

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE D'EL HARRACH - ALGER

En vue de l'obtention du diplôme de magister en sciences agronomiques

OPTION : Pédosphère

cartographie de la salinite des sols par induction electromagnetique

Cas de la zone est du périmètre irrigué de la Mina

Présenté par : Mr Abdelhafid youcef

M^r DJILI K. Professeur Directeur de thèse E.N.S.A, Alger
Année universitaire 2009/2010

Soutenu devant le jury composé de : **M^r DAOUD Y.** Professeur Président du jury E.N.S.A, Alger

M^r SEMAR A. Maitre de conférence Examineur E.N.S.A, Alger **M^r GAOUAS A.** Chargé de
cours Examineur E.N.S.A, Alger

Table des matières

Dédicace . . .	5
REMERCIEMENT . . .	6
ص خ لم . . .	7
Summary . . .	8
Résumé . . .	9
Introduction générale . . .	10
Chapitre I. Salinité et salinisation . . .	12
1. - La salinité . . .	12
2. - Salinisation . . .	12
3. - Sodisation . . .	13
4. - Alcalinisation . . .	13
5. - Origine de la salinisation des sols . . .	13
5.1. - Salinisation primaire . . .	14
5.2. - Salinisation secondaire . . .	14
6. - Effets de la salinité sur la plante . . .	15
7. - Effets de la salinité et de la sodicité sur le sol . . .	16
8. - Classification française des sols salés C.P.C.S (1967) . . .	16
9. - Classification des sols salés accordés par WRB (2006) . . .	17
10. - Classification Américaine des sols salés U.S.D.A (1954) . . .	18
11 - La salinité dans le monde . . .	18
12 - la salinité en Algérie . . .	19
13. - Méthodes d'évaluation de la salinité des sols . . .	19
13.1. - Méthodes de laboratoire . . .	20
13.2. - Méthodes géophysiques . . .	21
14. - Quelques travaux de recherches sur l'évaluation de la salinité par l'EM38 . . .	22
Chapitre II. Milieu physique . . .	25
1. - Présentation du Périmètre de la Mina . . .	25
2. - Le climat . . .	26
2.1. - Les précipitations . . .	26
2.2. - Les températures . . .	26
2.3. - L'évapotranspiration Potentielle . . .	27
2.4. - le diagramme ombrothermique . . .	27
2.5. - L'indice d'aridité de Demartone . . .	28
2.6. - Autres caractéristiques climatiques . . .	28
3. - La géologie . . .	29
4. - La géomorphologie . . .	30
5. - hydrologie et hydrogéologie . . .	30
6. - Les sols . . .	31
7. - Occupation du sol . . .	31
8. - Réseau d'irrigation . . .	33

9. - Réseau de drainage . . .	34
10. - Pratiques agricoles et modes d'irrigation . . .	35
Chapitre III. Matériels et méthodes . . .	37
1. - La zone d'étude . . .	37
2. - Approche méthodologique . . .	39
2.1. - Evaluation de la salinité par induction électromagnétique . . .	39
2.2. - Méthodes d'échantillonnage au niveau de la zone d'étude . . .	46
2.3. - Analyse au laboratoire des paramètres étudiés . . .	48
2.4. - Analyses statistiques univariée . . .	49
2.5. - Analyse statistique multi variée . . .	49
2.6. - Analyse spatiale . . .	50
Chapitre IV. Résultats et discussions . . .	56
1. - Analyse statistique . . .	56
1.1. - Analyse statistique univariée . . .	56
1.2. - Analyse statistique multivariée . . .	60
2. - Analyse spatiale de la salinité . . .	65
2.1. - Variographie . . .	66
2.2. - Interpolation de la CEps de l'horizon de surface et de subsurface par le krigeage ordinaire . . .	75
2.3. - Interpolation de la CEps de l'horizon de surface et de subsurface estimées aux sondages par le krigeage ordinaire . . .	78
2.4. - Interpolation de la CEps de l'horizon de surface et de subsurface estimées par régression krigeage . . .	80
2.5. - Interpolation de la CEps de l'horizon de surface et de subsurface par le cokrigeage ordinaire . . .	82
Conclusion générale . . .	86
Références bibliographiques . . .	88
Annexes . . .	95

Dédicace

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 Aissa A ma famille A mes amis

REMERCIEMENT

En premier lieu je tiens a remercier le bon Dieu qui m'a donné le courage pour accomplir ce modeste travail.

Je voudrais remercier Monsieur **DAOUD Youcef**, 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 Kaddour**, 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 **SE MAR A**, maître de conférence au département science du sol et Monsieur **GAOUAS A**, 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.

J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur **HABILA Mohamed**, Directeur Générale de l'Institut National des Sols de l'Irrigation et du Drainage (INSID) pour l'aide précieuse qu'il m'a prodigué.

Mes vifs remerciements vont également à l'égard de l'ensemble de mes collègues du laboratoire régional ouest de l'INSID El Matmar Relizane pour leur aide et leur soutien,

Je ne pourrai terminer ces remerciements sans y associer ma mère et mes frères et mes sœurs, mes amis et à tous ceux qui ont contribué de loin ou de proche à l'élaboration de ce travail.

ص خ لم

التطبيق المشترك الحث الكهرومغناطيسي مع الأساليب الإحصائية و الجيوفيزيائية لتحديد خصائص التباين المكاني للملوحة يمكن أن يقدم قياسات بطريقة سريعة ودقيقة وغير المدمرة وعلى أعماق مختلفة من التربة وتتبع التغيرات في الملوحة بمرور الوقت.

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد التباين المكاني للملوحة الترية في محيط مينا من قبل الحث الكهرومغناطيسي. تم تنفيذ هذه التجربة على مساحة 1256 هكتار عن طريق القياسات المغناطيسية في وضع أفقي (1690 قياسات) أجريت بطريقة منهجية لخطوة من 80 م والاسناد الجغرافي عن طريق نظام تحديد المواقع. أخذ العينات (192 عينة) أجريت على مستويين من العمق 0-35 سم و 35-70 سم.

النتائج الإحصائية تشير إلى وجود تباين المكاني القوي للتوصيل الكهربائي للمجينة المشبعة (، والتي تتراوح ما بين 0.52 و 41.7 ديسيومان / م في كل من طبقات التربة. وهناك علاقة عالية جدا بين القياسات لى EM38 في وضع أفقي والقوي التوصيل الكهربائي . اظهرت خرائط خطوط التساوي التوصيل الكهربائي للمجينة المشبعة المقدره حسب الاحتمال العاديين لمستويات اثنين من العمق في منطقة الدراسة ان التربة المالحة (التوصيل الكهربائي للمجينة المشبعة اكبر من $ds4$ م هو 30 ٪ في الطبقات السطحية و 43 ٪ في الطبقات تحت السطحية. وأظهرت خرائط للقوي التوصيل الكهربائي على جميع القياسات حسب تقدير المعادلة انحدار بسيط (الاحتمال الانحدار) في كل طبقات التباين المكاني للقوي التوصيل الكهربائي للمجينة المشبعة في شمال منطقة وان التربة المالحة تشغل مساحة قدرها 19 ٪ في الطبقات السطحية و 30 ٪ في الطبقات تحت السطحية. بالنسبة لخرائط التوصيل الكهربائي للمجينة المشبعة حسب تقدير cokriging هناك ارتفاعا بنسبة 9 ٪ من التربة المالحة جدالي للطبقات تحت السطحية لأرض مفرقة مع تلك التي أعدها كربع العاديين وتراجع بنسبة 3 ٪ من التربة المالحة جدا في الطبقات السطحية. العلاقة الكبيرة جدا بين التوصيل الكهربائي للمجينة المشبعة المقدره والمقاسة أظهر تقدير التوصيل الكهربائي للمجينة المشبعة من قبل الاحتمال الانحدار.

كلمات البحث : التلمح ، التوصيلية الكهربائية ، EM 38 ، التوصيلية الكهربائية ، رسم تغير ، الاحتمال العادي ، كربع الانحدار ، cokriging ، محيط مينا

Summary

The combined application of electromagnetic induction with statistical and geostatistical methods to characterize the spatial variability of salinity can make rapid and accurate non-destructive and at different soil depths and to keep track of the changes in salinity over time.

The objective of this study is to determine the spatial variability of soil salinity in the scope of the Mina by electromagnetic induction.

The experiment is performed on an area of 1256 ha. The magnetic measurements (1690 measurements) in horizontal mode were conducted in a systematic way of a step of 80 m and georeferencing by GPS. The sampling (192 samples) were performed on two levels of depth 0-35 cm and 35-70 cm.

The results indicate a strong spatial variability of electrical conductivity of saturated paste (CEps), which varies between 0.52 and 41.7 dS / m in both soil layers. A very highly significant correlation between stocks and measures of the EM38 horizontal mode. Maps of isolines of CEps estimated by ordinary kriging of the two depth levels rose in the study area, the area of saline soils (CEps > 4dS / m) is 30% in surface horizons and 43 % in subsurface horizons. Maps of the estimated PECs on all measures by the simple regression equation (regression kriging) in both layers showed a strong spatial variability of CEps to the north of the area. The saline soils occupy an area of 19% in surface horizons and 30% in subsurface horizons. Cards CEps estimated by the cokriging pitched a 9% increase in the size of the class of saline soils (4dS / m < Ceps < 8 dS / m) subsurface horizons compared to those prepared by ordinary kriging and a reduction of 3% of its area in the surface horizons. The very highly significant correlation between the estimated and measured values of CEps showed a good estimate of CEps by regression kriging.

Keywords: Salinization; electrical conductivity; EM38; electromagnetic conductivity; variogram, ordinary kriging, cokriging; Perimeter Mina.

Résumé

L'application combinée de l'induction électromagnétique avec les méthodes statistiques et géostatistiques pour caractériser la variabilité spatiale de la salinité permet de réaliser des mesures rapides et non destructives avec précision et à différentes profondeurs du sol et d'en faire un suivi de l'évolution de la salinité dans le temps.

L'objectif de ce travail est d'estimer la variabilité spatiale de la salinité des sols du périmètre de la Mina par induction électromagnétique.

L'expérimentation est réalisée sur une superficie de 1256 ha. Les mesures électromagnétiques (1690 mesures) en mode horizontal ont été effectuées d'une façon systématique d'un pas de 80 m et géo référenciés par un GPS. Les prélèvements des échantillons (192 échantillons) ont été effectués sur deux niveaux de profondeurs 0 à 35 cm et 35 à 70 cm.

Les résultats obtenus indiquent une forte variabilité spatiale de la conductivité électrique de la pâte saturée (CEps) qui varie entre 0,52 et 41,7dS/m dans les deux couches de sol. Une corrélation très hautement significative entre la CEps et les mesures de l'EM38 en mode horizontal. Les cartes d'isovaleurs de la CEps estimée par le krigeage ordinaire des deux niveaux de profondeur ont montré que dans la zone d'étude, la superficie des sols salés (CEps > 4dS/m) représente 30 % dans les horizons de surface et 43% dans les horizons de subsurface. Les cartes de la CEps estimée sur l'ensemble des mesures par l'équation de la régression simple (régression krigeage) dans les deux couches ont montré une forte variabilité spatiale de la CEps au nord de la zone. Les sols salés occupent une superficie de 19% dans les horizons de surface et 30% dans les horizons de subsurface. Les cartes de la CEps estimée par le cokrigeage ont montré une augmentation de 9% de la superficie de la classe des sols salins (4dS/m < CEps < 8 dS/m) des horizons de subsurface par rapport à celles établie par le krigeage ordinaire et une réduction de 3% de sa superficie dans les horizons de surface. La corrélation très hautement significatives entre les valeurs estimées et les valeurs mesurées de la CEps montre la bonne estimation de la CEps par la régression krigeage.

Mots clés: Salinisation ; conductivité électrique; EM38 ; conductivité électromagnétique ; variogramme ; krigeage ordinaire, régression krigeage, cokrigeage ; Périmètre de la Mina.

Introduction générale

Le recours à l'irrigation dans les pays arides et semi-arides est un choix stratégique pour garantir le développement de l'agriculture et assurer les besoins alimentaires (FAO, 2006). Selon USSL (2001), 35% à 40% de la nourriture produite au monde proviennent des 15% des terres arables cultivées.

Cependant, la mauvaise qualité de l'eau disponible affecte souvent profondément le sol et les cultures (FAO, 1988). La présence de sels solubles dans les eaux d'irrigation et le pouvoir évaporateur de l'air dans les zones arides et semi-arides conduisent souvent à une salinisation secondaire des sols dans les périmètres irrigués (Marlet et al, 2005). Ce risque de voir de nouvelles terres perdues par salinisation s'est fortement accru depuis 20 ans par suite du très fort développement de l'irrigation (Cheverry et Bourrié, 1998). Aussi, le suivi de la qualité des sols et des eaux dans ces périmètres devient une nécessité pour assurer la durabilité du système de production.

En Algérie, le problème de salinisation des terres agricoles constitue indéniablement l'un des dangers majeurs pour le patrimoine foncier. Le manque d'intérêt accordé à la connaissance des sols et l'absence d'un système de gestion de la qualité des eaux et des sols risquent de transformer les périmètres en des zones désertiques (ANRH, 2002). On évalue à un million d'hectare la superficie des sols salés dont 49 milles se situent dans le sud du pays (Szabolocs, 1989 cité par INSID, 1998).

Les périmètres irrigués de l'ouest algérien qui représentent plus de la moitié de la superficie irriguée du pays connaissent une baisse de rendement progressive liée à la salinisation. Le manque d'eau, la dégradation de sa qualité, l'insuffisance ou souvent l'absence du drainage aggravé par d'importantes pertes d'eau au niveau du réseau d'irrigation sont les causes directes de cette salinité (Hartani, 1999). La situation dans laquelle se trouvent certains périmètres irrigués illustre parfaitement les dimensions du phénomène comme c'est le cas des périmètres du Bas Cheliff et de la Mina où la salinisation des sols affecte respectivement 67% et 51% des superficies irriguées soit de 22500 ha et 8000 ha (ANRH, 2002).

D'une superficie de 13500 ha, le périmètre de la Mina est une zone caractéristique de cette situation. Ce périmètre historique est l'un des plus anciens de l'Algérie, il fut créé en 1943 (ANRH, 2002). Cependant, malgré l'importante infrastructure hydro-agricole dont il dispose, de grandes superficies sont entrain de se saliniser à cause probablement de la pénurie et de l'utilisation irrationnelle des ressources en eaux souterraines et de surface en présence d'un réseau de drainage défectueux (INSID, 1998).

Vu le déficit pluviométrique qu'a connu la région ouest Algérien durant la période 1974-1992 où il a atteint 33% par rapport à la normale (FAO, 2003), une importante partie de la ressource hydrique destinées à l'irrigation a été attribuée pour l'approvisionnement des villes en eau potable. Cette situation a conduit les agriculteurs à l'utilisation des eaux de mauvaise qualité, notamment celles des nappes superficielles et parfois même celles de l'oued, pour substituer ce manque d'eau d'irrigation (INSID, 1998). L'effet combiné d'une mauvaise maîtrise du drainage et d'une forte évaporation a entraîné une concentration des sels dans le sol, induisant ainsi la dégradation des sols de la région et par conséquent une baisse des superficies irrigables et la disparition des cultures pratiquées auparavant

(Douaoui, 2005). En outre, les facteurs socio-économiques ont influencé indirectement ce phénomène par l'intermédiaire des mutations qu'a subit le statut juridique des terres à travers les périodes vécues (Douaoui, 2005).

Devant l'ampleur de ce problème de salinisation, il y a nécessité d'élaborer une stratégie globale de développement durable des aires irriguées. Cette dernière commence par une bonne évaluation de l'intensité du phénomène et de sa distribution spatiotemporelle (Marlet et al, 2005). En effet, les variations spatiotemporelles du phénomène de salinisation des sols, déjà sensibles dans les systèmes naturels, sont accélérées sous irrigation en raison de la forte mobilité des sels, particulièrement des chlorures (Boivin et al, 1989). Le développement scientifique et technique, très significatif lors des récentes décennies, a élargi les moyens techniques et les possibilités de lutte contre la salinisation. En effet, la télédétection, les systèmes d'information géographique, les simulations menées par informatique, les méthodes d'optimisation, les systèmes experts, ou encore les méthodes instrumentales modernes jouent aujourd'hui un rôle important dans l'évaluation et la cartographie des sols et des propriétés pédologiques telles que la salinité. L'application combinée de l'induction électromagnétique avec les méthodes statistiques et géostatistiques pour caractériser la variabilité spatiale des propriétés du sol, surtout la salinité, s'est largement développée ces dernières années en agriculture de précision (Boivin et al, 1989; Cameron et al, 1981; Hendrickx et al, 1992; Job et al, 1987; De Jong et al, 1979; Lesch et al, 1995a, 1995b; Rhoades, 1993; Rhoades et al, 1990b; Hendrickx et al, 2002). Cette méthode géophysique permet de réaliser des mesures rapides et non destructives avec précision et à différentes profondeurs du sol (Triantafilis et al, 2001).

C'est dans cet objectif que s'inscrit le présent travail. Dans un premier temps, il s'agit d'étudier l'effet de certains paramètres pédologiques sur la variation de l'induction électromagnétique en utilisant des approches statistiques classiques et multiparamétriques (ACP). Par la suite, il s'agira d'estimer la variabilité spatiale de la salinité du sol par la conductivité électromagnétique apparente donnée par l'EM38 en utilisant l'approche géostatistique. Dans un souci d'améliorer la qualité de l'estimation des cartes, trois types de krigeage ont été utilisés : le krigeage ordinaire, la régression krigeage et le cokrigeage ordinaire.

Le présent document est structuré en quatre chapitres

- Le premier chapitre est réservé à l'étude bibliographique qui porte essentiellement sur la salinité des sols irrigués, les méthodes d'analyses et sur l'utilisation de l'induction électromagnétique comme méthode de mesure rapide et non destructive pour la mesure de la salinité des sols.
- Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation du milieu physique de la plaine de la Mina, objet de cette étude.
- L'approche méthodologique fera l'objet de troisième chapitre qui consiste aux choix de la méthode adoptée et le matériel utilisé pour la réalisation du présent travail.
- Les résultats obtenus et leurs discussions constituent l'essentiel de ce mémoire et sont présentés dans le dernier chapitre.

Enfin, nous terminons ce travail avec une conclusion générale dans laquelle nous présentons l'essentiel des résultats et les recommandations pour l'avenir.

Chapitre I. Salinité et salinisation

La quête de solution à la salinisation des terres passe d'abord par une meilleure compréhension de ses processus et surtout de l'identification de ses causes. Cela nécessite, au niveau national et au niveau local, des outils efficaces d'identification et de suivi de ce phénomène utilisant des indicateurs ayant les capacités de révéler les changements et leurs causes affectant dans le temps et dans l'espace le milieu naturel et les populations.

Il s'agit ici de présenter les connaissances de base concernant la salinité dans le sol et son impact sur les cultures et les rendements et d'évaluer l'état de la recherche dans ce domaine.

1. - La salinité

Plus de deux cents millions d'hectares de sols sont affectés par la salinité dans le monde, ce qui correspond à environ 20 % des surfaces cultivables (Flowers et Yeo, 1995 cités par Chinnusamy et al, 2005). L'origine des sels responsables de la salinité est diverse (Imaizumi et al., 2002 cités par Devisme, 2009) :

- Salinisation primaire ou naturelle est due aux sels formés lors de l'altération des roches ou par des apports naturels externes: remontée d'une nappe phréatique salée, inondations périodiques par de l'eau de mauvaise qualité;
- Salinisation secondaire induite par l'activité humaine qui est liée à des pratiques agricoles inappropriées, par exemple avec de l'eau d'irrigation riche en sel et /ou par un drainage insuffisant.

Les sols affectés par la salinité présentent des concentrations excessives en sels solubles dont les principaux ions concernés sont les cations (Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+) et les anions Cl^- , SO_4^{--} , CO_3^{--} , HCO_3^{--}) (Tanji, 1990 ; cité par Hamdy, 2004). La concentration en sels est estimée en mg/l (TDS), mais elle est souvent estimée par la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée à 25°C et exprimée en dS/m. D'après l'USSL, un sol est salin si la CEps est supérieur à 4 dS/m (Richards, 1954 cité par Essington, 2004). Cette valeur critique constitue le seuil de sensibilité de la majorité des cultures à la salinité des sols (Chinnusamy et al, 2005).

2. - Salinisation

D'après FAO (2006), la salinisation est un processus d'enrichissement d'un sol en sels solubles qui abouti à la formation d'un sol salin. Le terme processus intègre la notion d'évolution dans le temps, c'est pourquoi il est impossible de caractériser un processus en dehors du système intégral de production-environnement biophysique en général et les

pratiques hydro-agricoles qui interagissent avec l'évolution des sols (Marlet et al., 2004). L'accumulation des sels solubles dans la zone racinaire provient souvent à partir d'une nappe phréatique salée et peu profonde, d'origine naturelle ou anthropique (Cheverry et Robert, 1998). Les saisons chaudes et sèches favorisent l'ascension capillaire des sels à la surface des sols où ils se concentrent sous l'effet de l'évaporation et s'y expriment en efflorescences, poudres ocre ou brunes ou croûte du salant blanc (Grunberger et al., 2008 cités par Devisme, 2009).

3. - Sodisation

D'après FAO (2006), la sodisation est l'augmentation de la proportion de sodium dans les sols jusqu'à un seuil de saturation du complexe d'échange donnant des sols sodiques. Le sodium déplace les autres ions sur le complexe adsorbant et l'argile se disperse (Halitim, 1988). Un sol est généralement qualifié de sodique si son ESP est supérieur à 15 % de la capacité d'échange cationique tel que défini par le « US Salinity Laboratory Staff » en 1954 (Essington, 2004). Le processus de sodisation provoque la dispersion de l'argile et une instabilité structurale ainsi que la circulation de l'eau dans le sol sera inhibée d'où une prédisposition accrue à l'érosion hydrique. Les sols sodiques peuvent également limiter la croissance des plantes du fait des concentrations toxiques de Na^+ (FAO, 2006).

4. - Alcalinisation

L'alcalinisation indique une augmentation du pH, les réactions alcalines fortes de plusieurs sols sodiques et de sols salins sodiques sont dues à la présence de concentrations appréciables de CO_3^{2-} et HCO_3^- dans la solution du sol (Cheverry et Robert, 1998). Un sol sodique alcalin est formé si l'eau d'irrigation contient un excès de CO_3^{2-} et HCO_3^- par rapport à Ca^{2+} et Mg^{2+} présents. Cet excès est appelé Residual Sodium Carbonate (RSC) ou alcalinité résiduelle (méq/l) (Ayers et Westcot, 1994).

Quand tous les Ca^{2+} et du Mg^{2+} apportés par l'eau d'irrigation auront précipité dans le sol sous forme de carbonates de Ca et de Mg, l'excès de ($\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$) sera présent sous forme de carbonates et de bicarbonates de Na et de K dissous. Le pH du sol peut alors atteindre des valeurs très élevées, le Na_2CO_3 souvent présent en solution entraîne une dissolution de l'humus et la formation d'humâtes sodiques noir. Ces humâtes sodiques forment en surfaces des efflorescences noire dite salant noir (Cheverry et Robert, 1998 cités par Tabet, 1999).

5. - Origine de la salinisation des sols

Les facteurs les plus importants responsables du phénomène de salinisation des sols sont souvent liés aux conditions climatiques, la géomorphologie, la topographie et l'hydrologie de terrain, les caractéristiques physico-chimiques du sol, les techniques d'aménagement des sols et des eaux, de la qualité de l'eau appliquée, la profondeur et la qualité de l'eau de la nappe (Lamsal et al, 1999).

Selon que la salinisation est d'origine endogène ou exogène, on distingue deux types de salinisation des terres agricoles, une salinisation primaire et une salinisation secondaire.

5.1. - Salinisation primaire

La salinité est dite primaire lorsqu'elle est due aux sels se formant in situ au cours du processus d'altération des roches (Jacob et al, 1998). La migration et le dépôt de ces sels solubles dépendent de l'intensité et de la répartition des précipitations, du degré de porosité du sol et d'autres caractéristiques du milieu naturel (Cheverry et Robert, 1998). La mise en valeur des terres affectées par la salinité primaire est généralement très difficile (Mian et Ali, 1977; Qureshi et Barrett-Lennard, 1998 cités par Hamdy, 2004).

Au niveau du périmètre de la Mina, la nature des argiles marneuses de formations helvétique, tortonnaise et sahéenne qui entourent la plaine constituent les sources primaires de salinisation. Ces formations géologiques marneuses, fortement érodées par les crues des versants, constituent les matériaux de base des sols du périmètre (INSID, 1998). La salinisation primaire s'effectue aussi au niveau du périmètre et surtout dans les zones les plus basses grâce à la présence d'une nappe phréatique plus ou moins superficielle et salée (entre 1.5 et 2m) et en l'absence d'un drainage efficace qui, sous l'influence de l'évaporation en période sèche, favorise la remontée des sels et leur accumulation dans la zone racinaire (Energoproject, 1967).

L'alimentation de la nappe se fait par:

- Le rassemblement et l'accumulation des eaux de ruissellement qui s'infiltrent vers les nappes.

- L'eau en excès due à une irrigation non contrôlée ainsi que les infiltrations qui se produisent à partir des canaux de colature rejoignent les nappes.

La salinité des cours d'eau dépend des sols et des couches géologiques de leurs bassins versants. L'eau se charge en sels si les dépôts alluviaux des dépressions qu'elle rencontre sont eux mêmes salés.

- Si la nappe elle même est alimentée par les infiltrations des oueds qui descendent du dahra et dont l'écoulement des eaux traverse des affleurements salifères du miocène supérieur.

5.2. - Salinisation secondaire

Lorsque l'eau souterraine est la seule source disponible pour l'irrigation, sa trop grande salinité peut causer une accumulation de sels dans la zone racinaire des cultures (Maillard, 2001). Ce phénomène est généralement accentué lorsque le drainage interne du sol est restreint et que le lessivage par les pluies ou par les doses d'eau appliquées est inadéquats (Marlet et Ruelle., 2002).

L'irrigation altère le bilan hydrique du sol en générant un apport d'eau supplémentaire qui est toujours associé à un apport de sels (Hamdy, 2004). L'effet est d'autant plus marqué

que les eaux de surface et les eaux souterraines sont relativement chargées en sels. Le climat sec crée une demande évaporative élevée qui se traduit par la nécessité d'apport de grandes quantités d'eau pour l'irrigation des cultures. Même si l'eau d'irrigation est relativement pauvre en sels, cela entraîne le dépôt d'au moins six tonnes/ha de sels sur le sol par an (FAO, 2006) .

6. - Effets de la salinité sur la plante

La salinité est l'un des facteurs environnementaux les plus importants limitant la production agricole dans beaucoup de régions du monde (Chinnusamy et al, 2005). Environ 20% de régions agricoles irriguées sont compromises par la salinité (Flowers et Yeo, 1995 cités par Chinnusamy et al, 2005). Les effets de salinité sur des plantes incluent la toxicité des ions, l'effet osmotique, les insuffisances minérales, les perturbations physiologiques et biochimiques et les combinaisons de ces effets (Munns, 1993, 2002; Neumann, 1997; Yeo, 1998; Hasegawa et autres, 2000 cités par Netondo et al, 2004).

De nombreuses études ont été effectuées sur les réponses des cultures vis-à-vis de l'environnement salin (Maas et Hoffman, 1977; Flowers et Yeo, 1995; Zhu, 2002 cités par Chinnusamy et al, 2005). Toutes les cultures ne réagissent pas à la salinité de la même manière (Tableau01). En général, deux catégories d'effets de la salinité ont été considérées:

- La salinité de la solution de sol, qu'elle soit due au sel naturellement présent dans le sol ou au sel apporté par l'eau d'irrigation provoque un retard de la croissance par la réduction de la quantité d'eau disponible pour la culture (effet osmose entre la solution du sol et la plante) (Chinnusamy et al, 2005), essentiellement durant le stade de germination, d'émergence et le début de croissance (Maas et al., 1983; Marschner, 1995 cités par Hamdy, 2004). A un potentiel matriciel donné du sol, la plante a d'autant plus de difficultés à s'approvisionner en eau que le potentiel osmotique est élevé. La relation rendement-apport saisonnier d'eau est compliquée en conditions salines par l'influence du stress osmotique.

Pour atteindre un même potentiel total, la quantité d'eau à apporter est d'autant plus grande que le potentiel osmotique est élevée (Daoud et Halitim, 1994 cités par Ayers et Westcot, 1994).

- La suppression de la croissance due à l'augmentation de la concentration de certains ions qui ont un effet toxique sur le métabolisme végétal (effet ionique spécifique (Na^+ , Cl^- , SO_4^{--}) et qui peuvent affecter la balance nutritionnelle s'ils sont en concentration ou en proportion excessive et rentre en interférence avec l'assimilation des ions K^+ et Ca^{2+} (Zhu, 2001).

classes de tolérance des cultures relative à la salinité	Salinité limite du sol (ECe) sans perte de rendement
Sensible	< 1.3 dS / m
Moyennement sensible	1.3 - 3.0 dS / m
Moyennement tolérante	3.0 - 6.0 dS / m
Tolérante	6.0 - 10.0 dS / m
Inapte à la plupart des cultures (sauf si l'on accepte une baisse de rendement)	> 10.0 dS / m

Tableau n° 01 : Classe de tolérance des cultures à la salinité (Maas, 1990)

7. - Effets de la salinité et de la sodicité sur le sol

L'accumulation du sodium dans le sol provoque deux types de dommages :

- Une détérioration des conditions physiques du sol. La présence de quantités excessives de

sodium échangeable dans le sol favorise la dégradation par la dispersion et le gonflement des

minéraux argileux car la salinité réduit la couverture végétale laissant le sol sensible à l'érosion éolienne ou hydrique (FAO, 1972).

- L'infiltration et la conductivité hydraulique décroissent dans des proportions telles que l'eau ne circule pratiquement plus ou pas du tout à l'état humide quand le sol est plastique. En séchant, il devient difficile à travailler et une croûte se forme à la surface (Loyer, 1991; cité par Devisme, 2009).

8. - Classification française des sols salés C.P.C.S (1967)

Cette classification insiste sur l'importance des modifications morphologiques et écologiques subies par les sols dont l'évolution est soumise à l'influence d'un excès de sels solubles, ou d'ions provenant de leur dissociation et susceptibles de provoquer la modification de leurs caractéristiques physiques. De ces sols elle en fait une classe. Celle-ci est défini soit par la présence de sels solubles en quantité suffisante dans un horizon d'au moins 20 cm pour y élever la conductivité de l'extrait de pâte saturée jusqu'à au moins 8mmhos par centimètre, à 25°C, soit par la dégradation de la structure d'un horizon d'au moins 20 cm sous l'influence d'un excès d'ions échangeables alcalins (Na/T variable suivant les sols mais toujours supérieur à 10 %).

Plusieurs noms lui ont été donnés : Sols salés, Sols halomorphes, Sols sodiques, aucuns ne recouvre l'ensemble des sols concernés. La dénomination des Sols Salsodique

que propose SERVANT(CPCS,1967) parait bien meilleure. Selon la présence ou l'absence d'un horizon à structure dégradée, deux sous-classes ont été distinguées;

a. Sous-classe de sols salsodiques, à structure non dégradée avec deux groupes, celui des sols salins à complexe calci-magnésique d'ESP < 15 % et l'autre des sols salins à complexe sodique, enrichi en sodium échangeable d'ESP > 15%.

b. Sous-classe de sols salsodiques, dont un horizon sur au moins 20 cm présente une structure dégradée, une forte compacité, sous l'influence de la teneur élevée du complexe en sodium échangeable. A partir de cette sous-classe on a deux groupes; celui de sols sodiques à alcali, non lessivés, avec des sous-groupes et l'autre ce caractérise par le lessivage de l'argile sodique.

9. - Classification des sols salés accordés par WRB (2006)

Le terme salsodique, proposé antérieurement par Servant regroupe les sols salés et les sols sodiques. Ce terme a été retenu par le RP (Référentiel pédologique) mais pas par le WRB (Word référence base) qui n'a pas de terminologie génétique et distingue directement Solonchak et Solonetz.

Le terme Solontchaks vient du russe sol (sel) et chak (secteur salé), ce sont des sols salins dans lesquels les argiles 2/1 sont stables à l'état floculé (bonne structure). Le profil est peu différencié, du type AC. La conductivité électrique est importante. Ils sont caractérisés par un horizon Salique (RP) ou Salic (WRB). Le référentiel Pédologique (RP) et le WRB sont d'accord sur la définition de l'horizon Salic.

- Horizon diagnostique Salique a une conductivité électrique (CE) de l'extrait de la pâte saturée de plus de 15 dS/m à 25 °C à un certain moment de l'année ; une conductivité électrique (CE) de l'extrait de la pâte de plus de 8 dS/m à 25° C si le pH eau de l'extrait de saturation dépasse 8,5(pour les sols carbonate alcalin), ou moins 3,5 (pour les sols acides à sulfates).

Le terme Solonetz vient du russe sol (sel) et etz (fortement exprimé). Ce sont des sols riches en NaCO₃ et souvent peu salés avec une conductivité faible. Leur complexe adsorbant est riche en sodium (> 15%). Leur pH > 8.5. Leurs argiles défloculées par la présence de sodium sont entraînées vers le bas et éventuellement détruites par alcalinolyse. Ces sols ont une allure de sols lessivés avec des horizons bien contrastés. Le profil est de type ABC et ils sont caractérisés par un horizon Sodique (RP) ou Natrique (WRB).

Aussi ces sols contiennent souvent, des horizons Calciques ou Gypsiques et peuvent aussi présenter d'autres caractères qui les rapprochent des sols hydromorphe, des sols vertiques ou autres.

- Horizon diagnostique Natrique (WRB) : (Natrium, sodium) est riche en éléments fins ; il est situé sous un horizon A ; sa structure est colonnaire ou prismatique, massif et contient plus de 15 % de Na sur le complexe adsorbant. A partir de là, le classement des sols salés en différents sous-types se fait en prenant en compte des caractères accessoires, en particulier :
- Morphologie (Albic, Humic, Histic, Vertic..);

- Texture (Arenic, Silic, Clayic..);
- Hydromorphie (Gleyic, Stragnic..),
- Chimisme (Gypsic, Chloridric, Sulfatic, Calcaric..)

Il ya un bon accord entre les différents systèmes de classification qui, à quelque détails près, ont repris les travaux russes et les dénomination (Tableau 02).

CPCS	WRB	Référentiel Pédologique
Sols salins	Solonchak (Hz, Salic)	Salisols
Sols salins à alcalin	Solonchak - Solonetz	Sadisols indifférenciés
Sols sodiques	Solonetz (Hz, Natric)	Sodisols solonetziques
Sols sodiques dégradés	Solonetz Glossalbic	Sodisols solodisés

Tableau n°02 : Classement des sols salés et correspondances approximatives (Legros, 2004)

10. - Classification Américaine des sols salés U.S.D.A (1954)

Par rapport aux autres classifications, la soil Taxonomy (2003) ne classe pas à part les sols salés. Elle considère que la salinité correspond à un caractère subordonné pouvant apparaitre dans différents ordres. Il faut donc s'intéresser aux horizons diagnostiques.

- Horizon Salique : contient des sels plus solubles que le gypse et est caractérisé par une conductivité électrique de l'extrait de la pate saturée égale ou supérieure à 30 dS/m et le produit de la CE (dS/m) par l'épaisseur(cm) est égal ou supérieur à 900.
- Horizon Natric : dans lequel on observe soit une structure colonnaire et l'ESP est supérieur ou égal à 15% ou (SAR supérieur ou égal à 13), soit encore une valeur supérieure à 1 du rapport (Mg+Na)/ (Ca+acidité d'échange) à pH 8,2).

On trouve des sols salés dans différents ordres, en particulier dans les Inceptisols (sols moyennement évolués), les Entisols (sols peu évolués), Aridisols (sols des régions arides) et Alfisols (sols lessivés). La présence de sels apparait suivant les cas :

- - Au niveau des suborders par exemple Sal-ids (avec horizon salic).
- - Au niveau du grand groupe, exemple les Sal-orth-ids (Solonchaks), Natr-arg-ids (solonetz)
- - Au niveau du sous- groupe, exemple les Sodic Haplo-calci-ids, SodicPsamm-aq-ent, Sodic Calci-Xer-epts.

11 - La salinité dans le monde

La salinité des sols est présente dans la plupart des grands systèmes d'irrigation à travers le monde sous l'effet conjugué d'une mauvaise qualité des eaux d'irrigation, de l'aridité

et d'un drainage insuffisant du sol et des aquifères (Marlet et al, 2005). Les superficies irriguées ont connu un accroissement très rapide depuis 1950, elles atteignent aujourd'hui près de 300 millions d'hectares (Marlet et al, 2005). D'après Rhoades (1997), les évaluations indiquent que, selon les situations, de 15 à 50% des terres aménagées et environ 50% des systèmes d'irrigation seraient affectés par la salinité, plus particulièrement dans les zones arides (Marlet et al, 2005). Au Pakistan, plus de 25% des surfaces irriguées sont salinisées, en Tunisie 25%, aux USA 23%, en Inde près de 17%, en Chine près de 15% et en Afrique du Sud près de 9% (FAO, 2006).

12 - la salinité en Algérie

En Algérie, on évalue aujourd'hui à 1,5 million d'hectares la superficie des sols salés (MADR, 2004) dont 49 milles se situent dans le sud du pays. Selon Douaoui et Hartani (2007) environ 20 % des sols irrigués en Algérie sont concernés par le problème de salinité. Ce problème a été observé dans plusieurs régions de l'Algérie (Chlef, Relizane, Mohamadia, Sig, Ain Temouchent, Hautes plaines de Sétif et de Constantine). Dans l'ouest algérien, plusieurs périmètres irrigués (Tableau 03) sont soumis à de graves problèmes de salinisation et de la remontée de la nappe qui se traduisent par une dégradation des sols et une baisse de productivité.

