

Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie El Harrach - Alger
Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister en sciences agronomiques
Département : Génie Rural
Spécialité : Hydraulique Agricole

***Cartographie de la salinité du sol évaluée
par induction électromagnétique « Géonics
EM38 »***

Cas du sous bassin de Sidi Rached (Tipaza).

Présenté par :

M KHACHEBA Rafika

Promoteur : M. HARTANI T. Professeur, ENSA Alger

14-12-2011

Jury : Président : M. AIDAOUI A. Professeur, ENSA Alger Examineurs : M. SELLAM F. Chargé de Cours, ENSA Alger M. Douaoui AEK. Professeur, Centre Universitaire de Khémis Miliana

Table des matières

Remerciements : . . .	5
ص غ ل م . . .	6
Résumé : . . .	7
Summary : . . .	8
Liste des abréviations : . . .	9
Introduction Générale . . .	10
Partie Bibliographique . . .	12
Chapitre I. La salinisation des sols . . .	12
I.1 Introduction . . .	12
I.2 Définition . . .	12
I.3 Classification des sols salés . . .	13
I.4 Développement de la salinité dans le sol . . .	13
I.5 Influence de la salinité de l'eau sur la salinité du sol . . .	14
I.6 Mesure de la salinité . . .	15
I.7 Les conséquences de la salinisation des sols . . .	15
I.8 Méthodes de lutte contre la salinité . . .	16
I.9 L'approche socio-économique des problèmes de salinité . . .	18
I.10 Conclusion: . . .	19
Chapitre II. La salinité des sols en Algérie . . .	20
II.1 Introduction . . .	20
II.2 Etat de la salinisation en Algérie . . .	20
II.3 La salinité et sa transition . . .	22
II.4 Conclusion . . .	23
Chapitre III. La méthode d'induction électromagnétique par Géonics EM 38 . . .	23
III.1 Introduction . . .	23
III.2 Géonics EM 38 : . . .	23
III.3 Principe de fonctionnement: . . .	24
III.4 Applications de l'induction électromagnétique par le Géonics EM-38 : . . .	30
III.5 Conclusion : . . .	31
Chapitre IV. La cartographie de la salinité du sol . . .	31
IV.1 Introduction . . .	31
IV.2 Interpolation spatiale par l'analyse géostatistique . . .	32
III.3 Conclusion . . .	37
Matériel et Méthodes . . .	39
Chapitre I. Description du sous bassin versant de Sidi Rached . . .	39
1. Introduction . . .	39
I. Description du sous bassin versant de Sidi Rached . . .	40
Chapitre II : Protocole expérimental . . .	54
II.1 Introduction . . .	55
II.2 Présentation du matériel utilisé . . .	55

II.3 Présentation de l’outil de cartographie . .	56
II.4 Présentation du protocole expérimental . .	57
II.5 Conclusion . .	59
Résultats et discussion . .	61
I. Introduction . .	61
II. Résultats d’enquêtes . .	61
III. Mesure de l’extrait de pâte saturée . .	65
IV. Mesures électromagnétiques . .	66
V. Calibration du Géonics EM38 . .	68
VI. Etude variographique . .	69
VII. Description des cartes des conductivités électriques CEah, CEav et CEeh . .	72
VIII. Discussion . .	75
Conclusion générale . .	79
Références Bibliographiques . .	80
Annexes . .	88
Annexe 01 . .	88
Annexe 02 . .	88
Annexe 03 . .	89
Annexe 05 . .	92

Remerciements :

Je tiens tout d'abord à remercier le bon Dieu tout Puissant pour m'avoir permis d'accomplir mon travail.

Je tiens à remercier en premier lieu le Professeur : Hartani Tarik d'avoir accepté d'encadrer ce mémoire, et de m'avoir soutenu toutes ces années sans se plaindre, pour son aide inestimable et ces conseils précieux, pour son dynamisme et sa patience, son amabilité et sa recherche constante de la perfection, j'y exprime toute ma gratitude.

J'adresse également mes remerciements à M. Aidaoui AbdAllah pour avoir accepté de présider le jury, pour son aide et ses conseils tout le long de mon travail.

Mes respectueux remerciements sont également adressés à M. Sellam Fouad de m'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail, pour sa précieuse aide, ses orientations et son appui dans les moments cruciaux de ce mémoire.

Je remercie aussi M. Douaoui Abd El Kader, spécialiste de la salinité, d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Cette thèse n'aurait pas lieu d'être sans l'aide et le soutien de ma chère copine Lounis Amel, qui a accompagné le parcours de cette thèse et à qui je suis infiniment reconnaissante de m'avoir soutenue dans les moments les plus difficiles et pour ses précieuses remarques et ses orientations.

J'exprime mes sincères remerciements pour tous les agriculteurs de Sidi Rached ainsi que tous les responsables et ingénieurs de l'ANRH.

Je tiens à souligner mon extrême gratitude à l'égard de tous mes enseignants en particulier ceux du département du « Génie Rural » qui ont contribué tous à ma formation.

Enfin, je remercie ma famille - en particulier mes chères parents-, tous mes amis et tous ceux qui ont de près ou de loin contribué à la réalisation de ce travail.

ص خ لم

الملوحة هي المشكلة أكثر شيوعاً في العالم بأسره والذي بسبب أضرارها جسيمة، حالياً ، على مستوى منطقة الحوض الفرعي لسبدي راشد في ولاية تيبازة ، يوجد التكتيف الزراعي ونسبة مؤوية صغيرة من المياه الفيرة المخصصة للري ، التي هي من الأسباب التي يمكن أن تولد الملوحة الثانوية.

الري بآلماء المالح مشحونة يؤدي إلى تراكم هذه الأملاح في الأرض من المرجح أن يتباطأ نمو النباتات مع انخفاض العوائد ، وتصل إلى الاضمحلال، وخطر التملح الثانوي في حوض الفرعي لسبدي راشد ، ويمكن تقدير من خلال رسم الخرائط للملوحة الأرض ، ويتم تقويم الأخير في دراستنا عن طريق الحث الكهرومغناطيسي ب Géonics EM 38 لسنتي (2008-2009) باستخدام قياسات الموصلية الكهربائية لمستخلص عجيبة المشبعة لمعايرة البيانات الكهرومغناطيسي.

نتائج ملوحة التربة تبين عدم وجود خطر التملح الثانوي، ومع ذلك، فإن هذا النقي لا يكاد يلغي المخاطر على المدى الطويل. وبغية الكشف عن ذلك، دراسات مماثلة ينصح بتطبيقها لمنح وفروع أضرار محتملة.

الكلمات الأساسية: ملوحة التربة ، الحث الكهرومغناطيسي، رسم الخرائط، و الحوض الفرعي لسبدي راشد.

Résumé :

La salinité est le problème le plus récurrent dans le monde entier et qui cause de sérieux dégâts, actuellement, au niveau du bassin versant de Sidi Rached dans la Wilaya de Tipaza, existe une intensification agricole et un pourcentage, même faible, d'eau médiocre destinée à l'irrigation qui peuvent engendrer une salinisation secondaire des sols.

L'irrigation avec les eaux chargées en sels entraîne une accumulation de ces sels dans le sol susceptible de ralentir la croissance des végétaux avec baisse des rendements pouvant aller jusqu'au dépérissement ; le risque de la salinisation secondaire dans le sous bassin de Sid Rached peut être estimé à travers une cartographie de la salinité du sol, cette dernière est évaluée dans notre étude par induction électromagnétique avec le Géonics EM 38 pour les années (2008-2009) en utilisant les mesures de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée pour la calibration des données électromagnétiques.

Les résultats de la salinité du sol montrent l'absence d'un risque de salinisation secondaire, néanmoins, cette négation n'annule guère un risque à long terme. Et afin de le déceler, des études similaires à la notre sont préconisées pour prévenir des éventuels dégâts.

Mots clés : salinité du sol, induction électromagnétique, cartographie, sous bassin versant Sidi Rached .

Summary :

Salinity is the problem more answered in the whole world and which causes serious damage, currently, on the level of under catchment area of Sidi Rached in Wilaya de Tipaza, exists an agricultural intensification and a percentage, even small, of poor water intended for the irrigation which can generate a secondary salinisation of the grounds.

The irrigation with salt water charged involves an accumulation of these salts in the ground likely to slow down the growth of the plants with fall of the outputs being able to go until deterioration; the risk of the secondary salinisation in under basin of Sid Rached can be estimated through a cartography of the salinity of the ground, the latter is evaluated in our study by electromagnetic induction with Géonics EM 38 for the years (2008-2009) by using measurements of the electric conductivity of the extract of paste saturated for the calibration with the electromagnetic data.

The results of the salinity of the ground show the absence of a secondary risk of salinisation, nevertheless, this negation hardly cancels a long-term risk. And in order to detect it, of the studies similar to our are recommended to prevent possible damage.

Key words : salinity of the ground, electromagnetic induction, cartography, under area catchment Sidi Rached.

Liste des abréviations :

- GPS: Global Positioning System
- UTM: Universal Transverse Mercator
- EM38: Electromagnétique 38
- CE1:5 : Conductivité électrique de l'extrait de pâte diluée a 1:5
- CEa: Conductivité électrique apparente
- IGF: Indicative Goodness of Fit
- ANRH: Agence Nationale des Ressources Hydriques
- EMI: conductivité électromagnétique
- CEah: conductivité électrique apparent horizontale
- CEav: conductivité électrique apparent horizontale
- ha : hectare
- CE : conductivité électrique (dS/m anciens mmhos/cm).
- CEM : conductivité électromagnétique en général (mS/m).
- CEV : mesure CEM en mode vertical à la surface du sol.
- CEH : mesure CEM en mode horizontal à la surface du sol,
- SAR: Specific absorption rate Le taux spécifique d'absorption
- CEes: Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée
- ETCF : coefficient de concentration de l'évapotranspiration
- CV : Coefficient de variation

Introduction Générale

Le sol est un véritable livre d'histoire. Il conserve les traces de l'histoire, souvent très longues (jusqu'à plusieurs millions d'années), de sa formation : en étudiant les sols on peut y découvrir quelles furent certaines des conditions climatiques et biologiques du passé.

Le plus gros problème dans les années à venir va venir du réchauffement climatique et de l'augmentation de la population mondiale. D'une part car l'irrigation va devenir de plus en plus indispensable, notamment dans les régions arides, pour combler les déficits en eau et pour utiliser un maximum les terres arables et subvenir aux besoins d'une population croissante, et d'autre part car les phénomènes d'évaporation inhérents à l'augmentation de la température va accentuer le phénomène de concentration des sels dans les sols (wikipedia en ligne).

L'irrigation a certes des effets bénéfiques (l'augmentation du rendement des cultures irriguées par exemple), mais aussi des effets négatifs, la salinisation secondaire et l'alcalinisation des sols irrigués en particulier, phénomènes qui sont bien connus et ce depuis longtemps.

La salinisation des sols constitue un problème qui menace l'équilibre de l'environnement à différentes échelles, de la cellule végétale jusqu'à l'écosystème (Dutuit et al., 1994).

En Algérie, les facteurs qui contribuent à l'extension du phénomène de salinisation des terres sont liés à l'aridité du climat qui porte sur plus de 95 % du territoire, la qualité médiocre des eaux d'irrigation, le système de drainage souvent inexistant ou non fonctionnel, et la conduite empirique des irrigations (Daoud et Halitim, 1994 ; Djili *et al.*, 2003 ; Saidi, 2004).

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

L'utilisation du conductivimètre électromagnétique pour l'évaluation de la salinité des sols apparaît comme une méthode rapide et fiable. En effet, sa facilité de mise en œuvre et sa rapidité d'exécution; font de l'EM-38 un outil performant pour la caractérisation des sols salés. Il permet ainsi de suivre l'évolution spatiale et temporelle de la salinité en temps réel et à moindre coût, ce qui justifie son utilisation qui est de plus en plus fréquente pour la cartographie de la salinité des sols.

A travers une cartographie de la salinité des sols on cherche entre autres à :

- Représenter schématiquement la répartition spatiale, horizontale et verticale des sels.
- Relier les tendances de salinité à d'autres facteurs, climatiques, pédologiques ou aux pratiques culturales.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet de recherche scientifique *Qualiwater*, initié en collaboration avec l'union européenne sous le thème: " **Diagnostic et contrôle de la salinité et de la pollution par les nitrates dans le contexte d'une agriculture irriguée dans les pays méditerranéens** " ; dont l'objectif principal est d'évaluer l'impact des pratiques culturales sur les ressources en eaux superficielles et souterraines à l'échelle d'un bassin versant agricole.

Notre étude est basée principalement sur une cartographie de la salinité du sol au niveau du sous bassin versant de Sidi Rached, Wilaya de Tipaza, en utilisant la méthode d'induction électromagnétique pour l'évaluation de la salinité du sol et de déduire s'il existe un risque de salinisation secondaire dans ce sous bassin.

L'objectif est d'identifier les zones ayant un risque de salinisation secondaire où les pratiques agricoles sont de plus en plus intensives. C'est pourquoi ce manuscrit est divisé en 3 parties reflétant cet objectif :

La première partie « Synthèse bibliographique » de notre travail est consacrée à la description des données bibliographiques relatives à la salinisation des sols et l'évaluation et la cartographie des conductivités électriques apparente et réelle du sol, en particulier à l'échelle du bassin versant.

La deuxième partie intitulée « matériel et méthodes », se focalisera sur la description du sous bassin versant du point de vue climatique, pédologique, hydrogéologique et géologique. Les méthodes utilisées pour l'évaluation de la salinité du sol seront aussi présentées dans cette partie, et évidemment l'outil cartographique est y exposé.

Les résultats obtenus avec ces différentes méthodes sont comparés et discutés dans la troisième partie intitulée « Résultats et discussions ».

Enfin la dernière partie rassemblera la conclusion finale et mettra en évidence les perspectives de recherche.

Partie Bibliographique

Chapitre I. La salinisation des sols

I.1 Introduction

La salinisation a été identifiée comme un processus majeur de la dégradation des terres. Les causes techniques les plus importantes à l'origine de la diminution de la production sur de nombreux périmètres irrigués, particulièrement dans les zones arides et semi-arides (IPTRID 2006).

En Europe, entre 1999 et 2007, 6 à 10 % de la SAU est frappée par la salinité). Les pays les plus touchés (gros producteurs de maïs irrigué) : l'Espagne, l'Italie et la Hongrie 3,8 millions d'hectares de terres trop salines (Problème de la monoculture) (CE, 2007 in Jabnour, 2008).

La salinité se prolonge dans la méditerranée d'un total de 16 millions d'hectares dont 3,2 million ha pour l'Algérie (Hamdy, 1995).

La salinité du sol est la principale contrainte environnementale de l'agriculture moderne environ 20% des terres cultivées dont environ 50% de terres irriguées sont affectées par la salinité dans le monde 10 millions ha de terres cultivées abandonnées par an (Accumulation de sels).

En Algérie, la salinité constitue un problème majeur qui affecte les terres agricoles et qui concerne de grandes étendues (Boulaine, 1957 ; Aubert, 1976 ; Halitim, 1985).

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

La gestion de la salinité nécessite 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 distribution spatiale de la salinité peut être caractérisée à des dates spécifiques par la télédétection et la cartographie des sols pour les grandes et petites échelles (Marlet et al, 2005).

I.2 Définition

La salinisation est un processus d'enrichissement d'un sol en sels solubles qui aboutit à la formation d'un sol salin. La salinisation peut aussi être définie comme un processus d'accumulation des sels solubles (USDA, 1954).

Inéluctablement, la salinisation est le plus grand danger qui menace le secteur irrigué des pays du Maghreb (Ben Mechlia, 2001).

Les sels contenus dans l'eau ou le sol réduisent l'eau disponible pour les plantes au point de nuire à leurs rendements. Ces sels sont représentés en grande partie par Des cations (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , et le K^+), et des anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} et NO_3^-) (Kenfaoui, 1997).

Selon Aubert (1976), la salinisation est le processus pédologique suivant lequel le sol s'enrichit anormalement en sels solubles, acquérant ainsi le caractère salin.

I.3 Classification des sols salés

Selon l'USSL (1954), les sols affectés par les sels sont classés comme suit :

Sols salins non sodiques	Sols salins sodiques	Sols non salins et sodiques	Sols non salins et non sodiques
Ce sont les sols dont la conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée est supérieure à 4dS/m à 25°C et où le pourcentage de sodium échangeable (ESP) est inférieur à 15%. Le pH de l'extrait de pâte saturée est habituellement inférieur à 8.5 et les anions prédominants sont les chlorure et les sulfates.	Ce sont les sols dont la conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée est supérieure à 4dS/m à 25°C et où le pourcentage de sodium échangeable (ESP) est supérieur à 15%. Le pH peut dépasser légèrement 8.5 ; ces sols posent plus de problèmes pour la mise en valeur agricole que les sols salés	Ce sont les sols dont la conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée est inférieure à 4dS/m à 25°C et où le pourcentage de sodium échangeable (ESP) est supérieur à 15%. Le pH de ces sols est généralement supérieur à 8.5.	Ce sont les sols dont la conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée est inférieure à 4dS/m à 25°C et où le pourcentage de sodium échangeable (ESP) est inférieur à 15%.

Tableau n°01 : représentant les différentes classes des sols salins

I.4 Développement de la salinité dans le sol

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

D'après le processus d'accumulation du sel (Kenfaoui, 1997), Les sels solubles contenus dans les eaux souterraines ou superficielles, sont susceptibles, de contaminer les sols par une accumulation des produits solubles dans le milieu poreux ainsi que par une modification du complexe adsorbant. Il en résulte une transformation profonde des propriétés physiques et chimiques du sol, avec pour conséquence la création d'un milieu stérile vis-à-vis de la production agricole. L'irrigation ne fait qu'aggraver ce problème, en effet, les sels sont apportés dans le sol à chaque irrigation, la culture prélève dans le sol ses besoins en eau en laissant sur le sol une solution très concentrée en sel. Cette concentration sera encore très importante par l'irrigation suivante.

- 80% des terres salinisées ont une origine naturelle. On parle alors de salinisation “primaire”, due aux sels se formant lors de l’altération des roches ou à des apports naturels externes.
- 20% des terres salinisées, soit près de 15 millions d’hectares (Mha) sur le continent Africain, ont une origine « anthropique ». On parle alors de salinisation “secondaire”, induite par l’activité humaine, liée aux pratiques agricoles et en particulier à l’irrigation (IPTRID 2006).
- La salinisation du sol à partir de la nappe n’est pas directe et totale, mais souvent partielle (Ben Hassine, 2005).

Si l’eau d’irrigation appliquée contient des quantités relativement significatives d’ions sodium (Na^+) par rapport aux quantités présentes d’ions magnésium (Mg^{2+}) et d’ions calcium (Ca^{2+}), et en particulier si l’ion bicarbonate (HCO_3^-) est aussi présent ; les ions sodium peuvent alors saturer la majeure partie des sites d’échanges colloïdaux, ce qui est à l’origine de la formation de sols sodiques. C’est un type de sol extrêmement peu fertile. (IPTRID 2006).

I.5 Influence de la salinité de l’eau sur la salinité du sol

Généralement, une augmentation de la teneur en sels dans l’eau d’irrigation résultera d’une augmentation de la salinité de la solution du sol (voir le graphique 1).

