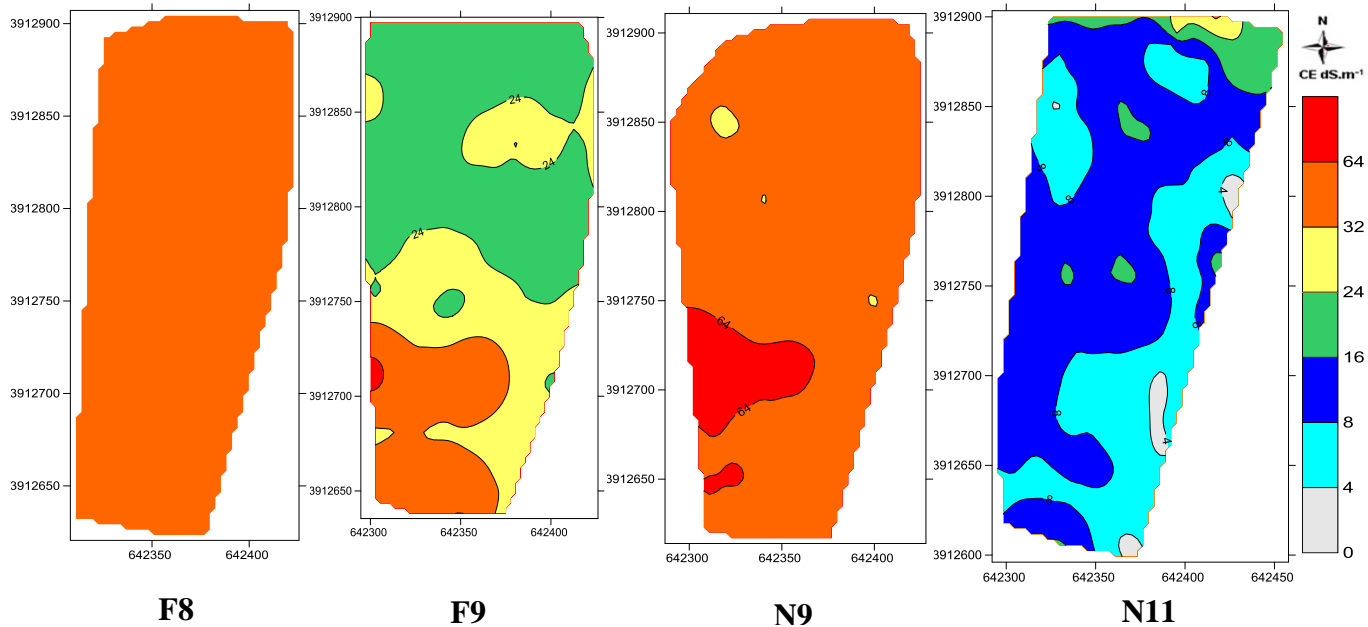


Figure 4-27. Cartes d'isovaleurs du Site B (0 -90 cm)

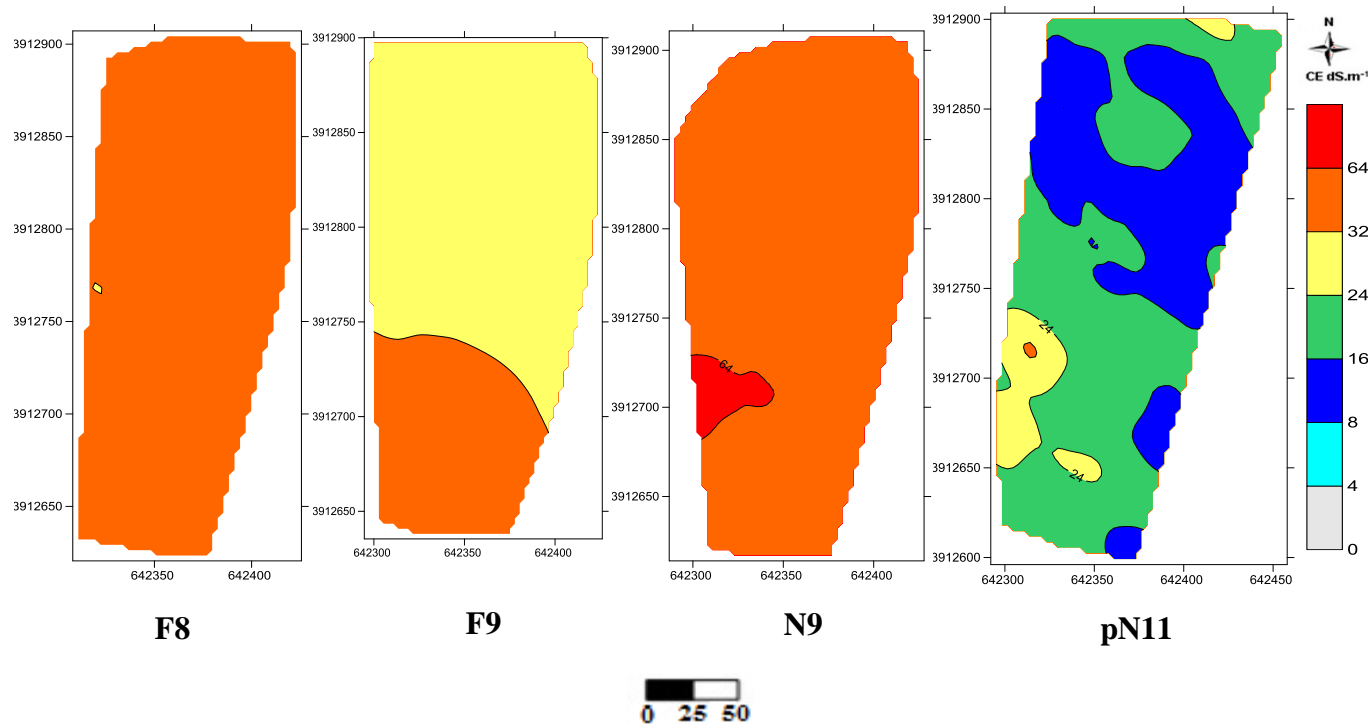
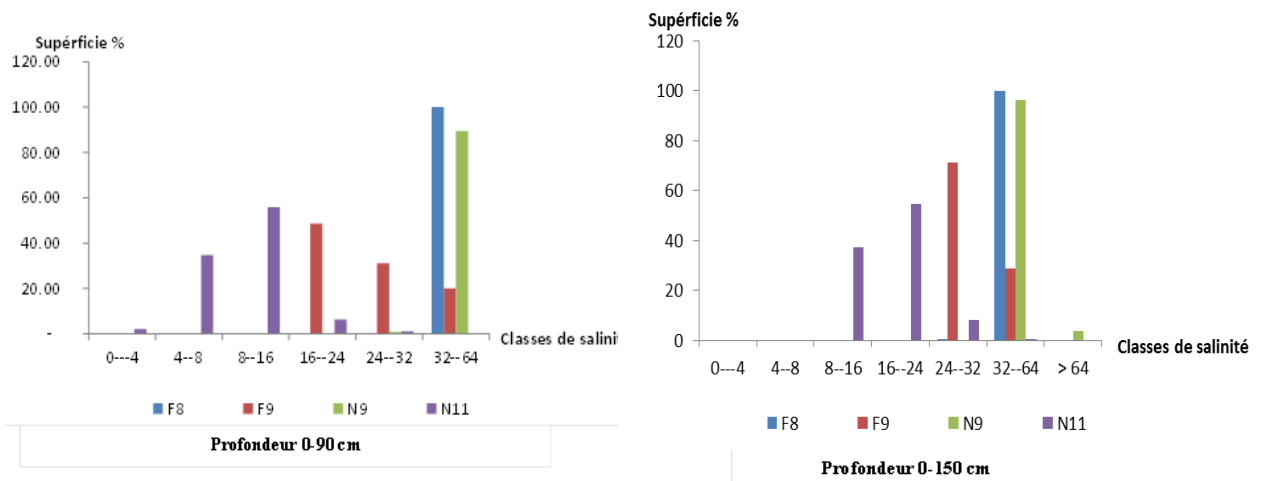
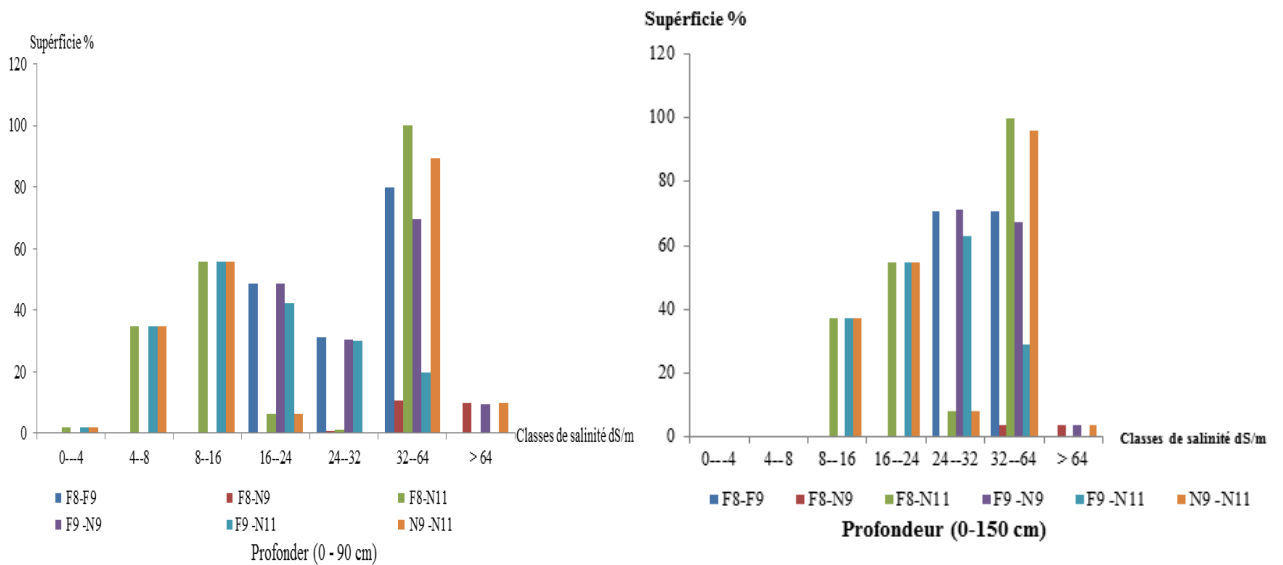


Figure 4-28. Cartes d'isovaleurs du Site B (0 -150 cm)

Les écarts totaux absolus des superficies des classes de salinité entre les différentes périodes de mesures au sein de chaque couche de sol (figure 4-30 et tableau 4- annexe 9) sont extrêmement variables ce qui suggère une forte influence du facteur temps. En effet, les écarts totaux varient entre 21% et 199% pour la couche 0-90 cm et entre 7% et 196% pour la couche 0-150 cm. Ce résultat traduit que la salinité du site B est très impactée par le facteur temps pour les deux couches de profondeurs. Les résultats du tableau montrent aussi que l'évolution temporelle est moins marquée entre les campagnes F8-N9 et cela pour les deux couches de profondeur. Cette différence de comportement de la salinité entre les différentes campagnes de mesures traduit l'impact de l'effet 'période de mesure'.



Figures 4-29. Superficiess% des classes de salinité dans le site B



Figures 4-30. Ecart absolu entre les différentes périodes des superficies% des classes de salinité dans le site B

4.4.2.3. Analyse des cartes d'isovaleurs du site C

Comparativement aux autres sites, les résultats (figures 4-31 et 4-32) révèlent que le site C est relativement peu salé quelles que soient les périodes de mesures et la profondeur du sol considérée. En effet, 94 % de la superficie de ce site se caractérisent par une salinité inférieure à 24 dS/m (figure 4-33 et tableau 5- annexe 9).

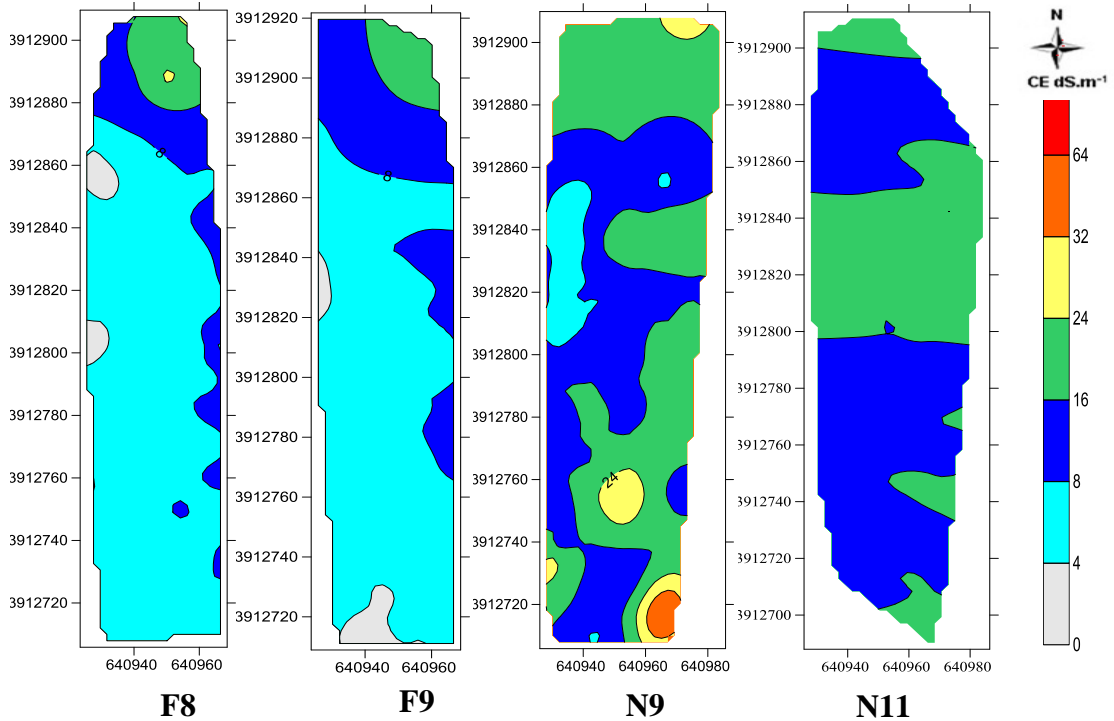
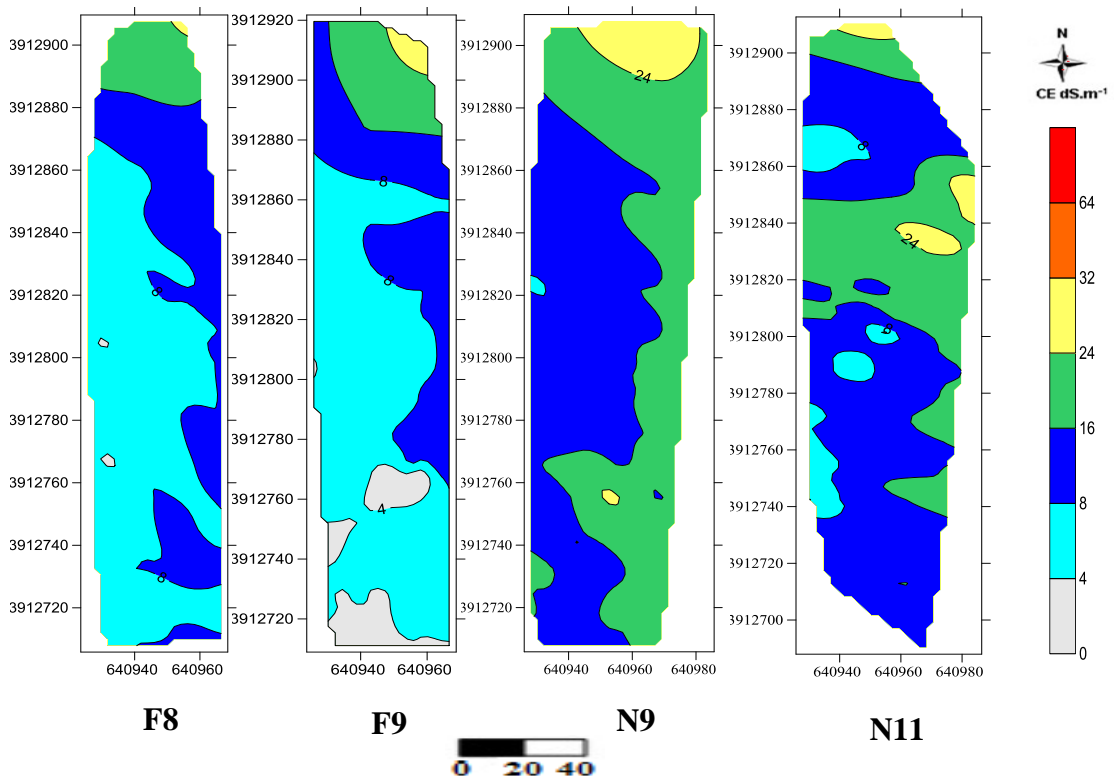