Périmètre	Superficie Irrigables (ha)	Superficie affectée /ha)	Pourcentage %
Haut Cheliff	20000	6400	32
Moyen Cheliff	21000	8700	41
Bas Cheliff	22500	15000	67
Mina	8250	4190	51
Habra	19000	8100	42
Sig	8000	3200	40

Tableau n°03 : Répartition des sols affectés par la salinité dans les périmètres Irrigués de l'ouest Algérien (ANRH, 2002).

13. - Méthodes d'évaluation de la salinité des sols

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour évaluer la salinité des sols (Corwin et Lesch, 2003) :

- L'observation visuelle des récoltes est une méthode économique et rapide mais son inconvénient est que le degré de salinité n'est détecté qu'après les dommages de la récolte.
- Les méthodes de laboratoire basées sur la mesure de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée ou l'extrait dilué des sols.
- Les méthodes géophysiques non destructives basées pour la mesure de la conductivité électrique apparente du sol (CEa). Elles sont basées sur la résistivité

électrique en utilisant le dispositif de Wernner, par induction électromagnétique EM et par des capteurs time-domain reflectometry (TDR).

13.1. - Méthodes de laboratoire

La conductivité électrique est l'aptitude d'une solution à faire passer un courant électrique entre deux électrodes. Le courant est transporté par des ions, c'est à dire que la conductivité augmente avec le nombre et la mobilité des ions présents en solution et aussi avec la température (Pansu et Gautheyrou, 2002). Une solution contenant très peu d'ions ne favorise pas le transport du courant, elle est dite peu conductrice ou résistive. L'inverse de la conductivité est la résistivité.

Les principaux sels responsables de la salinité sont les sels de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{2+}), de sodium (Na^+), les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les bicarbonates (HCO_3^-). Une valeur élevée de la salinité signifiant la présence d'une grande quantité d'ions en solution permet d'estimer la teneur globale en sels dissous. Elle est exprimée en millisiemens /centimètre (mS/cm), l'ancien nom de cette unité est le mmho. Un mmho est l'équivalent de 1mS/cm qui est l'équivalent de 1dS/m et en moyenne à 640mg/l de sel. Au laboratoire, pour évaluer la quantité de sels contenus dans un échantillon de sol, il faut extraire ces sels de l'échantillon. Pour cela, différentes méthodes sont utilisées.

13.1.1. - Extrait de la pâte saturée

C'est la méthode de référence internationale préconisée par le laboratoire de Riverside (US Salinity Laboratory Staff ; Richards, 1954) (Mathieu et Pieltain, 1998). Devant la difficulté d'obtenir un extrait représentatif de la solution du sol à un instant donnée et qui soit compris entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent, cette méthode standardisée consiste à amener l'échantillon à saturation, c'est-à-dire proche de sa limite de liquidité (Servant, 1970 cité par Baize, 1988). En opérant ainsi, on cherche à se rapprocher au mieux d'une réalité agronomique, l'humidité étant à proximité de la capacité de rétention, la plus efficace pour la plante (Le Brusq et al, 1982 ;cités par Diba, 1995). La méthode de l'extrait de pâte saturée est lourde à mettre en œuvre du fait de la difficulté de confection de la pâte et de l'extraction de la solution parfois impossible mais qui reste une méthode de référence internationale pour la classification des sols (Mathieu et Pieltain, 1998).

13.1.2. - Extrait dilué

Cette méthode consiste à faire des extractions aqueuses de rapports sol/eau (m/v) fixe pour obtenir de fortes dilutions. Le rapport poids sol/poids eau est en général de 1/5 ou 1/10 d'où le nom d'extrait 1/n et reste le même quelque soit la texture de l'échantillon (Mathieu et Pieltain., 1998).

Or, on constate souvent que la conductivité mesurée sur les extraits dilués est inférieure à la conductivité de pâtes saturées (Le Brusq et Loyer, 1982 ; cité par Pansu et Gautheyrou., 2002). Ceci tient au fait que certains extraits, surtout les extraits salin 1/10, apportent une importance redistribution des sels par rapport à l'extrait saturée. Cette relation n'est pas toujours proportionnelle au volume d'eau mais varie pratiquement en fonction de différents facteurs dont la texture des sols, le niveau de salinité et la composition ionique des solutés (Pansu et Gautheyrou., 2002).

Sur le plan pratique, cette méthode est plus facile à réaliser et surtout utilisable dans le cas de concentration faible et une proportion de gypse peu élevée. Elle permet ainsi de faire un grand nombre d'analyses, ce qui est au contraire plus difficile par pâte saturée. De nombreux travaux de recherche ont vu l'utilisation de la conductivité électrique de l'extrait dilué pour l'évaluation de la salinité du sol (Djili et al, 2003 ; Douaoui , 2005)

13.2. - Méthodes géophysiques

Bien que moins précises que les méthodes décrites ci-dessus, les méthodes de mesure directe de conductivité sur le terrain sont utiles pour une cartographie rapide de la répartition des sels ou un suivi de leur dynamique (Simon et Garcia, 1999 cité par Pansu et Gautheyrou, 2002). Les variations spatio-temporelles de la salinité des sols déjà sensibles dans les systèmes naturelles sont accélérées sous irrigation en raison de la forte mobilité des sels particulièrement des chlorures. Les méthodes conventionnelles de mesure sur petits échantillons peuvent difficilement rendre compte d'un tel phénomène (Boivin et al, 1989).

13.2.1. - La conductivité électrique apparente du sol CEa

Elle se définit comme une mesure de la capacité d'un matériel à transmettre une charge électrique exprimée en dS/m (Doerge et al, 2003 ; cité par Fox, 2004). Les mesures de la CEa du sol sont utilisées longtemps en géologie et en science de l'environnement afin de distinguer les propriétés du sol (Lund et al, 1999). Sur un modèle un peu plus simple à trois chemins (figure01), Rhoades et al (1989) ont proposé une formule qui permet de calculer la conductivité électrique apparente du sol CEa comme une fonction de trois phases : liquide, solide et sol-liquide (Sudduth et al, 2003).

(1); liquide (2); solide (3) (Sudduth et al, 2003)

La conductivité électrique apparente du sol CEa est donnée par la formule suivante (Rhodes, 1989, cité par Sudduth et al, 2003):

$$EC_a = \left[\frac{(\theta_{SS} + \theta_{WS})^2 \cdot EC_{WS} \cdot EC_{SS}}{\theta_{SS} \cdot EC_{WS} + \theta_{WS} \cdot EC_S} \right] + (\theta_{SC} \cdot EC_{SC}) + (\theta_{WC} \cdot EC_{WC})$$

Où:

ECa: Conductivité électrique apparente du sol;

θ_{WS} : Teneur en eau volumique contenue dans les micropores (immobile);

θ_{WC} : Teneur en eau volumique contenue dans les macropores (mobile);

θ_{SS} : Teneur en eau volumique contenue dans la phase solide;

θ_{SC} : Teneur en eau volumique contenue dans la surface solide;

EC_{WS} : Conductivité électrique de l'eau dans les micropores (immobile);

EC_{WC} : Conductivité électrique de l'eau dans les macropores (mobile);

EC_{SS} : Conductivité électrique de la phase solide;

EC_{SC} : Conductivité électrique de la surface de la phase solide;

13.2.2. - La résistivité électrique

L'appareil de mesure comprend quatre électrodes disposées horizontalement selon la configuration de WENNER (Corwin et lesch, 2003). Cette méthode est basée sur un principe simple: la capacité du sol à conduire le courant électrique est fonction de la concentration en électrolytes de la solution du sol. L'épaisseur du sol prospecté est en fonction de l'écartement entre les deux électrodes sources. L'appareil est un matériel encombrant à manipuler et parfois le contact des électrodes avec le sol est imparfait aux faibles humidités (Rhoades et al, 1976). La résistivité est l'inverse de la conductivité. ¶ Les dispositifs de résistivité convertissent des mesures de la résistivité apparente en mesures de la conductivité apparente.

13.2.3. - Les capteurs time-domain reflectometry (TDR)

Au début, cette méthode a été adaptée pour mesurer les teneurs en eau. Par la suite, ¶ Dalton et al (1984) ont démontré l'utilité de TDR pour mesurer la conductivité électrique apparente CEa . ¶ La mesure de la CEa avec TDR est basée sur l'atténuation de la tension appliquée du signal pendant qu'elle traverse le milieu d'intérêt avec l'importance relative de déperdition d'énergie liée à la CEa (Wraith, 2002). Cette mesure présente certains ¶ avantages cités par Wraith (2002) :

- Une nature relativement non destructive parce qu'il y a seulement interférence mineure avec le sol traité ;
- Une capacité de mesurer à la fois les teneurs en eau et la CEa ;
- Une capacité à détecter de petits changements de la CEa dans la condition représentative de sol,
- Les possibilités d'obtenir des mesures sans surveillance continues;
- Aucun besoin de calibrage des mesures de teneur en eau de sol dans beaucoup de cas.

13.2.4. - Induction électromagnétique

La méthode FDEM (méthode électromagnétique en domaine fréquentiel) appelée aussi EM ou conductivité in situ permet de mesurer la conductivité électrique apparente du sol en utilisant la magnitude et la phase d'un courant électromagnétique d'induction (Doerge et al, 2003 cités par Fox, 2004). Cette méthode sera présentée en détail dans le chapitre matériel et méthodes.

14. - Quelques travaux de recherches sur l'évaluation de la salinité par l'EM38

L'évaluation de la salinité par induction électromagnétique a été étudiée par de nombreux chercheurs. On peut citer les travaux de Job et al (1987) qui ont essayé de trouver une méthode simple en étalonnant la réponse de l'appareil en mode horizontal et en mode vertical par rapport à la conductivité électrique de l'extrait au dixième. La répartition de l'humidité et de la texture étant homogène. Les équations obtenues sont de type :

$$EC (1/10) = 0,0077EC_v - 0,0414 \text{ avec } r = 0,842$$

$$EC (1/10) = 0,0069EC_h - 0,0833 \text{ avec } r = 0,817$$

Nogués et al (2006) ont estimé la salinité exprimée par la conductivité électrique de la pate saturée du sol de 0 à 60cm par induction électromagnétique en modes horizontal et vertical. L'examen de l'étalonnage a aboutit aux équations suivantes :

$$CE_{ps} = - 0,38 + 0,58EM_h R^2 = 75,9 \text{ et } n = 20$$

$$CE_{ps} = - 0,52 + 0,57EM_v R^2 = 74,9 \text{ et } n = 20$$

Corrélation entre EM_v et EM_h

$$EM_v = 0,54 + 1,10 EM_h \text{ avec } R^2 = 98,1 \text{ et } N = 44$$

$$EM_v = 0,08 + 1,05EM_h \text{ avec } R^2 = 93,8 \text{ et } N = 240$$

Job et al (1997) ont tenté d'intégrer la texture du sol et sa teneur en eau dans les équations d'étalonnage. Cela permet une estimation plus précise de la conductivité électrique moyenne du sol

La variable choisie pour mesurer la conductivité électromagnétique est la moyenne des mesures en mode vertical et en mode horizontal, paramètre qui est le moins sensible aux variations de la salinité en profondeur.

$$\text{Sol sableux : } CVH_{\square} = 0,8\square + a$$

$$\text{Sol limono-sableux : } CVH_{\square} = 1,0\square + b$$

$$\text{Sol argileux : } CVH_{\square} = 2,2\square + d$$

$$CVH_{\square_2} = CVH_{\square_1} + f(\square_2 - \square_1) \text{ Soit } f \text{ } 0,36 - 0,04s$$

s : représente le pourcentage pondéral en sable (g/100g) du profil de sol entre 0 et 200cm \square_1 et

\square_2 deux valeurs d'humidité pondérale (en g/100g)

$$CE_{sat_{0-200}} = 0,043CVH_{20} - 1,20 \text{ r} = 0,943 \text{ avec } n = 27$$

Avec $\square = 20\%$ étant la teneur en eau de référence est 20% pondéral, car c'est la teneur que l'on rencontre le plus fréquemment dans les sols irrigués de texture moyenne (Job et al, 1997).

Gonzales et al (2002) ont établi un étalonnage entre la mesure de l'EM38 en modes horizontal et vertical et la CE_{ps} moyenne du profil (0 à 120 cm). Cette dernière représente la moyenne de la CE_{ps} dans chaque horizon. Le résultat a donné les équations suivantes :

$$CE_{ps_{0-120}} = 0,1 CE_v - 0,09 \square_{0-120} - 2,3 \text{ avec } n = 30 \text{ et } r = 0,91$$

$$CE_{ps_{0-120}} = 0,1 CE_h - 0,18 \square_{0-120} + 2,4 \text{ avec } n = 30 \text{ et } r = 0,92$$

Corwin et al (2006) ont établie des corrélations spatiales entre quelques paramètres physico-

chimiques (la CE_{ps}, A%, MO%, pH, CaCO₃%,) avec les lectures de l'EM38 en mode horizontal et vertical sur une profondeur de 0 à 120cm. Le nombre d'échantillons égal 40. Les résultats de cette corrélation ont aboutie aux coefficients de corrélation (r) suivants (Tableau04) :

Lectures	CEps dS/m	A %	CaCO3 %	MO% (0 à 60cm)	Hv %	pH
EMh	0,89	0,33	- 0,28	-0,49	0,59	0,40
EMv	0,84	0,28	-0,28	-0,29	0,63	0,43

Tableau n° 04 : Corrélation entre la EMh et EMv et certains paramètres de sol (Corwin et al, 2006)

Divers processus complexes de redistribution des sels sont liés au fonctionnement hydrologique du milieu sous l'influence de l'irrigation et du drainage. Ces évolutions sont le résultat d'une gestion agricole de l'eau dans différents contextes, liée à un drainage insuffisant et à une utilisation accrue d'eaux souterraines ou de drainage de mauvaise qualité en situation de pénurie.

Actuellement, les problèmes ont tendance à s'aggraver dans ces périmètres, avec la progression des surfaces irriguées, l'aménagement de sols de moindre qualité et les difficultés de maintenance des drains et des fossés. La gestion de la salinité dans ces régions nécessite donc une méthode appropriée permettant à la fois de comprendre les processus impliqués et d'évaluer les décisions à adopter en matière de gestion et de planification en fonction de la situation actuelle et des évolutions attendues.

La durabilité de ces systèmes irrigués dépend d'un contrôle rationnel et efficace de la salinité qui doit être basé sur des connaissances adéquates de la situation présente (caractéristiques des sols et des eaux dans les périmètres affectés par les sels, y compris une évaluation de la variabilité spatiale et temporelle de ces caractéristiques et des processus de salinisation et d'alcalinisation eux mêmes.

Les méthodes classiques pour estimer la quantité de sels répondent mal aux questions que l'on se pose actuellement sur la caractérisation et sur le fonctionnement du sol en place. En effet, la quantité de sels mesurée sur un échantillon ne peut être extrapolée à un grand volume de sol, la distribution spatiale des sels étant en général très hétérogène. De plus, si l'on considère la salinité comme une variable régionalisée (Delhomme., 1976), on ne peut mettre en évidence une structure du phénomène qu'avec un nombre très élevé de prélèvements. Il faut donc se tourner vers d'autres méthodes d'estimation de la salinité (Job et al., 1987).

¶ Les méthodes de la résistivité électrique selon la configuration de Wernner et de l'induction électromagnétique (EM) sont considérées comme des méthodes les mieux adaptées aux applications de l'agriculture de précision parce qu'elles permettent de mesurer un grand volume du sol qui ¶ réduit ainsi l'influence de la variabilité locale des mesures (Corwin et Lesch., 2003).

¶ Cependant, la résistivité électrique est une technique non destructive qui exige le bon contact entre le sol et quatre électrodes insérées dans le sol ; ¶ par conséquent, elle produit des mesures moins fiables dans les sols secs ou pierreux que la mesure non destructive de la conductivité électromagnétique. Cette dernière ¶ est devenue le premier choix pour la mesure de la salinité de sol dans un contexte géo spatiale pour les raisons suivantes (Hendrickx et al. 1992):

- - Les mesures peuvent être prises aussi rapidement qu'on peut se déplacer d'un endroit à l'autre,
- - Le grand volume de sol mesuré réduit la variabilité locale des mesures ;
- - Les mesures dans des sols relativement secs ou pierreux sont possibles parce qu'aucun contact n'est nécessaire entre le sol et la sonde.

Chapitre II. Milieu physique

1. - Présentation du Périmètre de la Mina

Le périmètre de la Mina et ses extensions se situent dans le bassin inférieur de l'oued Chélif (figure02). Il couvre une superficie de 13.647 ha environ dont 9592 ha sont irrigables sur les 10.580 que compte le SAU. Créé en 1943, ce périmètre est l'un des périmètres irrigués les plus anciens de l'Algérie. La partie centrale du périmètre se trouve au nord de l'oued Mina qui coule vers l'oued Chélif (figure03). La partie occidentale s'étend à gauche et à droite de la route d'Oran et comprend le voisinage immédiat de Matmar. La partie orientale s'étend à gauche et à droite de la route de Chélif et comprend les environs de la localité de Oued Djema. Les coordonnées géographiques de ce périmètre sont :

- Abscisses X1 = 283,5 Km ; X2 = 322,0 Km ;
- Ordonnées Y1 = 259,0 Km ; Y2 = 285,0 Km ;



Figure n°02 : Situation géographique du périmètre de la Mina (extrait de la carte des grands Périmètres ; ONID, 2006).

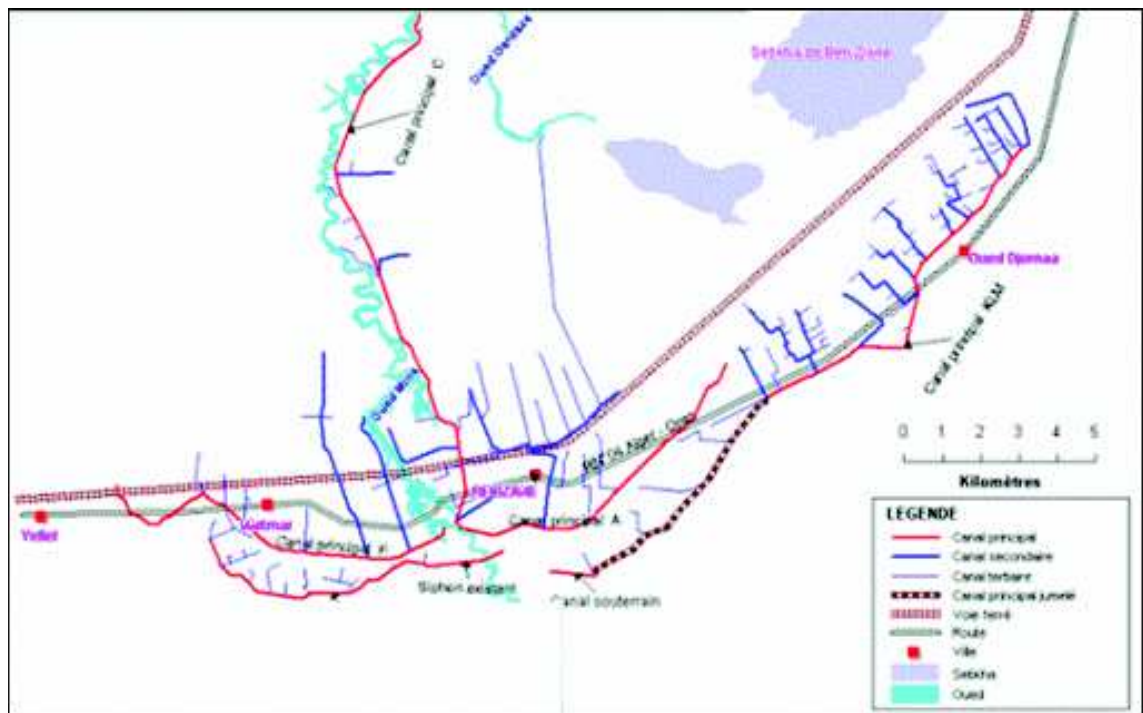


Figure n°03 : Vue générale du périmètre de la Mina (INSID, 2005).

2. - Le climat

L'analyse du climat du périmètre de la Mina est effectuée sur la base des données de la station climatique de l'Agence National des Ressources Hydriques (ANRH) de Relizane. Ces données climatiques couvrent une période de dix huit ans, allant de 1988 à 2006. Les coordonnées Lambert de la station climatique sont les suivantes : X km : 304,3 ; Y km : 272,2 ; Altitude m : 80.

2.1. - Les précipitations

Avec une moyenne pluviométrique annuelle de 250 mm environ (Tableau05), la région de la Mina se caractérise par une irrégularité des pluies dans le temps. En effet, avec une moyenne de 40 mm, novembre est le mois le plus pluvieux de l'année et juillet qui n'enregistre que 1,5 mm environ est le mois le plus sec.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	année
P (mm)	11.9	21.2	39.4	28.4	30.4	31.2	28.8	27.2	24.2	5.3	1.5	3.8	253.3

Tableau n°05 : Répartition mensuelles des pluies annuelles d'après L'ANRH pour la période de 1988 à 2006.

2.2. - Les températures

L'examen des données de températures (Tableau06) révèle que le régime thermique se caractérise par des températures élevées en été et modérées en hiver. Les températures

les plus élevées sont enregistrées en juillet (38,9°C) et août (38,5°C), ce qui engendre une forte évaporation qui favorise la remontée capillaire de la nappe qui se trouve parfois à uniquement un mètre de profondeur. Les basses températures se manifestent en janvier (6,1°C) et février (6.4°C).

Mois Temp.	Sep.	Oct.	Nov	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin.	Juil.	Août
T min (°C)	17.0	14.5	9.0	7.7	6.1	6.4	9.4	11.6	15.0	17.0	21.1	20.8
T Max (°C)	32.5	27.1	23.1	19.3	17.2	18.9	23.0	24.2	30.1	34.7	38.9	38.5
T Moy (°C)	24.2	20.8	15.9	13.6	11.6	12.8	16.1	18.5	22.7	25.8	29.6	29.3

Tableau n°06 : Températures moyennes mensuelles de la station de l'ANRH pour la période de 1988 à 2006.

2.3. - L'évapotranspiration Potentielle

Vue l'absence des données de la station de l'ANRH, les valeurs de l'évapotranspiration potentielle calculées à partir des données de Selzer par la formule de PENMAN sont illustrées dans le (Tableau07). Avec une moyenne de 1523 mm/an, la demande climatique est la plus importante en Juillet- août (7.7mm/j). Par contre, c'est en décembre, janvier que l'ETP est la plus faible (1.4mm/j). On comparant l'évapotranspiration aux précipitations moyennes, on remarque un déficit hydrique durant toute l'année avec un déficit annuel de 1523 mm. Le recours à l'irrigation est donc obligatoire pour subvenir aux besoins en eau des cultures.

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Année
PENMAN	44	60	99	137	174	198	231	232	153	98	55	39	1523

Tableau n°07 : Evapotranspiration potentielle (moyenne sur 25ans) de la station de Relizane

2.4. - le diagramme ombrothermique

le diagramme ombrothermique de la station de l'ANRH de Relizane pour la période de 1988 à 2006(figure04) révèle l'existence de deux périodes :

- Une période sèche de sept mois qui s'étale de mi-mars à mi-octobre. Cette période se caractérise par une forte demande en eau d'irrigation pour satisfaire les besoins des cultures.

- une période humide de cinq mois qui s'étale de mi-octobre à mi-janvier. Au total, 240 jours par année moyenne sont biologiquement secs pour l'ensemble de l'année alors que la période la plus xérique s'étale entre juin et septembre

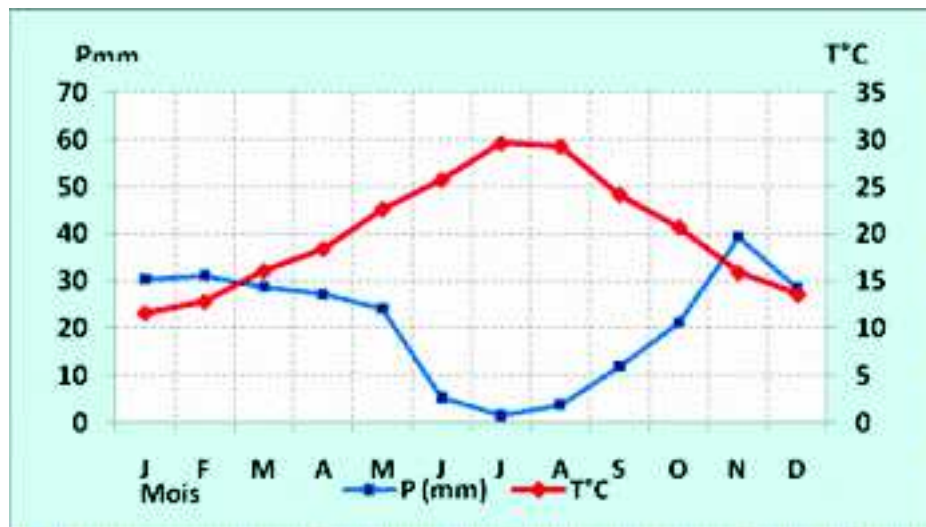


Figure n°04 : Diagramme ombrothermique de la station de Relizane (1988 à 2006).

2.5. - L'indice d'aridité de Demartone

Demartone (1923) a permis de préciser le climat d'une région en évaluant un indice donné par la formule suivante :

$$I = P / T + 10$$

Avec :

I : l'indice d'aridité annuelle,

P : précipitation annuelle (mm),

T : température moyenne annuelle (°C),

Si $7,5 < I < 10$, le climat est steppique,

Si $10 < I < 30$, le climat est semi aride,

Si $30 < I < 50$, le climat est tempéré.

La précipitation annuelle est de 253,3mm.

La température moyenne annuelle est de 20,07°C

On appliquant cette formule : $I_a = 253,3 / (20,07 + 10) = 8,42$.

Donc la valeur de l'indice annuel d'aridité (I_a) de Demartone, déterminée à partir des données de la station climatique de Relizane, classe la région dans l'étage bioclimatique steppique. Ce type de climat illustre bien les cycles de sécheresses qu'a connu la région durant ces dernières 20 ans et qui s'est répercuté sur la disponibilité des ressources en eau de surface qui n'assure plus qu'une fraction des besoins en eau des cultures.

2.6. - Autres caractéristiques climatiques

Du fait de la continentalité du climat de la région, le risque de gelée existe pendant une période de l'année. Le nombre de jours de gelées blanchâtres est de 40 jours par an. Le sirocco est particulièrement important. Il se manifeste en été surtout en juillet et août. On estime à 20 jours le nombre moyen de jours de sirocco par an. Le vent caractérisé par sa

direction, sa force et sa fréquence constitue un facteur climatique important pour la mise en valeur agricole d'un périmètre. Les vents froids dominent la région sud à sud-est entre septembre et avril. Ils se caractérisent par des vents chauds dans la région ouest entre mai et août.

3. - La géologie

Le périmètre de la Mina est une zone déprimée délimitée au sud et à l'est par les monts de l'Ouarsenis et au nord et à l'ouest par les monts du Dahra et de Belahcel (figure05). Du point de vue géologique, le substrat de base dans la vallée alluviale de l'oued Mina est de formation argileuse sur laquelle se sont déposés des sédiments récents alluviaux assez hétérogènes (Boulaine, 1957). Le matériel alluvial dont se sont formés les sols de la vallée provient de formations géologiques salées (marnes du pliocène, marnes blanches et bleues, argile helvétique, etc) dont le transport et le dépôt ont été assurés essentiellement par les oueds Mina et Yellel. La plaine de la Mina est bordée au sud et à l'est par des massifs érodés de marnes miocènes (du Helvétien) à petits cristaux de gypse. A l'ouest, la vallée est bordée par les collines de Relizane, formées de grès et de poudingues.

La partie sud-ouest de la région d'Oued Djemââ est bordée par des affleurements de marnes et d'argiles miocènes qui se raccordent à la plaine de Relizane par un glacis de piedmont ancien recouvert d'une croûte calcaire. L'est et le sud-est des monts environnants sont formés de marnes et d'argiles miocènes (tortoniennes). Au nord, la plaine d'Oued Djemaa est limitée par des terrains salés situés au nord de la sebka de Ben-Ziane. La présence des marnes miocènes est une source potentielle de sels solubles et de gypse qui concentrent encore plus la solution du sol.

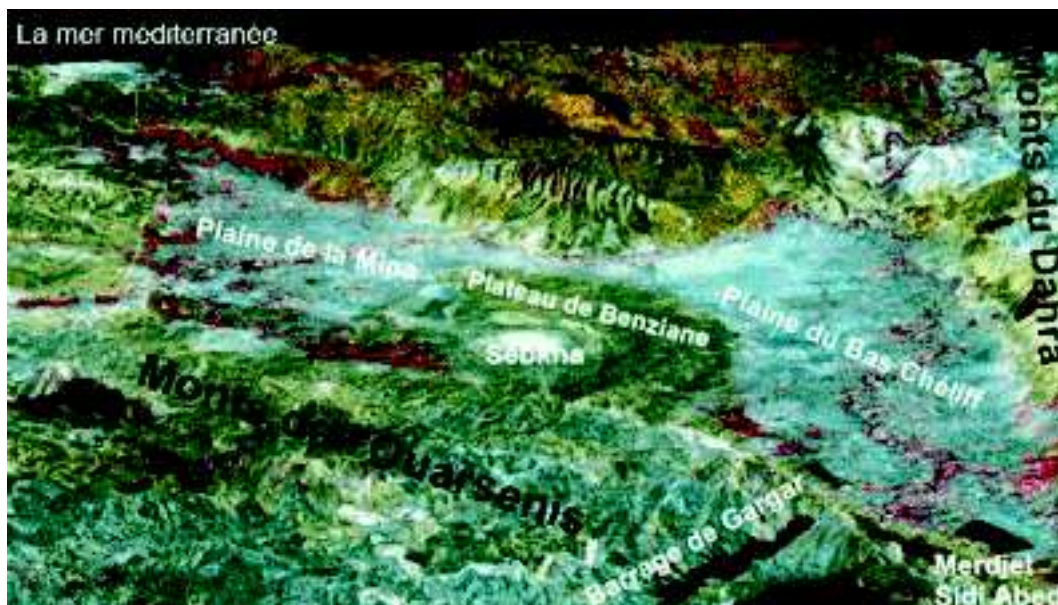


Figure n°05 : Principales unités morphologiques (INSID, 2005)

4. - La géomorphologie

Selon Boulaine (1957), on distingue deux principales formations géomorphologiques dans la plaine de la Mina:

a. Les glacis de piedmont : ce sont des formations colluviales de piedmont s'appuyant sur des versants, de topographie régulière ou peu ondulée, se raccordant en aval à des formations colluviales d'âge différent ou à des alluvions. Ce sont des formations recouvertes d'une croûte calcaire épaisse et durcies du quaternaire ancien.

Les glacis encroûtés entourent la plaine de Yellel, la plaine de Touila khaourara et forment le piedmont en bordure de la plaine de l'Oued Djemaa. A ces glacis peuvent être emboîtés vers l'aval des glacis colluviaux plus récents portant des sols à encroûtement calcaire en profondeur ou présentant une accumulation de calcaire sous forme de nodules ou amas friables apparaissant vers 60 cm de profondeur.

b. Les alluvions : il s'agit de formations déposées par les oueds de Yellel, Mina, Malah et Djemaa dans les plaines. La texture de ces alluvions est variable et est sous la dépendance de la lithologie de l'arrière pays drainé vers la plaine.

Dans les zones basses, les alluvions deviennent plus argileux, les sols de la rive gauche de l'oued Mina sont de texture moyenne, ils deviennent de texture fine et sont mal structurés dans la rive droite. Les alluvions salées sont localisées dans la vallée de l'oued Malah, la plaine de Khaourara, la plaine de la Mina et la partie sud de la sebkha de ben Ziane (Action de la nappe phréatique salée dans certaines zones et ravinement de la colline argileuse salée bordant la sebkha de Ben-Ziane à l'ouest).

5. - hydrologie et hydrogéologie

Selon SOGREAH (1985), le potentiel mobilisable en eau souterraine est de l'ordre de 12 millions m³/an. Les eaux souterraines de la plaine de la Mina sont considérées comme l'un des principaux agents du développement agricole de la région grâce à sa disponibilité dans le temps et dans l'espace. Vu la demande en eau pour l'irrigation elles sont actuellement en surexploitation et le nombre de points d'eau (généralement illicites) s'est multiplié.

On distingue deux types de nappe du complexe alluvio-plio-quaternaires :

- Les nappes superficielles libres contenues dans les formations alluvionnaires du quaternaire récentes. Elles sont utiles pour l'irrigation et localement pour les besoins d'alimentation en eau de quelques habitations éparses dans la plaine de la Mina. D'après Aubert (1976), il n'y a pas une seule nappe continue, mais plutôt une série de nappes dont le cloisonnement dépend surtout de la constitution physique des alluvions. La notion d'une nappe unique ne correspond pas à la réalité ; il y a autant de niveaux aquifères que de niveaux relativement perméables.

- Les nappes profondes captives contenues dans les formations plio-quaternaires.

Le réseau hydrographique est constitué par deux oueds principaux qui drainent la plaine de la Mina. L'oued Yellel à l'ouest et oued Mina au centre. Ce dernier reçoit un affluent salé (oued Malah) au sud du périmètre. Les lits de ces oueds sont encastrés dans la terrasse alluviale récente à un niveau inférieur à 10 m avec des bords escarpés et très abrupts. Ces oueds sont pratiquement à sec pendant la période estivale.

6. - Les sols

D'après la carte des sols d'Algérie (Durand, 1956), le périmètre de la Mina se caractérise principalement par la présence des sols de texture fine potentiellement salinisables alluviaux ou alluviaux-colluviaux. Les sols déjà irrigués sont effectivement affectés par la salinité. Les sols sont regroupés dans différentes classes pédologiques selon la classification française (CPSC, 1967) (figure06). On peut retrouver les sols peu évolués, les sols halomorphes, les sols calcimagnésiques et les vertisols. Tous ces types de sols présentent, à des degrés divers, de fortes teneurs en éléments fins liés à l'origine des alluviaux, des caractères vertiques, des teneurs élevées en sels et des taches d'hydromorphie dans le profil.

Les sols salés et alcalins occupent d'importantes surfaces (environ 60% de la totalité du périmètre) et se situent dans la partie nord du périmètre. D'après Boulaïne (1957), ce sont les solontchaks inertes et les hyposolontchaks qui dominent. Les sols calci-magnésiques, les sols très évolués et les sols hydromorphes sont localisés.

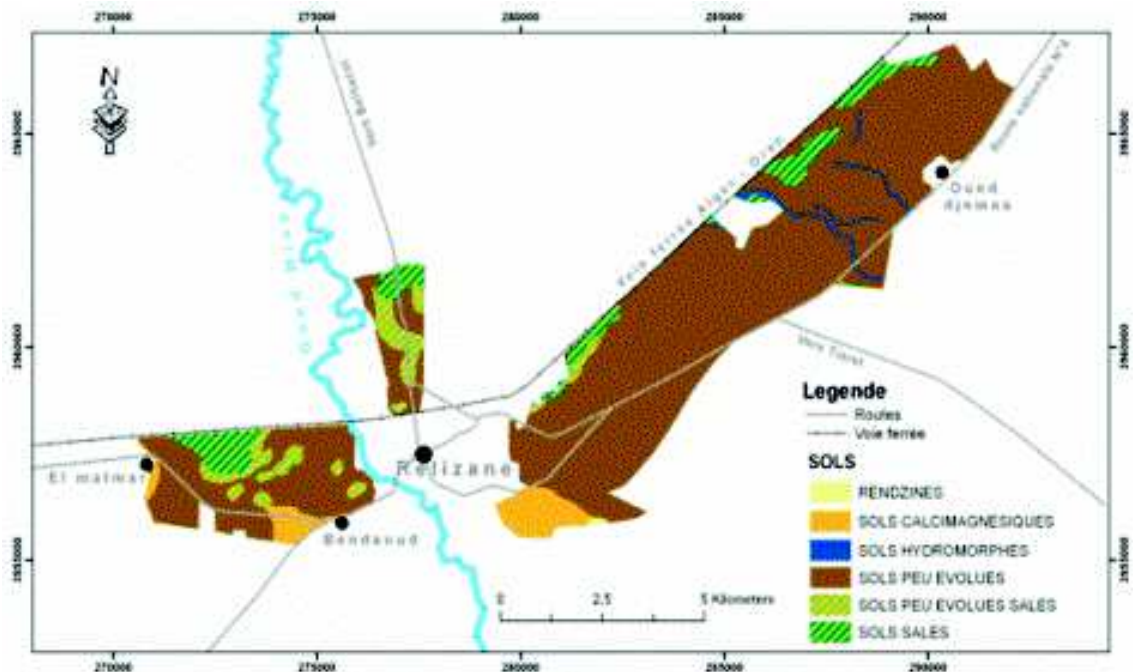


Figure n°06: Carte des sols du périmètre de la Mina (INSID, 2008 ; Extrait de la carte des sols Durand, 1956)

7. - Occupation du sol

La situation de référence établie en 2008 sur la base des données recueillies dans le cadre de projet de l'INSID sur une superficies prospectée de 5976 ha (figure07) révèle que les superficies irriguées au niveau du périmètre se situent autour de 3856 ha sur les 6245 ha que compte le périmètre actuel et qui se répartissent entre les différentes spéculations (Tableau08). Les terres nues sont généralement très salées et occupées par une végétation naturelle de type halophyte (photo01).

