

***Evaluation de la salinité par induction
électromagnétique : Exemple d'une
parcelle cultivée de la plaine de la Macta
(Wilaya de Mascara)***

Par:

Mr IDDIR Mohamed El Amine

Directeur de thèse Professeur Mr DJILI K.

Année universitaire 2005 / 2006

Devant le jury composé de : Mr DAOUED Y. Professeur Président du jury Mr Dridi B. Maître de
conférence Examineur Mr Tamagoult M. Chargé de cours Examineur

Table des matières

..	1
REMERCIEMENT ..	3
Résumé .	5
Summary ..	7
صغلملا .	9
INTRODUCTION .	11
CHAPITRE I. LA SALINITE DU SOL .	13
1. Définition .	13
2. Les facteurs de salinisations ..	14
3. Réhabilitation des sols salés ..	15
4. Méthodes de mesure de la salinité du sol .	16
4.1 La résistivité électrique (dispositif de Wenner) .	16
4.2. La méthode électromagnétique ..	17
Chapitre II. Présentation de la zone d'étude .	25
1. Situation géographique .	25
2. Géologie et géomorphologie .	25
3. Hydrologie et hydrogéologie .	26
4. Les sols .	27
4.1. Les sols peu évolués .	28
4.2. Les vertisols .	28
4.3. Les sols calcimagnésiques .	28
4.4. Les sols Hydromorphes ..	28
4.5. Sols sodiques .	29
5. La végétation ..	29
6. Le climat ..	30
6.1. Les précipitations ..	30

6.2. La température .	30
6.3. L'évapotranspiration .	31
Chapitre III. Méthodologie du travail . .	33
1. La conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée .	33
2. Mesure de la conductivité électromagnétique . .	34
2.1. Acquisition des données . .	34
2.2. Traitement des données .	35
Chapitre IV. Résultats et discussions .	41
1. Description de la salinité et de l'humidité des échantillons prélevés .	41
1.1. Analyses statistiques . .	41
1.2. Evolution de la salinité selon la profondeur .	42
1.3. Evolution de la salinité du sol en fonction du réseau de drainage .	43
2. Evaluation de la salinité par induction électromagnétique . .	45
2.1. Les mesures électromagnétiques . .	46
2.2. Etalonnage des mesures électromagnétiques .	47
2.3. La conductivité électrique calculée pour l'ensemble des horizons . .	50
2.4. Conclusion .	53
3. Analyse géostatistique de la salinité mesurée par induction électromagnétique .	54
3.1. Etude de la variabilité spatiale de la salinité .	54
3.2. Variabilité spatio-temporelle de la salinité . .	67
4. Synthèse et discussion .	71
4.1. La conductivité électrique .	71
4.2. L'induction électromagnétique .	72
4.3. La cartographie de la salinité .	73
Conclusion générale .	77
Références bibliographiques .	79
Annexes . .	85
Annexes 1. Formulation mathématique des équations de Maxwell . .	85
Annexes 2. Les valeurs de conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée .	86

Annexes 3. Les valeurs de la conductivité électromagnétique effectuées sur les deux transects (T1 et T2). .	86
Annexe 4. Les 197 mesures de la conductivité électromagnétique .	87
Annexe 4. Les 197 mesures de la conductivité électromagnétique .	87
Annexe 4. Les 197 mesures de la conductivité électromagnétique .	89
Annexe 4. Les 197 mesures de la conductivité électromagnétique .	91

Dédicaces Je dédis ce travail : A ma très chère mère qui sans elle la vie n'aura pas de goût. A la mémoire de mon père Ahmed et de mon frère Mounire. A ma famille A mes amis

REMERCIEMENT

Je voudrais remercier Monsieur **DAOUD Y.**, professeur au département science du sol pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury de soutenance. Aussi, je lui suis reconnaissant pour m'avoir fait bénéficier de ses conseils tout au long de ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur **DJILI K.**, professeur au département science du sol, pour avoir accepté de diriger cette thèse. Sa modestie et sa compétence m'ont fait bénéficier de son savoir et de ses conseils utiles. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je dois une mention particulière à Monsieur **DRIDI B.**, maître de conférence au département science du sol et Monsieur **TEMAGOULT M.**, chargé de cours département science du sol pour avoir bien voulu accepter de juger ce travail et pour l'intérêt qu'ils lui ont porté.

Je remercie vivement M^r Kellou A, M^{elle} Larbi F, M^r Belhadj A, Mr Hadj Miloud S, M^{elle} Ziare S, M^{elle} Aidate L et M^{elle} Abib F pour leur aide tout au long de ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Mes remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué de loin ou de proche à l'élaboration de ce travail

Résumé

L'étude de la variabilité spatiale de la salinité dans les sols par prélèvements d'échantillons suivis d'analyse de laboratoire est difficile à cause de la grande variabilité des teneurs en sels d'un point à l'autre. Une manière de mettre en évidence cette variabilité, consiste à utiliser la conductivité électromagnétique, méthode rapide et non destructive. L'objectif principal de cette étude est de montrer l'utilisation que l'on peut faire de cette technique (conductivité électromagnétique), son principe de fonctionnement et quelles sont ses limites. Un exemple d'utilisation est donné sur une parcelle cultivée de la plaine de la Macta caractérisée par une forte variabilité de la salinité. Les mesures électromagnétiques ont été effectuées de façon systématique avec un pas de 20 m. Les étalonnages de la conductivité électromagnétique à la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée sont réalisés par la régression multiple et la régression simple. Les données acquises sont traitées par des méthodes statistiques et géostatistiques et les cartes de salinité sont obtenues par krigeage. Les traitements statistiques effectués sur l'ensemble des mesures montrent que la salinité moyenne varie entre 3,64 et 24,04 dS/m, avec une forte variabilité supérieure à 70 % pour le premier et le dernier horizon. Sur la base de ces données le profil salin moyen est de type convexe. Les cartes krigées ont montré que dans la parcelle étudiée, c'est la classe des sols légèrement salins ($2 \text{ dS/m} < CE < 4 \text{ dS/m}$) qui est la plus représentée dans l'horizon de surface (0 – 25 cm), la classe des sols extrêmement salins ($CE > 16 \text{ dS/m}$) dans les horizons médians (0 – 25 et 50 – 75 cm) et que la classe des sols salins ($4 \text{ dS/m} < CE < 8 \text{ dS/m}$) qui prédomine dans l'horizon de profondeur (75 – 100 cm). La comparaison entre la carte de salinité réalisée en 1971 dont les mesures ont été effectuées sur l'extrait de pâte saturée pour une profondeur de 0 – 100 cm avec celle obtenues en 2005 par induction électromagnétique révèle que l'évolution spatio-temporelle de la salinité est clairement établie et que la salinisation de la plaine de la Macta est très intense. En effet, les sols non salins ($CE < 2 \text{ dS/m}$) et légèrement salins ($2 \text{ dS/m} < CE < 4 \text{ dS/m}$) ont cédé leur place au profit des sols très salins ($8 \text{ dS/m} < CE < 16 \text{ dS/m}$) et extrêmement salins ($CE > 16 \text{ dS/m}$).

Mots clés : Salinité ; conductivité électrique ; Conductivité électromagnétiques ; variogramme ; Krigeage ; EM38 ; Macta.

Summary

The study of the spatial variability of the soil salinity of the samples and laboratory analyze is difficult because of the great variability of this parameter from one point to each other. One manner to make this variability is to use the electromagnetic conductivity which is a speed and non-destructive method. The principal objective of this study is to show how to use this method (electromagnetic conductivity), its principle concept and which are its limits. An application example is given on a cultivated area of the Macta Valley. The salinity of this site has a great variability. The electromagnetic measures were systematically made with a lag of 20 m.

The calibration from the electromagnetic conductivity to the electric conductivity of the saturated paste extract are carried out by the multiple and simple regression. The data are then treated by the statistic's and the geostatistic's method. The salinity map is obtained by kriging.

The statistical treatments carried out used on the whole measure show that the average salinity varies between 3.64 and 24.04 dS/m, with a big variability greater than 70 % for the first and the last horizon. These data mean that the average saline profile is convex. The kriged map shows that the slightly saline soil ($2 \text{ dS/m} < EC < 4 \text{ dS/m}$) are the most represented in the shallow horizon (0-25 cm), the extremely saline soil ($EC > 16 \text{ dS/m}$) in the medium horizon (25 - 50 cm and 50 - 75 cm) and the saline soil ($4 \text{ dS/m} < EC < 8 \text{ dS/m}$), in the lower horizon (75 - 100 cm). A comparison of the salinity map carried out in 1971 and obtained from saturated paste extract for the same range of depth (0 - 100 cm) with the one obtained by electromagnetic conductivity, shows that the spatio-temporal evolution of the salinity is clearly determined to the salinisation of Macta valley is very intense. The non-saline soil ($EC < 2 \text{ dS/m}$) and the slightly saline soil ($2 \text{ dS/m} < EC < 4 \text{ dS/m}$) are replaced with a very saline soil.

Key Words : Salinity; Electric conductivity; Electromagnetic conductivity; Variogramme; Kriging; EM38; Macta

ص خ ل م ا

إنّ دراسة تغيرات الخصائص الملوحة التربة عن طريق أخذ العينات ليس بالأمر الهين نظراً لشدة تغير نسبة الملوحة من موضع إلى آخر. تُعدّ الناقلية الكهرومغناطيسية من بين الوسائل التي تُسمح لنا بالتمييز هذا الحقل، بحيث أنها تُسمح بإجراء عدد كبير من القياسات في وقت قصير مع إبقاء التربة على حالتها دون تدويرها. الهدف الرئيسي للدراسة الحرف هو إلى هذه التقنية و ما هي مجالات تطبيقها.

لهذا الغرض تمّ إجراء مثل عن ذلك في قطعة أرض مزروعة، نجمة لسهل المقطم المتميز بالملوحة لحدّ متخيرة بحيث أنّ القياسات الكهرومغناطيسية أُخريت بطريقة نظامية بحظي تقدر ب 20 متراً. بعد ذلك تمّ إجراء معايرة هذه القياسات بالنسبة إلى الناقلية الكهربائية المستخلص الحديثة المشعة عن طريق التراجع البسيط و التركيب. النتائج المحصل عليها عولجت بالطرق الإحصائية و الجيوإحصائية أما الخرائط حصلت عن طريق الكريجاج. بيثت المعالجة الإحصائية أنّ متوسط الملوحة يتراوح بين 3.46 dS/m و 24.04 dS/m مع تغير قوي يقوّن الـ 70%. استناداً إلى هذه المحطيت نستنتج أنّ المقطم السطحي المتوسط هو من نوع المصنّب الخرائط المحصل عليها تبين أنّ الأفق السطحي تطلب عليه التربة ذات الملوحة الخفيفة ($2 \text{ dS/m} < \text{CE} < 4 \text{ dS/m}$) في العقول تطلب التربة ذات الملوحة القوي ($\text{CE} > 4 \text{ dS/m}$) على الأعين الأوسطين، أما الأفق العميق تطلب عليه التربة المالحة ($\text{CE} < 4 \text{ dS/m}$) (8 dS/m). المعارنة بين خريطة الملوحة المتحصل عليها في سنة 1971 مع نظيرتها المتحصل عليها في 2005 تبين بوضوح حصول تطور فضائي زمني وأن ظاهرة التملح في سهل المقطم بلغت أشدها.

INTRODUCTION

La salinité du sol constitue un facteur limitant pour la production végétale (Maas, 1990). Les sols salés couvrent environ un milliard d'hectares dans le monde, ils sont situés principalement dans les régions arides et semi-arides (Hamdy, 1995).

En Algérie, la salinité constitue un problème majeur qui affecte les terres agricoles et qui concerne de grandes étendues (Boulaine, 1957 ; Aubert, 1976 ; Halitim, 1985). Selon Hamdy (1995), les sols salés occupent 3,2 millions d'hectares des sols algériens.

Dans les régions sèches où l'eau d'irrigation est souvent minéralisée, les risques de salinisation secondaire sont plus importants (F.A.O, 1972). Le développement de l'agriculture irriguée à l'eau minéralisée et sans drainage efficace a souvent comme conséquence l'apparition de manifestations salines secondaires (Boivin et al , 1988).

La caractérisation de la distribution et de l'évolution temporelle de la salinité du sol est une information indispensable pour la gestion de l'agriculture irriguée (Corwin et Lesh, 2003). La gestion et le traitement des sols souffrant d'un excès de salinité requièrent non seulement une connaissance précise de l'extension spatiale de ces sols, mais aussi une détermination rigoureuse de leur concentration en sels solubles. Les variations spatio-temporelles de la salinité du sol, déjà sensibles dans les systèmes naturels, sont accélérées sous l'irrigation en raison de la forte mobilité des sels solubles (Cheverry, 1995).

Les méthodes conventionnelles de mesures de la salinité sur de petits échantillons peuvent difficilement rendre compte d'un tel phénomène (Boivin et al 1988). Aujourd'hui,

de nouvelles méthodes sont employées pour caractériser la salinité du sol, elles permettent de réaliser des mesures rapides et non destructives et à différentes profondeurs du sol (**Hendrickx** et Kachanoski, 2002). En effet les méthodes géophysiques adaptées à la cartographie de la conductivité électrique offrent des perspectives intéressantes et peuvent être employées pour la connaissance de la variabilité spatiale des sols à courte distance (**Triantafilis et al** , 2001).

Les méthodes électromagnétiques qui font partie des méthodes géophysiques permettent de mesurer avec une bonne précision le niveau de salinité des différents horizons du sol, même pour des faibles teneurs en eau (**Triantafilis et al**, 2000).

La conductivimétrie électromagnétique est utilisée en science du sol depuis une vingtaine d'années (De Jong et al, 1979 ; McKenzie et al, 1989 ; Triantafilis et al, 2000 ; **Sudduth et al, 2003** ; **Jung et al, 2006**). La qualité de l'estimation des niveaux de salinité à partir des valeurs de la conductivimétrie électromagnétique dépend de l'établissement des équations d'étalonnage reliant la conductivité électrique du sol aux lectures électromagnétiques (**Triantafilis et al, 2000**). Les appareils électromagnétiques (par exemple l'EM38) ont été ensuite largement employés pour fournir des informations précises de la distribution spatiale et verticale de la salinité du sol.

Ces méthodes non destructives sont encore au stade expérimental, elles font l'objet de travaux de recherche pour mieux définir les conditions de leur utilisation optimale (**Corwin et. Lesh, 2003**).

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les possibilités d'utilisation d'une méthode électromagnétique pour mesurer le niveau de la salinité du sol. Le travail est réalisé sur une parcelle de sol salé de la plaine de la Macta.

Le présent document est structuré en quatre chapitres. Le premier consiste en une synthèse bibliographique et le second portera sur l'étude du milieu. L'approche méthodologique fera l'objet du troisième chapitre et les résultats obtenus sont représentés dans le dernier chapitre.

CHAPITRE I. LA SALINITE DU SOL

1. Définition

La salinisation correspond à l'accumulation des sels solubles (plus solubles que le gypse) dans la zone racinaire. Ce phénomène perturbe le fonctionnement de la plante, notamment par suite de la modification du potentiel osmotique de la phase liquide du sol (Chéverry, 1995). Selon Aubert (1976), la salinisation est le processus pédologique suivant lequel le sol s'enrichit anormalement en sels solubles, acquérant ainsi le caractère salin. Les sols appelés traditionnellement sols salés sont ceux dont la pédogenèse est fortement influencée par la présence des sels plus solubles que le gypse. De nombreux auteurs préfèrent maintenant les appelés sols sodiques (CPCS, 1967) ou salisols selon le référentiel pédologique (AFES, 1995). Cette dénomination rend compte des deux principales manifestations de la salinité. Il s'agit de la présence de sels solubles en quantités importantes dans la solution du sol, mais également de l'importance du sodium sur le complexe d'échange.

Selon l'USSL (1954), les sols affectés par les sels sont classés de la façon suivante :

- Sols salins non sodiques : Se sont les sols dont la conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée est supérieure à 4 dS / m à 25°C et où le pourcentage de sodium échangeable (ESP) est inférieur à 15 %. Le pH de l'extrait de pâte saturée est

habituellement inférieur à 8,5 et les anions prédominants sont les chlorures et les sulfates.

- Les sols salin-sodiques : Se sont les sols dont la conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée est supérieure à 4 dS / m à 25°C et où l'ESP est supérieur à 15 %. Le pH de l'extrait de pâte saturée peut dépasser légèrement 8,5 ; ces sols posent plus de problèmes pour la mise en valeur agricole que les sols salés.
- Les sols non salins et sodiques : Se sont les sols dont la conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée est inférieur à 4 dS / m à 25°C et où le pourcentage de sodium échangeable (ESP) est supérieur à 15%. Le pH de ces sols est généralement supérieur à 8,5.
- Les sols non salin et non sodiques : Se sont les sols dont la conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée est inférieur à 4 dS / m à 25°C et où le pourcentage de sodium échangeable (ESP) est inférieur à 15%.

2. Les facteurs de salinisations

Les sels présents dans le sol ont des origines très variées. Ils proviennent de l'altération des roches contenant des minéraux sodiques, potassiques ou magnésiques et qui donne des sels souvent solubles, en particulier des chlorures, des sulfates, des carbonates et des bicarbonates et parfois des silicates de ces métaux (Zahow et Amrhein, 1962 Aubert, 1976). Lorsque la roche est gypso-salifère, ce sont des sulfates et des chlorures qui sont libérés. Cette phase de salinisation correspond à la salinisation primaire (Gaucher et Burdin, 1974).

La salinisation peut être aussi provoquée par une invasion marine liée aux marais du territoire concerné. Dans ces conditions, l'eau du sol présente une composition proche de celle de l'eau de mer, donc riche en NaCl et peut provoquer par des phénomènes d'échange cationique un enrichissement du complexe d'échange en sodium (Cherbouy, 1991). Ce type de salinisation est très lent, de l'ordre de quelque dizaine de millions d'années, il est par contre plus rapide lorsque l'homme intervient et entraîne l'apparition du caractère halomorphe sur des sols exempts de salinité surtout par l'irrigation non contrôlée. Selon Cherbouy (1991), l'irrigation non contrôlée peut entraîner une salinisation secondaire des sols par :

- l'utilisation d'une eau d'irrigation très salée provenant d'une nappe, d'une rivière où d'eau stockée dans les grands barrages réservoirs qui, sous l'effet de l'évaporation, sont devenues très concentrées,
- l'utilisation d'une eau d'irrigation faiblement salée mais dont la répétition des apports, sans lessivage et sans drainage, a entraîné par concentration sous l'effet de l'évaporation une salinisation progressive du milieu,
- des apports d'eau en quantités trop importantes responsables d'une remonté du

niveau piézométrique d'une nappe originellement salée et dont le niveau devient alors suffisant pour permettre des remontées capillaires et affecter les horizons de surface.

- Les différentes origines de la salinité se répartissent entre une origine externe (cas de la submersion par les marées et de l'irrigation) et une origine interne (cas d'une salinisation par remontée du niveau d'une nappe salée ou par remontée capillaire). A ces deux phénomènes correspond une dynamique de profils différents.
- Le processus de la remontée capillaire d'une eau souterraine très salée est le processus le plus courant, son importance dépend de la salinité de la nappe, du bilan P / ETP et de la conductivité hydraulique du matériau vis-à-vis de la solution saline qui dépend de la structure et de la texture du sol (Cherbouy, 1991).

3. Réhabilitation des sols salés

Une mauvaise utilisation des eaux et un mauvais drainage des terres irriguées empêchent l'obtention de rendements potentiels et entraînent une perte des terres productives à cause de l'engorgement des terres et de l'accroissement de la salinité ou de la sodicité des sols. La salinité affecte un milliard d'hectares dans le monde, principalement dans les régions arides et semi-arides (Hamdy, 1995). La réhabilitation des sols salés a pour objectif de stopper leur extension et de récupérer, dans la mesure où cela est économiquement rentable, les terrains actuellement inutilisables. Selon Cherbouy (1991), la récupération des sols salés comprend plusieurs étapes :

- dans un premier temps, il faut isoler la zone à réhabiliter de la source des sels ;
- dans un deuxième temps, il faut évacuer les sels présents en solution ou sur le complexe adsorbant ;
- enfin, il faut instaurer un contrôle permanent de l'évolution du système sol-nappe, en particulier si les sols sont à nouveau irrigués.

La pratique de l'irrigation et du drainage est étroitement liée à l'aménagement hydro-agricole quand les sols sont salés ou risquent d'être salinisés. Le problème de la salinité dans les périmètres irrigués est souvent lié à la présence d'une nappe peu profonde et salée qui alimente en permanence la zone racinaire en sels au fur et à mesure que l'eau est utilisée par la plante. Cette accumulation des terres en sels est très marquée dans les régions chaudes à cause d'une forte évaporation de l'eau. Dans ces conditions, l'installation de drains ouverts ou enterrés est nécessaire pour entraîner et évacuer une partie de l'eau salée vers une zone où le sel peut être stocké sans risque (Benhelima, 2002).

Le drainage souterrain consiste à évacuer l'excès d'eau et les sels dissous par écoulement de l'eau à travers le sol vers les drains, ce qui permet de maîtriser le niveau de la nappe et donc la salinité de la zone racinaire (Ritzima et al, 1996).

Pour évacuer les sels du sol, on applique à la parcelle un volume d'eau d'irrigation

supérieur au besoin des cultures. Cette eau excédentaire s'infiltré dans le sol et traverse la zone racinaire. En percolant à travers cette zone, l'eau dissout les sels contenus dans le sol et les évacue dans les drains souterrains. Ce processus au cours duquel l'eau lave la zone racinaire des sels qu'elle contient s'appelle le lessivage (Ritzima et al, 1996).

4. Méthodes de mesure de la salinité du sol

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour évaluer la salinité du sol. Parmi elles, on peut citer les observations visuelles des récoltes, la mesure de la conductivité électrique de la solution de l'extrait de pâte saturée du sol ou du sol dilué, la mesure in-situ de la résistivité électrique en utilisant le dispositif de Wenner ou par la mesure in-situ de la salinité par induction électromagnétique. Ces deux derniers types de mesure sont des méthodes utilisées par la géophysique.

L'observation visuelle est une méthode rapide et économique mais son inconvénient est que le développement de la salinité ne se détecte qu'après que les dommages des récoltes se soient produits. Pour cette raison, l'observation visuelle est la moins souhaitable pour détecter et évaluer la salinité du sol. Cependant, les observations visuelles annuelles fournissent des informations utiles pendant les années de réussite (Corwin et Lesh, 2001).

La mesure de la conductivité électrique des extraits de pâtes saturées du sol ou des extraits dilués du sol, exprimée en mmhos/cm ou en dS/m, est très utilisée en science du sol pour déterminer le niveau de salinité des sols. Cette méthode se base sur le fait que la conductivité électrique d'un liquide est fonction de sa concentration en électrolytes. Cette technique devient très contraignante (méthode destructrice, effort physique important, lente) quand il s'agit de mesurer la salinité d'un grand nombre d'échantillons, mais elle reste toujours considéré comme la méthode de référence.

Les méthodes géophysiques de surface offrent de nombreux avantages permettant de contourner les difficultés signalées précédemment. Elles sont répétables et reproductibles, spatialement intégrantes, non intrusives et permettent d'obtenir des informations sur des sols impénétrables par les moyens d'investigation classiques du pédologue (Michot, 2003). Ces méthodes ont été largement utilisées pour l'étude des sols comme dans le cas de la résistivité électrique (Bottraud et al, 1984 ; Dabas et al, 1989 et 1995 ; Chéry et al, 1996 ; Robain et al, 1996 ; Bourennane et al 1998 ; Felkou et Khechana, 1998) ou de l'induction électromagnétique (Bruch et al, 1992 ; **Hendrickx** et al, 1992 ; Lesh et al, 1995).

4.1 La résistivité électrique (dispositif de Wenner)

Les chercheurs de Riverside (U.S.A) ont proposé avec succès l'installation en surface d'un quadripôle d'électrodes de configuration Wenner pour mesurer la conductivité

électrique apparente du sol à la capacité au champ (Michot, 2003). Il s'agit de déterminer in-situ la salinité d'une épaisseur de sol correspondant approximativement à la distance inter-électrodes (Rhoades et Ingvalson, 1971 ; Halvorson et Rhoades, 1976 ; Read et Cameron, 1979). La calibration des valeurs de la conductivité apparente du sol était assurée par des mesures de la conductivité électrique d'extrait de pâte saturée d'échantillons de sol prélevés sous le dispositif d'électrodes. L'inconvénient de cette méthode est que les mesures doivent être réalisées à de fortes teneurs en eau (à la capacité au champ) (Rieu et Cheverry, 1976) et qu'elles sont influencées par les cations échangeables du sol. L'autre inconvénient est que l'épaisseur concernée du sol est de même ordre que l'écartement entre les électrodes d'où la difficulté de réaliser les mesures en profondeur (Rieu et Cheverry, 1976).

4.2. La méthode électromagnétique

Les mesures de la salinité peuvent être réalisées au moyen d'un conductivimètre électromagnétique. L'ensemble des phénomènes électromagnétiques sont décrites par les équations de Maxwells présentées en Annexe 1. De nombreux auteurs ont fait appel à cette méthode qui est particulièrement sensible et adaptée aux sols conducteurs d'où sa capacité à cartographier la variabilité spatiale de la salinité (De Jong et al, 1979, Wollenhaupt et al, 1986), de la teneur en argile (Brush et al, 1992; Dalgaard et al, 2001 ; Domsch et Giebel, 2001), de l'humidité du sol (Kachanoski et al, 1988 ; Sheets, et al 1995, Michot, 2003) et même de la profondeur des substrats calcaires (Bramley et al, 2000).

4.2.1. Principe de la méthode

Le terme électromagnétique, utilisé en prospection géophysique comme en physique, décrit un phénomène variant dans le temps et combinant les champs électriques et magnétiques.

La prospection électromagnétique réalisée selon une méthode de type « slingram » méthode mise en oeuvre par Slingram et Ronka, 1958 où l'émetteur et le récepteur électromagnétiques sont mobiles. Cette méthode est de type de basse fréquence et de faible nombre d'inductions. On parle aussi de prospection magnétique à champ proche (Michot, 2003). Selon Job et al (1987), cette méthode se base 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. L'appareillage, en prospection électromagnétique comprend une alimentation en courant alternatif à une ou deux fréquences, des bobines d'émission et de réception, un amplificateur récepteur réglé sur la fréquence émise et un enregistreur (un écouteur, un lecteur analogique ou numérique, un disque ou encore une bande magnétique d'enregistrement etc.). Pour certaines mesures, on doit ajouter un potentiomètre en courant alternatif (ou un compensateur de phase et d'amplitude) pour comparer le signal du champ primaire avec celui du champ secondaire (Telford et al, 1982). La source d'alimentation utilisée en prospection électromagnétique est soit un groupe électrogène, soit un petit oscillateur transitoire fonctionnant sur des batteries légères avec un amplificateur de puissance de

faible impédance de sortie. Le choix de l'alimentation dépend du type de dispositif, selon que l'émetteur n'est que semi-mobile où continuellement mobile. Pour les émetteurs fixes comme le long fil, la grande boucle (bobine) horizontale et la boucle verticale, on utilise une source d'alimentation à forte puissance, pour les émetteurs mobiles tel que la petite boucle horizontale ou la boucle verticale latérale, on utilise un appareillage plus petit. Les émetteurs mobiles utilisent souvent des bobines émettrices multispires (de 100 tours ou plus) qui sont évoluées sur des cadres isolants d'un mètre de diamètre ou moins. Parfois, la bobine peut n'avoir qu'un seul tour d'un très bon conducteur, dans ce cas un transformateur d'adaptation est nécessaire à la sortie. Les bobines réceptrices sont souvent petites (deux mètres de diamètre ou moins) et possèdent de nombreuses spires de fil fin. Les bobines réceptrices ainsi que les bobines réceptrices portatives sont protégées électrostatiquement pour éliminer la capacité de couplage entre les bobines et le sol et entre les bobines et l'opérateur. En général, on doit orienter les bobines réceptrices dans une certaine direction par rapport au champ recherché. Dans certains dispositifs de terrain, il suffit qu'elle soit maintenue horizontalement ou verticalement (Telford et al ,1982). Lorsque la spire primaire (émettrice) (SP) est parcourue par un courant électrique de basse fréquence F, elle produit un champ magnétique primaire H_p de même fréquence qui induit dans le sol supposé homogène des courants i_1, i_2, i_3 (figure 1). 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). L'amplitude et la phase du champ secondaire différent de ceux 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 kachanosky, 2002 ; Corwin et Lesh, 2003). Le rapport entre le champ magnétique secondaire mesuré et le champ primaire émis est proportionnel à la conductivité apparente du sol et donne directement accès à son inverse, la résistivité électrique. Selon McNeil (1980), celle-ci est égale à :

$$\sigma_a = 4(H_s / H_p)\omega\mu_0 S^2 \dots(1) \text{ soit } \sigma_a = K (H_s / H_p) \text{ où :}$$

K est une constante dépendant de la construction de l'appareil,

H_s est le champ magnétique secondaire à la bobine réceptrice ($A.m^{-1}$)

H_p est le champ magnétique primaire à la bobine émettrice ($A.m^{-1}$)

ω : pulsation ($rd .S^{-1}$)

μ_0 : perméabilité magnétique du vide ($H. m^{-1}$)

S : distance inter bobine

σ_a : conductivité apparente du sol ($S.m^{-1}$)

La profondeur de pénétration du champ électromagnétique ou profondeur de peau « P » est donnée par la relation :

$$P = \sqrt{2 / \mu\sigma\omega}$$

μ : $\mu_0 (1+x)$

Avec x susceptibilité magnétique du milieu (sans dimension). Pour les milieux non

magnétiques, x est nul $\mu = \mu_0$.