La vitesse et le degré de cette augmentation dépendront du (Allaoui, 2006) :

- lessivage, c’est à dire la quantité d’eau apportée par irrigation ou par des pluies en excès des besoins de la culture et l’efficacité du lessivage;
- la composition ionique de l’eau d’irrigation et la tendance de quelques ions, tels que Ca^{2+} , HCO_3^- et SO_4^{2-} , à précipiter après l’extraction de l’eau du sol;
- et des propriétés physiques du sol telles que l’infiltration, les caractéristiques hydriques et de drainage.

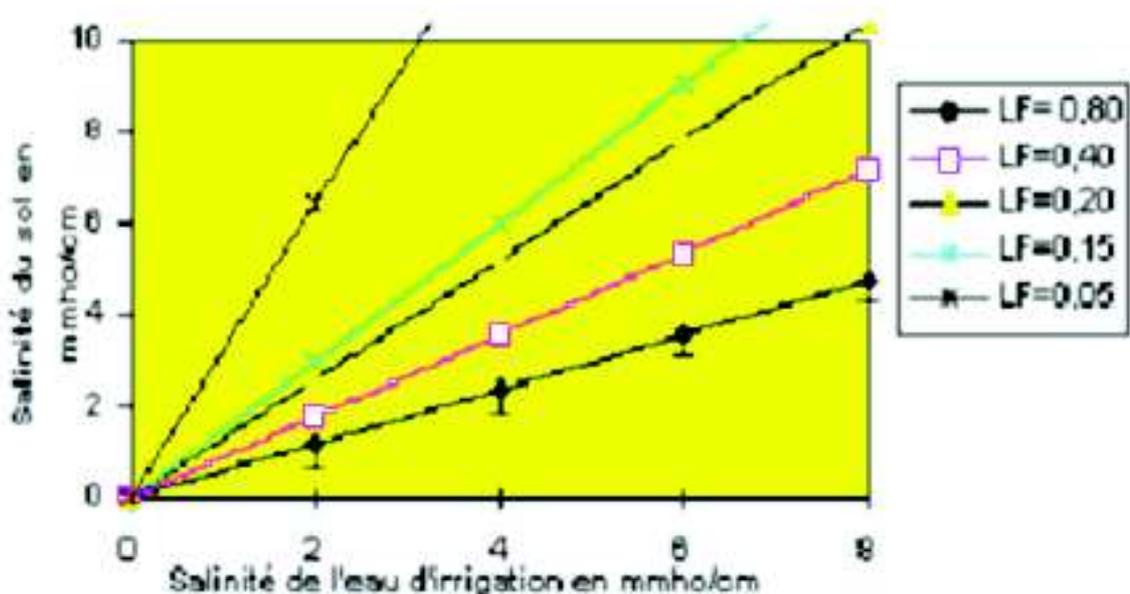


Figure n°1 : Effet de la salinité de l'eau d'irrigation sur la salinité du sol
(FAO, 2008)

Avec LF : Leaching fraction (fraction de lessivage)

I.6 Mesure de la salinité

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour évaluer la salinité du sol. Parmi elles, on peut citer les observations visuelles des récoltes, la mesure de la conductivité électrique de la solution de l'extrait de pâte saturée du sol ou du sol dilué, la mesure in-situ de la résistivité électrique en utilisant le dispositif de Wenner ou par la mesure in-situ de la salinité par induction électromagnétique. Ces deux derniers types de mesure sont des méthodes utilisées par la géophysique (Iddir, 2006).

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

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

La conductivité électrique définie la quantité totale en sels solubles correspondant à la salinité globale du sol, elle dépend de la teneur et de la nature des sels solubles présents dans ce sol (Guessoum, 2001). Un sol est considéré salé, lorsque la conductivité électrique de l'extrait saturé est supérieure à 4 ds / m à 25°C (Durand, 1983).

La conductivité électrique est souvent utilisée pour la mesure de la salinité des eaux et de la pâte du sol, elle est exprimée en décisiemens par mètre (dS/m) ou en millimhos par centimètre (mmho/cm), les deux unités sont équivalentes. (Kenfaoui, 1997). Elle peut aussi être quantifiée dans la quantité de sel en milligrammes par litre d'eau (mg/L), souvent exprimée en parties par million (ppm).

I.7 Les conséquences de la salinisation des sols

Avec le développement des Sciences de l'environnement, une large gamme d'effets négatifs de la salinisation sur la fonction biologique de l'environnement, incluant le déclin de la capacité à assurer la vie et la biodiversité ont été identifiés.

Des changements environnementaux préjudiciables dans différentes parties du monde conduisent à accorder une attention soutenue à de nouveaux problèmes, par exemple selon Chevery (1995) :

- Les relations entre la salinisation et la désertification;
- Le croisement des problèmes de salinité/alcalinité avec ceux de la pollution du sol et de l'eau ;
- L'accumulation simultanée de sels solubles et d'éléments potentiellement toxiques ;

- La limitation des ressources en eau conduisant à l'utilisation d'eaux polluées (eaux usées, eaux de drainage) pour l'irrigation ;
- Les changements défavorables de la qualité des nappes phréatiques liés à l'exploitation de ces nappes ;
- Les changements défavorables des propriétés physiques/hydrophysiques, du régime hydrique et du bilan de l'eau.

Et d'après IPTRID (2006) la salinisation entraîne aussi:

- Un accroissement de la pression osmotique qui rend l'eau plus difficilement mobilisable par les plantes;
- Une toxicité de certains ions pour les végétaux (Cl^- , Na^+ , etc.);
- Une dégradation du sol (modifications de l'état structural, diminution de la conductivité hydraulique, etc.).

Halitim et Daoud (1994) signalent que le développement de l'irrigation, s'il constitue un espoir pour les régions arides, se traduit souvent par une remontée du niveau de la nappe superficielle et par une augmentation de la salinité.

La tolérance des plantes à la conductivité électrique est plus élevée sur les sols gypseux que sur des sols non gypseux (Breinstan, 1987 in Guessoum, 2001).

La salinité limite la croissance et la production des plantes par accumulation d'ions toxiques (sodium et chlorure) dans les feuilles, ions capables d'inhiber l'activité enzymatique et le métabolisme des plantes, par exemple : l'activité photosynthétique.

La salinité du milieu induit aussi un stress supplémentaire lié à la diminution de la pression osmotique du sol. L'eau du sol devient alors moins disponible même si la nappe est affleurant d'où l'apparition d'un déficit hydrique qui modifie le potentiel hydrique foliaire et la transpiration des plantes (Maguy, 2007).

I.8 Méthodes de lutte contre la salinité

En général, le recours à la jachère augmente la teneur en eau de la rhizosphère, ce qui peut entraîner une élévation de la nappe phréatique et une augmentation de la concentration des sels solubles à la surface du sol ou à proximité. Par contre, la conservation de terres sous couverture végétale permanente et en culture continue sont deux pratiques qui facilitent l'utilisation de l'eau de la rhizosphère, abaissent la nappe phréatique et réduisent le risque de salinisation. On a mis au point l'Indicateur du risque de salinisation du sol (IRSS) pour évaluer les variations du risque de salinisation du sol dans les terres arides des Prairies en fonction du changement de l'utilisation des terres et des pratiques de gestion qui influent sur l'abondance et le déplacement de l'eau et des sels dans la rhizosphère (A.A.C en ligne).

On peut traiter le problème de la salinisation liée à l'irrigation par :

- La "prévention": le drainage des terres irriguées

Le drainage permet d'éviter la concentration des sels qui diminueraient les potentialités productives de terres irriguées mais génère des effluents qu'il faut gérer. Les externalités associées à la salinisation ne sont pas immédiates, en général, il faut au moins une décennie pour qu'elles se manifestent (baisse des rendements, etc.) (IPTRID, 2006).

Alors, l'installation de drains ouverts ou enterrés ou de puits drainants est nécessaire pour entraîner une partie de l'eau salée vers une zone où le sel peut être stocké sans risque (Kenfaoui, 1997).

· La "guérison": la réhabilitation des terres salinisées.

La réhabilitation des terres salinisées est coûteuse : elle peut représenter de 65% à 100% des coûts d'investissement. Elle est parfois impossible techniquement (IPTRID, 2006).

Le contrôle de la salinité a pour but le maintien de rendements acceptables, plusieurs solutions nous sont offertes pour atteindre cet objectif (Kenfaoui, 1997) :

a) Le lessivage

Lorsque la formation des sels solubles dans le sol devient où sur le point de devenir trop importante, les sels peuvent être lessivés en appliquant une dose d'eau plus importante aux besoins de la plante. Cette eau supplémentaire entraîne au moins une partie de sel en dessous de la zone racinaire.

b) La tolérance des cultures à la salinité

Toutes les plantes ne réagissent pas de la même manière à la salinité. Certaines cultures peuvent fournir des rendements acceptables avec une salinité du sol beaucoup plus grande que d'autres, Le degré de tolérance au sel des plantes peut varier de 1 à 10. Cette gamme étendue de tolérance permet un emploi des eaux jugées inutile auparavant; en effet, lorsqu'il n'est pas possible de maintenir la salinité du sol à un niveau acceptable pour la culture, on peut choisir une spéculation de remplacement qui à la fois tolère mieux la salinité prévue et présente une bonne rentabilité économique.

c) Méthodes de culture

· Surfaçage ou planage

Le contrôle de la salinité est difficile à réaliser si le terrain n'est pas suffisamment nivelé pour permettre une distribution d'eau uniforme. Les sels se concentrent dans les points hauts où l'infiltration et le lessivage sont trop faibles alors que l'eau s'accumule dans les dépressions générant un engorgement du terrain et d'éventuels problèmes de drainage. Les problèmes les plus délicats apparaissent lors de l'irrigation par ruissellement, le planage ou le surfaçage n'est nécessaire en aspersion ou en irrigation localisée que pour empêcher une accumulation excessive d'eau dans les zones basses.

· Calendrier des irrigations

Le choix des dates d'irrigation pour empêcher l'apparition du déficit hydrique améliorera les chances de succès lorsqu'on fera usage d'une eau plus salée. Ce choix peut consister à augmenter la fréquence des arrosages, à irriguer avant un hiver pluvieux, à recourir à la pré-irrigation ou à d'autres méthodes pour faciliter la croissance de la culture.

· Fumures

Les engrais chimiques, les fumiers et les amendements du sol contiennent beaucoup de sels solubles à des concentrations élevées. La localisation de la fumure et l'époque de son application doivent être pris en compte pour ne pas nuire au développement de la jeune plantule. En outre, l'utilisation d'une fumure à faible indice de salinité peut être envisagée. Si la salinité et une faible fertilité limitent à la fois les rendements, la correction, séparée ou simultanée, des deux facteurs limitant améliorera la production.

a) Modification des méthodes d'irrigation

La méthode d'irrigation a une incidence directe à la fois sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau et sur la façon dont les sels s'accumulent. L'irrigation par submersion ou par aspersion sont conçues pour distribuer l'eau uniformément sur toute la surface considérée. Il en résulte une accumulation de la plupart des sels dans les horizons inférieure de la zone racinaire. L'ampleur de l'accumulation dépend de la fraction de lessivage.

b) Aménagements et contrôle de la salinité

Ce sont des opérations réalisées une seule fois, ou rarement répétées, et ont pour objectif la restauration des terres. Ces opérations sont très coûteuses et nécessitent des études spéciales. On peut citer les opérations suivantes:

- Nivellement du terrain
- Amélioration du drainage souterrain

Le drainage doit être pris en compte car il constitue une donnée essentielle pour assurer le succès à long terme de tout projet d'irrigation. Il est nécessaire d'élaborer un projet permettant de contrôler les problèmes de drainage lorsqu'ils sont prévisibles.

- Labour profond

Les sols stratifiés sont difficiles à irriguer de façon efficace. Les horizons durcis gênent ou empêchent souvent la percolation profonde de l'eau, qu'est essentielle au contrôle de la salinité. Un labour profond s'impose alors pour rendre plus perméable les couches du sol. Cette opération est très coûteuse.

- Restauration par lessivage

Si la salinité dépasse de loin la tolérance des cultures, il peut s'avérer nécessaire, afin de rendre la culture possible, de procéder à un lessivage important pour abaisser la concentration en sels (restauration).

La hauteur d'eau nécessaire pour assurer une restauration convenable dépend de la salinité du sol et de la méthode de lessivage utilisée. Un lessivage non continu réduira la salinité du sol de façon plus efficace qu'un lessivage continu (submersion), mais il faudra plus de temps pour mener cette opération. L'efficacité est accrue si l'eau de percolation se déplace lentement (écoulement non saturé).

c) Changement ou mélange des eaux

Changer une eau d'irrigation constitue une solution simple mais radicale à un problème de qualité d'eau. Ce n'est possible que lorsqu'on dispose d'une eau de meilleure qualité et en quantité suffisante. Or, les problèmes de salinité sont souvent rencontrés dans des régions où l'eau fait défaut. On peut être amené à utiliser un mélange d'eaux de qualités différentes, ce mélange ne diminuera pas la charge totale en sel, mais il permet d'accroître la surface irriguée. La qualité de l'eau résultant du mélange est:

Le mélange des approvisionnements en eau ne constitue pas une pratique courante pour le contrôle de la salinité. La plupart des utilisateurs emploient alternativement les deux ressources. Cette aptitude des utilisateurs est due au fait que le mélange de deux ou plusieurs eaux de qualité différentes nécessitent un équipement supplémentaire et une demande en temps non négligeable.

I.9 L'approche socio-économique des problèmes de salinité

Quelle est l'ampleur des problèmes de salinisation des terres irriguées ?

Les terres irriguées salinisées représentent environ 10% de la salinisation due à des actions humaines (qui correspondent à 20% des terres salinisées), Près de 50% des terres irriguées salinisées se trouvent dans la zone aride.

Pendant les trente dernières années, les pays à faible revenu dans les régions sèches du monde ont considérablement développé l'irrigation de façon à pouvoir produire l'alimentation nécessaire pour répondre aux besoins d'une population croissante. En conséquence, le pourcentage des terres arables irriguées a considérablement augmenté pendant cette période (IPTRID, 2006).

La gestion des terres salinisées exige une combinaison de pratiques agronomiques spécifiques dépendant d'une définition précise des conditions basées sur une étude préalable détaillée et complète des caractéristiques du sol, de la qualité de l'eau et des conditions locales, incluant le climat, les cultures, l'environnement économique, social, politique et culturel, et les systèmes de cultures existants. Le contrôle de la salinité peut généralement se réaliser de diverses façons, particulièrement en agriculture irriguée. Cependant, plusieurs pratiques peuvent être combinées au sein d'un système intégré qui fonctionne de manière satisfaisante (Mashali et al, 2005).

Combien ça coûte?

Les pertes financières occasionnées par la salinisation des terres irriguées s'élève à environ 250 dollars/ha, soit environ 11 milliards de dollars de pertes totales.

On estime à environ 20% les pertes de rendement de la production de coton, ce qui correspond à plus de 200 Millions US \$ par an. Les sols salinisés affectent aussi les productions vivrières, avec des conséquences dramatiques pour les populations rurales: selon la Banque mondiale, près de 2 Milliards US \$ (environ 5% du PNB d'Asie Centrale) sont perdus à cause de la salinité des sols (Mashali et al, 2005).

L'accumulation de sel dans les sols agricoles irrigués réduit les taux de croissance de plantes, rendements et plus grave : l'échec de récolte, menaçant la production agricole (Herrero et Aragüés, 1988). L'atténuation et le contrôle de ce problème exige l'évaluation et la mesure de la salinité du sol dans la zone racinaire de façon fiable et rentable (Amezketta, 2007).

Selon Kenfaoui (1997), le problème de la salinité est négligé lors du choix d'un grand aménagement: les aménagements des grands deltas (le Sebou au Maroc, le Sénégal au Sénégal et Mauritanie) ont été retenus en considérant seulement la disponibilité en terres planes et en eau mais en négligeant totalement les problèmes de salinité liés aux dépôts marins, aux difficultés de drainage. De plus il n'est pas prévu une surveillance de l'évolution de la qualité du sol, de la remontée de la nappe.

Il apparaît important en matière de sel dans les aménagements hydro agricoles de retenir deux principes:

- Eviter les aménagements dans les zones où les conditions naturelles apparaissent très défavorables tant que toutes les autres possibilités aménagements n'ont pas été épuisées.
- Ne pas sous estimer l'importance des problèmes de salinité et leur évolution lorsque les conditions naturelles sont favorables.

I.10 Conclusion:

Le contrôle de la salinité constitue un enjeu fort des années à venir pour la gestion de l'eau au niveau mondial. L'idée forte qui sous-tend les travaux engagés est que la conception du drainage dans les périmètres irrigués de milieux arides ou semi-arides doit être entièrement repensée dans les années à venir (Bouarfa, 2003).

Chapitre II. La salinité des sols en Algérie

II.1 Introduction

La salinité est une caractéristique naturelle des sols, mais la salinisation est particulièrement causée par l'activité de l'homme. La salinité est un phénomène de dégradation des sols complexes qui cause la perte des sols agricoles. Ce qui a de graves répercussions socioéconomiques sur les régions affectées par ce phénomène.

Le phénomène de la salinisation est de plus en plus préoccupant. Quoique les estimations de la salinité diffèrent d'un auteur à un autre, les surfaces touchées sont généralement estimées à un Milliards d'hectares, ce qui représente 7% de la surface des continents, 77 millions d'hectares sont des sols salins induits par l'activité de l'homme dont 58% dans les régions irriguées (Benchallal et al., 2009).

La salinisation enregistrée dans les écosystèmes aride et semi aride résulte de forte évaporation d'eau à partir du sol (Munns et al., 2006) et d'une irrégulière et insuffisante pluviométrie (Mezni et al., 2002). Cette salinisation provient aussi de l'irrigation le plus souvent mal contrôlée (Bennaceur et al., 2001). Chaque année, les surfaces perdues à cause de la salinité des sols varient autour de 20 millions d'ha dans le monde. Ainsi, ces surfaces sont passées de 48 millions à 265 millions d'ha de terres agricoles touchées par la salinité et aujourd'hui, les surfaces agricoles affectées dans le monde seraient de 340 millions d'ha soit 23% des terres cultivées dans le monde (Cheverry, 1995).

II.2 Etat de la salinisation en Algérie

D'après l'INSID (2008), En Algérie, il n'est recensé aucune étude cartographique fiable et précise permettant de délimiter les zones touchées par la salinité des terres et la quantification de la teneur des sels dans le sol.

Néanmoins il existe quelques données fragmentaires qui donnent une idée générale sur le phénomène de salinité et de la dégradation des terres.

D'après Szabolcs (1994), 3,2 million d'hectares subissent à des degrés de sévérité variable, le phénomène de salinisation dont une bonne partie se trouve localisée dans les régions steppiques où le processus de salinisation est plus marqué du fait des températures élevées durant presque toute l'année, du manque d'exutoire et de l'absence de drainage efficient.

Ce phénomène est observé (voir carte de la figure n° 02) dans les plaines et vallées de l'Ouest du pays (Mina, Cheliff, Habra Sig, Maghnia) dans les hautes plaines de l'Est (Constantine, Sétif, Bordj Bou Arreridj, Oum El Bouagui), aux abords des Chotts et de Sbkhas (Chott Ech Chergui, Chott Gharbi, Chott Hodna, Chott Melghir, Sebkhia d'Oran, de

Benziane, Zemmoul, Zazhrez Gharbi et Chergui, etc..) et dans le grand Sud (dans les Oasis, le long des oueds, etc...).