Occupation du sol	Pourcentage %	Superficies (ha)
Céréales/jachère	46	2749
Arboriculture fruitière	33	1973
Olivier	08	479
Maraichage	04	239
Pépinière	01	60
Végétation halophyte	07	419
Totale	100	5976

Ta bleau n°08 : Répartition de l'occupation du sol entre les différentes spéculations (INSID, 2008).

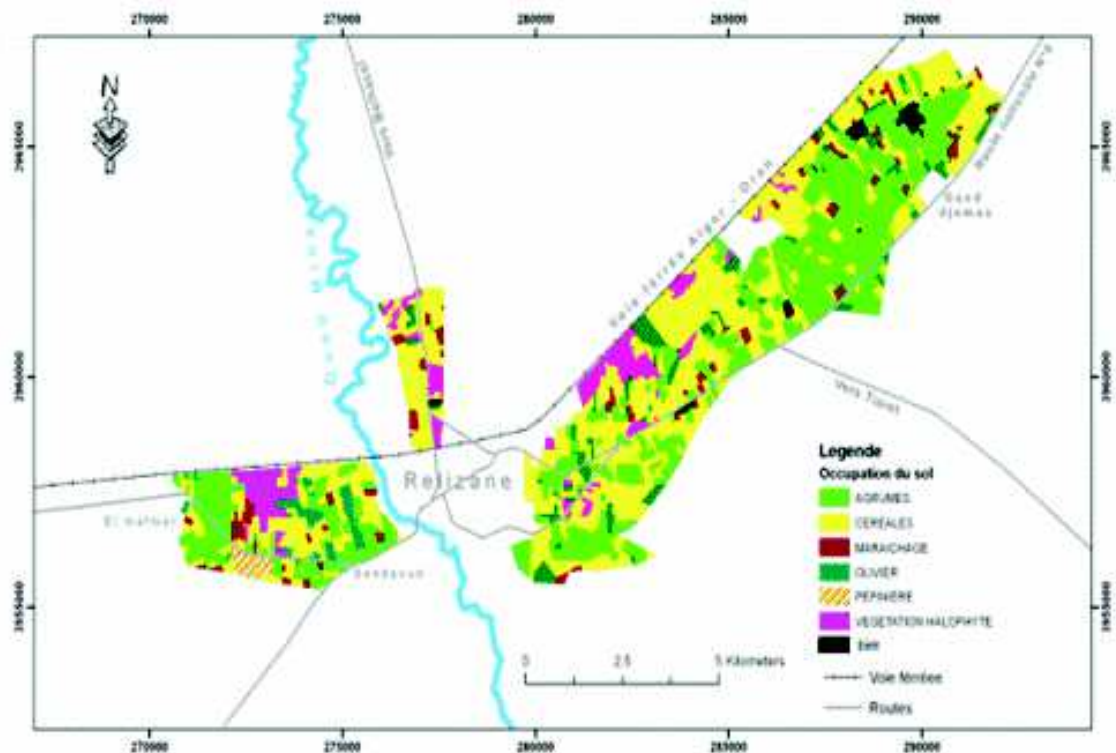


Figure n°07 : Carte d'occupation du sol au niveau du périmètre de la Mina (INSID, 2008)

Actuellement, le périmètre d'extension de l'ordre de 9000 ha n'est pas entièrement exploité, il a bénéficié de 1200 ha équipés mais non encore mis en service. La culture dominante au niveau du périmètre est la céréaliculture (6000 ha). Le reste est laissé essentiellement en jachère.



Photo n°1 : Sols salés occupées par des espèces halophytes Salsola et Atriplex

8. - Réseau d'irrigation

L'état de dégradation très avancée du réseau d'irrigation constitué de canaux à ciel ouvert d'une longueur de 172 Kms du périmètre de la Mina est la cause principale des pertes en eau qui dépassent les 40% lors de son transport vers les parcelles (AGID, 2002). Au niveau du périmètre, l'irrigation est assurée par un réseau de distribution alimenté à partir du barrage Sidi M'hamed Benaouda qui a une capacité de 225 Hm³. L'adducteur de la rive droite du périmètre en canal auto porté fait transiter l'eau au niveau des parcelles par des canaux secondaires et tertiaires (AGID, 2002).

La conductivité électrique de l'eau au niveau du barrage Sidi m'hamed ben aouda se situe entre 1.28 et 2.02dS/m pour la période allant de 1996 à 2002 et de 2005 à 2006 (Tableau09). on constate une légère augmentation de la salinité pour les années 2005 à 2006 au niveau de ce barrage. La moyenne générale de cette période est de 1.48dS/m, soit l'équivalent de 0.94g/l.

Période	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2005	2006
CE(dS/m)	1.28	1.33	1.44	1.64	1.59	1.29	1.33	1.71	1.76

Tableau n°09 : conductivité électrique de l'eau du barrage Sidi M'hamed Ben Aouda (INSID, 2008)

Selon le diagramme de classification du Laboratoire de Riverside (ussl, 1954), cette eau appartient à la classe S1 C3 (tableau10). C'est une eau de qualité moyenne à médiocre à utiliser avec précaution dans les sols lourds et qui nécessite le drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.

Ech. d'eau	Cations (még / l)				Anions (még / l)				SAR	Qualité de l'eau
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻		
2005	5.69	0.08	4.68	5.21	7.9	7.71	0.62	0	3.46	S1 - C3
2006	4.82	0.26	4.9	7.8	8.4	8.25	0.86	0.2	1.38	S1 - C3

Tableau n°10 : Bilan ionique de l'eau du barrage Sidi M'hamed Ben aouda (INSID, 2008)

Devant le manque accru en eau du barrage, les agriculteurs ont eu le recours à l'utilisation de l'eau de forages pour combler le déficit. Néanmoins, ces derniers ont été réalisés pour la plupart d'une manière illicite et leur eau est de mauvaise qualité. L'analyse de l'eau de quelques forages au niveau de la zone d'étude (tableau11) révèle que la conductivité électrique se situe entre 5.3dS/m et 15dS/m. Ces résultats confirment bien la mauvaise qualité de ces eaux.

Echantillon d'eau	CE dS/m	TDS g/l
Forage 1	5.57	3.51
Forage 2	5.34	3.36
Forage 3	7.67	4.83
Forage 4	15.06	9.48

Tableau n°11 : conductivité électrique de l'eau de quelques forages au niveau du Périmètre de la Mina (INSID, 2008)

L'examen des bilans ioniques de l'eau de ces forages (Tableau12) en fonction du diagramme de classification de laboratoire de Riverside (ussl, 1954) montre que la qualité de l'eau des forages 1 et 3 appartient à la classe S3 C5. Cette eau est déconseillée pour l'irrigation. Pour les forages 2 et 4 la qualité de l'eau appartient à la classe S2 C5. Cette eau est de qualité très mauvaise a utilisée que pour les circonstances exceptionnelles.

Ech. d'eau	Cations (még / l)				Anions (még / l)				SAR	Qualité de l'eau
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻		
Forage 1	60.56	0.01	3.01	10.22	55.6	15.85	0.24	0.24	23.54	S3 - C5
Forage 2	34.5	0.11	5.43	13.86	37.6	15.69	0.6	0.2	11.11	S2 - C5
Forage 3	52.26	0.12	1.85	8.59	51.2	8.59	0.7	0.24	22.87	S3 - C5
Forage 4	48.28	0.09	5.84	14.69	48.8	18.91	0.6	0.16	15.07	S2 - C5

Tableau n°12 : Bilan ionique de l'eau de quelques forages au niveau du périmètre de la Mina.

9. - Réseau de drainage

Au niveau du périmètre de la Mina, le réseau de drainage est évalué à 356 Kms de longueur dont 60% sont envasés. Ce phénomène rend le drainage inefficace et, au contraire, il aggrave la salinisation. La plupart des drains est enherbée au fond et fait l'impression d'être abandonnée (Photo n°02) d'où l'augmentation de la salinité du sol entraînant ainsi, un déclassement des terres d'année en année (INSID, 2008).

L'état actuel révèle une densité insuffisantes et une faible profondeur des drains, surtout dans les parties basses du périmètre (présence des sols lourds) ou on constate des accumulations des sels en surface et dans la zone racinaire. Cette accumulation est fréquemment liée à un phénomène de remontée capillaire a partir d'une nappe phréatique

salée et peu profonde. La nappe phréatique se situe entre 1 et 2 m de profondeur et 3 à 6 m en d'autres endroits. Devant cette situation, le rabattement du niveau de l'eau indispensable dans les sols salés devient inexistant. Les profils des drains existants devraient être donc approfondis et curés au préalable.



Photo n°02 : Drain primaire complètement enherbé (INSID, 2008)

10. - Pratiques agricoles et modes d'irrigation

Dans la plaine de la Mina, avec un climat semi-aride d'une pluviométrie de 230 mm/an et une évapotranspiration de 1500 mm/an, le recours à l'irrigation pour la majorité des cultures est indispensable. La rareté de l'eau qui dure depuis une vingtaine d'années a contraint les agriculteurs à utiliser de plus en plus les eaux souterraines. Cette pratique s'est encore accrue au cours de ces dix dernières années qui ont vu la multiplication des puits et des forages. A titre d'exemple, la superficie réservée à l'artichaut, culture par excellence de la plaine, est passée de 5000 ha à 1200 ha actuellement. Le recours à l'eau souterraine pour l'irrigation n'a pas été sans conséquence sur la dégradation des sols (Douaoui et al, 2004). En effet, le manque d'eau a poussé les agriculteurs à utiliser des eaux souterraines souvent très chargées et à abandonner la pratique du drainage. Ceci a entraîné une augmentation des teneurs en sel et dans certains cas une détérioration de l'état structural du sol.

L'examen de la situation actuelle au niveau du périmètre de la Mina illustre bien la présence de contraintes majeures:

Le périmètre de la Mina se caractérise par un climat continental du fait de sa position en cuvette entourée par des massifs montagneux. Ce climat se caractérise par une période de sécheresse estivale prononcée et souffre d'un déficit pluviométrique qui confère à l'irrigation un caractère obligatoire.

La correspondance entre les fortes températures et la faible pluviométrie indique le caractère méditerranéen du climat de la région de Relizane. La grande différence entre les températures moyennes de l'été et celles de l'hiver traduit bien la continentalité du climat de la région. Le matériel alluvial dont sont formés les sols provient de formations géologiques

salés (marnes du pliocène, marnes blanche et bleu, argile helvétique) transportées par les oueds Mina et Yellel.

Il existe une grande diversité de cultures dans le périmètre actuel et d'extension dont 15% environ sont en irrigués. Les cultures prédominantes sont la céréaliculture et l'arboriculture qui se situent dans les zones favorables, et des halophytes dans les zones non cultivés. L'irrigation du périmètre est essentiellement gravitaire à partir du barrage de Saada et les forages.

Le réseau de drainage est défectueux et ne remplit pas son rôle. La mauvaise qualité de l'eau irrigation des forages augmente le risque d'une salinisation secondaire des sols lourds

Chapitre III. Matériels et méthodes

1. - La zone d'étude

La zone d'étude fait partie du périmètre de la Mina. Elle se situe entre la sortie du chef lieu de la wilaya de Relizane et la commune d'Oued Djemaa et de part et d'autre de la route nationale N°04 qui mène vers Alger. Elle couvre une superficie de 1256 ha et constitue la partie est du périmètre irrigué de la Mina (figure 08).

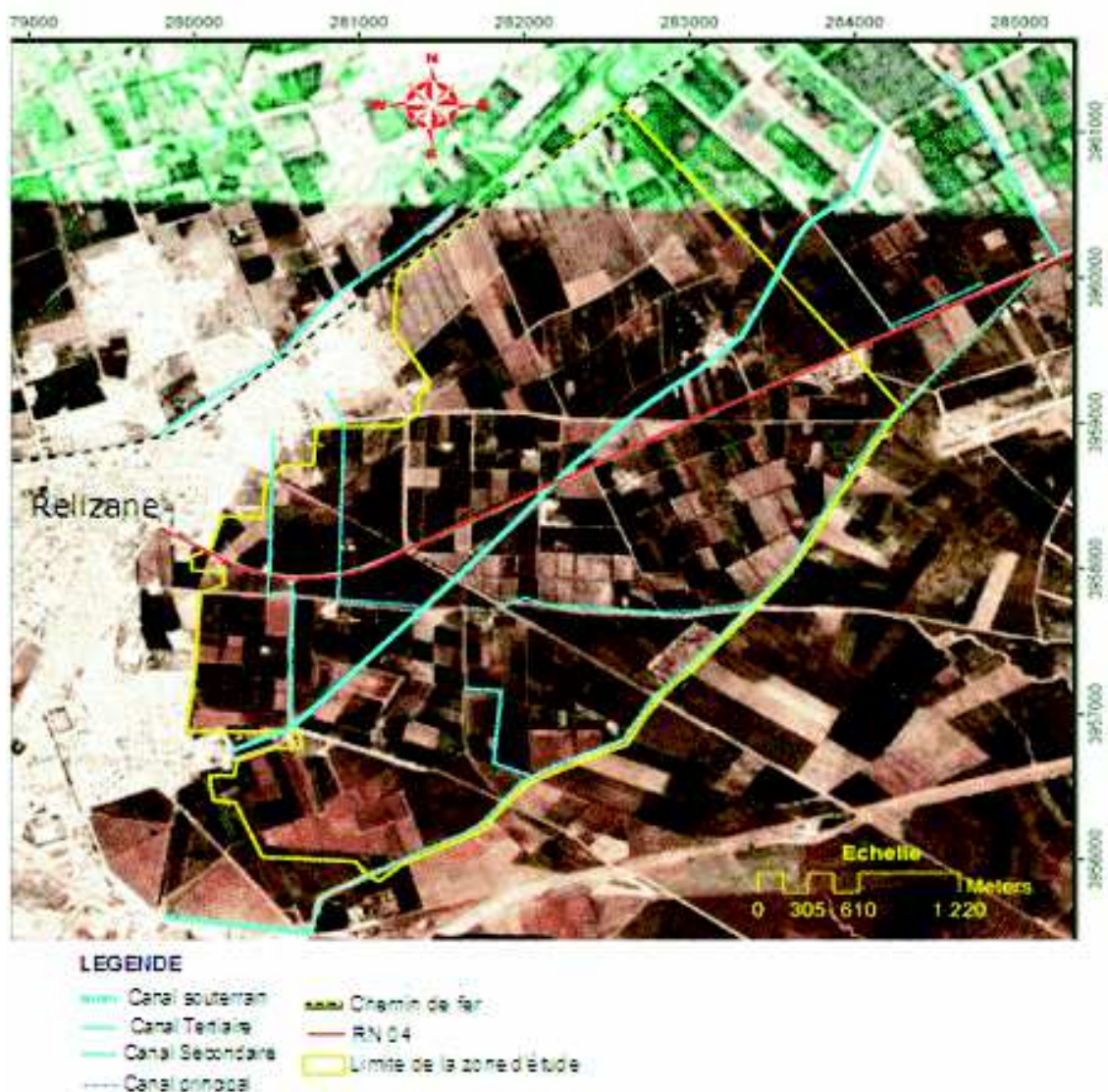


Figure n°08 : Vue générale de la zone d'étude (Google earth, 2008)

Les coordonnées géographiques des quatre points délimitant la zone étudiée sont les suivantes :

Longitude (WGS 84) N: 35°46'14.7" 35°43'53.6" 35°45'08.18" 35°43'20.2"
 Latitude (WGS 84) E: 0°35'42.3" 0°34'01.8" 0°36'51.42" 0°34'48.8"
 Altitude (mètre) Z: 56 84 76 79

La zone d'étude est légèrement ondulée et son altitude varie entre 50 et 80 mètre avec des pentes qui dépassent rarement les 3%. Les sols peu évolués caractérisent la zone d'études, leurs formations sont dues aux matériaux d'apport provenant des collines sud environnantes ou charriés par des oueds (oued Mina). Les sels issus de l'amont proviennent souvent des roches triasiques salifères. L'existence d'un système de drainage défaillant avec la présence d'une texture généralement argileuse ont participé à l'apparition de zones dont la productivité agricole est devenue faible ou nulle. La carte d'occupation du sol de la zone d'étude (figure 09) a été élaborée à l'aide d'un GPS sur une image satellitaire fusionnée de 15 m de résolution.

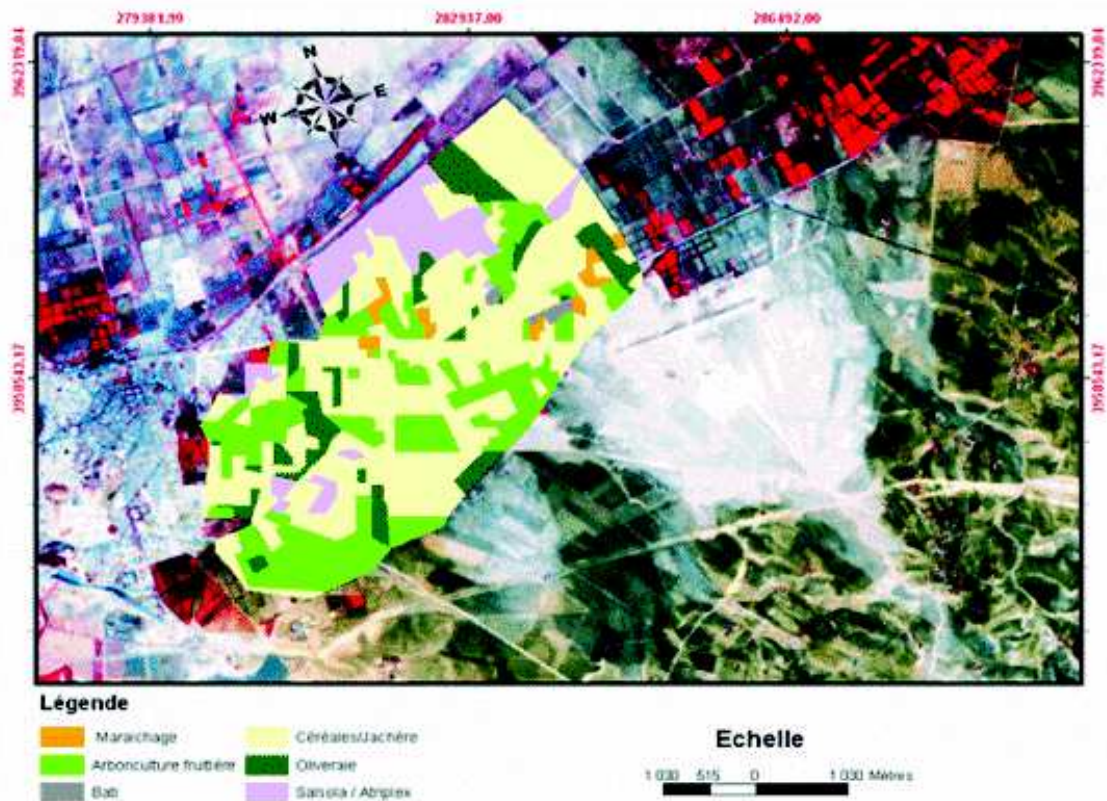


Figure n° 09 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude (INSID, 2008)

Dans la zone d'étude, la végétation naturelle est de type halophyte, elle occupe les cuvettes argileuses riches en sels minéraux (chlorure et sulfate de sodium). Les espèces dominantes sont Suaeda fructosa, Salicornia fructosa, Salsola Kali, Atriplex Halimus et Atriplex Mauritanica.

Les principales spéculations agricoles pratiquées dans la zone d'étude sont la céréaliculture, l'arboriculture, l'oléiculture et le maraîchage. La répartition des différentes cultures existantes au niveau de la zone d'étude est illustrée dans le tableau13

Occupation	Superficie (ha)	Superficie (%)
-Arboriculture	335.75	24
-Oliviers	204.35	12
-Céréales/Jachère	654.45	49
-Maraîchage	30.48	8
-Salsola /Atriplex	28.54	7
Totale	1256	100

Tableau n°13 : Occupation du sol par les différentes spéculations agricoles et végétations naturelles (INSID, 2008).

2. - Approche méthodologique

Pour caractériser la répartition spatiale de la salinité au niveau de la zone d'étude, nous avons adopté la démarche méthodologique développée par Corwin et Lesch(2003) :

- Mesure et géo référencement de la conductivité électrique apparente du sol sur terrain en modes horizontal et vertical en utilisant le GPS et l'EM38;
- Prélèvement des échantillons du sol selon la variation des lectures de l'EM38 ;
- Détermination de l'influence des propriétés du sol sur la conductivité électrique apparente du sol CEa pour l'étalonnage de la conductivité électrique de l'extrait saturée CEps;
- Utilisation de l'approche stochastique pour la spatialisation.

2.1. - Evaluation de la salinité par induction électromagnétique

Le concept d'utilisation de l'induction électromagnétique pour mesurer la conductivité électrique apparente du sol sur le terrain remonte aux années 50 dans le domaine géologique et hydrogéologique (Belluigui, 1948; Wait, 1957, 1955,1982 cités par Nogués et al, 2006). Les méthodes d'induction ont été utilisées par la suite pour les prospections des métaux et ensuite pour l'exploration industrielle du pétrole (Frischknecht, 1966 cité par Nogués et al, 2006). De jong et al (1979) ont utilisé le premier instrument non destructif dans le domaine de l'agriculture (Nogués et al, 2006).

Actuellement, cette technique est très utilisée dans la cartographie de certains paramètres physiques et chimiques avec lesquelles la conductivité électrique apparente du sol est corrélée (la salinité, l'humidité, la teneur en argile, la CEC, la nature d'argile, la taille et la distribution des pores dans le sol et la température). De plus en plus, des applications ont été identifiées dans l'agriculture de précision pour déterminer le statut nutritif et le rendement potentiel des sols (Corwin et Lesch, 2003; Corwin et al, 2003 cités par Robinson et al, 2004).

Avec le développement de l'agriculture de précision, les données de la conductivité électrique apparente du sol se sont avérées être liées à un certain nombre de propriétés du sol.

Kachanoski et al (1988) et Sheets et Hendrickx (1995) ont estimé la teneur en eau dans le sol, la CEC, le Ca⁺⁺ et le Mg⁺⁺ échangeables par la mesure de la CEa.

Corwin et Rhoades (1982), Wollenhaupt et al (1986), Hendrickx et al (1992), Lesch et al (1995a, 1995b), Rhoades et al (1999) et Triantafyllidis et al, (2000,2002) cités par Nogués et al, (2006) ont estimé la salinité par la conductivité électrique apparente CEa. Selon Williams et Baker (1982), dans les sols salés, la majeure partie de la variation de la CEa (environ 65%) peut être liée à la concentration en sels (Sudduth et al, 2003). D'après Rhoades et al (1976) et Kachanoski et al (1988), dans des sols non salés, les variations de la conductivité électrique sont principalement fonction de la texture du sol, de l'humidité et de CEC.

Si les variations de la CEa dues à une propriété de sol sont beaucoup plus grande que celles attribuables à d'autres facteurs, alors la CEa peut être calibrée comme mesure directe de ce facteur dominant (Sudduth et al, 2003). Lesch et al (1995) ont utilisé cette approche de calibrage pour mesurer les variations de la salinité dans un champ où la teneur en eau, la densité apparente et d'autres propriétés de sol sont relativement homogènes. Le conductimètre électromagnétique EM38 (Géonics Ltd, Mississauga, DESSUS, Canada) est parmi les outils géophysiques les plus souvent utilisés en agriculture.

2.1.1. - L'EM38, Géonics TD

Le conductimètre utilisé dans cette étude est l'EM38. Produit par Géonics Ltd (Ontario, Canada), cet appareil léger est très pratique et s'utilise in situ sans perturber le sol dès son contact avec le sol (Mc Neill, 1980 cités par bovin et al, 1989). L'EM38 est une barre légère conçu au début pour être porté à la main. Par la suite, cet appareil a été assemblé à un système mobile pour permettre l'acquisition rapide des données. Ce système est composé par un chariot ou un traîneau pour transporter la sonde, un véhicule de remorquage, un convertisseur analogique numérique, et un récepteur de GPS (Sudduth et al, 2001).

Le conductimètre électromagnétique EM38 a des avantages et des inconvénients. Il exige à l'utilisateur de remplir un procédé quotidien de calibrage avant l'emploi. Les changements des conditions ambiantes telles que la température de l'air, l'humidité et l'électricité atmosphérique peuvent affecter la stabilité de ces mesures (Sudduth et al, 2003).

Sudduth et al(2001) ont rapporté que le rendement de l'EM38 pourrait dériver à près de moins de 3 mS/m et que cette dérive n'a pas été uniformément liée aux conditions ambiantes. Ils ont proposé que la compensation de dérive soit accomplie au moyen d'un transect de calibrage ou par le recalibrage fréquent de l'EM38. De même, cette méthode peut donner une excellente résolution latérale suivant la maille de mesure utilisée. Les mesures sont aussi perturbées par la proximité de tuyaux métalliques, lignes électriques à haute tension, de clôtures, de véhicules et d'engins (Job et al, 1987).

2.1.2. - Principe de fonctionnement de l'EM38

L'EM38 possède deux spires, une spire émettrice et une autre réceptrice séparé de un mètre (figure10). Les deux cadrants disposés verticalement permettent la lecture des résultats jusqu'à 1000 mS/m lorsque l'axe des spires est maintenu horizontalement ou verticalement. La fréquence d'excitation est de 14.6kHz (Job et al, 1987).

La première spire envoie dans le sol un champ magnétique primaire H_p constant induisant des courants qui s'y propagent d'autant mieux que le milieu est plus conducteur. Ces courants créent à leur tour un champ magnétique secondaire H_s proportionnel à la surface des lignes de courants, donc à la conductivité électrique du sol. Par la suite, ce champ est capté par un solénoïde récepteur qui le transforme en réponse galvanométrique (Corwin et Lesch, 2003).

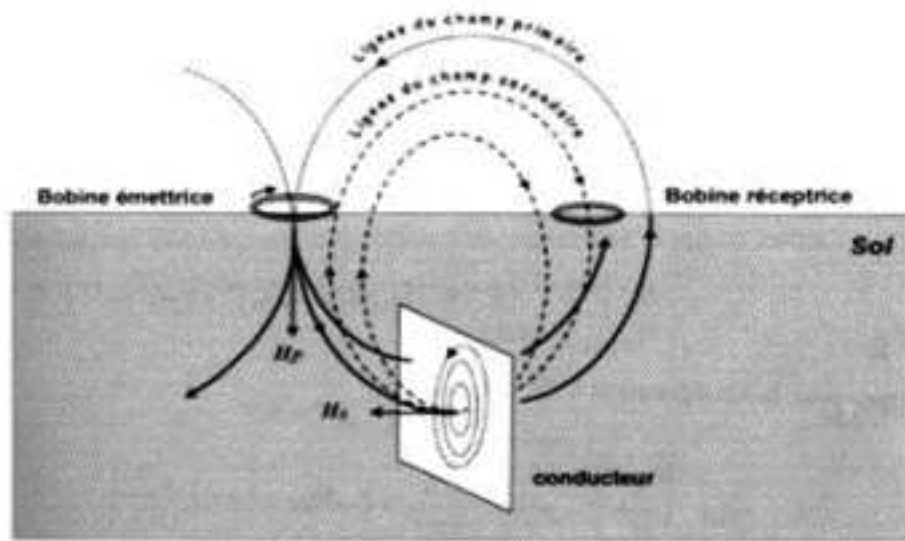


Figure n°10 : Principe de fonctionnement du conductivimètre électromagnétique

McNeill (1980) a démontré que si l'on choisi convenablement la fréquence f et l'écartement des spires (s), la conductivité électrique apparente peut s'écrire comme suit :

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu (s)^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right)$$

σ_a : Conductivité apparente du sol (mS m),

μ^e : Permittivité de l'air,

S : Distance interspire,

$\omega = 2\pi f$ et f : fréquence (Hz),

H_p : Champ émet par S_p ,

H_s : Champ reçu par S_s (milieu mesuré)

Soit : $\sigma_a = k^* (H_s / H_p)$

K étant une constante dépendant de la construction de l'appareil. Donc, la conductivité électromagnétique notée CE_a est liée linéairement au rapport (H_s/H_p) qui est donnée par l'appareil.

2.1.3. - Positions verticale et horizontale

La contribution d'une couche élémentaire de sol située à une profondeur z au champ secondaire H_s est une fonction non linéaire de la profondeur, notée : $d\hat{O} = dH_s / H_s$. Elle peut se faire de deux manières selon l'orientation des grands axes des solénoïdes de départ,

soit perpendiculaire à la surface du sol, mesure notée $\hat{O}_v(z)$, soit parallèle à celui-ci $\hat{O}_h(z)$, l'appareil étant alors horizontal (Job et al, 1987) (figure11).

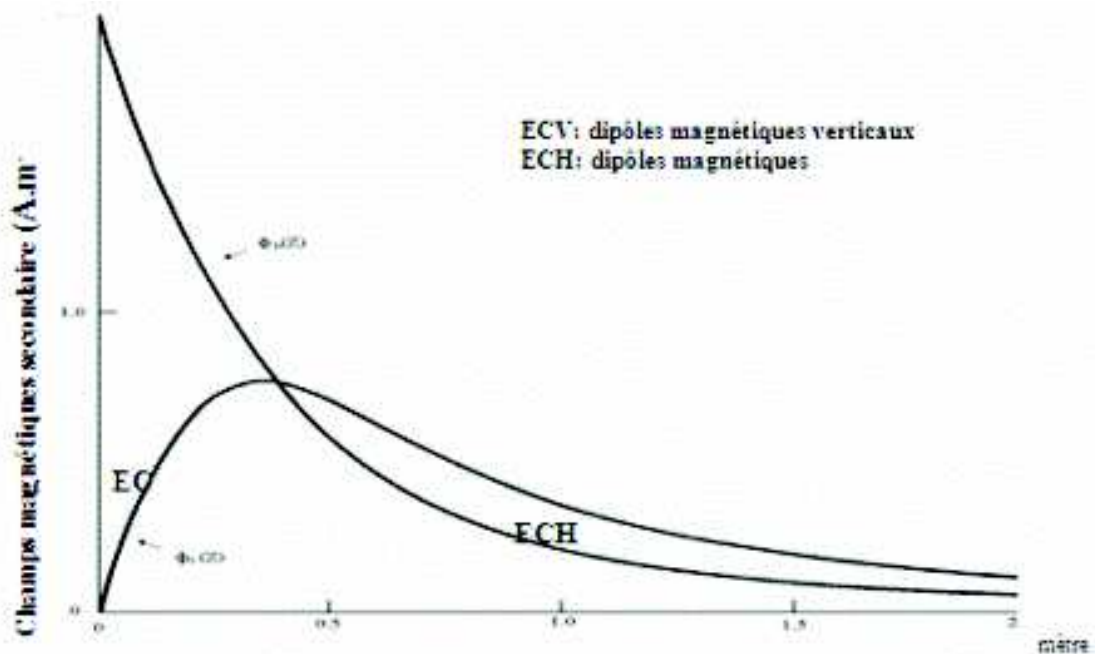


Figure n° 11 : Contribution relative d'une couche de sol au champ secondaire suivant sa profondeur dans le sol : \hat{O}_v en mode vertical, \hat{O}_h en mode horizontal (Corwin et Lesch., 2003).

On peut donner l'expression de $\hat{O}(z)$ entre $z = 0$ et $z = 2$ m, profondeur maximum explorée par chaque point de mesure, on dispose donc de deux valeurs (McNeill, 1980):

$$\begin{aligned} \hat{O}_v(z) &= 4z(4z^2+1)^{3/2} \\ \hat{O}_h(z) &= 2-4z/(4z^2+1)^{1/2} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad R_x(x) = \int_z^{\infty} \hat{O}_x(z) dz \quad \begin{cases} \rightarrow R_v(z) = 1/(4z^2+1)^{1/2} \\ \rightarrow R_h(z) = (4z^2+1)^{1/2}-2 \end{cases}$$

$\hat{O}_v(z)$ et $\hat{O}_h(z)$ sont respectivement les CEv et CEh qui représentent une conductivité électrique apparente globale du sol notée CEa.

$R_v(z)$ et $R_h(z)$ représentent la contribution à la lecture de l'EM de la couche de sol entre la surface et la profondeur normalisée z . Selon la théorie, ces deux équations sont valables pour un milieu homogène quant à la nature du sol, sa porosité et sa teneur en eau et en sels.

En position horizontale (photo3), la réponse de l'instrument à la CEa peut aller jusqu'à 0.75m de profondeur avec une grande sensibilité à l'approche de surface. En position verticale (photo n°3), elle est donnée jusqu'à une profondeur de 1.5m et atteint son maximum à 0,4 m comme fonction non linéaire de la profondeur (McNeill,1992). Les réponses mesurées sont en fonction de la conductivité du sol. Cette fonction est linéaire si la CEa est inférieure à 10dS/m (Nogués et al, 2006).



Photo n°3 : modes Vertical à gauche et Horizontal à droite (INSID, 2008).

En prenant une série de mesures à différentes hauteurs, en mode horizontal et en mode vertical, il est possible d'obtenir une image stratification des horizons salés à condition qu'il y ait une nette différence entre les horizons (Mac Neill, 1980).

2.1.4. - Influence des paramètres pédologiques

L'étude de l'influence des paramètres pédologiques sur la variation de la conductivité électrique apparente CEa du sol a fait l'objet de plusieurs recherches pour l'étalonnage de la CEa. Rhoades (1989) a présenté le modèle suivant de la CEa :

$$EC_a = \left[\frac{(\theta_{ss} + \theta_{ws})^2 \cdot EC_{ws} \cdot EC_{ss}}{\theta_{ss} \cdot EC_{ws} + \theta_{ws} \cdot EC_s} \right] + (\theta_w - \theta_{wz}) \cdot EC_{wz} \dots (1)$$

Où:

$\theta_w = \theta_{wz} - \theta_{wz} =$ Teneurs en eau volumique totale (cm^3 / cm^3),

$\theta_w = (PW \cdot \tilde{n}_s) / 100$,

$\theta_{wz} = 0.639 \theta_w - 0.0011$,

$\theta_{ss} = \tilde{n}_s / 2.65$,

$EC_{ss} = 0.019 (SP) - 0.434$,

$EC_w = [(EC_e \cdot \tilde{n}_s \cdot SP) / 100 \cdot \theta_w] \dots (2)$

Où PW: Pourcentage en eau contenue dans le sol,

\tilde{n}_s : Densité apparente du sol,

$EC_w = EC_{wz} = EC_{wz}$

EC_e : Conductivité électrique de l'extrait saturée (dS/m).

En remplaçant l'équation (2) dans l'équation (1), la CEa devient alors une fonction qui depend des propriétés physiques et chimiques du sol (la salinité, le pourcentage de saturation, la densité apparente et la teneur en eau).

La salinité est considérée comme le facteur le plus dominant qui influe sur la variation de la CEM par de nombreux auteurs (Cameron et al., 1981; Corwin et Rhoades, 1982 ; Boivin et al., 1989; Lesch et al., 1995b; Ceuppens et al., 1997 ; Rhoades et al., 1999). Le pH est la synthèse de toutes les interactions chimiques dans le sol. Il est un paramètre facile d'accès et généralement lié à la variation de la conductivité électrique. Ce paramètre a été utilisé souvent par de nombreux auteurs pour l'étalonnage de la CEa (Williams et Hoey, 1987).

Il existe entre autres, une relation directe entre la texture du sol, la taille des particules, la masse volumique apparente, la porosité et la CEa. Par exemple, un sol sableux présente une faible CEa alors qu'un sol argileux se caractérise par une CEa relativement élevée (Jacobs et Dunn, 1998 ; Lund et al, 1999 cités par Erindi., 2005). La densité apparente et le pourcentage de saturation en eau sont associés au taux d'argile. La teneur en matière organique dans le sol a une influence prépondérante sur le pH et la structure du sol et par conséquent sur la stabilité structurale et la perméabilité et donc sur la CEa du sol (Corwin et al, 2003).

L'étude de Fritz et al (1999) a permis d'observer que la CEa du sol était associée à la variation topographique et les données de CEa obtenues étant plus élevées dans les cuvettes et plus faibles dans les zones d'épaulement et de sommet. Ces différences sont probablement attribuables à la combinaison de l'accumulation du contenu en eau et de la salinité dans les zones de dépression. La topographie est l'un des principaux facteurs permettant de déterminer le niveau et la distribution spatiale de la salinité des sols (Florinsky et al, 2000).

La température est un autre facteur qui influence sur la CEa. La CEa augmente d'environ 1.9% par degré centigrade. La conductivité électrique exprimée par rapport à une température de référence à 25°C est donnée par la relation suivante (U.S.Salinity Lab.Staff, 1954).

$$EC_{25} = f_t * EC_t$$

Où f est un facteur de conversion. Les facteurs de conversion existants sont en forme polynomiale (Wraith et Or, 1999), il existe d'autres équations telle celle donnée par Sheets et Hendrickx (1995).

$$f_t = 0.04470 + 1.4034e^{-t/26.815}$$

Les changements de température affectent la viscosité des liquides donc le déplacement des ions dans la solution et par conséquent la conductivité du milieu. Rhoades et al (1976) ont développé une relation qui montre comment la salinité du sol, l'humidité, la teneur en argile et le type d'argile contribuent aux variations des mesures de l'EM38 et qui est donnée par l'équation suivante:

$$CE_a = CE_w \Theta (a \Theta + b) + CE_s$$

Où :

CE_a : conductivité électrique apparente du sol,

CE_w : conductivité électrique de la solution du sol,

CE_s : Conductivité de surface dépendant de la teneur en argile et de sa capacité d'échange,

a : teneur en argile et b : nature d'argile,

Θ : Humidité volumique du sol.