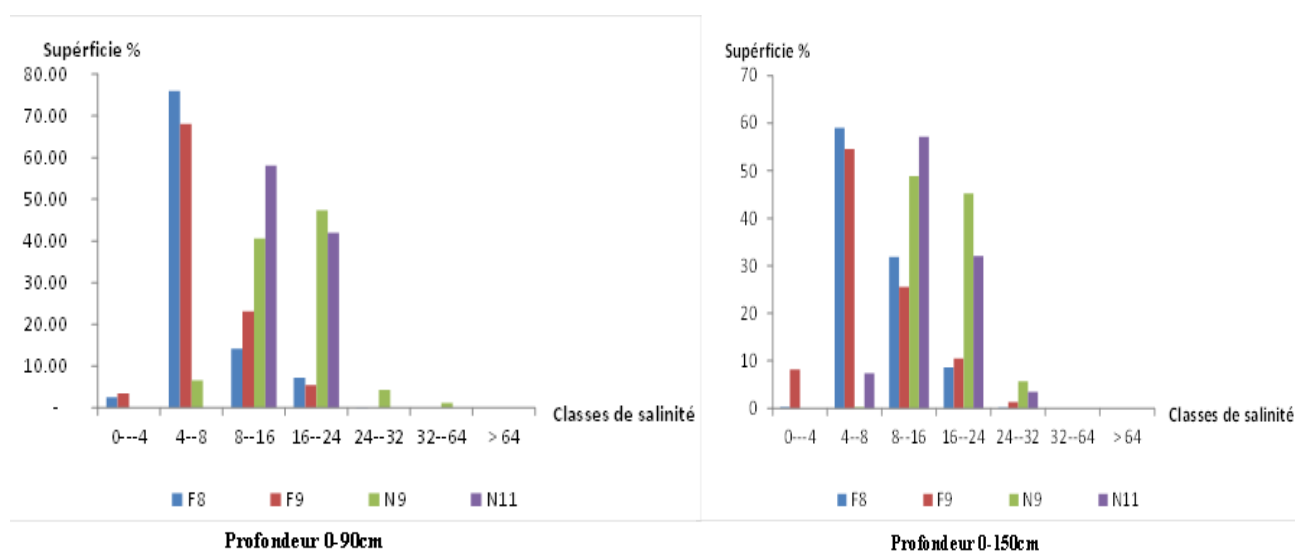
Figure 4-31. Cartes d'isovaleurs du Site C (0 -90 cm)



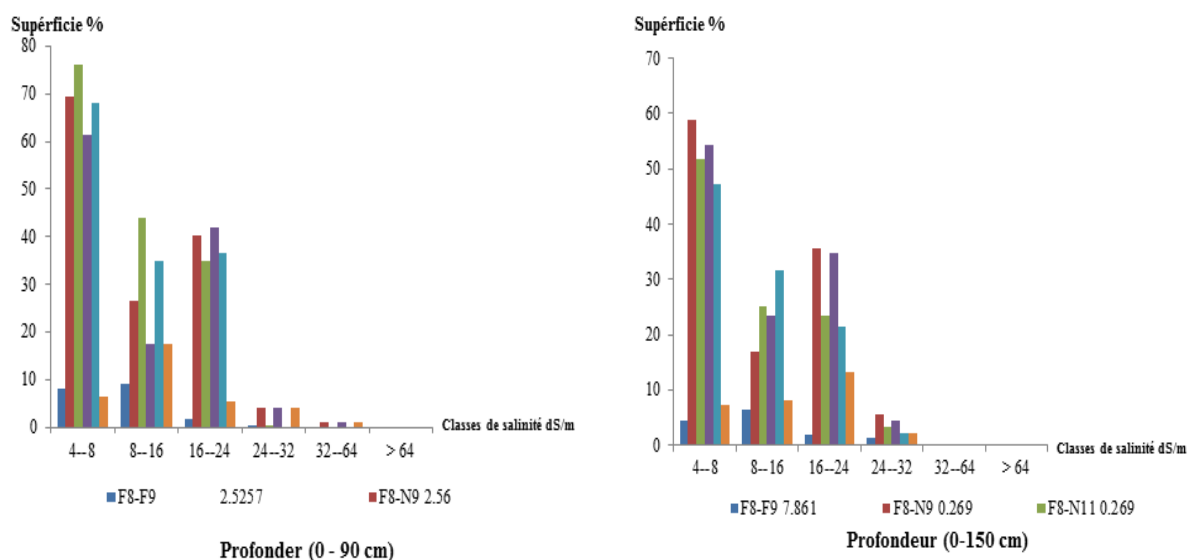
Figures 4-32. Cartes d'isovaleurs du Site C (0 -150 cm)

Notons aussi que les niveaux de salinité les plus faibles apparaissent essentiellement au sud-ouest du site et que les valeurs les plus élevées se situent à l'est et au nord du site C. La comparaison entre les cartes montre que CE décroît dans le temps dans le sens F8 > F9 > N9 ≈ N11 où les niveaux de salinité les plus élevés sont observés après les périodes les plus sèches (N9 et N11). On note une augmentation de la salinité de F8 à N9 puis une légère diminution de N9 à N11 et cela pour les deux couches de profondeurs.

Les écarts absolus des superficies des classes de salinité entre les différentes périodes de mesures au sein de chaque couche de sol sont extrêmement variables, ce qui suggère une forte influence du facteur temps (figure 4-34 et tableau 6- annexe 9). En effet, les écarts totaux varient entre 21% et 157% pour la couche 0-90 cm et entre 17% et 224% pour la couche 0-150 cm. Ainsi, quelles que soient les couches de profondeur considérées, la salinité du site C reste très impactée par le facteur temps. Les résultats montrent aussi que l'évolution temporelle est moins marquée entre les campagnes F8-F9 et entre N9-N11 pour les deux couches de profondeur. Cette différence de comportement des cartes entre les différentes campagnes de mesure traduit l'impact de l'effet 'période de mesure' sur l'augmentation ou la diminution de la salinité.



Figures 4-33. Superficies% des classes de salinité dans le site C



Figures 4-34. Ecart absolu entre les différentes périodes des superficies% des classes de salinité dans le site C

Conclusion

Ce volet de la recherche avait pour objectif de tester la capacité de la méthode électromagnétique à cartographier et à réaliser un suivi spatiotemporel de la salinité du sol dans une zone aride, sableuse et différemment utilisée par les pratiques agricoles. Les résultats obtenus ont montré que :

- Les équations d'étalonnage obtenues par le modèle RLS entre C_{Eq} et EM établis dans les quatre sites d'étude ont abouti à des relations statistiquement significatives ($p < 0,05$) à très hautement significatives ($p < 0,001$) avec des r comprises entre 0,77 et 0,98.
- Le test de Wilcoxon a montré que les différences entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées sont statistiquement non significatives. Ces résultats suggèrent que pour les quatre sites, C_{Eq} est convenablement estimée par le modèle RLS et ce quelle que soit la campagne de mesures considérée.
- L'utilisation des différentes équations d'étalonnage reliant C_{Eq} à EM ont permis de prédire C_{Ep} des différents sites d'étude pour les deux niveaux de profondeurs du sol (0-90 cm et 0-150 cm). Les C_{Ep} ainsi obtenues ont été traitées par les méthodes statistiques et géostatistiques (variographie et krigeage) pour réaliser les cartes d'isovaleurs.
- L'analyse statistique des valeurs de C_{Ep} a montré que C_{Ep} moyenne est forte dans les quatre sites d'étude ($6,2 \text{ dS/m} < C_{Ep} < 121 \text{ dS/m}$) et ce quelles que soient les périodes de mesures et les couches de profondeur considérées. De même, il s'est avéré que le site C est le moins salé ($6,2 \text{ dS/m} < C_{Ep} \text{ moyennes} < 16,2 \text{ dS/m}$) tandis que le site D est le plus salé

(34,78 dS/m < CE_p moyennes < 121,08 dS/m). Les résultats montrent aussi que les sites A, B et C présentent des CV qui varient fortement d'une campagne à l'autre et qui oscillent entre 10% et 68%. Par contre, les valeurs des CV du site D gardent le même ordre de grandeur, surtout dans la couche (0-90 cm) (38% < CV 60%). Cette hétérogénéité des CV pour les sites A, B et C est serait liée aux pratiques agricoles et donc à l'irrégularité de l'irrigation d'où un comportement salin très variable dans le temps.

La cartographie de la salinité des sols des sites A, B et C à deux niveaux de profondeurs a permis de décrire finement la variabilité spatiale de la salinité et de délimiter de manière assez précise les unités de sols salés et de mettre en évidence la variabilité spatio-temporelle de la salinité. Cette étude a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'analyse variographique a montré que les semivariogrammes obtenus sont bien structurés et qu'ils sont ajustés aux modèles sphérique (site A et B) et gaussien (sites C), modèles obtenus habituellement dans les études des paramètres du sol par EM. Les semivariogrammes obtenus présentent une divergence dans leur structure spatiale. Il ressort aussi que les portées des différents semivariogrammes sont supérieures à la valeur moyenne du pas d'échantillonnage du sol et des sondages électromagnétiques ce qui traduit une bonne qualité d'interpolation.
- Les cartes d'isovaleurs révèlent que les sites A et C se caractérisent approximativement par la même structure spatiale traduite par un gradient croissant de salinité de l'amont vers l'aval et ce quelles que soient la période de mesure et la profondeur d'investigation. Cette distribution est moins marquée dans le site B dont la structure spatiale paraît plus ou moins homogène. Ce résultat corrobore celui de la distribution spatiotemporelle de CE des transects et celle de la distribution spatiale de EM.
- Les écarts absolus des superficies des classes de salinité entre les différentes périodes de mesures au sein de chaque couche de sol sont extrêmement variables ce qui suggèrent une forte influence du facteur temps. Cette différence des classes de salinité entre les différentes campagnes de mesure reflète l'impact de l'effet 'période de mesure' sur l'augmentation ou la diminution de la salinité.

Chapitre V : Prédiction de la salinité du sol par extrapolation d'un modèle d'étalonnage de EM

Dans ce chapitre, nous testerons la qualité de l'estimation de la salinité in situ par utilisation des équations d'étalonnage établies ex situ entre CE mesurée au laboratoire ($CE_{1.5}$) et EM mesurée par l'EM38. Ceci permettra d'évaluer la possibilité de généraliser les équations d'étalonnage réalisées dans un secteur restreint à un secteur plus étendu. Rappelons que l'expérimentation a été réalisée sur 4 sites (A, B, C et D) représentatifs des pratiques agricoles de la zone d'étude. Dans chaque site, des mesures électromagnétiques ont été effectuées par le EM38 en mode vertical (EMv) selon des transects orientés sud-nord correspondant au gradient ascendant de salinité. Ceci a permis de mesurer directement EM sur une profondeur de 150 cm. Au total, 41 mesures ont été réalisées dont 13 sur le site A, 7 sur le site B, 10 sur le site C et 11 sur le site D (figure 2-10). En parallèle, au niveau de chaque point de mesure effectuée par le EM38, des échantillons de sols ont été prélevés à la tarière par incrément de 30 cm jusqu'à une profondeur de 150 cm en vue d'analyses au laboratoire. La granulométrie, les taux de calcaire total et de gypse, le $pH_{eau(2:5)}$, les taux de l'humidité pondérale (H%) et la conductivité électrique mesurée ($CE_{1.5}$) ont été déterminés pour chaque couche de sol et pondérés pour les 150 cm de profondeur. De ce fait, il devient possible d'établir la relation entre EM et $CE_{1.5}$ en posant, pour chaque site d'étude, une équation de type $CE_{1.5} = f(EM, X)$, X étant une ou plusieurs caractéristiques du sols. Ces équations sont dénommées équations A, B, C, D et G respectivement pour les mesures effectuées dans les sites A, B, C et D. L'équation G est obtenue en considérant la totalité des mesures effectuées dans les sites B, C et D. Pour ce faire, trois modèles d'équations ont été établis pour la prédiction de $CE_{1.5}$. Le premier modèle se base sur des équations de régression linéaire simple (RLS) et il considère que seul le facteur $CE_{1.5}$ est responsable de la variation de EM (De Jong et al., 1979 ; Job et al., 1987 ; Herrero et al., 2003 ; Feikema et Baker, 2011). Le deuxième modèle se base sur des équations de régression linéaire multiple (RLM1) du fait qu'il considère que, hormis la $CE_{1.5}$, les taux d'humidité H % peuvent significativement influencer les valeurs de EM (Job, 1992). Le troisième modèle (RLM2) est similaire au deuxième sauf qu'il intègre dans les équations la totalité des paramètres pédologiques mesurés. Ces trois modèles sont de types :

$$-CE_{1.5} = aEMv + c \dots (RLS)$$

$$-CE_{1.5} = aEMv + bH \% + c \dots (RLM1)$$

$$-CE_{1.5} = aEMv + bH\% + cSables\% + dCaCO_3\% + eGypse\% + fpH + g \dots (RLM2)$$

Avec a, b, c, d, e, f: Coefficients de régression ; g est une constante

Cependant, au préalable, il s'agira de rechercher la validité des modèles d'étalonnages basés sur la régression linéaire simple (RLS) ou multiple (RLM) dans leurs sites d'étude et de vérifier dans quelle mesure le modèle RLS peut-il se substituer ou non aux modèles RLM.

Le traitement des équations précédentes est réalisé en deux étapes :

- Dans la première étape, il s'agira de rechercher la validité des équations A, B, C et D obtenues par chacun des trois modèles par rapport aux mesures de $CE_{1.5}$ effectuées dans leurs sites respectifs. De même, les C_{Ec} (conductivité électrique calculée) obtenues dans chaque site par les équations des trois modèles seront comparées entre elles. Les C_{Ec} sont calculées par l'introduction des valeurs de EM_v dans chaque'une des équations des différents modèles d'étalonnage. Au terme de cette étape, l'un des trois modèles sera choisi pour être utilisé dans la suite de cette recherche.

- Dans la deuxième étape, il s'agira d'appliquer au site A (in situ) les équations A, B, C, D et G (équations obtenues ex situ sauf pour A) du modèle choisi pour évaluer la C_{Ec} du site A (in-situ) qui est considéré comme site de référence. Cette démarche permettra d'étudier la possibilité d'utiliser des équations d'étalonnage de EM établies ex situ (étalonnage externe) pour prédire in situ la salinité du sol. Cette étape est scindée en deux phases :

- Dans la première phase, il s'agira de déterminer la C_{Ec} du site A par les équations A (in situ) et B, C, D et G (ex situ) et de les comparer statistiquement aux valeurs correspondantes des $CE_{1.5}$ du site A.

- Dans la deuxième phase, il s'agira d'évaluer la précision des cartes d'isovaleurs de la salinité du site A obtenues par les équations d'étalonnage B, C, D et G. Pour ce faire, 125 mesures de EM_v ont été réalisées systématiquement sur l'ensemble du site A selon un pas approximatif de mesures de 20 m. Les C_{Ec} sont estimées par l'introduction des valeurs de EM_v du site A obtenues par le EM38 dans les équations A, B, C, D, et G du modèle de régression qui sera retenu. Cette démarche permet ensuite de tracer, par krigeage, les courbes d'isovaleurs de la salinité du site A successivement par les équations A, B, C, D et G. Les unités cartographiques représentant les classes de salinité C_{Ec} du site A obtenues par l'équation A (carte de référence) seront confrontées à celles du même site, mais obtenues par les équations B, C, D et G. Il reste à préciser que les traitements effectués dans ce chapitre concernent seulement la campagne de mesure effectuée en novembre 2011.

1. Caractéristiques des sols étudiés

Pour une meilleure compréhension de la démarche, nous représentons les principales caractéristiques des sols des sites A, B, C et D ainsi que les résultats de leurs analyses au laboratoire (**tableau 5-1**). Les moyennes calculées sur la totalité des échantillons montrent que les sols étudiés sont sableux ($\approx 80\%$ de sables), peu pourvus en calcaire ($\approx 4\%$) et en gypse ($\approx 3\%$), alcalins ($\text{pH} \approx 8,5$), peu humides ($\approx 21\%$) et salés ($\text{CE}_{1,5} \approx 2,2 \text{ dS/m}$). Toutefois, les résultats montrent aussi que ces caractéristiques varient différemment dans l'espace comme l'indiquent les écarts types pour chacun de ces paramètres.

En effet, dans le détail, les calculs révèlent la présence de quelques différences entre les sites étudiés. Ainsi, il s'avère que les teneurs moyennes en calcaire varient entre $2,4\%$ (site A) et $6,3\%$ (site B) et celles du gypse entre $0,7\%$ (site C) et $7,7\%$ (site B). Les taux d'humidité varient entre 15% (site C) et 25% (site B) et la $\text{CE}_{1,5}$ se situe entre $0,52 \text{ dS/m}$ (site C) et $3,46 \text{ dS/m}$ (site D). Les taux de sables, quant à eux, sont assez homogènes et ils se situent entre 77% (site A) et 87% (site C). Le pH, quant à lui, est relativement constant ($8,39 < \text{pH} < 8,67$). Ces résultats indiquent la présence de légères différences entre les caractéristiques des sols des quatre sites étudiés. Ainsi, il s'avère que le site C est le moins salé, le moins gypseux, le moins humide, le plus sableux et le plus alcalin. Par contre, le site B s'avère être le mieux pourvu en calcaire et en gypse et le plus humide. Toutefois, dans le détail, les résultats (écarts types) indiquent que chacun des paramètres étudiés peut également varier plus ou moins fortement au sein d'un même site.

Tableau 5-1. Caractéristiques moyennes des sols étudiés

	Site A	Site B	Site C	Site D	Total
	Moyenne \pm Ecart type				
CaCO ₃ %	2,48 \pm 1,31	6,39 \pm 2,3	5,74 \pm 1,71	3,55 \pm 2,08	4,00 \pm 2,32
Gypse %	1,01 \pm 0,84	7,72 \pm 5,26	0,77 \pm 1,1	4,76 \pm 3	3,00 \pm 3,6
CE _{1,5} dS/m	2,47 \pm 2,02	2,17 \pm 0,81	0,52 \pm 0,39	3,46 \pm 1,96	2,21 \pm 1,86
Sables %	77,15 \pm 4,72	80,06 \pm 3,19	87,65 \pm 3,33	78,79 \pm 6,93	80,00 \pm 6,5
H %	21,99 \pm 9,34	25,61 \pm 6,95	15,29 \pm 6,81	23,65 \pm 12,2	21,42 \pm 9,75
pH	8,39 \pm 0,19	8,44 \pm 0,17	8,67 \pm 0,37	8,58 \pm 0,20	8,52 \pm 0,25

2. Choix du modèle d'étalonnage

Les paramètres des équations d'étalonnage qui relient les $CE_{1:5}$ aux EM par les modèles RLS et RLM1 et RLM2 sont présentés dans les tableaux 5-2, 5-3 et 5-4. Les coefficients de détermination R^2 des cinq équations sont tous statistiquement hautement significatifs ($p < 0,001$) avec des R^2 compris entre 0,82 et 0,974 pour RLS, entre 0,911 et 0,99 pour RLM1 et entre 0,997 et 0,999 pour RLM2. Ce résultat signifie qu'au sein d'un même site, $CE_{1:5}$ peut être convenablement prédite aussi bien par RLS que par RLM1 et RLM2.