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

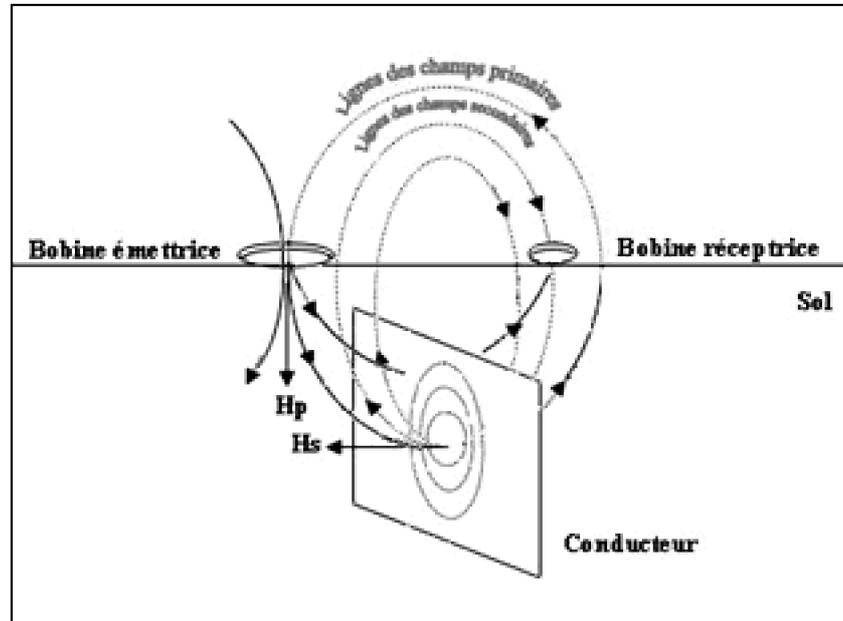


Figure 1 : Principe de fonctionnement de la conductivimétrie électromagnétique

Le rapport H_S / H_P eq (1) qui 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. Cette conductivité dépend à son tour de la solution du sol, de sa texture, de son humidité volumique et de sa porosité (Job et al, 1987). Ces propriétés de sol sont donc à prendre en compte au moment de la mesure d'où il serait préférable de réaliser les mesures on se plaçant dans des conditions où l'on considère des faibles variations de ces dernières en regard des variations de salinité (McNeil, 1980). Quel que soit l'appareil électromagnétique utilisé, il faut transformer la conductivité électromagnétique en conductivité de l'extrait saturé de sol afin de pouvoir faire des interprétations pédologiques des mesures (Job et al 1987). On peut aussi étalonner l'appareil par rapport à d'autres méthodes de mesure de salinité comme la sonde à quadripôle (Rhoades et Corwin, 1981) ou les extraits dilués (Job et al, 1987 ; Boivin et al, 1989). Mais les transformations ne se font pas sans problème à cause du fait que la conductivité électromagnétique dépend, en plus de la teneur en sel du sol, de la porosité, de la texture et de l'état hydrique du sol qu'on doit intégrer dans les équations d'étalonnage (Job et al, 1987).

4.2.2. Le conductivimètre électromagnétique EM38

Le EM-38 est un conductivimètre portable, à faible nombre d'induction et qui est constitué essentiellement de deux bobines d'induction espacées de 1 m. L'excitation est de 14.6 kHz et la précision de mesure de la conductivité électrique est de 0.1 ms/m. Le EM-38 peut être utilisé selon deux configurations (figure 2) :

1- En mode verticale : Les bobines d'induction sont horizontaux et les dipôles magnétiques sont verticaux. La profondeur d'investigation est approximativement de 1,5 m.

2- En mode horizontale : Les bobines sont verticaux et les dipôles magnétiques sont horizontaux. La profondeur d'investigation est alors réduite à 0.75 m(McNeil, 1980).



Figure 2 : Conductivimètre électromagnétique EM-38 selon le mode vertical (V) et horizontal (H)

4.2.3. Réponse du EM-38 en fonction de la profondeur

La figure 3 montre la réponse du conductivimètre en fonction de la profondeur. En mode vertical de dipôle, la sensibilité de l'appareil atteint le minimum à environ 0,4 m et diminue progressivement ensuite tout en allant vers la profondeur. En mode horizontal, la réponse est plus élevée en surface et diminue ensuite vers la profondeur. 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 la conductivité électromagnétique en mode horizontal (ECH) est supérieure à celle en mode vertical (ECV), 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 $ECH = ECV$, on est alors devant un profil salin uniforme. La comparaisons de ECH et ECV est donc une première possibilité d'interprétation des résultats.

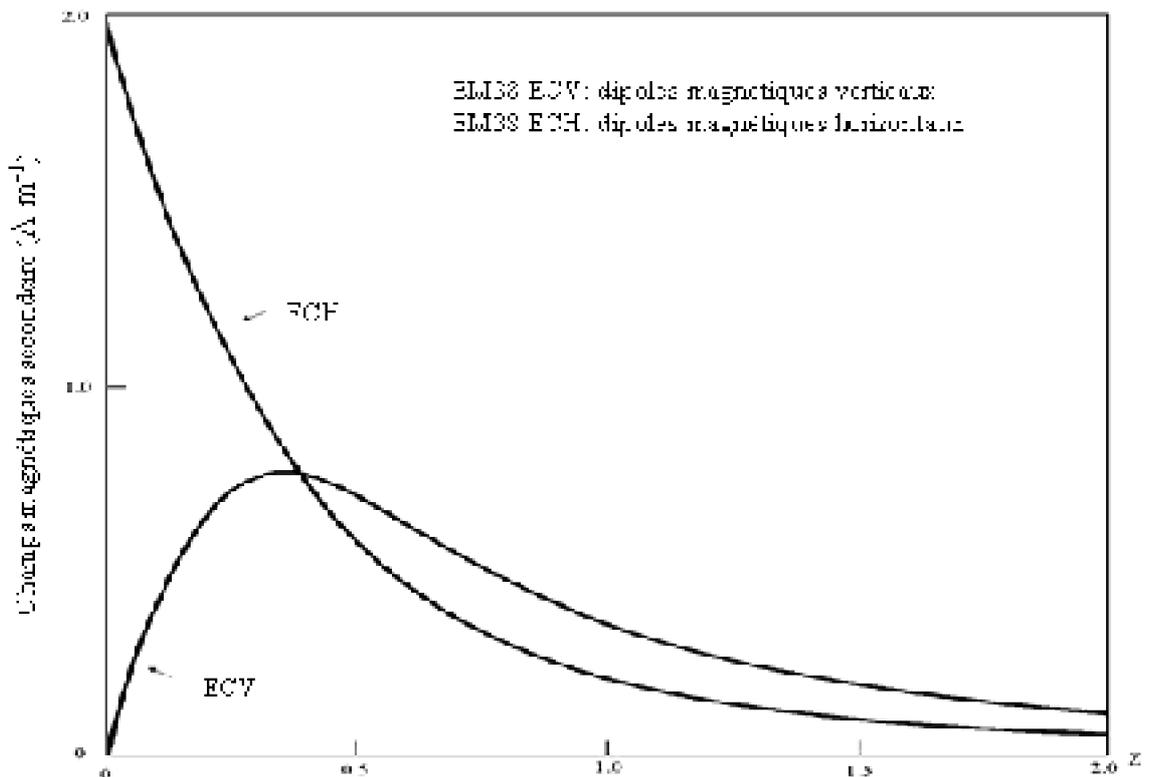


Figure 3 : Réponse du EM-38 en fonction de la profondeur

Profondeur (m)

4.2.4. Etalonnage du conductivimètre électromagnétique en fonction de la profondeur

De nombreuses études ont utilisé le conductivimètre électromagnétique pour évaluer la salinité du sol (Rhoades et Corwin, 1981 ; Cameron et al ,1981 ; Corwin et Rhoades, 1982 ; Rhoades et al, 1989 ; Makenzie et al, 1989 ; Slavish et Peterson,1990 ; Lech et al, 1992). Le succès de ces études dépendait de l'établissement des équations d'étalonnage du profil du sol reliant la conductivité électrique du sol aux lectures de l'EM (**Triantafilis et al, 2000**). **Dans ce qui suit, nous présentons** deux approches d'étalonnage, la régression linéaire simple et la régression multiple.

Pour une même profondeur de sol, un calcul d'une corrélation entre les valeurs de conductivité électromagnétique et celle de conductivité électrique donne une équation de type :

$$EM_z = a CE_z + b \dots (r^2).$$

EM_z: conductivité électromagnétiques pour une profondeur de sol z

CE_z : conductivité électrique pour une profondeur z

En utilisant la régression multiple, Rhoades et Corwin (1981) ont pu développer une série d'équations qui relient la conductivité électrique mesurée d'un intervalle de profondeur du sol avec la conductivité électromagnétique mesurée à différents niveaux au

dessus du sol, d'où deux types d'équations:

$$1: CEz = aEMz'_0 + bEMz'_1 + cEMz'_2 + dEMz'_3 + \dots + cst (r^2)$$

$$2: EMz' = aCEz_0 + bCEz_1 + cCEz'_2 + dCEz_3 + \dots + cst (r^2)$$

Où z est l'intervalle de profondeur.

CEz : conductivité électrique pour un intervalle de profondeur de sol z

EMz' : conductivité électromagnétique pour une profondeur de sol z'

$$\text{où } z' = z_0 + z_1 + z_2 + z_3 \dots$$

Et a, b, c, d sont des constante

4.2.4. Avantages et inconvénients de la méthode

La méthode par induction électromagnétique permet des mesures rapides, à faible coût et ne nécessite pas de contact direct avec le sol. Les conductivimètres EM-38 et EM-31 (Geonics, Ltd ; Canada) ont une profondeur d'investigation respectivement de 1m et de 5 m. Ces caractéristiques expliquent l'intérêt de la méthode pour l'étude des sols salés, généralement secs et sujet à de mauvais contacts avec les électrodes employées dans les méthodes électriques précédentes. Ces méthodes ont néanmoins de nombreux défauts :

- 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 températures 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.

4.2.5. Conclusion

Le développement initial des méthodes géophysiques en science du sol a concerné principalement les sols salés. Cette innovation a été motivée par l'influence de la salinité de la solution du sol sur la résistivité électrique. Les méthodes électriques ont constitué, dans un premier temps, un puissant outil d'investigation pour caractériser à partir de la surface et sans aucune perturbation ni intrusion de capteurs, la distribution verticale et spatiale de la salinité des sols. Dans le second temps, les méthodes électromagnétiques en domaine fréquentiel ont été employées de manière à s'affranchir de la difficulté d'obtenir et d'assurer un bon contact électrique entre le sol et les électrodes. Ces méthodes électromagnétiques sont basées sur trois processus distincts. Le premier consiste en la production d'un champ magnétique primaire qui varie avec le temps. Le second est la naissance de courants induits (courant de Foucault). Le dernier est la détection de ces conducteurs par des champs magnétiques secondaires créés par les courants de Foucault.

Diverses méthodes d'étalonnage ont été testées avec succès de manière à quantifier

la salinité des sols au moyen de la conductivité électromagnétique.

Chapitre II. Présentation de la zone d'étude

1. Situation géographique

La plaine de la Macta est une dépression sublittorale séparée du golf d'Arzew par un cordon dunaire bordé au nord-ouest par le massif de la sebkha d'Arzew et au nord-est par la retombée sud du plateau de Mostaganem. Elle est prolongée par la plaine de Sig et de l'Habra dans le sens est-ouest et atteint au sud les contreforts de l'atlas tellien, les monts de Ouled Ali et des Béni-Chougrane à Mohamadia (figure 4). Ces plaines sont parcourues par une série d'oueds dont les plus importants sont l'oued Sig à l'ouest, l'oued Habra au centre et l'oued Tinn à l'est. La plaine de la Macta comporte à la fois des plans d'eau, des marais et des steppes plus ou moins humides situées en général à moins de 9m d'altitude (A.N.N., 2001).

2. Géologie et géomorphologie

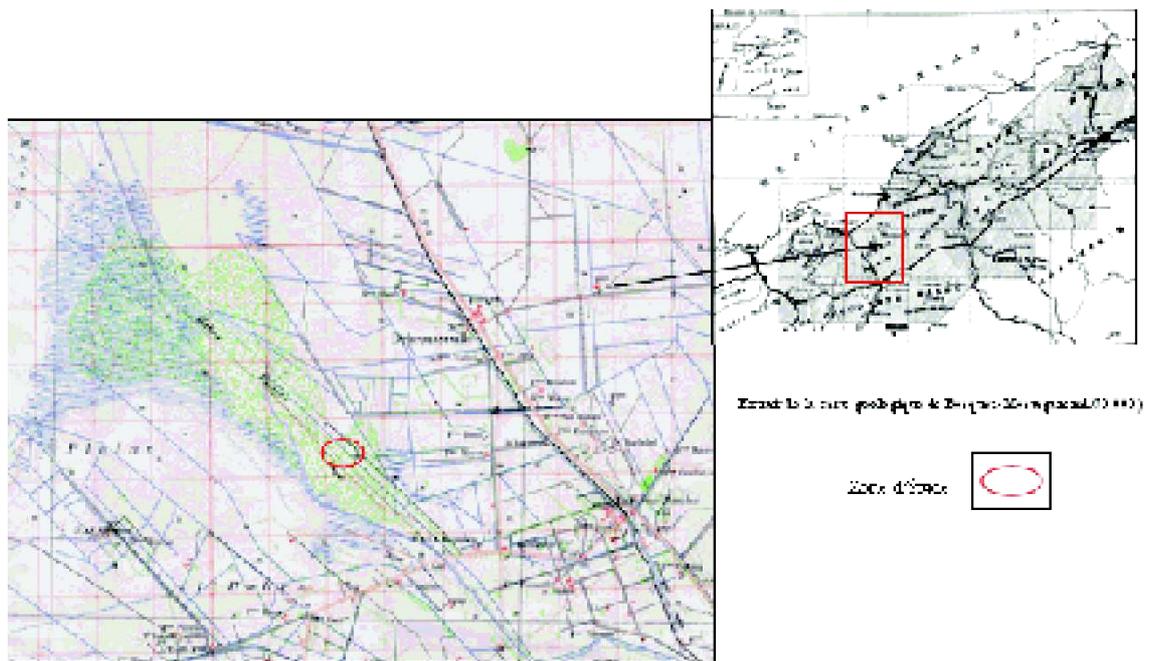
La plaine de la Macta constitue un bassin de sédimentation synclinal en voie de subsidence. Dès la fin du pliocène, une alternance capricieuse de couches argileuses et sableuses, déposées tant en milieu terrestre qu'en milieu lacustre ou lagunaire, a donné naissance à une plaine basse dont la partie avale se trouve à peu près au niveau de la mer. La coupe géologique de la plaine montre qu'il y a une succession des couches allant du paléozoïque jusqu'au pliocène (figure 5). L'effondrement de la plaine se compense par des mouvements ascendants de l'arrière-pays dont les collines, composées de calcaire, marnes et grés, fournissent des dépôts alluviaux. L'érosion des collines d'une part et la sédimentation de la cuvette d'effondrement d'autre part créent un équilibre morphologique et hydrologique délicat.

Une partie importante du bassin versant des oueds qui débouchent dans la plaine est constituée de roches marneuses ou calcaires (GRONTMIJ, 1971). Les terrains présentent des variations alluvionnaires et certains sols sont constitués d'alluvions argileux salifères. Les marais proprement dits présentent des alluvions limono-argileux. Dans la majeure partie de la basse plaine, les sols argileux présentent une grande accumulation de chlorure dans leurs horizons superficiels.

3. Hydrologie et hydrogéologie

La Macta fait parti du grand bassin versant de la Macta qui fait 1 368 677 hectares. Et est alimentés par trois oueds permanents, l'oued Tinn, l'oued Habra et l'oued Sig. Ce dernier alimente d'avantage la basse plaine que les deux autres qui sont partiellement canalisés jusqu'à la rivière Macta qui se jette directement dans la Méditerranée. La situation topographique basse de cette plaine ne lui permet pas de drainer facilement les eaux de pluie ramenées par un réseau hydrographique dense et facilite donc la submersion de la partie Nord où l'altitude est inférieure à un mètre. De nombreux oueds s'épandent dans la plaine (A.N.N., 2001).

La salinité de la plaine de Habra s'explique par son bilan hydrogéologique dont les principaux termes sont l'écoulement ascendant des eaux souterraines et le déficit pluviométrique. Les eaux souterraines commencent à se charger en sels dissous dans la partie amont du bassin versant de la plaine où des roches d'âge miocène contiennent du sel et du gypse (GRONTMIJ, 1971).



Extrait de la carte topographique de Mostaganem (Echelle 1:60 000)

Figure 4 : Localisation de la région d'étude

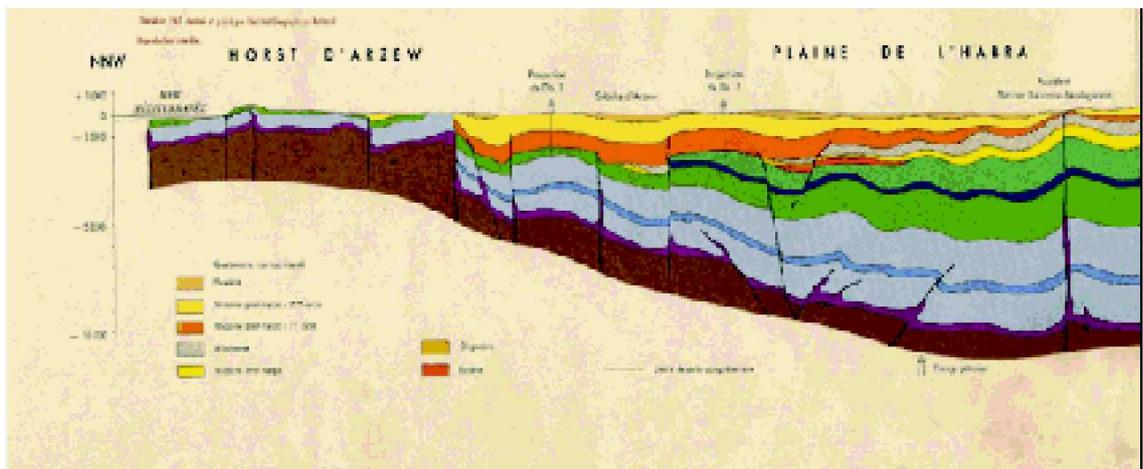


Figure 5 : Coupe géologique de la plaine de la Macta (Extrait de la carte géologique de Bosquet-Mostaganem 1/50 000)

4. Les sols

La plaine de la Macta présente une diversité de sols, les plus importants sont représentés, les sols peu évolués, les vertisols, les sols calcimagnésiques, les sols hydromorphe et les sols sodiques (GRONTMIJ, 1971).

4.1. Les sols peu évolués

Ils sont représentés par quatre principaux groupes :

- **Sols peu évolués modaux** : Se situent sur les parties relativement élevées de la plaine, l'aire de leur plus grande extension est située des deux cotés de l'oued Habra et plus au sud aux alentours de Mohammedia.
- **Sols peu évolués hydromorphes d'apport alluvial** : Ces sols occupent des zones plus basses que celles des sols peu évolués modaux avec lesquelles ils sont très souvent associés, ils sont donc situés dans les zones de transition entre les parties les plus élevées et les dépressions.
- **Sols peu évolués vertiques** : Ils ne sont présents que sur une faible étendue, on ne les trouve qu'éparpillés à quelques endroits où ils sont souvent associés à des sols vertiques.
- **Sols peu évolués halomorphes** : Ces sols se retrouvent dans la zone d'épandage de l'oued Mellah, dans le nord est du périmètre. Ils constituent la plus grande surface pour ces sols. En outre, on les trouve aux périphéries des bourrelets et des cônes de déjection de l'oued Habra ainsi que dans les zones de transition vers les dépressions.
- **Sols peu évolués hydromorphes halomorphes** : Ils se situent dans les parties basses des zones de transition entre les bourrelets et les dépressions et dans la partie basse des cônes de déjection.

4.2. Les vertisols

Ces sols sont présents dans les zones déprimées du périmètre et sont tous des sols homogènes et profonds à texture argileuse. Dans les grandes dépressions salines centrales sur la rive droite de l'oued Habra, on trouve surtout les sols vertiques halomorphes.

4.3. Les sols calcimagnésiques

-Sols bruns calcaires

Ils sont surtout représentés sur le long des limites sud du périmètre. La zone de leur plus grande extension est située entre Mohammedia et Bou Henni, et entre la route Nationale n°4 et la limite sud du périmètre.

4.4. Les sols Hydromorphes

- Sols à gley salés

Ils se présentent également à l'ouest de la route Ferme Blanche- Debrousseville, au Nord, nord est et est de Macta Douze et dans la dépression entre Ferme Brunier et Ferme Valero et dans le bas- fond au nord –est de Ste-Eugénie.

- Sols à amphigley

Ils se trouvent surtout dans la partie nord-ouest de la rive droite de l'Habra, dans la région de Ferme Blanche et de Debrousseville et sur les bordures des dépressions salines là où l'eau de la nappe est fortement chargée en sels.

4.5. Sols sodiques

- Les sols salins

On les trouve dans la grande dépression centrale du périmètre, près du champ d'aviation et localement dans le nord-est et le nord-ouest.

- Les sols salins à alcalis

On les trouve dans la grande dépression centrale de la rive droite de l'Habra où ils trouvent leurs aires de plus grande extension, ils se présentent aussi dans la région de Sahouria.

- Les sols salins à alcalis hydromorphes

On trouve ces sols dans les positions les plus basses, à la périphérie du périmètre là où la nappe se manifeste pendant une grande partie de l'année à faible ou à très faible profondeur.

5. La végétation

En ce qui concerne la végétation naturelle, le groupement à Sueda Fructicosa se situe entre la digue argileuse de Sbara et la limite du périmètre irrigué. Les digues et les talus sont occupés par Atriplex Halimus et Tamarix Gallica. Les anciennes stations d'épandage des oueds Sig et Habra sont colonisées par le groupement à Tamarix Africana clairsemé en forme de broussailles. Au Nord et jusqu'à l'embouchure de la Macta, les groupements à Anthracnemum Macrostachym et Phragmites Communis se trouvent dans les lignes d'écoulement des canalisations des oueds Sig, Habra et Tinn. Les groupements à Juncus Maritimus et Juncus Subulatus occupent les dépressions au nord de Sbara.

Pour la production végétale, il convient de noter une nette régression de l'arboriculture au profit d'une arboriculture occasionnelle. Les champs de céréales et les vignobles se rencontrent sur les plateaux et dans les plaines qui ne sont pas atteintes par une forte salinité, là où la nappe saumâtre n'est pas très proche de la surface (A.N.N.,

2001).

6. Le climat

Mois	Précipitations (mm)			S-A	Température moyenne (°C)		EIF Penmar (mm)	
	Mascara				Période		Période	
	Fériode 1990-2004	2004			1990-2004	2004	Fériode 1990-2004	2004
Janvier	30,9	17	27	33,9	8,6	9	40,92	31,31
Février	31,5	40	31	29,41	5,6	11	50,37	48,72
Mars	30,8	11	7	28,13	12,4	11,6	84,07	67,33
Avril	29,1	19	7	30,24	13,9	12,9	110,7	100,5
Mai	25,6	8,4	7	17,96	18,1	13,8	145,7	115,3
Juin	3,8	9	7	4,09	23,3	23,4	186,6	187,2
Juillet	2,0	3	7	1,88	26,5	27,1	210,6	207,6
Août	6,8	2	7	3,41	26,8	27,8	191,6	200,2
Septembre	14,1	15	7	19,34	22,6	22,5	138,3	150,3
Octobre	30,0	40	7	18,31	17,9	20	87,17	103,5
Novembre	45,7	37	7	46,34	12,4	11,4	49,2	40,5
Décembre	35,5	78	7	22,36	5,6	9	70,06	43,71
Total	286,6	254,4	7	255,27	/	/	1364,41	1294,7
Moyenne	/	/	/	/	16,31	13,8	/	/

Tableau 1. Les données climatiques de la station de Mascara et de Sidi-abdelmoumen (S - A)

6.1. Les précipitations

Le tableau 1 révèle une grande irrégularité des précipitations mensuelles moyennes. Elles varient de 2 mm en juillet à 45,7 mm en novembre pour la période 1990-2004. En 2004, ces précipitations varient entre 2 mm en août et 78 mm en décembre. On remarque aussi qu'environ 39 % et 32 % des pluies tombent respectivement en automne et en hiver. Par ailleurs, le total annuel de l'année 2004 s'avère moins important que celui enregistré durant la période 1990-2004. Pour les deux premiers mois de l'année 2005, les précipitations sont comparables à celles de l'année 2004.

6.2. La température

Le tableau 1 montre aussi que la température (moyenne mensuelle) la plus faible (8,6°C)

est enregistrée en janvier et la plus élevée (26,8°C) en Août et que la moyenne annuelle est égale à 16,81°C. De même, il indique que les températures mensuelles augmentent progressivement de janvier jusqu'en août à partir duquel elles amorcent une décroissance régulière.

Le diagramme ombrothermique de Gaussen (figure 6) indique que le climat de la région est caractérisé par une saison sèche qui se situe entre le 21 avril et 25 octobre, soit une durée de 6 mois. Selon le quotient d'Emberger (Emberger, 1955) [$Q = 3.43 (P / M - m)$], avec p précipitations moyennes annuelle, M et m représente respectivement la moyenne des températures maxima et minima, $Q = 3,43 (286,6 / 35,5 - 3,1) = 30,34$, le climat est de type semi aride à hiver doux.

6.3. L'évapotranspiration

On remarque que l'ETP la plus élevée est observée au mois de juillet (210,5 mm) par contre l'ETP la plus faible se rencontre au mois de janvier avec 40,92 mm.

En comparant l'évapotranspiration aux précipitations moyennes, on remarque qu'il existe un déficit hydrique climatique durant toute l'année. Le déficit annuel est de 1077,81 mm

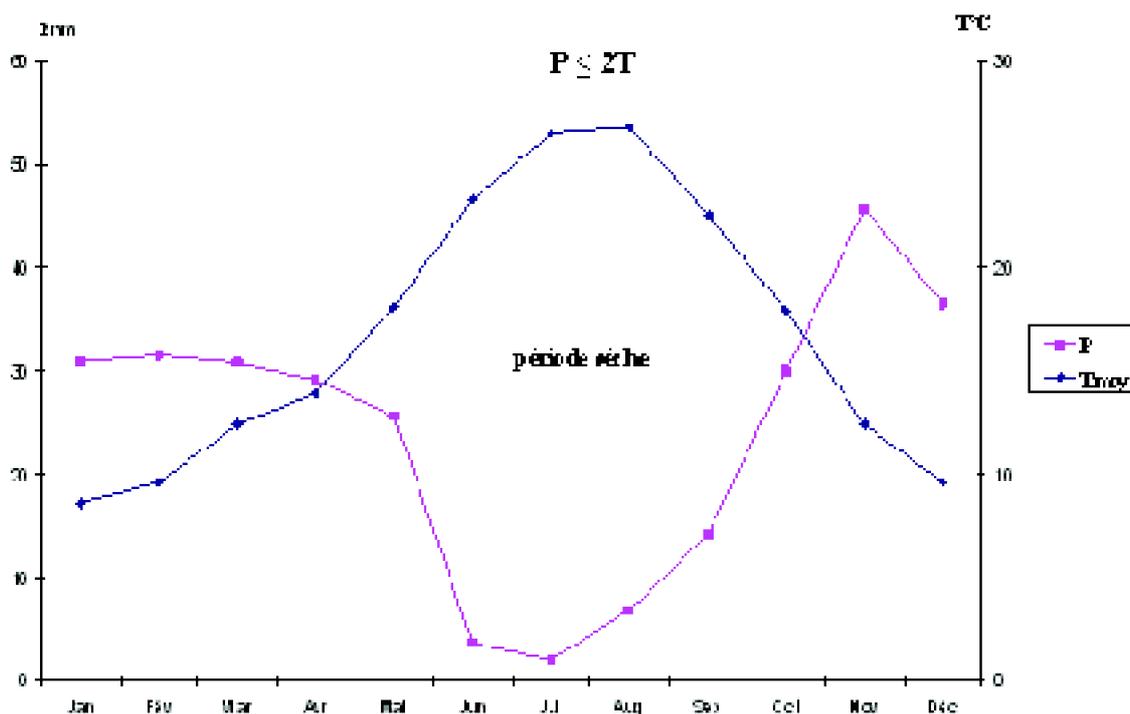


Figure 6 : Diagramme ombrothermique de Gaussen

Chapitre III. Méthodologie du travail

D'une superficie de 7,8 ha (322,5 m x 242 m), la parcelle retenue se compose de quatre petites parcelles a, b, c, d (figure 8). Selon les coordonnées Lambert, cette parcelle se situe entre les longitudes 253,2724 km et 253,5924 km et entre les latitudes 263,7136 km-263,9336 km.