Il faut donc évaluer à chaque point de mesure le profil hydrique moyen. La meilleure méthode consiste à intervenir après des pluies importantes qui homogénéisent les profils hydriques des sols. L'influence de la teneur en eau sur la CE_a a fait l'objet de plusieurs travaux (Kachanoski et al, 1988 ; Sheets et Hendrickx, 1995; Cowin et al, 2003).

Job et al (1987) expliquent l'effet de la porosité et de la texture sur la conductivité électrique apparente du sol à travers la relation suivante :

$$\sigma_x / \sigma_i = f^2$$

Où σ_x : Conductivité totale du sol ;

σ_i : Conductivité du liquide interstitiel ;

f : Une fraction de la porosité occupée par le liquide interstitiel.

Le rapport σ_x / σ_i augmente dans l'ordre pour les roches dures, les grès, les sables et les argiles. Plus la porosité est grande, plus l'effet de l'électrolyte qui remplit les pores est important. L'équation montre aussi que la conductivité électrique apparente CE_a mesurée peut être très faible si f est petit, ce qui implique pour les sols peu salés de faire les mesures à des taux d'humidité du sol élevé (Job et al, 1987).

La distribution des particules de sol dans un profil peut être un facteur important contribuant à la CE_a (Sudduth et al, 2003). Le contact physique entre les particules de sol tient compte d'une conductivité électrique plus élevée et elle est connue pour être plus grande avec l'argile qu'avec les particules de sable ou limon (Rhoades et al, 1976 ; Corwin et Lesch, 2003). La teneur en argile ainsi que sa nature minéralogique influent sur la teneur et la capacité de rétention en eau dans le sol. La texture est généralement prise en compte dans l'étalonnage de la CE_a (Williams et Hoey, 1987; Sudduth et Kitchen, 1993 ; Job et al, 1997; Triantafilis et al, 2001; Corwin et al, 2003).

2.1.5. - Calibration de la conductivité électrique apparente

Si on ne tient pas compte de la stratification horizontale et que l'on considère le milieu homogène en texture, porosité et température, on peut écrire :

$$CEa = F(\Theta, S)$$

La mesure faite devra alors être interprétée en fonction de la salinité du sol et de son humidité. Chaque mesure devra donc être ramenée à une humidité de référence choisie en fonction des caractéristiques texturales du sol et agro-climatique de la région considérée (entre 10 et 25% en humidité pondérale).

Pour comparer deux mesures de CEa faite sur des sols ayant le même profil hydrique, il faut ramener la mesure à la valeur de la conductivité électrique de la pâte saturée.

L'étalonnage consiste à trouver les droites : $CEps = a * CEa + b$.

Dans chaque étude, les chercheurs essaient de développer l'équation adaptée aux sols considérés.

Pour toutes les mesures faites de salinité variant de 2 à 30 dS/m de conductivité d'extrait saturé, l'effet de l'humidité peut se traduire (Job et al, 1991) :

$$CEMh(\Theta_2) = CEMh(\Theta_1) + (\Theta_2 - \Theta_1) (5.4 + c * CEMh^2(\Theta_1)) \quad \text{avec } c = 6.5 / 10^6.$$

Cette formule a été établie pour Θ compris entre 12 et 25 %. Des essais tendent à montrer qu'au dessus de ces valeurs, l'effet de l'humidité serait moindre. On peut utiliser ces formules pour corriger les mesures de la CEv et de la CEh prises sur le terrain par rapport à une humidité pondérale de référence de 15% (Job et al, 1991).

2.2. - Méthodes d'échantillonnage au niveau de la zone d'étude

Rappelons que ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de l'INSID qui porte sur la caractérisation de l'état actuel de la salinité au niveau des périmètres irrigués de l'ouest Algérien. Le bas Chélif a constitué le premier périmètre de ce projet réalisé en 1998. La difficulté rencontrée dans ce projet se résume dans sa méthodologie préalablement adoptée et les moyens mis en œuvre en l'occurrence le grand nombre des échantillons prélevés avec des méthodes d'analyses classiques et le retard enregistré pour son achèvement. Le deuxième périmètre concerné par ce projet est le périmètre de la Mina. Lancé en 2002, il se propose d'utiliser pour la première fois un nouveau outil d'investigation qui est l'EM38 qui mesure la CEM en modes vertical et horizontal à des profondeurs respectives 1.5 m et 0.75m.

La méthodologie adoptée pour l'opération de l'échantillonnage ainsi que la prise des mesures de l'EM38 ont été fixés au préalable. La caractérisation de l'état actuel de la salinité du sol a porté uniquement sur les horizons de surface. De ce fait, les prélèvements des échantillons ont été fait jusqu'à une profondeur approximative de 70cm. Cette profondeur représente généralement la profondeur de la zone racinaire de la plupart des cultures du périmètre et qui peut être exposée aux risques de la remontée des sels par capillarité. La remontée du niveau de la nappe, généralement de mauvaise qualité, en hiver et son rabattement en été laissent apparaître des couches de sels au niveau de la zone racinaire qui empêche par la suite la germination et le développement des cultures.

Les températures très élevés en été et les prélèvements à un niveau profond à l'aide d'une tarière dans des sols très secs et très compacts constituent une opération très

pénible dans un grand périmètre comme la Mina. La grande étendue de la zone d'étude et la topographie plane et uniforme nous ont conduit à opter pour un échantillonnage systématique pour les lectures de l'EM38 avec un maillage de 80 m*80 m. Ce plan d'échantillonnage assure une répartition régulière des lectures sur l'ensemble de la zone d'étude (1256 ha). L'EM38 a été utilisé par de nombreux auteurs pour mesurer la conductivité électromagnétique apparente du sol (CEa) avec un intervalle d'échantillonnage compris entre 5 et 100m (Cameron et al, 1981; Lesch et al, 1992; Hendrickx et al, 1992; Lesch et al, 1995; Ceuppens et al, 1997; Triantafilis et al, 2001; Lee et al, 2006). A ce niveau de précision, nous pouvons porter les cartes ainsi établies à l'échelle parcellaire.

Le nombre de lectures prise par l'EM38 en modes horizontal et vertical est 1690 lectures. Elles sont prises systématiquement dans chaque nœud de la grille et géoréférenciers à l'aide d'un GPS (global positioning system) selon le système WGS 84 (figure12).

Les 96 sondages réalisés (figure13) ont été effectués à l'aide d'une tarière à deux niveaux de profondeur, 0 à 35 cm et 35 à 70 cm. Au total, 192 échantillons du sol ont été prélevés. L'implantation des sondages est faite en fonction de la variation des lectures de l'EM38. Ceci permet de mettre en évidence la présence ou non d'une relation spatiale qui pourrait exister entre les paramètres pédologiques et les mesures de l'EM38.

L'épaisseur (0 à 70cm) correspond bien au volume du sol prospecté par l'EM38 en mode horizontal où les premiers 50 cm de sol donneront une réponse relative plus grande que les couches profondes, alors qu'en mode verticale les couches superficielles auront une réponse sensiblement égale à celle du demi espace restant.

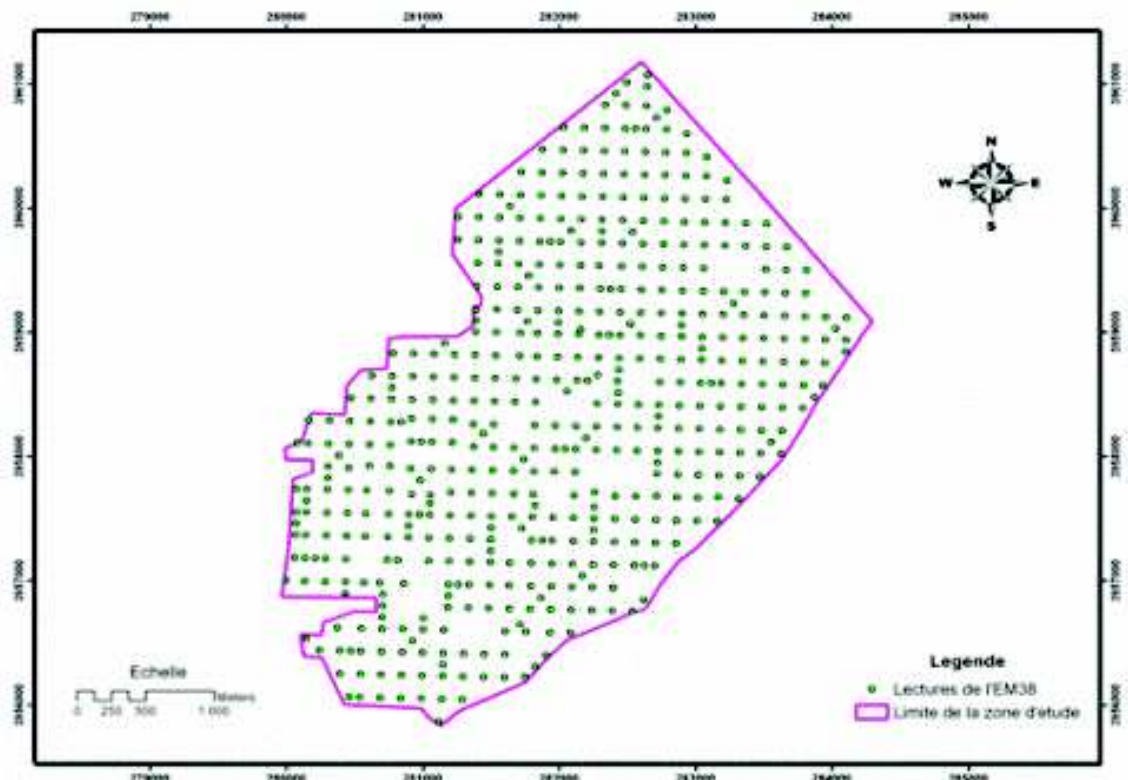


Figure n°12 : Positionnement des points de lectures de l'EM38.

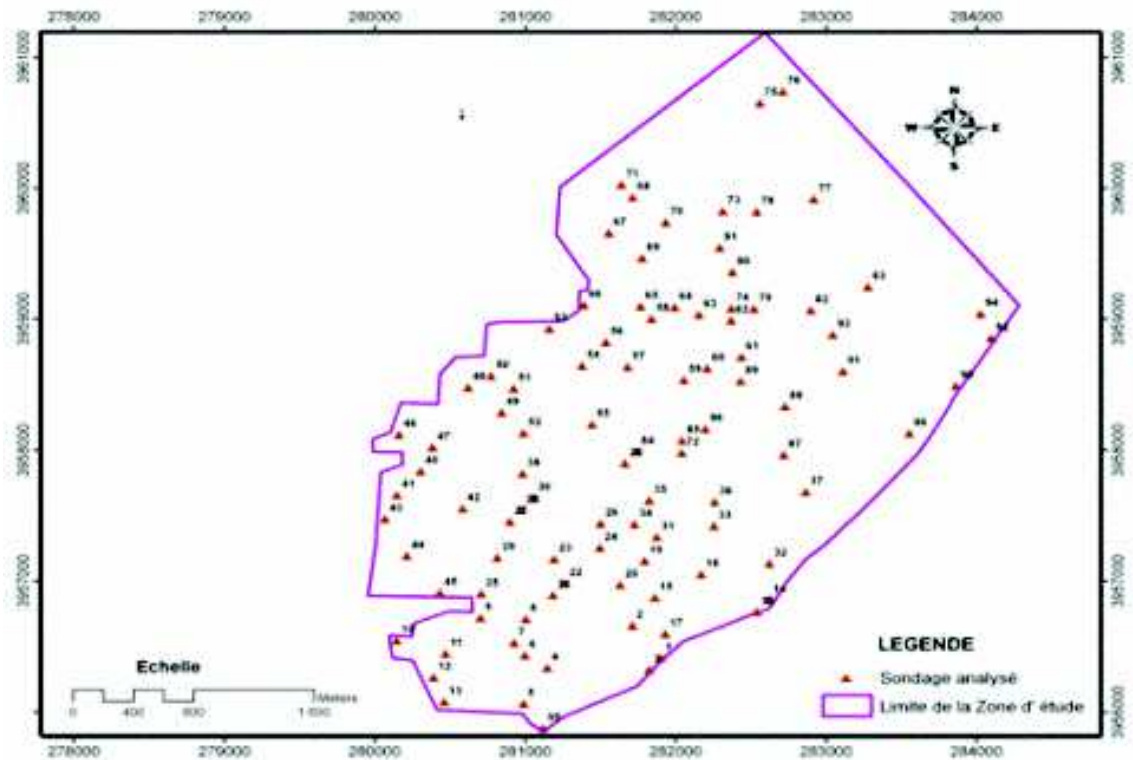


Figure n°13 : Positionnement des sondages à la tarière dans la zone d'étude.

2.3. - Analyse au laboratoire des paramètres étudiés

La connaissance de l'influence de quelques paramètres pédologiques tels que la CEps, le pH, la MO, la granulométrie, le calcaire total et l'humidité pondérale sur la variation de l'induction électromagnétique est nécessaire afin d'évaluer spatialement la salinité du sol (Corwin et al, 2006).

a. La granulométrie

L'analyse granulométrique est réalisée par la méthode internationale de sédimentation par la pipette de Robinson. Elle permet de déterminer la texture du sol en séparant les fractions granulométriques qui sont les argiles (0 à 2 μ m), les limons fins (2 à 20 μ m) et grossiers (20 à 50 μ m), les sables fins (50 à 200 μ m) et grossiers (200 à 2000 μ m) conformément à la norme internationale de normalisation.

b. La conductivité électrique de l'extrait de la pate saturée

Cette méthode a été mise au point par les chercheurs de l'US. salinity Laboratory. Pour extraire les sels, on amène le sol préalablement séché à saturation par malaxage avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre le point de saturation. Cette façon nous permet notamment de se rapprocher d'une réalité agronomique, l'humidité étant à proximité de la capacité de rétention la plus efficace pour la plante.

c. Le pH

L'échantillon du sol est mis dans un bécher et on ajoute de l'eau distillée avec un rapport sol/eau = 1/2,5. Après agitation, on note la valeur du pH à l'aide du pH mètre à 25°C.

d. le calcaire total

La teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) dans le sol est déterminée par la méthode volumétrique par le Calcimètre de Bernard.

e. La matière organique

Le taux de la matière organique est déterminé par la méthode ANNE qui mesure le pourcentage de carbone organique dans l'échantillon du sol par oxydation à chaud avec l'acide sulfurique. Par la suite on déduit la teneur en matière organique :

$$\% \text{ MO} = \text{Carbone C} \cdot 1.72$$

f. l'humidité pondérale du sol

On détermine le rapport de l'eau contenue dans un échantillon du sol au poids du même échantillon après dessiccation (%) à 105°C pendant 24 h.

$$H_p = M_e/M_s$$

Avec :

H_p : humidité pondérale,

M_e : poids d'eau contenu dans un échantillon de sol(gramme),

M_s : poids de l'échantillon sec (gramme).

2.4. - Analyses statistiques univariée

En statistique classique, il est possible de décrire la variabilité spatiale d'une propriété mesurée en un grand nombre de points dans un espace a partir de descripteurs tels que le minimum, maximum, médiane, moyenne, écart-type et coefficient de variation (CV), puis d'évaluer la normalité de la distribution à partir des indicateurs (Gascuel-Oudou, 1987).

Le CV est souvent utilisé pour comparer l'intensité de la variation des propriétés des sols. Nolin et Caillier (1992) ont proposé la classification suivante pour décrire la variabilité des sols (Tableau 14).

Classe	CV (%)
Faible	< 15%
Modérée	15 – 35 %
Elevée	35 – 50 %
Très élevée	50 – 100%
Extrêmement élevée	$\geq 100\%$

Tableau n°14 : Classification de la variabilité des sols selon la CV (Nolin et Caillier, 1992)

2.5. - Analyse statistique multi variée

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique descriptive multi variée, son but est de présenter sous forme graphique le maximum de l'information contenue dans un tableau de données (Philippeau, 1986). Ce tableau est constitué en lignes par des individus (n) et en colonnes par des variables (p) quantitatives.

Les données sont organisées sous forme d'un tableau statistique qui définit deux espaces :

- L'espace des individus (i) ou chacun d'eux est représenté par un point de coordonnées $(A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ip})$;
- L'espace des variables (j) ou chacune d'elles est représentée par le point de coordonnées $(A_{1j}, A_{2j}, \dots, A_{nj})$.

Pour faciliter la visualisation des individus, l'ACP réduit les dimensions de cet espace à une dimension (axe principal) ou deux dimensions (plan à deux axes). Les axes issus de cette réduction ne sont pas réalisés avec les variables initiales mais avec des individus synthétiques obtenus par combinaison linéaire des variables initiales. Ces axes sont donc représentés dans un espace à P dimensions. Pour une meilleure observation des individus, il ne reste plus qu'à construire le plan de deux composantes principales qui sont de variance maximale sous contrainte de non corrélation entre elles.

2.6. - Analyse spatiale

La géostatistique qui est une approche caractérisant la structure de la variabilité spatiale d'une propriété quelconque ainsi que son estimation s'avère être très appropriée pour cartographier un phénomène naturel (Rossi et al, 1995). Elle consiste à interpréter les résultats d'un grand nombre de mesures prises systématiquement dans une région dont les limites sont à priori imposées (périmètre irrigué de la Mina par exemple).

La géostatistique est une mathématique conduisant à la régionalisation de variables d'intérêt selon des méthodes d'interpolation appropriées. Son intérêt réside dans le fait qu'elle permet à la fois d'estimer des propriétés du sol dans l'espace et de mesurer la qualité de cette estimation. Elle a été employée en science du sol pour la compréhension de la variabilité spatiale des caractéristiques du sol et de ses propriétés intrinsèques (Voltz, 1986; Walter, 1990). La géostatistique admet des variables spatialement corrélées et elle procède en deux étapes (Gascuel-Odeux, 1987):

- Analyse de la structure spatiale de la variable étudiée grâce au variogramme ;
- Emploi des techniques d'interpolation spatiale par le krigeage.

2.6.1. - Analyse Variographique

L'analyse variographique est le point central de l'analyse structurale d'un échantillonnage et donc de la procédure d'interpolation géostatistique. Elle tient compte non seulement de la distance mais aussi des relations de dépendance (auto corrélations) qui existent entre les points de mesure, donc de la structure spatiale de l'échantillonnage.

Le semi-variogramme, appelé couramment variogramme, est un outil géostatistique qui permet d'identifier si la série de données est aléatoire ou présente une structure spatiale (Robertson, 2000 ; cité par Perron., 2002).

L'équation suivante définit la semi-variance $\tilde{\alpha}(h)$ pour un semi-variogramme empirique où $N(h)$ est égale au nombre des points échantillonnés séparés par une distance (h) , $Z(x_i)$ est égale à la valeur de la propriété mesurée au points X_i , et $Z(x_i + h)$ est la valeur de la propriété mesurée au point $(x_i + h)$ (Nielsen et Wendroth, 2003).

$$\gamma(h) = [1/(2N_h) \sum_{i=1}^{N_h} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2]^{0.5}$$

La valeur de h où la semi-variance ($\tilde{\alpha}(h)$) atteint le palier est la portée (A_0) (figure14). La portée représente la zone où il y a dépendance entre les échantillons. Ce paramètre constitue un indice très utile pour établir l'intervalle optimal d'échantillonnage. La valeur de $\gamma(0)$ représente la composante aléatoire de la variabilité. Si la valeur de l'effet de pépité (C_0) observable sur le semi-variogramme est nulle, cela signifie que le processus est régulier et que les mesures ne sont pas entachées par une variabilité instrumentale (Nolin et al, 2000).

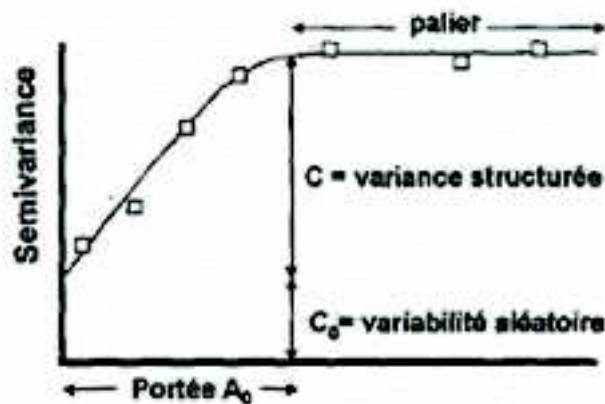


Figure n°14 : Paramètres descripteurs du semi-variogramme théorique

2.6.2. - L'estimation en géostatistique linéaire

Les méthodes géostatistiques d'interpolation sont pratiquement toutes regroupées dans la famille des krigeages. Matheron (1963) propose la définition suivante «un ensemble de techniques revenant à effectuer une pondération des échantillons,...les poids étant calculés de façon à rendre minimale la variance d'estimation résultante, compte tenu des caractéristiques géométriques du problème ».

Le Krigeage est une méthode d'estimation d'interpolation qui s'est développée à partir des années 50 par le géologue sud Africain Krige, basée sur un phénomène connu en certains points et qui a l'avantage parmi d'autres techniques d'interpolation d'utiliser la structure spatiale de la variable pour l'estimation (Delhomme, 1978). Ses avantages sont :

- Le krigeage intègre la connaissance émanant de l'analyse préalable de la structure par le variogramme ;
- Le krigeage est un interpolateur exact. Si un point d'échantillonnage coïncide avec un nœud de grille, la solution du krigeage est égale à la valeur de l'échantillon;
- Le krigeage livre une interpolation sur l'erreur d'estimation traduite par la variance de krigeage.

2.6.2.1. - Estimation mono variable (krigeage ordinaire)

Dans le cas du krigeage ordinaire, on se place dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque et l'hypothèse de stationnarité d'ordre 2 sur les accroissements (Gascuel-Oudou et al, 1996).

La fonction aléatoire est stationnaire d'ordre 2, lorsque :

- L'espérance mathématique existe et est constante $E(Z(x)) = m$ (m : la moyenne)
- La covariance pour chaque couple existe et ne dépend que de l'inter distance h

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

L'hypothèse intrinsèque est moins forte que la première. Elle considère que ce sont les accroissements $(Z(x) - Z(x+h))$ qui sont stationnaire d'ordre 2 et que l'on se place dans le cas le plus probable où la moyenne de cette fonction est inconnue dans le champ (VOLTZ, 1986).

Soit d'une part, l'espérance des accroissements ne dépend pas de x :

$$E(Z(x+h) - Z(x)) = 0 \text{ quels que soient } x \text{ et } h.$$

Et d'autre part, les accroissements ont une variance finie, liée à h et indépendante de x :

$$\text{VAR}[Z(x) - Z(x+h)] = 2\gamma(h)$$

Le Krigeage ordinaire à moyenne inconnue a pour but de fournir une estimation locale non biaisée la plus précise possible de la variable régionalisée à l'aide d'une combinaison linéaire pondérée des données expérimentales.

$$Z^* = a + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i$$

Z : Désigne la variable régionalisée étudiée,

Z^* : Son estimateur par Krigeage,

Z_i : Les valeurs prises par la variable régionalisée étudiée.

Où n est le nombre de points de mesure pris en compte dans l'estimation et λ_i est le poids affecté au point x_i .

Soit Z^* l'estimateur linéaire de la variable

L'erreur d'estimation s'écrit : $e = Z^* - Z$.

Pour que cet estimateur réponde aux exigences du krigeage, le paramètre a et les pondérateurs λ_i doivent respecter les contraintes suivantes :

- L'erreur d'estimation est une combinaison linéaire autorisée, c'est-à-dire que son espérance et sa variance existent. Cela implique que $a = 0$ et que $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$. Cette dernière relation assure également l'absence de biais.

- L'estimateur est le plus précis possible au sens où la variance de l'erreur d'estimation est minimale. Soit :

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_i} \text{Var}(Z^* - Z) = 0 \quad \forall i \quad \text{avec} \quad \text{Var}(Z - Z^*) = 2 \sum_{i,j} \lambda_i \lambda_j \gamma_{ij} - \sum_{i,j} \lambda_i \lambda_j \gamma_{ij}$$

$\tilde{\alpha}_{ij}$: est la valeur du variogramme entre les points s_i et s_j .

$\tilde{\alpha}_{ix}$: est la valeur du variogramme entre les points s_i et le point cible x

Le problème à résoudre pour estimer la valeur d'une propriété Z consiste donc à calculer le poids λ_j affecté à chaque point observé. Lorsque des hypothèses dites de stationnarités sont vérifiées, l'ajustement d'une fonction autorisée au variogramme expérimental permet de calculer les poids λ_i et donc fournit la valeur de l'estimation $z^*(x_0)$.

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \gamma_{N1} & \dots & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{1x} \\ \vdots \\ \gamma_{Nx} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Les poids λ_i qui remplissent ces conditions sont les solutions d'un système matriciel faisant intervenir $\tilde{\alpha}$:

Le paramètre μ est un multiplicateur de Lagrange qui intervient dans la résolution du système de Krigeage et dans le calcul de la variance de l'erreur.

Cette variance de l'erreur d'estimation ou variance de krigeage est donnée par la relation:

$$\sigma_K^2 = \sum_i \lambda_i \gamma_{ix} + \mu$$

Donc elle ne dépend que de deux facteurs :

- Du modèle du variogramme c'est-à-dire de la structure spatiale de la propriété étudiée. La variance d'estimation est d'autant plus faible que le variogramme présente des semi variances faibles.

- De la configuration relative du point ou du bloc à estimer et des données expérimentales, donc de l'échantillonnage effectué. On conçoit que la précision d'une estimation soit d'autant meilleure que l'échantillonnage est important.

Un intérêt essentiel du Krigeage est qu'il donne, en plus de cette estimation, une indication de sa précision sous la forme d'une variance d'estimation. D'autre part, il effectue un lissage. Cela signifie que les estimations sont moins variables que les concentrations que l'on cherche à estimer (leur distribution est plus resserrée autour de la moyenne). Plusieurs auteurs reconnaissent la robustesse de cette méthode (Voltz et al, 1989).

2.6.2.2. - Estimation multi variable (cokrigeage ordinaire)

Le cokrigeage est une méthode de Krigeage qui intègre avec un poids moins important une seconde donnée (appelée cofacteur ou variable auxiliaire) corrélée au phénomène à cartographier et qui permet d'apporter une information complémentaire (Triantafillis et al, 2001). Cette méthode a été largement utilisée en sciences du sol (Vauclin et al, 1982;

Trangmar et al, 1986 ; Yates et Warrick, 1987 ; Vaughan et al, 1995 cités par Triantafyllis et al, 2001).

L'intérêt de prendre en compte les informations apportées par une variable externe est d'améliorer la carte, surtout dans les zones où la densité des données est faible. Ainsi, l'information provenant de la variable auxiliaire permet de compenser un manque d'information sur la variable elle-même aux endroits non informés par des mesures.

Le cokrigeage ordinaire repose sur l'hypothèse de stationnarité d'ordre 2 ou de stationnarité intrinsèque conjointe.

Soient Z^1, Z^2, \dots, Z^n , N variables dont on souhaite estimer les valeurs dans le domaine d'étude. Si Z^1 est l'unique variable à estimer, alors Z^2, \dots, Z^n représentent des variables auxiliaires corrélées à Z^1 .

En un point x, l'estimateur par Cokrigeage ordinaire de la variable Z^{k0} s'écrit :

$$Z^{k0*}(x) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n_k} \lambda_i^k Z_i^k$$

Où n_k désigne le nombre de données de la variable Z^k .

Comme pour le krigage ordinaire, les pondérateurs doivent satisfaire à la condition de non biais et rendre la variance d'estimation minimale. Ces exigences imposent de résoudre le système de cokrigeage suivant (cas de deux variables) :

$$\begin{bmatrix} \gamma_{00}^{11} & \gamma_{00}^{12} & 1 & 0 \\ \gamma_{00}^{12} & \gamma_{00}^{22} & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1^1 \\ \lambda_1^2 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{xx}^{11} \\ \gamma_{xx}^{22} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$\tilde{\gamma}_{ij}^{kk}$: Variogramme simple de la variance Z^k entre les points de données s_i et s_j ($k=1$ ou 2).

$\tilde{\gamma}_{ij}^{12}$: Variogramme croisé des variables Z^1 et Z^2 entre les points de données s_i et s_j .

La variance de cokrigeage vaut (en supposant que $Z^{k0} = Z^1$ est la variable à estimer) :

$$\sigma_K^2 = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^{n_k} \lambda_i^k \gamma_{xx}^{k1} + \mu_1 - \gamma_{xx}^{11}$$

2.6.3. - Les logiciels utilisés pour l'analyse géostatistique

Les différents traitements sont en majeure partie réalisés à l'aide de logiciels spécifiques

Variowin 2.2 pour l'analyse variographique

Variowin est une combinaison de trois logiciels utilisés pour des données spatiales et la modélisation des variogrammes.

- Le module Prevar2D analyse la structure spatiale des données et met en place les couples de points.
- Le module Vario2DP sert à créer le variogramme expérimentale et ajuste le variogramme théorique.
- Le module Model 2D est utilisé pour ajusté les différents variogrammes qui ressortent de Vario2DP. Le model bidirectionnel ressortant de ce dernier module peut être utilisé pour le krigeage.

Variowin ne réalise pas la spatialisation mais permet seulement de faire l'analyse des données et de trouver des paramètres plus convenables pour la spatialisation.

ArcGIS 9™ (module d'interpolation de Géostatistical Analyst)

< Geostatistical Wizard >

ArcGIS 9.1 est un logiciel commercial produit par ESRI. L'extension (Spatial Analyst) d'arcGIS permet d'effectuer plusieurs types de spatialisation IDWA, Spline, Krigeage et cokrigeage.

Chapitre IV. Résultats et discussions

Les paramètres physicochimiques du sol représentent la qualité du sol qui influe sur la conductivité électromagnétique apparente globale du sol (CEa) données par l'EM38 en modes horizontal et vertical (Corwin et al, 2006). Dans ce chapitre, nous présentons l'analyse statistique des paramètres étudiés et leurs effets sur la conductivité électromagnétique en mode horizontal. Par la suite, nous présentons les résultats de l'analyse de la variabilité spatiale de la salinité dans les deux tranches de sol. Nous estimons cette variabilité par un krigeage ordinaire de la CEps des échantillons du sol par une régression krigeage en utilisant le modèle d'étalonnage donné par la régression simple au niveau des points de sondage et au niveau de l'ensemble des mesures. Nous le ferons également par un cokrigeage en utilisant les mesures de l'EM38 en mode horizontal comme variable auxiliaire dans l'interpolation.

1. - Analyse statistique

Nous avons utilisé l'analyse statistique univariée et multi variée pour décrire et quantifier la variabilité spatiale des paramètres du sol et l'interrelation spatiale qui pourrait exister entre elles.

L'analyse statistique univariée porte sur les paramètres étudiés des 96 échantillons prélevés sur deux couches 0 à 35cm et 35 à 70 cm et sur les mesures de l'EM38 en mode horizontal prises aux points de sondage. Cette analyse permet de caractériser statistiquement un paramètre mesuré en un grand nombre de points dans l'espace (Gascuel-odoux, 1984). Elle consiste essentiellement en la détermination de la loi de distribution des paramètres et de leurs principaux paramètres statistiques, à savoir la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation. Nous tenterons aussi de donner une interprétation agronomique à chacun de ces paramètres selon sa distribution dans le profil.

L'objectif de l'analyse multivariée est de mettre en évidence les relations spatiales entre les paramètres étudiés d'une part et leurs influences sur les mesures de la conductivité électromagnétique en mode horizontal.

1.1. - Analyse statistique univariée

La recherche de la loi de distribution est indispensable lorsqu'on désire traiter des données en

terme de moyenne ou la probabilité d'avoir une valeur inférieure à une certaine limite (Vauclin, 1982). En effet, les variables anormalement distribuées montrent des structures complètement aléatoires et purement peptiques. Le tableau 15 montre que l'ajustement à une loi normale donné par le test Kolmogorov révèle que la plupart des paramètres du sol se distribuent selon la loi normale dans les deux niveaux de profondeur à l'exception de la CEps et du %Sg qui se distribuent selon une loi log normale. Donc une transformation mathématique permet de normaliser la distribution de ces deux paramètres.

Les résultats révèlent aussi que la conductivité électrique des extraits de pâte saturée (CEps) des horizons de surface (0 à 35 cm) et des horizons de subsurface (35 à 70 cm) se situe entre 0,52 et 41,7 dS/m (tableau15). Cette large gamme de valeurs de salinité signifie que la parcelle étudiée est très hétérogène pour ce paramètre. Elles confirment donc la forte amplitude de la CEps dans la parcelle étudiée.

Horizon de surface (0 à 35cm)										
Paramètre Statistique	CEps1 dS/m	pH1	CT1 %	MO1 %	A1 %	Lf1 %	Lg1 %	Sf1 %	Sg1 %	Hp1 %
Nombre	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96
Mini	0.52	7.73	2.12	0.95	6.69	14.6	0.28	7.16	0.23	3.62
Max	41.7	8.91	22.49	5.18	55.55	45.35	50.9	44.63	9.3	41.44
Moyenne	4.25	8.23	13.42	3.1	38.87	31.51	9.7	17.96	2.07	8.24
Médiane	2.14	8.22	14	3.17	38.87	31.0	9.20	16.94	1.51	8.24
Ecart-type	5.252	0.215	5.05	0.92	8.67	5.54	7.058	6.605	1.642	4.844
Variance	35.01	0.046	25.52	0.86	75.28	30.765	49.81	43.633	2.695	23.464
C.V %	123.5	02.5	37	29.6	22.3	17.6	72.7	36.7	79.1	50.9
Probabilité	0.0001	0.927	0.328	0.968	0.901	0.903	0.369	0.333	0.006	0.762
Loi de distribution Kolmogoro	Ln Normale	Normale	Normale	Normale	Normale	Normale	Normale	Normale	Ln Normale	Normale
Horizon de subsurface (35 à 70cm)										
Nombre	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96
Mini	0.68	7.81	2.82	0.74	18.83	17.58	0.12	4.87	0.34	5.93
Max	32.1	8.79	22.49	4.97	66.47	39.95	22.81	39.21	14.69	27.8
Moyenne	5.87	8.25	12.95	2.54	42.80	28.50	9.57	17.11	2	14.20
Médiane	3.23	8.28	13.06	2.67	42.98	28.78	9.40	16.47	1.30	14.27
Ecart-type	6.63	0.193	4.68	0.904	7.554	4.894	5.320	6.918	2.413	4.2
Variance	44.02	0.037	21.98	0.817	57.06	4.894	28.30	47.862	5.822	17.64
C.V %	113	02.3	36.2	35.5	17.6	17.1	55.5	40.4	120.4	29.5
Probabilité	0.000	0.953	0.930	0.534	0.728	0.787	0.598	0.782	0.0001	0.068
Loi de distribution Kolmogoro	Ln Normale	Normale	Normale	Normale	Normale	Normale	Normale	Normale	Ln Normale	Normale

Tableau n°15 : Statistiques descriptives des paramètres du sol pour les deux couches

L'humidité pondérale au niveau des horizons de surface et de subsurface du sol varie entre 3 et 41 %. Les teneurs en eau de l'horizon de surface sont plus variables dans l'espace (CV= 50 %) que celles des horizons de subsurface (CV=29 %) à cause probablement de l'irrigation du fait que les mesures ont été effectuées sur des échantillons prélevés en été. Il faut noter aussi le grand écart entre les valeurs extrêmes des taux d'argile et de calcaire total.

Les coefficients de variation (CV) des paramètres étudiés (tableau15) sont très faibles pour le pH (2 à 2.5%) qui est la variable du sol la plus homogène dans la zone d'étude. Par contre, la CEps, le Lg% et le Sg% sont les variables du sol les plus dispersées compte tenu des valeurs élevées de leurs CV, allant respectivement de 113 à 123%, de 55 à 72% et de 79 à 120% quelles que soient leurs positions dans le profil. Les paramètres liés aux constituants du sol (calcaire total, la MO, l'argile, le limon fin, le limon grossier, le sable fin et l'humidité) varient faiblement dans l'espace. Leur CV varie de 15 % pour le limon fin à 50 % pour l'humidité.

Le tableau16 montre que toutes les mesures de l'EM38 se caractérisent par un grand écart entre les valeurs minimales et les valeurs maximales qui se situent entre 3 et 770 dS/m pour la CEMh et entre 9 et 724 dS/m pour la CEMv. Ces valeurs de l'EM38 révèlent une grande hétérogénéité de la conductivité électromagnétique apparente dans la zone d'étude. Cette forte variabilité spatiale de ces mesures est justifiée par les fortes valeurs qu'affichent leur coefficient de variation (CV) qui se situent entre 92 et 106%.

Paramètre statistique	CEMh dS/m	CEMv dS/m	CEMh dS/m	CEMv dS/m
Nombre	96	96	1690	1690
Mini	18	14	3	9
Max	375	557	770	724
Moyenne	78,24	101,64	83,67	110,55
Médiane	57	76,5	52	74
Ecart-type	76,14	93,91	88,69	107,11
Variance	5797,82	8820,13	7866,87	11473,53
C.V %	97,3	92,4	106	96,88
Probabilité	0,3	0,927	< 0,01	< 0,01
Loi de distribution	Ln	Ln		
Kolmogorov	Normale	Normale	Normale	Normale

Tableau n°16 : Statistiques descriptives des mesures de l'EM38.