Tableau 5-2. Paramètres des cinq équations d'étalonnages du modèle RLS

	Equations de Régression	R^2
Equation A	$CE_{1:5} = 0,011 EM_v + 0,39$	0,974***
Equation B	$CE_{1:5} = 0,008 EM_v + 0,33$	0,959***
Equation C	$CE_{1:5} = 0,06 EM_v - 2,19$	0,820***
Equation D	$CE_{1:5} = 0,013 EM_v + 0,27$	0,944***
Equation G	$CE_{1:5} = 0,012 EM_v + 0,02$	0,903**

*, **, *** Significatif à $P < 0,05$, $P < 0,01$, $P < 0,001$, respectivement

Tableau 5-3. Paramètres des cinq équations d'étalonnage du modèle RLM1

	Equations de Régression	R^2
Equation A	$CE_{1:5} = 0,013 EM_v + 0,024 H + 0,072$	0,990***
Equation B	$CE_{1:5} = 0,007 EM_v + 0,025H - 0,0551$	0,987***
Equation C	$CE_{1:5} = 0,04 EM_v + 0,026H - 1,7$	0,940***
Equation D	$CE_{1:5} = 0,009 EM_v + 0,048 H + 0,009$	0,982***
Equation G	$CE_{1:5} = 0,011 EM_v + 0,027 H - 0,33$	0,911***

*** Significatif $P < 0,001$

Tableau 5-4. Paramètres des cinq équations d'étalonnage du modèle RLM2

	Equations de Régression	R^2
Equation A	$CE_{1:5} = 0,009EM_v + 0,03H + 0,06Sand\% - 0,34CaCO_3\% - 0,05Gypse\% - 0,91 pH + 3,86$	0,992***
Equation B	$CE_{1:5} = 0,02EM_v - 0,44H\% - 0,46Sable\% - 0,59CaCO_3\% + 0,37Gypse\% + 8,98pH - 29,27$	0,999***
Equation C	$CE_{1:5} = 0,04EM_v + 0,04H + 0,008Sable\% - 0,003CaCO_3\% - 0,15Gypse - 0,28pH + 0,18$	0,976***
Equation D	$CE_{1:5} = 0,008EM_v + 0,03H - 0,07Sable\% - 0,15CaCO_3\% - 0,09Gypse + 0,19 pH + 5,45$	0,997***
Equation G	$CE_{1:5} = 0,008EM_v + 0,03H\% - 0,07Sable\% - 0,17CaCO_3\% - 0,05Gypse\% + 0,05pH + 6,38$	0,966***

*** Significatif $P < 0,001$

Par ailleurs, les résultats (tableau 5-5) montrent que les moyennes arithmétiques des CEC obtenues par les modèles RLS, RLM1 et RLM2 sont comparables et proches de celles de $CE_{1:5}$ et ce, quel que soit le site considéré. Ce résultat suggère que les trois modèles estiment correctement les valeurs de $CE_{1:5}$. En effet, les calculs (tableau 5-6) révèlent que les

corrélations effectuées entre $CE_{1,5}$ et CEc (RLS, RLM1 et RLM2) sont toutes statistiquement hautement significatives ($0,900 < r < 0,999$; $p < 0,001$) avec, cependant, un léger avantage au profit de RLM2. Les tests non paramétriques de Sign et de Wilcoxon (tableau 5-7) confirment ce résultat pour les sites A et D et indiquent que les différences entre les valeurs des $CE_{1,5}$ et CEc prédites par les trois modèles sont statistiquement non significatives. Ces différences sont cependant différemment appréciées dans les sites B et C.

Tableau 5-5. Caractéristiques statistiques des $CE_{1,5}$, CEc (RLS), CEc (RLM 1) et CEc (RLM 2)

Conductivité électrique dS/m				
	Min	Max	Moy	ET
Site A				
$CE_{1,5}$	0,43	7,5	2,47	2
CEc (RLS)	0,47	6,98	2,29	1,8
CEc (RLM1)	0,61	7,33	2,41	1,93
CEc (RLM2)	0,61	7,33	2,41	1,93
Site B				
$CE_{1,5}$	1,09	3,23	2,17	0,81
CEc (RLS)	1,04	3,29	2,17	0,79
CEc (RLM1)	1,02	3,29	2,2	0,81
CEc (RLM2)	1,09	3,23	2,17	0,81
Site C				
$CE_{1,5}$	0,14	1,53	0,52	0,39
CEc (RLS)	0,23	1,47	0,56	0,35
CEc (RLM1)	0,2	1,46	0,52	0,38
CEc (RLM2)	0,22	1,54	0,52	0,39
Site D				
$CE_{1,5}$	0,15	5,44	3,46	1,96
CEc (RLS)	0,49	5,59	3,3	1,81
CEc (RLM1)	0,3	5,39	3,36	1,86
CEc (RLM2)	0,22	5,49	3,46	1,96

Tableau 5-6. Coefficients de corrélation r entre les $CE_{1,5}$ et les CEc calculées par les équations A, B, C et D des trois modèles RLS, RLM1 et RLM2

	Site A	Site B	Site C	Site D
$CE_{1,5}$, CEc (RLS)	$r = 0,987^{***}$	$r = 0,980^{***}$	$r = 0,906^{**}$	$r = 0,972^{***}$
$CE_{1,5}$, CEc (RLM)	$r = 0,990^{***}$	$r = 0,994^{***}$	$r = 0,971^{***}$	$r = 0,982^{***}$
$CE_{1,5}$, CEc (RLM2)	$r = 0,996^{***}$	$r = 0,999^{***}$	$r = 0,988^{***}$	$r = 0,999^{***}$

******, ******* Significatif à $P < 0,01$, $P < 0,001$, respectivement

Tableau 5-7. Tests de sign et de Wilcoxon entre $CE_{1:5}$ et CEc calculées par les modèles RLS, RLM1 et RLM2

Sites	Test de sign			Test de Wilcoxon		
	RLS	RLM1	RLM 2	RLS	RLM1	RLM 2
Site A	0,267	0,579	1,000	0,116	0,972	0,600
Site B	0,096	0,006*	0,0233	0,006*	0,002*	0,018
Site C	0,006*	0,027*	0,752	0,003*	0,007*	0,445
Site D	0,267	0,267	0,547	0,422	0,039*	0,859

* Significatif à $P < 0,05$

Les résultats ont montré aussi que les CEc prédites par les modèles RLS, RLM1 et RLM2 sont analogues et leurs différences ne sont pas significatives sauf dans le site A où le test de Wilcoxon a montré que cette différence peut être statistiquement significative (tableau 5-8). De même, le tableau 5-9 révèle que les différences absolues entre les trois modèles dans le site A oscillent entre 0,105 dS/m et 0,753 dS/m avec des moyennes des différences absolues comprises entre 0,173 dS/m et 0,259 dS/m. Ce résultat suggère que, par rapport aux moyennes des modèles RLM1 et RLM2 (Tableau5-5), l'écart absolu moyen de prédiction par le modèle RLS n'est respectivement que de 8 % $((0,2 / 2,41) \times 100)$ et de 21% $(0,51/2,41) \times 100$). Ainsi, ce résultat conforte celui obtenu plus haut et indique que, dans le cadre de cette étude, l'utilisation des trois modèles pour la prédiction de la salinité aboutit pratiquement au même résultat. L'ensemble de ces résultats suggère que $CE_{1:5}$ peut être correctement estimée par EM, et que l'omission des autres paramètres pédologiques dans les équations d'étalonnage, dans le cas des sites étudiés, n'altère pas la qualité de la prédiction. Tenant compte de ce résultat et tenant compte du fait que les sols de la région d'étude sont sporadiquement et différemment irrigués, ce qui se traduit par une forte variabilité spatiale et temporelle des taux d'humidité des sols, le modèle RLS reste valide pour prédire les valeurs de la salinité à partir des données de EM.

Tableau 5-8. Tests de sign et de Wilcoxon entre les CEc calculées par les modèles RLS, RLM1 et RLM2

	Site A	Site B	site C	Site D
Test de sign (RLS, RLM1)	0,267	1,000	0,343	1,000
Test de Wilcoxon (RLS, RLM1)	0,013*	0,735	0,241	0,534
Test de sign (RLS, RLM2)	0,268	1,000	0,752	1,000
Test de Wilcoxon (RLS, RLM2)	0,075	1,000	0,445	0,424
Test de sign (RLM1, RLM2)	1,000	0,450	0,752	1,000
Test de Wilcoxon (RLM1, RLM2)	0,701	0,499	0,879	0,477

* Significatif à $P < 0,05$

Tableau 5-9. Moyennes et bornes inférieures et supérieures des différences absolues entre C_{Ec} calculées par le modèle RLS, RLM1 et RLM2

		Site A	Site B	Site C	Site D
RLS-RLM1	Min	0,105	0,003	0,007	0,066
	Max	0,351	0,215	0,276	0,504
	Moy	0,208	0,107	0,102	0,253
RLS-RLM2	Min	0,004	0,052	0,04	0,044
	Max	0,753	0,251	0,264	0,918
	Moy	0,259	0,131	0,132	0,372
RLM1-RLM2	Min	0,015	0,009	0,016	0,024
	Max	0,513	0,134	0,142	0,684
	Moy	0,173	0,08	0,059	0,29

3. Prédiction de la salinité des sols par le modèle RLS

Les valeurs des C_{Ec} du site A (site de référence) obtenues par les équations A, B, C, D, et G du modèle RLS sont illustrées par la figure 5-1.

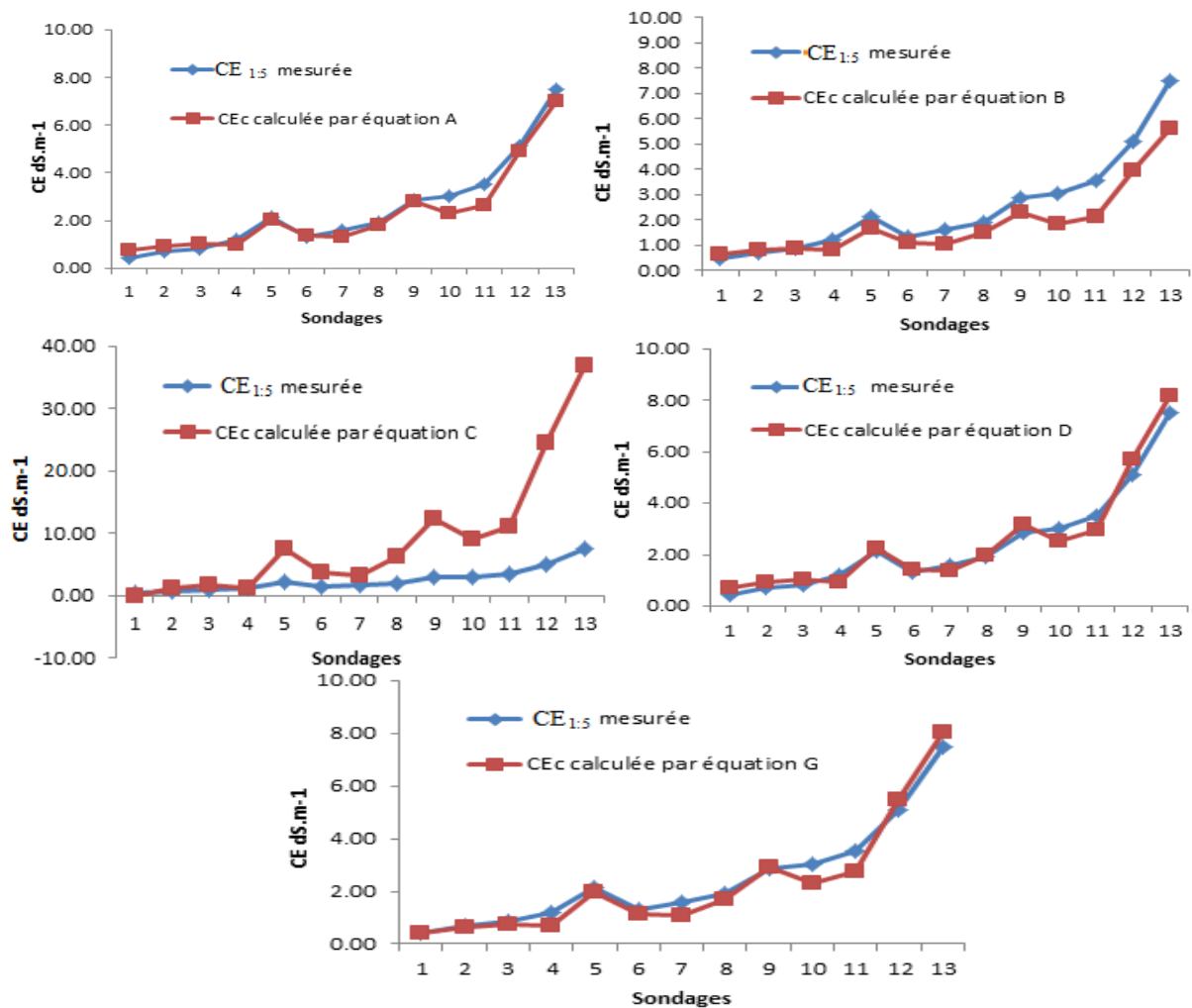


Figure 5-1. Courbes des $CE_{1.5}$ mesurées dans le site A et des C_c calculées par les cinq équations du modèle RLS

Cette figure révèle que les courbes obtenues par les équations A, B, D et G sont très proches de la courbe des $CE_{1:5}$ en se situant légèrement au-dessus ou au-dessous d'elle. Ce résultat signifie que les quatre équations prédisent avec une très légère surestimation ou sous-estimation les valeurs de la $CE_{1:5}$. En revanche, la courbe obtenue par l'équation C paraît assez distante de la courbe des $CE_{1:5}$ et semble surestimer la prédiction des valeurs de la CE.

Pour mieux évaluer l'erreur de l'estimation, nous avons calculé, pour chaque point du site A, les différences absolues entre les CEC obtenues par les cinq équations et la $CE_{1:5}$ correspondante. Les résultats consignés dans le tableau 5-10 révèlent la particularité de l'équation C par rapport au reste des équations. En effet, l'écart moyen entre les CEC calculées par l'équation C et les $CE_{1:5}$ correspondantes est de 6,70 dS/m et donc supérieur à la valeur moyenne de $CE_{1:5}$ (2,47dS/m) (tableau 5-4), soit un taux moyen d'erreur de prédiction de 271 % ($(CEC - CE_{1:5}) / CE_{1:5} \times 100$). Les écarts minimum et maximum pour cette équation se situent entre 0,03 dS/m et 29,25 dS/m (tableau 5-10) d'où une erreur de prédiction par rapport aux valeurs minimale et maximale de la $CE_{1:5}$ (tableau 5-4) comprise entre 6,98 % et 390 %. Ce résultat suppose donc que cette équation surestime la CE du site A et que son utilisation pour la prédiction de la salinité du site A n'est pas recommandée. En revanche, les écarts moyens entre la $CE_{1:5}$ et les CEC calculées par les équations A, B, D et G varient entre 0,3 dS/m et 0,66 dS/m (tableau 5-10) d'où des taux d'erreur de l'estimation compris entre 12 % et 26 %. Pour ces mêmes équations, les taux d'erreur minimum se situent entre 4,6 % et 18 % et les taux d'erreur maximum se situent entre 9 % et 25 % selon l'équation utilisée. En tenant compte des valeurs moyennes extrêmes de la $CE_{1:5}$ (0,52dS/m et 3,46 dS/m) (tableau 5-1) les erreurs absolues se situent entre 0,02 dS/m et 0,16 dS/m pour un taux d'erreur de 4,6 % et entre 0,13dS/m et 0,87dS/m pour un taux d'erreur de 25 %. Ces résultats signifient, dans le contexte de cette étude, qu'une $CE_{1:5}$ de 3 dS/m par exemple, serait estimée à des valeurs comprises entre $3 \pm 0,14$ dS/m avec un taux d'erreur de 4,6 % et $3 \pm 0,75$ dS/m avec un taux d'erreur de 25 %. De ce fait, une ou plusieurs équations du modèle RLS peuvent être utilisées pour la prédiction de la CE dans le site A comme le confirment les tests de sign et Wilcoxon (tableau 5-11). En effet, ce tableau montre que les différences entre les CEC obtenues par les équations A, D, G et à un moindre degré B et celles des $CE_{1:5}$ ne sont pas statistiquement significatives. Ce sont donc ces équations qui prédisent le mieux la CE du site A. En revanche, le tableau 5-11 confirme que l'équation C est celle qui prédit le moins bien la $CE_{1:5}$ de ce site. Toutefois, l'intégration des données du site C dans l'équation globale G, n'altère pas la qualité de la prédiction.

Tableau 5-10. Statistiques descriptive des différences absolues entre les conductivités électriques mesurées et celles calculées par les différentes équations du modèle RLS

Différences absolues dS/m	Min	Max	Moy	ET
CEc(équation A)- CE _{1:5}	0,04	0,88	0,3	0,26
CEc(équation B)- CE _{1:5}	0,02	1,9	0,66	0,57
CEc (équation C)- CE _{1:5}	0,03	29,25	6,7	8,6
CEc(équation D)- CE _{1:5}	0,08	0,68	0,32	0,19
CEc(équation G)- CE _{1:5}	0,02	0,79	0,32	0,27

Tableau 5-11. Tests de sign et de Wilcoxon entre les valeurs de la CE_{1:5} du site A et la CEc calculées par les équations du modèle RLS au niveau du site A

	Test de Sign	Test de Wilcoxon
Equation A	0,2673	0,1159
Equation B	0,0961	0,0058*
Equation C	0,0055*	0,0030*
Equation D	0,2673	0,4216
Equation G	0,096	0,08

* Significatif à $P < 0,05$

4. Cartographie de la salinité par le modèle RLS

Il s'agit de cartographier par krigeage les classes de salinité CEc des sols sur l'ensemble du site A par chacune des équations A, B, C, D et G du modèle RLS. Les classes de salinité sont déterminées selon les normes établies par Durand (1983). Les 5 cartes d'isovaleurs des CEc du site A sont illustrées par la figure 5-2 et leurs caractéristiques sont indiquées dans le tableau 5-12. La figure 5-2 révèle une certaine similitude de la distribution spatiale des classes de salinité entre les 5 cartes. En effet, toutes les cartes prédisent une augmentation de la salinité des sols du sud vers le nord du site. Cependant, dans le détail, il existe des différences entre la carte A (carte de référence) et les autres cartes. Ainsi, il apparaît que les cartes D, C et à un moindre degré la carte G sont celles qui se rapprochent le plus de la carte A alors que la carte C est celle qui s'en distingue le plus. Les différences de prédiction permettent de quantifier, pour chaque classe de salinité, le taux de l'erreur de l'estimation entre la carte A d'une part et chacune des autres cartes d'autre part. Ce taux d'erreur, exprimé en pourcent par rapport à la superficie totale du site A, est calculé pour chaque classe de salinité en considérant la différence entre la superficie prédite par l'équation A et celle prédite par chacune des autres équations (tableau 5-13).