L'objectif de ce travail étant la mesure du niveau de salinité des sols par induction électromagnétique, il était donc nécessaire de mesurer la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée pour pouvoir caler par la suite les mesures de la salinité obtenues par les deux méthodes.

1. La conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée

L'échantillonnage à été effectué sur la parcelle A selon les transects T1 et T2 (figure 7). Les prélèvements ont été effectués à quatre niveaux de profondeur : 0 - 25 cm, 25 - 50 cm, 50 - 75 cm et 75 - 100 cm. La conductivité électrique de l'extrait de pâte saturé et l'humidité pondérale de chaque échantillon ont été déterminées au laboratoire.

2. Mesure de la conductivité électromagnétique

2.1. Acquisition des données

Dans un premier temps, il s'agissait de réaliser des mesures pour étalonner le EM38 utilisé dans cette recherche. Pour cela, les mesures effectuées par le EM 38 ont été réalisées au niveau des transects T1 et T2 aux mêmes endroits et mêmes profondeurs que ceux qui ont servi pour les mesures de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (figure 7).

Par la suite, nous avons mesuré à l'aide de EM38 la conductivité de 197 profils situés aux nœuds d'une grille d'un pas de 20 m (figure 8). Nous avons choisi un pas de 20 m pour répondre aux critères de la géostatistique, ce pas ne doit absolument pas dépasser la portée (distance d'auto-corrélation) et la discontinuité à l'origine doit être minimale. Les lectures ont été effectuées en position verticale et horizontale pour les niveaux de profondeur 0 – 25 cm, 0 – 50 cm, 0 – 75 cm et 0 – 100 cm, soit un total de 1576 lectures.

Le prélèvement d'échantillons et les mesures électromagnétiques ont été effectués respectivement le 13 et le 14 février 2005.

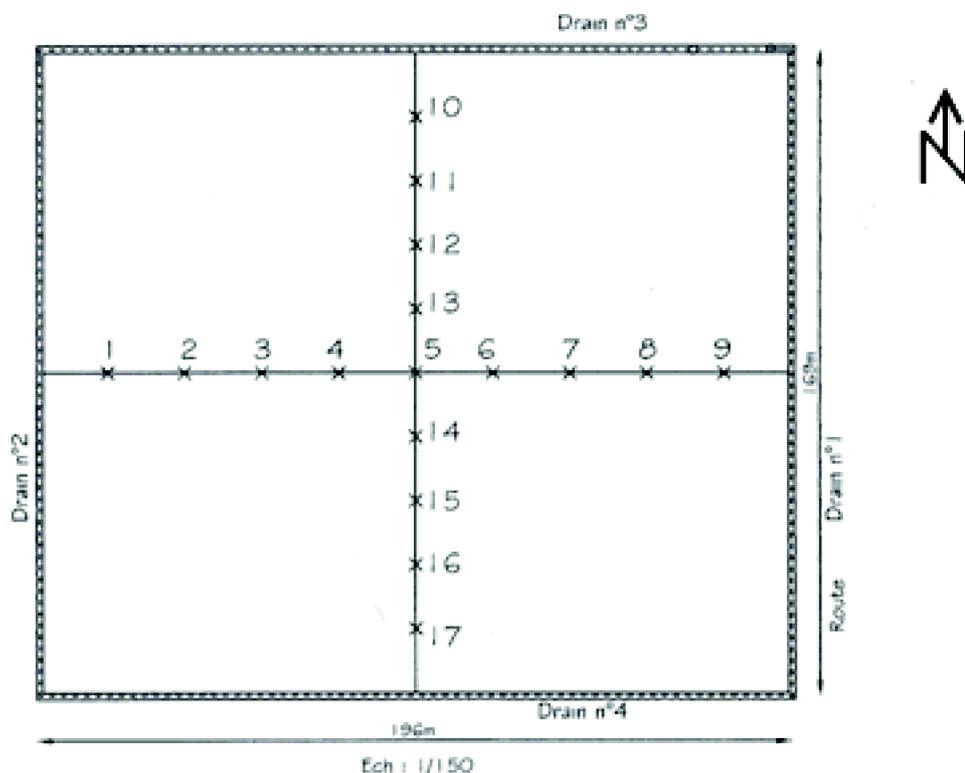


Figure 7 : Localisation des échantillons prélevés (Parcelle a)

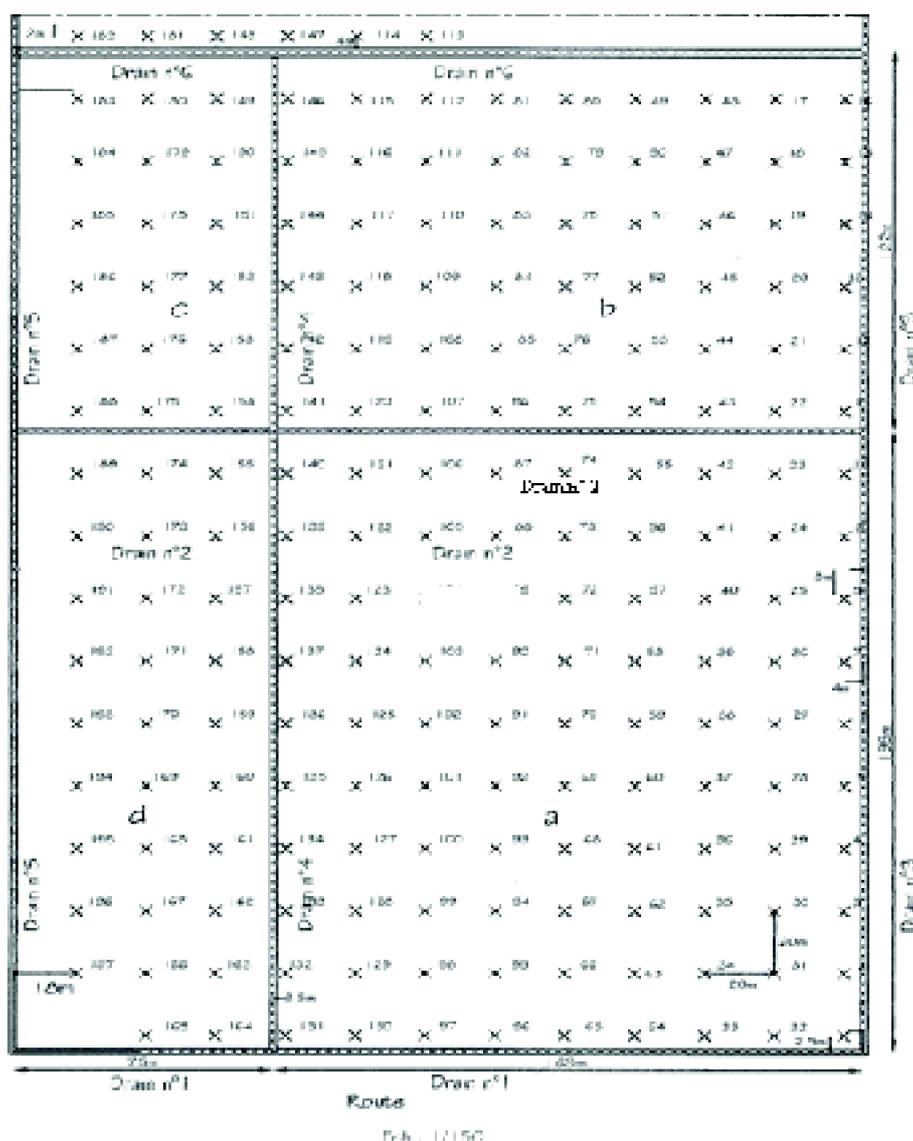


Figure 8 : Dispositif des mesures électromagnétiques

2.2. Traitement des données

Les données acquises sont traitées par des méthodes statistiques et géostatistiques et les cartes de salinité sont obtenues par krigeage.

2.2.1. L'analyse statistique

Nous avons d'abord utilisé les statistiques descriptives de tendance centrale et de dispersion pour appuyer l'interprétation des variables en tenant compte de la corrélation et de la localisation des échantillons. Par la suite, nous avons utilisé les régressions linéaires qui vont servir à réaliser un étalonnage des mesures électromagnétiques et répondre ainsi à notre objectif. Une régression (Goulard et al, 1987) est un modèle mathématique linéaire, reliant une variable aléatoire Z à d'autres variables X^j , $j=1, p$ qui

vont servir à prédire ou à approcher au point x la valeur de Z non mesurée $Z^*(x)$ par combinaison linéaire des variables X^j mesurées au point x :

$$Z^*(x) = \sum_j a_j X^j(x) + b$$

2.2.2. L'analyse géostatistique

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

Les méthodes géostatistiques se basent sur l'analyse de la structure spatiale et se réfèrent à la théorie de variable régionalisée (Mathéron, 1965). Ces méthodes ont pour but et selon les objectifs que l'on recherche, de connaître l'organisation spatiale d'un phénomène qui consiste à :

- l'étude de la structure spatiale d'une propriété donnée (variogramme) par le biais du variogramme.
- la cartographie des propriétés étudiées par le krigeage.

- Définition du variogramme

Soient deux points de coordonnées géographiques X_i et X_j associées à deux valeurs $Z(X_i)$ et $Z(X_j)$ d'une propriété donnée Z connue en n points de l'espace géographique. La variance entre ces deux points est par définition :

$$\delta^2 = (Z(X_i) - X_m)^2 + (Z(X_j) - X_m)^2 \dots \dots \dots (1)$$

X_m est la moyenne des valeurs X_i et X_j . Le développement de cette équation donne :

$$\delta^2 = 1/2 (Z(X_i) - Z(X_j))^2 \dots \dots \dots (2)$$

Considérant que ces deux valeurs sont séparées par une distance h, l'équation (2) s'écrit

$$\delta^2 = 1/2 (Z(X_i) - Z(X_i+h))^2 \dots \dots \dots (3)$$

En généralisant à un ensemble de n couples de points distants de h, la variance moyenne des écarts entre les couples est alors :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(X_i) - Z(X_i+h))^2$$

4)

L'équation (4) donne une estimation de ce qu'on appelle le semi-variogramme (Gascuel-odoux, 1996).

- Paramètres du variogramme.

Le variogramme, en tant que fonction habituellement croissante en fonction de h , synthétise beaucoup d'informations concernant le comportement de la variable aléatoire étudiée.

Dans le cas des modèles de variogrammes montrant un seuil (figure 9) on a :

- La portée : elle correspond à la distance à partir de laquelle le variogramme se stabilise et où les corrélations entre les valeurs de la variable s'annulent (Delhomme, 1976).
- Le palier : Il correspond à la variance spatiale de la variable à partir de laquelle le variogramme devient constant.
- L'effet de pépité : Il y a effet de pépité lorsque le variogramme non nul se traduit par une discontinuité à l'origine. Ce comportement peut être dû soit à des erreurs de mesure dues au protocole expérimental (Gascuel-odoux, 1987 ; Boivin et Touma, 1988) soit à une micro régionalisation, c'est à dire qu'il y a une autocorrelation inférieure à la distance d'échantillonnage ou encore à un nombre de couple de mesure inférieur à 50 (Journel, 1977).

Les modèles de variogrammes sans palier (figure 10) s'expliquent (Laborde, 1989) par le fait que la portée est supérieure à l'échelle de travail, ou par des variances qui augmentent indéfiniment ou encore par la présence d'une dérive.

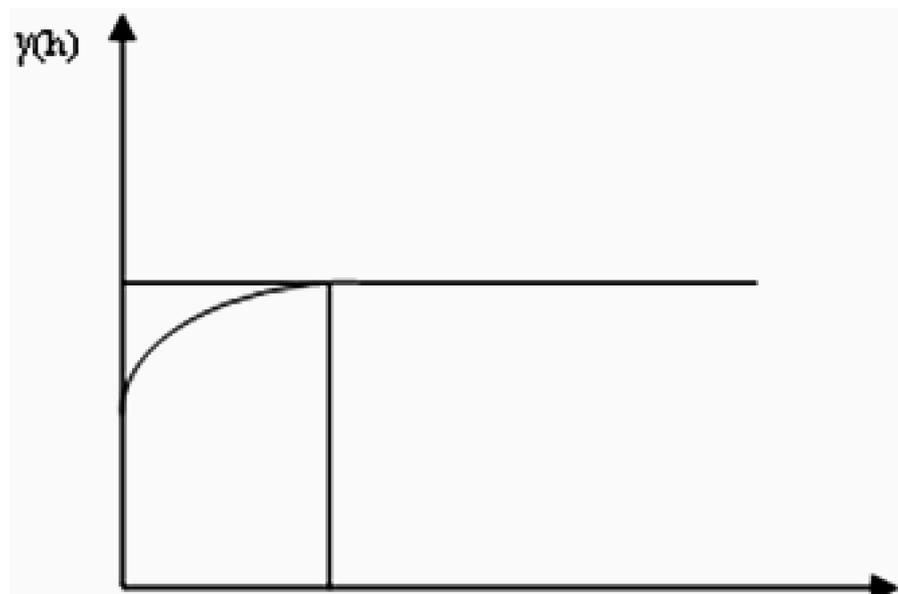


Figure 9 : Exemple de variogramme à palier

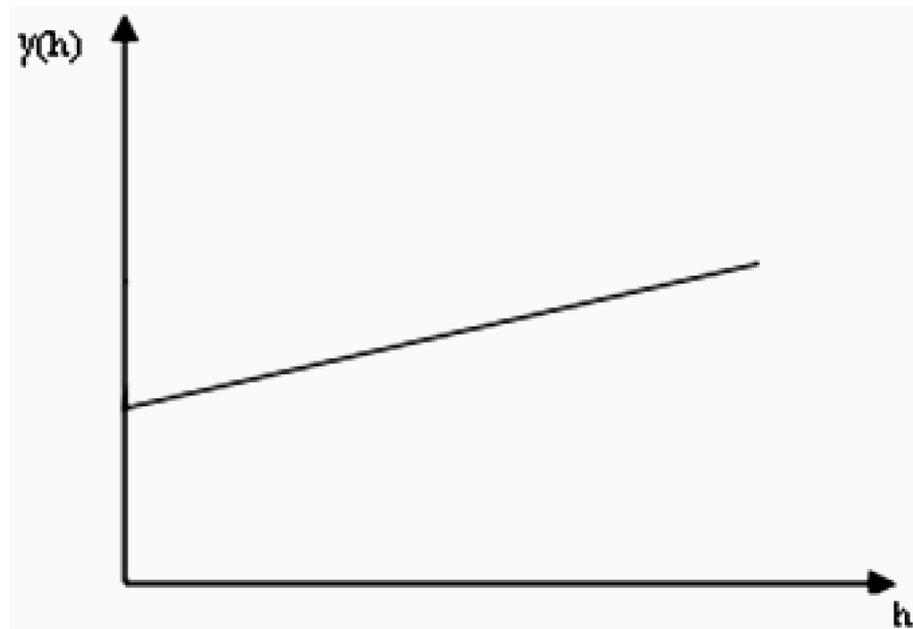


Figure 10 : Exemple de variogramme sans palier

Le krigeage est une technique d'estimation d'un phénomène connu en un certain nombre de points qui à l'avantage, parmi d'autres techniques d'interpolation, d'utiliser la structure spatiale de la variable pour l'estimation (Journel, 1977). Il existe plusieurs types de krigeage :

-Le krigeage ordinaire

Le krigeage ordinaire est l'estimation d'une valeur inconnue en un point arbitraire. Il consiste en une opération qui est répétée en chaque nœud X_0 d'une grille régulière recouvrant le domaine étudié.

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

$$Z^* (X_0) = \sum_{\alpha}^n \gamma_{\alpha} Z (X_{\alpha})$$

Les n pondérateurs γ_{α} sont calculés de façon à assurer que l'estimation $Z^* (X_0)$ soit sans biais et que la variance de l'erreur d'estimation soit minimale

-Krigeage simple en covariance

C'est le cas où la fonction aléatoire est stationnaire d'ordre 2, c'est-à-dire que l'espérance mathématique existe et est constante :

$$E (Z (x)) = m$$

La covariance pour chaque couple existe et ne dépend que de l'inter distance h :

$$C (h) = E (Z (x) - Z (x+h)) - m^2$$

Dans le cas où la condition de la variance finie serait posée, d'autres hypothèses sont alors à envisager.

-Krigage universel

Certaines propriétés du milieu naturel peuvent présenter un gradient qui se traduit par une tendance. C'est le cas lorsque, ni la variance, ni la covariance ne peuvent être définies. L'espérance mathématique n'est donc plus constante et elle est fonction de la position des points d'appui de x ; dans ces conditions, on aura donc :

$$E(Z(x)) = m(x)$$

$$\text{et } E(Z(x) - Z(x+h)) \neq 0$$

Dans ce type de krigage, l'estimation du variogramme par l'équation habituelle n'est plus valable et devient (Webster et al, 1985 ; Voltz, 1986) :

$$\bar{\delta} \text{ réel}(h) = \bar{\delta} \text{ estimé}(h) - 1/2 [m(x) - m(x+h)]^2$$

Dans ce type de krigage, il faut donc estimer simultanément le variogramme brut et la dérivée que l'on suppose généralement être une fonction simple variant relativement lentement.

Chapitre IV. Résultats et discussions

1. Description de la salinité et de l'humidité des échantillons prélevés

Les résultats portent sur la conductivité électrique de l'extrait pâte saturée et de l'humidité des 17 échantillons prélevés sur quatre horizons et selon les deux transects T1 et T2.

1.1. Analyses statistiques

Les résultats révèlent que la conductivité électrique des extraits de pâtes saturée (CE) pour l'ensemble des horizons se situe entre 1,08 et 27,74 dS/m (tableau II). Cette large gamme de valeurs de salinité signifie que la parcelle étudiée est très hétérogène pour ce paramètre. La salinité moyenne calculée par tranche de profondeur révèle que le profil salin moyen est de type convexe (figure 11), elle se situe entre 4,85 dS/m en surface et 13,8 dS/m en profondeur (H3) et confirme donc la forte amplitude de la CE dans la parcelle étudiée. Les valeurs du coefficient de variation de la CE1 et de la CE4 sont supérieures à 50 %, elles expriment une forte variabilité de la salinité en surface et en profondeur. Néanmoins, cette variabilité est relativement plus faible au niveau des horizons médians qui enregistrent des coefficients de variation de l'ordre de 43 % pour H2

et 26 % pour H3. Il s'avère que les quatre tranches de profondeur ont des niveaux de salinité élevés (4 - 8 dS/m) à très élevés (8-16 dS/m) (USSL, 1954).

Le tableau II montre aussi que l'humidité du sol varie entre 6,6 et 32,1 %, la teneur en eau diminue selon la profondeur. Les teneurs en eau de l'horizon de surface et de l'horizon de sub-surface sont moins variables dans l'espace (CV < 19 %) que celles des horizons profonds (CV > 35 %). Le profil hydrique est de type ascendant à cause probablement du fait que les mesures ont été effectuées sur des échantillons prélevés le 13 février 2005 en pleine saison pluvieuse.

paramètres	C.E. dS/m à 25° C.				Humidité pondérale %			
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0- 25 cm	25-50 cm	50-75 cm	75-100 cm
Minimum	1,08	2,34	6,48	2,50	14,51	15,39	7,20	6,62
Maximum	12,61	16,83	20,01	27,74	30,37	32,10	29,43	26,50
Moyenne	4,85	10,78	13,80	11,56	24,27	22,88	17,43	11,07
C.V. %	75,40	43,7	26,50	51,60	13,68	19,32	35,00	46,00

Tableau II. Les résultats statistiques de la conductivité électriques et de l'humidité des échantillons prélevés.

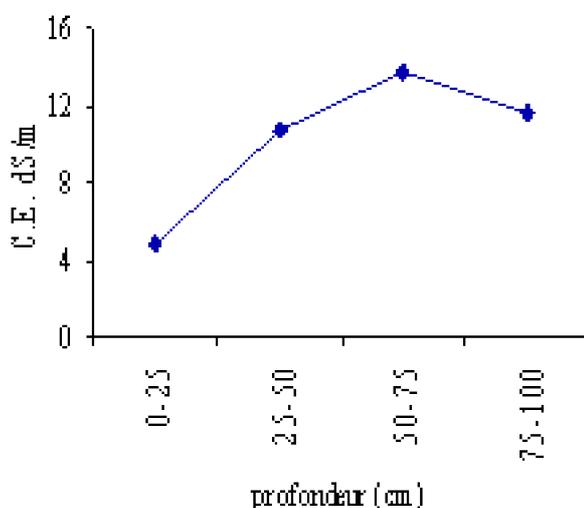


Figure 11. Profil salin moyen des échantillons prélevés (Parcelle a)

1.2. Evolution de la salinité selon la profondeur

Les profils salins réalisés pour les 17 sondages présentent des allures diverses (figure 12)

Les profils 6, 7, 9, 10 et 17 sont de type descendant avec un maximum de salinité dans l'horizon profond (75-100cm). Selon Servant (1976), ce type de profil à gradient de salinité dirigé vers le bas avec un maximum en profondeur serait le résultats d'une désalinisation du sol.

Les autres profils sont de types convexes avec des maximums de salinité dans les horizons 25-50 cm ou 50-75 cm. Ce type de profil caractérisé par un maximum de salinité peu à moyennement profond serait le résultats d'une salinisation due aux pluies d'hiver (Servant, 1976).

Il reste à noter que mis à part le profil 1, les profils 9, 10 et 17 adjacents aux drains ont un profil salin descendant.

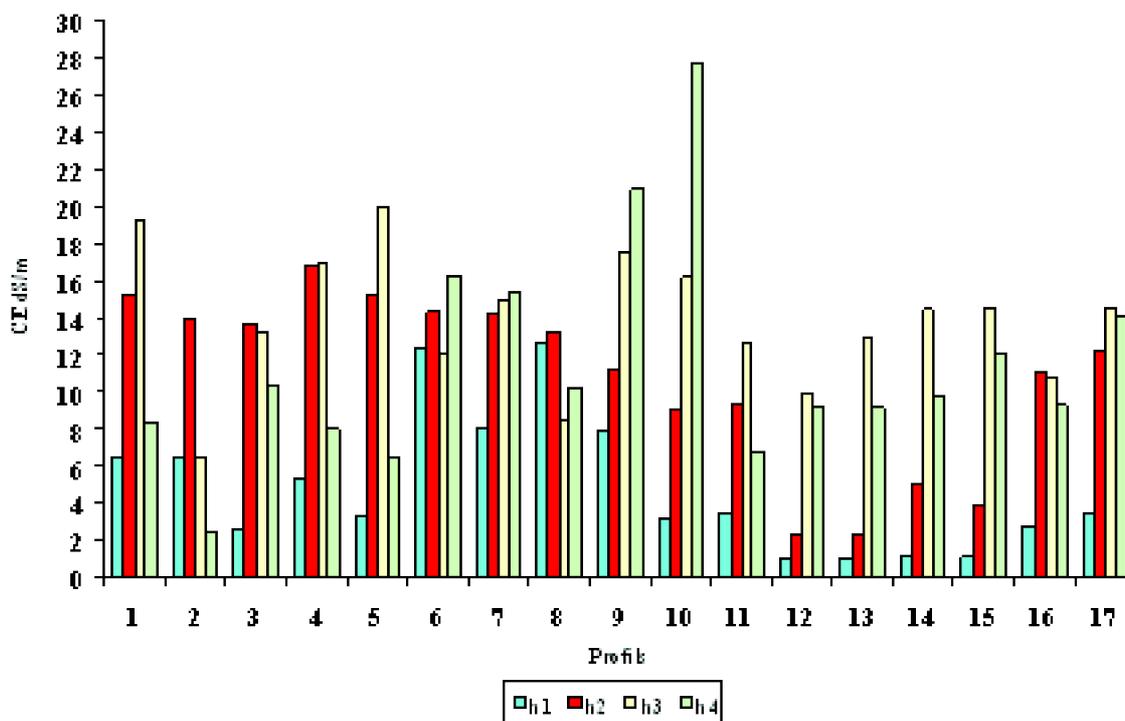


Figure 12 : Evolution de la salinité des différents sondages par horizons

1.3. Evolution de la salinité du sol en fonction du réseau de drainage

La distribution spatiale de la conductivité électrique des différents horizons du sol permet d'évaluer l'efficacité du réseau de drainage dans l'élimination des sels solubles de la parcelle étudiée. Pour ce, nous avons caractérisé la variation de la CE en fonction de la distance par rapport au centre de la parcelle (0), de chaque horizon le long des transects T1 et T2.

1.3.1. Evolution de la salinité selon T1

L'analyse de la figure 13 montre que le premier horizon présente une CE minimale de 2,59 dS/m située à une distance de 40m du côté ouest du centre de la parcelle. La CE maximale est de 12,61 dS/m située sur la partie est à 60 m du centre de la parcelle.

Pour le deuxième horizon, la conductivité électrique a une valeur maximale de 16,83 dS/m située sur la partie ouest à 20 m du centre de la parcelle; la conductivité électrique minimale est de 11,21 dS/m observée à 80 m du centre de la parcelle, soit à la limite du

drain est.

La conductivité électrique maximale du troisième horizon est de 20,01 dS/m et se situe au centre de la parcelle. La valeur minimale est de 6,48 dS/m et se trouve à l'ouest à 60 m du centre.

Le quatrième horizon à une conductivité électrique minimale de 2,5 dS/m située à 60 m du centre et à l'ouest de la parcelle, la valeur maximale de 21 dS/m se rencontre au voisinage du drain est.

En résumé on remarque qu'en allant du centre de la parcelle vers l'ouest, la salinité pour les quatre horizons tend à augmenter au voisinage du drain. En allant du centre vers l'est, la salinité tend à diminuer au voisinage du drain pour l'horizon de surface et de sub-surface et à augmenter pour les horizons de profondeurs.

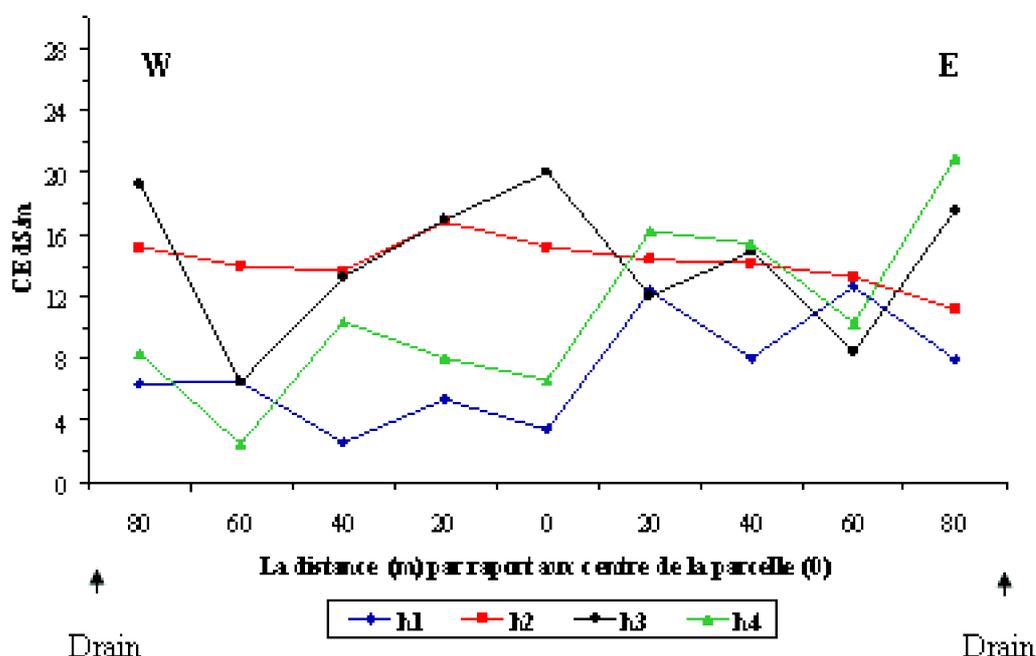


Figure 13 : Evolution de la salinité par horizon en fonction de la distance aux drains. Cas du transect T1

1.3.2. Evolution de la salinité selon T2

L'analyse de la figure 14 montre que le premier horizon présente une CE minimale de 1,08 dS/m observée deux fois à 20 m et à 40 m en allant du centre vers le nord de la parcelle. La CE maximale est de 3,49 dS/m rencontrée sur la partie nord à 60 m du centre et sur la partie sud à 80 m du centre de la parcelle.

Pour le deuxième horizon, la conductivité électrique maximale est de 15,23 dS/m localisée au centre de la parcelle, la conductivité électrique minimale est de 2,34 dS/m, elle est observée deux fois en allant vers le nord à 20 m et à 40 m du centre de la parcelle.

La conductivité électrique maximale du troisième horizon est de 20,01 dS/m située au centre de la parcelle. La plus faible valeur de la CE (9,89 dS/m) se situe au nord à 40 m

du centre de la parcelle.