Notons aussi que la moyenne et la médiane des mesures de l'EM38 en mode vertical sont supérieures à celles en mode horizontal, ce qui traduit une augmentation de la salinité en profondeur (Nogués et al, 2006). Ceci serait dû soit au phénomène de la remontée des eaux de la nappe sous l'effet de la pression capillaire et l'évapotranspiration durant la période sèche qui est la période de notre échantillonnage ou à la mauvaise qualité des eaux d'irrigation. Accordant au test de Kolmogorov-Smirnov au niveau de signification ($p < 5\%$), la distribution des fréquences des mesures de l'EM38 au niveau des sondages suit une loi normale. Seules les mesures en mode horizontal sont présentées dans la suite de ce chapitre du fait que la réponse des mesures en mode vertical peuvent aller jusqu'à 1,50 m de profondeur et par conséquent au delà de la couche de sol étudiée.

Pour évaluer la distribution des valeurs des paramètres dans la zone d'étude, nous avons établi des histogrammes des fréquences pour chaque paramètre étudié (figure 15). Les résultats révèlent que la zone d'étude se caractérise par trois classes de taux de calcaire total (CT) quelle que soit la profondeur considérée. Au niveau des horizons de surface, ce sont les échantillons peu calcaires ($5\% < \text{CaCO}_3 < 10\%$) qui sont les plus dominants (63% de l'ensemble des échantillons). Dans les horizons de subsurface, les échantillons sont majoritairement moyennement calcaire ($10\% < \text{CaCO}_3 < 25\%$) avec 72%. Ce résultat signifie que les horizons de subsurface sont plus calcaires que les horizons de surface à cause probablement de la décarbonatation sous l'effet de l'irrigation.

Pour la matière organique, la classe de la teneur moyenne (2 à 4%) est la plus représentée dans la zone d'étude. Elle représente 70% des échantillons des horizons de surface et 68% des horizons de subsurface (figure 16). La MO est généralement concentrée au niveau de l'horizon de surface exploité par le système racinaire de la plupart des cultures de la zone d'étude telles que la céréaliculture et le maraichage. Quant au pH (figure 15), la dominance de la classe des pH basiques ($7,5 < \text{pH} < 8,5$) représente 92% de l'ensemble des échantillons. Le reste des échantillons (8%) ont un pH très basique ($\text{pH} > 8,5$). En général, ces valeurs du pH confirment le caractère alcalin qui caractérise les sols de la zone d'étude et du périmètre irrigué de la Mina. La texture argileuse caractérise la majorité des échantillons des deux classes de profondeur (45% des échantillons de l'horizon de surface et 48% des échantillons de l'horizon de subsurface). Cette texture confère au sol un risque potentiel de salinisation sous l'effet de la remontée de la nappe et de la pression capillaire.

La répartition des échantillons du sol selon la profondeur et en fonction des classes de salinité de l'USDA (1954) révèle une dominance des échantillons non à peu salés ($< 4\text{dS/m}$)

dont 68 % des échantillons de l'horizon de surface et 55% des échantillons de subsurface. Les échantillons moyennement salés (4 à 8dS/m) représentent 20% dans les deux horizons. Ces résultats montrent que la salinité en profondeur est plus élevée qu'en surface. Les sols peu à moyennement salés sont les plus dominants et présentent un risque potentiel très élevé de salinisation à moyen et à long terme favorisé par la présence d'une texture fine et une nappe superficielle généralement de mauvaise qualité.

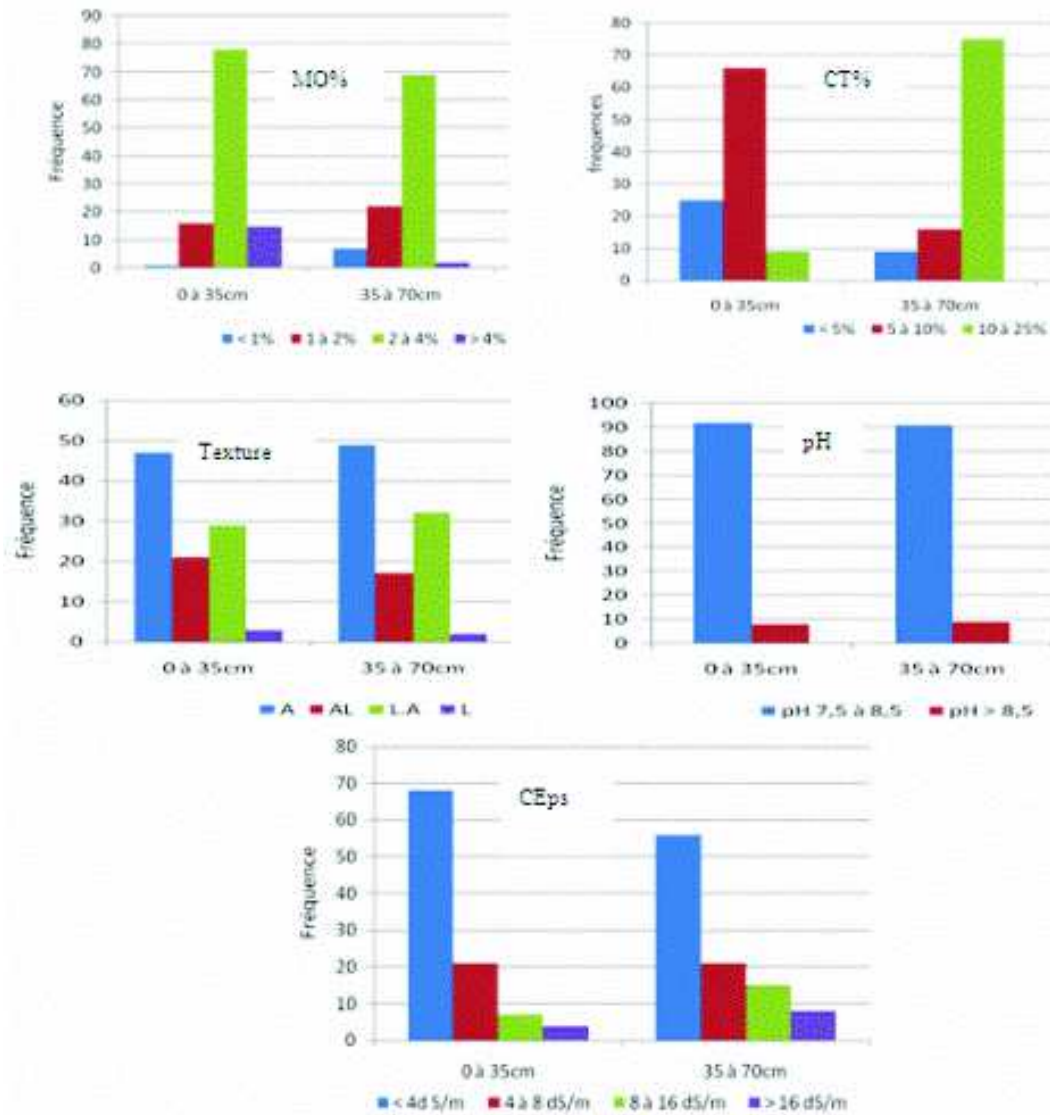


Figure n° 15: Histogrammes de fréquence des paramètres du sol pour les deux couches.

La comparaison des moyennes (test apparié) a pour but de vérifier l'homogénéité de chacune des variables entre les deux niveaux de profondeur 0 à 35cm et 35 à 70cm. Le résultat de ce test (Tableau17) a révélé que la différence des moyennes des variables CEs, MO%, %A, %Lf, %Sf et Hp% est statistiquement significative. Ce résultat signifie que ces paramètres varient en fonction de la profondeur.

Cette variation serait liée probablement à la nature de dépôts alluviaux de la fraction fine (%A, %Lf, %Sf). La formation d'un horizon de subsurface plus argileux augmente la

capacité de rétention en eau et favorise l'accumulation des sels et par conséquent le risque de salinisation. La distribution de ces paramètres dans le profil influe sur la variation verticale de la salinité. La différence des moyennes pour les variables pH, % CT, % Lg, % Sg est non significative.

Variables	Nbre	Diff	Diff Ec-Type	T	dl	P	Interp
CEps	96	-1,614	3,094	-5,111	95	0,0000	S
pH	96	-0,023	0,228	-0,9880	95	0,3256	NS
CT%	96	0,469	2,831	1,6247	95	0,1075	NS
MO%	96	0,557	0,858	6,3632	95	0,00000	S
A%	96	-4,044	5,788	-6,8458	95	0,00000	S
Lf%	96	3,008	4,008	6,40884	95	0,00000	S
Lg%	96	0,131	0,131	6,76267	95	0,8497	NS
Sf%	96	0,844	3,934	2,10286	95	0,03812	S
Sg%	96	0,071	1,780	0,39374	95	0,6946	NS
Hp%	96	4,694	4,6288	-9,9378	95	0,00000	S

Tableau n° 17 : Test de comparaison des moyennes (t appariés) des paramètres selon les deux classes de profondeur au niveau de signification $P < 0,05$.

En conclusion, l'analyse statistique a permis de caractériser les variables du sol selon les deux classes de profondeur 0 à 35cm et 35 à 70cm. Les résultats ont montré que le sol de la zone d'étude est caractérisée par un pH basique ($7,7 < \text{pH} < 8,5$), un faible taux en calcaire total ($\text{CaCO}_3 < 10\%$) dans les horizons de surface et modéré ($10\% < \text{CaCO}_3 < 25\%$) dans les horizons de subsurface. Les résultats ont montré aussi que la MO a des taux généralement moyen (2 à 4%) dans les deux horizons et que la texture est argileuse à limono argileuse dans le profil. Les échantillons salés ($\text{CEps} > 4\text{dS/m}$) représentent 40 % de l'ensemble des échantillons.

L'analyse statistique a révélé aussi que les paramètres étudiés présentent des niveaux de variabilité spatiale différents. Le pH est le paramètre le plus centré autour de sa moyenne et qui constitue donc le paramètre le plus homogène dans la zone d'étude. Par contre, la CEps est le paramètre le plus dispersé. Le calcaire total, la MO%, l'argile%, le Lf%, le Lg% et Hp% montrent une faible dispersion par rapport à leurs moyennes. L'ajustement de chacun de ces paramètres à la loi normale a révélé une tendance générale vers une distribution normale à l'exception de la CEps qui a une distribution log normale. La comparaison des moyennes des variables entre les deux classes de profondeur a révélé des différences significatives pour la CEps, la MO%, l'A%, Lf%, le Sf% et l'Hp% qui ont une distribution hétérogène dans les profils. La distribution des autres paramètres (le pH, le CT%, le Lg% et le Sg%) est homogène.

1.2. - Analyse statistique multivariée

L'analyse multivariée permet de mettre en évidence l'interrelation spatiale entre les paramètres et leurs effets sur les mesures de l'EM38 en mode horizontal. Ces mesures représentent la conductivité électromagnétique apparente pour un volume du sol compris

entre 0 et 70 cm au niveau des sondages. Les paramètres du sol concernant les échantillons prélevés dans les deux niveaux de profondeur 0 à 35 cm et 35 à 70 cm.

1.2.1. - Relations entre les paramètres

L'analyse bivariée permet de mettre en évidence les éventuelles relations entre deux paramètres du sol à un niveau de signification $P < 5\%$. Le tableau 18 révèle une corrélation statistiquement très hautement significative et positif ($0,37 < r < 0,84$) de la CEMh avec la CEps, %Hp et pH2 et négative et significative ($-0,3 < r < -0,2$) avec le %Sg.

0 – 35 cm		CEps1 dS m	pH1	CT1 %	MO1 %	A1 %	Lf1 %	Lg1 %	Sf1 %	Sg1 %	Hp1 %
CEMh	r	0,68	0,11	-0,008	-0,004	0,078	0,21	0,99	-0,137	-0,30	0,37
	p	0,0001	0,26	0,93	0,968	0,44	0,83	0,335	0,192	0,003	0,0001
35 – 70 cm		CEps2 dS m	pH2	CT2 %	MO2%	A2 %	Lf2 %	Lg2 %	Sf2 %	Sg2%	Hp2 %
CEMh	r	0,84	0,35	0,002	-0,006	0,09	0,06	0,07	-0,13	-0,2	0,46
	p	0,0001	0,0001	0,98	0,95	0,35	0,54	0,46	0,19	0,043	0,0001

Tableau n°18 : Coefficients de corrélation (r) entre les paramètres étudiés

Ces résultats montrent l'influence de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée et de l'humidité du sol sur les mesures de l'EM38 en mode horizontal et confirment donc les résultats obtenus par les auteurs cités en bibliographie.

1.2.2. - Etalonnage de la conductivité électromagnétique

A travers les régressions simples et multiples, nous recherchons l'équation qui permet de transformer les mesures de l'EM38 en mode horizontal en conductivité électrique des extraits de pâtes saturées du sol pour des intervalles de profondeur compris entre 0 et 35 cm et 35 et 70 cm. Les mesures horizontales qui donnent une réponse maximale à une profondeur de 0,40 m seront étalonnées aux conductivités électriques de l'extrait de la pâte saturée et à l'humidité pondérale.

Le premier étalonnage se base sur l'utilisation de la régression simple pour trouver une relation statistique entre les mesures électromagnétiques horizontales et les valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée des deux horizons (0-35 cm et 35-70 cm). La régression est réalisée sur les valeurs brutes de la CEps des deux couches (variable expliquée) et de la CEMh (variable explicative) à un niveau de signification $p < 5\%$. Elle a permis d'aboutir aux relations linéaires suivantes:

$$CEps1 = CEMh + 3,2995 \text{ avec } R^2 = 0,46$$

$$CEps2 = CEMh + 3,4128 \text{ avec } R^2 = 0,70$$

Elle est réalisée ensuite sur les valeurs transformées en logarithme népérien de chacune des variables et a aboutit aux équations suivantes:

$$\ln CEps1 = 1,0344 \ln CEMh - 3,2995 \text{ avec } R^2 = 0,57 \text{ et } p < 0,001 \text{ (voir figure 16)}$$

$$\ln CEps2 = 1,1532 \ln CEMh - 3,4128 \text{ avec } R^2 = 0,71 \text{ et } p < 0,001 \text{ (voir figure 17)}$$

La régression multiple consiste à relier les mesures horizontales de l'EM38 et les humidités pondérales (variables explicatives) avec la CEps des deux couches (variable expliquée). Le résultat de cette régression a aboutit aux relations suivantes :

$$CEps1 = 0,646CEMh + 0,092Hp1\% - 0,746 \text{ avec } R^2 = 0,46 \text{ et } p < 0,001$$

$$CEps2 = 0,853CEMh - 0,02Hp2\% + 0,558 \text{ avec } R^2 = 0,71 \text{ et } p < 0,001$$

$$\text{LnCEps1} = 0,967\text{LnCEMh} + 0,482\text{LnHp1\%} - 4,07 \text{ avec } R^2 = 0,60 \text{ et } p < 0,001$$

$$\text{LnCEps2} = 1,17\text{LnCEMh} - 0,075\text{LnHp2\%} - 3,28 \text{ avec } R^2 = 0,72 \text{ et } p < 0,001$$

D'après ces résultats, il s'avère que les coefficients de détermination R^2 donnés par les équations des régressions simple et multiple sont tous hautement significatifs ($p < 0,001$) et que ces résultats suggèrent l'utilisation des équations des valeurs transformées qui ont données les R^2 les plus élevés par rapport aux équations des valeurs brutes. Ainsi, nous pouvons dire que l'introduction de l'humidité pondérale dans les équations d'étalonnage n'a pas amélioré les coefficients de détermination R^2 . Ces résultats peuvent être expliqué par le fait que l'échantillonnage est effectué durant la période sèche lorsque l'humidité n'a pas une grande variabilité au niveau de la zone d'étude, la variation de l'état hydrique actuel du sol est liée principalement à la variation des teneurs en argile et en MO. Donc, la CEps est le seul facteur dominant responsable de la variation de la CEMh. De ce fait, nous avons obtenu, pour chacun des deux horizons de sol, 96 valeurs de la conductivité électrique CEps estimée par les équations de la régression simple que nous traitons par la suite avec la conductivité électrique CEps analysée dans l'approche spatiale.

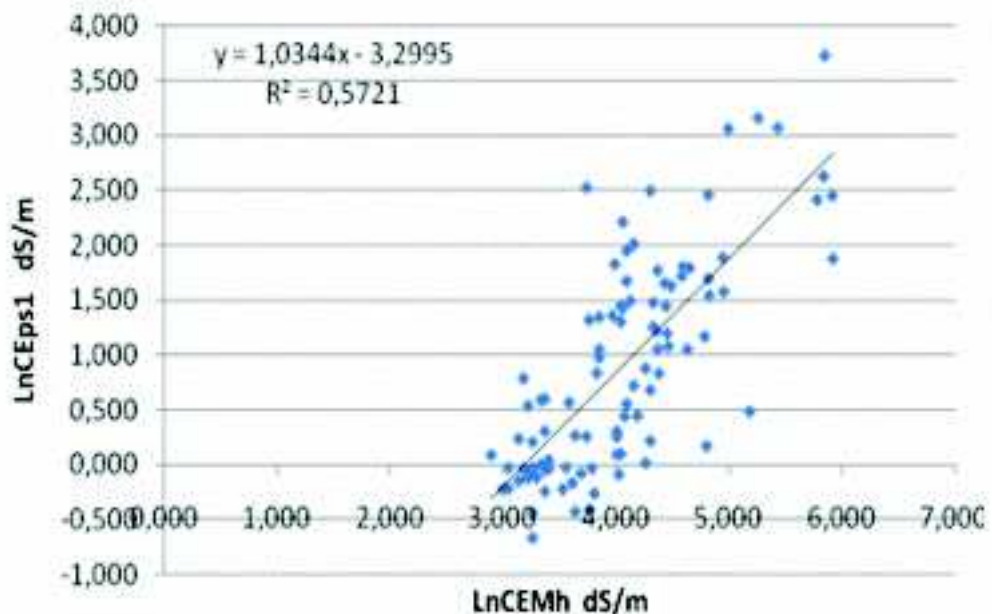


Figure n° 16 : Corrélation entre LnCEps1 et LnCEMh

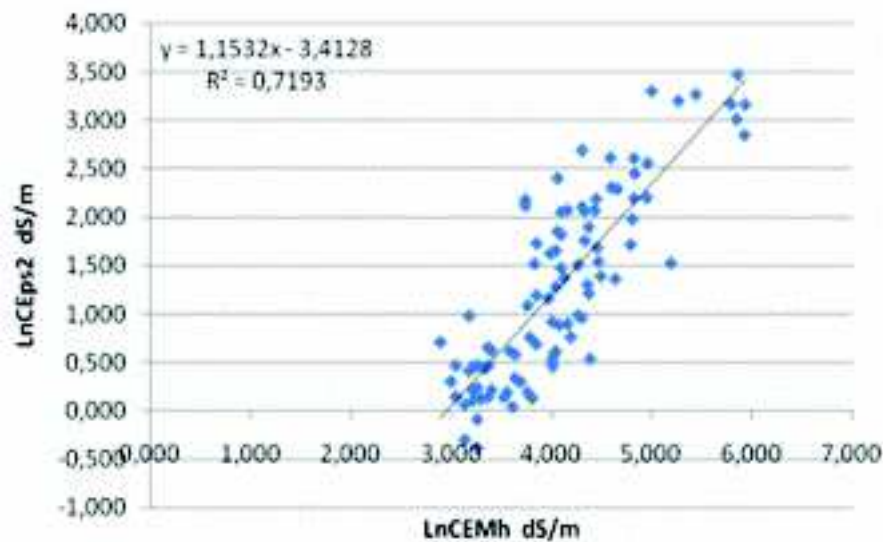


Figure n° 17 : Corrélation entre LnCEps2 et LnCEMh.

1.2.3. - analyse en composantes principales ACP

Cette méthode permet de traiter aussi bien les variables individuellement que simultanément ainsi que les individus. Elle permet aussi de détecter la structure des relations entre variables. La relation est déduite relativement à la position dans l'espace décrit par l'ACP. La notion de l'individu introduite est attribuée aux sondages. Les mesures de l'EM38 en mode horizontal sont celles prises dans les points de sondage. Les variables représentent les échantillons prélevés dans les deux tranches du sol (0 à 35cm) et (35 à 70cm). Le tableau 19 montre la projection perpendiculaire des vecteurs variables sur les axes principaux. Les valeurs propres représentent la variation des individus (variables) sur ces axes exprimée en pourcentage des valeurs propres totales

Horizon 0 – 35 cm			
Axe	Valeurs propres	Pourcentage(%)	Pourcentage cumulé (%)
1	2,771	25,195	25,195
2	2,141	19,465	44,66
3	1,317	11,981	56,641
Horizon 35 – 70 cm			
1	2,706	24,604	24,604
2	2,375	21,594	46,2
3	1,354	12,309	58,55

Tableau n°19 : Valeurs propres et pourcentages des axes principaux.

Pour l'horizon de surface, les deux premiers axes principaux ont des valeurs propres égales respectivement à 2,77 et 2,14 et expliquent respectivement 25% et 24% de la variation totale. Pour les horizons de subsurface, les deux premiers axes représentent 46% de la variation totale. Nous retiendrons donc uniquement les deux premiers axes dans les

deux couches du sol. Le cercle de corrélation permet de visualiser les variables corrélées entre elles et par conséquent leurs dissemblances et ressemblances. Les figures 18 et 19 révèlent une forte relation entre les mesures de la CEMh, la CEps et l'Hp% dans les deux horizons. D'autre part, on remarque qu'il y a une forte opposition entre la fraction grossière et la fraction fine due généralement à l'arrangement des ces particules dans le sol.

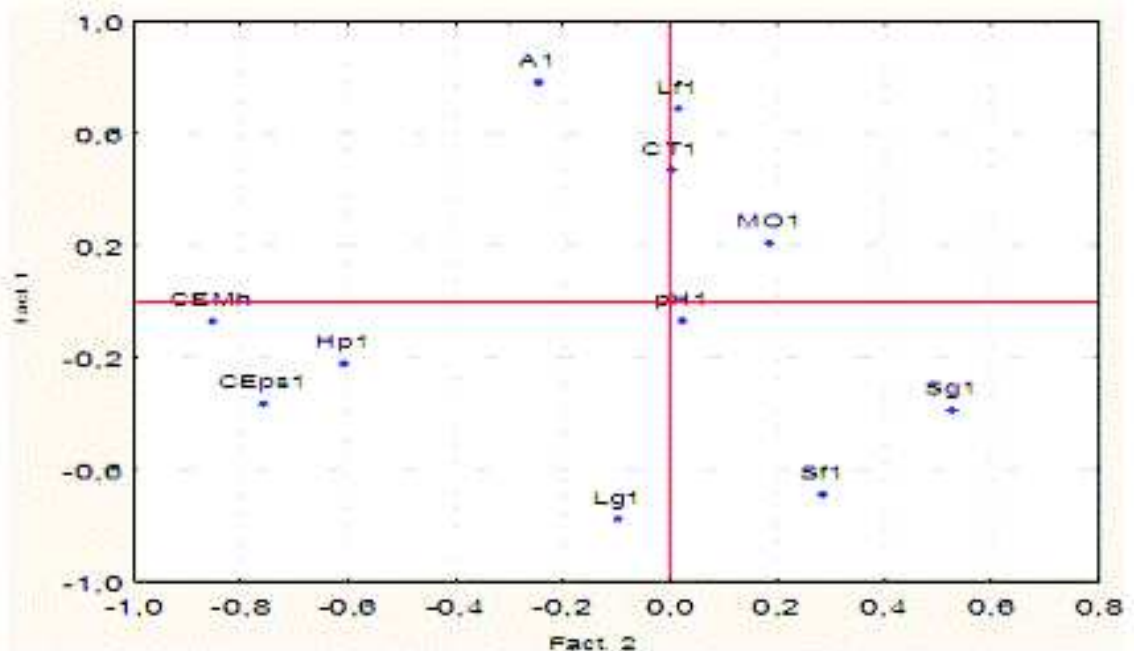


Figure n°18 : Projection des 11 variables dans le plan de l'axe 1 et 2 pour l'horizon de surface

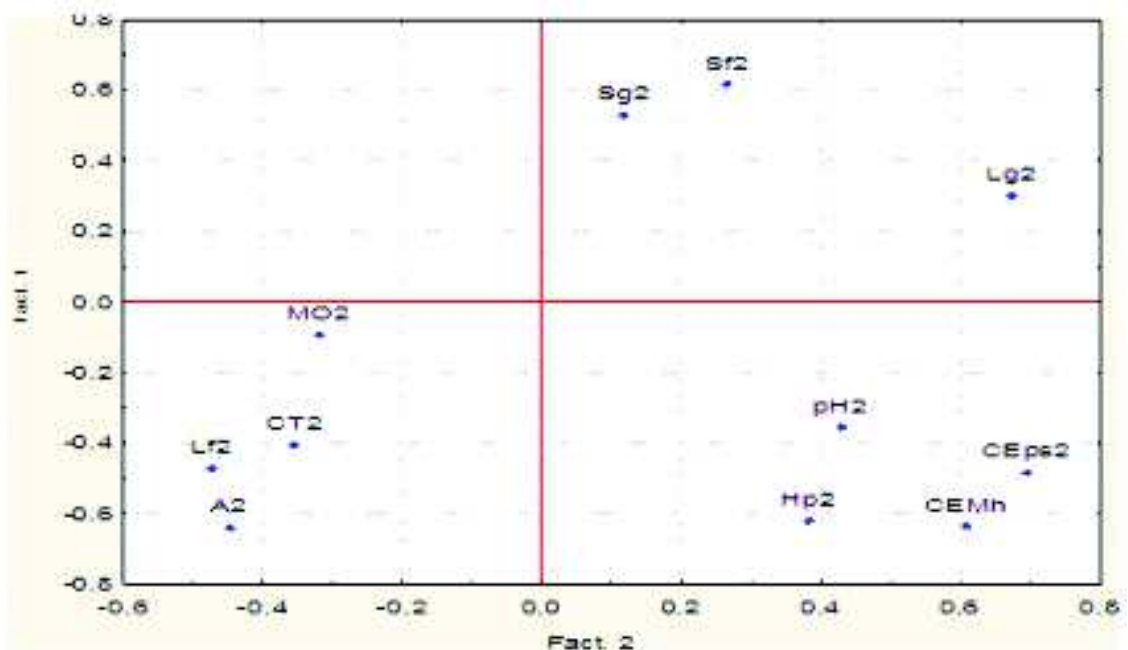


Figure n°19 : Projection des 11 variables dans le plan de l'axe 1 et 2 pour l'horizon de subsurface

La contribution de chaque variable dans la formation d'une composante principale est donnée par le coefficient de corrélation entre la variable et l'axe considéré; plus ce coefficient est important, plus la variable contribue à la formation de l'axe. La projection des variables dans le plan de l'axe 1 et 2 pour l'horizon de surface révèle que les corrélations des variables avec l'axe2 sont négatives, elles sont classées par ordre croissant $CEMh > CEps1 > Hp1\%$. Ces variables sont les mieux représentées sur ce plan. Cet axe représente l'axe de la salinité. Les corrélations sur l'axe1 sont positives pour $\%A1$ et $\%Lf1$ et négatives pour $\%Sf1$ et $\%Sg1$. Ces variables sont les mieux représentées sur l'axe qui représente l'axe de la texture. Pour l'horizon de subsurface, les corrélations des variables $CEMh$, $\%A2$, $\%Hp2$, sont négatives sur l'axe 1 et s'opposent aux $Sf2\%$, $Sg2\%$ et $\%Hp2$. Les variables $CEMh$, $CEps2$ et $\%Lg$ sont corrélées positivement sur l'axe 2 qui représente aussi l'axe de la salinité.

L'analyse en composantes principales (ACP), par son traitement multiparamétrique a permis donc de mettre en évidence les interactions entre l'ensemble des variables du sol, y compris les valeurs de l'EM38 en mode horizontal. En effet, la projection de toutes les variables dans l'espace factoriel décrit par l'ACP est exprimée par le coefficient de corrélation (r) de chacune de ces variables. La valeur de ce coefficient représente la part de la variation expliquée par une composante principale. Les résultats de cette analyse ont révélé que l'ensemble des variables du sol qui contribuent fortement à l'axe 1 sont les variables qui ont les valeurs du coefficient le plus élevé, donc elles sont étroitement liées positivement entre elles. Il s'agit en l'occurrence et par ordre décroissant de la de $CEMh$, de $CEps$ et de $Hp\%$. Elles constituent les variables de la salinité et s'opposent par rapport à l'axe 1. Les variables $\%A$ et $Lf\%$ sont, quant à elles, étroitement liées entre elles et s'opposent par rapport à l'axe 2 aux variables $\%Lg$ et $\%Sf$ et $\%Sg$. Cet ensemble constitue l'axe de la texture.

De ce fait, nous pourrions dire que les analyses statistiques univariées et multivariées ont permis de caractériser les variables du sol selon les deux classes de profondeur (0 à 35) et (35 à 70) et de mettre en évidence les interactions spatiales qui peuvent exister entre elles. Une répartition selon la loi normale caractérise la distribution de l'ensemble des échantillons à l'exception de la $CEps$ et du $Sg\%$ qui ont une distribution log normale. L'analyse de la variabilité de chaque paramètre révèle des CV très élevés pour la $CEps$ et le $\%Sg$. Les autres paramètres ont des CV plus modérés. La comparaison des moyennes de chaque variable dans chaque niveau de profondeur a révélé des différences de moyennes non significatives pour les variables $A\%$, $Hp\%$ et $MO\%$. Ce résultat peut s'expliquer par les teneurs homogènes de ces variables dans les deux classes de profondeur. La différence de moyenne est significative pour les variables ($CEps$, $Sf\%$ et $Lg\%$) et explique que ces variables changent lorsqu'on passe du premier horizon au deuxième horizon. De même, l'analyse multivariée a permis de mettre en évidence la variabilité spatiale de l'ensemble des variables et son incidence sur la variabilité spatiale de la $CEMh$.

2. - Analyse spatiale de la salinité

L'évaluation spatiale la salinité dans la zone d'étude porte sur les deux couches du sol (0 à 35cm) et (35 à 70 cm). La salinité du sol est estimée d'abord par les valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée ($CEps$) issues de l'analyse des échantillons, et ensuite, par les mesures de la $CEMh$ aux points de sondage et enfin par l'ensembles des mesures en utilisant les équations d'étalonnage issues de la régression simple. Les

valeurs de la CEps et les mesures de l'EM38 ont été préalablement transformées en logarithme népérien. Les normes d'interprétation de l'USSL (1954) y seront adaptées selon le tableau 20.

CE dS/m	Ln CE 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
> 16	> 2,773	Extrêmement salin

Tableau n°20 : Présentation des normes d'interprétations de USSL (1954)

2.1. - Variographie

Le but de cette analyse est de rechercher pour chaque paramètre un modèle structurel théorique du variogramme utilisable lors des procédures d'interpolation par krigeage.

2.1.1. - Variogramme de la CEps de l'horizon de surface et de subsurface

Le variogramme surfacique permet l'identification d'un comportement anisotrope de la variable étudiée lorsque la structure spatiale change non seulement en fonction de la distance mais également selon la direction. La valeur de l'anisotropie est incluse dans la modélisation du semi variogramme.

Les variogrammes surfaciques de la CEps de l'horizon de surface et de subsurface (figures 20 et 21) montrent du comportement anisotrope selon deux directions. Cette anisotropie se manifeste par des valeurs de la dissemblance en décroissance dans la direction Sud-Est et Nord-Ouest (100° et 10°). Elle est calculée par l'ajustement commun de deux variogrammes directionnels selon les deux directions.

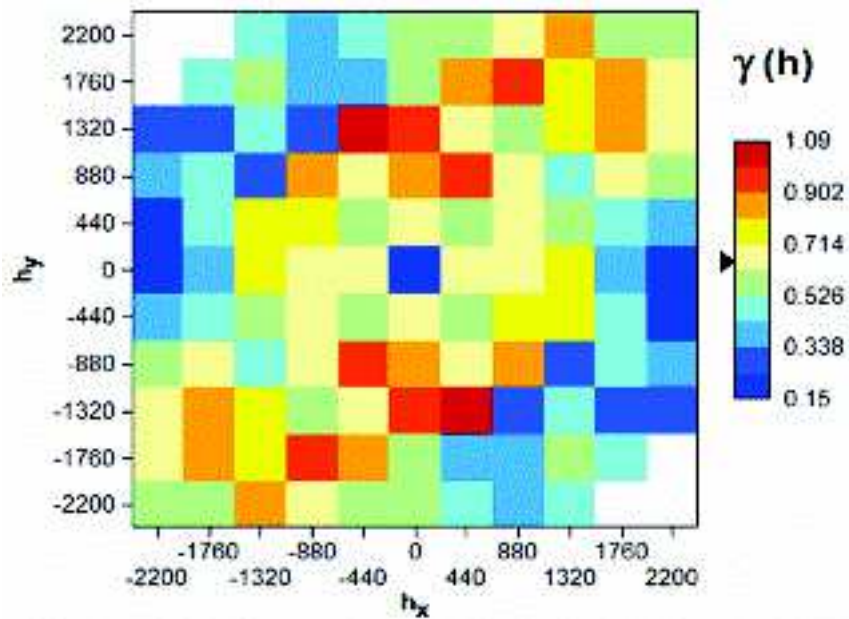


Figure n° 20: Variogramme surfacique de la LnCEps de l'horizon de surface

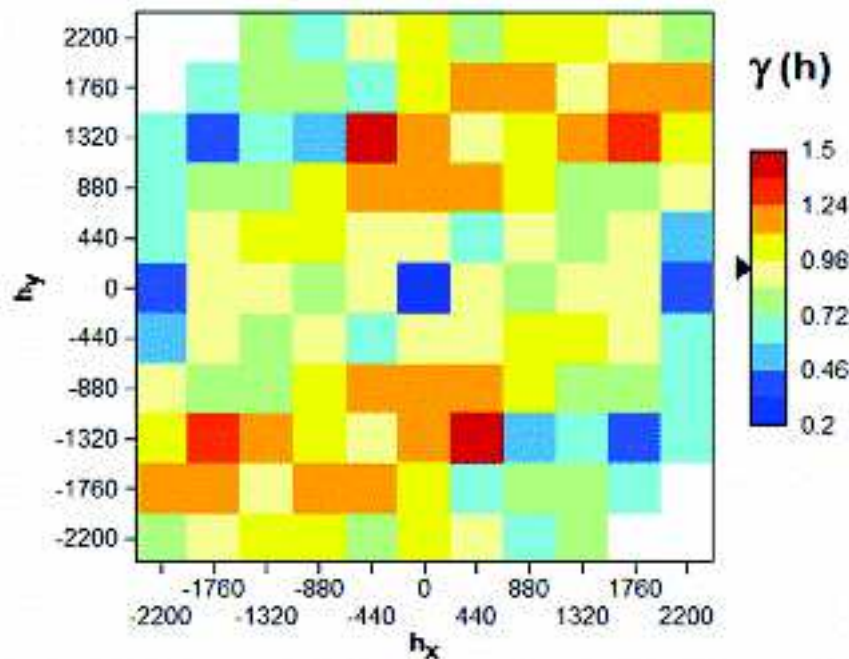


Figure n° 21: Variogramme surfacique de la LnCEps de l'horizon de subsurface

Le variogramme expérimental étudie la variation spatiale dans une direction donnée lorsque le phénomène présente un comportement anisotrope (directionnel) ou dans toutes les directions le cas échéant (omnidirectionnel). Le modèle du variogramme obtenu devient par la suite un outil indispensable pour l'estimation de la variable en tout point non échantillonné.

Les variogrammes expérimentaux directionnels de la CEps de l'horizon de surface (figure 22) s'ajustent mieux à un modèle sphérique théorique commun avec un rapport d'anisotropie égal à 1,1 selon la direction. Ce résultat signifie que la CEps évolue

différemment selon la direction considérée. La faible valeur de l'indice IGF (Indice Goodness Fit) indique un bon ajustement lorsqu'il est proche de zéro. La valeur de la dissemblance relative à la distance d'auto corrélation (palier) est égale à 0,51 dS/m soit ln 1,66 dS/m. Cette valeur élevée du palier indique la grande variabilité de la CEps de l'horizon de surface. L'effet pépité correspondant a une valeur de dissemblance à l'origine (h=0) égale à 0,16 dS/m (ln 1,17 dS/m) et représente 23% de la variance totale. Elle exprime soit des erreurs de mesures de la CEps, soit des hétérogénéités spatiales existantes à une échelle plus détaillée que celle optée pour l'échantillonnage. La portée égale à 660 m selon les deux directions. Au-delà de cette distance, les mesures de la CEps deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesures sont proches. La connaissance de cette portée peut être également utile pour le choix du pas d'échantillonnage dans la zone d'étude.

L'ajustement des variogrammes expérimentaux directionnels de la CEps de l'horizon de subsurface selon ces deux directions à un modèle sphérique (figure 23) montre un effet de pépité assez élevé (1,3dS/m) représentant 33 % de la variabilité globale. Le palier est de 2.63 dS/m et la portée est de 810 m selon les deux directions. Le rapport d'anisotropie est de 0,94. Ce résultat signifie que la direction n'a qu'une faible influence sur la variabilité de la salinité de cette horizon.