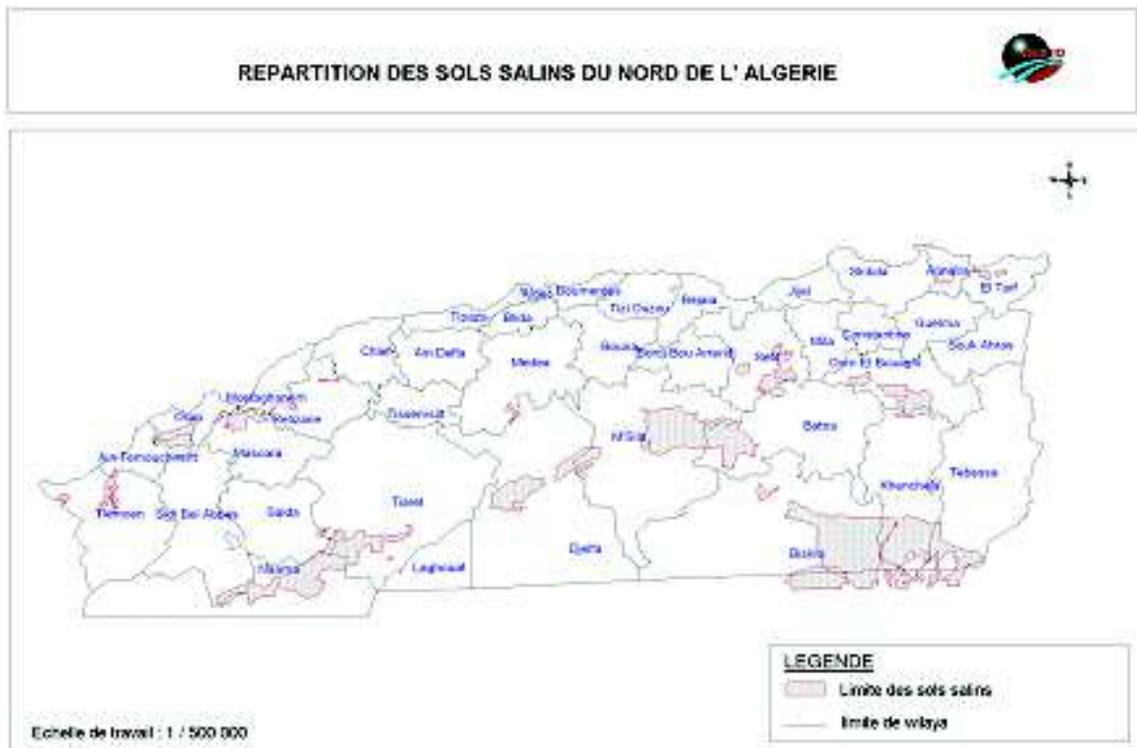


Figure n°2 : Répartition des sols salins du Nord de l'Algérie

Source : INSID 2008

Dans le tableau suivant il est donné un aperçu sur les superficies affectées par la salinité dans quelques périmètres de l'Ouest du pays.

Périmètres irrigués	Superficies irrigables	Superficies affectées	%
Haut Cheliff	20 200	6 400	32
Moyen Cheliff	21 800	8 700	40
Bas Cheliff	22 500	15 000	67
Mina	9 600	4 190	44
Habra	19 600	8 100	41
Sig	8 600	3 200	37

Tableau n°2 : Niveau de la salinité dans quelques périmètres dans l'Ouest de l'Algérie

Source : ENHYD (2003)

Dans les régions arides, les eaux soumises à une forte évaporation ont tendance à se concentrer et les sols à se saler. Une salinisation trop importante, accompagnée parfois

d'une alcalinisation du complexe absorbant des sols, nuit à la mise en valeur agricole des zones cultivables.

L'étude effectuée par INSID en 2008 sur la salinité des sols dans les périmètres irrigués: Risques et Recommandations (Cas du périmètre irrigué du Bas Cheliff), montre que l'expansion du phénomène de salinisation des sols en Algérie, constituant un domaine d'investigation qu'il faut à tout prix privilégier car il représente une menace certaine et «sournoise » qui risque d'hypothéquer à terme l'avenir économique et social de certaines régions du pays.

Il est admis, par la communauté des scientifiques, que ce phénomène « naît » et se développe grâce à la combinaison de plusieurs facteurs dont deux peuvent paraître comme principaux ; il s'agit à notre sens de :

- L'aridité du climat et les données géomorphologiques qui font que les reliefs de plaines et de vallées, constituant l'ossature principale de cette région, sont alimentés de façon constante, en alluvions et colluvions, matériaux qui proviennent essentiellement de régions de montagne du fait de l'érosion « naturelle » et des phénomènes de dégradation liés à l'homme ;
- L'endoréisme et l'exoréisme limité de certains bassins versants de la partie Nord Ouest et Nord Est de notre pays, jouent un rôle assez important, dans la salinisation des terres, salinisation accentuée par les problèmes posés par la géologie (salifère) et le climat (aride) de la région.

II.3 La salinité et sa transition

La salinité est définie comme un « état » du sol ou plus exactement de la solution du sol. Or cet état est obligatoirement transitoire, il est marqué à la fois par une variabilité spatio-temporelle forte et par une saisonnalité marquée.

- La variabilité spatiale est importante dans les deux dimensions horizontale et verticale du sol.
- La variabilité temporelle est due aux apports d'eau de qualité variable (eau des précipitations, eaux d'irrigation de surface, eaux souterraines) et au fait que pour une salinité de sol donnée, la salinité de la solution augmente lorsque le sol se dessèche. Cette dernière observation implique qu'il est par exemple possible d'irriguer avec des eaux relativement chargées en sels pour peu que la fréquence des apports soit ajustée de manière à ne pas trop dessécher le sol pour ne pas induire de stress salin.
- La saisonnalité est due au rythme climatique et aux rotations des cultures.

Ces différentes observations montrent qu'il faut dépasser le raisonnement classique de la salinité comme un état du sol. Tout au moins tant que cette salinité reste sous le contrôle des agriculteurs.

Dans cet ordre d'idées il est proposé de distinguer deux grands types de salinité dans les périmètres irrigués :

a) la salinité forte, qui conduit ou résulte de l'abandon de terres agricoles : pour cette salinité, la vision classique de sols salés ou salinisés peut retrouver sa place. Il peut être défini un pourcentage de sols salés au sein d'un périmètre en observant les sols dont le contrôle a échappé aux agriculteurs ;

b) la salinité faible au moyenne, gérée et contrôlée par les pratiques des agriculteurs et/ou par des techniques de drainage. Trop souvent, la perception de la salinité forte, hors

de contrôle, a prévalu. Il est important de changer de perception et de comprendre que dans les périmètres irrigués la majeure partie de la salinité constitue un risque géré par les pratiques des agriculteurs.

II.4 Conclusion

Le changement de perspective ainsi introduit conduit à essayer de comprendre quels sont les coûts de la gestion de la salinité pour le système, pour quels niveaux de disponibilité de la ressource en eaux ces coûts deviennent insupportables pour les agriculteurs.

Cette vision plus agro-économique que pédologique de la salinité ne va pas sans difficultés non plus. Mais elle présente l'avantage de pouvoir donner des indications sur l'opportunité (notamment économique) d'une amélioration du drainage dans une zone donnée.

Chapitre III. La méthode d'induction électromagnétique par Géonics EM 38

III.1 Introduction

La conductivité électrique (CE) a été employée pendant plusieurs années pour déterminer la salinité du sol moyennant sa mesure par l'extrait de saturation du sol (CE_s) ou d'autres extraits de « sol :eau » tel que l'extrait CE_{1:5} (USSS, 1954).

Cependant, cette méthode demande du temps et de la main-d'œuvre, Pour cette raison, la mesure géospatialisée fiable et rapide de la conductivité électrique apparente (CE_a) est devenue une référence pour le suivi spatio-temporel de la salinité du sol. La sonde électromagnétique EM38 de Géonics, l'instrument le plus utilisé dans le monde et a été bien validé dans beaucoup d'études (Mc Neil, 1986).

III.2 Géonics EM 38 :

Les instruments d'induction électromagnétique ont été largement utilisées pour rendre non invasive de la conductivité électrique apparente (CE_a) des mesures qui peuvent être utilisés pour caractériser la variabilité spatiale de la salinité des sols dans de vastes zones (Corwin, 2005).

La sonde EM38, ayant 1 m de long, est légère et nécessite qu'une seule batterie de 9-volt (durée approximativement de 16 à 20 heures), elle utilise l'induction électromagnétique pour estimer la salinité de sol dans la zone racinaire (De Jong et al, 1979). C'est une méthode non envahissante, non destructive et donne la conductivité électrique apparente du sol instantanément. Cependant, la CE_a dépend également d'autres propriétés de sol que la salinité (température, humidité du sol, texture du sol, etc..). Pour cette raison, la sonde doit être calibrée pour chaque type de sol par la prise des échantillons du même sol et la mesure de la salinité au laboratoire (généralement CE_s de l'extrait de pâte saturée).

La conductivité électrique apparente (CE_a) mesurée correspond à un volume de sol donné qui dépend des caractéristiques de l'appareil de mesure (longueur, fréquence de

l'onde électromagnétique émise), de son mode d'utilisation (dipôle émetteur-récepteur vertical ou horizontal, réponse non uniforme avec la profondeur) et des caractéristiques physico-chimiques du sol (teneurs en eau et en argile, minéralisation de la solution du sol, compacité...) (McNeill, 1980). L'unité de la conductivité électrique apparente du sol est millisiemens par mètre (Geonics Limited, 1999).

Généralement utilisées en valeurs relatives, les mesures de CEa peuvent être calibrées par rapport à une méthode d'extraction de la solution du sol et de mesure de la CE au laboratoire (Corwin et Rhoades, 1990 ; McKenzie et al, 1989; Wollenhaupt et al, 1986 ; Montoroi, 1997). Cette calibration entraîne des biais dus à l'échantillonnage in situ et aux variations de teneur en eau et de texture dans le volume de sol exploré par la méthode électromagnétique (Johnston et al, 1997).

III.3 Principe de fonctionnement:

C'est un appareil constitué de deux bobines à axes parallèles et coplanaires séparées d'un mètre. Selon Wade (1998), La bobine émettrice ou spire primaire (SP) parcourue par un courant électrique de fréquence (f) produit un champ magnétique primaire (HP) de même fréquence qui induit des courants dans le sol supposé homogène. Ces courants produisent à leur tour un champ secondaire (HS) proportionnel à la conductivité du sol. Ce champ est capté par la bobine réceptrice ou spire secondaire (SS). L'amplitude et la phase du champ secondaire diffèrent de ceux du champ primaire en raison de la variation des propriétés du sol (taux d'argile, teneur en eau, salinité...), de la distance inter-bobine et de leur orientation, de la fréquence du courant et de la distance au dessus de la surface du sol (Hendrickx et Kachanosky, 2002 ; Corwin et Lesh, 2003).

Ces propriétés de sol sont donc à prendre en compte au moment de la mesure d'où il serait préférable de réaliser les mesures on se plaçant dans des conditions où l'on considère des faibles variations de ces dernières en regard des variations de salinité (McNeil, 1980).

Le rapport entre le champ magnétique secondaire mesuré (HS) et le champ primaire émis (HP) est proportionnel à la conductivité apparente du sol et donne directement accès à son inverse, la résistivité électrique.

Selon McNeil (1980), celle-ci est égale à :

$$\sigma a = 4 \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \omega \mu_0 S^2 \dots (1) \quad \text{soit :} \quad \sigma a = K \left(\frac{H_s}{H_p} \right)$$

où :

K : constante dépendant de la construction de l'appareil,

H_s : champ magnétique secondaire à la bobine réceptrice (A.m-1)

H_p : champ magnétique primaire à la bobine émettrice (A.m-1)

ω : pulsation (rd .S-1)

μ₀ : perméabilité magnétique du vide (H. m-1)

S : distance inter bobine

σa : conductivité apparente du sol (S.m-1)

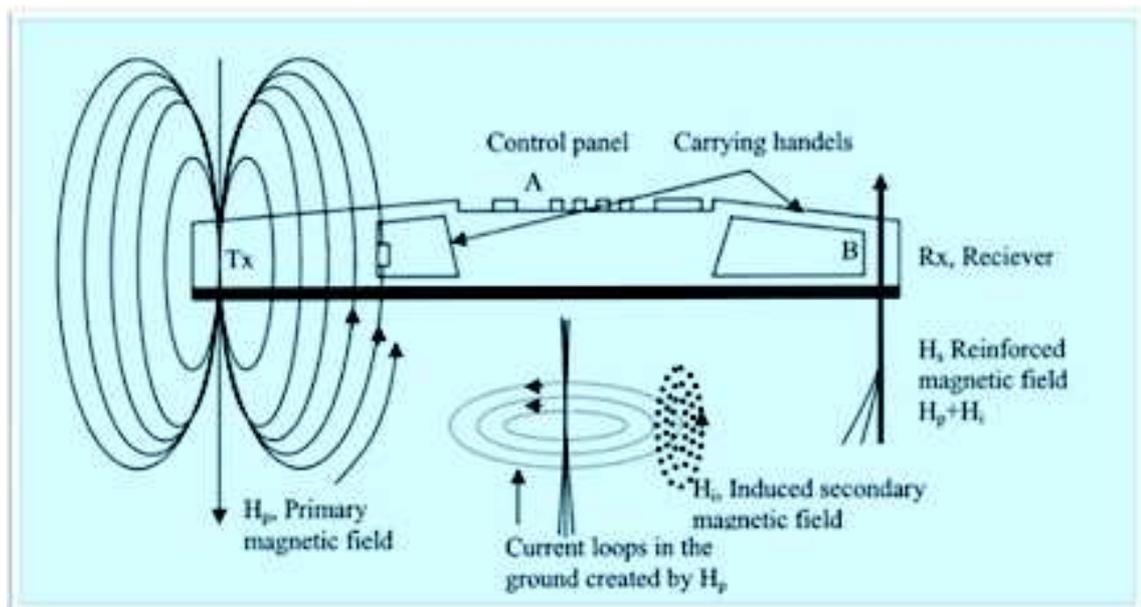


Figure n° 3 : Principe de fonctionnement du conductimètre électromagnétique

Quel que soit l'appareil électromagnétique utilisé, il faut transformer la conductivité électromagnétique en conductivité de l'extrait saturé de sol afin de pouvoir faire des interprétations pédologiques des mesures (Job et al 1987). On peut aussi étalonner l'appareil par rapport à d'autres méthodes de mesure de salinité comme la sonde à quadripôle (Rhoades et Corwin, 1981) ou les extraits dilués (Job et al, 1987 ; Boivin et al, 1989).

III.3.1 Mode de fonctionnement et réponse du conductivimètre EM38 en fonction de la profondeur :

L'EM 38 peut être utilisé selon deux configurations (McNeill, 1980) comme présenté dans les figures 4 et 5:

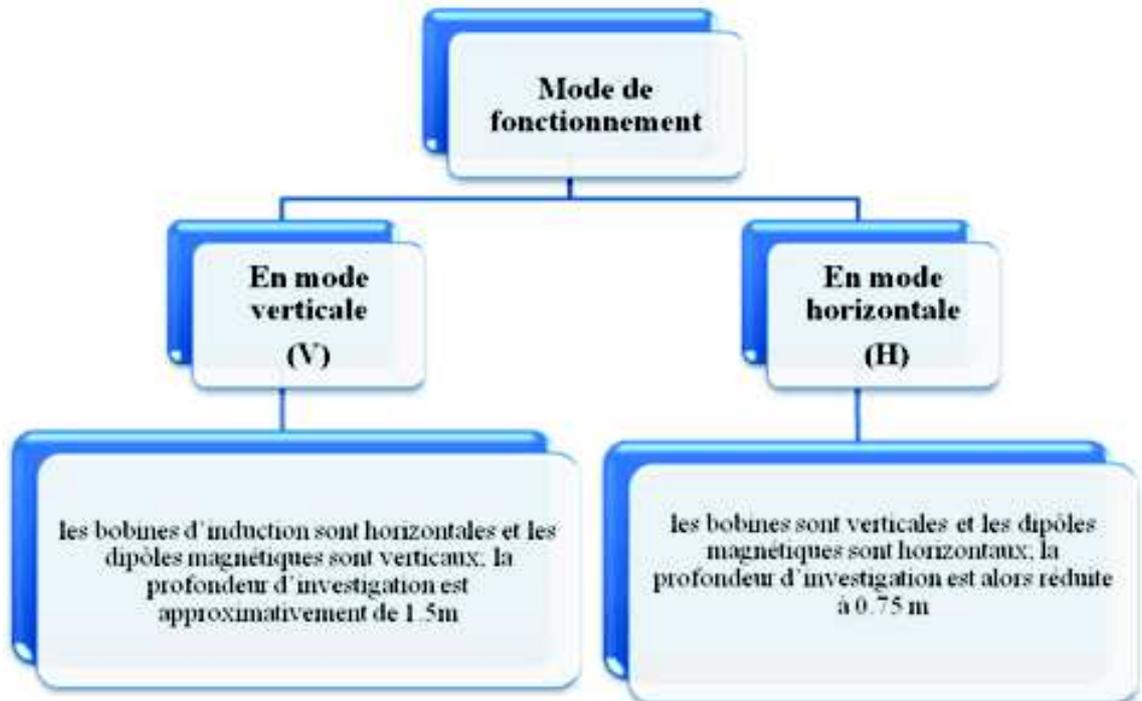


Figure n°4 : Mode de fonctionnement du conductimètre électromagnétique EM38

En mode vertical de dipôle, la sensibilité de l'appareil atteint le minimum à environ 0,4 m et diminue progressivement ensuite tout en allant vers la profondeur. En mode horizontal, la réponse est plus élevée en surface et diminue ensuite vers la profondeur (figure 6).

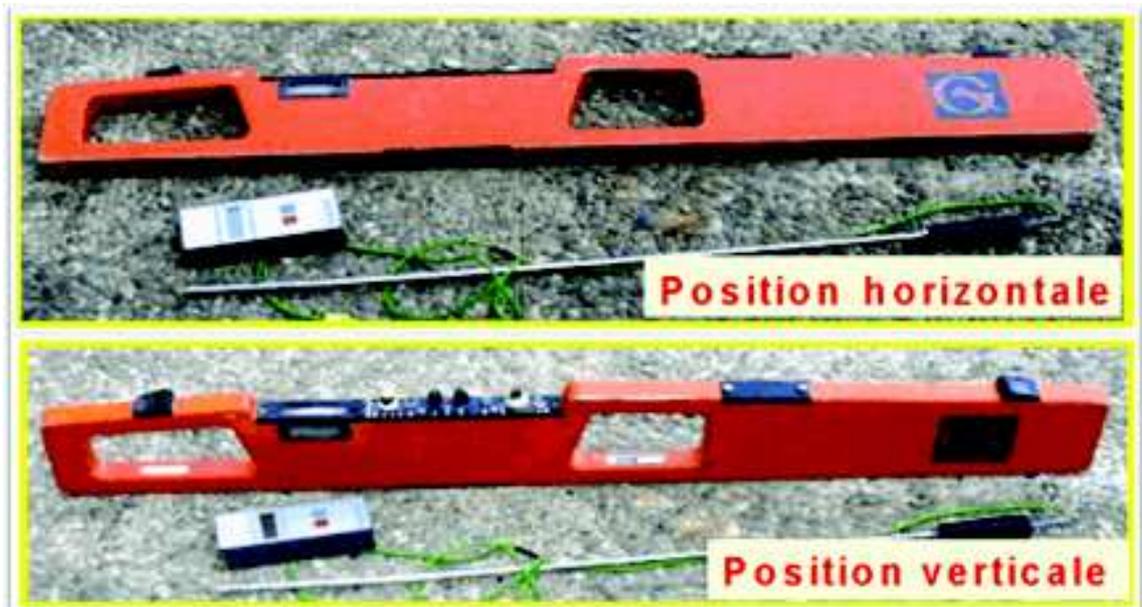


Figure n°5 : Conductimètre électromagnétique EM-38 selon le mode vertical (V) et horizontal (H)

Selon Corwin et Rhoades (1984) et Job et al (1987), cette différence dans la sensibilité peut être utilisée comme étant une méthode rapide pour déterminer si la couche superficielle du sol est plus conductrice que la couche profonde ou non.