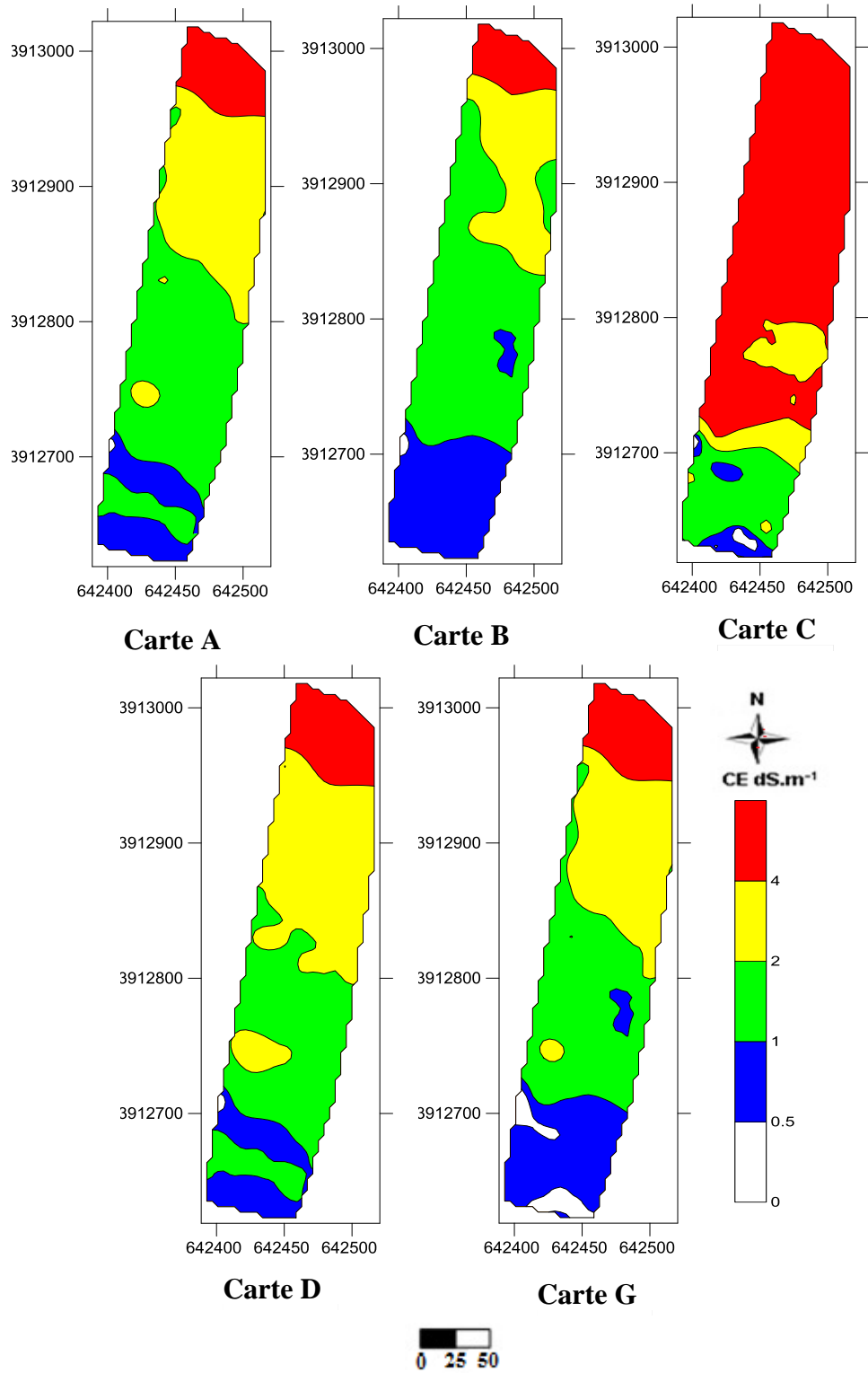


Figure 5-2. Cartes d'isovaleurs de salinité du site A obtenues par les équations A, B, C, D et G du modèle RLS

L'analyse du tableau 5-13 révèle que les superficies prédites sont différemment surestimées (0,07 % à 59,07 %) ou sous-estimées (-30,50 % à -0,79 %) en fonction de l'équation utilisée et de la classe de salinité considérée. La classe la moins salée « $CE_{1:5} < 0,5 \text{ dS/m}$ » est celle qui est la mieux estimée (erreur < 3,36 %) comparativement aux autres classes à cause, probablement, de sa très petite superficie qui ne représente que 0,11 % de la superficie totale de la carte A (tableau 5-12). Par ailleurs, il ressort que l'équation C surestime exagérément (59 %) la superficie de la classe « $CE > 4 \text{ dS/m}$ » au détriment des classes « 2-4 dS/m » (-20 %), « 1-2 dS/m » (-30%) et « $0,5-1 \text{ dS/m}^{-1}$ » (-8%). Ce résultat suggère que l'équation C est celle qui estime le moins bien la distribution spatiale de la salinité dans le site A. Ce phénomène serait dû au fait que le site C est moins salée, moins humide et plus sableux que le site A. En revanche, l'erreur maximale relative observée pour les autres équations n'est que de l'ordre de 11 % au maximum.

Tableau 5-12. Superficies des classes de salinité des cartes A, B, C, D, et G

Classes de salinité (dS/m)					
	0- 0,5	0,5 - 1	1 - 2	2 - 4	>4
Carte A					
Superficies (m ²)	31,64	3427,99	13349,03	9390,04	3005,41
Superficies (%)	0,11	11,74	45,71	32,15	10,29
Carte B					
Superficies (m ²)	79,94	6650,39	14323,96	6004,9	2144,92
Superficies (%)	0,27	22,77	49,05	20,56	7,34
Carte C					
Superficies (m ²)	182,61	896,24	4442,48	3427,09	20255,7
Superficies (%)	0,63	3,07	15,21	11,73	69,36
Carte D					
Superficies (m ²)	52,25	3198,73	11239,32	11186,65	3527,17
Superficies (%)	0,18	10,95	38,49	38,31	12,08
Carte G					
Superficies (m ²)	1011,99	5726,63	10550,31	8596,49	3318,70
Superficies (%)	3,47	19,61	36,13	29,44	11,36

Tableau 5-13. Taux d'erreur de l'estimation des superficies des cartes B, C et D par rapport à la superficie de la carte A

	Classes de salinité (dS/m)				
	0 - 0,5	0,5 - 1	1 - 2	2 - 4	>4
Carte B-A	0,17	11,03	3,34	-11,59	-2,95
Carte C-A	0,52	-8,67	-30,50	-20,42	59,07
Carte D-A	0,07	-0,79	-7,22	6,15	1,79
Carte G-A	3,36	7,87	-9,58	-2,71	1,07

Conclusion

Nous pouvons conclure que le modèle RLS prédit correctement les valeurs de la $CE_{1,5}$ du site dans lequel il a été établi. Ce résultat signifie que, dans le contexte de cette étude, EM est peu sensible aux variations des taux d'humidité et des autres paramètres pédologiques (RLM1 et RLM2) et qu'elle reste contrôlée essentiellement par la CE (RLS). De ce fait, dans ce genre de milieux, le modèle RLS est suffisant pour prédire correctement la salinité des sols.

Cette étude a montré aussi que les différences entre les CEC calculées par les différentes équations RLS élaborées ex situ et les $CE_{1,5}$ mesurées in situ sont toutes statistiquement non significatives sauf pour l'équation C. De ce fait, abstraction faite de l'équation C qui constitue une particularité (le site C étant plus sableux, moins salé et plus sec que le reste des sols), l'utilisation des équations RLS pour la prédiction de la salinité ex situ est possible et les résultats obtenus sont satisfaisants. Par ailleurs, les calculs ont montré que l'intégration des données du site C dans l'équation globale G n'altère pas la qualité de la prédiction de la salinité.

Les résultats ont montré aussi que les cartes d'isovaleurs de salinité réalisées par krigeage par utilisation des équations RLS élaborées ex situ sont, à quelques détails près, similaires à celle réalisée par l'équation RLS élaborée in situ. En effet, toutes les cartes prédisent une augmentation de la salinité du sol du sud vers le nord. Toutefois, en fonction de l'équation utilisée, l'erreur de prédiction par rapport à l'équation élaborée in situ est assez variable. Ainsi, les calculs ont montré que cette erreur reste globalement peu importante et acceptable (erreur absolue comprise entre 0,07 % et 11 %) sauf pour l'équation C où elle peut atteindre 59 %.

En fin, l'ensemble de ces résultats suggère que les équations d'étalonnage obtenues par le modèle RLS dans un secteur restreint peuvent être généralisables à des zones plus larges, à condition que le contexte pédologique reste assez homogène, même si l'humidité du sol varie dans l'espace.

Conclusion générale

Cette recherche a comme objectif d'utiliser la conductivité électromagnétique (EM) pour caractériser la variabilité spatio-temporelle de la salinité des sols à l'échelle de la parcelle. Elle se propose également d'estimer la qualité de la prédiction de CEEq in situ par utilisation des équations d'étalonnage établies ex situ entre CE mesurée au laboratoire et EM mesurée par l'EM38. L'expérimentation a été menée dans quatre sites A, B, C et D situés dans la région du R'mell au sud du chott El Hodna en milieu aride, sableux et salé dans lequel l'agriculture est tributaire de l'irrigation. L'étude des profils pédologiques a montré que les sols de ces sites sont sableux ($\approx 80\%$ de sables), salés ($CE_{1.5} > 2$ dS/m), peu pourvus en calcaire ($\approx 4\%$) et en gypse ($\approx 3\%$), alcalins ($pH \approx 8,5$) et peu à très humides surtout en profondeur. Toutefois, il existe quelques menues différences entre leurs caractéristiques.

L'analyse des transects a confirmé le caractère très psammophile de ces sols avec des textures qui oscillent entre 'loamy sand' et 'sand' selon le triangle de texture de l'USDA (Soil Survey Staff, 2014). Elle confirme aussi que les sols étudiés sont peu pourvus en calcaire et en gypse ($2,5 < CaCO_{3\text{moy}} \% < 6,4$; $0,8 \% < \text{gypse}_{\text{moy}} \% < 7$ %) même si, par endroits, les taux de ces deux constituants peuvent être relativement forts ($CaCO_3 \approx 14\%$; Gypse $\approx 20\%$) ou faibles ($CaCO_3 < 0,5\%$; Gypse $< 0,1\%$). Le pH est dans l'ensemble alcalin avec des valeurs qui sont généralement supérieures à 8 ($7,53 < pH_{\text{moy}} < 8,67$). La variabilité de ce paramètre est très faible quels que soient le site d'étude et la profondeur de l'horizon considérée ($CV < 4\%$) ce qui laisse penser que le pH n'aurait qu'une très faible influence sur les mesures électromagnétiques.

Les résultats ont montré que les taux d'humidité sont très hétérogènes et ce quelles que soient la campagne de mesures et la profondeur du sol considérée. Les plus faibles valeurs de ce paramètre sont enregistrées dans le site C ($3\% < H_{\text{moy}} < 19\%$) dont la texture est la plus sableuse. Par contre, au niveau des autres sites, les taux d'humidité sont relativement élevés avec des moyennes qui oscillent entre 13 % et 38%. Les résultats montrent également que quel que soit le site d'étude et quelle que soit la campagne de mesures, les profils hydriques sont de type descendants avec des horizons de profondeurs saturés en eau. Les résultats montrent aussi que la variabilité spatiale et temporelle des taux d'humidité est très élevée, ce qui rend ce paramètre l'un des facteurs les plus influençant sur la conductivité électromagnétique. De même, les résultats montrent que les niveaux de salinité sont très élevés (5 dS/m $< CE_{\text{moyenne}} < 56$ dS/m) et très hétérogènes ($12\% < CV < 146\%$) et ce quelles que soient la campagne de mesure et la profondeur du sol considérée. Comme pour

l'humidité, les valeurs les plus faibles de CE sont enregistrées dans le site C et les valeurs les plus élevées le sont en D. Les résultats ont révélé également que les profils salins sont très variables et ce quel que soit le site d'étude et quelle que soit la campagne de mesures. Cette variabilité des profils salins serait liée à la pratique de l'irrigation et aux caractéristiques locales de la pédogenèse des sondages (microrelief, texture...) le long des transects étudiés. Au total, les fortes amplitudes entre les valeurs les plus faibles et les valeurs les plus fortes de la salinité et de l'humidité des sols ainsi que leur forte variabilité spatio-temporelle ont rendu ces deux paramètres comme étant les facteurs les plus influençant sur les lectures électromagnétiques.

L'utilisation de EM pour la caractérisation de la salinité du sol nécessite au préalable l'étude de l'impact des différents paramètres pédologiques sur elle. Les résultats ont montré que EM est impactée par tous les paramètres pédologiques mais avec des degrés variables. Ainsi, l'impact de ces paramètres sur EM diminue dans le sens $CE_{eq} > H\% > texture\% > CaCO_3\% > Gypse\% > pH$. De ce fait, la CE_{eq} du sol est considérée comme étant le paramètre le plus influent sur les variations de EM ($r > 0,75$) et par conséquent, la salinité du sol peut être correctement estimée par le biais de EM.

Pour leur donner une signification pédologique, les valeurs de EM ont été étalonnées et transformées en conductivités électriques prédites (CE_p) par le biais d'un modèle de régression linéaire simple (RLS) entre EM et la CE_{eq} (paramètre dominant). Toutes les équations du modèle RLS ont abouti à des corrélations statistiquement significatives ($p < 0,05$) à très hautement significatives ($p < 0,001$) entre CE_{eq} et EM avec des coefficients de corrélations « r » compris entre 0,77 et 0,98. Ce résultat a été validé par les tests non paramétriques de Wilcoxon qui ont montré que les différences entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées sont statistiquement non significatives. Ces résultats suggèrent ainsi qu'au sein des quatre sites, CE_{eq} peut être convenablement estimée par le modèle RLS au sein de n'importe quelle campagne de mesures.

L'utilisation des différentes équations d'étalonnage a permis de transformer les mesures électromagnétiques (EM) effectuées sur les sites cultivés (Sites A, B et C) en conductivités électriques prédites (CE_p). Les CE_p ainsi obtenues ont été par la suite cartographiées par les méthodes géostatistiques. La variographie a montré que les semi-variogrammes expérimentaux sont clairement structurés et qu'ils sont adaptés à des modèles sphériques, à l'exception de ceux du site C (F8 et F9 ; 0-90 cm) qui sont ajustés à des modèles gaussiens. Les semi-variogrammes présentent aussi une divergence dans leur dépendance spatiale avec

des paliers qui varient entre 19 et 78 pour le site A, entre 10 et 170 pour le site B et entre 5,2 et 45,5 pour le site C. Concernant le site C (N9 et N11), les résultats indiquent la présence d'une erreur aléatoire causée par un effet de pépité qui varie entre de 0,5 et 10.5. Cette erreur aléatoire représente entre 2 % et 48 % de la variabilité total avec une forte dépendance spatiale inférieure à 25%. Les semi-variogrammes montrent également que les valeurs de la portée varient d'un site à l'autre avec une valeur minimale de 20 m (site C, N11). Cette portée correspond à la valeur moyenne du pas de mesures de EM ce qui traduit la bonne qualité d'interpolation.

La cartographie de la salinité a permis de décrire finement la variabilité spatiale de ce paramètre et de délimiter de manière très précise les unités de sols salés et de mettre en évidence la variabilité spatio-temporelle de la salinité. Ainsi, les résultats ont montré que les cartes d'isovaleurs des sites A et C ont d'une façon générale la même structure spatiale traduite par un gradient croissant de salinité de l'amont vers l'aval et ce quelles que soient la période de mesures et la profondeur d'investigation. Cette distribution est moins marquée pour le site B qui présente une structure relativement homogène. Ce résultat corrobore celui de la distribution spatiotemporelle de CEEq effectuée au niveau des transect et celle de la distribution spatiale de EM. De même, les écarts absolus des superficies des classes de salinité entre les différentes périodes de mesures au sein de chaque couche de sol sont extrêmement variables ce qui traduit l'impact de l'effet 'période de mesure' sur l'augmentation ou la diminution de la salinité.

Les résultats ont montré que l'utilisation des équations établies in situ pour la prédiction de la salinité ex situ est possible et satisfaisante dans ce genre de milieu. En effet, en fonction de l'équation utilisée, l'erreur de prédiction par rapport à l'équation élaborée in situ est assez variable. Ainsi, les calculs ont montré que les erreurs sont globalement peu importantes et acceptables pour la majorité des équations d'étalonnages ($0,02 \text{ dS/m} < \text{erreurs absolues} < 0,87 \text{ dS/m}$). Ce résultat signifie que les équations d'étalonnage obtenues dans un secteur restreint peuvent être généralisées à des zones plus larges, à condition que le contexte pédologique reste assez homogène.

En fin, la démarche adoptée a permis de réaliser une bonne estimation de l'état actuel de la salinité des sols avec une marge d'erreur acceptable dans le contexte pédologique de cette étude. En perspective, il serait utile d'affiner les modèles de calibration et de prédiction utilisés et de les tester sur un contexte plus large. Il serait également utile de poursuivre cette

recherche par l'application de l'extrapolation des modèles d'étalonnage dans le temps et à un panel de milieux différents (sols argileux, climat humide,...) afin de vérifier les tendances observées et les hypothèses proposées dans cette recherche.