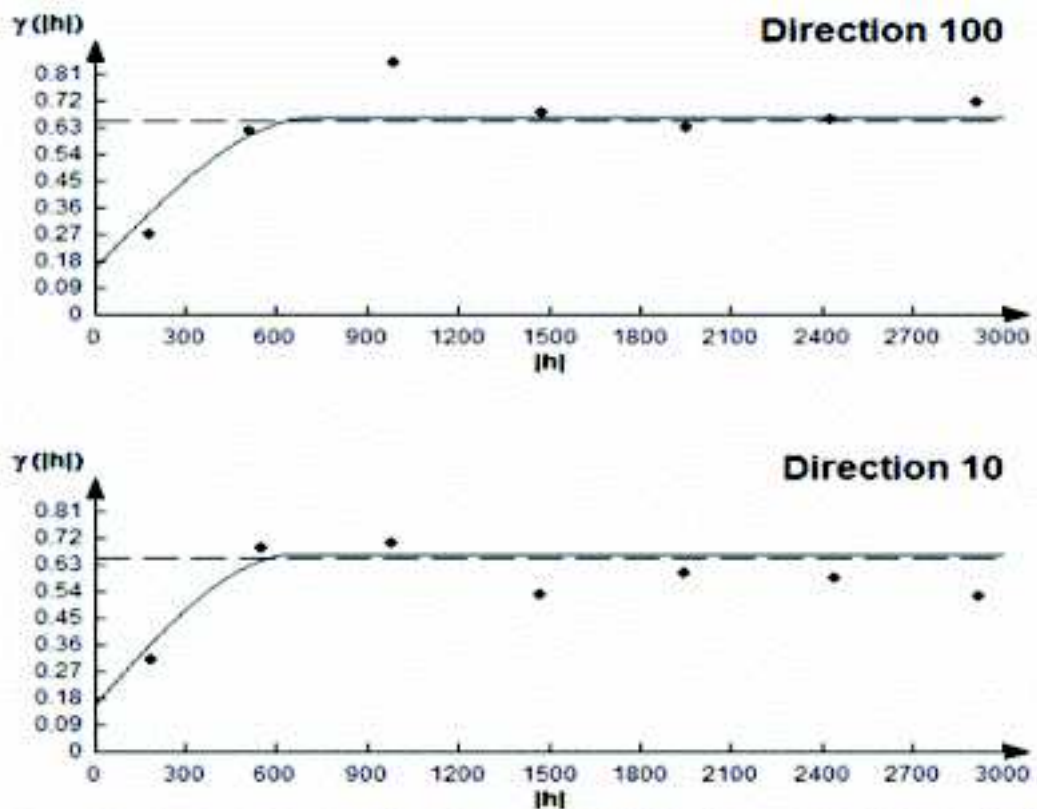


Figure n° 22: Variogrammes directionnels de la LnCEps de l'horizon de surface

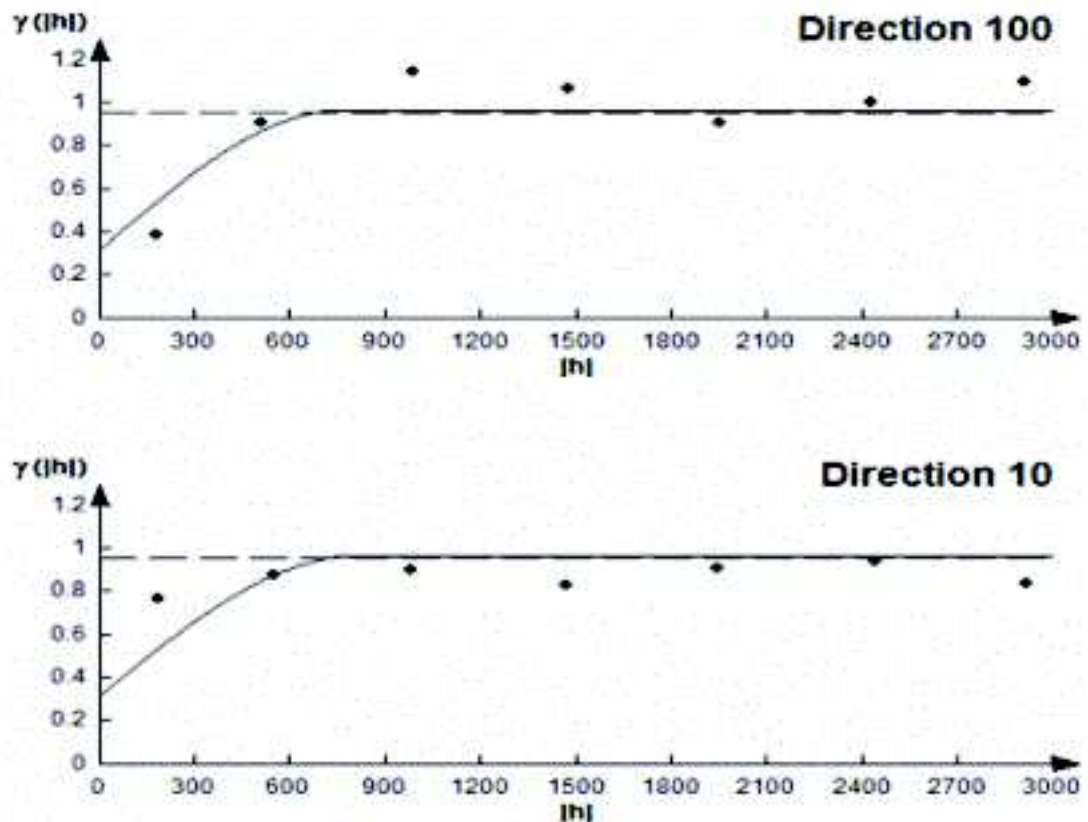


Figure n° 23: Variogrammes directionnels de la LnCEps de l'horizon de subsurface

2.1.2. - Variogrammes de la CEps de l'horizon de surface et de subsurface estimée aux sondages

Les variogrammes surfaciques de la CEps de l'horizon de surface et de subsurface estimées aux points de sondage (figures 24, 25) indiquent un comportement anisotrope maximal dans la direction NE-SO (145°) minimal dans la direction NO-SE (55°) révélant ainsi une meilleure auto-corrélation entre les points selon cette dernière direction. Ce résultat est pratiquement le même que celui obtenu pour la CEps de l'horizon de surface.

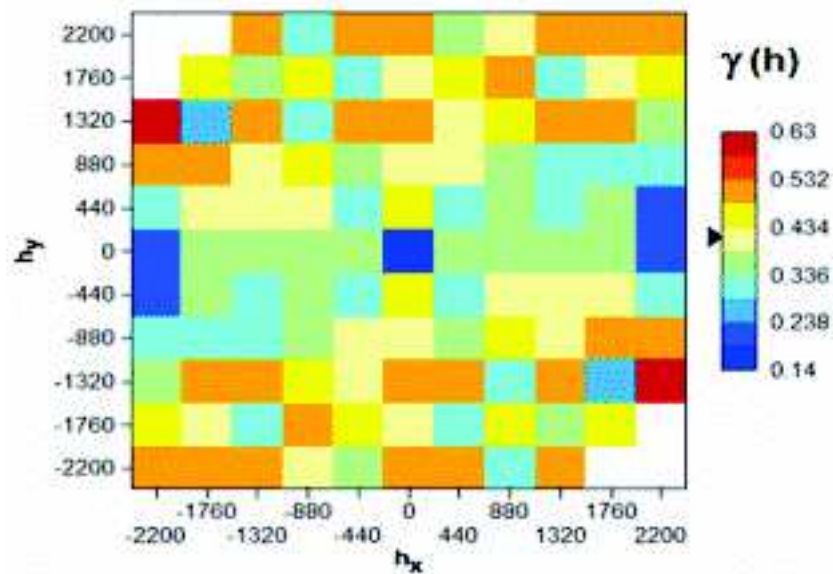


Figure n° 24 : Variogramme surfacique de la LnCEps de l'horizon de surface estimée aux sondages.

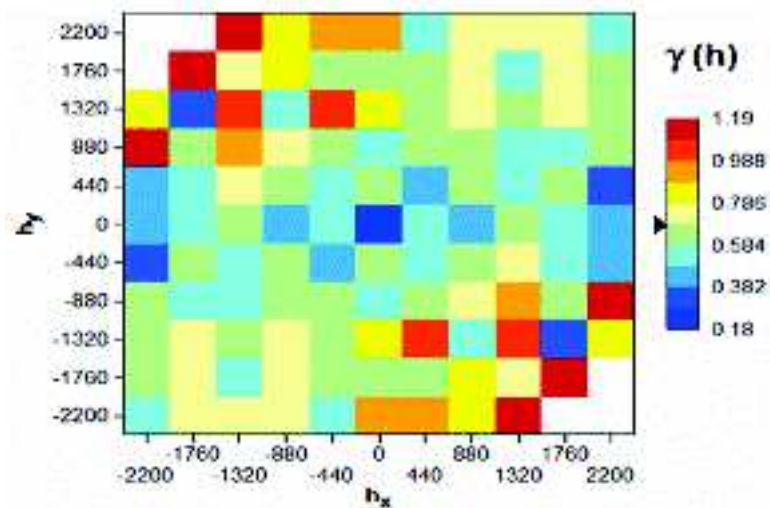


Figure n° 25 : Variogramme surfacique de LnCEps de l'horizon de subsurface estimée aux sondages.

Les variogrammes directionnels expérimentaux de la CEps de l'horizon de surface estimée aux points de sondage (figure 26) s'ajustent mieux aux modèles théoriques de type sphérique selon des deux directions. L'analyse des paramètres issus de cet ajustement révèle un effet de pépite de 0,21 dS/m (ln1,23dS/m) soit 53% de la variance totale et un palier de 0,18 dS/m. Ces deux valeurs montrent une forte sensibilité de la CEps estimée à la variation aux faibles distances. La portée est de 420 m.

L'ajustement du variogramme expérimental de la CEps de l'horizon de subsurface estimée aux points de sondage à un modèle théorique a aboutit à des variogrammes de type sphérique selon ces deux directions (figure 27). L'analyse des paramètres des variogrammes ajustés révèle la présence d'une variance locale (0,31ds/m) qui représente 46% de la variance totale. Le palier est atteint à une distance égale à 780 m. Cette valeur indique qu'il ya une auto corrélation entre les valeurs de la CEps pour les longues distances.

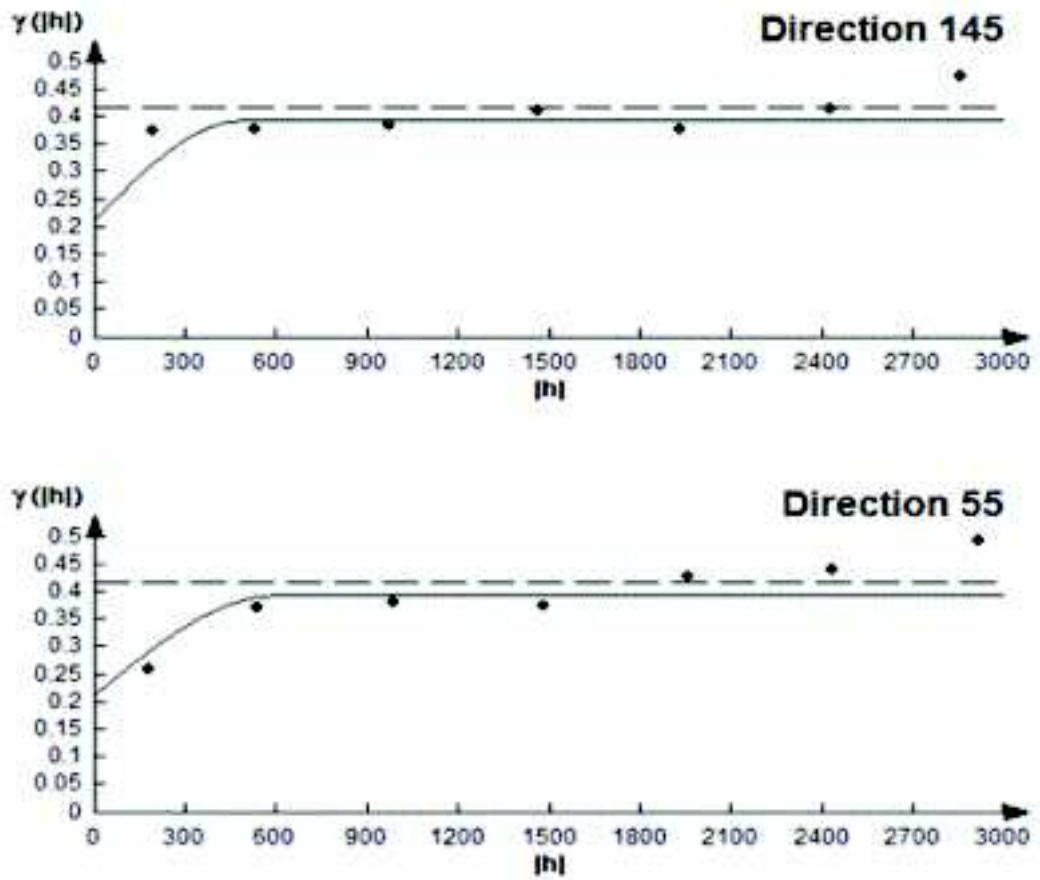


Figure n°26 : Variogrammes directionnels de la LnCEps de l'horizon de surface estimée aux sondages

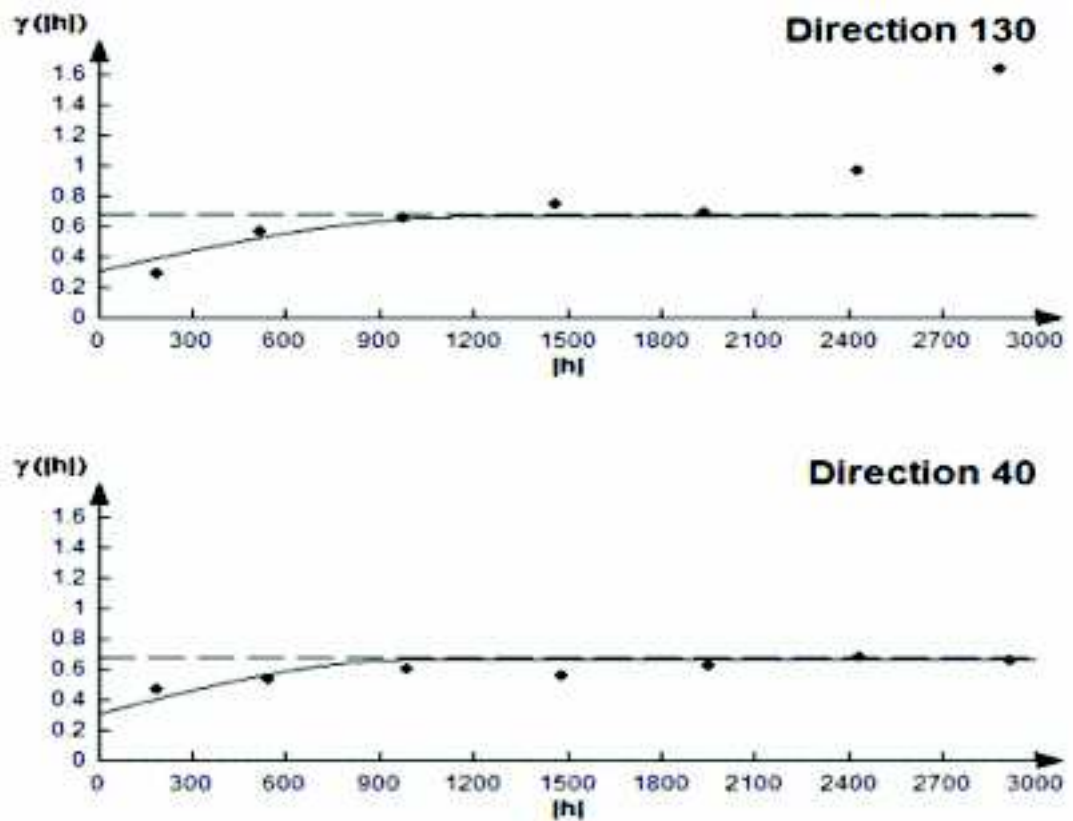


Figure n°27 : Variogrammes directionnels de la LnCEps de l'horizon de subsurface estimée aux sondages

2.1.3. - Variogrammes de la CEps estimée au niveau de l'ensemble des mesures de la CEMh

Les variogrammes surfaciques de la CEps de l'horizon de surface et de subsurface estimées sur l'ensemble des points de mesure (figures 28et29) mettent en évidence deux directions d'anisotropie, une anisotropie maximale selon la direction NE-SO (45°) et une autre minimale selon la direction NO-SE (135°).

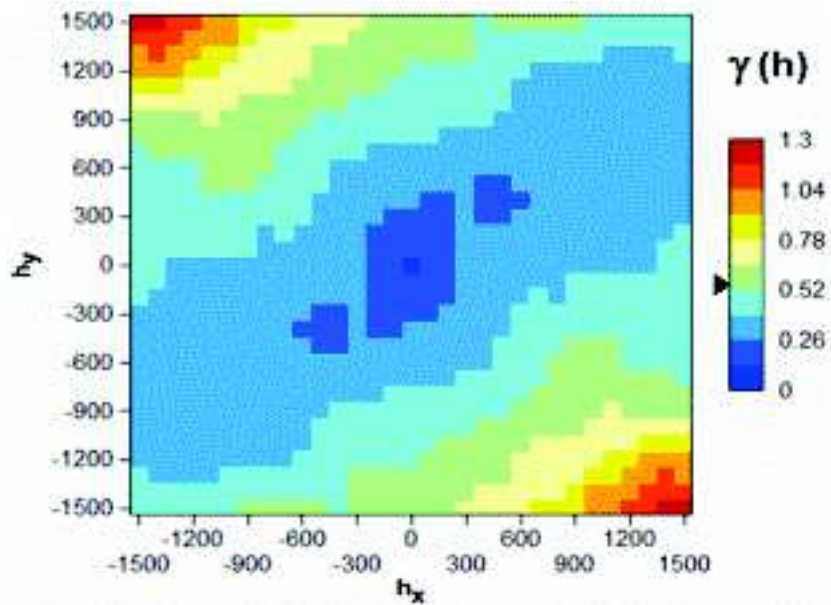


Figure n° 28: Variogramme surfacique de la LnCEps de l'horizon de surface estimée sur l'ensemble des mesures.

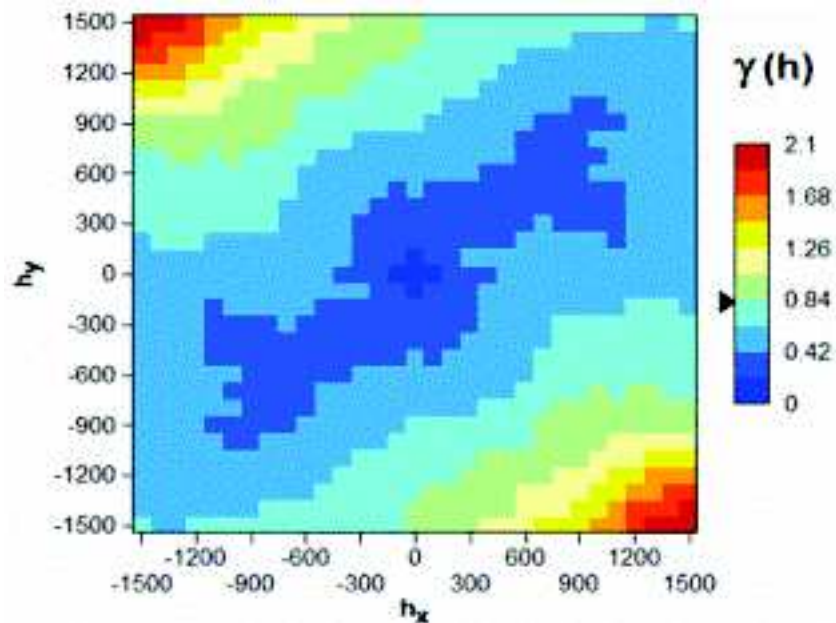


Figure n° 29: Variogramme surfacique de la LnCEps de l'horizon de subsurface estimée sur l'ensemble des mesures.

Les variogrammes expérimentaux directionnels de la CEps de l'horizon de surface et de subsurface estimée sur l'ensemble des mesures de l'EM38 en mode horizontal s'ajustent mieux aux modèle sphériques avec des effets de pépites égale à 0,162 dS / m et 0,216 dS / m pour la CEps1 et la CEps2 qui représentent 27% et 24% de la variance totale traduit une variabilité locale peu importante. Les portées sont égale à 2267 m et 2160 m au delà de ces distances, les mesures de la CEps deviennent statistiquement indépendantes. La connaissance de ces portées peuvent être également utile pour le choix du pas d'échantillonnage. Les valeurs de la dissemblance relatives à la distance d'auto-corrélation

(palier) sont égales respectivement à 0,6 dS/m et 0,9 dS/m. Ces paramètres d'ajustement des variogrammes seront pris en considération lors de l'estimation par krigeage ordinaire.

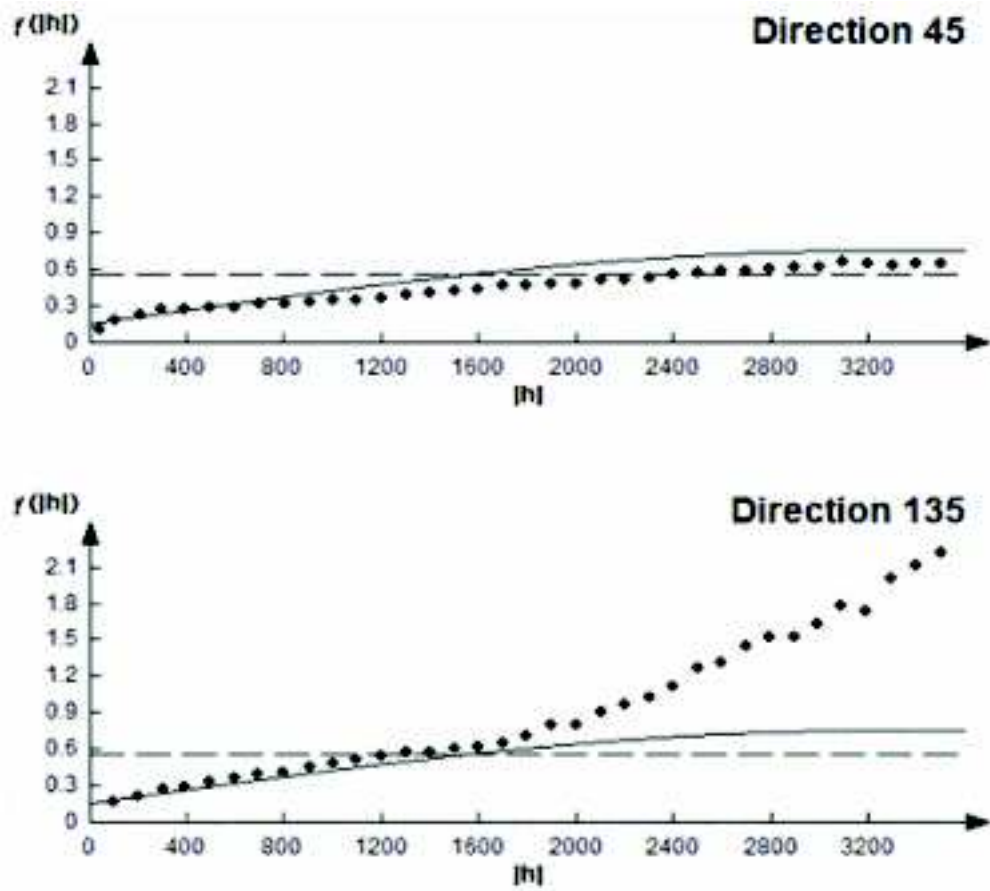


Figure n° 30 : Variogrammes directionnels de la LnCEps de l'horizon de surface estimée par l'ensembles des mesures.

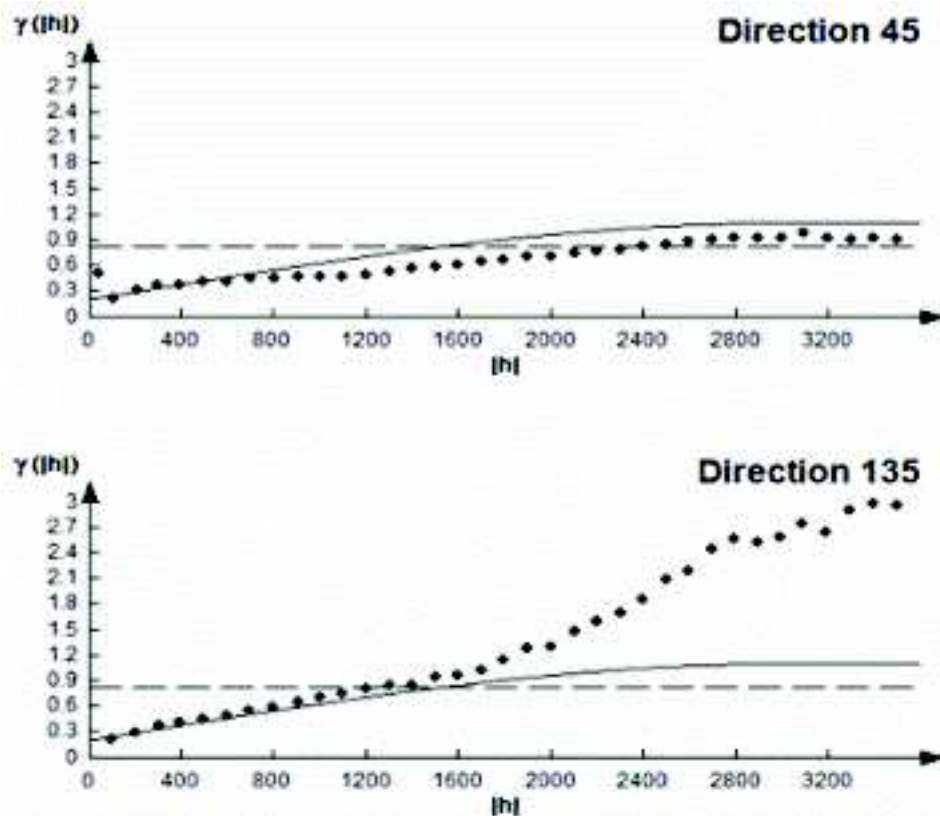


Figure n°31 : Variogrammes directionnels de la LnCEps de l'horizon de subsurface estimée par l'ensemble des mesures.

2.2. - Interpolation de la CEps de l'horizon de surface et de subsurface par le krigeage ordinaire

L'interpolation par le krigeage ordinaire consiste à cartographier la variation spatiale de la CEps dans des endroits échantillonnés et non échantillonnés. L'analyse de la carte d'isovaleurs de la CEps de l'horizon de surface établie par le krigeage ordinaire (figure 33) présente une certaine hétérogénéité de la salinité au niveau de la zone d'étude (figure 32) :

- Les sols non salins ($CEps < 0,693$ dS/m soit $CEps < \ln 2$ dS/m) occupent la partie la plus importante de la zone (467 ha soit 37 %) et se situent essentiellement au nord est et au sud-ouest.

- Les sols légèrement salins ($0,693$ dS/m $< CEps < 1,366$ dS/m soit $\ln 2$ dS/m $< CEps < \ln 4$ dS/m) occupent une bonne partie (422 ha soit 34 %) et se localisent au milieu de la zone.

- Les sols salins ($1,366$ dS/m $< CEps < 2,079$ dS/m soit $\ln 4$ dS/m $< CEps < \ln 8$ dS/m) sont assez bien représentés (316 ha soit 25 %) et s'étalent indifféremment sur toute la parcelle dont une bonne partie au nord de la zone.

- Les sols très salins ($2,079$ dS/m $< CEps < 2,773$ dS/m soit entre $\ln 8$ dS/m et $\ln 16$ dS/m) occupent le nord de la zone avec la présence d'une petite plage au sud ouest de la zone (50,5 ha soit 4 %).

- Les sols extrêmement salins ($CEps > 2,773 \text{ dS/m}$ soit $CEps > \ln 16 \text{ dS/m}$) représente seulement 0,5 ha soit 0,2% du total dans une petite plage située au sud-ouest de la zone.

Les sols salés ($CEps > 4 \text{ dS/m}$) se trouvent généralement au niveau des endroits les plus bas et/ou le niveau de la nappe est plus proche de la surface. Ces sols sont souvent occupés par des espèces halophytes de type Salsola et Atriplex.

Pour la carte de la $CEps$ de l'horizon de subsurface (figure 34) le gradient de salinité est orienté du sud vers le nord et relève les faits suivants (figure 32):

- Les sols non salins ($CEps < 2 \text{ dS/m}$) ne représentent que 112,5 ha soit 9% et se situent au sud est de la zone.
- Les sols légèrement salins ($2 \text{ dS/m} < CEps < 4 \text{ dS/m}$) sont les plus représentés dans la zone d'étude avec 602 ha soit 48% de la superficie totale et s'étalent sur le milieu de la zone.
- Les sols salins ($4 \text{ dS/m} < CEps < 8 \text{ dS/m}$) occupent également une bonne partie de la zone avec 407,5 ha soit 33 % et se localisent dans la partie nord et sud ouest de la zone d'étude.
- Les sols très salins ($8 \text{ dS/m} < CEps < 16 \text{ dS/m}$) occupent une partie peu importante (134 ha soit 10 %) et se situent essentiellement au nord de la parcelle.
- Les sols extrêmement salins ($CEps > 16 \text{ dS/m}$) sont inexistant.

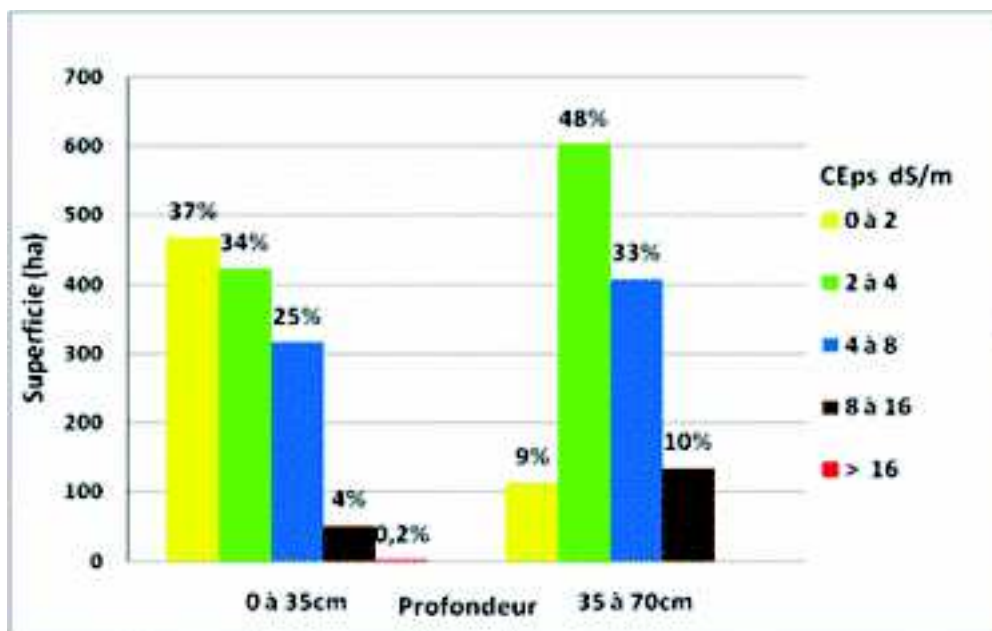


Figure n°32 : Répartition des classes de la $CEps$

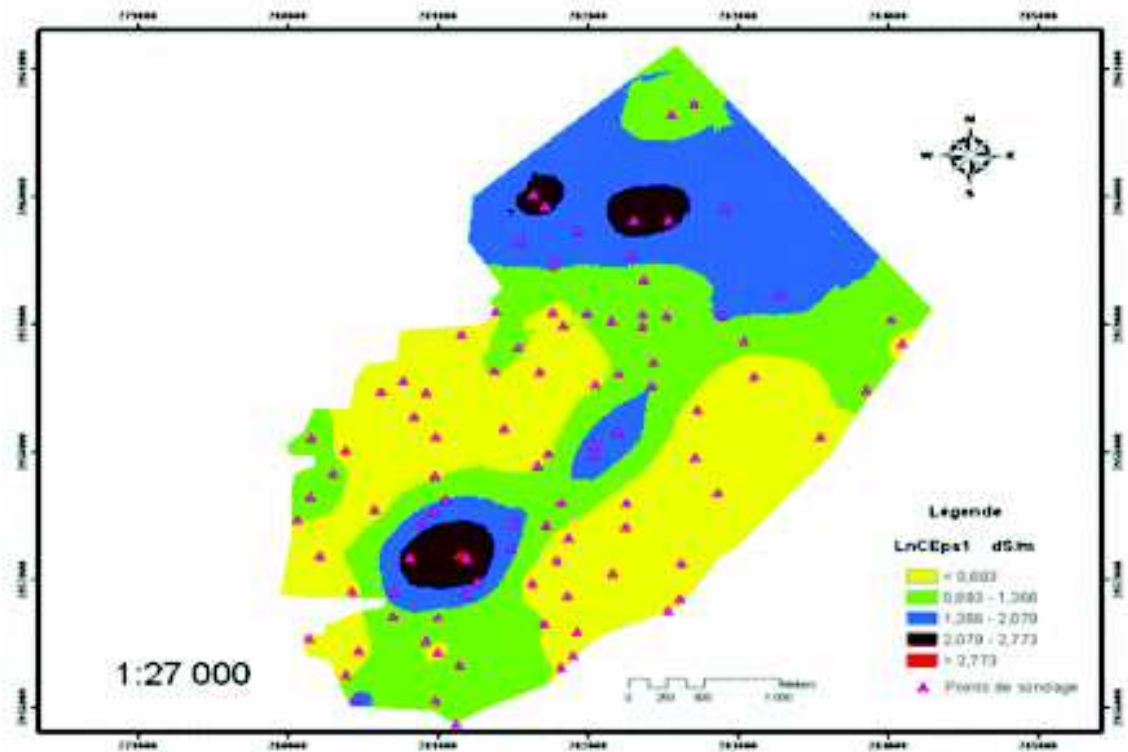


Figure n°33 : Carte d'isovaleurs de la LnCEps1 de l'horizon de surface

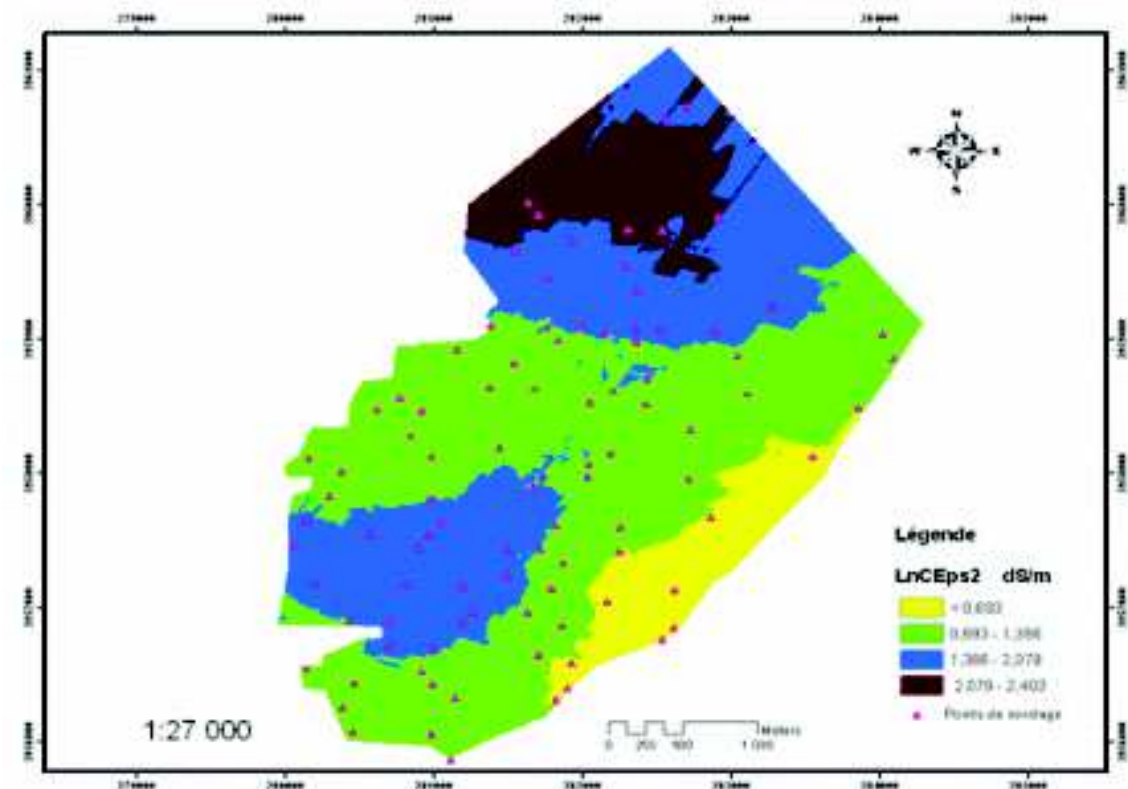


Figure n° 34: Carte d'isovaleurs de la LnCEps2 de l'horizon de subsurface

Le coefficient de corrélation entre les valeurs de LnCEps mesurées de l'horizon de surface et de subsurface et les valeurs de LnCEps estimées est égale à 0,29 avec $p <$. Il indique une estimation très peu significative. Pour l'estimation globale, le nuage de points entre la CEps mesurée et les résidus montre qu'il y a une tendance d'une sous-estimation, ainsi, toutes les valeurs de LnCEps supérieures à 1,5 dS/m sont sous-estimées. Par contre, les faibles valeurs de Ln CEps ($< 0,5$ dS/m) sont surestimées, celles qui le sont les valeurs qui se situent entre 0,5 et 1,5 dS/m (figures 34 et 35).