Autrement dit :

- Si $ECH > ECV$ on a un profil salin décroissant avec la profondeur, situation indiquant une concentration des sels en surface.
- Si $ECH < ECV$ il s'agit d'un profil salin croissant avec la profondeur où les sels se sont accumulés.
- Si $ECH = ECV$, on est alors devant un profil salin uniforme.

La comparaison de la conductivité électromagnétique en mode horizontal (ECH) et en mode vertical (ECV) est donc une première possibilité d'interprétation des résultats.

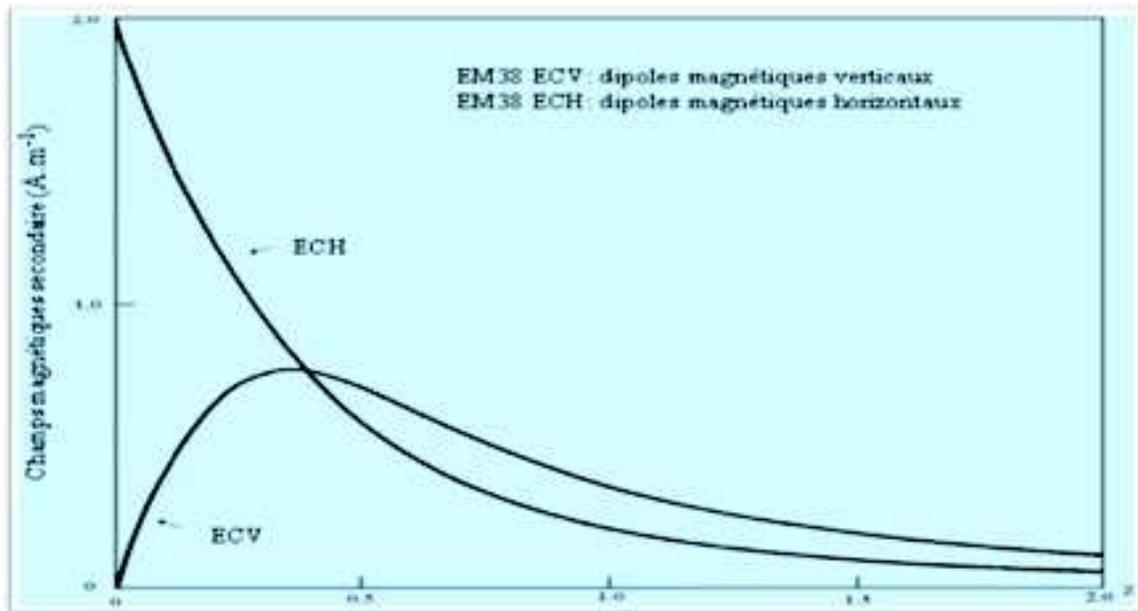


Figure n°6 : Réponse du Géonics EM-38 en fonction de la profondeur

III.3.2 Calibration du conductimètre électromagnétique EM 38 :

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

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

$$EMz = a CEz + b \dots (r^2).$$

Avec :

EMz : conductivité électromagnétiques pour une profondeur de sol z

CEz : conductivité électrique pour une profondeur z

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

$$1: CEz = aEMz'0 + bEMz'1 + cEMz'2 + dEMz'3 + \dots + cst (r^2)$$

$$2: EMz' = aCEz0 + bCEz1 + cCEz2 + dCEz3 + \dots + cst (r^2)$$

Où z est l'intervalle de profondeur.

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

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

Où $z' = z0 + z1 + z2 + z3 \dots$ et a, b, c, d sont des constantes

III.3.3 Influence des paramètres pédologiques :

Certains paramètres pédologiques du sol peuvent influencer les mesures de CEM obtenues avec l'EM-38. En effet, l'appareil mesure le rapport H_s/H_p qui pour une même position initiale des spires dépend de la géologie des lignes de courant dans le sol, donc du volume exploré. Ce dernier varie avec la texture, la porosité et l'humidité mais aussi avec la conductivité propre du sol et celle du liquide interstitiel (Job et al, 1987).

Effet de la texture et de la porosité du sol :

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

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_l} = f^2$$

σ_x : conductivité totale du sol

σ_l : conductivité du liquide interstitiel

f : fraction de la porosité du sol occupée par le liquide interstitiel

Le rapport σ_x/σ_l augmente dans l'ordre pour les roches dures, les grés, les sables, 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 électromagnétique mesurée peut être très

faible si f est petit, ce qui implique pour les sols peu salés de faire les mesures à taux

d'humidité du sol élevé.

Effet de l'humidité:

Rhoades et al (1976) ont développé l'expression de la variation de f avec l'humidité du sol :

$$\frac{(\sigma_x - \sigma_s)}{\sigma_l} = \theta(a\theta + b) \dots\dots(A)$$

Avec :

σ_s : conductivité de surface dépendant de la teneur en argile et de la capacité d'échange du sol

θ : humidité volumique du sol

a et b : coefficients de texture

La relation (A) montre qu'avec une salinité et une humidité faible l'influence de l'argile sur la valeur de la conductivité du sol est prépondérante. Au contraire, lorsque la salinité est forte, le rapport σ_x/σ_l reste faible et la conductivité du sol dépend plus de

θ et σ_l (Rhoades et al, 1976).

Effet de la température:

Les changements de température affectent la viscosité des liquides, donc le déplacement des ions dans la solution et par conséquent la conductivité du milieu. Le gradient est de 2 à 2.4 % par degré selon les électrolytes (Robinson et al, rapportés par Job et al, 1987).

Habituellement, la conductivité électrique (CE) est exprimée à une température de référence de 25°C à des fins de comparaison. La conductivité électrique apparente CE_a, mesurée à une température Donnée, t (en°C), elle peut être ajustée à une référence CE à 25°C, EC25, en utilisant les équations ci-dessous du Guide 60 (USSSL, 1954) :

$$CE_{25} = ft CE_t$$

Où : ft est un facteur de conversion de la température.

III.4 Applications de l'induction électromagnétique par le Géonics EM-38 :

La salure des sols est un des facteurs limitant les plus anciennement reconnus de l'agriculture en zone aride. C'est pour cette raison que, la cartographie du risque de la salinité du sol a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dans le monde. Ces dernières exploitent différents types de mesures de la salinité du sol notamment la mesure de la conductivité électromagnétique (CEM) des sols, qui est une propriété qui petit à petit s'est imposée comme une des méthodes de mesure de la salinité des sols (De Jong et al., 1979 ; Williams et Bake, 1982 ; Job et al., 1987). En pratique, la mesure de CEM intègre un volume de sol de quelques mètres cube (m³), variable suivant l'équipement utilisé. Elle permet entre autres d'évaluer la salinité globale apparente des sols intégrée sur une profondeur d'à peu près deux mètres.

La méthode électromagnétique en domaine fréquentiel (FDEM) est largement utilisée pour cartographier et diagnostiquer les couvertures pédologiques très conductrices comme celles des sols salés (De Jong et al., 1979 ; Cameron et al., 1981 ; Williams et Hoey, 1987 ; Job et al., 1987 ; Boivin et al., 1988 ; Lesch et al., 1992 ; Rhoades, 1992 ; Cannon et al., 1994 ; Montoroi, 1999).

La conductivité électrique apparente (CE_a) mesurée correspond à un volume de sol donné qui dépend (McNeill, 1980) :

- Des caractéristiques de l'appareil de mesure (longueur, fréquence de l'onde électromagnétique émise),
- De son mode d'utilisation (dipôle émetteur-récepteur vertical ou horizontal, réponse non uniforme avec la profondeur),
- Et des caractéristiques physico-chimiques du sol (teneurs en eau et en argile, minéralisation de la solution du sol, compacité...).

Généralement utilisées en valeurs relatives, les mesures de CE_a peuvent être calibrées par rapport à une méthode d'extraction de la solution du sol et de mesure de la CE au laboratoire (Corwin et Rhoades, 1990 ; McKenzie et al., 1989 ; Wollenhaupt et al., 1986 ; Montoroi, 1997).

Cette calibration entraîne des biais dus à l'échantillonnage in situ et aux variations de teneur en eau et de texture dans le volume de sol exploré par la méthode électromagnétique (Johnston et al., 1997).

Les premières études scientifiques commencent au début du siècle avec la mesure de la conductivité électrique d'extraits de sols en 1910 (Davis et Bryan). A partir de 1929 on trouve dans la littérature toutes les analyses de base faites en laboratoire jusqu'à maintenant.

Suivent bientôt les grands projets de développement de terres vierges accompagnés de monographies, en URSS (Kovda, 1937), aux Etats-Unis (USSR, 1954), en Algérie (Durand, 1954), Irak (Buringh, 1960; ILRI, 1963), Tunisie (CRUESI, 1970) et en Syrie (Dosso, 1980), entre autres. C'est dire l'ampleur du problème de la salure des sols, son étendue géographique, sa persistance dans le temps.

Parallèlement, sont éclaircis quelques mécanismes fondamentaux: dynamique des sels et fixation sur les argiles (Bower, 1959; Bolt et Page, 1965; Sposito et Mattigod 1977), précipitation-évaporation (Cheverry, 1972; Droubi, 1976; Tardy et Gac 1979), effets sur le pH (Van Bremen et Wielemaker, 1974; Bourrié, 1976) et la structure du sol. On aboutit à la modélisation des phénomènes (Truesdell, 1974; Rieu et Cheverry, 1976; Droubi et al., 1976).

Les outils sur le terrain se développent, des sondes électriques (Rhoades et Ingvalson, 1971) et électromagnétiques (De Jonc et al., 1979) permettent des mesures répétées sur un espace plus vaste alors qu'en même temps se développe la théorie des variables régionalisées (Matheron, 1965; Delhomme, 1976). L'utilisation de descripteurs pertinents permet alors d'élaborer des stratégies d'échantillonnage, utiles dans les systèmes à forte variabilité spatiale.

III.5 Conclusion :

La Conductivité électrique (EC) peut être mesurée facilement avec des appareils disponibles dans le commerce (surtout l'EM38 de la société GEONICS) mais souffre d'un certain nombre de défauts bien connus (Dabas et Cassassoles, 2002):

- Une profondeur d'investigation que l'on ne peut changer,
- Une mauvaise stabilité du signal électronique dans des environnements difficiles,
- Une réponse très faible pour des sols résistants,
- Un temps de réponse important
- Et une sensibilité aux interférences électromagnétiques comme par exemple les files métalliques.

Chapitre IV. La cartographie de la salinité du sol

IV.1 Introduction

La cartographie de la conductivité électrique (CE) d'un sol salé doit satisfaire certaines exigences, particulièrement lorsqu'elle est associée à un schéma de développement ou de suivi d'un périmètre irrigué. D'après Bovin et al (1988) la réalisation de la carte doit satisfaire les critères de qualité suivants :

- Erreur d'estimation minimale ;

- Reproductibilité de la méthode, notamment l'hypothèse d'un suivi intersaisonnier ou interannuel ;
- Résolution optimale.

Les données acquises à l'aide du conductimètre électromagnétique sont traitées numériquement par des méthodes géostatistiques, en particulier, des cartes sont tracées à partir d'une interpolation par krigeage. L'étude des variogrammes peut également fournir des renseignements sur la variabilité spatiale de la mesure, susceptibles d'orienter les modes d'échantillonnage futurs (Bovin, 1988).

Le krigeage est une méthode d'interpolation issue de la géostatistique. Le terme krigeage, kriging en anglais, provient du nom de famille de l'ingénieur minier sud-africain Daniel Gerhardus Krige. Il a été formalisé pour la prospection minière par Georges Matheron à l'École des Mines de Paris. Depuis, le domaine de ses applications a largement été étendu, touchant notamment la météorologie, les sciences de l'environnement et l'électromagnétisme (Krige, 1951 et Matheron, 1962, 1963a et b).

IV.2 Interpolation spatiale par l'analyse géostatistique

L'emploi de la géostatistique s'impose dans ce type de situation. Il s'agit en effet de cartographier une seule variable, non corrélée de façon simple à des variations morpho-pédologiques. En outre, la cartographie est souvent mise en œuvre à une échelle détaillée, à l'intérieur d'une unité pédologique ; le choix de périmètres irrigués se situe le plus souvent en zone alluviale à topographie plane (Bovin et al, 1989).

Bovin et al (1988) confirme que pour divers types de sols salés, l'emploi du conductimètre électromagnétique couplé à un traitement numérique de type géostatistique aboutit au tracé de cartes, estimées et interpolées par krigeage à partir d'un lot de mesures de terrain, satisfaisant aux critères de fiabilité et de reproductivité énoncés ci-dessus.

Les méthodes de la géostatistique se basent sur l'analyse de la structure spatiale et se réfèrent à la théorie régionalisée (Mathéron, 1965). Leur but est de connaître l'organisation spatiale d'un phénomène en étudiant:

- L'étude de la structure spatiale de la variable en question par le variogramme (variographie)
- La cartographie par krigeage

IV.2.1 Le variogramme

C'est une fonction qui quantifie la corrélation spatiale entre deux variables aléatoires $Z(x_i)$ et $Z(x_i+h)$ séparées dans la nature par une distance h . (Gausculel-Odoux et al, 1984)

Soit deux points de coordonnées géographiques X_i et X_j associées à deux valeurs $Z(X_i)$ et $Z(X_j)$ d'une propriété donnée Z connue en n points de l'espace géographique. La variance qui évalue le degré de dispersion. Autrement dit, elle traduit l'importance des écarts à la moyenne et est d'autant plus grande que les observations sont différentes (Walter, 1990) de ces deux points est par définition :

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

Avec $Z(m)$ est la moyenne des valeurs X_i et X_j , le développement de cette équation donne :

$$\delta^2 = \frac{1}{2}(Z(X_i) - Z(X_j))^2 \quad \dots(2)$$

Puisque X_i et X_j sont séparés par une distance h , l'équation 2 s'écrit :

$$\delta^2 = \frac{1}{2}(Z(X_i) - Z(X_i + h))^2 \quad \dots(3)$$

On considère un ensemble de n couples de points distants de h , la variance moyenne des écarts entre les couples est alors :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(X_i) - Z(X_i + h))^2 \quad \dots(4)$$

L'équation (4) donne une estimation de ce qu'appelle semi-variogramme (Gauscuel-Odeux, 1996)

a) Modèles de variogrammes

Le variogramme, entant que fonction habituellement croissante en fonction de h , synthétise beaucoup d'information concernant le comportement de la variable aléatoire étudiée. L'anisotropie (contraire d'isotropie) est la propriété d'être dépendant de la direction.

Variogramme à palier (figure n°7) : souvent le variogramme apparaît comme une ligne brisée qui atteint un palier après une distance appelée la portée où les corrélations entre les valeurs de la variable s'annulent (Delhomme, 1976).

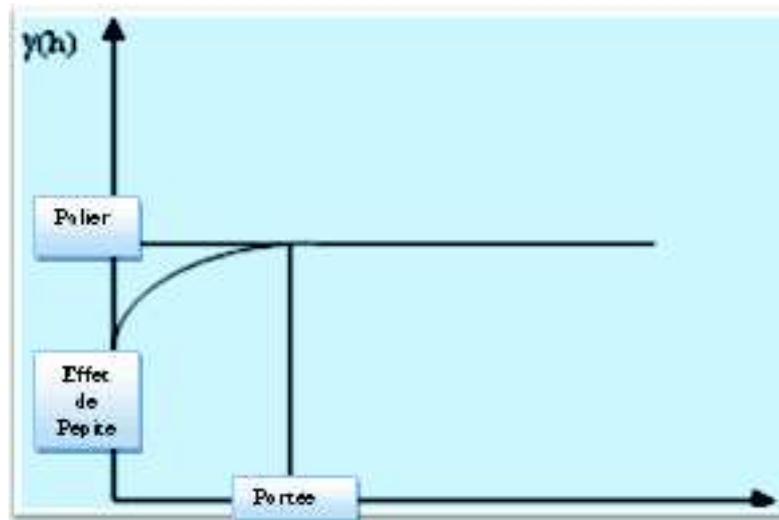


Figure n°7 : Exemple de variogramme à palier

- Variogramme sans palier (figure n°8) s'explique par le fait que la portée est supérieure à l'échelle de travail, ou par des variances qui augmentent indéfiniment ou encore par la présence d'une dérive (Laborde, 1989).

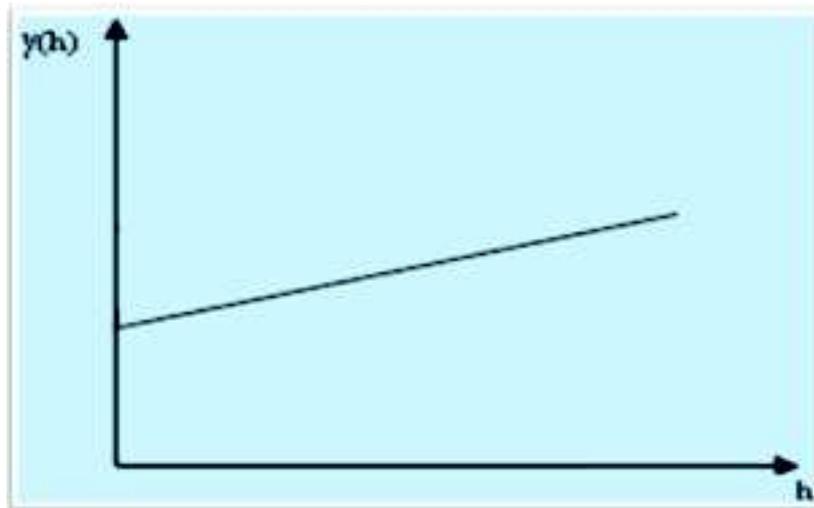


Figure n°8 : Exemple de variogramme sans palier

- L'effet pépité (figure n°9) : il y a effet pépité lorsque le variogramme non nul se traduit par une discontinuité à l'origine. Ce comportement peut être dû soit à des erreurs de mesure dues au protocole expérimental (Gascuel-odoux, 1987 ; Boivin et Touma, 1988) soit à une micro régionalisation.



Figure n°9 : Exemple de variogramme à effet pépité

- C'est à dire qu'il y a une autocorrelation inférieure à la distance d'échantillonnage ou encore à un nombre de couple de mesure inférieur à 50 (Journel, 1977).

Le modèle de variogramme, qui spécifique à chaque variable en étude, est incorporé dans un système linéaire d'équations (le système de krigeage), afin de déterminer les poids optimaux à affecter aux données lors de l'interpolation (Armstrong et Carignan, 1997).

a) Ajustement du variogramme expérimental à un modèle théorique

L'ajustement rend compte la structure de la variable considérée qui sera utilisée par la suite, lors du krigeage, donc ce modèle rend compte des caractéristiques observées.

Quatre principaux modèles peuvent être calculés :

- Modèle exponentiel,
- Modèle gaussien,
- Modèle sphérique,
- Modèle linéaire (cas particulier du modèle puissance).