Références bibliographiques

- Abdel Ghany M.B., Hussein A.M., Omara M.A., EI Nagar H.M., 2000.** Testing electromagnetic induction device (EM38) under Egyptian conditions. EM38 Workshop, New Delhi, India. Feb. 4, 2000.
- Abdelhafid Y., 2010.** Cartographie de la salinité des sols par induction électromagnétique. Cas de la zone est du périmètre irrigué de la Mina. Mémoire de magister. ENSA. Alger. 102p.
- Abu-Hassanein Z.S., Benson C.H., Blotz L.R., 1996.** Electrical Resistivity of compacted clays. *Journal of Geotechnical Engineering*. 122(5): 397-406.
- Adam I., Michot D., Guero Y., Soubega B., Moussa I., Dutin G., Walter C., 2012.** Detecting soil salinity changes in irrigated vertisols by electrical resistivity prospection during a desalinisation experiment. *Agricultural Water Management*. 109 :1-10.
- Adam I., 2011.** Cartographie fine et suivi détaillé de la salinité des sols d'un périmètre irrigué au Niger en vue de leur remédiation. Thèse de Doctorat de l'université Abdou Moumouni de Niamey (Niger). 269p
- Agricultural Compendium., 1989.** Third ed for Rural Development in the Tropics and sub tropics: 3rd Revised edition. Elsevier, Amsterdam. Oxford. New York. Tokyo. 740pp.
- Allred B.J., Daniels J.J., Ehsani M.R., 2008.** Handbook of Agricultural Geophysics. Books in soils, plants, and the environment, CRC Press (Taylor & Francis Group), New York. 410 p.
- Amezketta E., 2007.** Soil salinity assessment using directed soil sampling from a geophysical survey with electromagnetic technology: a case study. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 5: 91-101.
- Askri B., 2002.** La modélisation des processus de salinisation des sols irrigués en zones arides, cas de l'oasis de Segdoud. Thèse, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis. 165 p.
- Auerswald K., Simon S., and Stanjek H., 2001.** Influence of soil properties on electrical conductivity under humid water regimes. *Soil Science* 166 :382-390.
- Baize, D., 1988.** Guide des analyses courantes en pédologie : choix, expression, présentation, interprétation. INRA. Paris.

- Barbiero L., Cunnac S., Mane L., Laperrousaz C., Hammecker C., Maeght J.L., 2000.** Salt distribution in the Senegal middle valley. Analysis of a saline structure on the future irrigation schemes from N'Galenka creek. *Agricultural and Water Management*. 46: 201- 213.
- Barzanji A.F., 1973. Gypsiferous soils of Iraq.** Ph.D. thesis, Univ. Gent, 199 pp.
- Bauder T.A., Waskom R.M., Davis J.G., 2007.** Irrigation water quality criteria. Colorado State University, Us Department of Agriculture. Research Report. 7- 03.
- Bennett D.L., 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 : 69-85.
- Berkal I., 2016.** Dynamique spatiotemporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride. Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie. Thèse de Doctorat. ENSA. Alger. 113 p.
- Besson A., 2007.** Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la teneur en eau des sols à l'échelle parcellaire par la méthode de résistivité électrique. Thèse de Doctorat. Science de la terre. Université d'Orléans. 212p
- Boivin P., Brunet D., Job J.O., 1988.** Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés. Une méthode rapide et fiable. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* 24 (1): 39-48.
- Bourennane H., King D., Isambert M., Le Parco R., 1997.** Utilisation de la prospection géophysique par résistivité pour l'étude de la variabilité spatiale du sol et des matériaux géologiques d'un site de Petite Beauce. Colloque GEOFCAN Géophysique des sols et des formations superficielles. 11-12 septembre 1997, Bondy, France BRGM, INRA, ORSTOM, UPMC.
- Bouksila F., Persson M., Bahri A., Berndtsson R., 2012.** Electromagnetic induction prediction of soil salinity and groundwater properties in a Tunisian Saharan oasis. *Hydrological Sciences Journal*. 57:1473- 1486.
- Boyadgiev T. G., 1975.** Les sols du Hodna. Rapport FAO. Algérie 9. Rome 141 p.
- Brus D.J., Knotters M., Van Dooremolen W.A., Van Kernebeek P., Van Seeters R.J.M., 1992.** The use of electromagnetic measurements of apparent soil electrical conductivity to predict the boulder clay depth. *Geoderma*. 55 (1-2): 79-93.

- Camara O.A., Cluis D., 1992.** Variabilité spatiale des propriétés physico-chimiques d'un champ affecté par la salinité dans le nord-ouest du Mexique. *Pedologie* 42 : 183-203.
- Cambardella C.A., Moorman, T.B., Novak J.M., Parkin T.B., Karlen D.L., TurV, R.F., Konopa A.E., 1994.** Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:1501-1511.
- Cameron D.R., De Jong E., Read D.W.L., Oosterveld M., 1981.** Mapping salinity using resistivity and electromagnetic techniques. *Can. J. Soil Sci.* 61: 67-78.
- Cannon M.E., McKenzie R.C., Lachapelle G., 1994.** Soil salinity mapping with electromagnetic induction and satellite-based navigation methods. *Can. J. Soil Sci.* 74:1545-1556.
- Carvalho J.R.P.D., Silveira P.M., Vieira S.R., 2002.** Geostatistics to determine spatial variability of soil chemical properties using different preparation systems. *Pesquisa Agropecuária Brasileira.* 37: 1151–1159.
- Cetin M., Kirda C., 2003.** Spatial and temporal changes of soil salinity in a cotton field irrigated with low-quality water. *Journal of Hydrology.* 272: 238–249.
- Ceuppens J., Wopereis M.C.S., 1999.** Impact of non-drained irrigated rice cropping on soil salinization in the Senegal river delta. *Geoderma.* 92 : 125–140.
- Chalikakis M.K., 2006.** Application de méthodes géophysiques pour la reconnaissance et la protection de ressources en eau dans les milieux karstiques. Thèse Doctorat. Univ Paris 6. 217 p.
- Chávez R., Cámara M., Tejero A., Barba L., Manzanilla L., 2001.** Site characterization by geophysical methods in the archaeological zone of Teotihuacan. Mexico, *Journal of Archaeological Science.* 28 :1265 – 1276.
- Condom N., 2000.** Analyse et modélisation couplée des processus hydro-géochimiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger (Mali). Thèse de doctorat Ecole National Agronomique de Montpellier. 190 p.
- Cook P.G., Hughes M.W., Walker G.R., Allison G.B., 1989.** The calibration of frequency-domain electromagnetic induction meters and their possible use in recharge studies. *J. Hydrol* 107: 251–265.

- Corwin D.L., Lesch S.M., Oster J.D., Kaffka S.R., 2006.** Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma*. 131: 369–387.
- Corwin D.L., Lesch S.M., 2005a.** Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 46: 11-43.
- Corwin D.L., Lesch S.M., 2005b.** Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture*. 46: 103-133.
- Corwin D.L., Lesch S.M., 2003.** Using the Dual-Pathway Parallel Conductance Model to Determine How Different Soil Properties Influence Conductivity Survey Data. *Agronomy Journal*. 95: 365-379.
- Corwin DL, Rhoades JD., 1984.** Measurements of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 288–291.
- Corwin D.L., Rhoades J.D., 1982.** An improved technique for determining soil electrical conductivity—Depth relations from above-ground electromagnetic measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46(4):517-520.
- Dagnelie P., 1982.** Théories et méthodes statistiques. V1, Presses Agron., Gembloux. 346p.
- Dalgaard M., Have H., Nehmdahl H., 2001.** Soil clay mapping by measurement of electromagnetic conductivity. Third European conference on Precision Agriculture, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro Montpellier, France), pp. 367–372.
- De Jong E., Ballantyne A.K., Cameron D.R., Read D.L., 1979.** Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid salinity surveys. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 810–812.
- Descloitres, M., Séguis L., Wubda M., Legchenko A., 2007.** Discrimination of rocks with different hydrodynamic properties using MRS, EM and resistivity methods. EAGE International Conference “Near Surface 2007”, Istanbul. 3-5 sept. 2007.
- Djili K., Daoud Y., Gaouar A., Beldjoudi 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*. 14: 241-246.

- Durand J.H., 1983.** Les sols Irrigables. Etude pédologique. Presses Universitaire de France. Agence de Coopération Culturelle et Technique. 338 p.
- D’Emden F., Knight Q., 2009.** Optimising gypsum applications through remote sensing and Variable Rate Technology. Agribusiness Crop Updates Proceeding soil. Perth, Wa. p 21-25
- FAO., 2005.** Irrigation in Africa in figures - AQUASTAT Survey-2005. Food and Agriculture
- Feikema P.M., Baker T.G., 2011.** Effect of soil salinity on growth of irrigated plantation Eucalyptus in south-eastern Australia. Agricultural Water Management. 98: 1180–1188.
- Fukue M., Minato T., Horibe H., Taya N., 1999.** The microstructure of clay given by resistivity measurement. Engineering Geology. 54 (1-2): 43-53.
- Gacem F., 2015.** Etude spatiale et temporelle de la salinité dans les sols de la plaine de mina (Relizane). Mémoire de magister. Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem. 166 p.
- Hall D., Galloway P., Lemon J., Curtis B., Van Burgel A., Kong K., 2014.** The agronomy jigsaw Finding the pieces that maximise water use efficiency. Department of Agriculture and Food, Western Australia; and Nigel Metz, South East Premium Wheat Growers Association. Edited by Sandra Prosser. 96 p.
- Hedley C.B., Yule I.Y., Eastwood C.R., Shepherd T.G., Arnold G., 2004.** Rapid identification of soil textural and management zones using electromagnetic induction sensing of soils. Aust. J. Soil Res. 42: 389–400.
- Hendrickx J.M.H., Kachanoski R.G., 2002.** Indirect measurement of solute concentration: Nonintrusive electromagnetic induction. In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI. p. 1297–1306.
- Hendrickx J.M.H., Borchers B., Corwin D.L., Lesch S.M., Hilgendorf A.C., Schlue J., 2002.** Inversion of soil conductivity profiles from electromagnetic induction measurements: theory and experimental verification. Soil Science Society of America Journal. 66: 673–685.
- Hendrickx J.M.H., Baerends B., Raza Z.I., Sadig M., Akram Chaudhry M., 1992.** Soil salinity assessment by electromagnetic induction of irrigated land. Soil Sci. Soc. Am. J. 56 (6): 1933–1941.

Herrero J., Netthisingheb A., Hudnall W.H., Pérez-Coveta O., 2011. Electromagnetic induction as a basis for soil salinity monitoring within a Mediterranean irrigation district. *Journal of Hydrology*. 405(3-4): 427-438.

Herrero J., Ba A.A., Aragues R., 2003. Soil salinity and its distribution determined by soil sampling and electromagnetic techniques. *Soil Use Manage.* 19: 119–126.

Hoogerwerf M.R., Muchena F.N., Stein A., 1992. Spatial variability and reclamation of salinity and sodicity in a Kenyan irrigation scheme. *Soil Technology* 5 : 121-34.

Hossain M.B., Lamb D.W., Lockwood P.V., Frazier P., 2010. EM38 for volumetric soil water content estimation in the root-zone of deep vertosol soils. *Computers and Electronics in Agriculture*. 74 100–109.

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). Mémoire de Magistère. INA, Alger. 113 pages.

IUSS WORKING GROUP WRB., 2014. World reference base for soil resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

Jackson P., 1975. An Electrical -resistivity method for evaluating the in-situ porosity of clean marine sand. *Marin geotechnology*. 1(2): 91-115.

Job J.O., 1992. Les sols sales de l'oasis d'el Guettar (sud tunisien). These doctorat : Université des Sciences et techniques du Languedoc, Montpellier. France. 161 p.

Job J.O., Loyer J.Y., Ailoul M., 1987. Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* 23: 123-131.

Johnson C.K., Doran J.W., Eghball B., Eigenber R.A., Wienhold B.J., Woodbury B.L., 2003a. Status of soil electrical conductivity studies by central states researchers. American Society of Agricultural Engineers Annual International Meeting, Las Vegas, NV. Paper No. 032339.

Johnston M.A., Savage M.J., Moolman J.H., Du Plessis H.M., 1997. Evaluation of calibration methods for interpreting soil salinity from electromagnetic induction measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1627–1633.

- Jung W.K., Kitchen N.R., Sudduth K.A., Anderson S.H., 2006.** Spatial characteristics of claypan soil properties in an agricultural field. *soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1387–1397.
- Jung W.K., Kitchen N.R., Sudduth K.A., Kremer R.J., Motavalli P.P., 2005.** Relationship of apparent soil electrical conductivity to claypan soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 83–92.
- Kachanoski R.G., Van Wesenbeeck I. J., Gregorich E.G., 1988.** Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods. *Can. J. Soil Sci.* 68: 715-722.
- Kaman H., Çetin M., Kirda C., Karaca Ö.F., Sesveren S., 2008.** Possibility of Using EM38 Device to Determine the Extent and Severity of Soil Salinity: A Case Study in the Lower Seyhan Plain, Turkey. *International Meeting on Soil Fertility Land Management and Agroclimatology*. Turkey, 2008. p:245-251.
- Khacheba R., 2011.** Cartographie de la salinité du sol évaluée par induction électromagnétique «Géonics EM38». Thèse de magister, ENSA, Alger. 94p.
- Kuang B., Mahmood H.S., Quraishi M., Hoogmoed W.B., Mouazen A.M., Van Henten E.J., 2012.** Sensing soil properties in the laboratory, in situ and on-line: a review. *Advances in Agronomy*. 114: 155–223.
- Lahlou M., Badraoui M., Soudi B., Goumari A., Tessier D., 2002.** Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols. Actes de l'atelier du PCSI, Montpellier, France, 28-29 mai 2002.
- Lal R., Stewart B.A., 1990.** Soil degradation. *Advances in Soil Science*. Springer-Verlag, New York, NY.337p.
- Legros J.P., 2009.** La salinisation des terres dans le monde. Académie de Sciences et Lettres de Montpellier conférence n°4069, Bull, n°40, pp 257-269
- Le Houérou H.N., Claudin J., 1972.** Carte géologique de la région d'El-Hodna au 500 000^e. F.A.O.
- Lesch S.M., Herrero J., Rhoades J.D., 1998.** Monitoring for Temporal Changes in Soil Salinity using Electromagnetic Induction Techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 232-242
- Lesch S.M., Strauss D.J., Rhoades J.D., 1995.** Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques: I. Statistical prediction models: A comparison of multiple linear regression and cokriging. *Water Resour. Res.* 31(1) : 373–386.

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(2):540-548.

Li Y., Shi Z., Wu C.F., Li H.Y., Li F., 2007. Improved prediction and reduction of sampling density for soil salinity by different geostatistical methods. *Agricultural Sciences China* 6 : 832-41.

López-Bruna D., Herrero J., 1996. El comportamiento del sensor electromagnético y su calibración frente a la salinidad edáfica. *Agronomie.* 16: 95-105.

Mahdi H., 2008. Cartographie de la salinité d'un sol sableux par conductivité électromagnétique. Mémoire ing. ENSA, Alger. 104p.

Martini E., Werban U., Zacharias S., Pohle M., Dietrich P., Wollschläger U., 2017. Repeated electromagnetic induction measurements for mapping soil moisture at the field scale: validation with data from a wireless soil moisture monitoring network. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21: 495–513.

Martino L., Bonomo N., Eugenia Lascano E., Osella A., Norma Ratto N., 2006. Electrical and GPR prospecting at Palo Blanco archaeological site, northwestern Argentina. *Geophysics.* 71: (6)193-199.

Matheron G., 1963. Principles of Geostatistics. *Economic Geology.* 58: 1246-1266.

McBride RA., Gordon AM., Shrive S.C., 1990. Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 290–293.

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.* 69:25-32.

McLeod M.K., Slavich P.G., Irhas Y., Moore N., Rachman A., Ali N., Iskandar T., Hunt C., Caniogo C., 2010. Soil salinity in Aceh after the December 2004 Indian Ocean tsunami. *Agricultural Water Management* 97: 605–613.

McNeill J.D., 1992. Rapid, accurate mapping of soil salinity by electromagnetic ground conductivity meters. In: *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory Into Practice.* Spec. Publ. 30, SSSA, Madison, WI, pp. 209–229.

McNeill J.D., 1980. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Geonics Tech. Note TN-6. Geonics Limited, Mississauga, ON, Canada. 14 p.

Michot M.D., 2003. Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire. Thèse de Doctorat de l'université de Paris 6. 394p.

Molin J.P., Faulin G.D., 2013. Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. *Sci. Agric.* 70(1) : 1-5.

Montoroi J.P., 1999. Estimation quantitative de la salinité d'un bas-fond par conductivimétrie électromagnétique : application aux sols salés de Basse-Casamance (Sénégal). 2^{ème} colloque GEOFCAN 21-22 septembre 1999 BRGM, Orléans, France.

Montoroi J.P., Bellier G., Delariviere J.L., 1997. Détermination de la relation résistivité électrique-teneur en eau au laboratoire. Application aux sols de la Tunisie centrale. 1^{er} Colloque GEOFCAN, 11-12b bsept 1997, Bondy, France, pp. 153-159

Montoroi, J.P., 1994. Dynamique de l'eau et géochimie des sels d'un bassin versant aménagé de basse Casamance (Sénégal). Conséquence sur la gestion durable des sols de la mangrove en période de sécheresse. Thèse de Doctorat en Science de la terre de l'université Henri Poincaré Nancy I. 227p.

Nogués J., Robinson D.A., Herrero J., 2006. Incorporating Electromagnetic Induction Methods into Regional Soil Salinity Survey of Irrigation Districts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:2075–2085.

Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., and Vetterling W.T., 1988. *Numerical Recipes in C.* Cambridge University Press.

Pommier A., Garnero E.J., 2014. Petrology-based modeling of mantle melt electrical conductivity and joint interpretation of electromagnetic and seismic results. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* 19: 4001-4016.