La conductivité électrique minimale du quatrième horizon est de 6,55 dS/m et se localise au centre de la parcelle, sa valeur maximale (27,74 dS/m) est enregistrée à 80 m du centre de la parcelle, soit à la limite du drain nord.

Il s'avère donc que la salinité des quatre horizons tend à augmenter en direction des deux drains.

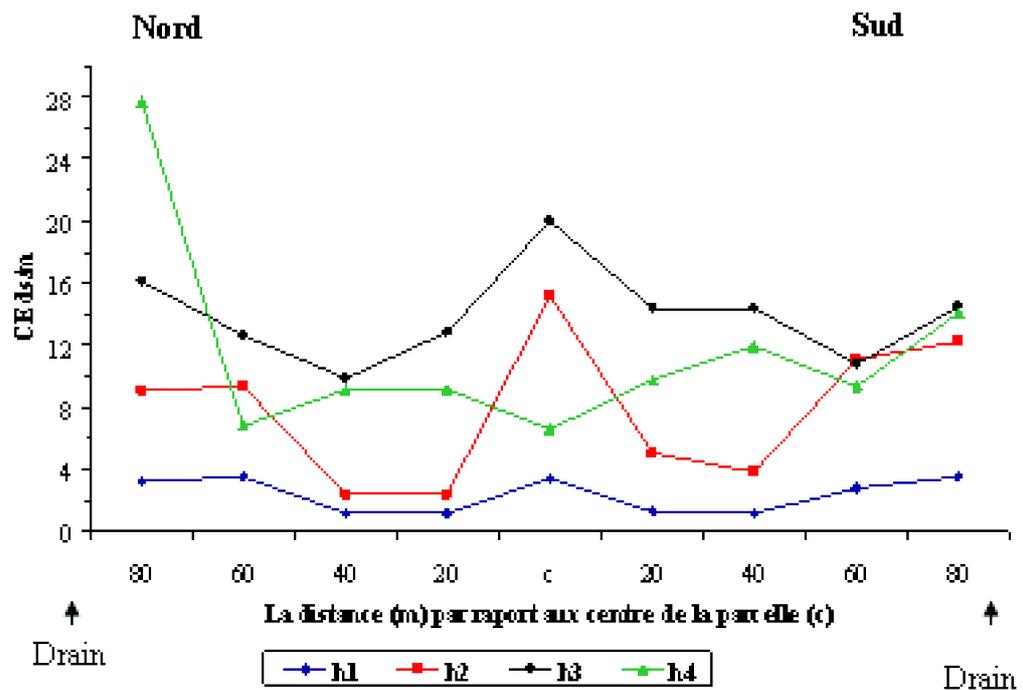


Figure 14. Evolution de la salinité par horizon en fonction de la distance aux drains. Cas du transect T2

En résumé, il s'avère que la salinité maximale se localise au centre de la parcelle sur l'horizon de surface du transect 1 et sur les trois premiers horizons du transect 2

L'évolution de la salinité des différents horizons en fonction de la distance par rapport aux drains varie selon les horizons et selon l'orientation.

-En allant vers le nord, le sud et l'ouest la salinité des quatre horizons tend à augmenter au voisinage des drains.

-En allant vers l'est, la salinité tend à diminuer au voisinage du drain pour l'horizon de surface et de sub-surface et à augmenter pour les deux horizons de profondeur.

Cette augmentation au voisinage des drains montre qu'il y a un mouvement des sels solubles du centre vers les drains sans qu'il y ait une évacuation de ces sels hors de la parcelle par le biais de ces drains.

2. Evaluation de la salinité par induction

électromagnétique

Il s'agit ici d'étalonner les mesures obtenues par induction électromagnétique par rapport aux mesures de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée. Cet étalonnage permettra d'obtenir une caractérisation de la conductivité électrique calculée de la parcelle d'étude.

2.1. Les mesures électromagnétiques

L'appareil est utilisable par simple lecture dès sa mise en contact avec le sol. Il permet d'obtenir une conductivité apparente globale sur 1,5 m de profondeur si on le maintient verticalement et sur 0,75 m si on le maintient horizontalement. La profondeur d'investigation diminue progressivement au fur et à mesure qu'on soulève l'appareil au-dessus du sol.

Dans la présente expérimentation, nous avons mesuré 197 profils de conductivité électrique apparente à l'aide du conductivimètre électromagnétique EM38 en position horizontale et verticale pour quatre gammes de profondeur (EM1 (0-25cm) ; EM2 (0-50cm) ; EM3 (0-75cm) ; EM₄ (0-100cm)). Seul les mesures en mode vertical sont présentées dans la suite de ce chapitre du fait qu'au delà de 0.75cm la réponse de l'EM38 en mode horizontal devient négligeable (figure.15).

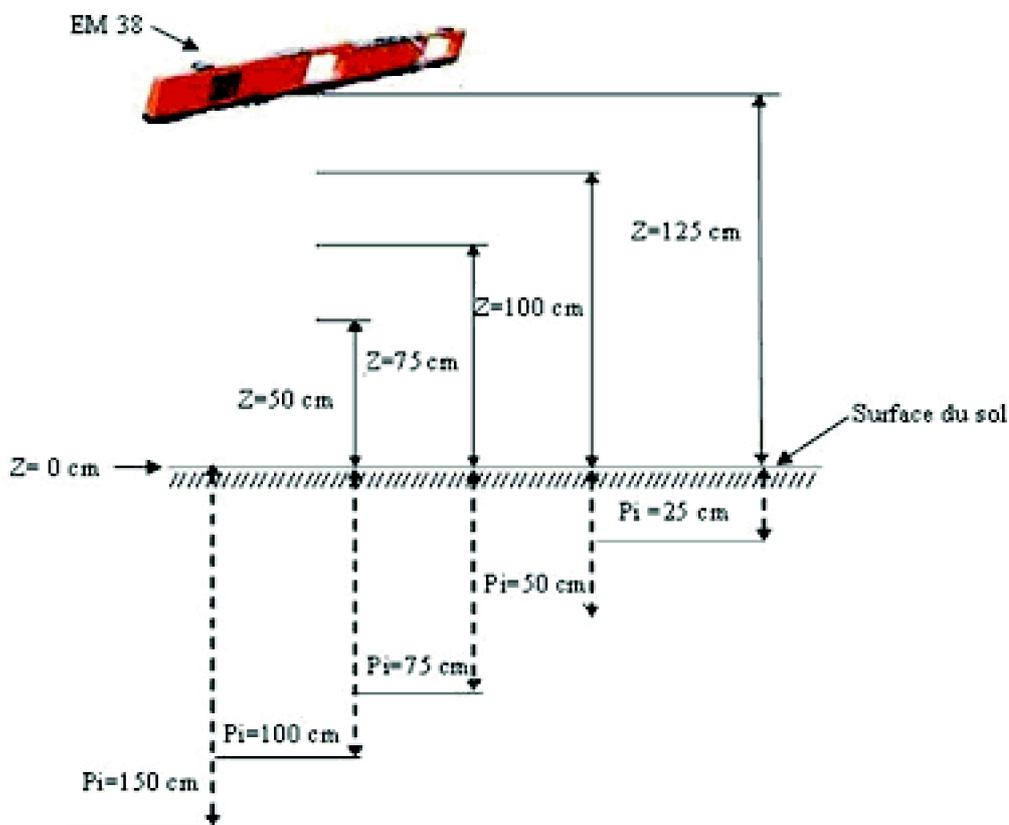


Figure 15 : Prospection électromagnétique

Avec Pi profondeur d'investigation de L'EM-38 et Z hauteur du maintient de l'appareil au dessus du sol.

La corrélation entre les mesures électromagnétiques en mode horizontal (EMh) et vertical (EMv) pour une tranche de sol de 1 mètre permet selon Corwin et Rhoades (1984) de caractériser l'évolution de la salinité en profondeur. En effet, si la conductivité électromagnétique en mode horizontal est supérieure à celle en mode vertical ($EMh > EMv$), on se trouve au dessus d'un profil salin ascendant avec la profondeur, situation indiquant une concentration des sels en surface. Dans le cas contraire ($EMv > EMh$), il s'agit d'un profil salin descendant où les sels sont accumulés en profondeur. Si $EMh = EMv$, on est alors devant un profil salin uniforme. La comparaison de EMh et EMv est donc une première possibilité d'interprétation des résultats.

La figure 16 montre que tous les points de mesures se situent au-dessus de l'axe ab ($EMv > EMh$) ce résultat signifie que le gradient de salinité augmente avec la profondeur (profil salin descendant).

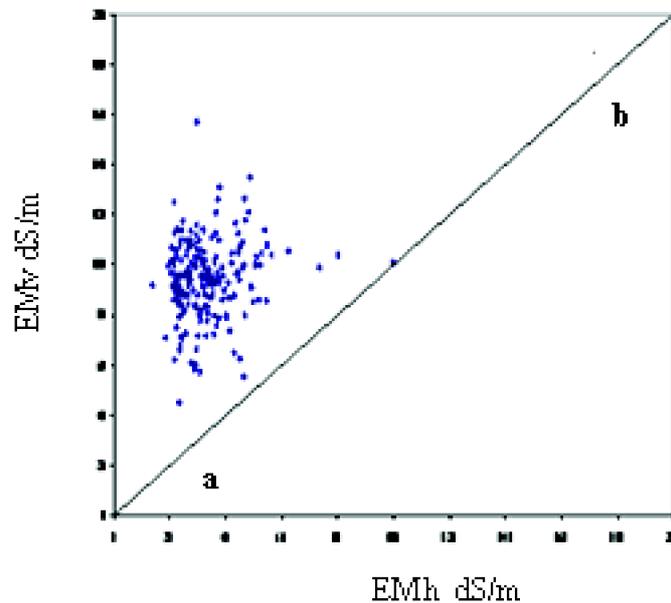


Figure 16 : Test d'homogénéité du profil salin. Corrélation entre les mesures en mode vertical EMv et celle en mode horizontal EMh .

2.2. Etalonnage des mesures électromagnétiques

Pour leur donner une signification pédologique, les mesures électromagnétiques ont été étalonnées par rapport aux conductivités électriques des extraits de pâtes saturées de sol. Cet étalonnage peut être réalisé par l'utilisation de régressions linéaires simples sauf que ces dernières aboutiront à des conductivités électriques calculées (CE_C) pour les mêmes gammes de profondeur des mesures électromagnétiques, c'est à dire entre 0 et 25 cm, 0 et 50 cm, 0 et 75 cm et entre 0 et 100 cm. Or, l'objectif visé dans la présente étude est de calculer des conductivités électriques pour des intervalles de profondeur comprises entre 0 et 25 cm, 25 et 50 cm, 50 et 75 cm et enfin entre 75 et 100 cm. Pour résoudre ce problème, nous avons réalisé deux types d'étalonnage.

Le premier étalonnage se base sur l'utilisation des régressions multiples (Rhoades et Corwin, 1981). Il consiste à rechercher une relation statistique entre les mesures électromagnétiques de L'EM-38 des différentes profondeurs du sol et les valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée des quatre horizons du sol (0-25cm ; 25cm-50cm ; 50cm-75cm ; 75cm-100cm). Cette approche permet d'obtenir deux séries d'équations. La première série d'équations consiste à relier les conductivités électriques des extraits de pâtes saturées de chaque horizon du sol (valeurs expliquées) aux différentes mesures de l'EM-38 pour les différentes gammes de profondeur (valeurs explicatives). Les équations obtenues sont alors les suivantes :

$$CE1= 0,750 EM1 + 0,403 EM2 - 0,058 EM3 - 0,355 EM4 - 9,64 \dots (R^2=0,349)$$

$$CE2= - 2,399 EM1 + 2,680 EM2 - 0,640 EM3 + 0,096 EM4 + 4,83 \dots (R^2=0,396)$$

$$CE3= - 2,530 EM1 + 0,189 EM2 - 0,235 EM3 - 1,110 EM4 + 22,64 \dots (R^2=0,46)$$

$$CE4= 0,410 EM1 + 0,020 EM2 - 0,510 EM3 + 0,380 EM4 - 4,92 \dots (R^2=0,459)$$

Par contre, la deuxième série d'équations consiste à relier les mesures obtenues par l'EM-38 pour les différentes gammes de profondeur (valeurs expliquées) aux conductivités électriques des extraits de pâtes saturées de chaque horizon (valeurs explicatives). Les équations obtenues sont les suivantes :

$$EM1= 1,360 CE1 - 0,130 CE2 + 0,780 CE3 + 0,590 CE4 + 14,98 \dots (R^2=0,71)$$

$$EM2= 1,695 CE1 - 0,040 CE2 + 1,079 CE3 + 0,794 CE4 + 16,20 \dots (R^2=0,72)$$

$$EM3= 2,780 CE1 - 0,449 CE2 + 1,740 CE3 + 0,960 CE4 + 18,72 \dots (R^2=0,66)$$

$$EM4= 3,420 CE1 - 0,230 CE2 + 2,290 CE3 + 1,520 CE4 + 20,06 \dots (R^2=0,73)$$

où

CE1 : Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée de l'horizon de surface (0-25 cm)

CE2 : Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée de l'horizon de sub-surface (25-50cm)

CE3 : Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée du troisième l'horizon (50-75 cm)

CE4 : Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée de l'horizon de profondeur (75-100cm)

et

EM1 : conductivité électromagnétique entre 0 et 25cm de profondeur

EM2 : conductivité électromagnétique entre 0 et 50cm de profondeur

EM3 : conductivité électromagnétique entre 0 et 75cm de profondeur

EM4 : conductivité électromagnétique entre 0 et 100cm de profondeur

A l'inverse de la première série, il s'avère que les coefficients de détermination R^2 des équations de la deuxième série sont statistiquement hautement significatifs ($\alpha = 0,05$). Ce résultat suggère donc l'utilisation de cette deuxième série d'équations pour la

transformation des mesures électromagnétiques en conductivités électriques de pâte saturée. Ainsi, nous avons obtenu pour chacun des quatre horizons de sol 197 valeurs de conductivité électrique calculée (CE_C) que nous traiterons par les méthodes statistiques et géostatistiques.

Le deuxième étalonnage se base sur la régression linéaire simple entre les mesures électromagnétiques effectuées entre 0 et 100 cm de profondeur et les valeurs de conductivités électriques de l'extrait de pâte saturée pour la même profondeur du sol. Ces valeurs sont obtenues par le calcul des moyennes des conductivités électriques des extraits de pâtes saturées des quatre horizons (EC1, EC2, EC3, EC4). Le résultat obtenu servira par la suite à élaborer la carte de salinité du sol pour la profondeur comprise entre 0 et 100 cm, carte de salinité qui sera comparée à celle de GRONTMIJ (1971).

La figure 17 réalisée pour l'étalonnage des deux types de mesure de la salinité des sols montre une nette tendance à l'augmentation des valeurs obtenues par l'EM-38 quand la CE de l'extrait de pâte saturée augmente. La relation entre ces deux paramètres est de type

[$EM_{0-100\text{ cm}} \text{ dS/m} = 6,22 CE_{0-100\text{ cm}} \text{ dS/m} + 19,59$] avec un coefficient de corrélation statistiquement hautement significatif ($r = 0,80$; $\alpha = 0,05$).

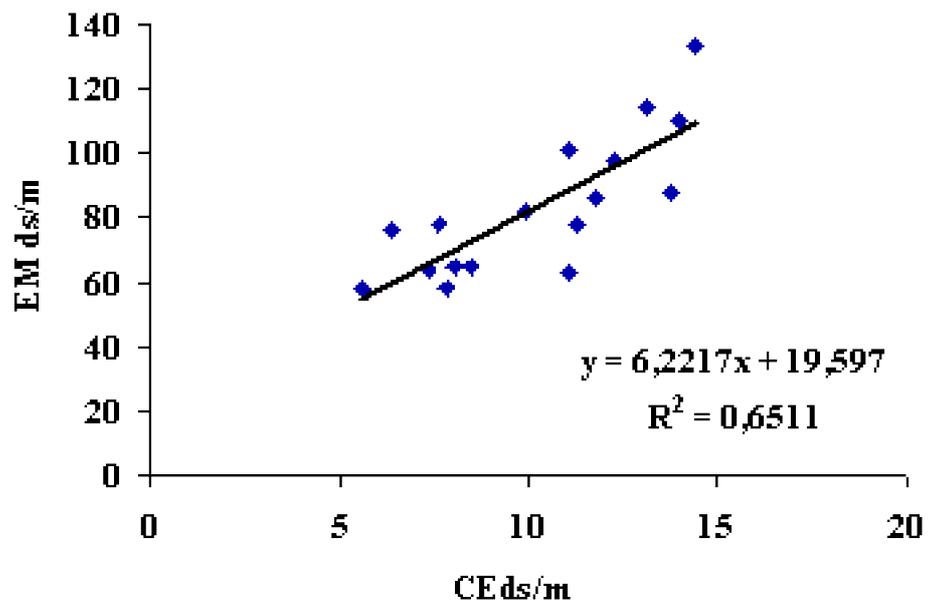


Fig.17 : Relation entre les conductivités électromagnétiques et les conductivités électriques de pâte saturée de (0-100) cm

L'utilisation de l'équation [$EM_{0-100\text{ cm}} \text{ dS/m} = 6,22 CE_{0-100\text{ cm}} \text{ dS/m} + 19,59$] permet de convertir les normes d'interprétation de l'USSL (1954) de conductivité électrique de pâte saturée en mesures électromagnétiques adaptées à l'échelle de l'USSL (tableau III). Ces valeurs converties vont être utilisées pour le choix des courbes d'isovaleur de la carte de salinité obtenue par l'utilisation directe des mesures électromagnétiques ($EM_{0-100\text{ cm}}$).

Tableau III Normes d'interprétations de l'USSL transformées

CE/dS/m	EMv dS/m	Niveau de salinité
0-2	19-32	Non salin
2-4	32-44	Légèrement salin
4-8	69-44	Salin
8-16	69-119	Très salin
>16	>119	Extrêmement salin

2.3. La conductivité électrique calculée pour l'ensemble des horizons

Les calculs ont porté sur l'ensemble des valeurs de la conductivité électrique calculée (CEC) par le biais du premier type d'étalonnage.

2.3.1. Analyses statistiques

Les résultats révèlent que la conductivité électrique calculée (CE_C) pour l'ensemble des horizons se situe entre 0,14 et 37,33 dS/m (Tableau, IV). Ce résultat signifie que la salinité de la parcelle étudiée est très hétérogène. La salinité moyenne varie entre 3,64 dS/m en surface et 24,04 dS/m pour le troisième horizon. Le profil salin moyen est donc de type convexe (figure 18). Les coefficients de variation de la CE_{C1} et de la CE_{C4} sont supérieurs à 50 %, ils expriment une forte variabilité de la salinité en surface et en profondeur. Cette variabilité est relativement plus faible au niveau des horizons de moyenne profondeur qui enregistrent des coefficients de variation de l'ordre de 37 % pour H2 et 25 % pour H3.

La médiane indique que 50 % des horizons ont des CE_C inférieures à 2,94 dS/m en surface, à 16,87 dS/m en sub-surface, inférieures à 24,8 dS/m dans le troisième horizon, et à 5,71 dS/m en profondeur. La différence entre la moyenne et la médiane montre qu'il y a une dissymétrie à droite pour la CE_{C1} , CE_{C2} et CE_{C4} , par contre, la CE_{C3} a une faible dissymétrie à gauche. Ceci est confirmé par les valeurs du coefficient d'aplatissement qui sont de l'ordre de 1,48, 0,49 et 2,01 respectivement pour la CE_{C1} , CE_{C2} et CE_{C4} et de -0,65 pour la CE_{C3} .

Les coefficients d'asymétrie de Fisher pour la CE_{C1} et la CE_{C4} sont loin de 0 où la loi de distribution est très loin d'être normale. Par contre ceux de la CE_{C2} et CE_{C3} (0,18 et 0,33) sont proches de 0 et donc la distribution est proche de la loi normale (tableau IV)

Tableau.IV .Les paramètres de statistiques descriptives de la conductivité électrique calculée

paramètres				
Minimum	0,14	3,53	1,11	0,13
Maximum	17,29	34,55	35,46	37,33
Moyenne	3,64	17,30	24,04	7,19
Médiane	2,99	16,87	24,8	5,71
Coefficient de variation %	70	37	25	74
Coef- d'aplatissement	1,48	0,49	-0,65	2,01
Coef- d'asymétrie	4,06	0,18	0,33	6,19

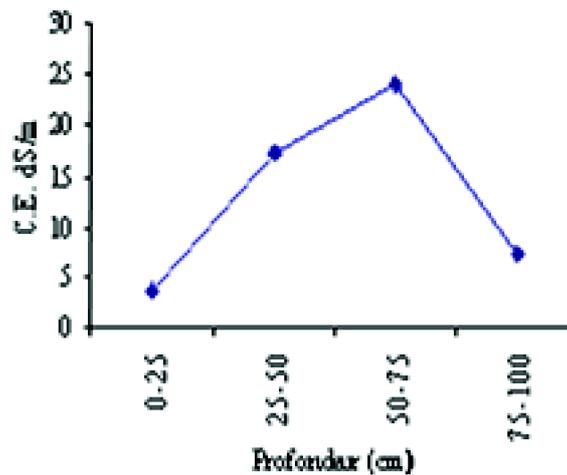


Figure 18 : Profil salin moyen des mesures électromagnétiques transformées

2.3.2. Les fréquences de la conductivité électrique calculée des différents horizons

La figure 19 présente les fréquences des différentes classes de salinité pour chaque horizon, où la proportion des horizons non salés avec une CE_C inférieure à 2 dS/m est la suivante:

- 28,93% des horizons de surface (H1) ;
- 0 % des horizons de sub-surface (H2) ;
- 0,51 % des troisièmes horizons (H3) ;
- 8,12 % des horizons de profondeur (H4).

Par ailleurs,

- 33,5 % des H1, 1,01 % des H2, 0 % des H3 et 17,76 % des H4 sont légèrement salins avec une CE_C comprise entre 2 et 4 dS/m
- 30,97 % des H1, 3,05 % des H2, 0 % des H3 et 43,65 % des H4 sont salins avec une CE_C comprise entre 4 et 8 dS/m.
- 6,09 % des H1, 48,22 % des H2, 12,69 % des H3 et 23,35 % des H4 sont très salins avec une CE_C comprise entre 8 et 16 dS/m.
- 0,51 % des H1, 47,72 % des H2, 86,80 % des H3 et 7,12 % des H4 sont

extrêmement salins avec une CE_C supérieur à 16 dS/m.

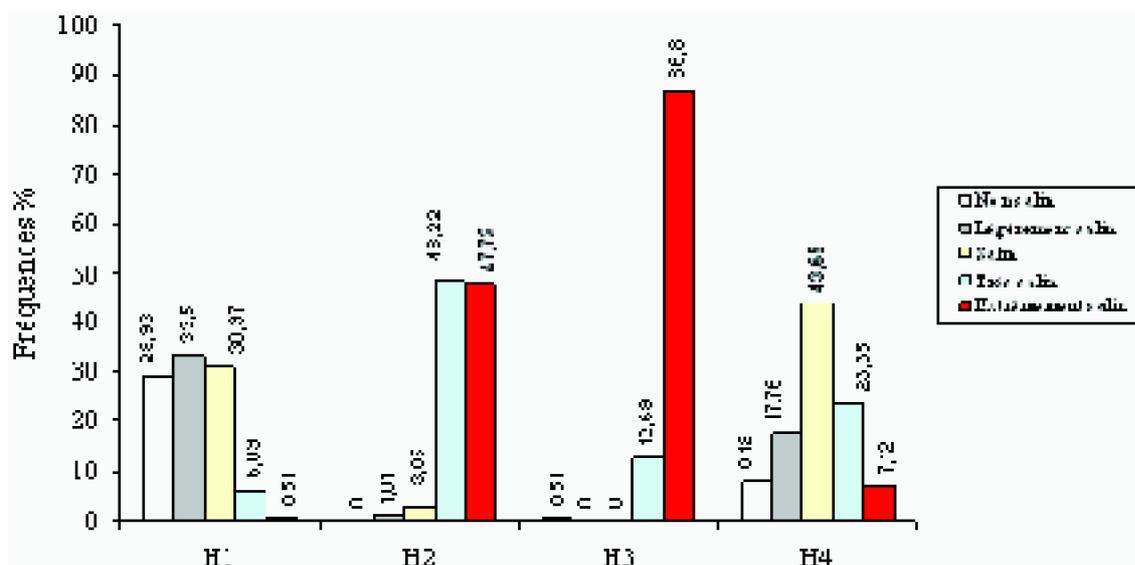


Figure 19 : Les fréquences de la conductivité électrique calculée des quatre horizons

Si on retient la valeur de 4 dS/m comme étant la limite entre les horizons salés et les horizons non salés, nos résultats montrent que 62,43% des horizons de surface, 1,01% des horizons de sub-surface, 0,51% des troisièmes horizons et 25,88% des horizons de profondeur seraient non salés ($CE_C < 4$ dS/m). Autrement dit, 37,57 % des horizons de surface, 98,9 % des horizons de sub-surface, 99,49 % des troisièmes horizons et 74,12 % des horizons de profondeur seraient salés ($CE_C > 4$ dS/m) (figure 20)

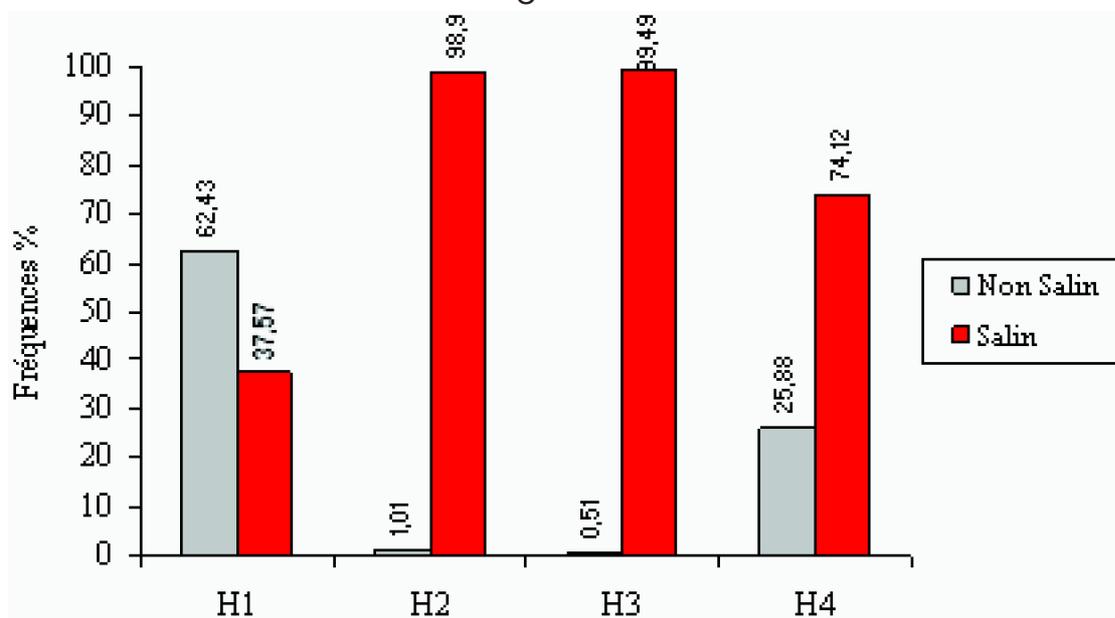


Figure 20 : Les fréquences des horizons affectés par la salinité

2.3.3. Vérification de la loi de distribution

La vérification de la loi de distribution est importante au cours des analyses

géostatistiques. En effet, les variables anormalement distribuées montrent des structures complètement aléatoire et purement pépitique. La vérification des lois de distribution théorique a été effectuée par le test Kolmogorov-Smirnov qui a été réalisé à partir de la distribution des fréquences. Nous l'avons effectué pour 35 échantillons au moins et pour un niveau de signification de 0,05

$$N'(X) - F(X) \leq 1,36 / \sqrt{N}$$

Où :

$N'(X)$ est la fréquence cumulée et $F(X)$ est la fonction de répartition de la distribution normale envisagée et N est le nombre d'échantillons (Dagnelie, 1982).

Les résultats du test sont représentés dans le tableau V qui montre que la CE_{C1} suit une loi log-normale, la CE_{C2} et la CE_{C3} suivent une loi normale et la CE_{C4} ne suit aucune des lois proposées alors elle suit une loi anormale.

Au cours de l'analyse géostatistique, les données de la CE_{C1} seront transformées en logarithme népérien et les normes d'interprétation de USSL (1954) y seront adaptées selon le tableau VI.

Tableau.V. Vérification de la loi de distribution par le test Kolmogorov-Smirnov

paramètres	Test K-S	1,36/ \sqrt{N}	Lois de distribution
CE_{C1}	0,111	0,096	AN
CE_{C2}	0,065	0,096	N
CE_{C3}	0,094	0,096	N
CE_{C4}	0,177	0,096	AN
$\ln CE_{C1}$	0,09	0,096	N
$\ln CE_{C4}$	0,173	0,096	AN
$\text{Exp} CE_{C4}$	0,523	0,096	AN

N : normale

AN : anormale

Tableau VI . Présentation des normes d'interprétations de USSL (1954)

CE ds/m	CE Ln ds/m	Niveau de salinité
< 2	< 0.693	Non salin
2 - 4	0.693 - 1.366	Légèrement salin
4 - 8	1.366 - 2.079	Salin
8 - 16	2.079 - 2.773	Très salin

2.4. Conclusion

En conclusion, on peu dire que les valeurs de la conductivité électrique calculée sont comprises entre 0,13 et 37,33 dS/m et qu'elles ont une variabilité élevée pour l'horizon de

surface et de sub-surface, avec la prédominance de la classe de salinité des sols extrêmement salins ($CE > 16$ dS/m).