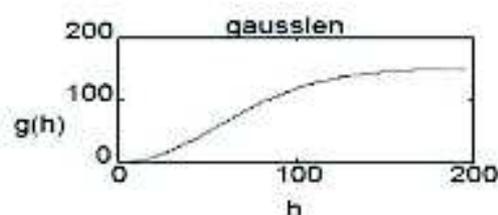
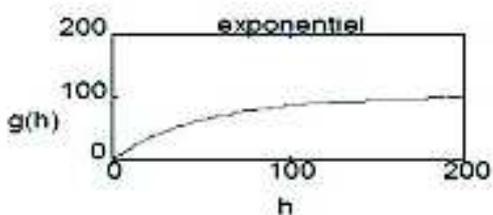
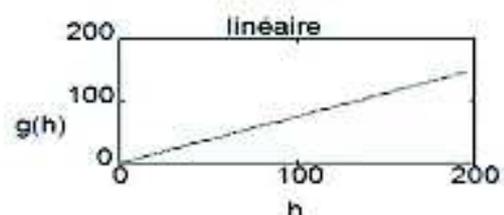
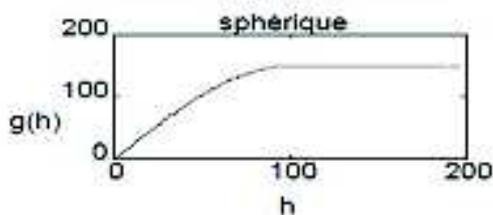


Figure n°10 : Principaux modèles d'ajustement du variogramme

IV.2.2 Le krigeage

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

Méthode d'estimation linéaire, sans biais, minimisant la variance d'estimation telle que calculée à l'aide du variogramme, Il existe trois types de Krigeage univarié : le Krigeage simple, le Krigeage ordinaire, le plus fréquemment utilisé, et le Krigeage universel. La différence entre ces types d'estimation réside dans la connaissance de la statistique de la variable à interpoler (Journel et Huijbregts, 1978):

a) Krigeage simple

Variable stationnaire de moyenne connue; soit X_i nombre de points échantillonnés d'une propriété donnée Z et Z^* et la valeur estimée par la moyenne connue m :

$$Z^*(X_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(X_i)$$

$$m = E[Z(X)]$$

M est connu, on travaille alors sur un champ centré :

$$\begin{cases} E [Z^*(X) - m] = 0 \\ \delta^2 = Var (Z^*(X_0) - Z(X_0)) \text{ minimale} \end{cases}$$

a) Krigeage ordinaire

Variable stationnaire de moyenne inconnue ; on considère estimer une valeur Z^* en un point X_0 , la nouvelle valeur de Z^* est estimer par la moyenne pondérée des données $Z(X_i)$, avec X_i le nombre de points échantillonnés d'une propriété donnée Z ;

Le N pondérateurs sont calculés de façon à assurer l'estimation $Z^*(X_0)$ soit dans biais et que la variance de l'erreur d'estimation soit minimale.

$$m = E[Z(X)] \text{ , inconnu}$$

$$Z^*(X_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(X_i)$$

$$\begin{cases} E [Z^*(X_0) - Z(X_0)] = 0 \\ \delta^2 = Var (Z^*(X_0) - Z(X_0)) \text{ minimale} \end{cases}$$

a) Krigeage universel : Variable non-stationnaire (qui contient une tendance).

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

$$\begin{cases} E [Z(X)] = m(X) \\ E [Z(X) - Z(X+h)] \neq 0 \end{cases}$$

Donc l'estimation du variogramme par l'équation habituelle n'est plus valable et devient (Webster et al., 1985 ; Voltz, 1986) :

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

Il faut donc estimer, dans ce cas, simultanément le variogramme brut et la dérivée que l'on suppose généralement être une fonction simple variant relativement lentement.

IV.2.3 Propriétés du krigeage

Les principales propriétés et caractéristiques associées au krigeage sont:

1. Linéaire, sans biais, à variance minimale, par construction.
2. Interpolateur exact. : si l'on estime un point connu, on retrouve la valeur connue.
3. Présente un effet d'écran: les points les plus près reçoivent les poids les plus importants. Cet effet d'écran varie selon la configuration et selon le modèle de variogramme utilisé pour le krigeage. Plus l'effet de pépité est important, moins il y a d'effet d'écran.
4. Tient compte de la taille du champ à estimer et de la position des points entre eux.
5. Par l'utilisation du variogramme, tient compte de la continuité du phénomène étudié (effet de pépité, anisotropie, etc.).
6. Effectue généralement un lissage, les estimations sont moins variables que les teneurs réelles (point ou bloc) que l'on cherche à estimer.
7. Transitif. Si l'on observe en un point une valeur coïncidant avec la valeur krigée pour ce point, alors les valeurs krigées en d'autres points ne sont pas modifiées par l'inclusion de ce nouveau point dans les krigeages. Par contre les variances de krigeage, elles, sont diminuées. De même, si l'on krige un certain nombre de points et que l'on utilise les valeurs krigées comme si c'étaient de nouvelles données, alors les krigeages subséquents ne s'en trouvent pas modifiés (sauf pour la variance de krigeage).

III.3 Conclusion

Le Krigeage est la méthode optimale, au sens statistique, d'interpolation et d'extrapolation. C'est la méthode d'estimation la plus précise. Contrairement à toutes les autres méthodes, elle nous permet aussi de calculer l'erreur d'estimation (Gratton, 2002).

La pratique du krigeage n'est pas envisageable sans ordinateur. Certains choisissent de programmer la méthode, car les calculs intervenant dans la démarche sont relativement

simples. Cependant, une bonne analyse variographique requiert un support graphique assez puissant (Baillargeon, 2005).

Matériel et Méthodes

Chapitre I. Description du sous bassin versant de Sidi Rached

1. Introduction

La qualité médiocre des eaux d'irrigation, le système de drainage souvent inexistant ou non fonctionnel, et la conduite empirique des irrigations vont accentuer le phénomène de concentration des sels dans les sols. En fonction de la quantité et de la chimie des sels accumulés dans le sol, les conséquences de ce processus sur les traits essentiels du sol (physiques, chimiques, biologiques...) peuvent être diverses, mais toutes conduisent à une dégradation du sol, à une diminution de sa productivité. Ce problème est devenu global: il concerne non seulement des aspects de production agricole, mais il a aussi des implications sur l'environnement.

L'objectif de ce travail est d'établir la cartographie de la salinité du sol d'un sous bassin versant à partir de la conductivité électrique mesurée par induction électromagnétique « Géonics EM-38 » qui doit être calibrée grâce à des mesures de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée afin de savoir le degré de l'évolution de la salinisation dans la zone d'étude durant les prochaines années.

Le choix du site se voit justifié par sa vocation agricole s'inscrivant dans les objectifs du projet « **Qualiwater** », il s'est porté sur le sous bassin versant de Sidi Rached. Ce dernier appartient au grand bassin de Attatba situé à l'Ouest de la plaine de la Mitidja, drainé principalement par les deux grands affluents de l'oued Mazafran : l'oued Djer au centre et l'oued Bouroumi à l'Est. (Figure n°11)

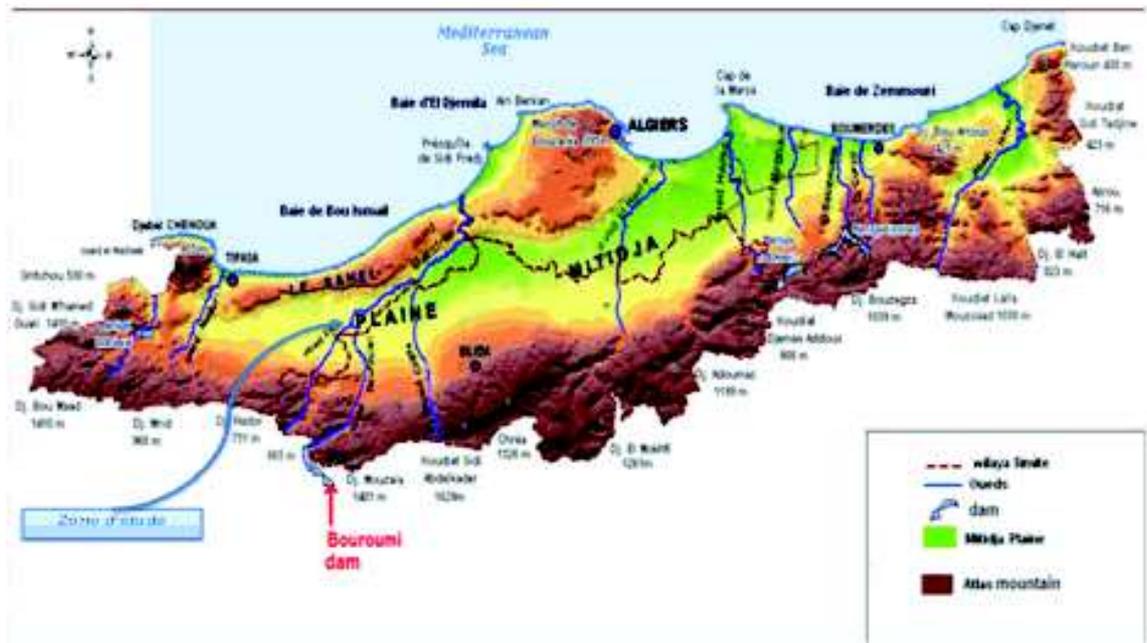


Figure n°11 : Situation géographique de la plaine de la Mitidja

Source : programme d'aménagement côtier (PAC) 2006

I. Description du sous bassin versant de Sidi Rached

I.1 Introduction

Etant la plus grande plaine sublittorale d'Algérie et surtout l'une des plus fertiles, la plaine de la Mitidja a comme principal avantage des sols très productifs, un climat clémente pour une large gamme de cultures. Elle se caractérise par une superficie de 1 450 km², avec une SAU estimée Selon le ministère de l'agriculture et du développement rural, à environ 120.000 ha. Quant à la SAU Irriguée elle est de 55.314 ha.

Le bassin versant de Attaba situé dans le côtier Algérois, couvre une superficie estimée à 8600 km² à la station de Attatba. Il est drainé principalement par les deux grands affluents de l'oued Mazafran à savoir, l'oued Djer au centre et l'oued Bouroumi à l'Est, il est constitué de plusieurs sous bassins dont celui de Sidi Rached objet de notre étude (Figure n°12)

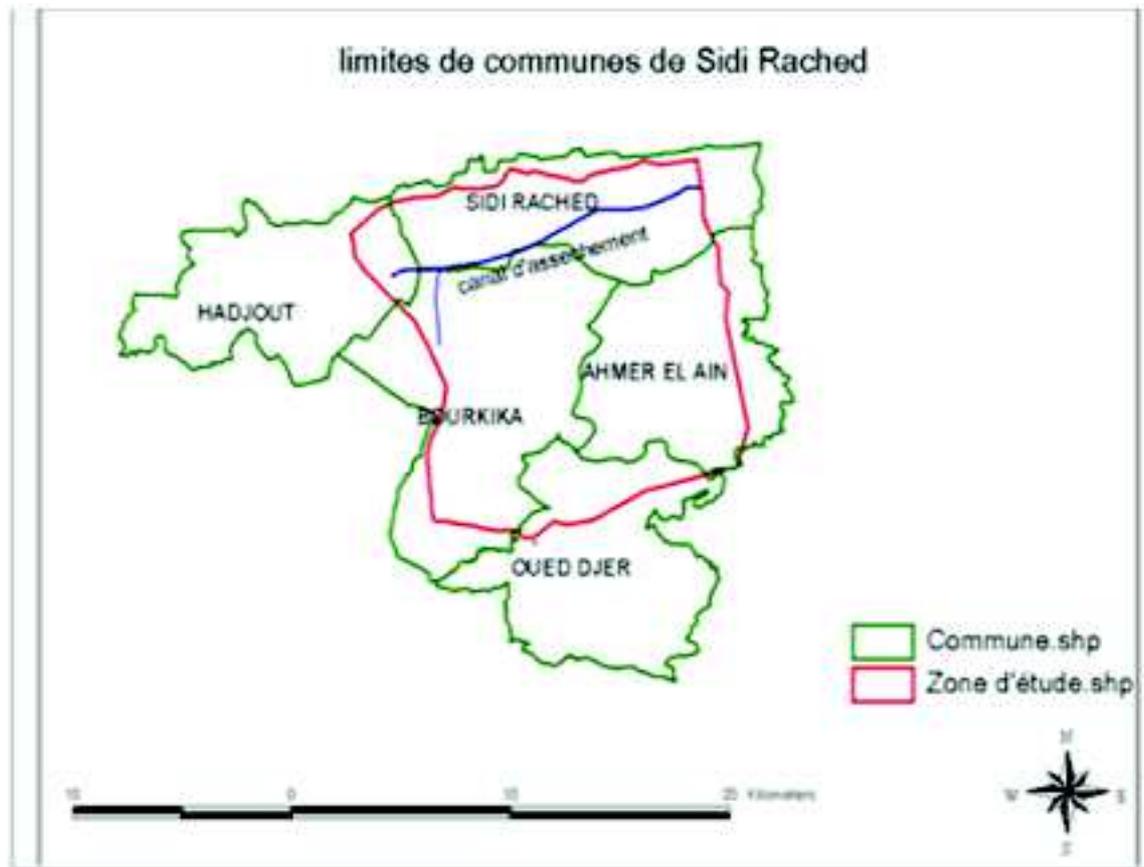


Figure n°13 : Découpage en communes du sous bassin versant de Sidi Rached.

I.3 Caractéristiques géomorphologiques du bassin de Sidi Rached

La courbe hypsométrique (Figure n°14) représente la répartition de la surface du bassin en fonction des altitudes. Elle fournit une vue synthétique de la pente du bassin et donc du relief, et exprime aussi la répartition des superficies comprises entre deux altitudes données.

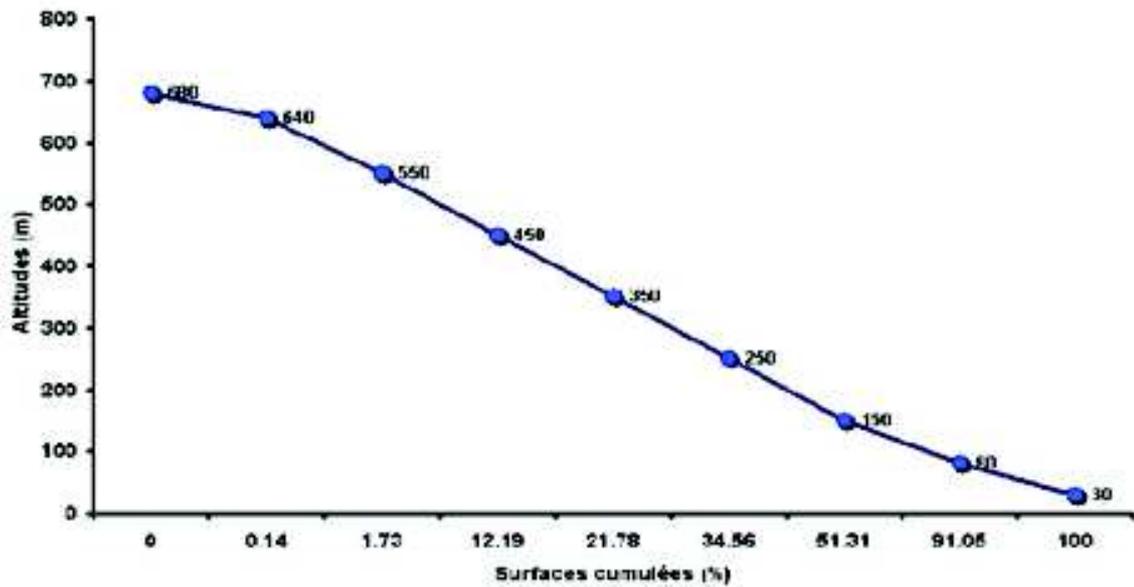


Figure n°14 : Courbe hypsométrique du sous bassin versant

Caractéristiques du sous bassin versant « Sidi Rached »	
Aire (Km ²)	156.4
Périmètre (Km)	52.47
Coefficient de compacité	1.17
Longueur du rectangle équivalent : L (Km)	16.84
Largeur du rectangle équivalent : l (Km)	9.28
Indice de compacité de Gravelius (K _G)	1.17
Altitude maximale (m)	680
Altitude minimale (m)	60
Altitude moyenne (m)	181.1
Altitude médiane (m)	154
Indice de pente globale : I _g (m/Km)	26.42
Dénivelée spécifique : D _s (m)	330.40

Tableau n° 3 : Caractéristiques géomorphologiques du sous bassin

Cette courbe caractérise le relief du bassin versant qui est présenté dans la figure suivante.

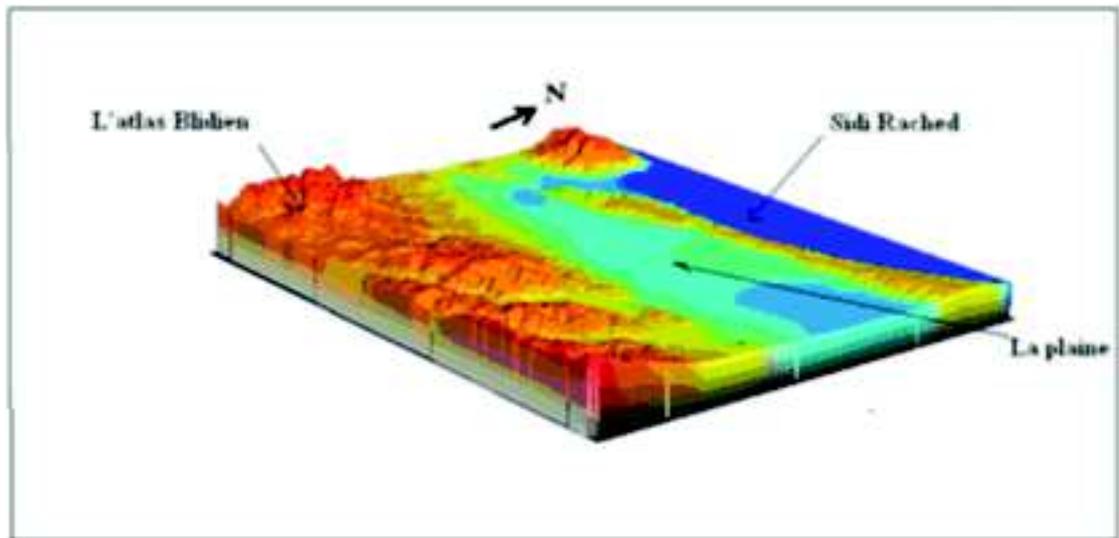


Figure n° 15 : Caractéristiques des reliefs
Relief du sous bassin versant de Sidi Rached

Source : in Hadjout et Chami, 2008

I.4 Caractéristiques hydrographique

Le sous bassin de Sidi Rached présente une hydrographie très modérée. Son système de drainage est constitué d'un certain nombre de rivières et leurs affluents (Figure n°16): à l'Est par l'oued Bouziane, au Sud Est par l'oued Ahmer el Ain et leurs affluents, à l'Ouest par l'oued Ouriane et au Sud Ouest par les oueds Guenidha, Oued Saffah et leurs affluents.

Le système de drainage de Sidi Rached à l'exutoire est constitué par un réseau artificiel, un canal d'assèchement principal et trois canaux secondaires (est, central, ouest) :

- Le canal Est draine les eaux qui proviennent de Attatba et participe à 20% des écoulements.
- Le canal central draine les eaux qui proviennent de la partie Sud Ouest de la zone d'étude et participe à 70% des écoulements.
- Le canal Ouest draine les eaux urbaines de la ville de Sidi Rached et participe à moins de 10% des écoulements.