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. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Rhoades J.D., 1992. Instrumental field methods of salinity appraisal. In: Topp, G.C., Reynolds, W.D., Green, R.E. (Eds.), *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bring Theory into Practice*. Soil Sci. Soc. Am. J. Special Publication 30, pp. 231–248.

Rhoades J.D., Corwin D.L., 1990. Soil electrical conductivity: effects of soil properties and application to soil salinity appraisal. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 21: 837–860.

Rhoades J.D., Manteghi N.A., Shouse P.J., Alves W.J., 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity. New formulations and calibrations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 433-439.

Rhoades J.D., Corwin D.L., 1981. Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 255–260.

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

Richard G., Cosenza P., Aboubacar A., Tabbagh A., 2005. Etude des variations de résistivité électrique d'un sol limoneux en fonction de sa teneur en eau et de sa porosité. GEOFCAN « Géophysique des sols et formation superficielles », Orleans, France.

Richard G.I., Cousin J.F., Sillon A., Brund G., 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil - Influence on unsaturated hydraulic properties. *European journal of soil science.* 52: 49-58.

Robert C., Reedy I., Bridget R., Scanlo N., 2003. Soil Water Content Monitoring Using Electromagnetic Induction. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering.* 129(11) : 1028-1039.

Robinson D.A., Lebron I., Lesch S.M., Shouse P., 2004. Minimizing drift in electrical conductivity measurements in high temperature environments using the EM-38. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:339–345.

Rongjiang Y., Jingsong Y., 2010. Quantitative evaluation of soil salinity and its spatial distribution using electromagnetic induction method. *Agricultural Water Management* 97 (2010) 1961–1970.

Saarenketo T., 1998. Electrical proprieties of water in clay and silty soils. *Journal Of Applied Geophysics.* 40: 73-88.

Saoud M., 2014. Evolution spatiale de la salinité des sols du Bas-Chélif. Mémoire de magister, ENSA, Alger. 105p.

Shaw R.J., 1999. Soil salinity – electrical conductivity and chloride. In: Soil Analysis: An Interpretation Manual. CSIRO Publishing, Australia. pp 129-145.

Shaw R.J., 1988. Soil salinity and sodicity. In Understanding soils and soil data: invited lectures for refresher training course in soil science. Brisbane Australian Society of Soil Science, Queensland Branch (Ed IF Fergus) pp. 109-134.

Slavich P.G., Petterson G.H., 1990. Estimating average rootzone salinity from electromagnetic induction (EM-38) measurements. Australian Journal of Soil Research. 28: 453–463.

Soil Survey Staff., 2014. Keys to soil taxonomy. 12th ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 372 p.

Soil Survey Staff., 1999. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Second ed. USDA Natural Resources Conservation Service Agricultural Handbook, vol. 436. US Gov. Printing Office, Washington, DC. 877 p.

Sudduth K.A., Kitchen N.R., Wiebold W.J., Batchelor W.D., Bollero G.A., Bullock D.G., Clay D.E., Palm H.L., Pierce F.J., Schuler R.T., Thelen K.D., 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north–central USA. Computers and Electronics in Agriculture. 46: 263–283.

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: 239–264.

Sumner M.E., Naidu R., 1998. Sodic soils: distribution, properties, management, and environmental consequences. New York : Oxford University Press, 207 p.

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., Keys D.A., 1982. Geophysics prospecting. tome 1 et 2: Combridge University press. p220

Toé G., 2004. Apport de nouvelles techniques géophysiques a la connaissance des aquifères de socle tomographie électrique électromagnétisme fréquentiel résonance magnétiques protoniques application au Burkuna Faso. Thèse Doctorat, Univ Paris 6. 272p.

Triantafilis J., Lesch S.M., 2005. Mapping clay content variation using electromagnetic induction technique. *Comput. Electron. Agric.* 46: 203-237

Triantafilis J., Odeh I.O.A., McBratney A.B., 2001. Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65(5):869-878.

Triantafilis J., Laslett G.M., McBratney A.B., 2000. Calibrating an electromagnetic induction instrument to measure salinity ins under irrigated cotton. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1009-1017

U.S. Salinity Laboratory Staff., 1954. Diagnostic and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A. Handbook, n 60, 160p.

Urish D., 1981. Electrical resistivity-hydraulic conductivity relationship in glacial outwash aquifers. *Water resources Research.* 5 (17): 1401-1408.

Viscarra Rossel R.A., Adamchuk V.I., Sudduth K.A., McKenzie N.J., Lobsey C., 2011. Proximal soil sensing: an effective approach for soil measurements in space and time. *Advances in Agronomy.* 113: 237–282.

Williams B.G., Hoey D., 1987. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils. *Aust. J. Soil Res.* 25: 21–27.

Zhao D., Li N., Zare E., Wang J., Triantafilis J., 2020. Mapping cation exchange capacity using a quasi-3d joint inversion of EM38 and EM31 data . *Soil & Tillage Research* 200 (104618):1-12.

Zhao X., Wang J., Zhao D., Li N., Zare E., Triantafilis J., 2019. Digital regolith mapping of clay across the Ashley irrigation area using electromagnetic induction data and inversion modeling. *Geoderma* 346: 18–29.

Annexes

Annexe 1. Valeurs des humidités à saturation

Tableau 1. Valeurs de l'humidité à saturation au niveau du transect A

sondages	profondeurs				
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
1	41.23	49.93	39.00	46.82	44.16
2	39.44	45.32	44.41	48.75	43.68
3	40.53	35.15	41.47	41.80	44.14
4	41.44	39.14	35.71	41.85	39.71
5	42.42	37.14	43.14	37.86	40.84
6	48.26	47.28	41.51	40.08	38.27
7	44.92	41.68	58.73	50.54	48.14
8	41.95	40.73	40.08	43.53	43.16
9	41.27	46.30	47.63	48.43	45.64
10	42.64	35.40	39.05	42.97	46.65
11	44.90	42.97	39.64	35.82	45.07
12	46.60	44.26	42.27	44.38	42.40
13	47.87	43.82	42.73	35.36	52.90

Tableau 2. Valeurs de l'humidité à saturation au niveau du transect B

sondages	profondeurs				
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
1	43.77	35.75	39.93	40.70	38.47
2	44.58	42.74	42.79	47.48	41.72
3	39.83	35.97	37.24	38.83	37.11
4	48.81	40.08	36.58	37.43	49.00
5	44.28	38.67	37.24	36.37	41.59
6	49.86	46.15	40.51	43.44	45.27
7	43.53	48.21	40.35	36.79	41.37

Tableau 3. Valeurs de l'humidité à saturation au niveau du transect C

sondages	profondeurs				
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
1	38.80	37.51	39.82	39.68	40.52
2	35.17	36.33	36.76	42.89	42.59
3	35.80	36.16	35.43	35.74	40.06
4	35.96	31.91	35.42	40.73	41.14
5	37.43	35.84	35.83	35.75	37.45
6	35.87	35.91	35.06	35.37	35.20
7	35.93	35.02	35.42	35.88	35.44
8	35.52	35.18	36.35	38.09	41.29
9	35.63	35.81	43.23	38.27	43.14
10	42.17	41.1	38.6	45.04	41.2

Tableau 4. Valeurs de l'humidité à saturation au niveau du transect D

sondages	profondeurs				
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
1	35.30	35.20	35.15	35.25	35.76
2	41.33	42.37	43.56	42.33	41.44
3	35.07	35.05	42.77	52.80	41.36
4	35.93	35.95	40.12	40.57	43.81
5	41.33	39.67	42.37	41.36	42.67
6	39.67	40.53	41.56	42.36	43.65
7	42.37	42.37	43.56	55.95	39.83
8	43.53	43.36	42.36	51.86	52.50
9	39.81	41.33	42.56	52.05	47.23
10	44.36	48.26	45.52	42.33	41.62
11	42.72	43.07	44.85	40.17	39.46

Annexe 2. Mesures électromagnétiques au niveau des transects

Tableau 1. Mesures électromagnétique au niveau des transects (Site A)

Février 2008		février 2009		Novembre 2008		Novembre 2011	
EMv	EMh	EMv	EMh	EMv	EMh	EMv	EMh
75	48	90	52	73	27	35.00	50.00
70	43	87	53	71	35	55.00	31.00
72	45	79	45	79	35	65.00	38.00
66	41	68	36	60	20	57.00	35.00
80	85	71	124	90	75	165.00	151.00
123	114	126	132	111	90	97.00	70.00
133	108	139	120	128	107	90.00	61.00
114	112	153	175	165	171	142.00	119.00
204	231	212	191	222	227	243.00	205.00
179	124	160	140	186	138	189.00	154.00
177	223	156	311	272	358	225.00	287.00
377	413	293	231	533	664	451.00	569.00
648	695	449	351	754	775	659.00	626.00

Tableau 2. Mesures électromagnétique au niveau des transects (Site B)

Février 2008		février				Novembre 2011	
EMv	EMh	EMv	EMh	EMv	EMh	EMv	EMh
105	85	150	182	39	46	270.00	249.00
118	136	82	44	84	66	88.00	66.00
104	86	71	41	72	44	142.00	113.00
95	85	112	86	42	25	220.00	188.00
150	165	106	122	68	80	320.00	227.00
231	225	275	280	242	184	370.00	272.00
171	121	181	145	183	132	196.00	122.00

Tableau 3. Mesures électromagnétique au niveau des transects (Site C)

Février 2008		février 2009		Novembre 2008		Novembre 2011	
EMv	EMh	EMv	EMh	EMv	EMh	EMv	EMh
27	16	32	15	17	19	41.00	22.00
28	17	35	18	29	23	40.00	24.00
28	18	46	23	33	25	41.00	23.00
29	18	49	23	45	28	43.00	21.00
25	15	50	26	39	29	45.00	30.00
26	17	45	24	41	22	45.00	32.00
26	13	44	26	45	31	46.00	32.00
31	18	43	21	49	38	47.00	28.00
52	37	78	58	56	45	46.00	38.00
71	46	107	67	66	39	61.00	42.00

Tableau 4. Mesures électromagnétique au niveau des transects (Site D)

Février 2008		février 2009		Novembre 2008		Novembre 2011	
EMv	EMh	EMv	EMh	EMv	EMh	EMv	EMh
26	18	45	32	37	25	18.00	44.00
75	53	60	36	94	72	30.00	14.00
46	30	70	36	98	72	92.00	61.00
94	69	90	54	118	98	216.00	261.00
195	281	181	342	231	253	225.00	196.00
189	298	285	328	229	200	280.00	370.00
225	257	358	313	349	319	380.00	289.00
276	235	299	216	385	237	323.00	246.00
268	211	255	211	342	243	419.00	341.00
307	269	268	321	319	387	443.00	403.00
377	391	342	325	350	334	345.00	314.00

Annexe 3

Tableau 1. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H1 de TA entre les campagnes de mesures

Profondeur 0-30 cm (Site A)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	1	0	0	1	1	0
2	1	1	3	2	2	4
3	10	12	8	2	2	4
4	0	2	0	2	0	2
5	13	21	24	8	11	3
6	3	8	8	5	5	0
7	2	4	4	2	2	0
8	4	1	2	5	6	1
9	1	3	3	2	2	0
10	1	3	5	2	4	2
11	19	22	1	3	20	23
12	27	20	12	7	39	32
13	4	7	17	3	13	10
Ecart moyen	7	8	7	3	8	6

Tableau 2. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H2 de TA entre les campagnes de mesures

Profondeur 30-60 cm (Site A)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	2	6	2	4	0	4
2	0	1	1	1	1	2
3	0	1	1	1	1	0
4	0	1	0	1	0	1
5	3	1	5	2	8	6
6	5	1	5	6	0	6
7	2	2	6	0	4	4
8	1	3	1	4	2	2
9	9	12	13	3	4	1
10	4	4	4	8	0	8
11	6	1	2	5	4	1
12	10	9	13	1	3	4
13	0	3	3	3	3	0
Ecart moyen	3	3	4	3	2	3

Tableau 3. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H3 de TA entre les campagnes de mesures

Profondeur 60-90 cm (Site A)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	3	0	3	3	0	3
2	2	0	1	2	1	1
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	2	0	2	2
5	5	5	1	0	4	4
6	2	0	3	2	5	3
7	4	0	7	4	3	7
8	1	2	3	1	2	1
9	3	15	4	18	1	19
10	3	9	2	6	1	7
11	2	5	1	3	1	4
12	3	2	2	1	5	4
13	1	0	1	1	2	1
Ecart moyen	2	3	2	3	2	4

Tableau 4. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H4 de TA entre les campagnes de mesures

Profondeur 90-120 cm (Site A)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	1	2	3	1	4	5
2	5	3	1	8	6	2
3	2	2	3	0	1	1
4	2	4	3	2	1	1
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
Ecart moyen	1	1	1	1	1	1

Tableau 5. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H5 de TA entre les campagnes de mesures

Profondeur 120-150 cm (Site A)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	3	2	6	1	3	4
2	0	0	1	0	1	1
3	0	0	4	0	4	4
4	0	5	7	5	7	2
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
Ecart moyen	0	1	1	0	1	1

Tableau 6. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H1 de TB entre les campagnes de mesures

Profondeur 0-30 cm (Site B)						
Sondage	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	4	6	3	2	8	9
2	2	6	0	5	1	6
3	3	2	1	1	4	3
4	2	0	2	3	4	1
5	11	2	4	9	7	2
6	6	4	1	2	7	5
7	22	17	18	5	4	1
Ecart	7	5	4	4	5	4

Tableau 7. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H2 de TB entre les campagnes de mesures

Profondeur 30 -60 cm (Site B)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	3	5	3	3	6	8
2	1	3	3	2	1	1
3	0	0	1	0	1	1
4	2	3	1	1	2	2
5	7	9	1	2	6	8
6	10	4	1	6	11	5
7	9	9	7	0	1	2
Ecart	5	5	2	2	4	4

Tableau 8: Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H3 de TB entre les campagnes de mesures

Profondeur 60-90 cm (Site B)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	2	3	2	1	0	1
2	3	0	6	2	4	6
3	1	2	16	0	18	18
4	1	3	17	2	18	20
5	6	3	23	3	17	20
6	3	9	23	6	20	13
7	0	0	0	0	0	0
Ecart moyen	2	3	12	2	11	11

Tableau 9. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H4 de TB entre les campagnes de mesures

Profondeur 90-120 cm (Site B)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	6	1	1	5	7	1
2	2	1	1	1	3	2
3	2	4	3	2	5	7
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
Ecart moyen	1	1	1	1	2	1

Tableau 10. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H5 de TB entre les campagnes de mesures

Profondeur 120-150 cm (Site B)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	1	0	2	1	3	3
2	17	17	17	0	0	0
3	2	0	3	1	4	3
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
Ecart moyen	3	2	3	0	1	1

Tableau 11. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H1 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 0-30 cm (Site C)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	2	2	1	0	3	3
2	1	0	5	1	6	5
3	0	3	2	3	2	5
4	1	0	1	2	0	1
5	2	2	0	4	2	2
6	2	0	1	2	1	1
7	2	1	1	3	2	1
8	3	1	1	2	2	0
9	12	1	0	11	12	1
10	4	2	1	6	4	2
Ecart moyen	3	1	1	3	3	2

Tableau 12. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H2 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 30-60 cm (Site C)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	2	4	6	2	4	2
2	3	6	9	3	6	3
3	0	3	11	3	11	8
4	2	4	11	3	9	7
5	1	2	7	2	6	5
6	0	1	4	1	5	3
7	1	4	9	3	8	6
8	7	10	16	3	9	6
9	6	13	16	7	10	3
10	7	11	13	4	6	1
Ecart moyen	3	6	10	3	7	4

Tableau 13. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H3 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 60-90 cm (Site C)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	2	5	7	3	5	2
2	0	1	7	0	7	6
3	1	8	11	7	10	3
4	3	9	15	6	12	5
5	8	8	12	0	4	4
6	3	6	9	3	6	3
7	4	12	9	7	5	3
8	7	8	11	2	4	2
9	9	16	22	8	14	6
10	6	13	12	7	7	0
Ecart moyen	4	9	11	4	7	3

Tableau 14. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H4 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 90-120 cm (Site C)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	0	2	8	2	8	6
2	4	4	7	0	4	4
3	3	5	10	1	7	5
4	1	4	14	3	14	11
5	0	2	2	2	2	3
6	1	2	10	3	10	8
7	1	2	10	1	9	8
8	6	8	12	2	6	4
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
Ecart moyen	2	3	7	1	6	5

Tableau 15. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H5 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 120-150 cm (Site C)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	2	2	7	0	5	5
2	1	1	6	3	5	7
3	1	5	10	4	9	6
4	1	5	14	4	13	9
5	0	1	5	1	5	4
6	0	0	4	0	4	4
7	1	1	5	0	4	4
8	0	1	4	1	4	3
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
Ecart moyen	1	2	6	1	5	4

Tableau 16. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H1 de TD entre les campagnes de mesures

Profondeur 0-30 cm (Site D)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	2	1	1	1	1	0
2	4	2	8	6	12	6
3	2	2	1	0	3	3
4	0	0	1	0	1	1
5	4	5	8	0	4	4
6	4	5	3	9	7	2
7	12	9	13	3	2	4
8	1	2	2	1	2	0
9	1	0	1	1	2	1
10	3	3	2	6	5	1
11	2	17	2	19	1	20
Ecart moyen	3	4	4	4	3	4

Tableau 17. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H2 de TD entre les campagnes de mesures

Profondeur 30-60 cm (Site D)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	1	0	1	1	0	1
2	2	1	5	1	4	4
3	0	1	3	1	3	2
4	2	2	1	4	3	1
5	8	1	7	8	1	7
6	6	7	15	2	20	22
7	4	1	3	2	1	2
8	5	6	2	12	8	4
9	5	4	6	0	2	2
10	2	4	2	6	4	2
11	8	8	0	17	8	8
Ecart moyen	4	3	4	5	5	5

Tableau 18. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H3 de TD entre les campagnes de mesures

Profondeur 60-90 cm (Site D)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	1	1	2	1	0	1
2	3	2	3	1	1	1
3	11	6	13	18	2	19
4	1	3	4	2	3	1
5	8	3	5	5	3	2
6	1	1	1	0	0	0
7	14	14	2	0	12	12
8	22	22	5	0	16	16
9	23	23	5	0	18	18
10	19	19	4	0	22	22
11	20	20	5	0	25	25
Ecart moyen	11	10	4	2	9	11