La loi de distribution de la conductivité électrique de l'horizon de surface est log-normale, la conductivité électrique du deuxième et du troisième horizon suit la loi normale, alors que celle de l'horizon de profondeur ne suit aucune des deux lois.

La comparaison entre les lectures électromagnétiques verticales et horizontales montre que le profil salin est descendant.

3. Analyse géostatistique de la salinité mesurée par induction électromagnétique

3.1. Etude de la variabilité spatiale de la salinité

Cette étude porte sur les 197 valeurs de conductivité électrique calculée (CE_C) pour chaque horizon par le biais du premier étalonnage (régressions multiples). Nous rappelons que les CE_C du premier horizon sont normalisées en transformant ces valeurs en logarithme népérien.

3.1.1. Variographie

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

Le variogramme de surface de la CE_C de l'horizon de surface (figure 21) montre une anisotropie peu marquée selon deux directions, une anisotropie maximale selon la direction NE-SO (50° par rapport à l'horizontale) et une anisotropie minimale selon la direction NO-SE (140°), cette dernière donnant une meilleure autocorrection entre les points. L'établissement des variogrammes en fonction de ces directions permet de déterminer le rapport d'anisotropie qui est un paramètre important pour le krigeage.

Pour cela, nous avons tracé deux variogrammes expérimentaux selon les deux directions principales d'anisotropie (50° et 140°) pour leur caler ensuite deux variogrammes directionnels théoriques dans le but de déterminer le rapport d'anisotropie (portée minimale/portée maximale).

Les variogrammes expérimentaux directionnels (figure 22) s'ajustent mieux à un modèle exponentiel théorique commun avec un rapport d'anisotropie égal à 0,82 selon la direction 50° . Ce résultat signifie que la CE_C du premier horizon évolue différemment selon la direction considérée.

L'effet de pépite est de 0,28 dS/m (ln 1,32 dS/m) et représente 38,1 % de la

variabilité globale, il indique donc une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier ($\ln 2,1$ dS/m soit $0,74$ dS/m) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de $88,2$ m selon la direction 50° et de $72,3$ m selon la direction 140° . Au-delà de ces distances, les mesures de la CE_C deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches. La connaissance de cette portée peut être également utilisée pour choisir le pas d'échantillonnage lors d'une cartographie de la salinité des sols de cette région, un pas inférieur à 70 m s'avère inutile.

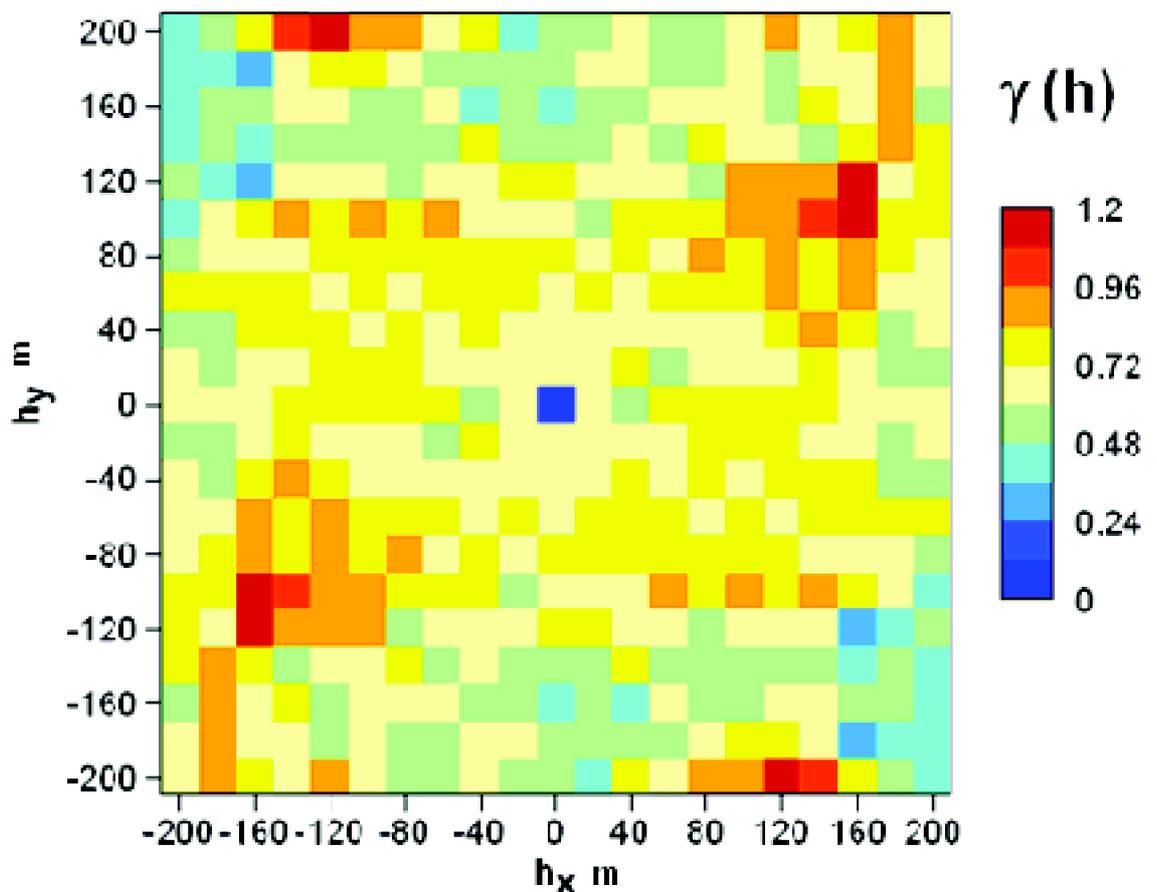


Figure 21 : Variogramme de surface de la $\ln CE_{C1}$

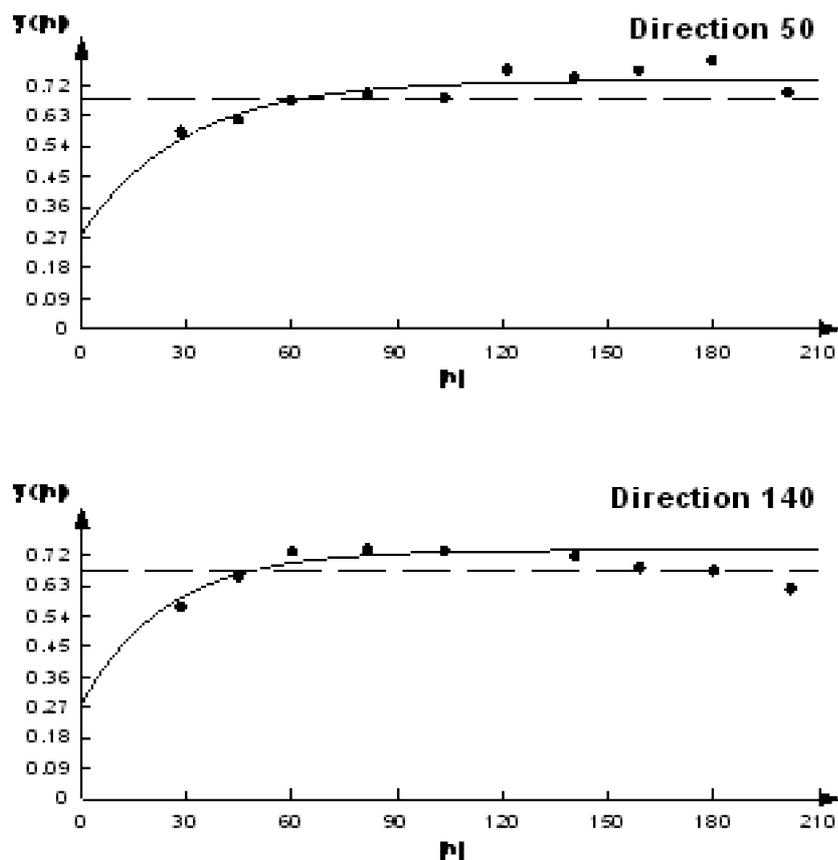


Figure 22 : Variogrammes ajustés de $\ln CE_{C1}$ selon les deux directions d'anisotropie

Le variogramme de surface de la CE_C de l'horizon de sub-surface (figure 23) révèle deux directions d'anisotropie, une anisotropie maximale selon la direction NO-SE (115°) et une anisotropie minimale selon la direction NE-SO (25°).

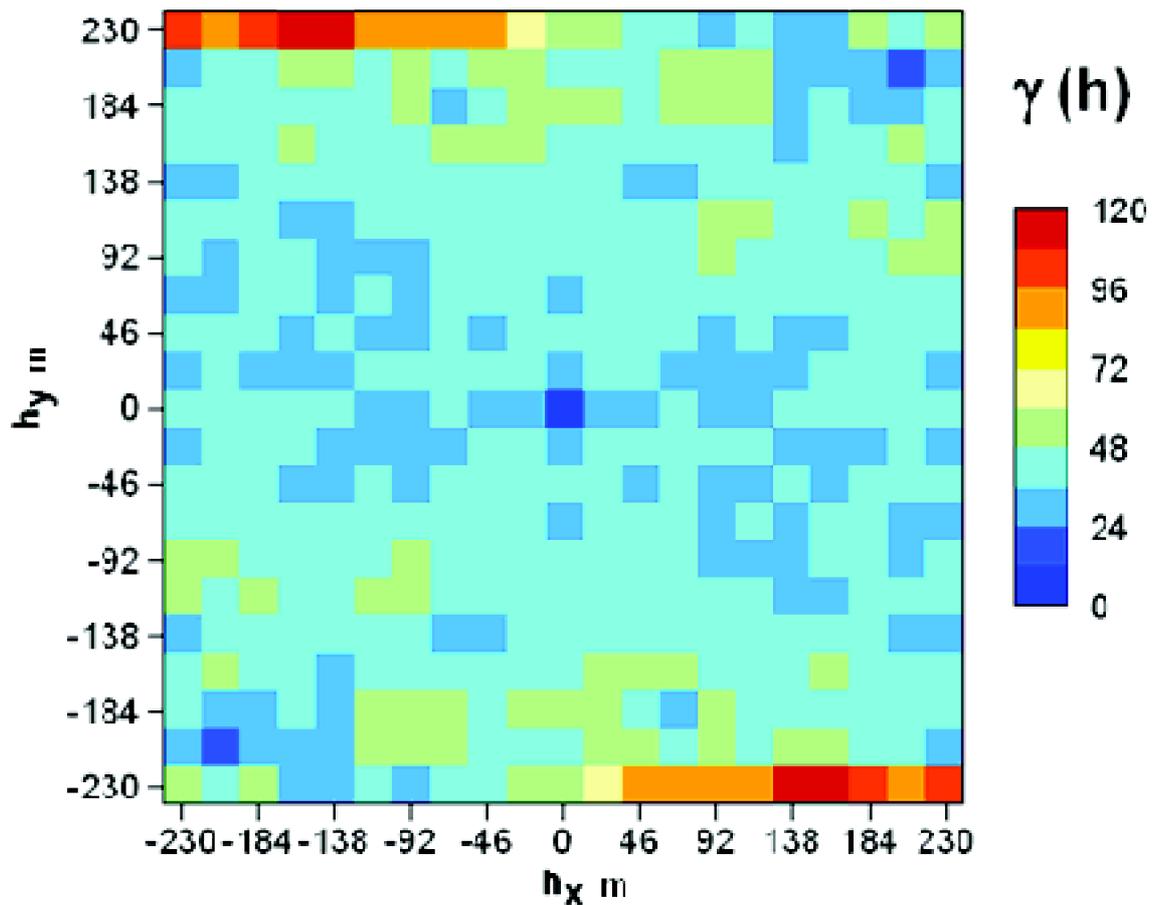


Figure 23 : Variogramme de surface de la CE_{C2}

L'ajustement des variogrammes expérimentaux selon ces deux directions à un modèle sphérique (figure 24) montre un effet de pépite assez élevé (11,9 dS/m) représentant presque la moitié de la variabilité globale (45 %). Le palier tend vers 26,7 dS/m et la portée est de 62,4 m selon la direction 115° et de 55,5m selon la direction 25° , le rapport d'anisotropie est de 0,89. Ce résultat signifie que la direction n'a qu'une faible influence sur la variabilité de la salinité de cette horizon.

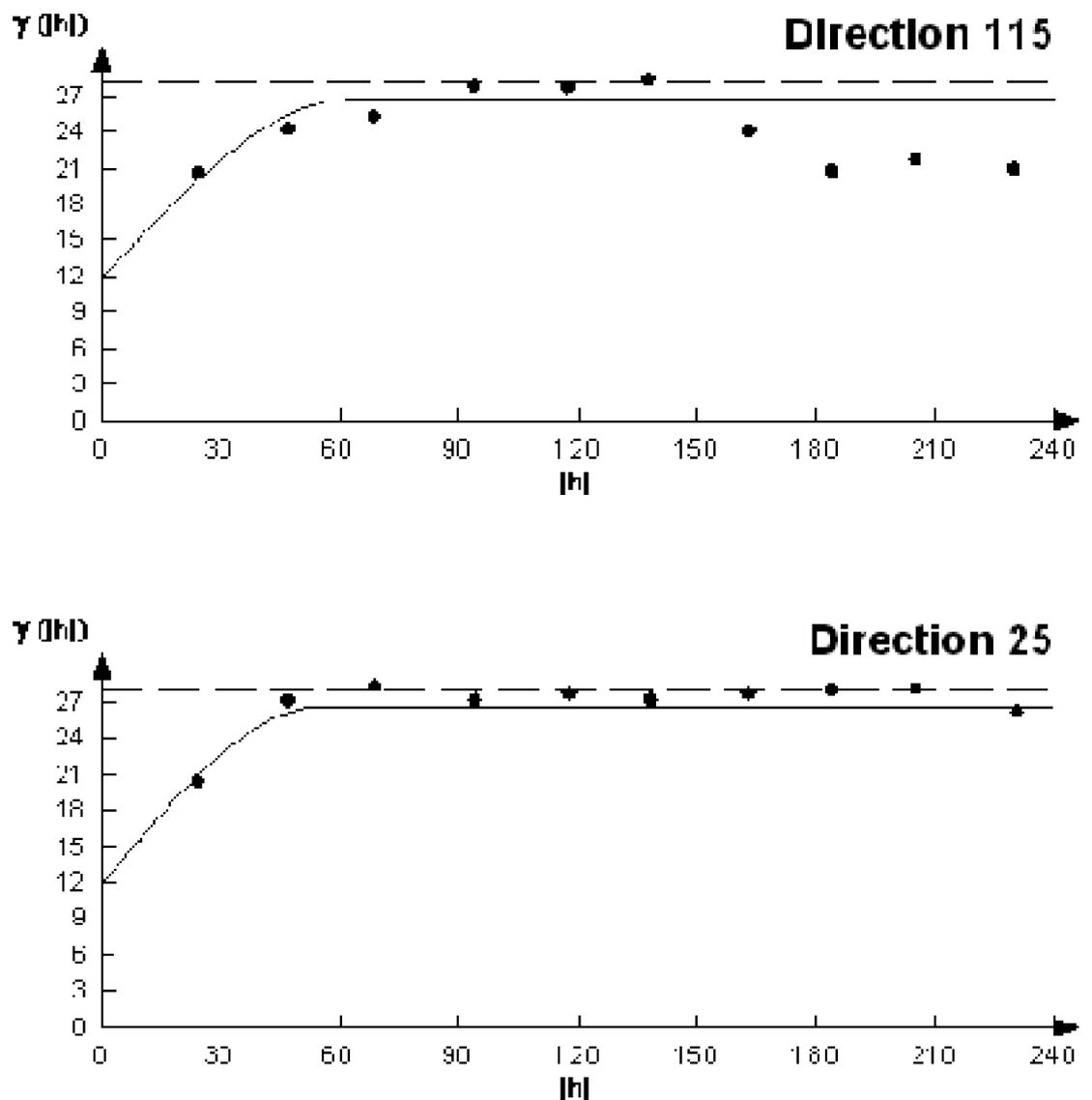


Figure 24 : Variogrammes ajustés de CE_{C2} selon les deux directions d'anisotropie

Le variogramme de surface de la CE_C du troisième horizon (figure 25) indique un comportement anisotrope maximal dans la direction NE-SO (25°) et minimal dans la direction NO-SE (115°) révélant ainsi une meilleur autocorrelation entre les points selon cette dernière direction. Ce résultat est pratiquement l'inverse de celui obtenu pour la salinité du deuxième horizon.

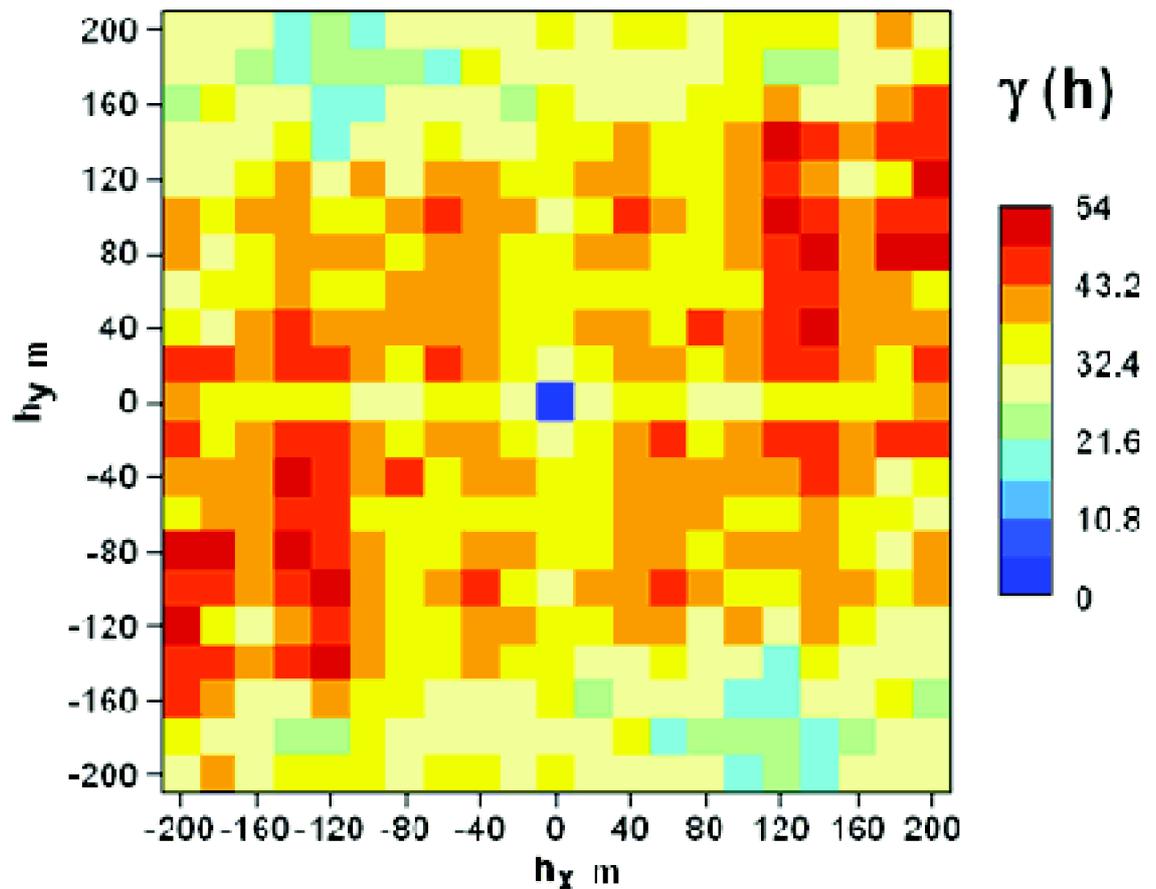


Figure 25 : Variogramme de surface de la CE_{C3}

Les variogrammes expérimentaux selon ces deux directions (figure 26) ont été ajustés à un modèle sphérique avec un effet de pépité de 19,4 dS/m correspondant à 52 % de la variabilité totale. Le palier est de 37,2 et la portée selon la direction minimale d'anisotropie est de 55,1 m et de 51,8 m selon la direction maximale.

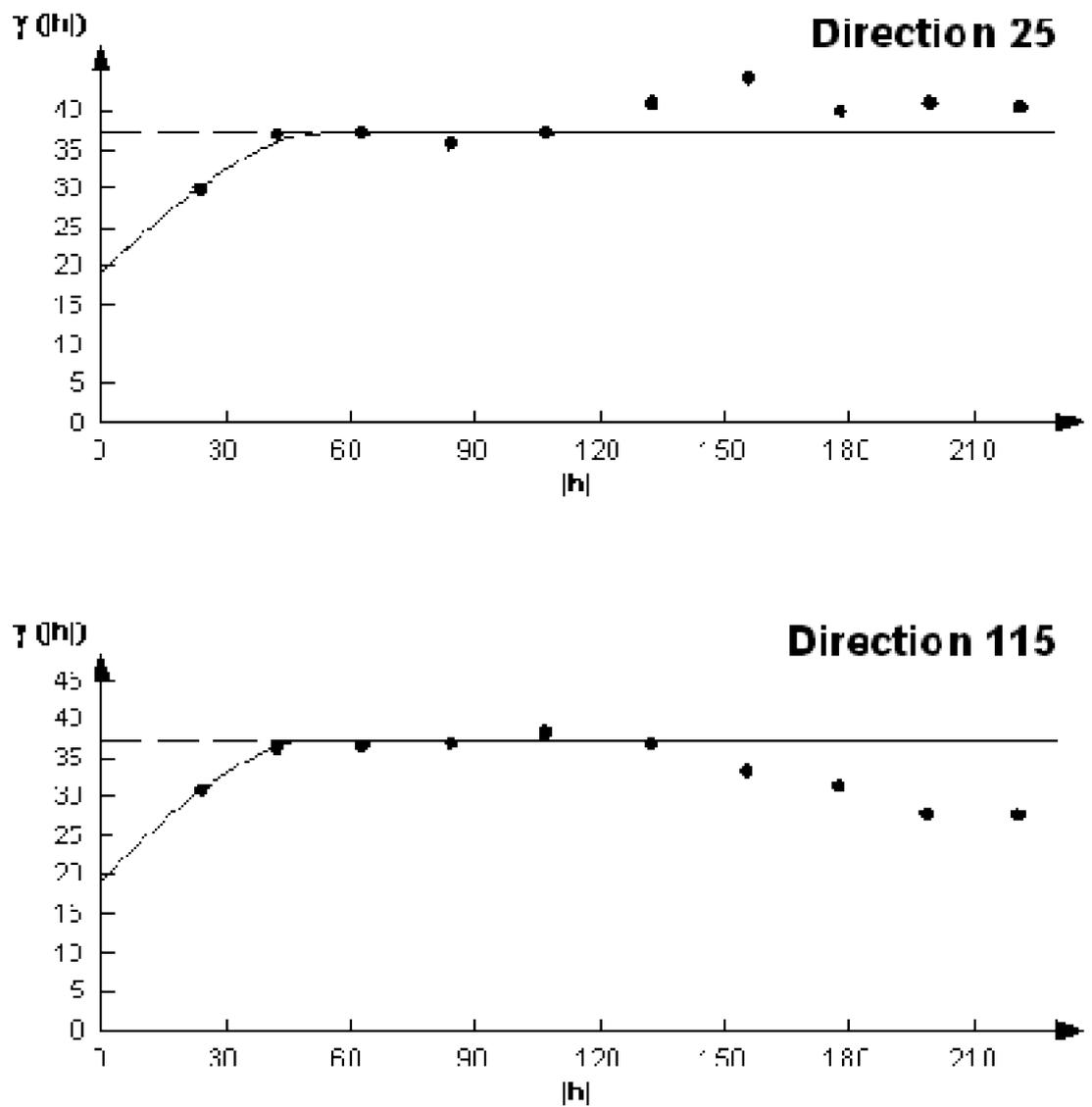


Figure 26 : Variogrammes ajustés de la CE_{C3} selon les deux directions d'anisotropie

Le variogramme surfacique de la CE_C pour cet horizon (figure 27) montre deux directions d'anisotropie, une anisotropie maximale selon la direction NE-SO (40°) et une anisotropie minimale selon la direction NO-SE (130°).

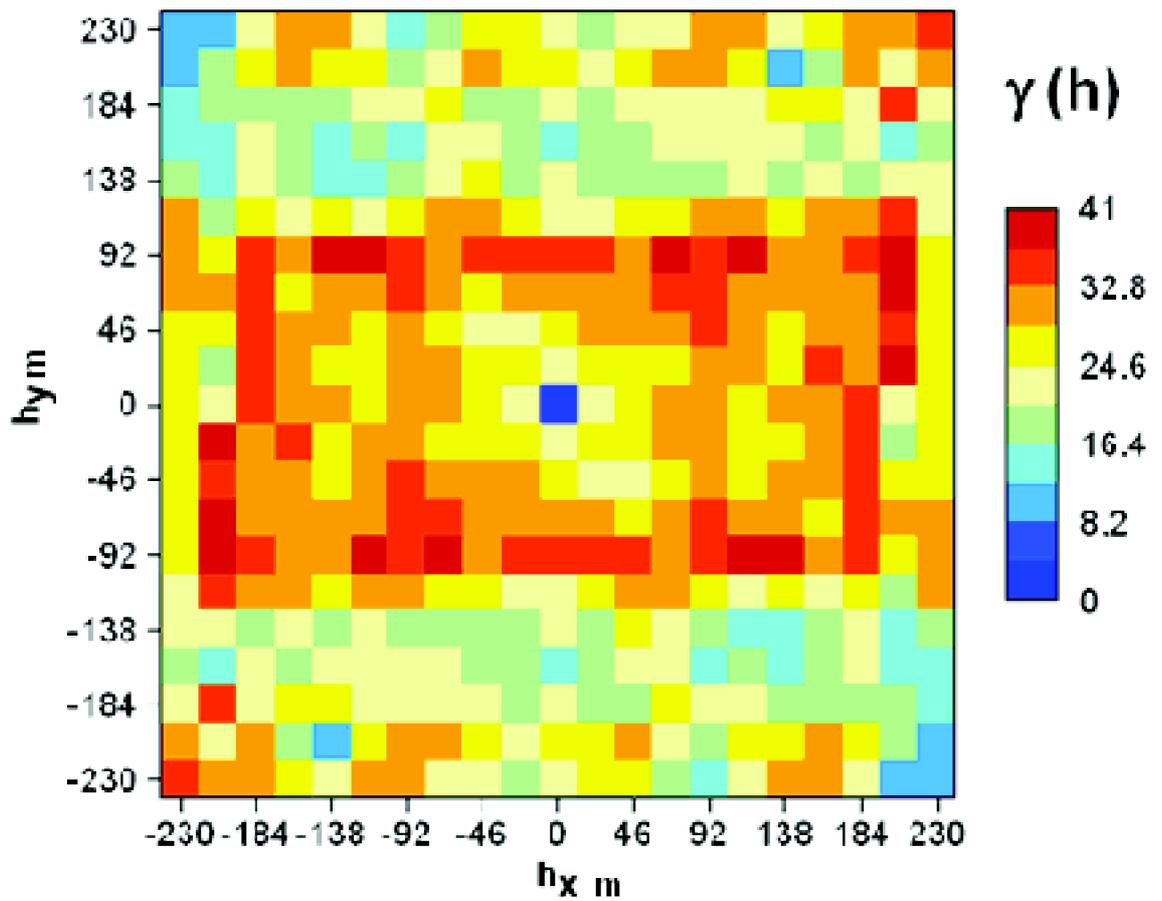


Figure 27 : Variogramme de surface de la CE_{C4}

L'ajustement des variogrammes expérimentaux selon ces deux directions à un modèle sphérique (figure 28) donne deux variogrammes communs avec un effet de pépité de 8,4 dS/m soit 31 % de la variabilité globale, un palier de 27,5 dS/m, une portée de 69 m selon la direction 40° et une portée de 63,5 m selon la direction 130°.