Ces eaux, drainées par les trois canaux, rejoignent par la suite la mer méditerranée à Tipaza par le biais d'un tunnel de 3 Km de long.

Le réseau hydrographique est caractérisé par :

- Sa densité de drainage : $Dd = 1.01 \text{ Km} / \text{Km}^2$
- La densité des thalwegs élémentaires (coefficient de torrentialité) : $Ct = 0.35$ Le rapport de confluence. $F = 0.35 \text{ km}$.

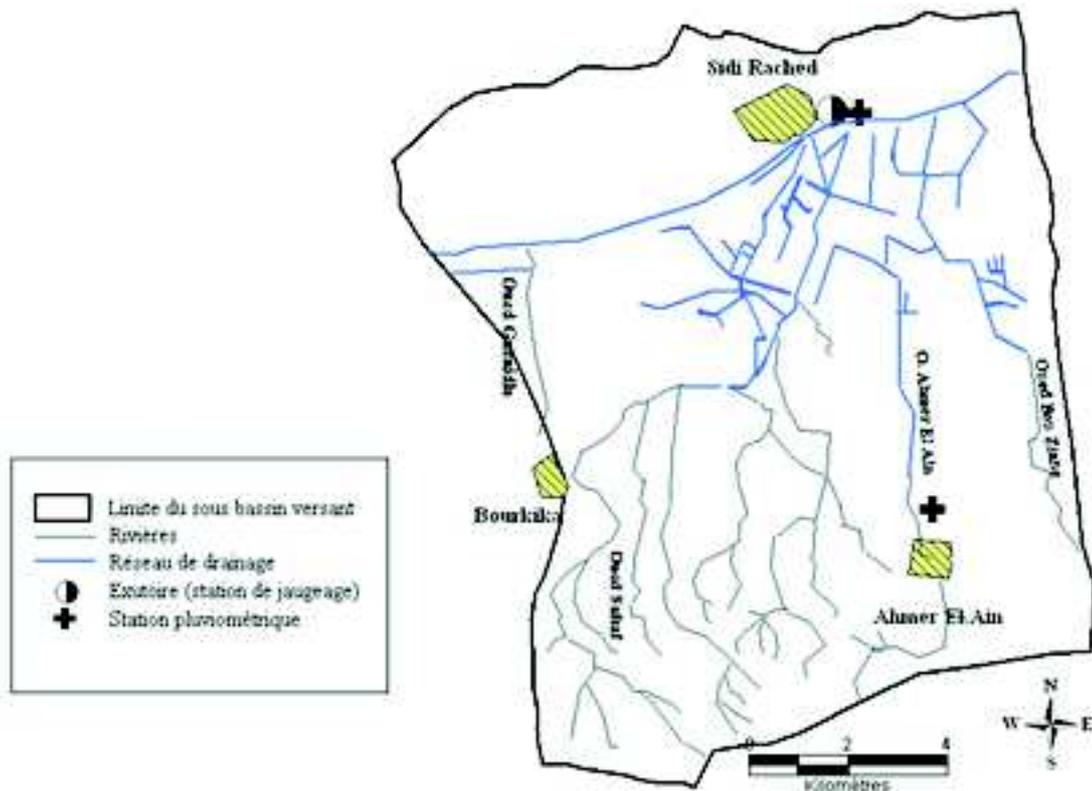


Figure n°16 : réseau hydrographique du sous bassin versant du Sidi Rached

I.5 Caractéristiques climatiques

La plaine de la Mitidja est sous climat méditerranéen sub-humide littoral avec une influence continentale. Au niveau de la pluviométrie et des températures on constate une irrégularité entre les saisons et entre les années, un hiver doux et humides et un été chaud et sec.

I.5.1 La pluviométrie

Les pluies sont irrégulières d'une année à l'autre et pour un même mois. La pluviométrie moyenne annuelle de la région varie de 400 à 1000 mm concentrée sur une période pluvieuse d'octobre à février avec une phase humide s'étalant de novembre à février et une phase sèche s'étalant de juin à août.

Le bassin versant compte deux stations pluviométriques situées au niveau de Sidi Rached et Ahmer El Ain et une station hydrométrique située à l'exutoire du bassin (Sidi Rached) voir figure n°16.

Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
P (mm)	125,2	21,1	71,3	39,8	41,7	4,4	4,8	6,7	53,1	74,4	102,8	115,3

Tableau n° 4 : Pluie mensuelle moyenne enregistrée au niveau de la station d'Ahmer El Ain (2008-2009)

I.5.2 La température

La température de l'air contribue à l'accélération du phénomène d'évaporation par la diminution du niveau d'eau.

La température moyenne annuelle de la région est de 16.8°C, elle varie de 10.8°C pour les mois les plus froids de décembre à février et 24.5°C pour les mois le plus chauds de juin à septembre

I.5.3 L'évaporation et l'évapotranspiration

L'évaporation moyenne annuelle est de l'ordre de 1163.6mm, enregistrée au niveau de la station météorologique de Mouzaïa, la plus proche de Sidi Rached, pour une série d'année allant de 1988 à 2006. Elle atteint son maximum au mois de Juillet (154.8mm) et son minimum (54.1mm) au mois de Février. Sa valeur moyenne mensuelle interannuelle est de 96.96mm.

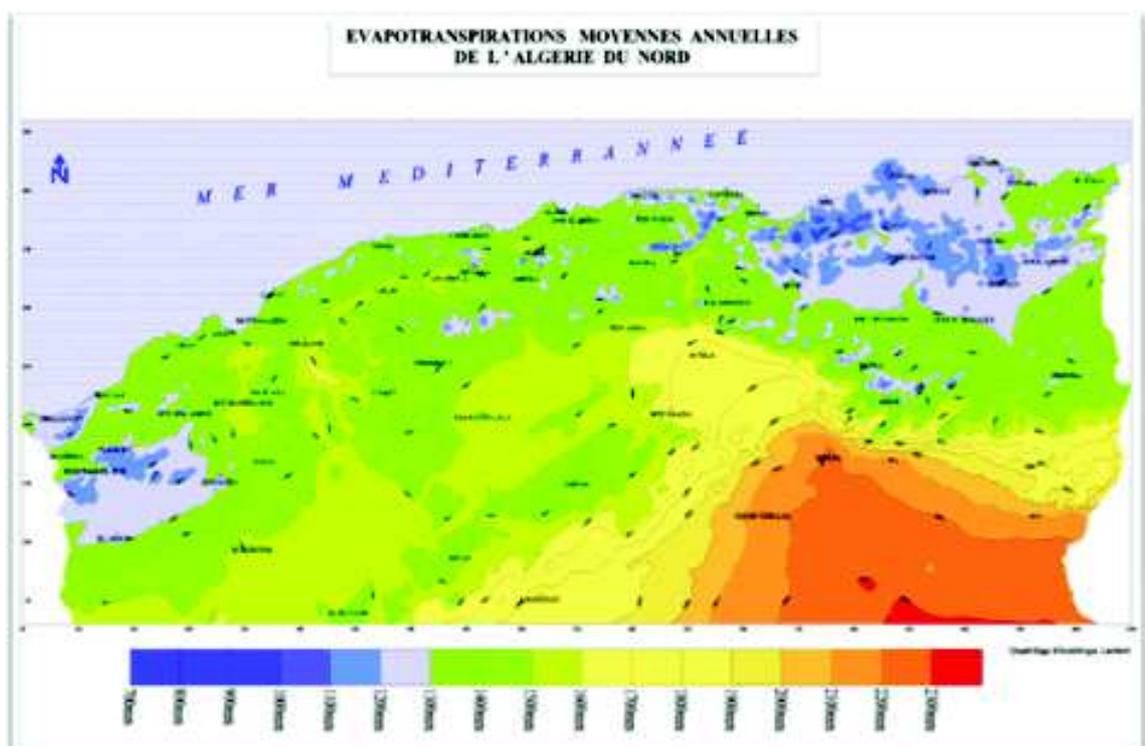


Figure n°17 : Carte des évapotranspirations moyennes annuelles de l'Algérie du nord

Les études cartographiques, établies par l'ANRH, les évapotranspirations sur le Nord de l'Algérie ont montré des variations entre 1200 et 1400 mm. (Figure n°17)

I.5.4 L'humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air est assez élevée, le mois le plus humide est le mois de décembre avec 85,5 %, alors que le mois le moins humide coïncide avec le mois de juillet avec 71,6 %.

La distribution mensuelle de l'humidité relative est consignée dans le tableau suivant.

Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Jun	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Hr, %	83,5	79,8	80,6	76,4	76,1	74,6	71,9	74,8	75,7	79,9	79,3	85,5

Tableau n°5 : Humidité relative de l'air en %(2008-2009)

(Source : ANRH, 2009)

I.5.5 Le vent

Le vent est un agent très important du fait qu'il accélère le phénomène d'érosion ainsi le phénomène de l'évapotranspiration.

Les vitesses moyennes mensuelles des vents sont représentées dans le tableau suivant.

Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
V(m/s)	214,0	223,7	273,6	189,1	193,6	204,3	273,3	290,3	257,0	210,1	269,9	235,6

Tableau n°6 : Vitesse moyenne des vents pendant l'année en (Km/j) (2008-2009)

(Source : ANRH, 2009)

I.6 Caractéristiques pédologiques du bassin versant de Sidi Rached

Selon les résultats de l'étude pédologique (ANRH, 1983) de la région de Sidi Rached, les sols sont formés sur des alluvions de gharbien récent, la texture est argileuse à

argilo-limoneuse et présente localement des phénomènes de salure et d'hydromorphie. L'origine du matériau dans la plus part des cas est lié à la dégradation des oueds de Bourkika et Djer.

La zone d'étude présente cinq classes pédologiques (Mutin, 1977) :

- Les sols hydromorphes.
- Les sols calcimagnésiques.
- Les vertisols.
- Les sesquioxydes de fer.
- Les sols peu évolués.

La figure n°18 résume la représentation et les proportions de la répartition des différentes classes de sol au niveau du sous bassin versant de Sidi Rached.

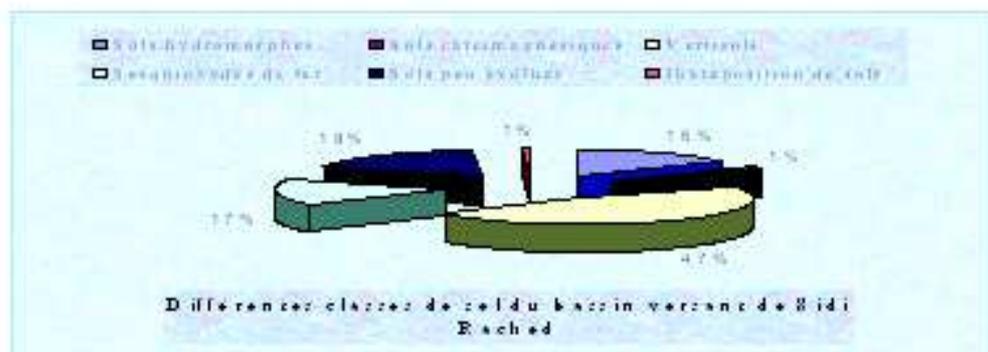
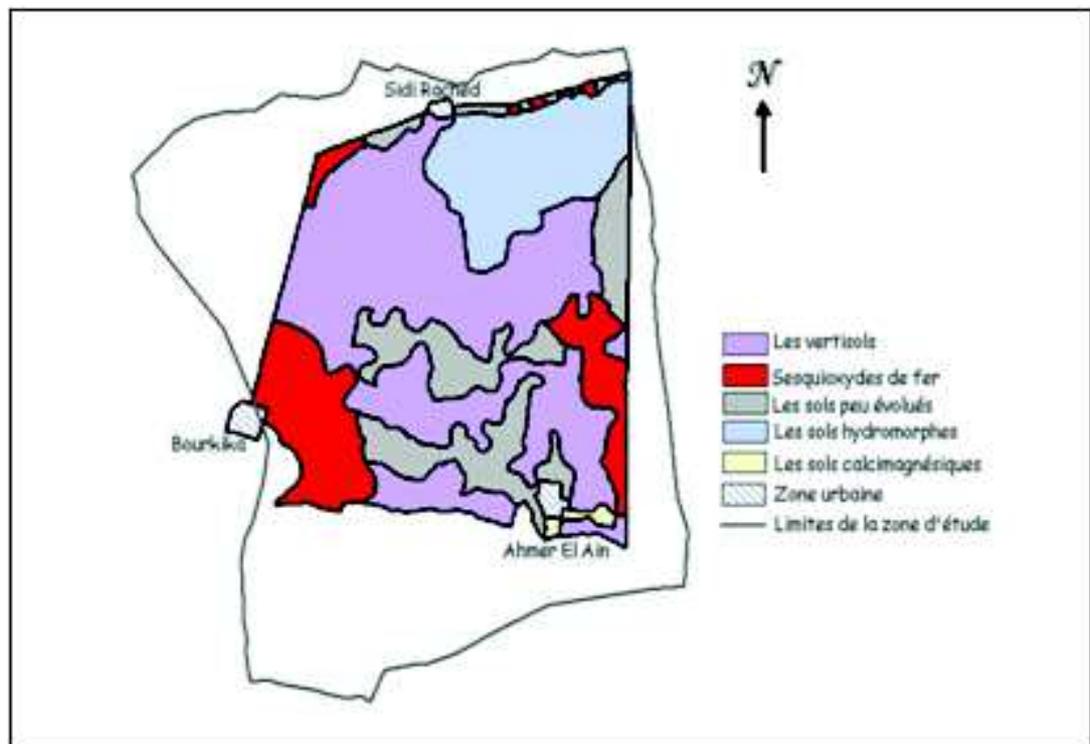


Figure n°18 : Représentation de la répartition et les proportions des différentes classes de sol au niveau du sous bassin versant de Sidi Rached. (Source : Lounis, 2010)

Les sols Hydromorphes On les rencontre à l'Ouest de Sidi Rached, l'ancien lac Halloula, occupe une superficie de 1344 ha. Les sols Hydromorphes se caractérisent par une texture très fine et leur hydromorphie (7 à 12 mmhos/cm), résulte de la présence d'une nappe permanente à faible oscillation.

Les sols calcimagnésiques Cette classe de sols se localise à proximité d'Ahmar El Ain. Elle s'est développée sur des alluvions limono-argileux et occupe une superficie de 78 ha. Le taux de calcaire est de 16 à 20%. Notons par ailleurs que ces sols conviennent à la vigne, aux cultures annuelles et maraîchères.

Les Vertisols Ces sols se localisent là où l'écoulement de l'eau est à la surface du sol, Nord Ouest de Ahmar El Ain, Sud de Sidi Rached. Occupant une superficie de 3941 ha, ils se caractérisent par une forte teneur en argile.

Les sols à Sesquioxides de fer Ils se localisent au Nord de Bourkika, Nord Est de Ahmar El Ain, Couvrent une superficie de 1379 ha et se caractérisent par une texture fine.

Les sols peu évolués Cette classe occupe une superficie de 1485 ha, et elle se localise à la bordure de l'ancien lac Halloula, au centre et au sud de la zone. Ces sols possèdent une texture argilo limoneuse, contiennent plus de 86% d'argile et de loin fin.

I.7 Découpage en zone homogène

L'étude hydrodynamique établie en 1989 dans le cadre d'aménagement hydro agricole de la Mitidja Ouest tranche II par l'ANRH, classe le bassin en quatre zones homogènes comme indiqué par la figure n° 18. Le principal facteur pris en considération dans cette classification est celui du degré d'engorgement des sols en eau, en incluant les autres facteurs pédologiques (texture, structure, profondeur, porosité, perméabilité, etc.)

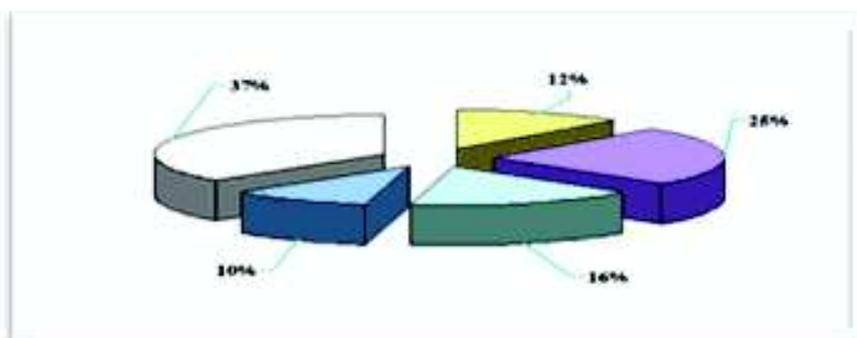
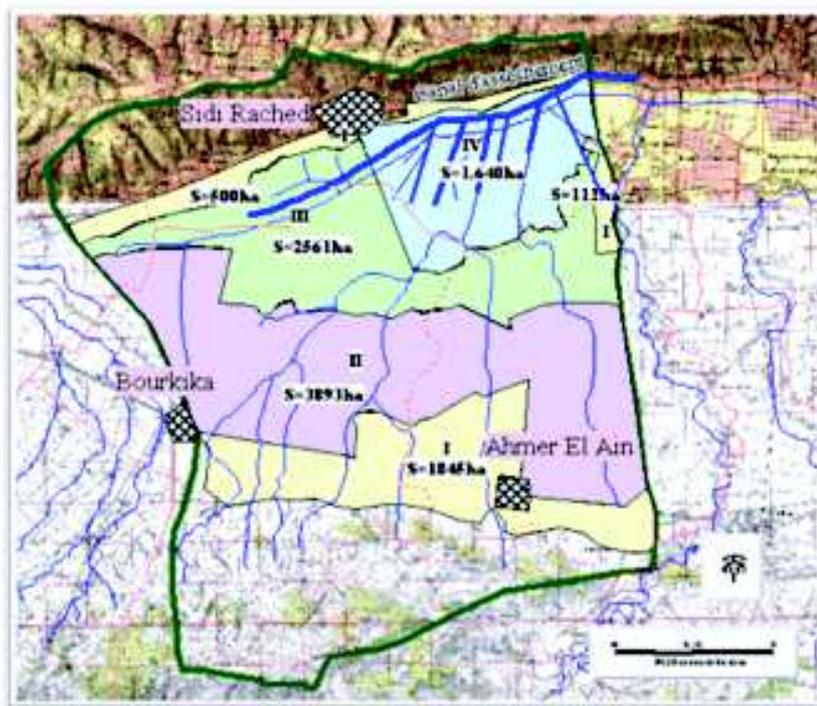


Figure n°19 : Représentation de la répartition des zones homogènes au niveau du sous bassin versant de Sidi Rached.

Les quatre zones du bassin versant de Sidi Rached sont :

a- Zones I

Les sols de cette zone I ne nécessitent pas de travaux de drainage et d'assainissement. Elle occupe une superficie de l'ordre de 2456 ha. Ils présentent une pente pouvant créer un drainage naturel et se localisent au nord et au sud de la zone d'étude. Et ils sont classés dans les sols calcimagnésiques, les sesquioxydes de fer, les vertisols peu profonds et les sols peu évolués.

Certains de ces sols possèdent des caractères secondaires de vertisolisation et d'hydromorphie en profondeur.