Tableau 19. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H4 de TD entre les campagnes de mesures

Profondeur 90-120 cm (Site D)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	3	1	1	2	2	0
2	5	2	4	2	0	2
3	10	11	9	2	19	21
4	3	0	7	3	10	7
5	10	5	8	5	2	2
6	0	0	1	0	1	1
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
Ecart moyen	3	2	3	1	3	3

Tableau 20. Ecart en valeurs absolues des taux d'humidité H5 de TD entre les campagnes de mesures

Profondeur 120-150 cm (Site D)						
Sondages	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9-N9	F9-N11	N9-N11
1	3	0	0	4	3	0
2	2	0	1	2	2	0
3	12	10	5	2	17	15
4	24	8	1	16	25	9
5	9	1	5	11	5	6
6	0	0	14	0	14	14
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
Ecart moyen	5	2	2	3	6	4

Tableau 21. Comparaisons des moyennes des Humidités pondérales entre les quatre campagnes de mesures

site A	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
F08-F09	0.5574	0.35162	0.30202	0.81609	0.34431
F08-N09	0.85021	0.37483	0.49436	0.20797	0.20457
F08-N11	0.18387	0.03877*	0.57803	0.05006	0.07036
F09-N09	0.02533*	0.97822	0.23637	0.31727	0.47943
F09-N11	0.14632	0.01785*	0.08993	0.08656	0.07788
N09-N11	0.35753	0.04952	0.75852	0.47835	0.07107
Site B	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
F08-F09	0.58537	0.73181	0.63548	0.73582	0.3775
F08-N09	0.72311	0.64369	0.982	0.32729	0.35289
F08-N11	0.52061	0.64213	0.07371	0.3851	0.35759
F09-N09	0.56205	0.05007	0.74835	0.27128	0.8076
F09-N11	0.87284	0.92428	0.0561	0.97584	0.87772
N09-N11	0.70731	0.38606	0.04048*	0.34763	0.9077
Site C	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
F08-F09	0.07883	0.01234*	0.00162*	0.05233	0.02328*
F08-N09	0.06652	0.00153**	1.38263E-4*	0.00508*	0.05295
F08-N11	0.05335	1.6449E-5*	2.00901E-5*	0.00322**	0.00264*
F09-N09	0.01288*	2.21795E-4*	0.00128*	0.00402*	0.22279
F09-N11	0.44329	3.80673E-6*	7.70569E-5*	0.00669*	0.00357*
N09-N11	0.00838*	2.01187E-4*	0.01164*	0.01231*	0.00137*
Site D	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
F08-F09	0.11159	0.06601*	0.02614*	0.04117*	0.07162
F08-N09	0.72277	0.48665	0.00877*	0.12881	0.20585
F08-N11	0.10694	0.54457	0.87887	0.87635	0.36012
F09-N09	0.18279	0.4712	0.66701	0.11365	0.07921
F09-N11	0.68408	0.54178	0.01129*	0.14296	0.04437*
N09-N11	0.0776*	0.94704	0.01205*	0.33939	0.17947

* Significatif à $P < 0,05$

Annexe 4

Tableau 1. Ecart en valeurs absolues des CEEq H1 de TA entre les campagnes de mesures

Profondeur 0-30 cm (Site A)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	0,9	0,1	2,1	0,8	1,2	2,0
2	2,0	1,4	0,3	0,6	1,7	1,1
3	0,2	0,2	0,5	0,5	0,7	0,2
4	1,1	1,1	3,7	0,0	4,8	4,8
5	4,5	1,7	7,6	2,7	3,1	5,9
6	11,7	8,1	25,9	19,7	14,2	34,0
7	4,9	16,7	7,1	11,8	2,2	9,6
8	26,9	13,1	23,7	39,9	3,2	36,7
9	10,9	18,1	24,0	29,0	13,1	42,1
10	4,1	24,4	6,9	20,3	2,8	17,5
11	35,1	2,2	13,8	37,2	21,3	15,9
12	1,5	26,8	26,4	28,2	27,9	0,4
13	24,8	7,2	20,3	32,0	45,0	13,1
Ecart moyen	9,9	9,3	12,5	17,1	10,9	14,1

Tableau 2. Ecart en valeurs absolues CEEq H2 de TA entre les campagnes de mesures

Profondeur 30-60 cm (Site A)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	0,37	1,52	3,73	1,15	3,36	2,21
2	2,23	4,66	0,20	2,44	2,02	4,46
3	11,53	2,48	4,59	14,01	6,94	7,08
4	0,48	0,57	5,31	0,10	5,79	5,88
5	4,02	1,49	20,97	2,53	16,95	19,48
6	16,42	1,83	21,34	14,59	4,92	19,50
7	14,03	12,00	19,30	2,03	5,27	7,30
8	11,83	6,25	12,09	18,08	0,27	18,34
9	14,16	1,48	2,85	15,64	17,00	1,37
10	2,64	3,51	30,93	6,16	33,58	27,42
11	1,61	0,32	19,18	1,30	17,57	18,87
12	3,44	8,26	16,95	11,70	20,40	8,70
13	1,82	28,41	24,99	26,59	23,17	3,42
Ecart moyen	6,51	5,60	14,03	8,95	12,09	11,08

Tableau 3. Ecart en valeurs absolues des CEEq H3 de TA entre les campagnes de mesures

Profondeur 60—90 (Site A)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	2,19	0,59	2,63	2,77	0,44	3,21
2	0,77	2,45	1,40	3,22	0,63	3,85
3	11,54	2,54	2,40	9,00	13,94	4,94
4	9,90	6,53	3,05	3,38	12,95	9,58
5	4,82	1,17	0,06	5,99	4,77	1,23
6	8,31	0,38	23,16	7,93	14,85	22,78
7	2,88	0,79	8,00	3,67	5,12	8,79
8	1,14	4,81	4,77	5,95	3,63	9,58
9	1,01	11,49	1,93	12,51	0,92	13,43
10	3,73	2,78	9,29	6,51	13,02	6,50
11	1,66	6,99	1,43	5,32	3,09	8,42
12	2,00	10,20	10,22	8,20	8,22	0,01
13	0,70	1,17	16,73	1,87	17,44	15,56
Ecart moyen	3,90	3,99	6,54	5,87	7,62	8,30

Tableau 4. Ecart en valeurs absolues des CEEq H4 de TA entre les campagnes de mesures

Profondeur 90-120 cm (Site A)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	3,68	7,13	1,58	3,45	2,10	5,55
2	1,72	1,67	7,18	3,39	5,46	8,85
3	10,29	3,56	24,81	13,85	14,52	28,37
4	6,26	2,42	0,49	3,84	5,77	1,93
5	12,92	6,59	6,53	6,32	6,38	0,06
6	6,31	0,57	4,70	6,88	1,61	5,27
7	7,40	2,49	6,88	9,88	0,52	9,36
8	2,46	3,78	6,83	6,23	4,37	10,61
9	0,26	18,82	0,66	19,08	0,40	19,48
10	0,59	4,88	5,71	4,29	5,12	0,83
11	6,41	8,33	0,04	1,92	6,37	8,29
12	2,74	10,05	18,59	7,32	15,85	8,54
13	6,08	11,74	35,35	5,66	41,43	47,09
Ecart moyen	5,16	6,31	9,18	7,09 *	8,46	11,86

Tableau 5. Ecart en valeurs absolues des CEEq H5 de TA entre les campagnes de mesures

Profondeur 120-150 cm (Site A)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	2,44	1,48	4,56	0,96	2,13	3,08
2	19,86	8,81	0,25	28,67	19,61	9,06
3	2,38	2,96	5,08	5,35	2,69	8,04
4	3,72	17,96	4,90	21,69	1,17	22,86
5	2,88	2,16	3,78	5,04	6,67	1,63
6	11,63	0,46	4,19	12,09	7,44	4,65
7	6,07	0,52	7,12	6,59	1,06	7,65
8	2,39	5,70	3,94	8,09	1,55	9,64
9	3,26	10,96	3,98	14,22	0,73	14,95
10	1,48	5,34	1,06	6,82	0,42	6,40
11	2,36	8,14	0,98	5,78	3,34	9,12
12	3,81	10,81	15,03	7,00	11,21	4,22
13	1,71	8,52	25,28	10,22	23,58	33,80
Ecart moyen	4,92	6,45	6,17	10,19	6,28	10,39

Tableau 6. Ecart en valeurs absolues des CEEq H1 de TB entre les campagnes de mesures

Profondeur 0-30 cm (Site B)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	4,22	12,09	0,47	7,86	4,69	12,55
2	5,72	1,17	14,16	4,55	8,44	12,99
3	43,68	18,39	34,23	25,30	9,45	15,84
4	18,57	22,82	12,61	4,25	5,96	10,21
5	28,02	6,76	15,82	21,26	43,84	22,58
6	17,37	1,86	20,09	15,51	37,45	21,95
7	16,52	15,01	32,86	31,54	16,33	47,87
Ecart moyen	19,16	11,16	18,60	15,75	18,02	20,57

Tableau 7. Ecart en valeurs absolues des CEEq H2 de TB entre les campagnes de mesures

Profondeur 30-60 cm (Site B)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	22,53	5,98	17,50	16,54	5,03	11,51
2	24,02	11,62	34,26	12,41	10,24	22,65
3	22,89	5,39	36,96	17,50	14,07	31,57
4	17,59	7,66	18,91	9,93	1,33	11,25
5	13,57	8,20	10,70	5,36	2,87	2,49
6	0,39	6,63	11,36	6,24	10,97	4,73
7	11,29	16,52	24,85	5,23	13,56	8,33
Ecart moyens	16,04	8,86	22,08	10,46	8,30	13,22

Tableau 8 : Ecart en valeurs absolues des CEEq H3 de TB entre les campagnes de mesures

Profondeur 60-90 cm (Site B)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	12,91	3,76	1,15	16,68	11,76	4,91
2	33,69	34,62	50,72	0,92	17,03	16,11
3	1,09	1,76	18,36	2,85	19,45	16,60
4	15,39	7,75	14,43	7,64	0,96	6,68
5	11,39	10,42	9,92	0,97	1,47	0,50
6	9,34	25,71	10,74	35,05	1,40	36,45
7	8,08	0,77	26,12	7,31	18,04	25,35
Ecart moyens	13,13	12,11	18,78	10,20	10,02	15,23

Tableau 9. Ecart en valeurs absolues CEEq H4 de TB entre les campagnes de mesures

Profondeur 90-120 cm (Site B)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	10,06	8,09	15,79	1,97	5,73	7,70
2	20,13	14,73	28,67	5,40	8,54	13,94
3	12,10	5,40	8,43	6,70	20,52	13,82
4	11,47	8,63	15,90	2,83	4,43	7,26
5	11,55	8,98	13,60	2,57	2,04	4,61
6	22,76	15,78	25,82	6,98	3,06	10,04
7	15,73	2,09	8,12	17,82	7,62	10,20
Ecart moyens	14,83	9,10	16,62	6,32	7,42	9,65

Tableau 10. Ecart en valeurs absolues des taux d'hum CEEq H5 de TB entre les campagnes de mesures

Profondeur 120-150 cm (Site B)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	13,70	8,98	18,45	4,72	4,76	9,48
2	14,02	1,15	17,01	12,87	2,99	15,86
3	4,50	9,23	18,99	13,73	23,49	9,76
4	4,97	6,48	5,46	1,51	0,49	1,02
5	1,57	4,82	0,30	6,40	1,27	5,12
6	7,04	0,71	8,62	7,75	1,58	9,33
7	26,09	20,78	32,37	5,31	6,27	11,59
Ecart moyens	10,27	7,45	14,46	7,47	5,84	8,88

Tableau 11. Ecart en valeurs absolues des CEEq H1 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 0-30 cm (Site C)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	0,3	1,2	0,2	0,9	0,5	1,4
2	4,0	2,8	5,8	1,2	1,8	3,0
3	0,9	4,6	0,3	3,7	0,6	4,3
4	4,7	6,4	4,6	11,0	0,0	11,0
5	20,3	3,8	3,5	16,5	23,7	7,3
6	6,7	9,8	9,2	3,1	2,5	0,6
7	5,7	15,0	1,3	9,3	4,5	13,8
8	4,3	17,6	1,0	13,3	3,3	16,6
9	0,7	15,5	1,9	14,8	2,6	17,4
10	3,9	12,8	9,8	16,7	5,9	22,6
Ecart moyen	5,1	9,0	3,8	9,1	4,5	9,8

Tableau 12. Ecart en valeurs absolues CEEq H2 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 30-60 cm (Site C)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	0,4	1,9	0,9	1,5	1,3	2,8
2	2,4	4,6	3,6	2,2	1,1	1,1
3	1,6	6,7	7,4	5,1	5,8	0,7
4	1,5	18,6	2,7	20,1	1,2	21,3
5	1,4	16,6	0,8	15,2	0,6	15,8
6	1,8	14,6	2,2	16,4	0,4	16,8
7	4,4	36,3	3,9	31,8	0,6	32,4
8	2,1	19,2	2,4	17,1	0,3	16,8
9	8,0	1,5	13,7	9,5	5,7	15,3
10	1,2	13,9	4,4	12,7	5,6	18,3
Ecart moyen	2,5	13,4	4,2	13,2	2,3	14,1

Tableau 13. Ecart en valeurs absolues des CEEq H3 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 60-90 cm (Site C)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	1,4	0,3	0,2	1,0	1,6	0,6
2	5,5	1,0	0,8	4,5	4,7	0,2
3	1,7	3,7	0,6	2,0	2,3	4,3
4	1,3	21,5	2,3	20,1	1,0	19,2
5	0,7	21,5	2,2	20,8	1,6	19,3
6	2,1	19,1	1,3	17,0	0,8	17,8
7	2,7	25,6	3,5	22,8	0,8	22,0
8	0,5	16,9	1,5	17,4	2,0	15,4
9	8,7	35,3	23,2	44,0	14,5	58,5
10	17,7	4,7	20,9	22,5	3,2	25,6
Ecart moyen	4,2	15,0	5,7	17,2	3,2	18,3

Tableau 14. Ecart en valeurs absolues des CEEq H4 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 120-150 cm (Site C)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	0,6	2,5	2,4	1,9	1,8	0,1
2	2,2	0,2	1,6	2,3	0,6	1,8
3	1,8	2,0	5,2	0,2	3,4	3,2
4	2,8	22,8	2,4	20,0	0,5	20,5
5	2,3	25,3	3,8	23,1	1,5	21,6
6	2,0	24,7	3,5	22,7	1,5	21,2
7	4,0	17,0	4,7	13,0	0,8	12,3
8	1,3	20,2	3,0	18,9	1,7	17,2
9	12,2	11,6	22,2	0,6	10,0	10,5
10	3,0	4,8	0,6	1,9	3,6	5,5
Ecart	3,2	13,1	4,9	10,5	2,5	11,4

Tableau 15. Ecart en valeurs absolues des CEEq H5 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 120-150 cm (Site C)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	0,4	0,1	0,3	0,3	0,7	0,3
2	2,5	1,1	3,3	1,3	0,9	2,2
3	15,8	15,7	16,7	0,2	0,9	1,0
4	25,0	0,1	6,3	24,9	18,7	6,2
5	1,0	1,5	3,7	0,5	2,8	2,3
6	2,5	13,6	2,6	11,2	0,1	11,1
7	2,4	20,7	3,0	18,4	0,6	17,8
8	7,4	0,5	21,9	7,9	29,3	21,4
9	5,3	2,3	17,4	3,0	22,7	19,7
10	10,2	0,6	2,8	10,8	7,5	3,3
Ecart moyens	7,2	5,6	7,8	7,9	8,4	8,5

Tableau 16. Ecart en valeurs absolues des CEEq H1 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 0-30 cm (Site D)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	1,6	0,2	0,1	1,8	1,5	0,3
2	8,0	10,5	10,7	2,5	2,7	0,2
3	0,4	1,0	24,1	0,6	23,7	23,1
4	17,8	10,9	6,4	28,7	11,4	17,4
5	2,0	14,8	14,5	16,8	12,4	29,3
6	6,0	27,3	39,9	33,3	45,9	12,6
7	0,0	50,0	14,8	50,0	14,8	35,2
8	24,5	2,0	16,7	22,5	7,9	14,7
9	16,6	18,0	1,2	1,4	17,9	19,3
10	12,3	1,4	7,2	13,7	19,5	5,8
11	1,1	25,1	50,4	24,1	49,3	25,2
Ecart moyens	8,2	14,7	16,9	17,8	18,8	16,6

Tableau 17. Ecart en valeurs absolues CEEq H2 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 30-60 cm (Site D)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	2,0	2,6	2,3	0,6	0,3	0,3
2	1,0	33,8	34,2	34,8	35,2	0,4
3	15,6	7,0	3,2	8,6	18,8	10,2
4	46,9	5,0	7,7	51,9	54,6	2,7
5	19,3	3,3	13,5	16,0	5,8	10,2
6	7,2	38,5	25,5	45,7	32,7	12,9
7	12,3	27,2	18,3	39,5	30,6	8,9
8	13,4	29,4	2,1	42,7	11,2	31,5
9	9,4	16,5	4,7	25,9	14,1	11,8
10	18,9	12,4	13,0	6,5	5,9	0,6
11	2,8	32,9	26,0	30,1	23,1	6,9
Ecart moyens	13,5	19,0	13,7	27,5	21,1	8,8

Tableau 18. Ecart en valeurs absolues des CEEq H3 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 60-90 cm (Site D)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	17,7	9,6	9,5	27,3	27,2	0,1
2	15,1	31,1	31,9	46,1	47,0	0,8
3	9,8	18,4	30,7	8,5	20,9	12,4
4	12,8	7,4	1,1	5,4	11,7	6,3
5	3,4	2,3	1,5	1,1	1,9	0,9
6	5,4	36,6	41,7	31,2	36,3	5,1
7	5,0	37,7	18,2	42,7	23,1	19,6
8	15,7	5,5	10,5	10,1	26,2	16,1
9	63,1	1,3	6,5	64,4	69,5	5,1
10	20,3	19,3	23,1	0,9	2,8	3,8
11	0,7	19,9	17,6	19,2	16,9	2,2
Ecart moyens	15,4	17,2	17,5	23,4	25,8	6,6