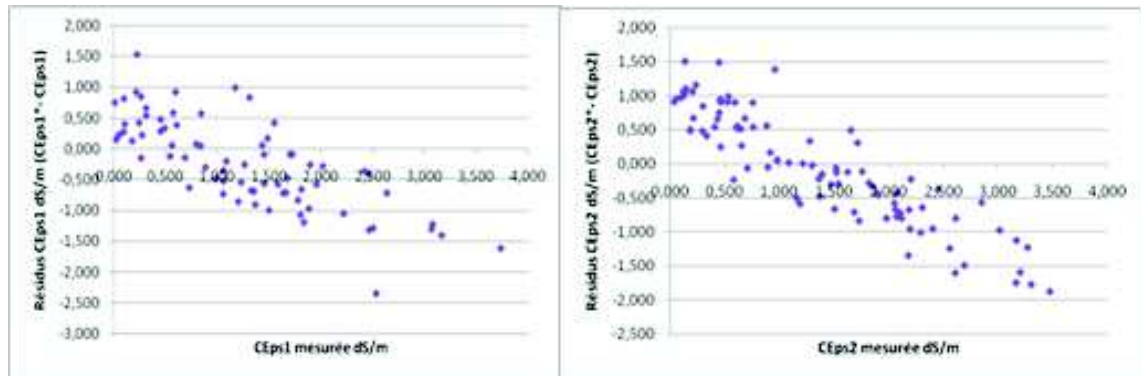


Figure n° 35: Corrélation entre la CEps et les résidus

2.3. - Interpolation de la CEps de l'horizon de surface et de subsurface estimées aux sondages par le krigeage ordinaire

La visualisation des cartes d'isovaleurs de la CEps estimée aux points de sondage des horizons de surface et de subsurface (figures 33 et 34) montre bien la répartition des classes de salinité (figure 36). La lecture générale de ces cartes indique que pour la CEps de l'horizon de surface, les sols légèrement salés sont les mieux représentés dans la zone d'étude et qui occupe le milieu de la zone avec une superficie de 582 ha soit 42 %. Les sols non salés occupent une bonne partie de la zone, ils se situent surtout au sud et au nord avec 417,5 ha, soit 30% de la superficie totale. Les sols salés occupent 254 ha soit 19% de la superficie et se situent au nord de la zone, alors que les sols extrêmement salés ne sont représentés que par de petites taches et cumulent 122 ha soit 9% de la superficie.

Pour la carte d'isovaleurs de la CEps estimée de l'horizon de subsurface, la répartition de la salinité (figure 36) dans la zone montre que les sols non salés (< 2 dS/m) ne représentent que 96,6 ha, soit 8% de la superficie et occupent la partie sud ouest de la zone, alors que les sols légèrement salés (2 dS/m $<$ CEps $<$ 4 dS/m) sont les plus représentés dans la zone d'étude avec 675,4 ha soit 54% de la superficie totale et sont répartis au milieu de la zone. Les sols salins (4 dS/m $<$ CEps $<$ 8 dS/m) occupent une superficie de 342 ha, soit 27 % de la superficie et se localisent au nord de la zone. Les sols très salins (8 dS/m $<$ CEps $<$ 16 dS/m) sont peu abondants (140 ha soit 11 %) et se situent essentiellement à l'est de la zone. Les sols extrêmement salins sont inexistantes.

En comparant ces cartes d'isovaleurs avec celles de la CEps, nous enregistrons une diminution de la superficie des classes (CEps $<$ 2 dS/m) et (4 dS/m $<$ CEps $<$ 8 dS/m) de l'horizon de surface qui passent respectivement de 37% à 30% et de 25% à 19% de la superficie totale. Par contre il y a une augmentation des superficies des classes (2 dS/m $<$ CEps $<$ 4 dS/m) et (8 dS/m $<$ CEps $<$ 16 dS/m) qui passent respectivement de 34% à 42% et 4% à 9% de la superficie totale. Le gradient devient de plus en plus élevé en s'orientant

vers le nord de la zone d'étude où nous constatons plus de variation de la CEps avec la présence des fortes valeurs (CEps >16 dS/m). Le centre de la zone est plus homogène. D'après cette répartition de la CEps on remarque que cette dernière serait étroitement liée à la topographie de la zone où les fortes valeurs de la CEMh coïncident avec les dépressions.

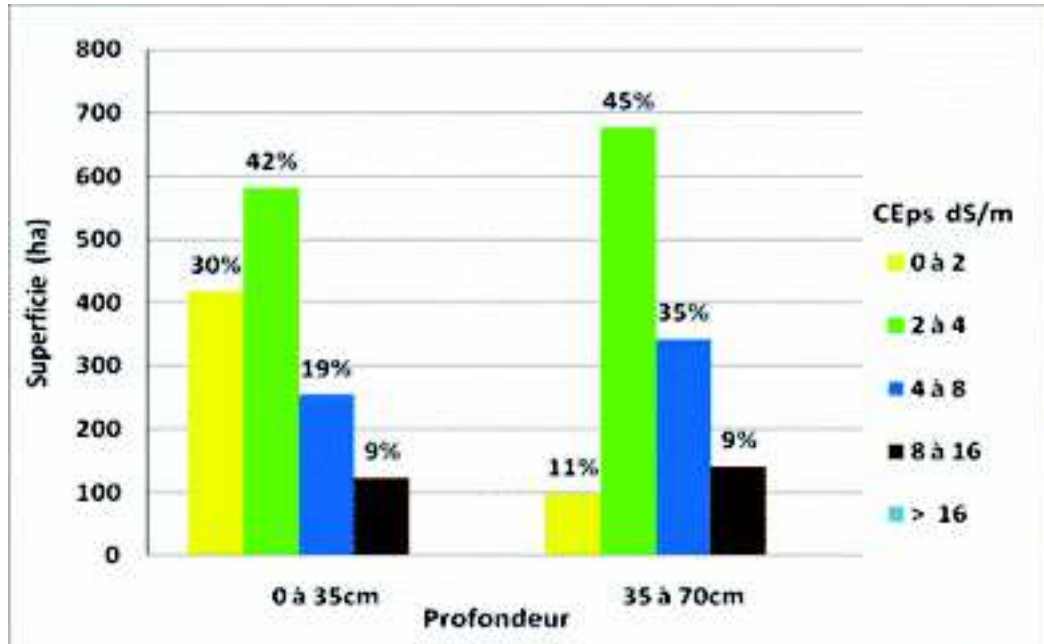


Figure n°36 : Répartition des classes de la CEps estimée aux sondages

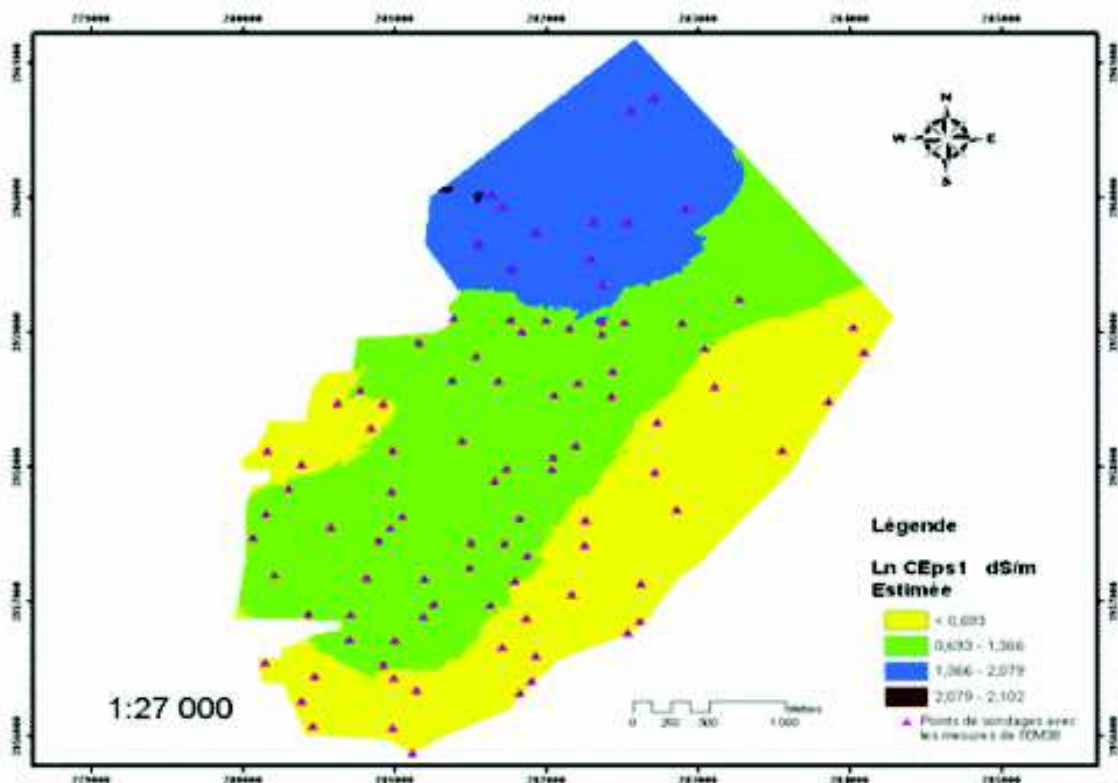


Figure n° 37: Carte d'isovaleurs de la LnCEps de l'horizon de surface estimée aux sondages

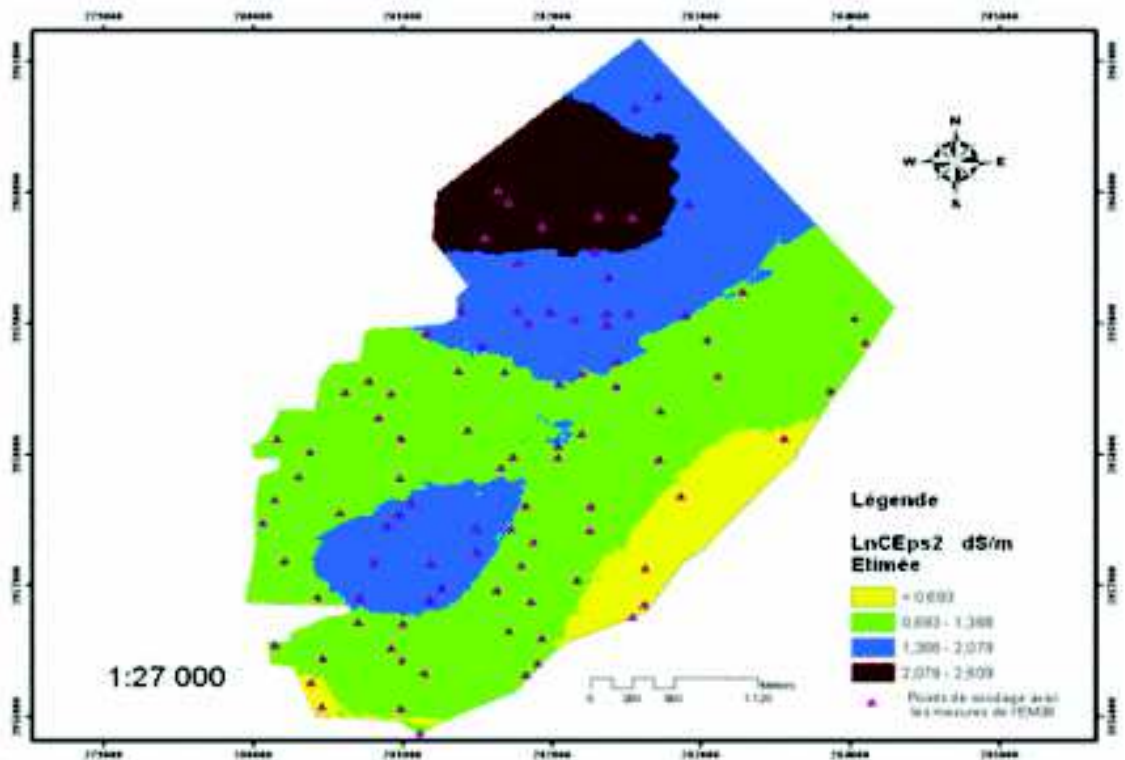


Figure n° 38 : Cartes d'isovaleurs de la LnCEp de l'horizon de subsurface estimée aux sondages

2.4. - Interpolation de la CEps de l'horizon de surface et de subsurface estimées par régression krigéage

La multiplication du nombre de prélèvements et d'analyses est très difficile en raison du coût et du temps de réalisation de cette opération, surtout si cette cartographie est destinée à être renouvelée au cours du temps. Les cartes d'isovaleurs de la CEps estimée sur l'ensemble des mesures horizontales de l'EM38 des deux horizons (figure 40 et 41) sont des représentations plus détaillées des cartes d'isovaleurs de la CEps estimée aux points de sondage dans la mesure où l'estimation de la CEps est répartie sur l'ensemble des points de lectures selon un échantillonnage systématique. La lecture de ces cartes montre bien que le gradient de la variation de la salinité augmente en allant vers le nord où nous trouvons les plus fortes valeurs de la CEps $CEps > 16$ dS/m. La répartition des superficies des classes de salinité estimée de l'horizon de surface se présente comme suit (figure 39) :

- Les sols non salins ($CEps < 2$ dS/m) occupent une importante superficie (550 ha, soit 44 %) et se situent à l'ouest de la parcelle.
- Les sols légèrement salins (2 dS/m $< CEps < 4$ dS/m) occupent une bonne partie (465 ha, soit 37 %) en se situant essentiellement au nord-ouest de la zone.
- Les sols salins (4 dS/m $< CEps < 8$ dS/m) occupent partie moins importante de la zone (128 ha, soit 10 %).
- Les sols très salins (8 dS/m $< CEps < 16$ dS/m) occupent aussi une partie moins importante que celle des sols salins (103 ha, soit 8%) et se situent à l'est de la zone.
- Les sols extrêmement salins ($CEps > 16$ dS/m) ne sont représentés que par de petites plages (10 ha soit 1 %) et se localise au nord de la zone.

Pour la carte d'isovaleurs de la CEps estimée de l'horizon de subsurface, les sols légèrement salés occupent 411 ha, soit 33 % de la superficie totale. Les sols non salés représentent une bonne partie avec 360,5 ha, soit 29% de la superficie. Les sols salins occupent 309,5 ha, soit 25 %. Les sols très salins représentent une superficie de 80 ha, soit 6%, alors que les sols extrêmement salins occupent 95 ha, soit 7% de la superficie totale de la zone d'étude.

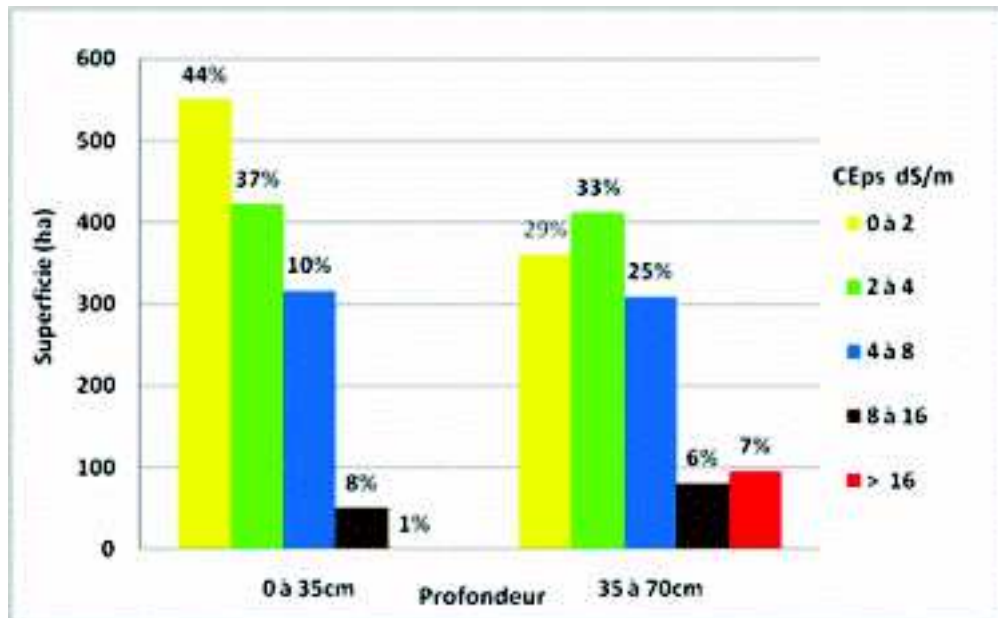


Figure n° 39: Répartition des classes de la CEps estimée sur l'ensemble des mesures

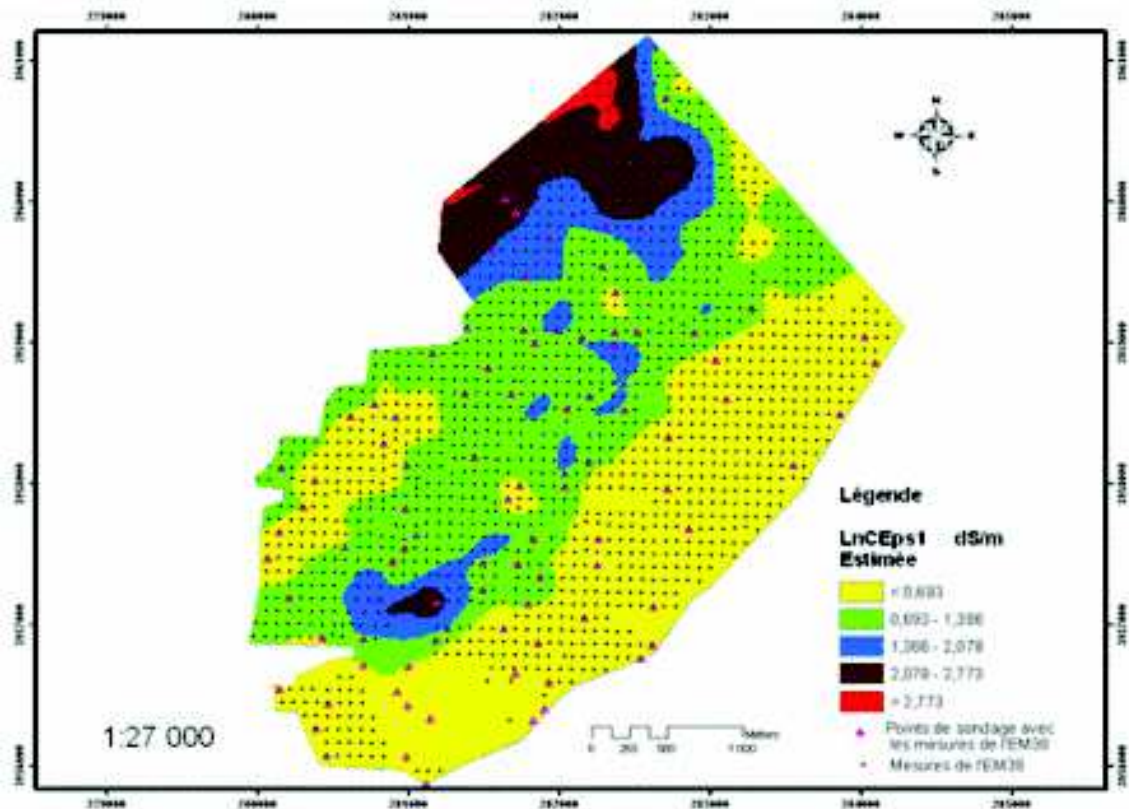


Figure n° 40 : Carte d'isovaleurs de la LnCEps de l'horizon de surface estimée sur l'ensemble des mesures

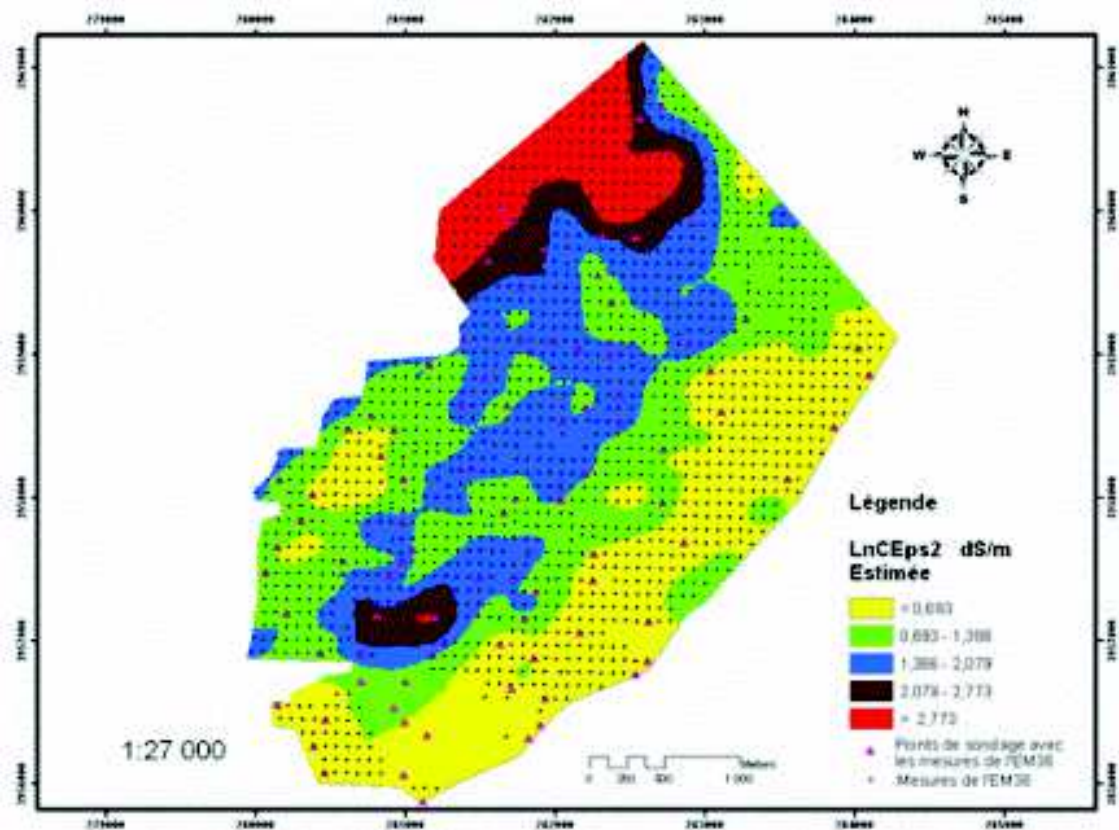


Figure n° 41 : Carte d'isovaleurs de la Ln CEps de l'horizon de subsurface estimée sur l'ensemble des mesures.

2.5. - Interpolation de la CEps de l'horizon de surface et de subsurface par le cokrigage ordinaire

L'objectif de cette interpolation est de mesurer le succès de l'incorporation de la structure des données de la CEMh dans la prédiction spatiale de la salinité dans des site non échantillonnés et de la comparer à la technique d'interpolation usuelle (krigeage ordinaire). La variable auxiliaire est connue en chaque nœud de la grille d'estimation. Prendre en compte l'ensemble des informations disponibles (96 points de mesure de la CEps ; 1200 nœuds de la grille). La mesure de la variation conjointe de deux variables contenues Z_i et Z_j constitue le cross variogramme expérimental.

La réduction des incertitudes avec l'approche géostatistique en utilisant la variable auxiliaire CEMh a permis d'établir la carte d'isovaleurs de la CEps par le cokrigage ordinaire (figures 37 et 38). La carte d'isovaleurs de la CEps de l'horizon de surface estimée par le cokrigage montre que les sols légèrement salés occupent une bonne partie de la zone avec 615 ha soit 49% de la superficie totale. Les sols non salés se localisent à l'ouest et au sud-est de la zone avec 359 ha soit 29%. Les sols salins se situent au nord et au sud ouest de la zone avec 282 ha soit 22% de superficie totale (figure 42).

La carte d'isovaleurs de la CEps de l'horizon de subsurface estimée par le cokrigeage indique que les sols non salés se trouvent dans la partie sud est avec une superficie de 139 ha soit 11% de la superficie totale. Les sols légèrement salés sont les plus dominants dans la zone et se localisent généralement au nord et s'étalent à l'ouest de la zone avec 656 ha soit 45 % de la totalité de la superficie. Les sols salins occupent une bonne partie et localisent au nord et l'ouest de la zone avec 437 ha soit 35 % de la superficie. Les sols très salés se localisent dans la partie nord avec 115 ha soit 9% de la superficie totale (figure 42).

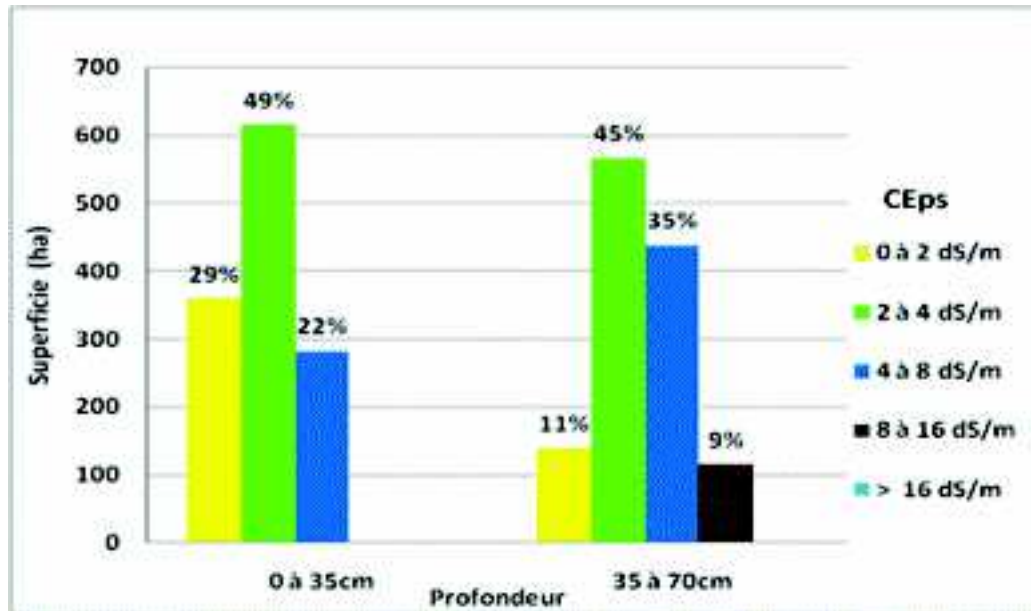


Figure n° 42: Répartition des classes de la CEps estimée par cokrigeage

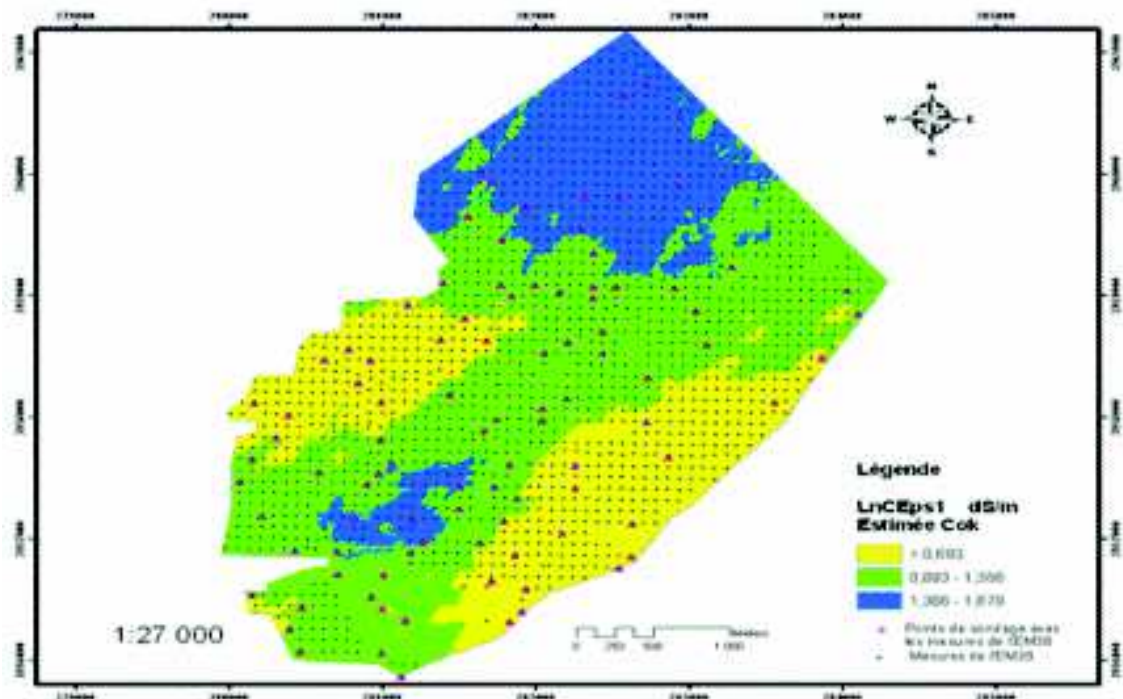


Figure n° 43 : Carte d'isovaleurs de la LnCEps de l'horizon de surface estimée par le cokrigeage.

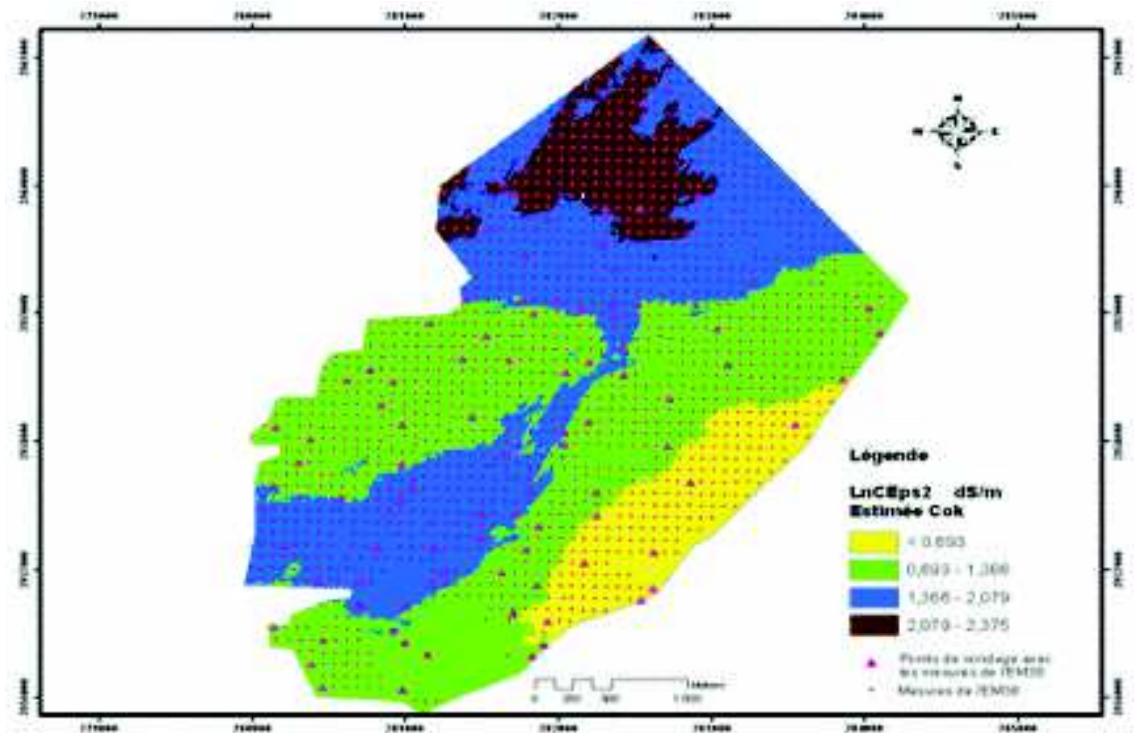


Figure n° 44 : Carte d'isovaleurs de la LnCEps de l'horizon de subsurface estimée par le cokrigeage.

Les méthodes d'interpolations réalisées nous ont permet d'estimer la variabilité spatiale de la CEps dans les deux couches de sol. Le but de l'utilisation de ces méthodes est d'avoir une meilleure estimation possible de la CEps et de réduire les incertitudes liées au mode d'échantillonnage et la difficulté de réaliser un nombre élevé de mesures. L'interpolation par l'introduction des équations d'étalonnage issues de la régression simple dans l'estimation est une méthode plus fiable dans la mesure où elle donne une bonne corrélation entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées voir figure 45.

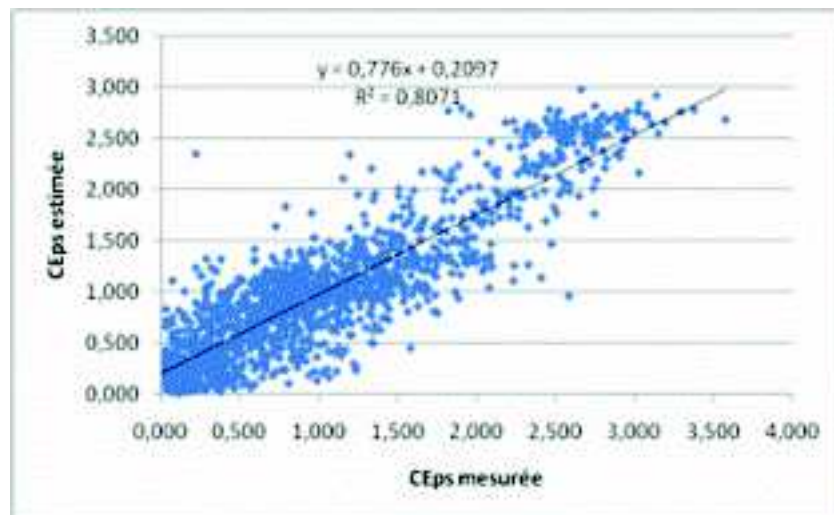


Figure n°45 : Corrélation entre la LnCEps mesurée et LnCEps estimée par régression krigéage

La comparaison des superficies de la CEps dans les deux couches de sol en fonction des méthodes d'interpolation est illustrée dans les tableaux 22 et 23. Cette répartition révèle que pour les horizons de surface, la superficie de la classe des sols salins (CEps > 4 dS/m) établie par le krigeage ordinaire (367 ha) est supérieure par rapport aux deux autres méthodes (214 ha et 282 ha). Par contre la superficie de la classe des sols non salins (CEps < 4dS/m) est inférieure est de 889 ha contre 1015 ha pour la régression krigeage et 974 ha pour le cokrigeage. Dans les horizons de surface, nous enregistrons l'absence de la classe des sols très salins pour la carte d'isovaleurs établie par le cokrigeage.

Pour les horizons de subsurface, la superficie de la classe des sols salins (CEps > 4 dS/m) établie par le cokrigeage (552 ha) est supérieure à celles obtenue par les deux autres méthodes (389 ha pour la régression krigeage et 540 ha pour le krigeage ordinaire). Par contre la superficie de la classe des sols non salins (CEps < 4 dS/m) est égale à 704 ha, 771 ha et 714 ha respectivement pour les trois méthodes. Nous enregistrons aussi dans les cartes d'isovaleurs de la CEps des horizons de subsurface, l'absence de la classe des sols extrêmement salins pour les cartes isovaleurs établies par le krigeage ordinaire et la régression krigeage.

Classes de salinité	0 à 2dS /m		2 à 4 dS /m		4 à 8 dS /m		8 à 16 dS /m		> 16 dS/m	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
CEps estimée krigeage ordinaire	467	37	422	34	316	25	50,5	4	0,5	0,2
CEps1 estimée Régression krigeage	550	44	465	37	128	10	103	8	10	1
CEps1 estimée Co- krigeage	359	29	615	49	282	22	-	-	-	-

Tableau n° 21: Répartition des classes de la salinité de l'horizon de surface estimées par trois types de krigeage

Classes de salinité	0 à 2dS /m		2 à 4 dS /m		4 à 8 dS /m		8 à 16 dS /m		> 16 dS/m	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
CEps estimée Krigeage ordinaire	112,5	9	602	48	407,5	33	134	10	-	-
CEps2 estimée Régression krigeage	360,5	29	411	33	309,5	25	80	6	95	7
CEps2 estimée Co- krigeage	139	11	565	45	437	35	115	9	-	-

Tableau n° 22: Répartition des classes de la salinité de l'horizon de subsurface estimées par trois types de krigeage

La salinité au niveau de la zone d'étude trouve son origine à l'enrichissement en sels solubles au niveau du périmètre de la Mina ces 30 dernières années le sous l'effet d'un déficit hydrique climatique dû à une faible pluviométrie annuelle (253 mm), à une évapotranspiration annuelle très élevée (1523 mm) et à un déficit en eau d'irrigation à partir du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda 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 (1,70dS/m) pour l'eau du barrage et supérieur à 5.57 pour les eaux de forage (INSID, 2006) 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'estimer la variabilité spatiale de la salinité des sols du périmètre irrigué de la Mina par induction électromagnétique. L'expérimentation est réalisée sur une superficie de 1256 hectare. Les mesures électromagnétiques (1690 mesures) en mode horizontal ont été effectuées d'une façon systématique au nœud d'une grille d'un pas de 80 m et géoréférencés par un GPS. Les sondages à la tarière ont été choisis selon la variation des mesures de l'EM 38 et les prélèvements des échantillons ont été effectués sur deux niveaux de profondeurs 0 à 35 cm et 35 à 70 cm.

Les principaux résultats obtenus indiquent que la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée (CEps), le sable grossier (Sg%) et les limons grossiers (Lg%) sont les plus dispersées dans les deux couches de sol avec des CV très élevés ($CV > 70$), alors que le pH est le paramètre le plus homogène ($CV=2,5$). La conductivité électrique des extraits des pâtes saturées varie entre 0,52 et 41,7 dS/m. Ce résultat montre que la salinité est très variable dans l'espace. Les échantillons salins (CEps > 4 dS/m) représentent 32 % des échantillons de l'horizon de surface et 44% de ceux de l'horizon de subsurface. Cette salinisation est le résultat probablement d'une irrigation non contrôlée (les eaux sont généralement chargées), de l'aridité du climat, de la texture fine et du mauvais drainage. Les paramètres étudiés se distribuent selon une loi normale à l'exception de la CEps (log-normale).