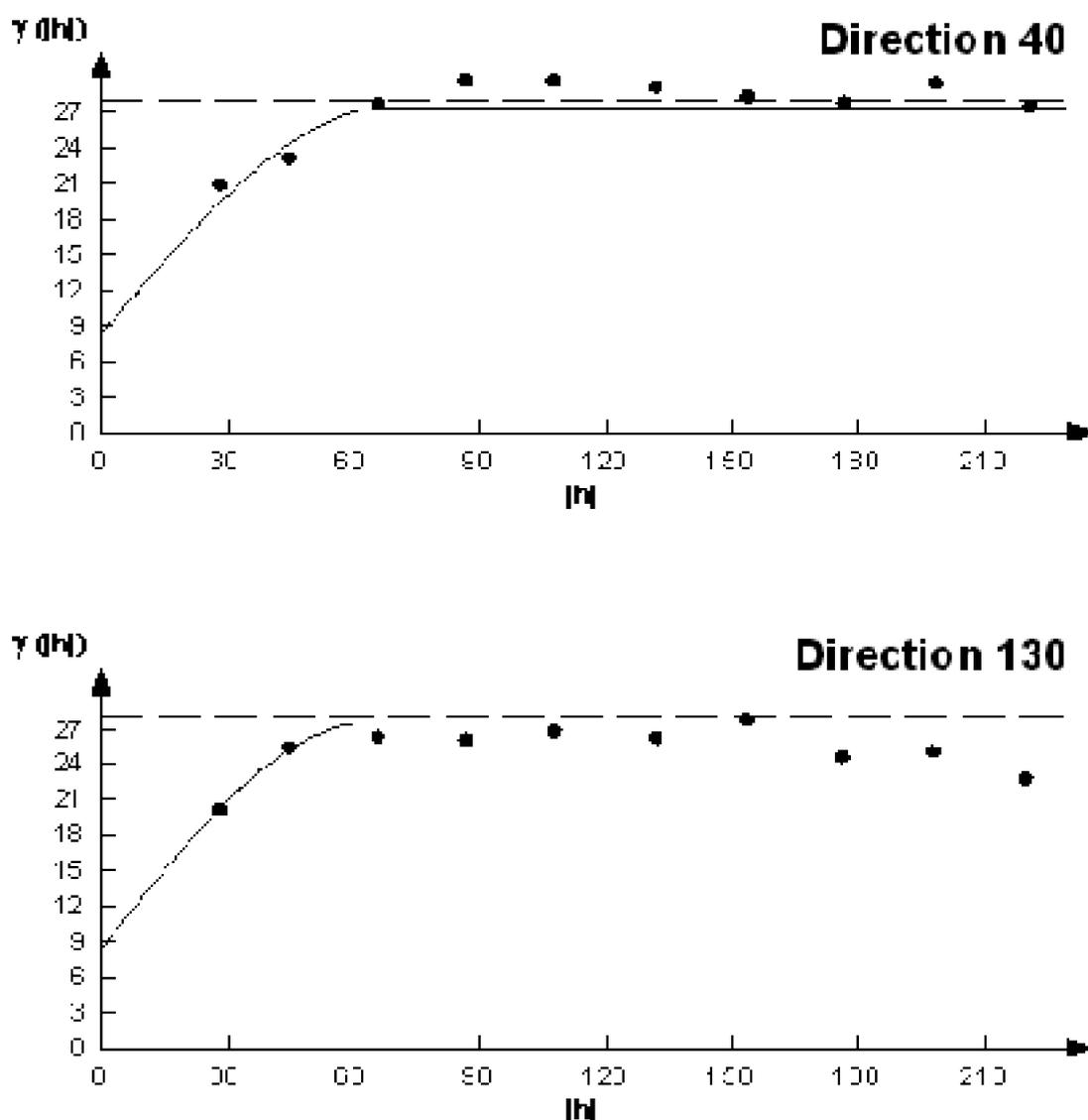


Figure 28 : Variogrammes ajustés de CE_{C4} selon les deux directions d'anisotropie

3.1.2. Le krigeage

Une fois la structure de la variable à étudier a été déterminée par le biais du variogramme, l'interpolation par krigeage peut avoir lieu. Le type de krigeage retenue est le krigeage ordinaire à voisinage glissant. Ce choix est justifié par l'existence d'une anisotropie d'une part et, d'autre part, par le fait que ce type de krigeage peut donner de meilleurs résultats pour les variogrammes stationnaires (Goovaert, 1997).

Une fois la grille d'estimation établie par le logiciel (SURFER 8), le traçage des courbes d'isovaleur peut être effectué par une interpolation linéaire entre les points estimés de la grille automatiquement. Le nombre de courbes d'isovaleur et les distances entre celles-ci ont été choisis de telle sorte à obtenir les différentes classes de salinité correspondant à la conductivité électrique de l'extrait saturé du sol retenues par USSS (1954) (Tableau VI).

Le calcul des superficies a été établi automatiquement par le logiciel SURFER avec lequel les cartes krigées ont été obtenues. Le tableau VII représente la répartition des superficies en fonction des classes de salinité.

La carte de la CE_C de l'horizon de surface (figure 29) présente une certaine hétérogénéité de salinité :

- Les sols non salins ($CE_C < 0,693$ dS/m soit $< \ln 2$ dS/m) occupent une bonne partie de la parcelle (1,77 ha soit 25,16 %) et se situent essentiellement au centre et au sud-ouest (Tableau VI).
- Les sols légèrement salins ($0,693$ dS/m $< CE_C < 1,366$ dS/m soit $\ln 2$ dS/m $< CE_C < \ln 4$ dS/m) occupent la partie la plus importante (3,35 ha soit 47,52 %) et se répartissent sur toute la parcelle.
- Les sols salins ($1,366$ dS/m $< CE_C < 2,079$ dS/m soit $\ln 4$ dS/m $< CE_C < \ln 8$ dS/m) sont assez bien représentés (1,87 ha soit 26,5 %) et s'étalent indifféremment sur toute la parcelle.
- Les sols très salins ($2,079$ dS/m $< CE_C < 2,773$ dS/m soit $\ln 8$ dS/m et $\ln 16$ dS/m) sont représentés par de petites plages situées sur la partie est de la parcelle (0,06 ha soit 0,82 %).
- Les sols extrêmement salins ($CE_C > 2,773$ dS/m soit $> \ln 16$ dS/m) sont inexistant.

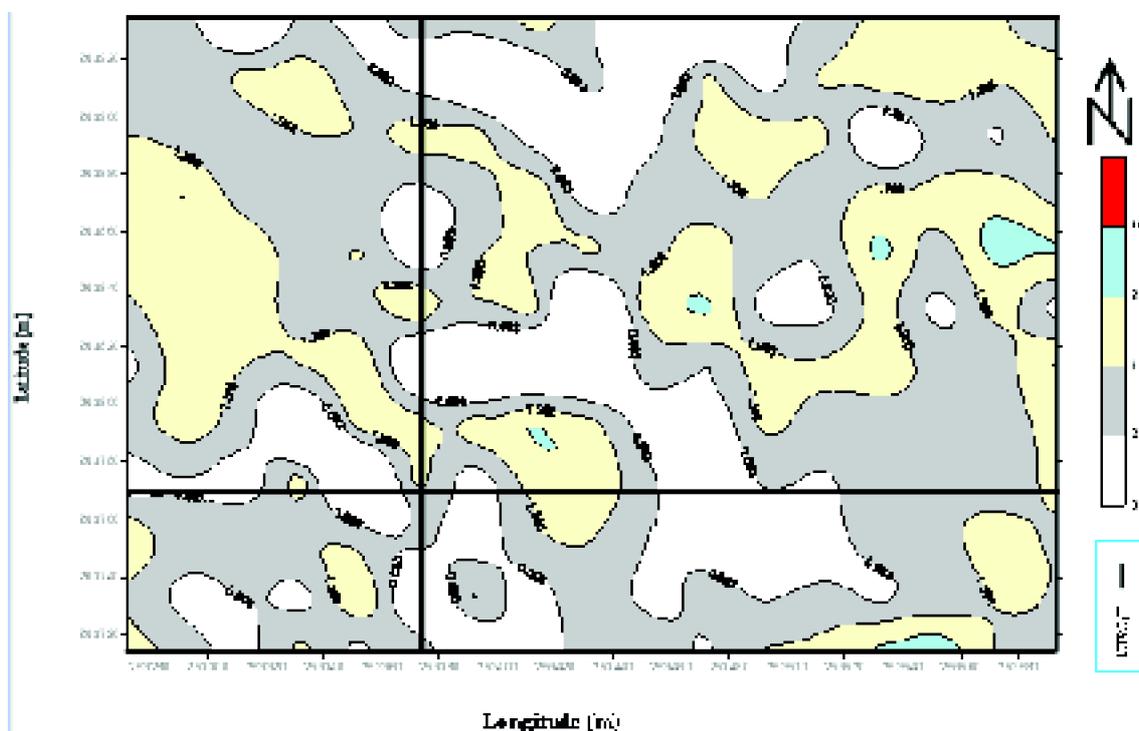


Figure 29 : Carte krigée de la CE_C de l'horizon de surface (Ech :1 / 2000)

La carte de la CE_C de l'horizon de sub-surface (figure 30) révèle un certain gradient de salinité orienté du nord-est vers le sud-ouest où :

- Les sols non salins ($CE_C < 2 \text{ dS/m}$) ne sont pas représentés.
- Les sols légèrement salins ($2 \text{ dS/m} < CE_C < 4 \text{ dS/m}$) sont très rares et ne sont représentés que par une petite plage située au nord-est de la parcelle (0,016 ha soit 0,23 %).
- Les sols salins ($4 \text{ dS/m} < CE_C < 8 \text{ dS/m}$) occupent également une infime partie de la parcelle et ne sont représentés que par de petites plages (0,13 ha soit 1,89 %).
- Les sols très salins ($8 \text{ dS/m} < CE_C < 16 \text{ dS/m}$) occupent une partie importante (2,55 ha soit 36,23 %) et se situent essentiellement au nord de la parcelle.
- Les sols extrêmement salins ($CE_C > 16 \text{ dS/m}$) sont très largement représentés (4,34 ha soit 61,65 %) et se situent surtout au sud de la parcelle.

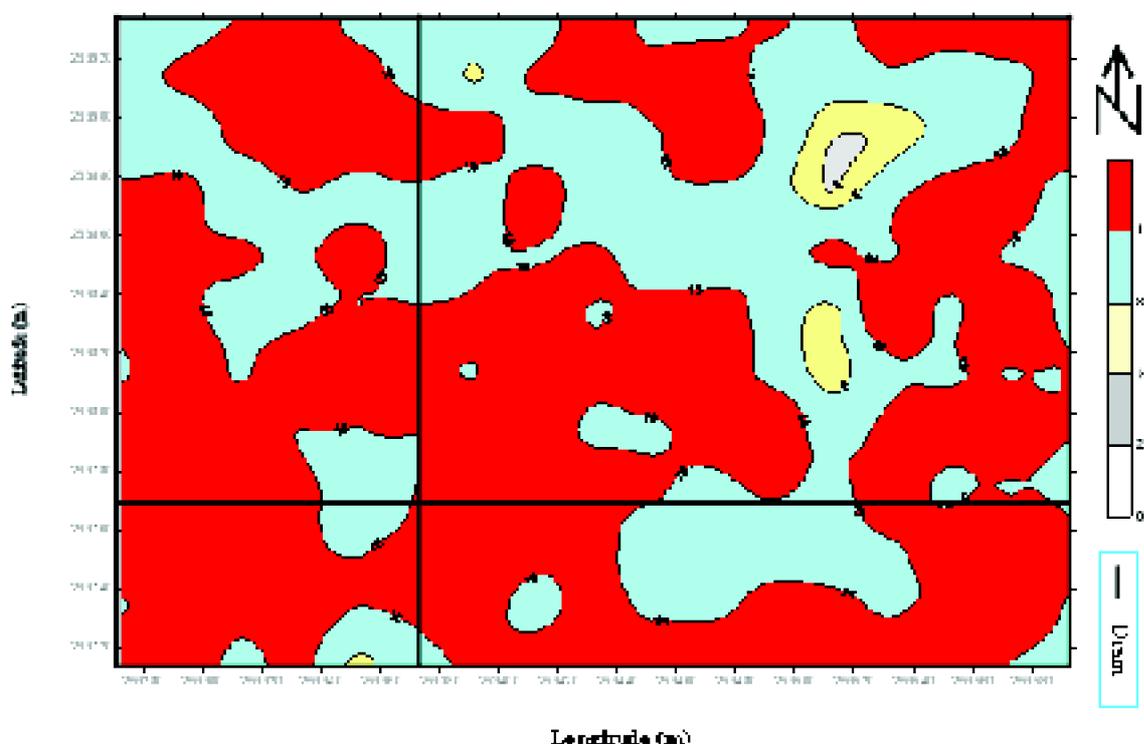


Figure 29 : Carte krigée de la CE_C de l'horizon de surface (Ech : 1 / 2000)

La carte de la CE_C du troisième horizon (figure 31) indique que les sols extrêmement salins ($CE_C > 16 \text{ dS/m}$) occupent la majeure partie de la parcelle d'étude (6,62 ha soit 93,97 %). Les sols très salins ($8 \text{ dS/m} < CE_C < 16 \text{ dS/m}$) sont peu abondants (0,41 ha soit 5,88 %) et se situent essentiellement à l'est de la parcelle alors que les sols salins et légèrement salins ont des surfaces négligeables et ne sont représentés que par deux petites plages.

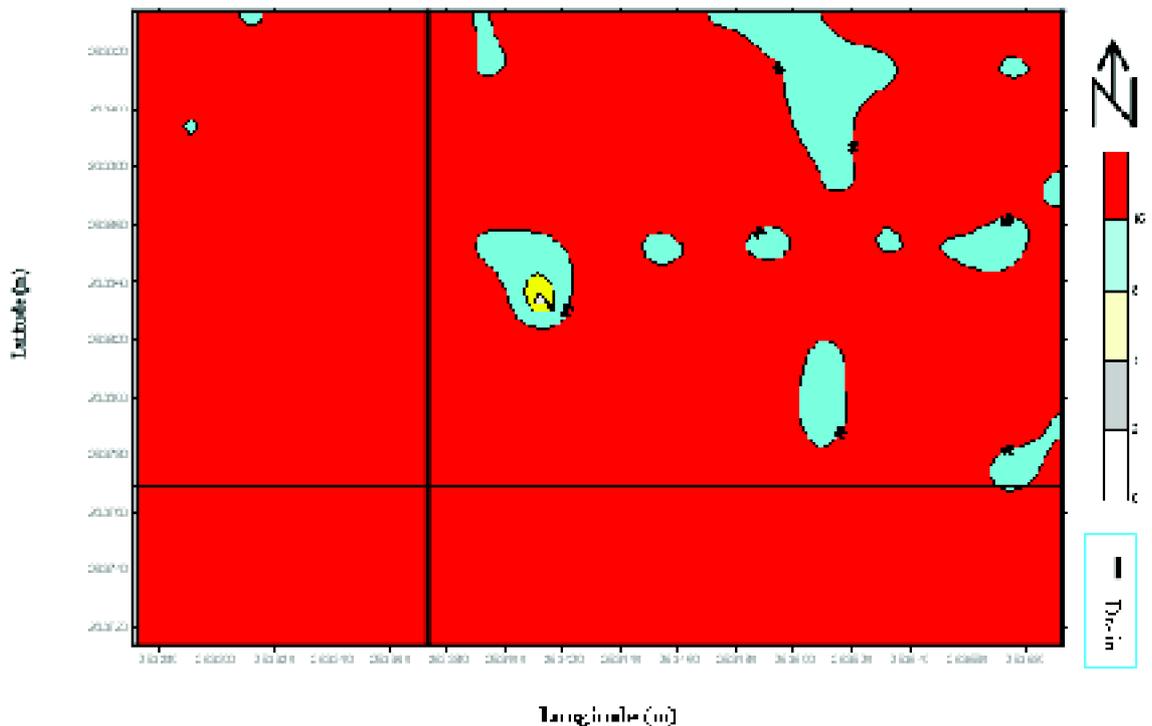


Figure 31 : Carte krigée de la CE_C du troisième horizon (Ech : 1 / 2000)

La carte de la CE_C de l'horizon de profondeur (figure 32) montre un certain gradient de salinité orienté du nord-est vers le sud-ouest où :

- Les sols non salins ($CE_C < 2$ dS/m) occupent une faible superficie (0,19 ha soit 2,74 %) et se situent à l'ouest de la parcelle.
- Les sols légèrement salins (2 dS/m $< CE_C < 4$ dS/m) occupent une bonne partie (1 ha soit 14,09 %) en se situant essentiellement au nord-ouest de la parcelle.
- Les sols salins (4 dS/m $< CE_C < 8$ dS/m) occupent la majeure partie de la parcelle (3,94 ha soit 55,9 %).
- Les sols très salins (8 dS/m $< CE_C < 16$ dS/m) occupent une grande partie moins importante que celle des sols salins (1,7 ha soit 24,09 %) et se situent à l'est de la parcelle.
- Les sols extrêmement salins ($CE_C > 16$ dS/m) ne sont représentés que par quelques petites plages (0,22 ha soit 3,18 %), la plus importante se localise au centre de la parcelle.

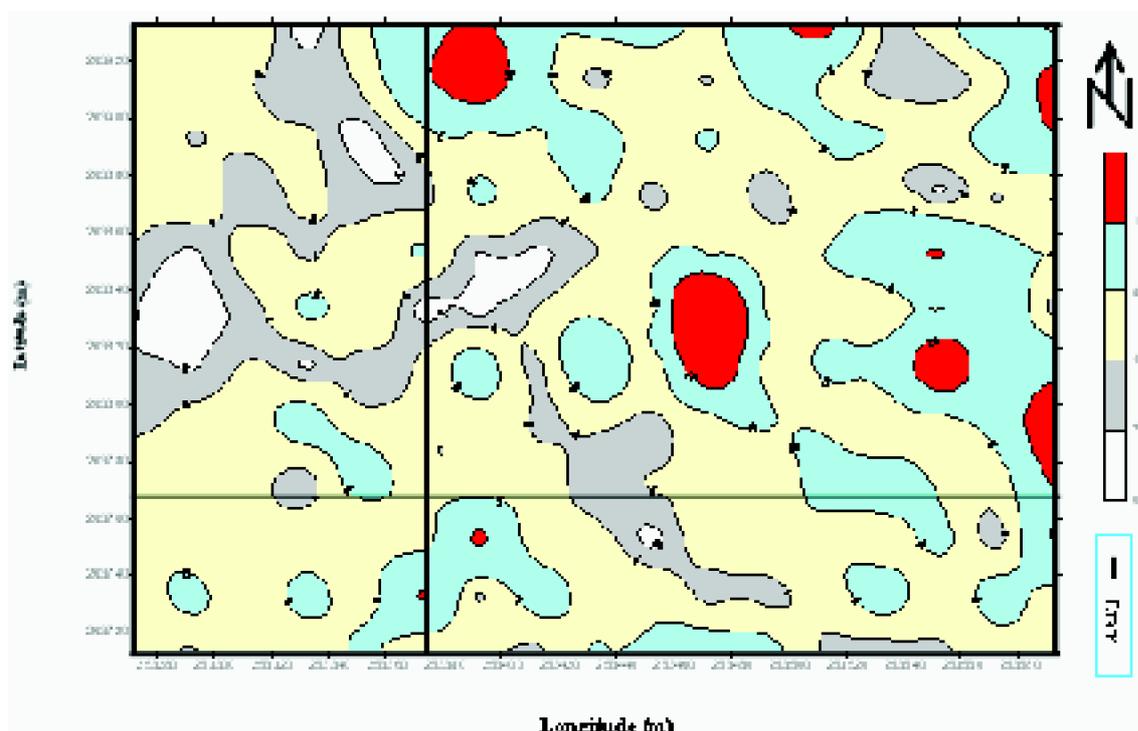


Figure 32 : Carte krigée de la CE_C du troisième horizon (Ech : 1 / 2000)

Tableau VII. Superficies des sols en fonction des différentes classes de salinité

Classes de salinité	C.E. dS/m	Superficies affectées (ha)			
		Horizon1 (0-25 cm)	Horizon2 (25-50 cm)	Horizon3 (50-75 cm)	Horizon4 (75-100 cm)
Non Salin	0-2	1,77	0	0,01	0,19
Légèrement salin	2-4	3,35	0,016	0,001	1,00
Salin	4-8	1,87	0,13	0	3,94
Très salin	8-16	0,06	2,55	0,41	1,7
Extrêmement	<16	0	4,34	6,62	0,22

La figure 33 représente la répartition des classes de salinité en fonction du totale de superficie (7,04 ha). Il apparaît donc que les classes des sols non salins, légèrement salins et salins avec une $CE_C < 8$ dS/m ne sont représentées que sur le premier et le quatrième horizon. La classe des sols très salins ($8 < CE_C < 16$ dS/m) est présente sur les trois derniers horizons. La classe des sols extrêmement salins ($CE_C > 16$ dS/m) se retrouve surtout dans les horizons médians.

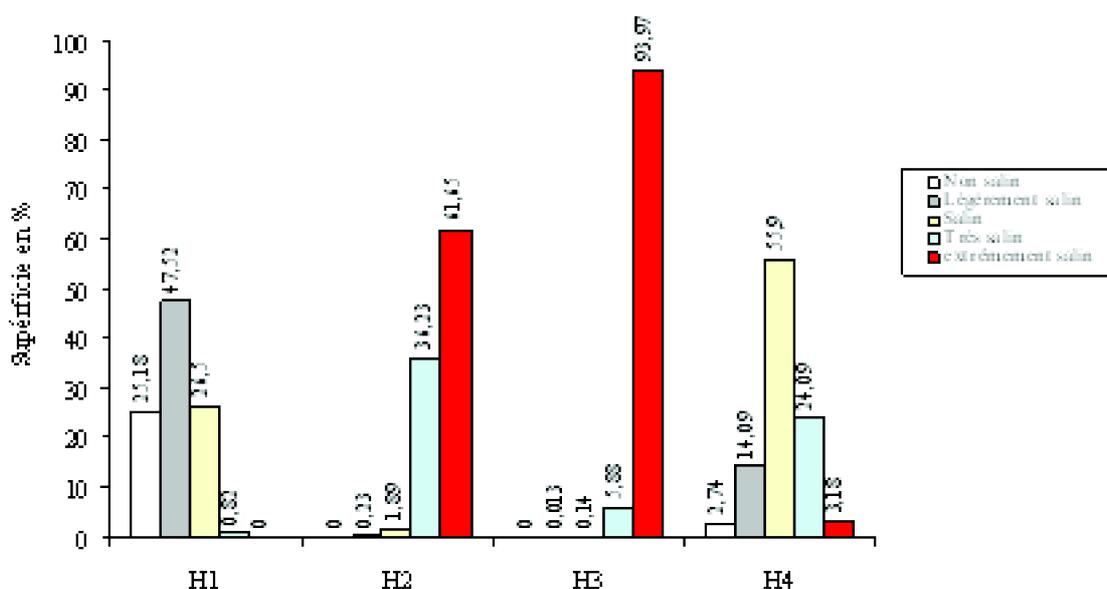


Figure 33 : La distribution des classes de salinité sur l'ensemble de la parcelle étudiée

3.2. Variabilité spatio-temporelle de la salinité

Elle consiste à comparer la carte de salinité réalisée en 1971 (Grontmij, 1971) dont les mesures ont été effectuées sur l'extrait de pâte saturée pour une profondeur de 0 à 100 cm avec celle obtenue en 2005 par induction électromagnétique.

La carte de salinité réalisée en 2005 est obtenue par krigeage en utilisant les mesures électromagnétiques pour une profondeur de 0 à 100cm. Le nombre de courbes d'isovaleur a été choisi de telle sorte à obtenir les différentes classes de salinité correspondantes aux valeurs électromagnétiques adaptées aux normes de l'USSL (Tableau III). Ces valeurs sont calculées en transformant les normes d'interprétation de l'USSL par le biais du deuxième étalonnage (régression simple).

3.2.1. Les variogrammes de la EM (0-100cm)

Le variogramme de surface de la EM (0-100cm) (figure 34) montre deux directions d'anisotropie, une anisotropie maximale selon la direction NO-SE (135°) et une anisotropie minimale selon la direction NE-SO (45°).

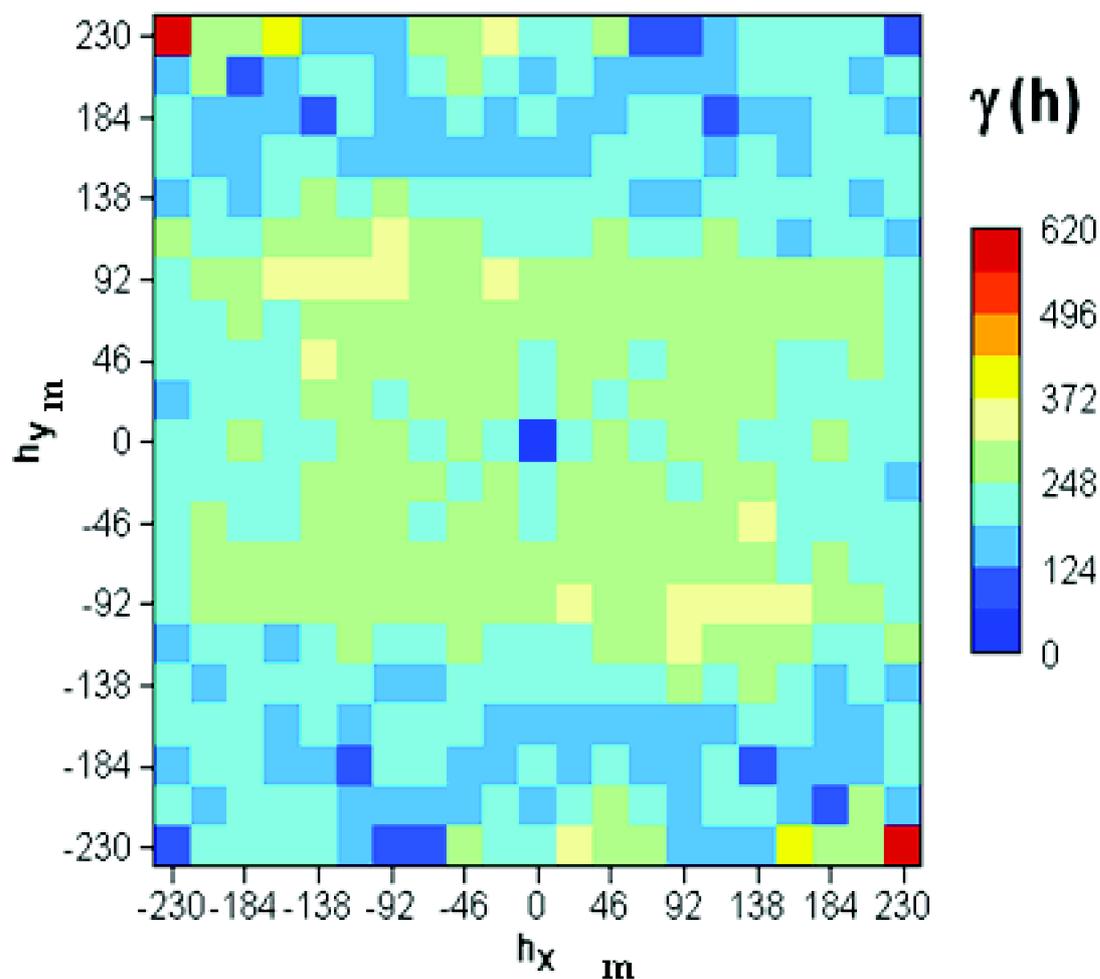


Figure 34 : Variogramme de surface de la EM4

Les variogrammes expérimentaux des mesures électromagnétiques selon ces deux directions (figure 35) s'ajustent assez bien au modèle théorique sphérique avec un effet de pépite de 90 dS/m soit 34,82 % de la variabilité totale et un palier de 264,47. La portée selon la direction maximale d'anisotropie est de 52,54 m et elle est de 46,76 m selon la direction minimale. Le rapport d'anisotropie est de 0,89 qui signifie que la direction n'a que peu d'effet sur la variabilité spatiale de la salinité des sols considérés entre 0 et 100 cm.