Tableau 19. Ecart en valeurs absolues des CEEq H4 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 90-120 cm (Site D)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	6,9	17,6	16,1	24,5	23,0	1,5
2	13,4	25,0	25,4	38,5	38,9	0,4
3	22,9	8,6	4,2	31,5	27,1	4,4
4	2,3	4,3	7,6	2,1	9,9	12,0
5	8,7	5,9	1,3	2,8	7,4	4,6
6	11,2	0,0	6,7	11,2	18,0	6,8
7	5,7	8,0	8,8	2,3	3,1	0,9
8	61,0	15,1	4,9	45,9	65,9	20,0
9	15,2	11,2	8,5	4,0	6,7	2,7
10	11,3	11,4	21,8	0,1	33,2	33,2
11	4,4	3,8	0,7	8,2	5,1	3,1
Ecart moyens	14,8	10,1	9,6	15,5	21,7	8,1

Tableau 20. Ecart en valeurs absolues des CEEq H5 de TC entre les campagnes de mesures

Profondeur 120-150 cm (Site D)						
Sondages	(F8-F9)	(F8-N9)	(F8-N11)	(F9-N9)	(F9-N11)	(N9-N11)
1	9,9	15,1	14,6	25,0	24,5	0,5
2	4,6	26,8	27,2	31,5	31,9	0,4
3	31,0	1,2	4,8	32,2	26,2	6,0
4	5,2	11,6	3,5	6,5	8,7	15,2
5	8,2	4,3	2,3	3,9	5,9	2,0
6	6,1	8,2	7,1	14,4	1,0	15,3
7	6,6	4,9	4,6	1,7	2,0	0,3
8	11,2	9,3	17,6	20,4	28,8	8,4
9	0,4	1,7	5,8	2,2	5,3	7,5
10	30,0	21,8	16,5	8,2	13,4	5,3
11	3,3	0,9	2,7	2,4	0,7	1,8
Ecart	10,6	9,6	9,7	13,5	13,5	5,7

Tableau 21. Comparaisons des moyennes des CEEq entre les quatre campagnes de mesures

site A	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
F08-F09	0.01017*	0.11234	0.42499	0.07379	0.10949
F08-N09	0.54884	0.34184	0.05192	0.16569	0.35973
F08-N11	0.30204	0.66933	0.97246	0.95155	0.60279
F09-N09	0.04685*	0.05028	0.01781*	0.00265*	0.13275
F09-N11	0.29057	0.17219	0.68917	0.39403	0.08964
N09-N11	0.21729	0.9181	0.32128	0.57032	0.84499
Site B	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
F08-F09	0.14207	0.0024*	0.01853	0.0384*	0.12592
F08-N09	0.61254	0.00102*	0.60742	0.06013	0.31009
F08-N11	0.0797	0.00138*	0.02128*	0.00148*	0.03688*
F09-N09	0.16453	0.09835	0.11718	0.16257	0.30477
F09-N11	0.9122	0.09388	0.24251	0.15055	0.14597
N09-N11	0.23914	0.01491*	0.08145	0.00031**	0.00249*
Site C	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
F08-F09	0.61378	0.81916	0.60885	0.66963	0.79408
F08-N09	0.04784*	0.00824*	0.00322*	0.03701**	0.4749
F08-N11	0.03294*	0.48752	0.31776	0.97001	0.17445
F09-N09	0.14187	0.00278*	0.00592*	0.02079***	0.40106
F09-N11	0.07128	0.32637	0.19012	0.54863	0.39727
N09-N11	0.00354*	0.00256**	0.00729*	0.00841***	0.05022
Site D	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
F08-F09	0.04452*	0.55576	0.48293	0.06684	0.6454
F08-N09	0.94571	0.27911	0.00741*	0.37247	0.2108
F08-N11	0.24179	0.08338	0.00558*	0.31741	0.01519*
F09-N09	0.39682	0.67252	0.27704	0.01412*	0.19602
F09-N11	0.84463	0.50973	0.27155	0.06195	0.04095*
N09-N11	0.20535	0.7718	0.86216	0.91016	0.14213

* Significatif à $P < 0,05$

Annexe 5.

Tableau 1. Classification de la teneur en gypse (Barzanji, 1973)

Gypsum (%)	Classes
<0.3	Non gypseux
0.3-10	peu gypseux
10-25	Moyennement gypseux
25-50	Fortement gypseux

Annexe 6

Tableau 1. Classification des carbonates (Baize, 1988)

Taux de CaCO₃	Classes
< 1	Non calcaire
1-5	Peu calcaire
5-25	Modérément calcaire
25-50	Fortement calcaire
50-80	Très fortement calcaire
> 80	Extrêmement calcaire

Annexe 7. Diagramme de classification des eaux d'irrigation (eaux 1 et 2)

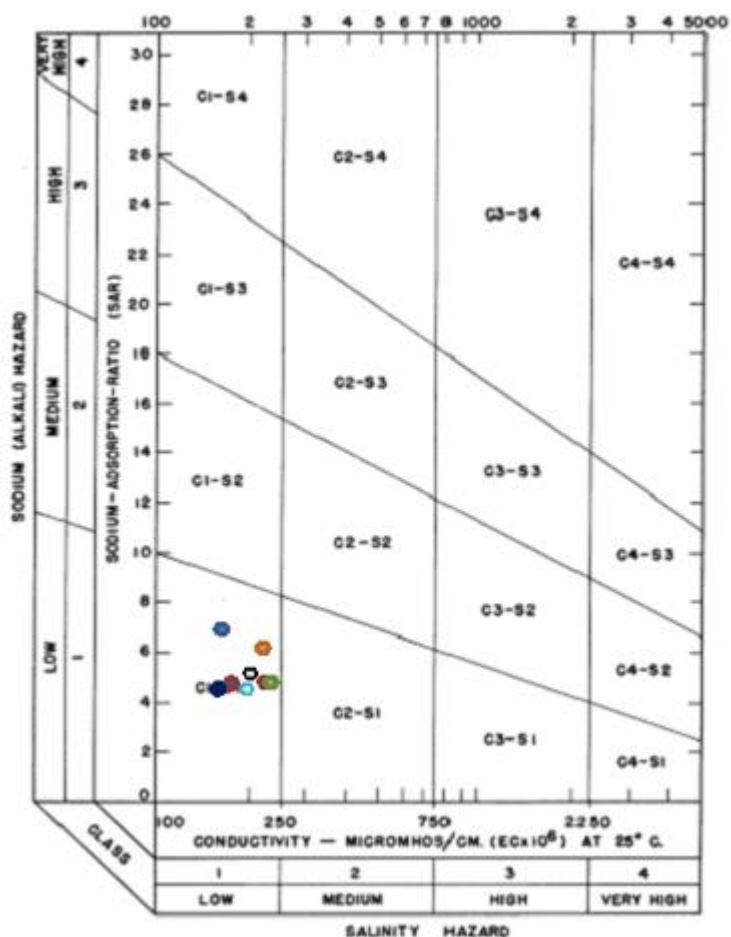


Figure 1. Classification des eaux d'irrigation des sites d'études (USSL, 1954)

Annexe 8.

Tableau 1. Profondeurs approximatifs de la limite supérieure de la couche imperméable (Debdeb) pour les quatre sites d'études.

Profondeur de la couche imperméable				
Sondages	Site A	Site B	Site C	Site D
1	> 150	> 150	> 150 cm	> 150 cm
2	> 150	> 110	> 150 cm	> 150 cm
3	> 150	> 90	> 150 cm	> 150 cm
4	> 150	> 90 cm	> 150 cm	> 150 cm
5	> 100 cm	> 90 cm	> 150 cm	> 150 cm
6	> 100 cm	> 90 cm	> 150 cm	> 90 cm
7	> 100 cm	> 90cm	> 150 cm	> 90 cm
8	> 100 cm	/	> 90	> 80 cm
9	> 90cm	/	> 90	> 80 cm
10	> 90 cm	/	/	> 55 cm
11	> 70 cm	/	/	> 45 cm
12	> 45cm	/	/	/
13	> 20	/	/	/

Annexe 9

Tableau 1. Superficies des classes de salinité des cartes du site A

Classes de	Campagnes (0-90 cm)							
	F8		F9		N9		N11	
	Superficie		Superficie		Superficie		Superficie	
	m ²	%	m ²	%	m ²	%	m ²	%
0--4	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
4--8	0	0,0	871,90	3,2	0	0,0	0	0,0
8--16	0,00	0,0	11360,17	41,3	34,55	0,1	10240,1	35,06
16--24	17542,38	61,9	7270,93	26,5	14878,39	49,4	7657,51	26,22
24--32	7084,63	25,0	5168,52	18,8	11093,72	36,8	7248,38	24,82
32--64	3536,57	12,5	2816,79	10,2	4099,45	13,6	2504,5	8,58
> 64	178,99	0,6	0,00	0,0	0,00	0,0	1553,59	5,32
Total	28342,57	100,0	27488,31	100	30106,12	100,0	29204,11	100,0
Classes de	Campagnes (0-150 cm)							
	F8		F9		N9		N11	
	Superficie		Superficie		Superficie		Superficie	
	m ²	%	m ²	%	m ²	%	m ²	%
0--4	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
4--8	0	0,0	0	0,0	0	0,0	13,19	0,0
8--16	0	0,0	1430,79	5,2	0	0,0	6653,54	22,8
16--24	13591,85	48,0	18464,28	67,2	9476,76	31,5	7302,91	25,0
24--32	11433,79	40,3	6426,70	23,4	15027,03	49,9	7491,30	25,7
32--64	3161,68	11,2	1166,54	4,2	5602,33	18,6	5957,18	20,4
> 64	155,25	0,5	0,00	0,0	0,00	0,0	1786,00	6,1
Total	28342,57	100,0	27488,31	100,0	30106,12	100,0	29204,11	100,0

Tableau 2. Ecart absolu entre les différentes périodes des superficies% des classes de salinité des cartes du site A

Classes de salinité dS/m	Profondeur 0-90 cm					
	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9 -N9	F9 -N11	N9 -N11
0--4	0	0	0	0	0	0
4--8	0,032	0	0	0,032	0,032	0
8--16	0,413	0,001	0,3506	0,412	0,0624	0,3496
16--24	0,354	0,125	0,3568	0,229	0,0028	0,2318
24--32	0,062	0,118	0,0018	0,18	0,0602	0,1198
32--64	0,023	0,011	0,0392	0,034	0,0162	0,0502
> 64	0,006	0,006	0,0472	0	0,0532	0,0532
Ecart total	89	26,1	79,6	65,5	22,6	80,5
Classes de salinité dS/m	Profondeur 0-150 cm					
	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9 -N9	F9 -N11	N9 -N11
0--4	0	0	0	0	0	0
4--8	0	0	0	0	0	0
8--16	0,052	0	0,228	0,052	0,176	0,228
16--24	0,192	0,165	0,23	0,357	0,422	0,065
24--32	0,169	0,096	0,146	0,265	0,023	0,242
32--64	0,07	0,074	0,092	0,144	0,162	0,018
> 64	0,005	0,005	0,056	0	0,061	0,061
Ecart total	48,8	34	75,2	82,8	84,4	61,4

Tableau 3. Superficies des classes de salinité des cartes du site B

Classes de salinité dS/m	Campagnes (0-90 cm)							
	F8		F9		N9		N11	
	Superficie		Superficie		Superficie		Superficie	
	m ²	%	m ²	%	m ²	%	m ²	%
0---4	0	0	0	0	0	0	662,54	2,06
4--8	0	0			0	0	11180,53	34,77
8--16	0	0			0	0	17977,98	55,91
16--24	0	0	13867.1	48.64%	0	0	2009,33	6,25
24--32	0	0	8863.6	31.09%	225,87	0,72	317,84	0,99
32--64	25335,23	100	5681.11	19.93%	27937,00	89,43	4,50	0,01
> 64	0	0	100.6	0.35%	3076,24	9,85	0	0
Total	25335,23	100	28512,41	100	31239,11	100	32152,72	100
Classes de salinité dS/m	Campagnes (0-150 cm)							
	F8		F9		N9		N11	
	Superficie		Superficie		Superficie		Superficie	
	m2	%	m ²	%	m2	%	m2	%
0---4	0	0	0	0	0	0	0	0
4--8	0	0	0	0	0	0	0	0
8--16	0	0	0	0	0	0	11945,56	37,15
16--24	0	0	0	0	0	0	17562,86	54,62
24--32	18,46	0,1	20261,61	71,06	0	0	2598,57	8,08
32--64	25316,76	99,9	8250,79	28,94	30058,57	96,224	45,69	0,14
> 64	0	0	0	0	1180,55	3,78	0	0
Total	25335,23	100	28512,41	100	31239,11	100	32152,72	100

Tableau 4. Ecart absolu entre les différentes périodes des superficies% des classes de salinité des cartes du site B

Profondeur 0-90 cm						
Classes de salinité dS/m	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9 -N9	F9 -N11	N9 -N11
0---4	0	0	2,06	0	2,06	2,06
4--8	0	0	34,77	0	34,77	34,77
8--16	0	0	55,91	0	55,91	55,91
16--24	48,64	0	6,25	48,64	42,39	6,25
24--32	31,09	0,72	0,99	30,37	30,1	0,27
32--64	80,07	10,57	99,99	69,5	19,92	89,42
> 64	0,35	9,85	0	9,5	0,35	9,85
Ecart totaux	160,15	21,14	199,97	158,01	185,5	198,53
Profondeur 0-150 cm						
Classes de salinité dS/m	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9 -N9	F9 -N11	N9 -N11
0---4	0	0	0	0	0	0
4--8	0	0	0	0	0	0
8--16	0	0	37,15	0	37,15	37,15
16--24	0	0	54,62	0	54,62	54,62
24--32	70,96	0,1	7,98	71,06	62,98	8,08
32--64	70,96	3,676	99,76	67,284	28,8	96,084
> 64	0	3,78	0	3,78	0	3,78
Ecart totaux	141,92	7,556	199,51	142,124	183,55	195,934

Tableau 5. Superficies des classes de salinité des cartes du site C

Classes de salinité dS/m	Campagnes (0-90 cm)							
	F8		F9		N9		N11	
	Superficie		Superficie		Superficie		Superficie	
	m2	%	m ²	%	m2	%	m2	%
0--4	188,62	2,56	271,98	3,43	0	0	0	0
4--8	5602,85	75,96	5390,00	67,98	626,23	6,57	0	0
8--16	1045,40	14,17	1835,24	23,15	3869,74	40,59	5563	58,07
16--24	527,19	7,15	431,96	5,45	4516,07	47,37	4016,3	41,93
24--32	12,22	0,17	0	0	405,78	4,26	0	0
32--64	0	0	0	0	116,16	1,22	0	0
> 64	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	7376,28	100	7929,19	100	9533,99	100	9579,23	100
Classes de salinité dS/m	Campagnes (0-150 cm)							
	F8		F9		N9		N11	
	Superficie		Superficie		Superficie		Superficie	
	m2	%	m ²	%	m2	%	m2	%
0--4	19,83	0,269	644,30	8,13	0	0	0	0
4--8	4354,60	59,035	4325,60	54,55	22,58	0,24	707,55	7,39
8--16	2352,05	31,887	2020,74	25,48	4660,00	48,88	5469,5	57,10
16--24	637,79	8,646	831,62	10,49	4309,57	45,20	3071,2	32,06
24--32	12,02	0,163	106,93	1,35	541,83	5,68	331,02	3,46
32--64	0	0	0	0	0	0	0	0
> 64	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	7376,28	100	7929,19	0	9533,99	100	9579,23	100

Tableau 6. Ecart absolu entre les différentes périodes des superficies% des Classes de salinité des cartes du site C

classe de salinité	Profondeurs 0-90 cm					
	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9 -N9	F9 -N11	N9 -N11
0--4	2,5257	2,56	2,56	0,0343	0,0343	/
4--8	7,98	69,39	75,96	61,41	67,98	6,57
8--16	-8,98	-26,42	-43,9	-17,44	-34,92	-17,48
16--24	1,7	-40,22	-34,78	-41,92	-36,48	5,44
24--32	0,17	-4,09	0,17	-4,26	/	4,26
32--64	/	-1,22	/	-1,22	/	1,22
> 64	/	/	/	/	/	/
Ecart total	21,3557	143,9	157,37	126,284	139,414	34,97
0-150 cm	Profondeurs 0-150 cm					
	F8-F9	F8-N9	F8-N11	F9 -N9	F9 -N11	N9 -N11
0--4	-7,861	0,269	0,269	8,13	8,13	0
4--8	4,485	58,795	51,645	54,31	47,16	-7,15
8--16	6,407	-16,993	-25,213	-23,4	-31,62	-8,22
16--24	-1,844	-36,554	-23,414	-34,71	-21,57	13,14
24--32	-1,187	-5,517	-3,297	-4,33	-2,11	2,22
32--64	/	/	/	/	/	/
> 64	/	/	/	/	/	/
Ecart total	17,301	118,124	103,834	224,88	210,59	30,73

Annexe 10

Tableau 1. Matrice de corrélation entre les différents paramètres pédologiques étudiés

Profondeur (0-150 cm)						
Paramètres	CEeq	H%	CaCO3%	Gypse%	pH	A+L%
CEeq	1	0.821**	-0.074	0.622*	-0.383	0.690*
H		1	-0.253	0.537	-0.561	0.869**
CaCO3			1	-0.077	-0.067	-0.225
Gypse				1	-0.208	0.285
pH					1	-0.562
A+L						1
Profondeur (0-150 cm)						
Paramètres	CEeq	H%	CaCO3%	Gypse%	pH	A+L%
0-150 cm						
CEeq	1	0.839**	-0.188	0.574	-0.415	0.722**
H		1	-0.346	0.426	-0.634	0.846**
CaCO3			1	0.041	0.043	-0.298
Gypse				1	-0.172	0.213
pH					1	-0.607
A+L						1