Classe de sol		
Calcimagnésique / Texture fine		
Encroûtement calcaire à 0.4 m		
Pente	Plane	
Profondeur (cm)	0 – 16	16 – 40
CE (mmols/cm)	0.98	0.45
Argile %	55	59
Limon fin %	23	20
Limon grossier %	8	8
Sable fin %	7	6
Sable grossier %	3	3
Point de flétrissement PF	23.7	25.5
4.2		
PF 3	29.8	32.8
PF 2.5	35.4	38
Sesquioxyde de fer / Texture fine		
Encroûtement calcaire à 0.8 m		
Pente	Plane	
Profondeur (cm)	0 – 30	30-80
Argile %	40	44
Limon fin %	27	27
Sable fin %	13	13
Sable grossier %	3	3
PF 4.2	13.5	13.7
PF 3	20.5	20.7
PF 2.5	24.6	25.6

Tableau n° 7 : Description morphologique des sols représentatifs de la zone I

b- Zone II

Cette catégorie de sols présente une topographie plane et nécessite un drainage superficiel et un labour profond. Elle couvre une superficie de l'ordre de 3893 ha.

Les sols de cette zone se regroupent dans les classes des vertisols, des sols peu évolués vertiques et des sesquioxydes de fer. Ces sols se caractérisent par une forte teneur en argile, de larges fentes de retrait et des faces de glissement bien marquées.

De plus, ils présentent des caractères secondaires de vertisolisation, d'hydromorphie, d'halomorphie et un niveau de nappe ou un encroûtement calcaire compris entre 50 et 80 cm qui après irrigation peuvent créer une nappe perchée.

Classe de sol			
Sesquicoxyde de fer /Texture fine			
Encroûtement calcaire à 0.7 m			
Pente	Plane		
Profondeur (cm)	0 - 15	15 - 50	50 - 70
CE (mmols/cm)	0.57	0.76	0.5
Argile %	52	52	49
Limon fin %	21	21	23
Limon grossier %	9	9	8
Sable fin%	7	7	8
Sable grossier %	6	6	8
PF 4.2	14.2	16	15.3
PF 3	21.8	22.7	23.1
PF 2.5	26.3	26.9	26.1
Densité réelle	2.2	2.2	2.3
Vertisol /Texture fine			
Nappe à 90 m			
Pente	Plane		
Profondeur (cm)	0-25	25-75	75-90
Argile %	55	60	58
Limon fin %	27	21	23
Limon grossier %	6	7	6
Sable fin%	4	3	5
Sable grossier %	3	4	4
PF 4.2	19.2	21.1	20.3
PF 3	26.5	27.1	26.1
PF 2.5	31.7	34.2	31.1

Tableau n°8 : Description morphologique des sols représentatifs de la zone II

a- Zone III

La grande majorité des sols de cette catégorie se localisent au centre de la zone d'étude, occupant une superficie de l'ordre de 2561 ha. Ces sols possèdent une texture très fine avec un pourcentage d'argile supérieur à 50% au niveau de tous les horizons et présentent une nappe ou un horizon humide dès les premiers cinquante centimètres. Ils se distinguent par leur forte halomorphie et une conductivité hydraulique mesurée variant entre 0.15 et 0.55 m/j.

Les sols de cette zone se regroupent dans les classes des vertisols à caractère noirci, hydromorphe et/ou halomorphe. Ils possèdent une très faible porosité, de larges fentes de retrait, une consistance et une cohésion fortes et une structure prismatique.

La représentation de la description morphologique des sols représentatifs de la troisième zone est dans le tableau n° 9 qui suit.

Classe de sol			
Vertisol /Texture fine			
Nappe à 100 m			
Perte	Plane		
Profondeur (cm)	0 - 20	20 - 50	50 - 100
CE (mmols/cm)	0.96	0.83	4.15
Argile %	54	64	63
Limon fin %	33	25	27
Limon grossier %	4	3	3
Sable fin%	3	7	2
Sable grossier %	1	1	1
PF 4.2	18.9	18.3	20
PF 3	28.2	28.9	30.1
PF 2.5	33.6	34.7	36.1

Tableau n°9 : Description morphologique des sols représentatifs de la zone III

b- Zone VI

Cette zone se localise au niveau du Lac Halloula au sud du village de Sidi Rached et se caractérise par une stagnation des eaux pendant plusieurs mois due à la présence d'une dépression qui capte toute l'eau de ruissellement du versant sud du Sahel. Elle couvre une superficie de l'ordre de 1640 ha,

Les sols de cette catégorie sont hydromorphes et présentent une texture fine à très fine avec un taux d'argile plus limons supérieur à 60% et pouvant atteindre 90%. Ils sont peu poreux, possèdent une structure massive avec des faces de glissement bien marquées et présentent, en été, des fentes de retrait de 5 à 6 cm de large et jusqu'à 150 cm de profondeur.

Ces sols se distinguent par une forte halomorphie qui augmente en profondeur et des zones saturées qui atteignent généralement 130 à 150 cm ;

Classe de sol			
Hydromorphe /Texture fine			
Nappe profonde			
Pente	Plane		
Profondeur (cm)	0 - 30	30 - 50	>50
CE (mmols/cm)	0.75	5.9	13.32
Argile %	76	77	78
Limon fin %	22	20	22
Limon grossier %	1	1	0
Sable fin%	1	1	0
Sable grossier %	0	0	0
PF 4.2	24.3	23.6	21.8
PF 3	35.1	32.4	31
PF 2.5	29.4	38.4	37.3
Densité réelle	2.3	2.3	2.3

Tableau n° 10 : Description morphologique des sols représentatifs de la quatrième zone

I.8 Occupation des sols du bassin versant de Sidi Rached

Selon le rapport de la DSA de Tipaza (2004) les cultures pratiquées au niveau du bassin sont réparties comme suit :

- **Les Céréales** : occupent la plus grande surface cultivée avec 6890.35 ha (57,21% de la surface totale). On les-rencontre dans toute la surface du bassin.
- **Les Cultures maraîchère** : après les céréales c'est les cultures maraîchères (primeur et extra primeur) qui occupent 2414.19 ha (20.04%).
- **Les Arbres fruitiers** : ils sont présents avec 998.88 ha (8.29%). Les agrumes constituent les principales spéculations. Il faut ajouter que depuis le lancement du PNDA dans la zone le secteur agricole a connu une relance notamment les superficies arboricoles (rapport du conseil de la wilaya Tipaza, 2006).
- **La Vigne** : La zone possède des aptitudes pour le développement de la viticulture, actuellement la surface est de 373.53 ha (3.10%).
- **Les Forêts** : on les rencontre dans l'extrême sud (Atlas Bliidiéen), et le nord du bassin, ils occupent 644.37 ha (5.35%).
- Il faut noter la présence des cultures fourragères avec 293.34 ha (3.43%), et les agglomérations qui occupent 427.89 ha (3.55%).

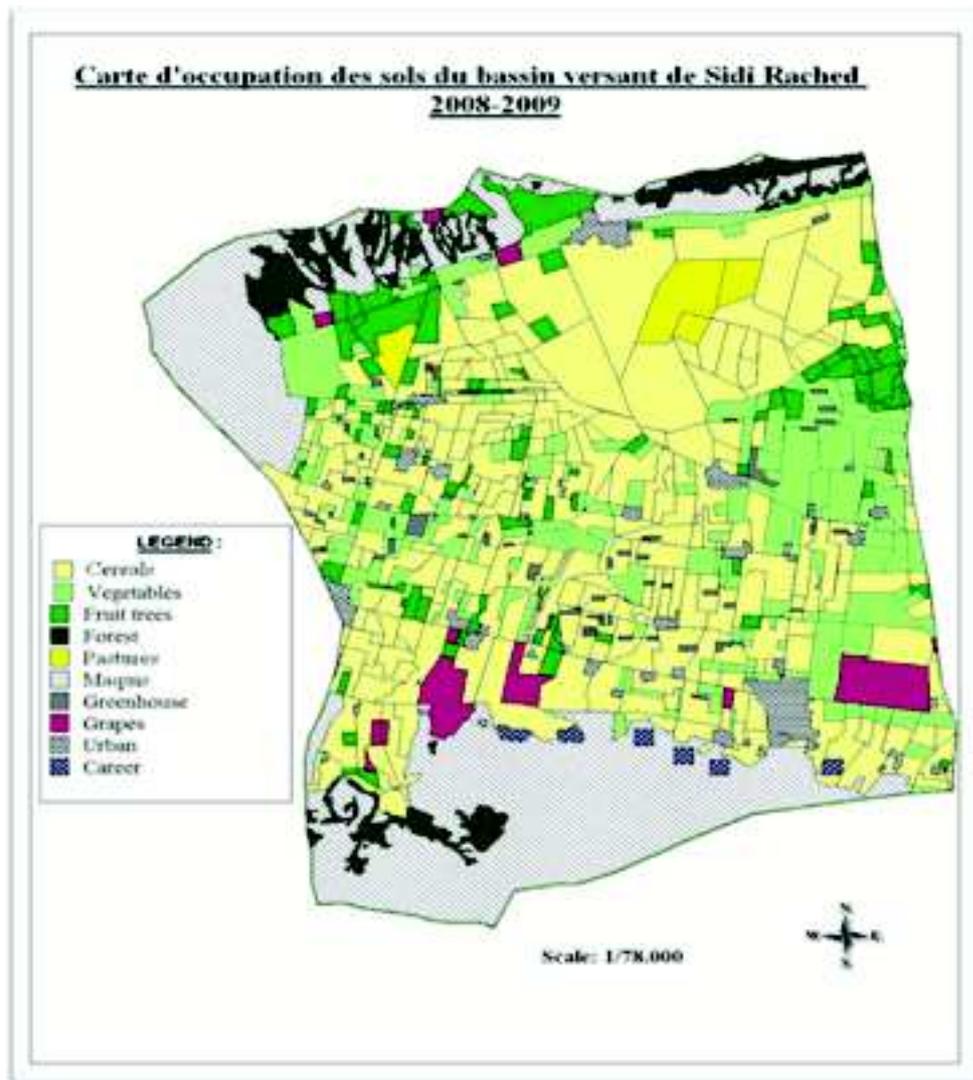


Figure n°20 : Occupation du sol de la zone de Sidi Rached (Source : Hennab, 2009)

La valeur de la production végétale varie suivant les campagnes agricoles, et reste tributaire surtout des conditions du climat. Les sols de la région se caractérisent par leur forte fertilité (DSA Tipaza 2004), ce qui explique la présence de plusieurs types de culture (Figure n°20).

I.9 Conclusion

Notre zone d'étude située au nord du bassin versant de Attatba, s'étend sur une superficie de 156.4 km² et un périmètre de 52.47 km. Elle se trouve au dessus de 60m d'altitude et présente un relief accidenté en amont mais relativement plat sur 75% du bassin versant, les sols qui dominent dans le bassin sont les vertisols.

Chapitre II : Protocole expérimental

II.1 Introduction

Dans cette partie, portera sur les présentations du matériel utilisé en suite de l'outil cartographique et enfin du protocole expérimental avec ces deux principales composantes : les mesures électromagnétiques et les mesures de l'extrait de pâte saturée.

II.2 Présentation du matériel utilisé

II.2.1 Le Géonics EM-38

La description de ce matériel a été détaillée dans le deuxième chapitre. Ce type de matériel nécessite une calibration effectuée au préalable (avant d'effectuer les lectures sur le Géonics EM38) pour chaque type de sol. En annexe 01, le manuel d'utilisation du Géonics EM38 explique toutes les étapes à suivre pour une meilleure estimation de la salinité du sol.



Figure n°21 : Le Géonics EM-38

II.2.2 Matériel de l'échantillonnage du sol

L'échantillonnage du sol a été effectué à l'aide d'une tarière manuelle prélevant 10 cm du sol à différents horizons (30, 60 et 90 cm) afin de prélever la zone racinaire et la zone au dessous.

Les échantillons prélevés pour l'analyse de l'extrait de pâte saturée seront stockés dans des sachets en plastiques puis conduit en laboratoire où ils seront séchés à l'air libre, puis analysés.



Figure n°22 : Tarière manuelle.

II.2.3 Le GPS

Le GPS (de marque eTREX) a été utilisé pour la localisation précise des points échantillonnés pour l'analyse de l'extrait de pâte saturée et des lectures effectuées par le Géonics EM-38.



Figure n°23 : Le GPS « eTREX »

II.3 Présentation de l'outil de cartographie

La cartographie de la salinité des sols du bassin versant de Sidi Rached permet une caractérisation de l'état actuel de la salinité et d'évaluer les terres affectées par le phénomène de salinisation. La carte d'estimation de la salinité présente des valeurs rapprochées de la salure des sols, par la méthode d'interpolation par Krigeage qui offre une précision admise quant à l'estimation des valeurs de la salure, ceci grâce aux modèles d'estimation qui permettent une cartographie automatique de la salinité.

II.3.1 Variowin

Son but est d'effectuer les analyses géostatistiques et les variogrammes modelant en 2D. Il comporte trois modules :

- Le premier crée un dossier de paire -comparaison sur la base d'un fichier contenant XY coordonnée et attributs.
- Le deuxième module calcule des variogrammes surfaciques, des variogrammes directionnels, et a variogramme général. Il est également possible d'estimer le semi-variogramme avec d'autres estimateurs.
- Le dernier module offre un excellent outil pour modeler interactivement le semi-variogramme.

Dans le cas du programme Variowin, la validation du modèle se fait automatiquement par l'indice IGF (Indicative Goodness of Fit), calculé en prenant en compte les paramètres du variogramme. C'est un nombre sans unité, il indique un bon ajustement lorsqu'il est proche de 0.

II.3.2 Surfer version 7.0

Le logiciel SURFER permet cependant de manière assez simple d'analyser et de visualiser des données issues d'un tableau sous forme de cartes en 2D ou de blocs diagramme en 3D et de réaliser des profils.

C'est donc un outil puissant de création de contours et de surfaces, utilisé par les scientifiques et les ingénieurs en topographie, génie civil, géographie, géologie, etc....pour convertir des données brutes en cartes géographiques, plans topographiques, surfaces et contours de tout genre.

II.3.3 Mapinfo professionnel version 7.0

Ce logiciel est un outil de type Système d'Information Géographique qui sert à créer de l'information géographique, à traiter et manipuler cette information et à la cartographier de différentes manières.

II.4 Présentation du protocole expérimental

Le principe de notre travail est basé sur l'estimation de la conductivité électrique du sol à partir des lectures de la conductivité électromagnétique mesurées par l'appareil Géonics EM-38 puis étalonnées par l'extrait de pâte saturée.

Le protocole a été établi durant l'année 2009 dans le but de caractériser la salinité du sol du bassin de Sidi Rached. Ainsi notre travail s'est partagé en deux étapes; une première s'effectuant sur le terrain pour enquêtes et échantillonnages, une deuxième étape qui consiste à l'analyse au laboratoire de l'extrait de pâte saturée des échantillons prélevés.

II.4.1 Enquêtes et mesures électromagnétiques

Cette étape correspond au suivi expérimental s'effectuant sur le bassin versant et qui consiste en un travail de prospection et d'enquêtes qui permettra l'élaboration d'un planning de mesure, l'identification des parcelles de mesures ainsi que la détermination du maillage de l'échantillonnage.

Les enquêtes réalisées auprès des agriculteurs avaient pour objectifs de délimiter la zone irrigable et la zone irriguée ainsi que l'occupation culturelle et les itinéraires culturels.

La mesure de la conductivité électromagnétique doit s'effectuer quand le sol est proche de la capacité au champ soit 2 à 3 jours après irrigation ou précipitations afin de réduire au maximum l'effet de la teneur en eau du sol sur les lectures électromagnétiques CEa. Pour cela, de multiples rencontres avec les agriculteurs, au niveau du bassin versant de Sidi Rached, ont été tenues afin de pouvoir définir les parcelles irriguées. Et à partir de là et en collaboration avec ces agriculteurs, on a pu tracer le planning de mesure qui est fonction des irrigations et/ou des précipitations. Ainsi donc les visites de terrains ont été organisées suivant un calendrier des irrigations.

Le choix du maillage a nécessité une bonne connaissance du terrain et ce, avant l'exécution du plan d'échantillonnage afin d'évaluer son adéquation avec la réalité du terrain. Cette opération est une étape indispensable pour la détermination de l'itinéraire de l'échantillonnage, le maillage a été choisi en fonction du degré de la salinité du sol (études préalables) en déterminant le gradient de salinité au niveau du bassin versant ;

Une étude antérieure pour l'évaluation de la salinité du sol au niveau du bassin de Sidi Rached effectuée par Gherbi (2009), a donné des résultats de salinité inférieurs à 2dS/m ce qui correspond, selon USSL 1954, à des sols non salin. Ces résultats sont en moyenne

de l'ordre de 0.69 dS/m pour l'extrait de pâte saturée (CEes) et de 0.30 dS/m pour la lecture verticale (ie à 2 mètre de profondeur du sol). Le protocole expérimental adopté dans cette étude a été élaboré à l'échelle parcellaire (04 parcelles) situées chacune dans les quatre zones homogènes du bassin.

Cependant une étude plus ancienne (ANRH, 1982), a donné des résultats très variables selon le type de sol de la zone d'étude.

Pour les zones 1 et 2, la conductivité est inférieure à 2dS/m et est de l'ordre de 0.5 dS/m en moyenne pour une profondeur de 1 m du sol. Nous noterons aussi que le profil de la salinité en fonction de la profondeur est descendant.

En ce qui concerne la zone 3, les sols sont considérés comme salin avec une valeur moyenne de l'ordre de 4.15 dS/m pour un mètre de profondeur. Mais dans ce cas la salinité augmente en fonction de la profondeur du sol.

Les sols de la zone 4 (ancien lac Halloula) sont des sols très salin avec une moyenne de 13.32 dS/m pour un mètre de profondeur et se caractérisant par un profil ascendant.

Les zones 3 et 4 se caractérisent non seulement par un profil ascendant mais les valeurs augmentent considérablement et brusquement lorsqu'on atteint une profondeur d'un mètre du sol. Les sols de la zone 3 présentent une salinité de l'ordre de 0.85 puis 4.15 dS/m et elle est de l'ordre de 5.9 puis 13.32 dS/m pour les sols de la zone 4; pour des profondeurs de 50 et 100 cm respectivement.

A partir de ces résultats antérieurs et dans le but de couvrir la totalité de la zone d'étude (zone irrigable), nous avons opté pour un maillage "large" soit deux à trois lectures électromagnétiques par hectare. Ce maillage est aléatoire car il dépend de la disposition des parcelles irriguées.

Les lectures effectuées sont au nombre de 651, ils ont été marqués puis identifiés par leurs coordonnées géographiques (X, Y, Z). Le suivi de ces lectures s'étale du mois de janvier au mois de mars 2009 pour les cultures pluviales (le blé) puis du mois de juin à juillet 2009 pour les parcelles irriguées qui englobent l'arboriculture et le maraîchage de plein champ.

II.4.2 Mesure de l'extrait de pâte saturée

A) Echantillonnage de l'extrait de pâte saturée

On a prélevé 59 échantillons de sol pour l'analyse de l'extrait de pâte saturée. Le nombre d'échantillons pour déterminer la CE de l'extrait de pâte saturée dépend d'une part de la salinité du sol qui est dans notre cas faible, et d'autre part du nombre d'échantillons toléré par le laboratoire d'analyse de l'ANRH.

Les échantillons sont prélevés à l'aide d'une tarière manuelle chaque 30, 60 et 90 cm. La température est mesurée pour les trois profils afin d'établir la corrélation à une température de 25°C se fait à l'aide du tableau de corrélation de la température (Annexe N° 02).