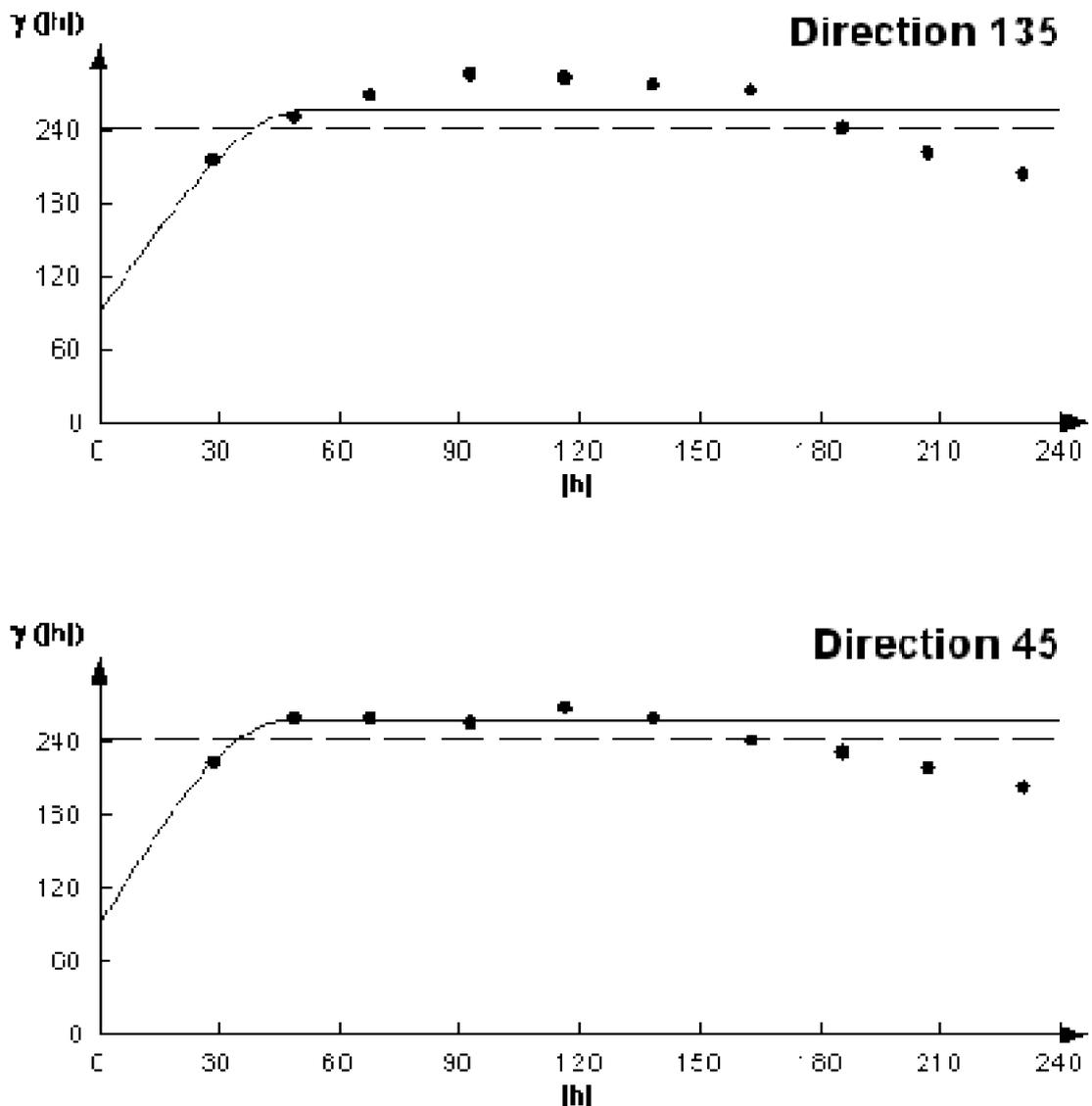


Figure 35 : Variogrammes ajustés de EM4 selon les deux directions d'anisotropie

3.2.2. Carte de salinité réalisée en 1971 (0-100cm)

Cette carte a été extraite de la carte de salinité réalisée par Grontomij (1971) et numérisée (limite de la parcelle d'étude et courbes d'isovaleur) par le logiciel MapInfo (figure 36). Cette carte révèle l'existence de deux classes de salinité, une classe des sols non salins à légèrement salins ($CE < 4$ dS/m) qui se situent à l'est de la parcelle sur une superficie de 5,01 ha correspondant à 72,25 % de la surface totale de la parcelle et une classe des sols salins ($4 < CE < 8$ dS/m) à l'ouest avec une superficie de 1,99 ha, soit 27,75% du total.

3.2.4. La carte de la salinité établie en 2005

L'analyse de la figure 37 révèle que les sols très salins ($8 < CE < 16$ dS/m) correspondant

à une EM comprise entre (69 et 119 dS/m) occupent la majeure partie de la parcelle (97 % de la superficie totale). Les sols salins (EM compris entre 44 et 69 dS/m) et extrêmement salins (EM > 119 ds/m) sont négligeables et représentent moins de 3 % de la superficie totale.

La comparaison entre les figures 36 et 37 révèle que l'évolution spatio-temporelle de la salinité est clairement établit et que la salinisation de la plaine de la Macta est très intense. En effet, les sols non salin ou légèrement salins ont cédé leur place au profit de sols très salins à extrêmement salins.

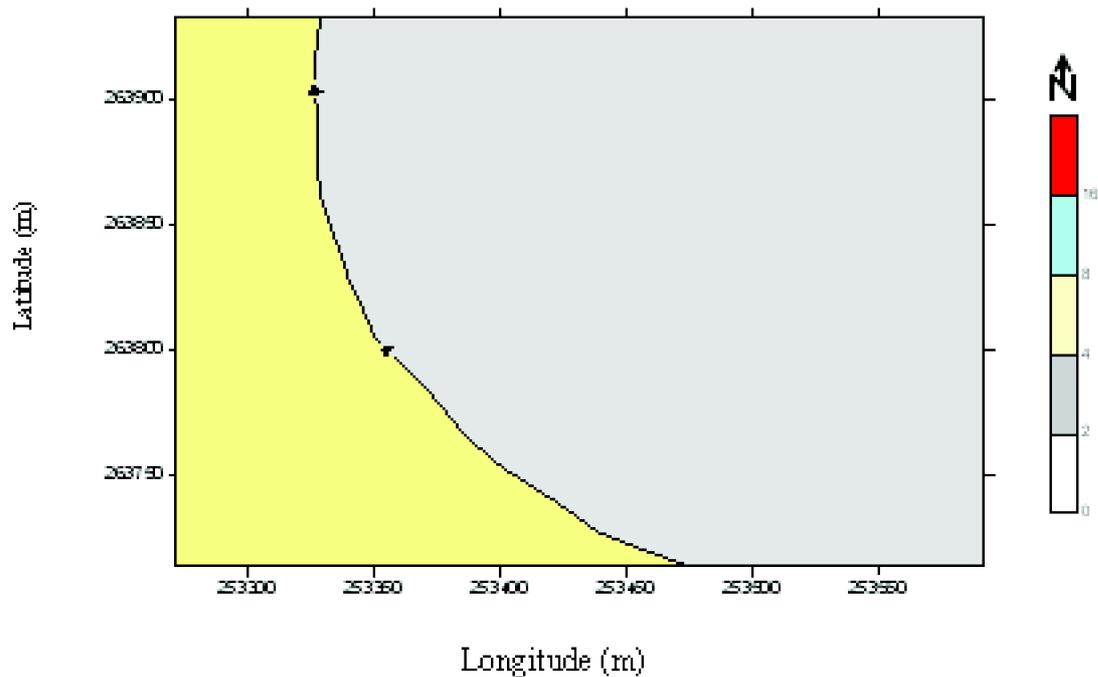


Figure 36 : Carte de salinité 1971 (Ech : 1 / 3000) (Grontmij, 1971)

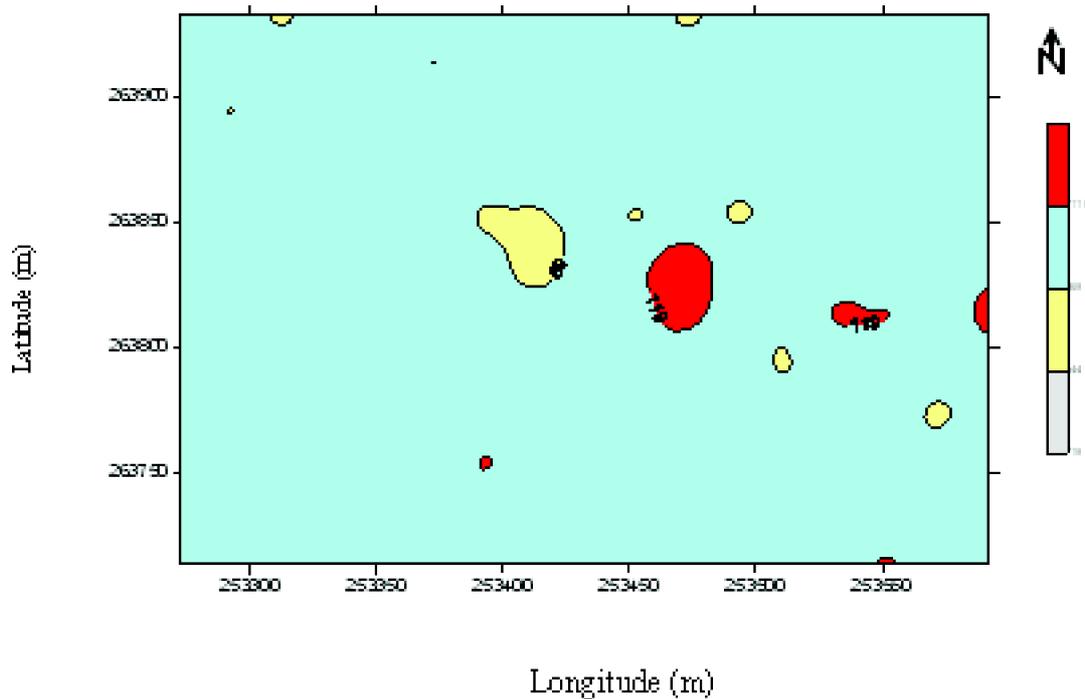


Figure 37 : Carte krigée de salinité 2005 (Ech : 1 / 3000)

4. Synthèse et discussion

Cette expérimentation menée dans une parcelle de la plaine de la Macta a porté sur l'évaluation de la salinité des sols mesurée par conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée et par induction électromagnétique. Ces dernières mesures ont été utilisées par la suite pour la cartographie de la salinité de la parcelle d'étude.

4.1. La conductivité électrique

Les mesures de la conductivité électrique ont porté sur quatre tranches de sol (ou horizons) de 17 profils salins répartis selon deux transects croisés délimités par des drains tertiaires. Ces mesures avaient un triple objectif :

- Evaluer le niveau de salinité des profils salins,
- Montrer la variabilité spatiale de la salinité dans le profil et selon les deux transects et d'en déduire l'efficacité du réseau de drainage,
- Caler les mesures de l'induction électromagnétique effectuées par le EM38 sur celles réalisées sur l'extrait de pâte saturée et mesurée par le conductivimètre électrique. Les mesures effectuées par le EM38 permettront par la suite d'étudier la variabilité spatiale de la salinité à l'échelle de la parcelle.

Les résultats obtenus ont montré que la salinité moyenne de l'horizon de surface est

de 4,85 dS/m, celle de l'horizon de sub-surface est de 10,78 dS/m, celle du troisième est de 13,80 dS/m et que celle du quatrième est de 11,56 dS/m. Ces valeurs moyennes de la salinité correspondent à des niveaux de salinité qui qualifient le sol de salin à très salin selon les normes de l'USSL (1954). Le profil salin moyen est donc de type convexe qui, selon Servant (1975), serait sous la dépendance des pluies d'hiver. Cependant, ce profil moyen ne devrait pas masquer la forte variabilité de la salinité dans l'espace, en particulier pour les horizons de surfaces et de profondeur (CV % > 50 %). De même, les résultats ont montré que la salinité varie modérément dans les horizons médians (CV comprise entre 26 et 45 %).

La distribution de la salinité des différents horizons en fonction de la distance par rapport aux drains varie selon les horizons et l'orientation considérées. En effet, la salinité augmente pour les quatre horizons lorsqu'on se dirige du centre de la parcelle vers les drains. Néanmoins, la salinité des horizons de surface et sub-surface diminue au voisinage du drain est. Cette distribution de la salinité le long des transects suggère l'existence d'un mouvement des sels solubles du centre de la parcelle vers les drains sans qu'il y ait une évacuation de ces sels hors des sols étudiés. Ce résultat signifie une déficience du réseau de drainage à l'échelle de la parcelle.

4.2. L'induction électromagnétique

On sait que l'induction électromagnétique est influencée par de nombreux paramètres et propriétés des sols tels que la salinité, la texture et l'humidité du sol (Job et al, 1987 ; Boivin et al, 1988 ; Hendrich et Kachanosky et al, 2002 ; Michot, 2003 ; Corwin et Lesh, 2003). Ainsi, dans cette étude, nous avons tenu compte des taux d'humidité des différents horizons de la parcelle selon le même plan d'échantillonnage pour l'étude de la salinité de l'extrait de pâte saturée. Les résultats obtenus ont montré que les taux moyens d'humidité se situent entre 24 % pour l'horizon de surface et 11 % pour l'horizon de profondeur en passant par des taux de 22 % pour l'horizon de sub-surface et 17 % pour le troisième horizon. Il s'avère donc que le profil hydrique moyen est ascendant. Ce résultat peut être expliqué par la période d'échantillonnage qui a été effectué lors de la saison pluvieuse. Les résultats ont montré aussi que l'humidité des horizons de surface et de sub-surface se caractérise par une faible variabilité spatiale (CV % < 20 %) ce qui n'est pas tout à fait le cas pour les horizons profonds (CV compris entre 35 et 46 %). De ce fait, on peut supposer que la variabilité de la conductivité électromagnétique est peu ou pas influencée par celle des taux d'humidité des horizons de surface et de sub-surface. La variabilité de la conductivité électromagnétique des horizons de profondeur reste, quant à elle, légèrement sous la dépendance de celle des taux d'humidité des mêmes horizons.

La comparaison entre les mesures électromagnétiques verticales et horizontales permet de donner une idée initiale sur le profil salin du sol (Corwin et Rhoades, 1984 ; Job et al, 1987 ; Lesh et al, 1992 ; Johnson et al, 2001). Cette comparaison a montré que les valeurs des mesures électromagnétiques verticales sont toutes supérieures à celles des mesures électromagnétiques horizontales. Ce résultat suggère donc que la salinité augmente en profondeur et par conséquent que le profil salin est descendant.

L'étalonnage des mesures électromagnétiques (EM) par rapport aux conductivités électriques (CE) de l'extrait de pâte saturée a été réalisé moyennant les régressions multiples pour déterminer les relations entre EM et CE au niveau des quatre couches de sol et en utilisant la régression linéaire simple pour déterminer la relation entre EM et CE pour la couche de sol comprise entre 0 et 100 cm de profondeur.

Les résultats obtenus ont montré que les coefficients de détermination R^2 pour les quatre équations $EM = f(CE_{1-4})$ correspondant aux quatre couches de sol se situent entre 0,66 et 0,73 alors que ceux des équations $CE = f(EM_{1-4})$ se situent entre 0,35 et 0,46. Des travaux similaires (Corwin et Rhoades, 1981 ; Triantafyllis et al, 2000) ayant utilisé ce type d'étalonnage ont trouvé une meilleure corrélation entre les EM et les CE avec des coefficients de corrélation tous supérieurs à 0,95 quelle que soit la série considérée. Cette différence entre nos résultats et ceux des travaux précités serait due à l'hétérogénéité des taux d'humidité dans le profil et dans l'espace de la parcelle étudiée.

En revanche, l'étalonnage par la régression simple a abouti à une corrélation hautement significative ($r = 0,81$) entre EM et CE semblable à celle obtenue par Job et al (1987) ($r = 0,83$) et légèrement inférieure à celles obtenues par Cameron et al (1981) et Canon et al (1994) qui ont trouvé des coefficients de corrélations r supérieurs à 0,9.

Partant de là, nous avons calculé la conductivité électrique (CE_C) à partir de celles des 197 mesures électromagnétiques (EM). Les résultats ont montré que les moyennes arithmétiques de la conductivité électrique calculée (CE_C) sont égales à 3,64 dS/m pour l'horizon de surface, 17,3 dS/m pour l'horizon de sub-surface, 24,04 dS/m pour le troisième horizon et à 7,19 dS/m pour l'horizon de profondeur. Le profil salin moyen est donc de type convexe. Ces niveaux de salinité correspondent à un état salin pour les horizons de surface et de profondeur et extrêmement salin pour les horizons médians (USSS, 1954). Les résultats ont montré aussi que la variabilité spatiale de la CE_C est très forte en surface et en profondeur et relativement modérée dans les horizons médians. Ce résultat concorde assez bien avec celui obtenu habituellement par les mesures électriques (Vauclin, 1982), en particulier, dans notre cas, pour les horizons de surface et de profondeur.

4.3. La cartographie de la salinité

La cartographie de la salinité de la parcelle étudiée a porté sur les conductivités électriques calculées (CE_C) pour les quatre horizons de sols et sur la conductivité électromagnétique (EM_4) qui correspond à la couche de sol comprise entre 0 et 100 cm de profondeur. La première étape a consisté à étudier la structure spatiale (ou variographie) des valeurs de la salinité. La deuxième étape qui consiste au traçage des cartes d'isovaleur par krigeage ordinaire n'a pu être effectuée qu'une fois la variographie réalisée.

4.3.1. La cartographie de la salinité des différents horizons

La variographie des conductivités électriques des différents horizons (CE_{C1} , CE_{C2} , CE_{C3} et CE_{C4}) a abouti à des variogrammes de structure exponentielle pour la CE_{C1} et

sphériques pour le reste. Cette structure sphérique est similaire à celle obtenue par Job et al (1987). Il est à noter que tous les variogrammes se caractérisent par des effets de pépite élevés supérieurs à 30 % par rapport à la variabilité globale ce qui suggère une importante variabilité locale de la salinité. Selon certains auteurs (Boivin et Touma, 1988 ; Gascuel-Oudou, 1996), ces effets de pépite seraient dus aux erreurs de mesure et/ou à une microrégionalisation de la salinité à cause d'un pas d'échantillonnage trop grand. Dans notre cas, tous les variogrammes présentent des portées supérieures à 50 m, distances nettement supérieures au pas d'échantillonnage qui était de 20 m. Quant aux paliers, ils se distinguent d'un variogramme à l'autre et suggère une forte variabilité pour la CE_{C1} (Supérieur à 70 %) et faible à modérée pour les autres (compris entre 25 et 40 %).

L'analyse des cartes krigées des CE_C révèle une forte variabilité de la salinité des horizons de surface et de profondeur qui se situe entre non salins et extrêmement salins. Par contre, les cartes krigées des horizons médians présentent un aspect plus homogène avec une salinité dominante qui se situe entre très salin à extrêmement salin. Ce résultat confirme les valeurs du coefficient de variation élevées de la conductivité électrique calculée de l'horizon de surface et de profondeur.

L'analyse des classes de salinités des cartes krigées a montré que les horizons de surface sont dans leur majorité (47,52 % de la superficie) légèrement salins ($2 \text{ dS/m} < CE_C < 4 \text{ dS/m}$), les horizons médians extrêmement salins ($CE_C > 16 \text{ dS/m}$) (61,65% de la superficie de la parcelle pour l'horizon de sub-surface et 93,97% pour le troisième horizon) et que les horizons de profondeur sont essentiellement salins ($4 \text{ dS/m} < CE_C < 8 \text{ dS/m}$) (55,9 % de la

superficie de la parcelle). Il s'avère donc que les sels s'accumulent préférentiellement dans les horizons médians malgré que les mesures ont été effectuées durant la période humide. Ce résultat signifie que les pluies d'hiver seraient tout justes en mesure de mobiliser les sels solubles dans la partie superficielle du sol mais elles restent insuffisantes pour pouvoir les évacuer hors du profil, le profil hydrique ascendant le confirme.

4.3.2. La cartographie de la couche de sols 0 – 100 cm

Le variogramme du EM4 montre un comportement comparable à celui des variogrammes de la CE_{C2} , CE_{C3} et CE_{C4} et ce du fait qu'il s'ajuste au modèle théorique sphérique. En effet, l'effet de pépite est supérieur à 30 % de la variance totale et la portée est supérieur à 50 m. En revanche, il se différencie de ceux de la CE_C par la présence d'un palier très élevée supérieur. L'analyse de la carte krigée de l'EM4 présente un aspect homogène avec une prédominance très remarquable des sols très salins ($8 \text{ dS/m} < CE_C < 8 \text{ dS/m}$ correspondant à $69 \text{ dS/m} < EM4 < 119 \text{ dS/m}$) occupent la majeure partie de la parcelle (97 % de la superficie totale).

L'évolution temporelle a été déterminée en comparant la carte de salinité réalisée en 1971 (Grontmij, 1971) à celle obtenue actuellement (2005) par krigeage. La comparaison entre ces deux cartes révèle une augmentation de la salinité sur toute la parcelle avec la disparition de la classe de salinité non salin à légèrement salin $CE_C < 4 \text{ dS/m}$ au profit de la

classe des sols très salins $CE > 16$ dS/m qui affectent 97 % de la superficie de la parcelle. Les 3 % de la superficie restante se partagent entre les sols salins et extrêmement salins. Ce résultat indique que l'évolution spatio-temporelle de la salinité est clairement établit et que la salinisation de la plaine de la Macta est très intense. Ces sols, jadis irrigués par les eaux du barrage et des forages maintenaient des niveaux de salinité assez faibles (non salés à salés) grâce aux doses lessivantes et à l'efficience du réseau de drainage. L'enrichissement en sels solubles de la plaine de la Macta durant ces 30 dernières années serait le fait d'un déficit hydrique climatique dû à une faible pluviométrie annuelle (286 mm), à une évapotranspiration annuelle très élevée (1364 mm) et à un déficit en eau d'irrigation à partir du barrage de Fergoug qui est fortement envasé. De ce fait, les sels dissous par les eaux de pluie ne sont mobilisés que sur de faibles distances et redistribués dans le sols dès que la remonté capillaire le permet. De plus, l'irrigation non contrôlée avec des eaux chargées dont la conductivité électrique moyenne est assez élevée (1,77 dS/m) (Louadj, 2005) avec le plus souvent des drains non fonctionnels et une texture fine des sols qui ne permet pas un bon drainage naturel seraient également responsables de la salinisation de ces sols

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'expérimenter la méthode électromagnétique pour la mesure de la salinité du sol. Ces mesures constituent un moyen d'aide à la cartographie et à la reconnaissance de la variabilité spatiale et temporelle de la salinité du sol. Ce travail est réalisé au niveau d'une parcelle de 7,04 ha située dans la plaine de la Macta. Les mesures électromagnétiques (197 mesures x 4 horizons) ont été effectuées de façon systématique au noeud d'une grille d'un pas de 20 m. Pour l'étalonnage de l'appareil, des mesures de la salinité de l'extrait de pâte saturée et des mesures électromagnétiques (17 mesures x 4 horizons) sont réalisées suivant deux transects perpendiculaires sur des points espacés de 20m.

Les principaux résultats obtenus indiquent que les valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée sont comprises entre 1,08 et 27,74 dS/m. Ce résultat révèle que la salinité est très variable dans l'espace et dans le profil. Le profil salin moyen au niveau de la parcelle est de type convexe.

La distribution de la salinité des différents horizons en fonction de la distance par rapport aux drains varie selon les horizons et selon l'orientation. Le fonctionnement salin permettrait une migration des sels solubles du centre de la parcelle vers les drains sans qu'il y ait une évacuation de ces sels hors de la parcelle. Ce résultat montre que le réseau de drainage est déficient à l'échelle de la parcelle. Ce phénomène trouverait son explication dans la faiblesse des précipitations et dans l'absence de l'irrigation. .

L'étalonnage de l'appareil par rapport à la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée a été effectué par deux méthodes. Le premier étalonnage a été effectué par les

équations de la régression multiple entre les mesures obtenues par l'EM38 pour les différentes gammes de profondeur (0-25 cm, 0 -50 cm, 50 – 75 cm, 0 – 100 cm) et les conductivités électriques de l'extrait de pâte saturée de chaque horizon de sol (0 à 25 cm, 25 à 50 cm, 50 à 75 cm et de 75 à 100 cm). Les corrélations obtenues ont abouti à des coefficients de régression significatifs ($R^2 > 0,66$) qui a permis d'obtenir des conductivités électriques calculées pour chacun des quatre horizons.

Le deuxième étalonnage a utilisé les équations de la régression simple entre les mesures électromagnétiques effectuées entre 0 et 100 cm de profondeur et les valeurs des conductivités électriques des extraits des pâtes saturées pour la même profondeur du sol. Le résultat obtenu a servi par la suite à élaborer la carte de salinité du sol pour la profondeur comprise entre 0 et 100 cm et de la comparer à la carte de salinité réalisée en 1971 par Grontmij.

Les valeurs de conductivités électriques calculées par le biais du premier étalonnage sont comprises entre 0,14 et 37,33 dS/m. Le profil salin moyen est de type convexe.

L'analyse variographique a permis de mettre en évidence une certaine structure spatiale pour l'ensemble des variables étudiées (CE_{C1} , CE_{C2} , CE_{C3} , CE_{C4} et EM4). Les variogrammes se caractérisent par des effets de pépites importants tous supérieurs à 30 % de la variance total et des portées toutes supérieures à 50 m et donc au pas d'échantillonnage.

Les résultats ont montré que les horizons de surface sont dans leur majorité (47,52 % de la superficie) légèrement salins ($2 \text{ dS/m} < CE_C < 4 \text{ dS/m}$), les horizons médians extrêmement salins ($CE_C > 16 \text{ dS/m}$) (61,65% de la superficie de la parcelle pour l'horizon de sub-surface et 93,97% pour le troisième horizon) et que les horizons de profondeur sont essentiellement salins ($4 \text{ dS/m} < CE_C < 8 \text{ dS/m}$) (55,9 % de la superficie de la parcelle).

Les résultats ont montré aussi l'existence d'une importante salinisation durant ces 30 dernières années à cause probablement d'une irrigation non contrôlée quand elle existe (les eaux sont généralement chargées), de l'aridité du climat, de la texture fine et du mauvais drainage.

Enfin, ce travail a montré l'intérêt de la méthode électromagnétique pour la caractérisation des sols salés. Une grande facilité de mise en œuvre sans destruction du sol et qui permet de délimiter de manière très rapide des unités de sols salés et d'en faire un suivi de l'évolution de la salinité dans le temps. Ces avantages peuvent être exploités à condition de faire des mesures à humidité comparable, par exemple après une irrigation et sur des sols qui présentent la même texture.

Références bibliographiques

- AFES., 1995. Référentiel pédologique-INRA, Paris, 332p.
- A.N.N, 2001. Etude des marais de la Macta et préparation d'un plan d'action dans le cadre de la convention de RAMSAR. Ed. A.N.N, Alger, 50p
- Aubert G., 1976. Les sols sodiques en Afrique du Nord. Ann. I.N.A., Alger, 6(1), pp. 185 -195.
- Benhelima N., 2002. Effet de la salinité de l'eau d'irrigation sur le sol, l'absorption de l'azote et le rendement de la fève. Thèse Master.CIHEAM. Bari., 83 p
- 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., vol.XXIV, n° 1, 39-48
- Boivin P., Touma J., 1988. Variabilité spatiale de l'infiltrabilité d'un sol mesurée par la méthode du double anneau. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol.XXIV, n° 3, pp 227-234
- Boivin P., Hachicha M., Job J.O., Loyer J.Y., 1989. Une méthode de cartographie de la salinité des sols. Conductivité électromagnétique et interpolation par krigeage. Science du sol 27(1). pp 69-72
- Boulaine J., 1957. Etude des sols des Plaines du Chélif. Thèse d'Etat de l'Université d'Alger, 582p
- Bottraud J.C., Bornand M. et Servat E., 1984. Mesures de résistivité appliquée à la cartographie en pédologie. Science du sol, 4, pp 276-294.