Les mesures de l'EM38 en mode horizontal sont très variables dans l'espace (CV égale 106 %) et varient entre 3 et 770 dS/m. La moyenne et la médiane des mesures verticales sont supérieures aux mesures horizontales indiquant une distribution descendante de la salinité dans le profil (Corwin et Rhoades, 1984; Job et al, 1987; Lesh et al, 1992; Johnson et al, 2001).

L'analyse a montré aussi une corrélation hautement significative entre les mesures électromagnétiques horizontales, la CEps et l'humidité pondérale dans les deux couches de sol. L'étalonnage des lectures horizontales de l'EM38 par la conductivité électrique (CEps) des extraits des pâtes saturées et l'humidité pondérale par les régressions simples et multiples sur les deux couches de sol a révélé que la CEps est le facteur dominant responsable de la variation des mesures de l'EM38.

L'analyse spatiale de la salinité dans les couches de sol a porté d'abord sur la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée CEps des échantillons du sol. L'analyse variographique de la CEps a donné des variogrammes directionnels de type sphérique dans les deux couches avec des portées de 660 m et 810 m, supérieures au pas d'échantillonnage, un effet de pépité supérieurs à 50% indiquant une importante variabilité locale de la salinité par rapport à la variabilité globale et qui serait due selon certains auteurs (Boivin et Touma, 1988; Gascuel - Odoux, 1996) aux erreurs de mesure et/ou à une micro régionalisation de la salinité à cause d'un pas d'échantillonnage trop grand.

Les variogrammes directionnels de la CEps estimée aux sondages dans les horizons de surface et de subsurface sont respectivement de types sphériques avec des effets de pépité supérieurs à 50% de la variance totale et des portées respectives de 420 m et 780 m.

Les variogrammes directionnels de la CEps estimée sur l'ensemble des mesures de l'EM38 en mode horizontal (CEMh) sont de type sphérique avec une variance locale supérieure à 30 % et des portées respectives de 2267 m et 2160 m, supérieures au pas d'échantillonnage (80 m).

Les cartes d'isovaleurs de la CEps estimées par le krigeage ordinaire ont montrés que la zone d'étude présente une forte variabilité de la salinité au nord et au sud. La superficie des sols salins (CEps > 4dS/m) représente 30 % dans les horizons de surface et 43 % dans les horizons de subsurface.

Les cartes d'isovaleurs de la CEps estimée aux sondages révèlent une forte variabilité spatiale de CEps au nord de la zone. Les sols salins (CEps > 4 dS/m) représentent 29% de la superficie totale pour les horizons de surface et 43% pour les horizons de subsurface.

L'introduction des équations d'étalonnage issues de la régression simple a permis d'établir les cartes d'isovaleurs de la CEps estimée sur l'ensemble des mesures dans les deux couches de sol pour améliorer l'estimation de la CEps et de réduire les incertitudes. Ces cartes ont montré la présence d'une forte variabilité spatiale de la CEps au nord de la zone d'étude dans les deux niveaux de profondeur. Les sols salins (CEps > 4dS/m) occupent une superficie de 19% dans les horizons de surface, cette classe est inférieure à celle enregistrée dans la carte d'isovaleurs de la CEps (30%). Les sols salins représentent 38% de la superficie totale.

L'interpolation par le cokrigeage ordinaire est une autre manière d'estimer la CEps par l'introduction de la CEMh comme variable auxiliaire. La comparaison entre les deux cartes d'isovaleurs de la CEps établies par le krigeage ordinaire et par le cokrigeage révèle une augmentation de la superficie des sols salins ($4\text{dS/m} < \text{CEps} < 8\text{dS/m}$) qui passe de 30% à 39% dans la deuxième carte et aussi, la réduction de la superficie de la classe des sols très salins ($2\text{dS/m} < \text{CEps} < 4\text{dS/m}$) qui passe de 19% à 16% de la superficie totale. Le test de validation a donné une meilleure estimation de la CEps par régression krigeage par rapport aux autres modes d'interpolation. L'interpolation de la CEps par la régression krigeage a permis donc de mettre en évidence certaines zones affectées par la salinité. Cette salinité trouve son explication sur le fait que la plupart des terres de la plaine de la Mina est irriguée par des eaux de mauvaise qualité qui viennent généralement des forages et que les eaux de barrage et les doses lessivantes sont généralement insuffisantes pour baisser le niveau de salinité dans un réseau de drainage défectueux.

Enfin, ce travail a montré l'intérêt de la méthode électromagnétique pour l'estimation des paramètres physicochimiques ainsi que 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.

Cette recherche mérite d'être poursuivie en intégrant les mesures de l'induction électromagnétique en mode vertical pour inclure un volume de sol plus profond. Par ailleurs, des mesures sur des profondeurs bien ciblées dans des parcelles portées à la capacité au champ permettent de mieux appréhender les processus de salinisation des sols par induction électromagnétique.

Références bibliographiques

- AGID., 2002.** Travaux d'extension du périmètre de la Mina.
- ANRH., 2002.** Les périmètres irrigués en Algérie.
- Aubert G., 1976.** Les sols sodiques en Afrique de nord. Ann, INA d'Alger, vol. VI, n° 1, p 185- 196.
- Ayers R.S et Westcot D.W., 1994.** Qualité de l'eau en agriculture Bulletin d'irrigation et de drainage n° 29 revue 1. FAO, Rome 180p.
- Baize D., 1988.** Guide des analyses courantes en pédologie. INRA Edition, 170p.
- 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.
- C.P.C.S., 1967.** Classification des sols : commission de pédologie et de cartographie des sols. Doc. Multi., INRA Grignon.96p.
- Cameron D.R., De Jong E., Read D.W.L., Oosterveld M., 1981.** Mapping salinity using resistivity and electromagnetic inductive techniques. Can. J. Soil Sci.; 61(1):67-78p.
- Ceuppens J., Wopereis M.C.S., Miézan K. M., 1997.** Soil salinization processes in rice irrigation schemes in the Senegal River Delta. Soil Science Society of America Journal.p1122-1130.
- Chevry et Bourié., 1998.** La salinisation des sols. Sol interface fragile. INRA, Paris. 109- 126p.
- Chevry et Robert., 1998.** La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau. Revue Etude et gestion des sols5, 4. 217-228p.
- Chinnusamy V., Jagendorf A., Zhu J.K., 2005.** Understanding and improving salt tolerance in plants Soil Sci. Soc. Am. J. 45:437-448p.
- 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., Lesch S.M., 2003.** Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture Theory, Principles, and Guidelines. Agronomy Journal. 95, pp. 455-471.
- Corwin D.L., Lesch S.M., Oster J.D., Kaffka S.R., 2006.** Monitoring management-induced spatio- temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. Geoderma 131. 369-387p.
- Dagnelie P., 1982.** Théories et méthodes statistiques. V1, Presses Agron, Gembloux, 346p.

- De Jong, E., Ballantyne, A. K., Cameron D. R., Read D. W., 1979.** Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid salinity surveys. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 810- 812p.
- Delhomme J. P., 1976.** Application de la théorie de la variable régionalisée dans la science de l'eau. Thèse Doc. Ing. ENSM de Paris.130p.
- Devisme B.A., 2009.** Implications des communautés bactériennes ferri-réductrices et des paramètres environnementaux dans le fonctionnement et la qualité des sols de rizières (Thaïlande et Cote d'ivoire), thèse de doctorat en science du sol de l'université de Nancy I. 234p.
- Diba., 1995.** Caractérisation d'un sol halomorphe du Delta du fleuve Sénégal, fertilisation du riz aux engrais minéraux. Mémoire d'ingénieur de l'Institut des Sciences de la terre de l'UCAD, 57p.
- Djili K., Daoud Y., Gaouar A., Beldoudi Z., 2003.** La salinisation secondaire des sols au sahara. Conséquence sur la durabilité de l'agriculture dans les nouveaux périmètres de mise en valeur. *Science et changements planétaires/ Sécheresse.* Vol.14, N 4,241-6.
- Douaoui A, Gascuel-Odoux C, Walter C.H., 2004.** Infiltration et érodabilité des sols salinisés de la plaine du Bas Chélif Algérie. Mesure au laboratoire sous simulation de pluie. *EGS*, 11,(4), 379- 392p.
- Douaoui A., 2005.**Variabilité spatiale de la salinité en relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chélif. Apport de la géostatistique et de la télédétection. Thèse Doct. d'état, INA- Alger. 115- 142pp
- Douaoui A., Hartani T., 2007.**Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb. Actes du troisième atelier régional du projet Sirma, 5p.
- Durand J. H., 1958.** Les sols irrigables, étude pédologique. Section Pédologie et Agrologie. Alger, 191p. electrical conductivity measurements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 57.* FAO, Rome.
- Energoproject Beograd., 1967.** Etude de l'irrigation des grands périmètres Algériens, Périmètre de Bas- Cheliff. Rapport.
- Erindi K. A., 2005.** Remote sensing and root zone soil moisture. A thesis submitted to The Faculty of degree. Master of science. Mc Gill University, Montreal. 130p.
- Essington T.E., 2004.** Getting the right answer from the wrong model: Evaluating the sensitivity of multispecies fisheries advice to uncertain species interactions, *Bull. Mar. Sci.*74: 563-581p.
- FAO., 1972.**La salinité. Doc. FAO. N° 7, Rome, 272p.
- FAO., 1988.** World Agriculture Toward 2000 : An FAO study. N. Alexandratos (ed). Belhaven Press, London. 338 pp.
- FAO., 2003.** The State of Food Insecurity in the World . Monitoring progress towards the Food Summit and Millennium Development Goals. Rome, Italie. 36p.
- FAO., 2006.** Conférence électronique sur la salinisation extension de la salinisation et stratégies de prévention et réhabilitation, organisée et coordonnée par le programme International pour la technologie et la recherché en irrigation et drainage. 12p.

- Florinsky I. V., Eilers R. G., Lelyk G.W., 2000.** Prediction of soils salinity risk by digital Terrain modelling in Canadian prairies *Can. J. Soil Sci.* 80:455-463p.
- Fox M. L., 2004.** Identifying soils with potential of expanding sulfate mineral formation using electromagnetic induction. Submitted to the office of graduate studies of Texas A et M university in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of science. 80p.
- Gascuel-odoux C., 1987.** Variabilité spatiale des propriétés hydrique du sol, méthode et résultats; cas d'une seul variable : revue bibliographique. *Agronomie*, 7(1), p61-71.
- Gascuel-odoux C., Gyon D., Moreau p., 1996.** Élément de géostatistique. Acte de l'école de chercheur INRA en Bioclimatologie, le Croisic, p 335-358.
- Gonzalez Barrios J.L., Job J.O., Ahlers R., 2002.** Irrigation et salinisation des sols dans la partie basse aride du bassin Nazas-Aguanaval : le périmètre de la Comarca Lagunera (Nord-Mexique). *Science et changements planétaires. Sécheresse*. Vol 13,N° 13, p244-250.
- Goulard M., Voltz M., Monestiez P., 1987.** Comparaison d'approches multi variables pour l'étude de la variabilité spatiale des sols. *Agronomie.*, 1987, 7(9), pp 657-665. Graduate and Postdoctoral Studies Office in partial fulfillment of the requirements for the
- Halitim M., 1988.** Les sols des régions arides d'Algérie. Office des publication Universitaire. Alger, 384p.
- Hamdy., 2004.** Non-Conventional salinity and saline irrigation practices and management. IAMB, Italy, CIHEAM,199p.
- Hartani T., 1999.** Analyse des facteurs de salinisation dans le périmètre du Bas Cheliff. Séminaire Euro-Méditerranéen sur la maîtrise de l'irrigation et du drainage. Rabat, Maroc. 27- 29 Octobre 1997.
- 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):1933-1941p.
- Hendrickx J. M.H., Borchers B., Corwin D.L., Lesch S.M., Hilgendorf A.C., Schlue J., 2002.** Inversion of soil conductivity profiles from electromagnetic induction measurements: Theory and experimental verification. In *Soil Sci.Soc.Am.J.*66. P. 673-685.
- Hendrickx J.M.H., Kachanoski R.G., 2002.** Indirect measurement of solute concentration: Nonintrusive electromagnetic induction. In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) *Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Ser. 5.* SSSA, Madison, WI. 1297–1306 p.
- INSID., 1998.** Projet pilote sur la caractérisation de l'état actuel de la salinité du Bas-Cheliff, Alger.70p.
- INSID., 2008.** Caractérisation de l'état actuel de la salinité dans le périmètre de la Mina, Relizane.
- Jacob W. K., Prathapar S. A., Wopereis M.C.S., Sahrawat K.L., 1998.** How to manage salinity in irrigated lands : A selective review with particular reference to

irrigation in developing countries. SWIM paper, International Irrigation Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

- Job J. O., Mohdi M., Hachicha M., 1989.** Suivi de l'évolution de la salinité des terres dans le périmètre irrigué de Sidi-Saad (Kairouannais) premiers résultats de mesure de conductivité électromagnétique. Cahier ORSTOM n° 31.295 ex 1 Cote :B. p30.
- Job J.O, Bellier G, Gaaloul N, Montoroi J.P, Zante P., 1997.** Interprétation pédologique de données électromagnétiques et électriques Application au bassin versant d'El Gouazine. Colloque GEOFCAN, Bondy, France, 17-22p.
- 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, Fontainebleu, Tome 1 et 2, 737 p.
- 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 non contacting electromagnetic inductive methods. Canadian Journal of Soil Science, 68(5):pp715-722.
- Laborde J.P., 1989.** Méthodes d'interpolation, géostatistique et cartographie automatique à l'usage des géographe et de quelques autres; stage DEA Nice, 21p.
- Lamsal K, Gun N, Paudyal, Saeed M., 1999.** Model for assessing impact of salinity on soil water availability and crop yield. ELSEVIER, Agricultural Water Management 41, 57-70p.
- Lee B. D., Jenkinson B. J., Doolittle J. A., Taylor R. S., Tuttle J. W., 2006.** Electrical Conductivity of a Failed Septic System Soil Absorption Field. Soil Sci. Soc. Am. Published in Vadose Zone Journal 5:757-763p.
- Legros J.P., 2004.** Les grands sols du monde, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, p509-547.
- Lesch S.M., Strauss D.J., Rhoades. J.D. 1995.** Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques: I. Statistical prediction models: A comparison of multiple linear regression and cokriging. Water Resour. Res. 31(1) : pp 373-386.
- Lesch S.M., Rhoades J.D., Lund L.J., Corwin D.L., 1992.** Mapping soil salinity using calibrated electromagnetic measurements. Soil Sci. Soc. Am. J., 56(2):540-548.
- Lund E.D., Christy C.D et Drummond P.E., 1999.** Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture. Dans: precision Agriculture, Proc. Of the Fourth international Conference. P.C. Robert et al. (Eds), St-Paul, MN, (ASA-CSSA-SSSA). p 1089- 1100.
- Maas E.V., 1990.** Crop salt tolerance. Engineering practice 71. New York: ASCE, 1990: p262- 304.
- Maillard., 2001.** Le point sur et la salinité des sols en zone sahéenne: risqué et recommandation handicapée international, document des centres d'actions et de réalisations international, France, 35p.

- Marlet S., 2004.** Evolution des systèmes d'irrigation et gestion de la salinité des terres irriguées. Projet INCO-WADEMED, Actes du séminaire Modernisation de l'Agriculture irriguée, 11p.
- Marlet S., Ruelle P., 2002.** Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation. Actes de l'atelier du PCSI, Montpellier, France. 2p.
- Marlet S., Vincent B, Vidal A, Bouarfa S, Wu J, Yang J, N'Diaye M.K, Kuper M, Zimmer D., 2005.** Gestion de l'eau et de la salinité et redistribution des sels dans les périmètres irrigués. Congress, Symposium R. 12. International Commission on irrigation and drainage. Beijing. Revue 12- 18p.
- Matheron G., 1965.** Les variables régionalisées et leur estimation. Une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature. Masson., 305p.
- Mathieu C., Pielain F., 1998.** Analyse chimique des sols. Méthodes choisies. Edit. Lavoisier TEC et DOC. 265p.
- 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., 1992.** Rapid accurate mapping of soil salinity by electromagnetic ground conductivity meters. In Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice. SSSa Spec. Publ. 30. Madison, WI. p209-229.
- McNeill, J.D. 1980.** Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Geonics Tech. Note TN-6. Geonics Limited, Mississauga, ON, Canada. 14p.
- Netondo G. W., Onyango J. C., Beck E., 2004.** Sorghum and Salinity: II. Exchange and Chlorophyll Fluorescence of Sorghum under Salt Stress. Revue CSSA. 44: 806-811p.
- Nogués J, DA., Robinson, and J., Herrero., 2006.** Incorporation electromagnetic induction methods into regional soil salinity survey of irrigation districts soil sci.soc.am.J.70:2075-2085p.
- Nolin M. C., Caillier M. J., 1992.** La variabilité des sols. II-Quantification et amplitude. Agrosol 5(1):15 5-2
- Pansu M., Gautheyrou J., 2002.** L'analyse du sol minéralogique, organique et minéral.
- Perron I., 2002.** Influence de la microtopographie sur le rendement des cultures et la qualité des sols. Mémoire du grade Maître ès science. Université du Québec. 109p.
- Philippeau G., 1992.** Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales? Collection STA-ITCF. 93p.
- Rhoades J. D., 1993.** Electrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity. Adv. Agron. 49: 201- 251p.
- Rhoades J.D., Ingvalson R.D., 1976.** Determining Salinity in field soils with soil resistance measurements. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 35(2), pp 54-60.
- Rhoades , J.D., et Corwin, D.L. 1990.** Soil electrical conductivity : Effects of Soil Properties and applications to soil salinity appraisal. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 21: 837- 860p.

- Rhoades, J.D., F. Chanduvi, et S.M. Lesch. 1999.** Soil salinity assessment. Methods and interpretation of
- 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.
- Robinson D. A., Lebron I., Lesch S. M., Shouse P., 2004.** Minimizing Drift in Electrical Conductivity Measurements in High Temperature Environments using the EM-38 Soil *sci.soc.am.J.68:339-345p.*
- Rossi J .P., Lavelle P et Tondoh J E., 1995.** Statistical tool for soil biologie. X. géostatistical analysis. *European Journal of Soil Biology*, 31: pp173 – 181
- Sheets, K.R., Hendrickx J.M.H., 1995.** Non-invasive soil water content measurement using electromagnetic induction. *Water Resour. Res.* 31(6):pp2401–2409.
- SOGREAH SOGETA., 1985.** Etudes, Rapport et cartes.
- Sudduth K. A., Kitchen N. R et Drummond S. T., 1999.** Soil conductivity sensing on claypan soils: Comparison of electromagnetic induction and direct methods. Applications of electromagnetic methods- Agriculture, Geonics limited, Mississauga, Ontario. 12p
- 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:pp472-482.
- Tabet H.D., 1999.** Intérêt d'une approche spatiale pour le suivi de la salinité des sols dans le système irrigués. Thèse de doctorat d'état. Cemagref. Montpellier, 435p.
- Triantafyllis 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):p869-878.
- U.S. Salinity Laboratory Staff., 1954.** Diagnostic and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A. Handbook, n 60, 160p.
- U.S.D.A., 1954.** Diagnostic and improvement of saline and alcali soils, United Laboratory Staff. Editor L.A. Agriculture Handbook n° 60. 166p.
- USSL., 2001.** Site web de l' «United Salinity laboratory» [http:// www.ussl.ars.usda.gov/](http://www.ussl.ars.usda.gov/)
- 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 :essai de cartographie quantitative des paramètres hydrodynamiques. Thèse doc. Ing, ENSA Montpellier, 220p,
- Walter C., 1990.** Estimation des propriétés du sols et quantification de leur variabilité à moyenne échelle: Cartographie pédologique et géostatistique dans le sud de l'Ile et vilaine (France).Thèse Doctorat de l'Université de Paris VI.172p.
- Williams B.G, Hoey D., 1987.** The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of The salt and clay contents of soils. *Aust. J. Soil Res.* 25: 21-27p.

Wraith J.M., Or D., 1999. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time reflectometry: Experimental evidence and hypothesis development. Water Resour. Res. 35:pp 361-369

Wraith J.M., 2002. Indirect measurement of solute concentration. Time domain reflectometry. In J. H. Dane and G. C. Topp Methods of soil analysis. Part 4. SSSA book Ser.5.SSSA, Madison,WI.pp1289- 1297.

Zhu J. k., 2001 : Plant salt tolerance. Review TRENDS in Plant Science Vol 6 N°2,66-71p.

Annexes

Caractéristiques	Sols salins	Sols alcalins
Chimique	Dominé par des sels solubles neutres : chlorure et sulfates de sodium, calcium et magnésium.	Peu de sels solubles neutres mais généralement des quantités appréciables de sels capables d'hydrolyse alcaline tel que les carbonate de sodium (Na_2CO_3).
	pH de l'extrait de sol saturé généralement de moins de 8,2 (8,7 dans d'autres ouvrages)	Le pH de l'extrait de sol saturé de plus de 8,2 (ou 8,7) et atteignant souvent 9 ou 10.
	Une électro – conductivité (EC) de l'extrait de sol saturé de plus de 4 dS/m à 25°C est en général la limite acceptée. Cependant le « Soil Science Society of America » établit une limite à 2 dS/m.	Le pourcentage de sodium échangeable (Exchangeable sodium pourcentage ou ESP ⁵) de 15 est la limite admise au – delà de laquelle le sol est qualifié d'alcalin. L'EC est généralement de moins de 4 dS/m mais peut être plus importante au cas où des quantités de Na_2CO_3 seraient présentes.
	Généralement pas de relation bien définie entre le pH de l'extrait de sol saturé et l'ESP ou le coefficient d'absorption du Sodium (Sodium absorption ration ou SAR) de l'extrait de sol saturé.	Bonne relation entre le pH du sol et l'ESP ou le CAS ⁴ , de telle sorte que le pH peut être utilisé comme index approximatif du degré d'alcalinité.
	Des quantités appréciables de composés calciques solubles peuvent se trouver (tel que le gypse).	Le gypse est pratiquement toujours absent.
Physique	En présence excessive de sels solubles neutres, la fraction argileuse est floculée et le sol est stable.	Un excès en sodium échangeable couplé à des valeurs de pH élevées rend l'argile dispersée et une instabilité structurale du sol.
	La perméabilité à l'eau et à l'air de ces sols est généralement comparable à ceux des sols « normaux ».	La perméabilité à l'eau et à l'air est restreinte. Les propriétés physiques de ces sols s'aggravent avec l'augmentation du pH et du sodium échangeable.
Effet sur la croissance des plantes	La croissance des plantes est affectée par l'action des sels solubles sur la pression osmotique de la solution du sol résultant en une diminution de disponibilité en eau.	La croissance des plantes est affectée par l'action de dispersion du sodium échangeable dégradant les propriétés physiques du sol.
	Toxicité des ions tels que les ions Na, Cl, B, etc.	A travers le pH élevé du sol causant des déséquilibres nutritionnels incluant notamment une déficience en calcium. A travers la toxicité d'ions tels que les ions Na, CO_3 , Mo, etc.
Amélioration du sol	L'amélioration des sols salins se fait par le lessivage des sels solubles dans la zone racinaire du sol. L'application d'amendements n'est généralement pas nécessaire.	L'amélioration des sols alcalins se fait essentiellement par remplacement du sodium sur le complexe échangeable du sol par du calcium à travers des amendements, le lessivage et le drainage des sels après réaction avec l'amendement et le sodium échangeable.
Distribution géographique	Les sols salins dominent dans les régions arides à semi – arides.	Les sols alcalins se trouvent principalement dans les régions semi – arides et sub – humides.

Annexes. 1 Caractéristiques des sols salés et des sols alcalins

Sondages	EC0.1m	EC0.5m
P1	35	47
P2	15	25
P3	47	44
P4	25	37
P5	33	33
P6	42	45
P7	35	105
P8	45	35
P9	35	35
P10	35	35
P11	35	35
P12	35	35
P13	42	35
P14	35	35
P15	45	35
P16	35	35
P17	35	35
P18	45	35
P19	35	35
P20	35	35
P21	35	45
P22	114	115
P23	114	115
P24	35	35
P25	35	35
P26	35	35
P27	35	35
P28	35	35
P29	35	35
P30	35	35
P31	35	35
P32	35	35
P33	35	35
P34	35	35
P35	35	35
P36	35	35
P37	35	35
P38	35	35
P39	35	35
P40	35	35
P41	35	35
P42	35	35
P43	35	35
P44	35	35
P45	35	35
P46	35	35
P47	35	35
P48	35	35
P49	35	35
P50	35	35
P51	35	35
P52	35	35
P53	35	35
P54	35	35
P55	35	35
P56	35	35
P57	35	35
P58	35	35
P59	35	35
P60	35	35
P61	35	35
P62	35	35
P63	35	35
P64	35	35
P65	35	35
P66	35	35
P67	35	35
P68	35	35
P69	35	35
P70	35	35
P71	35	35
P72	35	35
P73	35	35
P74	35	35
P75	35	35
P76	35	35
P77	35	35
P78	35	35
P79	35	35
P80	35	35
P81	35	35
P82	35	35
P83	35	35
P84	35	35
P85	35	35
P86	35	35
P87	35	35
P88	35	35
P89	35	35
P90	35	35
P91	35	35
P92	35	35
P93	35	35
P94	35	35
P95	35	35
P96	35	35
P97	35	35
P98	35	35
P99	35	35
P100	35	35

Annexes. 2 Les mesures de l'EM38

Annexes. 3 Les paramètres de sol

ECH	CEPS1	CEPS2	pH1	pH2	CT%1	CT%2
P1	0,98	1,21	8,14	8,17	13,58	12,73
P2	2,42	4,50	8,85	8,16	16,13	17,83
P3	2,87	3,28	8,03	7,98	13,58	11,03
P4	4,47	3,94	7,88	8,38	4,24	5,51
P5	1,83	1,92	8,10	8,11	6,79	11,88
P6	0,78	1,14	7,98	8,69	2,54	2,97
P7	2,88	3,36	8,68	7,90	4,24	2,97
P8	2,32	4,56	7,73	8,06	6,79	5,51
P9	3,53	7,85	8,44	8,33	15,28	17,40
P10	0,65	0,68	8,40	8,18	2,12	3,39
P11	1,72	1,57	8,46	7,89	3,39	2,82
P12	0,81	1,35	7,99	8,12	4,24	7,21
P13	12,55	8,83	7,80	7,81	8,49	13,88
P14	0,66	1,79	8,31	8,29	15,70	14,43
P15	2,07	2,45	8,14	8,26	6,79	7,64
P16	0,87	0,74	8,21	8,02	10,61	11,03
P17	1,10	2,03	8,01	8,00	12,73	10,18
P18	0,67	1,21	7,99	7,90	19,00	14,00
P19	0,90	1,13	7,91	8,30	7,64	7,21
P20	0,92	1,23	8,25	8,06	11,88	12,31
P21	3,70	3,59	8,05	7,82	8,06	8,49
P22	21,40	27,10	8,22	8,38	7,21	11,46
P23	41,70	32,10	8,29	8,79	4,66	6,79
P24	4,18	6,35	8,06	8,34	10,61	9,76
P25	7,06	7,77	8,55	8,70	8,06	6,79
P26	4,26	8,88	8,43	8,36	14,85	10,61
P27	7,50	7,92	7,94	8,25	7,64	6,36
P28	4,40	5,79	8,38	8,50	13,58	8,06
P29	23,60	24,50	8,10	8,55	3,82	8,49
P30	5,35	6,16	8,44	8,59	8,91	7,64
P31	1,11	1,84	8,45	8,48	17,40	16,55
P32	0,52	0,91	8,30	8,24	16,13	15,28
P33	0,93	1,34	8,52	8,35	14,85	16,13
P34	2,96	4,66	8,25	8,40	16,98	13,16
P35	6,05	9,87	8,42	8,52	20,80	19,95
P36	0,97	1,51	8,59	8,39	17,83	18,67
P37	0,81	1,59	8,36	8,41	16,98	16,13
P38	1,57	2,42	8,32	8,10	12,73	18,25
P39	0,98	1,59	8,16	8,27	22,49	19,10
P40	3,41	3,67	8,13	8,13	9,33	14,00
P41	6,25	5,07	8,05	8,07	4,66	3,82
P42	0,81	1,15	8,22	8,36	7,64	7,21
P43	1,30	8,30	8,22	8,14	10,18	15,28
P44	1,99	8,21	8,08	8,05	8,06	5,09
P45	0,92	1,81	8,43	8,30	6,36	8,06
P46	3,86	5,63	8,32	8,29	16,13	14,43
P47	0,96	1,91	8,42	8,44	11,03	8,06
P48	1,05	1,86	8,16	8,19	12,73	10,61
P49	0,89	1,11	8,34	8,48	13,58	12,18
P50	1,30	2,50	8,25	8,27	14,00	11,46
P51	0,79	1,15	8,14	8,19	10,61	10,18
P52	1,02	2,67	8,60	8,18	12,73	11,85
P53	1,75	4,36	8,28	8,09	15,28	16,98
P54	3,32	5,38	8,32	8,34	19,95	12,21
P55	1,19	7,22	8,35	8,15	20,37	12,73
P56	2,88	3,90	8,20	8,27	15,25	14,43

ECH	M.O%1	M.O%2	A%1	A%2	Lf%1	Lf%2
P1	3,06	2,00	34,95	40,25	21,21	19,44
P2	1,58	2,32	6,69	41,01	14,6	17,83
P3	2,85	2,00	38,56	46,65	23,08	19,19
P4	3,17	2,11	37,26	35,45	30,2	23,66
P5	2,53	1,79	35,63	40,53	33,04	20,19
P6	2,43	3,91	42,3	41,57	26,72	28,28
P7	3,59	3,17	36,57	44,88	30,3	27,21
P8	2,96	1,79	39,26	37,07	28,74	25,46
P9	2,43	1,48	36,1	45,86	38,38	24,65
P10	3,38	3,27	23,38	31,28	33,72	36,31
P11	2,64	3,27	35,56	40,08	29,8	20,02
P12	4,12	2,43	24,85	27,42	22,83	22,47
P13	4,23	2,53	15,86	24,85	26,67	24,14
P14	3,38	2,75	40,1	46,85	29,95	23,55
P15	3,27	2,64	33,37	37,17	27,78	20,24
P16	2,85	2,53	42,6	44,43	28,51	22,43
P17	3,60	2,32	50,84	50,87	27,22	24,19
P18	2,32	2,11	40,43	50,44	34,94	30,99
P19	3,17	3,17	50,37	50,97	30,59	26,36
P20	1,90	2,11	55,02	40,89	27,27	26,97
P21	2,96	2,96	45,61	50,2	29,24	30,75
P22	2,64	1,69	30,61	33,13	28,28	25,76
P23	2,43	0,74	34,65	38,74	21,72	22,78
P24	3,69	3,27	37,17	36,67	28,28	28,79
P25	2,64	1,05	33,64	36,16	29,29	24,24
P26	1,26	1,48	47,78	49,80	26,26	26,26
P27	1,58	1,16	38,18	41,72	29,80	26,77
P28	1,90	1,69	40,71	43,32	31,82	27,33
P29	2,64	0,95	31,11	35,66	25,25	23,23
P30	2,64	2,43	31,62	35,66	37,88	28,79
P31	2,00	2,32	41,72	51,82	35,35	35,35
P32	3,38	2,96	40,20	43,23	32,83	29,80
P33	3,70	3,06	42,73	46,77	30,81	29,80
P34	3,17	2,85	44,24	46,77	29,80	20,25
P35	2,00	3,27	33,13	40,20	28,28	28,79
P36	3,27	1,16	35,15	45,76	31,82	28,79
P37	3,06	1,05	32,63	37,68	27,78	29,80
P38	3,91	3,49	52,83	49,29	34,85	34,34
P39	1,79	0,74	28,76	35,62	23,1	20,85
P40	3,38	2,70	34,14	38,58	29,19	26,6
P41	3,91	3,28	31,48	38,69	22,12	20,61
P42	3,38	2,75	35,66	36,16	27,17	26,16
P43	3,17	2,33	17,98	27,07	42,83	34,75
P44	5,18	3,70	29,09	34,65	31,72	29,7
P45	3,81	3,18	30,78	39,19	28,76	25,15
P46	4,97	3,70	42,22	32,63	29,19	28,18
P47	2,96	3,07	29,6	37,17	41,31	29,7
P48	4,34	3,49	37,68	32,63	33,23	31,21
P49	3,60	3,51	41,72	43,64	38,79	27,68
P50	3,17	3,60	49,8	51,31	33,74	29,7
P51	3,60	3,49	44,24	45,76	37,11	26,16
P52	3,07	3,38	47,27	51,82	27,68	26,16
P53	3,52	3,49	52,32	53,33	35,25	31,21
P54	3,38	3,38	37,17	41,72	31,72	30,2
P55	4,34	3,70	32,63	37,35	32,22	29,7
P56	3,49	3,38	44,75	48,28	36,26	32,73

ECH	Lg%1	Lg%2	Sf%1	Sf%2	Sg%1	Sg%2	Hp%1	Hp%2
P1	17,07	19,32	19,52	6,94	7,25	14,05	5,67	5,93
P2	50,90	5,84	24,74	32,73	3,07	2,59	10,48	10,48
P3	3,53	11,01	29,62	22,57	5,21	0,58	18,33	16,26
P4	12,47	18,04	14,90	20,44	5,17	2,41	10,27	21,04
P5	9,17	10,61	18,39	24,99	3,77	3,68	8,4	15,59
P6	10,61	6,13	18,71	22,11	2,66	1,91	5,44	12,79
P7	9,24	8,82	21,91	17,05	1,98	2,04	7,58	16,76
P8	10,19	16,03	19,04	18,83	2,77	2,61	12,32	14,18
P9	7,64	10,20	16,72	17,50	1,16	1,79	8,9	19,05
P10	16,51	6,57	23,27	23,03	3,12	2,81	10,68	7,69
P11	8,78	18,86	22,00	18,82	3,86	2,22	9,06	6,04
P12	23,72	22,81	26,84	24,37	1,76	2,93	10,16	10,74
P13	24,49	20,34	27,53	27,13	5,45	3,54	12,55	14,1
P14	16,60	15,60	10,71	11,80	2,64	2,20	8,66	17,43
P15	15,64	14,64	21,52	16,69	1,70	11,26	20,37	20,43
P16	13,32	19,31	13,33	11,68	2,33	2,15	10,97	12,9
P17	2,74	5,68	17,10	17,00	2,10	2,26	7,69	11,3
P18	6,75	1,47	14,23	13,81	3,65	3,29	3,76	8,72
P19	1,42	3,65	14,88	16,42	2,74	2,60	7,12	9,01
P20	0,62	16,12	14,29	13,57	2,80	2,45	6,67	11,48
P21	3,81	0,12	17,21	16,06	4,13	2,87	8,76	8,86
P22	14,87	17,80	24,37	20,56	1,87	2,75	12,34	15,2
P23	19,91	18,55	22,44	18,75	1,29	1,18	17,5	20,11
P24	17,10	10,01	16,45	23,28	1,00	1,26	14,08	14,31
P25	13,00	20,28	22,93	18,21	1,14	1,11	14,53	15,24
P26	13,57	12,70	11,87	10,50	0,52	0,74	14,3	15,46
P27	13,60	11,76	17,60	19,14	0,82	0,62	11,53	16,68
P28	10,97	11,22	15,36	17,25	1,14	0,88	10,24	15,34
P29	12,20	15,93	30,42	23,80	1,02	1,38	10,55	15,7
P30	9,52	13,59	19,43	20,83	1,56	1,14	10,07	14,24
P31	10,76	3,02	11,66	9,14	0,51	0,67	6,83	12,81
P32	11,76	10,37	12,05	12,21	3,16	4,39	6,06	10,73
P33	14,68	13,80	10,88	8,76	0,90	0,87	7,02	13,53
P34	9,16	11,22	15,34	20,25	1,46	1,51	8,02	10,68
P35	18,94	17,76	17,11	10,35	2,54	2,90	11,05	27,8
P36	13,05	11,85	18,36	12,31	1,62	1,29	7,91	10,91
P37	12,16	4,03	25,17	26,71	2,27	1,79	5,89	9,6
P38	1,49	6,58	10,60	9,36	0,23	0,42	7,34	11,17
P39	4,90	4,33	42,48	38,54	0,76	0,66	8,48	10,58
P40	5,97	5,53	28,67	27,88	2,03	1,41	15,62	16,03
P41	14,88	10,48	28,99	28,63	2,53	1,59	7,69	10,39
P42	10,21	9,70	20,54	24,23	6,42	3,75	9,07	14,82
P43	15,72	8,84	21,06	27,31	2,41	2,03	3,62	9,28
P44	11,08	7,25	24,05	25,94	4,06	2,46	6,96	15,25
P45	18,98	19,20	18,22	15,41	3,26	1,05	13,9	16,73
P46	4,23	12,52	19,91	22,23	4,45	4,44	8,99	11,77
P47	5,08	5,84	18,45	12,60	5,56	14,69	5,61	10,13
P48	3,00	10,75	22,60	23,54	3,49	1,87	4,7	11,2
P49	1,63	13,46	12,93	13,15	4,93	2,07	13,74	18
P50	4,34	6,05	11,06	11,55	1,06	1,39	9,49	17,14
P51	2,00	11,86	15,05	14,90	1,60	1,32	12,83	14,81
P52	11,88	8,58	11,72	11,95	1,45	1,49	5,7	12,52
P53	4,54	6,10	7,16	8,64	0,73	0,72	6,91	12,55
P54	13,35	13,01	16,81	14,66	0,95	0,41	7,08	16,55
P55	8,23	11,38	25,59	20,45	1,33	1,12	5,38	15,28
P56	3,59	3,41	14,21	14,60	1,19	0,98	7,56	20,11