- Bourennane H., King D., le Parco R., Isambert M. et Tabbagh A., 1998. Three-dimensional analysis of soils and surface materials by electrical resistivity survey. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 3, pp 5-23.
- Bramley R.G.V., Proffott A.P.B., Corner R.J., Evans T.D, 2000. Variation In grape yield et soil depth in two contrasting Australian vineyards. In soil 2000: new horizons for a new centry. Australian and New Zealand Second Joint Soils conference Volume 2: Oral papers. (Eds. J.A. Adams and A.K0 methereil), Lincoln University, New Zealand Society of Soil Science, pp. 29-30.
- Bruch D.J., Knotters M., Van Dooremolen W.A., Van Kernebeek P. et Van Seeters R.J.M., 1992 –The use of electromagnetic measurements of apparent soil electrical conductivity to predict the boulder clay depth. *Geoderma*, 55, pp. 79-93.
- Cameron D.R., De Jong E., Read D.W.L., Oosterveld M., 1981. Mapping salinity using resistivity and **electromagnetic** inductive techniques. *Can. J. Soil Sci.*;61(1):67-78.
- Cannon M.E., McKenzie R.C., Lachapelle G., 1994. Soil salinity mapping with electromagnetic induction and satellite-based navigation methods. *Canadian Journal of Soil Science*, 74, pp1545-1556
- Cherbouy. B., 1992 –Les sols salés et leurs réhabilitation. Ecole nationale supérieure d'agronomie. Rennes, Agrocontact, 90p.
- Chéry P., Dabas M., Bruand A., Voltz M., 1996. Epaisseur de la couverture de sol et prospection géophysique par des méthodes électriques. Etude de cas en petite Beauce. *Géologue*, 109, pp. 17-23.
- Chéverry, C., 1995. Extension et diversité des phénomènes mettant en jeu les sels solubles. *C.R.Acad.Agric.Fr.*, 81 n°2 pp42-46
- Corwin D. L., Lesch S. M., 2003. Using the Dual-Pathway Parallel Conductance Model to Determine How Different Soil Properties Influence Conductivity Survey Data. *Agronomy Journal* 95:365-379 .
- Corwin D.L., 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.
- Corwin D.L., Rhoades J.D., 1984 Measurements of inverted electrical conductivity profiles using **electromagnetic** induction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*,48(1):288-291.
- C.P.C.S., 1967 - Classifications des sols. Lab Geol –pedol. , E.N.S.A., Paris Grignon, 87p.
- Corwin D.L., Lesh S.M., 2001. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture Theory, Principles, and Guidelines. *Agronomy Journal*. 95, pp. 455-471
- Dabas M., Duval O., Bruand A., Vérbeque B., 1995. Cartographie électrique en continu. Apport à la connaissance d'une couverture de sol développée sur matériaux deltaïque. *Etude et Gestion des Sols*, 2, pp. 257-268.
- Dabas M., Hesse A., Jolivet A. et Tabbagh., 1989 intérêt de la cartographie de la résistivité électrique pour la connaissance du sol à grande échelle. *Science du sol*, 27, pp. 65-68.
- Dagnelie P., 1982. Théories et méthodes statistiques. V1, Presses Agron., Gembloux, 346p

-
- Dalgaard M., Have H., et Nehmdahl H., 2001. Soil clay by measurement of electromagnetic conductivity, 3rd European Conference on Precision Agriculture, Montpellier-France, pp. 367-372.
- De Jong E., Ballantyne A.K., Cameron D.R., Read D.W.L., 1979. Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an **electromagnetic** induction probe to aid salinity surveys. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43(6):810-812.
- Delhomme J.P., 1976. Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de doc.ing., ENSMP Fontainebleau, 130p
- Domsch H., et Giebel., 2001. Electrical conductivity of soils typical for the state brandenburg in Germany, 3rd European conference on precision Agriculture, Montpellier-France. pp. 373-378.
- F.AO., 1972. La salinité. Doc. FAO. N° 7, rome, 272p.
- Felkou M., Khechana I., 1998. étude comparative entre les méthodes de géophysique et les méthodes pédologiques usuelle pour la détermination de certaines propriétés du sol. mém. Ing. agr. INA Alger, 44 p
- Gascuel-odoux C., 1987. Variabilité spatiale des propriétés hydrique du sol, méthode et résultats; cas d'une seul variable : revue bibliographique. *Agronomie*, 7(1), pp61-71.
- Gascuel-odoux C., Gyon D., Moreau p., 1996. Elément de géostatistique. Acte de l'école de chercheur INRA en Bioclimatologie, le Croisic, pp. 335-358.
- Gaucher G., Burdin S., 1974. Géologie, géomorphologie et hydrologie des terrains salés. *Technique vivantes*, presses universitaires de France, Paris, 234p.
- Goovaerts P., 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, New York. 476p
- Goulard M., Voltz M., Monestiez P., 1987. Comparaison d'approches multivariables p^{our} l'étude de la variabilité spatiale des sols. *Agronomie.*, 1987, 7(9), pp 657-665
- Grontmij., 1971. Etude de l'assainissement du périmètre irriguée de l'habra. Ed. Grontmij. De Bilt (Pays-bas), 787p.
- Halitim A., 1985. Contribution à l'étude des sols des régions arides (Hautes Plaines Steppiques D'Algérie). Morphologie distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Rennes, 383p
- Halvorson A.D. et Rhoades J.D., 1976 – Field mapping soil conductivity to delineate dryland saline seeps with four-electrode technique., *Soils Sci. Soc. Am. J.*, 40(3), pp. 571-575.
- Hamdy A., 1995. Les problèmes de salinité dans la zone méditerranéenne. *C.R.Acad.Agric.Fr.*, 81 n°2 pp 47-60
- Hendrickx J.M.H., Baerends B., Raza Z.I., Sadig M., Akram Chaudhry M., 1992. Soil salinity assessment by **electromagnetic** induction of irrigated land. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56(6):1933–1941.
- Hendrickx, J.M.H., Kachanoski R.G., 2002. Indirect measurement of solute concentration : Nonintrusive electromagnetic induction. p. 1297–1306. In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) *Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA*, Madison, WI.
-

- Job J.O., Loyer J.Y., Ailoul M., 1987. Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., v.23, n°2, pp.123-131.
- Journel A.G., 1977. Géostatistique minière. Centre de géostatistique. Ecole des mines, Fontainbleu, Tome 1 et 2, 737 p.
- Johnson C.K., Doran J.W., Duke H.R., Wienhold B.J., Eskridge K.M., Shanahan J.F., 2001. Field-Scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. Soil Sci. Soc. Am. J. 65: pp 1829-1837
- Jung W.K., Kitcheu N.R., Sudauth K.A., Anderson S.H., 2006. Spatial characteristics of claypan soil properties in an agricultural field. Soil Sci. Soc. Am. J. 70: pp 1387-1397.
- Kachanoski R.G, Gregorich E.G., Wesenbeeck I.J., 1988. Estimation spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods. Canadian Journal of Soil Science, 68(5):pp. 715-722.
- Laborde J.P., 1989. Méthodes d'interpolation, géostatistique et cartographie automatique à l'usage des géographe et de quelques autres; stage DEA Nice, 21p
- Lesh 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.
- Lesh 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) : pp. 373-386.
- Louadj Y., 2005. Analyse de la salinité des sols et des eaux d'une toposéquence dans le bassin de la Macta (Mohamadia). mém. Ing. agr. INA Alger, 42 p
- Maas E.V., 1990. Crop salt tolerance. Engineering practice 71. New York: ASCE, 1990: pp262- 304.
- Matheron G., 1965. Les variables régionalisées et leur estimation. Une application de la théorie des fonctions aléatoire aux sciences de la nature. Masson., 305p.
- 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(1):25-32
- McNeill, J.D. 1980. -Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Geonics Tech. Note TN-6. Geonics Limited, Mississauga, ON, Canada. P14
- 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.
- Read D.W.L., Cameron D.R., 1979. Relationship between salinity and wenner resistivity for some dryland soils. Can. J. Soil. Sci. 59, pp. 381-385.
- Rieu M., Cheverry C. 1976 – mise au point bibliographique sur quelques recherches récentes en matériaux des sols salés. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., v.14, n°1, pp.39-61.
- Ritzema H.P., Kselic R.A.L. Chanduvi F. 1996. Drainage des terres irriguées: Gestion des Eaux en irrigation. F.A.O., Rome, 74p.

- Rhoades J.D., Ingvalson R.D., 1971. Determining Salinity in field soils with soil resistance measurements. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35(2), pp. 54-60.
- 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(1):255-260.
- 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(2):433–439.
- Robain H., Descloitres M., Ritz M., Atangana Q.Y., 1996. A multiscale electric survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. *Applied geophysics.*, 34, pp. 237-253.
- Servant J., 1976. Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. Thèse de doctorat d'état, Université du Languedoc, 194p
- Sheets, K.R., Hendrickx J.M.H., 1995. Non-invasive soil water content measurement using electromagnetic induction. *Water Resour. Res.* 31(6):2401–2409.
- Slavich, P.G., Petterson. G.H., 1990. Estimating average rootzone salinity from electromagnetic induction (EM-38) measurements. *Aust. J. Soil Res.* 28(3):453–463.
- Sudduth K.A., Kitchen N. R., Bollero G. A., Bullock D.G. and Wiebold W.J., 2003. Comparison of Electromagnetic Induction and Direct Sensing of Soil Electrical Conductivity. *Agronomy Journal*, 95:472-482.
- Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., Keys D.A., 1982. Geophysics prospecting tome1 et 2: Combridge University press. p220
- Triantafilis J., Laslett G.M., McBratney A.B., 2000. Calibrating an electromagnetic Induction Instrument to Measure Salinity in Soil under Irrigated Cotton. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64(6):1009-1017
- 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
- U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954. Diagnostic and improvement of saline and alkali soils.
- U.S.D.A. Handbook, n 60, 160p
- Vauclin M., 1982. Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. In: Les colloques de l'INRA. Variabilité spatiale des processus de transfert dans le sol. Ed INRA.Paris N°15,pp 9-43.
- Voltz M., 1986. Variabilité spatiale des propriétés physiques du sol en milieu alluvial. Thèse doc. Ing, ENSA Montpellier, 220p,
- Webster R., Burgess T.M., 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. in: B. A. Stewart. *Advances in soil science*, Vol. 3. Springer Verlag, 1-70.
- Wollenhaupt N.C., Richardson J.L., Foss J.E and Doll E.C. 1986. A rapid method for estimating weighted soil salinity from apparent soil electrical conductivity measured with an above ground **electromagnetic** induction meter. *Can. J. Soil Sci.* 66:315-321.
- Zahow M.F., Amrhein C., 1962. Reclamation of a saline sodic soil using synthetic

polymers and gypsum. Soil Sci. Soc. Am. J. 56, pp. 1257-1260

Annexes

Annexes 1. Formulation mathématique des équations de Maxwell

Les phénomènes électromagnétiques connus avant les travaux de Maxwell peuvent être résumés par les équations maîtresses suivantes

Les phénomènes électromagnétiques connus avant les travaux de Maxwell peuvent être résumés par les équations maîtresses suivantes

Electrostatique	Magnétostatique
$\text{div}\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ <p>Théorème de Gauss</p> $\text{rot}\vec{E} = \vec{0}$ <p>Circulation conservative</p>	$\text{div}\vec{B} = 0$ <p>Flux conservatif</p> $\text{rot}\vec{B} = \mu_0 \vec{J}$ <p>Théorème d'Ampère</p>

Electromagnétisme

$\text{div}\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ <p>Maxwell - Gauss</p> $\text{rot}\vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$ <p>Maxwell-Faraday</p>	$\text{div}\vec{B} = 0$ <p>Maxwell-Flux</p> $\text{rot}\vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \right)$ <p>Maxwell-Ampère</p>
---	--

Annexes 2. Les valeurs de conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée

Annexes 3. Les valeurs de la conductivité électromagnétique effectuées sur les deux transects (T1 et T2).

Lectures électromagnétiques horizontales					Lectures électromagnétiques verticales			
N	EM1 dS/m	EM2 dS/m	EM3 dS/m	EM4 dS/m	EM1 dS/m	EM2 dS/m	EM3 dS/m	EM4 dS/m
1	22	27	40	57	43	55	73	98
2	15	19	23	36	31	40	50	64
3	18	23	30	45	37	47	60	82
4	19	26	33	48	38	50	66	86
5	18	24	30	43	35	46	59	78
6	17	22	31	44	35	45	59	76
7	16	17	22	32	30	35	45	58
8	15	20	26	40	30	38	50	65
9	26	35	46	68	48	63	83	110
10	21	28	37	54	40	51	67	88
11	27	34	47	68	50	64	85	114
12	23	30	40	60	45	57	76	101
13	30	39	55	82	56	72	97	133
14	19	22	30	44	36	45	60	78
15	13	17	22	32	27	34	45	58
16	14	18	25	36	30	38	50	65
17	15	17	23	35	30	37	38	63

Annexe 4. Les 197 mesures de la conductivité électromagnétique

Annexe 4. Les 197 mesures de la conductivité électromagnétique

Evaluation de la salinité par induction électromagnétique :Exemple d'une parcelle cultivée de la plaine de la Macta (Wilaya de Mascara)

N	Lectures électromagnétiques horizontales				Lectures électromagnétiques verticales			
	EM1	EM2	EM3	EM4	EM1	EM2	EM3	EM4
50	12	14	17	26	41	53	74	96
51	11	14	17	25	36	47	61	82
52	14	17	22	32	43	56	78	102
53	12	14	17	26	44	58	80	106
54	13	16	20	30	47	61	85	112
55	19	23	34	47	49	65	87	118
56	13	16	20	30	48	63	87	116
57	13	15	19	29	45	59	82	108
58	12	15	19	28	43	56	76	101
59	12	14	18	26	44	57	80	104
60	12	14	17	26	34	42	57	73
61	16	20	26	39	38	49	65	86
62	18	22	30	43	48	64	87	117
63	17	21	28	41	40	53	68	93
64	11	13	15	24	31	39	51	66
65	21	27	34	53	46	58	80	105
66	19	24	31	47	45	57	75	100
67	14	18	22	34	37	49	59	83
68	16	19	25	38	48	62	82	110
69	14	18	22	34	40	53	68	93
70	13	15	19	29	28	36	43	58
71	13	15	19	29	38	48	65	84
72	10	12	14	22	30	38	47	62
73	12	14	18	27	37	48	63	84
74	12	15	18	28	29	37	46	61
75	13	15	19	29	29	37	46	60
76	12	14	17	26	46	60	83	110
77	11	13	15	24	45	60	79	108
78	11	13	15	24	31	40	51	68
79	10	12	14	22	45	59	79	106
80	10	11	13	21	43	57	77	102
81	10	11	13	21	45	59	81	107
82	10	12	14	22	48	62	88	114
83	12	15	18	28	47	62	86	113
84	10	12	14	22	47	62	84	113
85	12	14	17	26	46	60	83	109
86	11	14	17	25	41	54	73	97
87	11	13	15	23	24	30	33	45
88	10	11	12	20	41	54	72	97
89	10	12	14	22	45	59	79	106
90	13	16	20	30	65	86	111	157
91	15	19	24	36	40	52	70	93
92	15	19	25	37	34	43	59	76

93	15	19	24	36	43	58	74	103
94	16	19	25	38	40	52	70	93
95	17	21	27	42	43	58	70	101
96	10	12	14	21	42	55	76	100
97	19	24	34	49	56	73	101	135
98	19	25	32	49	40	52	68	91

Annexe 4. Les 197 mesures de la conductivité électromagnétique

Evaluation de la salinité par induction électromagnétique :Exemple d'une parcelle cultivée de la plaine de la Macta (Wilaya de Mascara)

N	Lectures électromagnétiques horizontales				Lectures électromagnétiques verticales			
	EM1	EM2	EM3	EM4	EM1	EM2	EM3	EM4
99	19	24	31	48	51	67	87	121
100	19	23	32	47	53	69	95	127
101	17	21	27	41	35	43	58	74
102	18	22	28	44	42	54	73	97
103	16	19	25	38	54	72	93	131
104	14	16	21	32	40	54	68	95
105	12	14	17	26	41	54	68	95
106	11	13	15	24	36	49	60	85
107	10	12	14	22	41	54	70	96
108	15	18	22	35	37	50	64	87
109	10	10	12	19	42	57	71	100
110	13	16	20	31	34	46	55	78
111	11	13	16	25	49	64	89	118
112	11	12	15	23	39	53	65	92
113	10	12	14	21	42	55	76	100
114	11	13	16	25	36	48	60	83
115	13	16	20	31	45	59	79	106
116	13	16	20	30	44	59	77	106
117	11	13	15	24	41	54	70	96
118	12	15	18	28	41	53	71	94
119	14	16	21	32	40	52	69	92
120	30	39	57	80	44	58	77	104
121	11	13	16	23	40	52	68	91
122	10	12	14	22	38	49	65	86
123	13	15	20	29	42	55	76	100
124	20	26	34	52	37	49	63	86
125	13	16	20	31	41	55	68	96
126	17	22	28	43	31	39	49	65
127	15	18	23	35	40	53	69	94
128	18	22	30	45	40	53	69	94
129	28	35	50	73	42	56	71	99
130	20	25	33	51	45	59	74	103
131	13	16	20	31	45	58	76	103
132	19	24	31	46	27	34	41	56
133	36	47	69	100	43	56	76	101
134	14	17	21	32	44	59	75	105
135	15	19	24	36	36	46	59	80
136	12	14	17	27	38	50	65	88
137	10	12	14	22	40	53	71	95
138	11	12	15	23	38	50	65	88
139	14	17	21	32	41	54	70	95
140	12	14	17	27	42	55	73	98
141	13	16	20	30	42	58	72	103

142	8	8	8	14	40	52	69	92
143	12	15	19	28	39	51	66	90
144	10	12	14	22	34	44	56	75
145	10	12	13	21	39	52	67	92
146	15	18	23	35	46	61	82	111
147	12	14	17	26	41	55	71	98

Annexe 4. Les 197 mesures de la conductivité électromagnétique

Evaluation de la salinité par induction électromagnétique :Exemple d'une parcelle cultivée de la plaine de la Macta (Wilaya de Mascara)

N	Lectures électromagnétiques horizontales				Lectures électromagnétiques verticales			
	EM1	EM2	EM3	EM4	EM1	EM2	EM3	EM4
148	11	12	14	23	48	63	85	114
149	10	12	14	21	42	56	73	100
150	10	12	14	22	39	51	67	90
151	11	13	16	25	41	54	71	96
152	13	15	18	29	37	48	63	84
153	17	22	28	43	38	50	65	88
154	10	12	14	22	51	69	88	125
155	10	12	14	22	39	51	67	90
156	11	13	16	24	43	57	75	102
157	13	16	19	30	31	39	51	66
158	16	20	26	39	42	55	74	99
159	17	21	27	41	38	49	66	87
160	16	20	26	39	41	53	72	96
161	14	17	22	32	37	48	63	84
162	18	23	30	46	42	56	71	99
163	15	18	25	36	40	54	67	94
164	18	23	30	44	45	59	76	105
165	16	21	27	40	36	46	59	79
166	15	19	24	36	43	57	73	101
167	14	17	22	33	38	50	65	88
168	12	14	18	26	40	52	68	92
169	10	12	14	22	40	53	69	94
170	11	13	16	25	35	47	58	81
171	10	12	14	22	43	56	78	102
172	14	17	22	34	40	52	70	93
173	22	27	40	55	45	60	79	108
174	16	21	27	40	36	46	60	80
175	20	25	36	50	37	49	62	85
176	15	18	23	36	43	57	72	101
177	15	19	24	36	48	62	86	113
178	14	17	22	33	41	55	69	97
179	13	16	21	31	36	47	61	82
180	15	19	25	37	41	55	69	97
181	11	13	15	23	37	48	63	84
182	11	13	16	24	46	61	81	110
183	11	13	16	24	38	51	64	89
184	11	12	15	22	40	52	70	93
185	10	12	14	22	44	58	77	104
186	14	17	22	32	43	56	78	101
187	14	17	23	33	35	45	59	78
188	21	27	37	54	37	49	63	86
189	14	17	22	33	35	47	58	81
190	15	18	23	35	39	53	64	92

191	41	55	76	114	42	57	70	100
192	45	61	88	127	45	61	77	109
193	18	23	30	45	45	60	77	107
194	18	23	30	44	41	55	70	97
195	22	28	37	56	44	59	75	104
196	15	19	24	37	53	70	93	126
197	11	13	15	23	36	46	59	79

Annexe 5. Les valeurs de la conductivité électrique calculée

F	CE ₁ (μS/cm)	1 ₀ CE ₁ (μS/cm)	CE ₂ (μS/cm)	CE ₂ (μS/m)	CE ₂ (μS/m)
1	2,27	1,67	17,77	24,61	4,38
2	4,28	1,45	22,75	20,41	12,7
3	3,25	2,11	20,01	26,42	6,09
4	4,0	1,85	25,5	24,08	4,74
5	2,13	3,27	20,93	17,24	20,1
6	1,55	3,44	20,21	22,24	14,20
7	1,61	4,5	11,11	14,48	6,54
8	3,14	2	23,25	22,3	11,85
9	2,59	2,95	24,7	22,17	12,25
10	5,37	1,68	12,05	21,47	5,29
11	2,83	1,04	14,5	14,55	15,73
12	3,06	1,12	23,42	22,22	11,2
13	1,85	3,44	23,28	22,72	21,8
14	2,34	3,85	28,72	21,65	6,12
15	3,27	1	26,22	22,27	2,42
16	2,0	1,01	10,5	25,16	6,42
17	2,27	3,82	17,77	24,61	4,38
18	5,05	1,62	21,05	22,27	2,2
19	2,11	1,96	19,17	16,98	2,05
20	2,27	3,82	17,77	24,61	4,38
21	1,21	2,25	23,42	22,43	15,17
22	3,67	0,4	3,01	23,54	24,21
23	3,02	4,2	1,77	19,69	3,54
24	2,03	1,04	20,22	18,26	2,24
25	3,29	0,3	26,22	22,27	4,19
26	4,71	1,55	25,23	24,28	2,25
27	1,13	2,15	3,40	1,73	11,29
28	4,43	1,3	20,22	22,23	2,1
29	4,75	1,01	25,54	21,3	4,15
30	2,12	1,96	20,22	22,27	2,2
31	4,05	1,4	23,22	14,56	4,48
32	5,29	1,29	22,22	17,67	19,96
33	4,24	1,45	22,22	20,41	2,7
34	1,62	3,82	24,22	24,23	12,24
35	2,55	3,04	3,55	22,22	6,2
36	2,53	4,7	5,05	22,22	2,24
37	4,85	1,58	4,01	4,85	6,59
38	4,05	1,20	24,01	19,16	4,52
39	5,27	1,62	22,02	22,42	3,22
40	1,55	3,44	23,28	22,72	21,8
41	1,24	3,29	20,42	20,25	12,4
42	1,34	1,37	11,11	26,48	6,34
43	5,53	1,71	21,42	22,23	3,24
44	5,52	1,71	21,42	22,22	2,24
45	5,54	1,35	14,5	22,22	6,5
46	3,82	1,24	28,42	25,65	3,24
47	2,27	3,82	17,77	24,61	4,38
48	2,94	1,05	2,05	14,22	2,24
49	3,25	2,11	20,01	26,42	6,09

Evaluation de la salinité par induction électromagnétique :Exemple d'une parcelle cultivée de la plaine de la Macta (Wilaya de Mascara)

F	CE ₁ (d/m)	1a CE ₂ (d/m)	2E ₁ (d/m)	CE ₂ (d/m)	2E ₂ (d/m)
50	2,61	2,96	9,54	25,87	4,58
51	2,10	3,74	13,82	21,47	4,54
52	2,00	1,00	12,40	21,21	2,22
53	4,81	3,40	14,31	34,89	2,41
54	2,20	2,79	0,82	21,23	9,74
55	2,10	1,96	22,67	28,27	6,34
56	4,11	3,01	18,91	34,89	9,75
57	2,37	1,69	13,44	22,67	2,5
58	2,54	1,05	12,45	27,47	2,24
59	4,28	1,48	18,53	32	2,25
60	2,61	2,96	3,32	14,97	6,66
61	4,24	1,93	14,01	19,55	4,66
62	5,38	1,72	22,8	35,46	1,23
63	6,33	1,01	24,23	22,97	2,24
64	2,57	1,09	9,89	14,18	8,45
65	0,34	2,29	12,22	12,22	0,27
66	11,79	2,46	14,24	18,03	11,24
67	2,27	2,62	12,27	14,81	18,89
68	11,47	2,44	14,54	13,15	15,78
69	2,20	2,74	18,27	29,28	0,22
70	3,00	1,2	15,79	18,72	4,6
71	5,27	1,68	2,72	14,25	4,8
72	2,00	1,03	12,45	12,21	4,1
73	4,65	1,58	18,27	28,27	3,23
74	2,04	1,25	15,42	15,51	1,74
75	8,41	1,29	15,02	12,87	2,7
76	0,22	0,2	8,93	32,64	9,17
77	4,20	1,40	22,79	28,54	5,48
78	8,28	1,25	15,37	15,37	2,91
79	6,75	1,91	18,05	25,53	5,71
80	6,43	1,69	16,91	26,47	1,22
81	6,82	1,39	12,97	22,47	0,47
82	2,20	1,96	18,72	28,78	2,7
83	2,25	2,67	12	22,67	9,66
84	3,23	1,29	14,35	32,1	2,87
85	8,00	2,08	17,03	28,15	0,72
86	3,22	1,21	17,05	28,74	4,2
87	5,67	1,77	17,94	1,23	4,23
88	0,20	-1,7	14,27	28,03	2,23
89	6,27	1,91	12,95	25,53	5,21
90	9,25	2,26	22,97	22,05	27,38
91	1,20	2,22	12,41	26,23	6,66
92	1,41	1,49	5,85	18,97	5,8
93	5,65	1,62	29,07	28,97	3,83
94	1,20	2,22	12,41	26,23	6,66
95	5,21	1,67	4,04	2,22	12,04
96	1,22	2,26	12,27	32,62	2,23
97	6,20	2,24	16,27	28,02	23,7
98	2,43	2,96	15,03	22,78	9,47

F	CE ₁₀ de/h	Le CE ₁₀ de/h	CE ₂₀ de/h	CE ₃₀ de/h	CE ₄₀ de/h
99	2,44	1,48	14,83	24,34	25,36
100	2,10	1,46	15,02	24,5	25,9
101	4,39	1,48	1,31	11,3	9,11
102	2,42	1,49	12,1	20,65	4,54
103	1,43	0,46	19,69	20,34	25,12
104	2,53	1,16	20,05	27,93	3,53
105	0,45	-0,0	16,22	22,25	17,13
106	0,41	-0,5	17,3	24,1	3,03
107	0,33	-1,1	15,24	26,14	12,17
108	0,45	-0,8	19,59	27,43	4,74
109	2,32	1,99	24,55	26,09	1,99
110	4,46	1,4	16,1	21,63	3,91
111	4,46	1,4	12,91	24,96	4,43
112	2,41	1,76	11,1	25,06	1,61
113	1,43	0,16	12,39	22,62	2,11
114	2,19	1,16	24,14	23,24	2,1
115	0,75	1,31	18,93	25,53	5,71
116	1,40	1,43	23,64	21,64	5,83
117	0,33	-1,1	15,24	26,14	12,17
118	0,36	1,45	15,05	26,09	5,03
119	2,40	1,41	15,93	21,1	5,01
120	2,17	1,46	19,67	26,09	5,64
121	0,47	1,16	20,51	26,02	5,13
122	4,45	1,33	14,01	19,06	4,67
123	1,43	0,16	12,39	22,62	2,11
124	0,70	-0,1	18,65	26,12	4,81
125	2,45	1,42	23,11	22,43	3,63
126	2,18	1,41	1,1	12,03	3,93
127	1,46	1,9	19,73	23,16	5,13
128	1,46	1,9	19,73	23,16	5,13
129	1,73	1,42	22,63	25,61	10,17
130	4,41	1,33	16,33	19,13	13,06
131	2,31	1,45	1,1	10,54	1,1
132	1,32	0,45	14,31	11,37	4,13
133	2,44	1,43	19,45	23,47	2,94
134	2,44	1,43	24,61	23,95	10,19
135	1,75	0,36	11,91	17,73	10,77
136	2,17	0,17	17,77	24,81	4,83
137	1,1	1,1	17,47	23,69	3,19
138	2,73	0,17	17,17	24,81	4,83
139	2,46	0,41	23,37	21,67	3,41
140	2,31	1,45	17,91	24,54	5,33
141	1,14	0,13	33,77	25,23	4,03
142	4,40	1,41	15,93	23,1	5,01
143	0,14	1	13,23	23,1	11,65
144	4,33	1,72	18,43	25,94	2,1
145	1,49	0,49	20,63	23,46	5,13

Evaluation de la salinité par induction électromagnétique :Exemple d'une parcelle cultivée de la plaine de la Macta (Wilaya de Mascara)

F	CE _{10cm}	LoCE _{10cm}	CE _{50cm} /r	CE _{100cm} /r	CE _{total} /m
148	1,25	1,11	20,01	26,61	6,03
149	1,64	1,97	21,42	18,5	5,41
150	1,63	1,29	18,57	23,91	4,87
151	1,02	1,24	18,61	25,62	5,16
152	1,46	1,24	14,91	21,16	4,62
153	1,27	1,07	17,77	24,71	4,77
154	1,24	1,29	25,69	33,67	14,31
155	1,63	1,29	16,67	22,11	4,54
156	1,01	1,29	20,77	28,18	5,48
157	1,92	1,65	11,11	18,69	6,62
158	1,55	1,44	13,24	28,72	5,18
159	1,70	1,15	9,48	24,64	6,54
160	1,90	1,54	12,11	27,69	8,78
161	1,46	1,24	14,91	21,16	4,62
162	1,77	1,02	22,64	25,41	14,57
163	1,17	1,97	11,8	28,79	1,47
164	1,28	1,21	16,38	21,98	7,33
165	1,70	1,30	15,16	17,17	6,29
166	1,14	1,42	21,79	14,9	14,54
167	1,27	1,02	17,77	24,61	4,62
168	1,51	1,40	12,38	22,48	11,92
169	1,46	0,7	19,72	27,16	5,18
170	1,30	1,59	28,67	24,93	2,61
171	1,00	1,00	11,41	20,11	2,16
172	1,38	1,32	11,41	26,38	6,64
173	1,15	1,45	22,72	30,24	5,03
174	1,16	1,15	9,48	11,9	11,17
175	1,57	1,52	23,62	21,54	2,94
176	1,61	1,9	18,17	24,98	7,33
177	1,56	1,17	11,9	25,11	5,73
178	1,38	1,33	23,54	26,62	10,9
179	1,10	1,24	15,61	22,47	4,24
180	1,29	1,33	23,98	26,51	10,9
181	1,46	1,24	14,91	21,16	4,62
182	1,28	1,14	21,11	29,41	8,98
183	1,25	1,21	26,69	25,69	3,13
184	1,43	1,57	11,21	26,79	6,16
185	1,27	1,69	19,67	26,69	5,64
186	1,75	1,29	9,38	27,93	8,17
187	1,29	1,19	12,54	18,61	4,13
188	1,90	1,1	19,68	28,11	4,11
189	1,80	1,59	25,64	24,93	2,62
190	1,29	1,14	29,52	28,27	11,11
191	1,02	1,24	20,57	26,21	0,93
192	1,18	1,28	27,77	11,9	11,14
193	1,31	1,46	12,7	26,64	14,95
194	1,90	1,99	27,12	26,61	3,95
195	10,17	1,20	22,74	22,41	2,12
196	1,15	1,28	12,11	21,61	4,03
197	1,73	1,30	15,16	17,17	6,29