L'humidité étant supposée uniforme pour tous les prélèvements en raison de la période correspondant au troisième jour après irrigation ou une précipitation.

B) Analyse des échantillons de l'extrait de pâte saturée

Au laboratoire, l'évaluation de la quantité de sels contenue dans un échantillon de sol, il faut extraire ces sels (méthode de l'extrait de pâte saturée) et mesurer la CE de cet extrait.

Cette méthode présentée dans la figure n°24, permet l'analyse la terre fine sèche d'un diamètre $d = 2\text{mm}$, afin d'en tirer un extrait. Malaxer avec l'eau distillée et porter l'échantillon jusqu'à sa limite de liquidité. La confection de la pâte nécessite au moins 300g de terre afin d'obtenir une quantité de solution d'extraction suffisante puis laisser une nuit au repos.

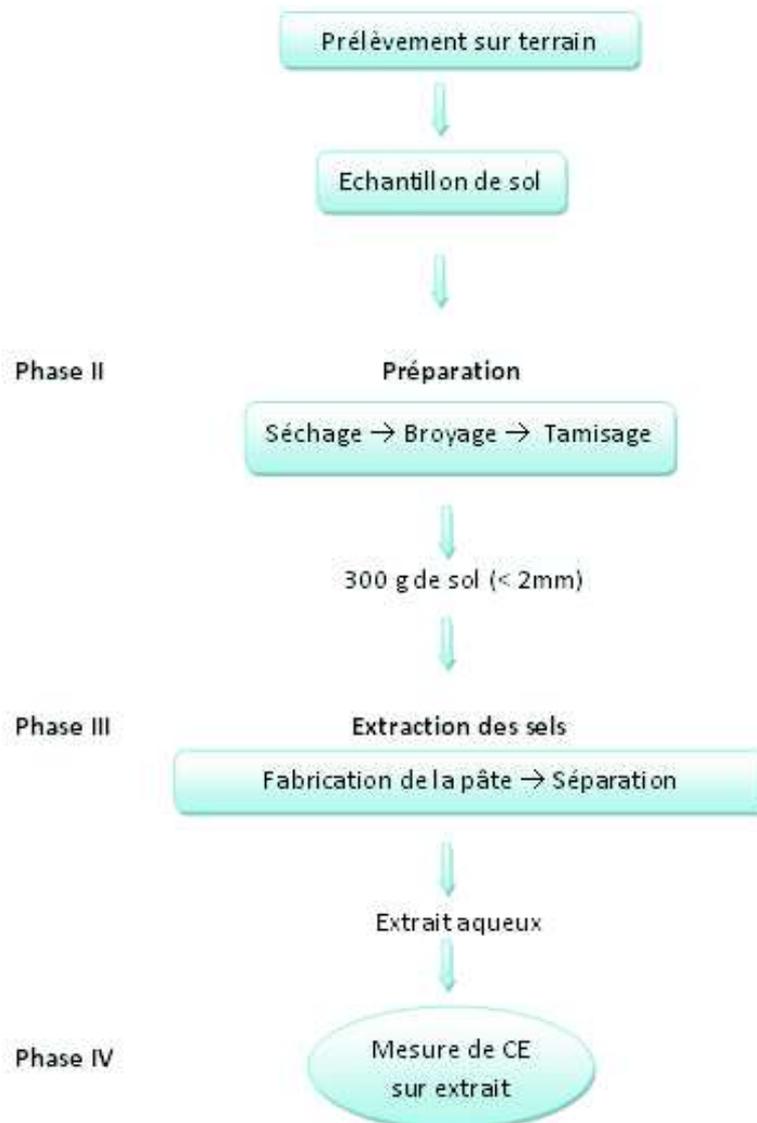


Figure n°24 : Protocole expérimental de la pâte saturée

II.5 Conclusion

Le protocole expérimental précédemment détaillé, se base sur le fait que la salinité de la majorité des sols ne dépassait pas 2 dS/m, selon des études antérieures effectuées au niveau du sous bassin versant.

L'avantage de cette méthodologie se présente dans la répartition des mesures électromagnétiques, non destructives, sur la totalité du sous bassin et avec la minimisation

des prélèvements de l'extrait de pâte saturée qui nécessitent en revanche la destruction du sol et des analyses au laboratoire.

Le seul inconvénient est que ces mesures électromagnétiques doivent être accompagnées par des mesures de la salinité, dans notre cas on s'est contenté d'effectuer les lectures par le Géonics, trois jours après une pluie ou une irrigation.

Résultats et discussion

I. Introduction

Cette partie sera consacrée à la présentation et la description des résultats.

Nous allons présenter en premier lieu les résultats des enquêtes et des investigations effectuées auprès des agriculteurs ainsi que les différentes cartes élaborées à partir de ces résultats.

Nous présenterons par la suite les résultats de l'extrait de pâte saturée, les lectures horizontales et verticales leurs correspondants et enfin les lectures électromagnétiques couvrant tout le bassin versant de Sidi Rached.

La calibration faite entre les valeurs de la conductivité mesurée au laboratoire et les lectures électromagnétiques présentant la conductivité apparente a permis le calcul de la conductivité réelle présente dans la zone d'étude.

II. Résultats d'enquêtes

Nous avons choisi d'élargir notre prospection à la zone irrigable. Cette dernière représente une superficie totale de 9753 ha et se partage en zone irriguée et zone non irriguée. Ces deux dernières changent d'une année à une autre ou d'une rotation à une autre (Lounis, 2010).

- La zone irriguée (3721 ha) englobe l'arboriculture, les cultures sous serres et le maraîchage de plein champ et couvre les zones 1, 2 et 3.
- La zone non irriguée (6032 ha) est souvent cultivée en céréales d'hiver ou laisser en jachères. Elle représente les 2/3 de la surface irrigable.

La couverture végétale joue un rôle important dans le comportement hydrologique du bassin de la Mitidja. Elle a une influence mécanique sur le ruissellement superficiel, en plus du fait qu'elle conditionne l'évapotranspiration et donc le bilan hydrologique du bassin.

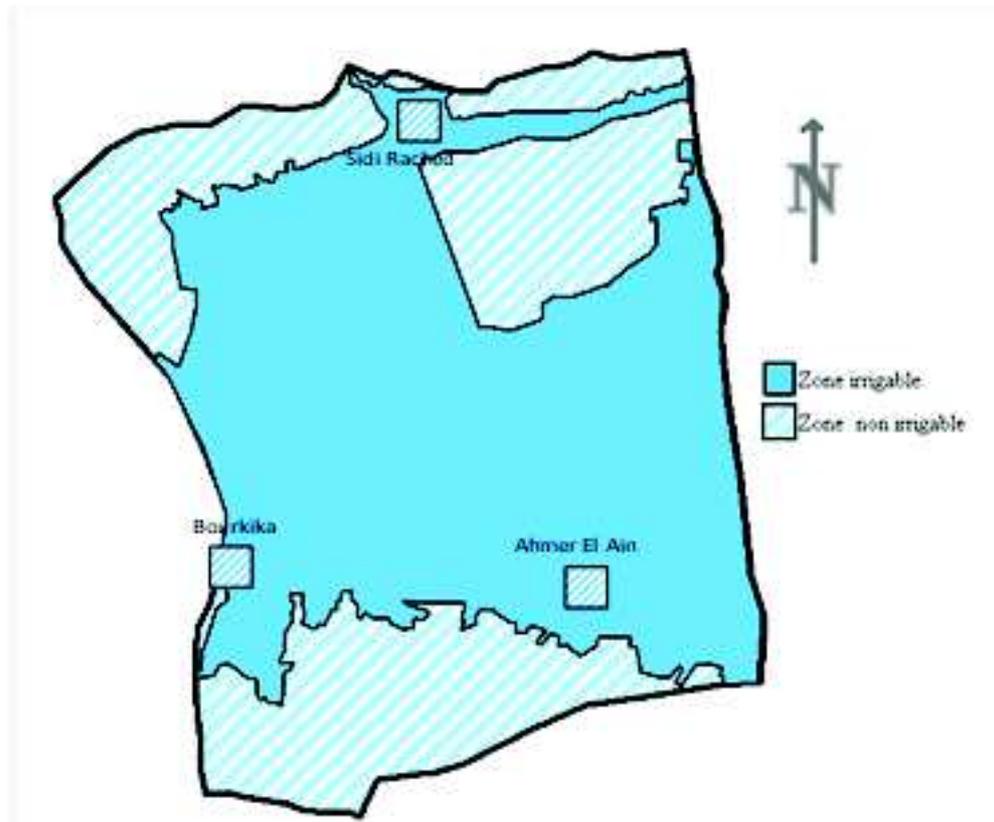


Figure n° 25 : Représentation de la répartition en zones irrigables et non irrigables au niveau du sous bassin versant de Sidi Rached. (Lounis, 2010)

La plaine de la Mitidja est une des régions agricoles à potentiel élevé de l'Algérie, en raison de son climat et de la fertilité des ses sols. D'après Henneb (2009), les activités agricoles les plus répandues sont :

- **Les céréales** : occupent la plus grande surface cultivée avec 6890.35 ha (57,21% de la surface totale). On les-rencontre dans toute la surface du bassin.
- **Les cultures maraîchères** : après les céréales c'est les cultures maraîchères (pomme de terre et poivron sous serre) qui occupent 2414.19 ha (20.04%).
- **Les Arbres fruitiers** : ils sont présents avec 998.88 ha (8.29%). Les agrumes constituent les principales spéculations.
- **La vigne** : La zone possède des aptitudes pour le développement de la viticulture, actuellement la surface est de 373.53 ha (3.10%)
- **Les forêts** : on les rencontre dans l'extrême sud (Atlas Blidiéen) et le nord du bassin, ils occupent 644.37 ha (5.35%).

Il faut noter la présence des cultures fourragères avec 293.34 ha (3.43%), et les agglomérations qui occupent 427.89 ha (3.55%).

Les systèmes de rotation le plus répandues sont : Céréale / Céréale et Maraichage/ Céréale/ Maraichage. (Henneb, 2009)

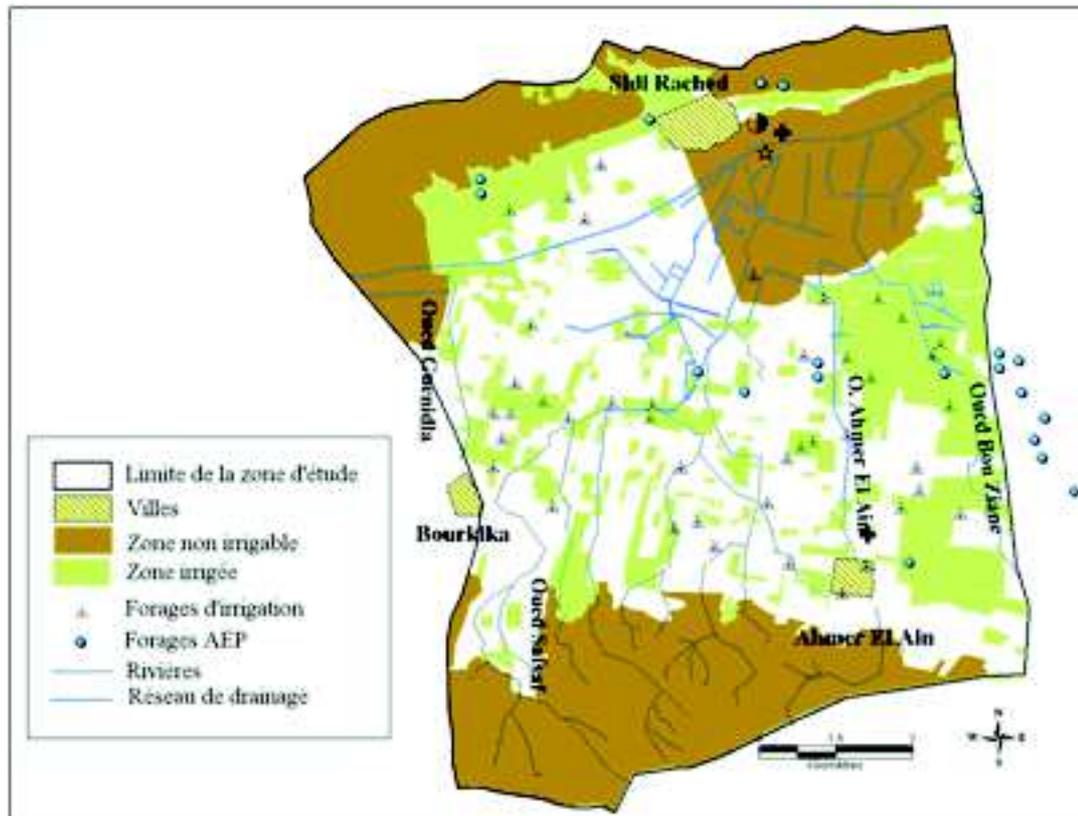


Figure n° 26 : Occupation du sol au niveau du sous bassin versant de Sidi Rached. (Lounis et al., 2010)

Plusieurs enquêtes ont été menées auprès des agriculteurs dans le but de déterminer les rotations effectuées dans la zone d'étude.

Les résultats obtenus montrent que la culture dominante est la céréaliculture. On retrouve aussi les cultures maraîchères de plein champs et celles sous serres.

Le schéma suivant montre la répartition des cultures sur la surface irrigable ainsi que les rotations effectuées en deux années successives.

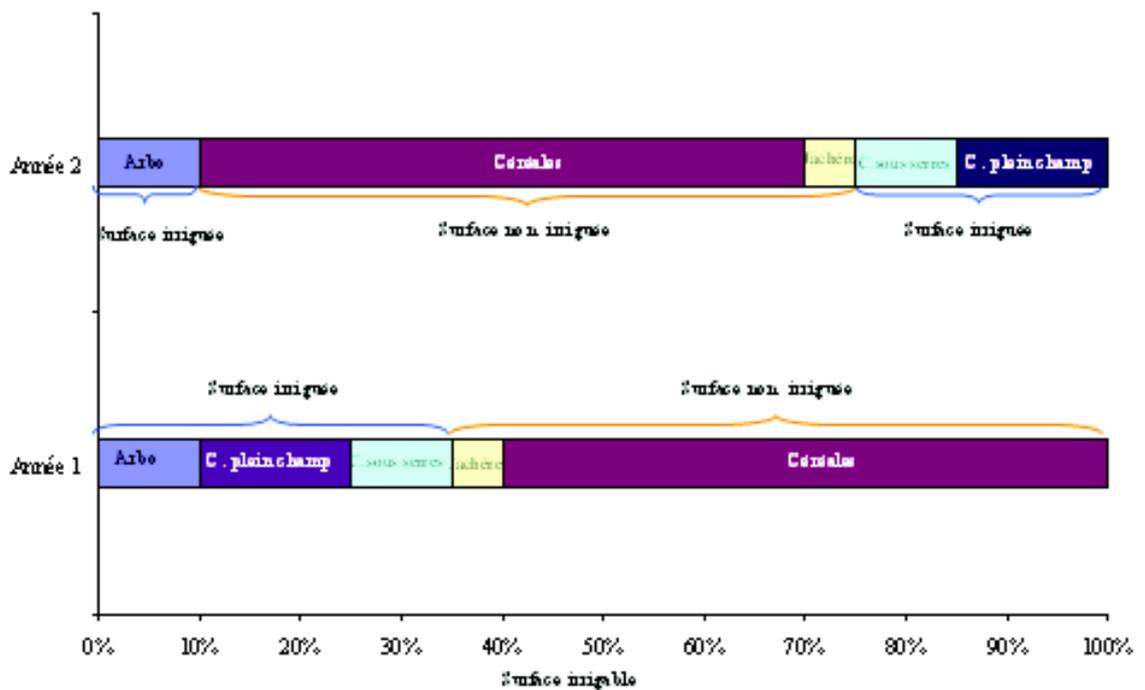


Figure n° 27 : Représentation schématique de l'occupation des sols et répartition des surfaces irriguées et non irriguées selon les cultures.

La figure suivante explique les types de rotations choisies par les agriculteurs pour la même année. Le résultat des enquêtes menées montre que pour chaque exploitation, on peut trouver trois types de cultures :

- Les céréales : la culture dominante étant le blé dur.
- Le maraîchage : avec comme principale cultures la pomme de terre.
- Les cultures sous serres : la culture la plus répandue est le poivron.

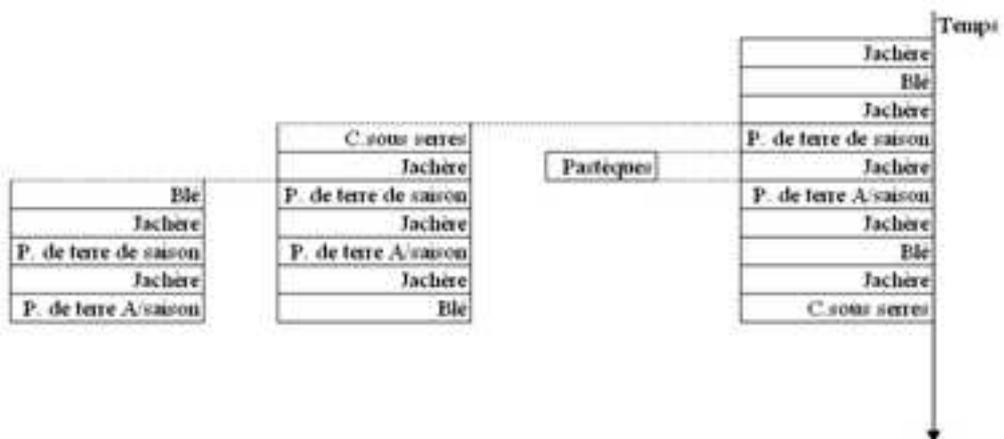


Figure n° 28 : Représentation schématique des types de rotations appliqués sur le bassin versant de Sidi Rached.

Pour l'arboriculture, nous notons que la culture la plus répandue au niveau de la zone 1 est la vigne, les agrumes pour la zone 2 et le pommier pour la zone 3.

Le tableau suivant montre les surfaces de l'arboriculture par zone homogène. La surface totale de l'arboriculture au niveau de la surface irriguée est de l'ordre de 1372.4 ha.

	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Surfaces (ha)	852.7	183.66	281.5

Tableau n°11 : Surfaces de l'arboriculture au niveau de chaque zone homogène.

III. Mesure de l'extrait de pâte saturée

La mesure de l'extrait de pâte saturée permettra par la suite la calibration de l'appareil Géonics EM38. Pour se faire, plusieurs échantillons du sol ont été prélevés pour l'analyse au laboratoire. Les résultats obtenus vont être confrontés aux lectures EMI qui leurs correspond. Ainsi, on obtiendra une équation de calibration qui permettra, selon le coefficient R^2 , le calcul de la conductivité électrique réelle CEes.

Les prélèvements effectués sur terrain sont analysés au laboratoire de l'ANRH et donne les résultats suivants :

- Les points de prélèvements pour la mesure de l'extrait de pâte saturée sont au nombre de 59; prélevés pour trois horizons (0-30cm, 30-60cm et 60-90cm). Ainsi, nous avons obtenus un nombre de 171 échantillons (Annexe 04).

Les résultats obtenus au laboratoire ont permis le calcul de la moyenne de chaque profil. Le tableau n°12 présente les statistiques des résultats de l'extrait de pâte saturée et des lectures horizontales et verticales correspondantes.

	CEes	CEa hor	CEa ver
N	59	59	59
Maximum	1,37	1,07	1,19
Minimum	0,20	0,01	0,01
Moyenne	0,59	0,33	0,31
Ecart Type	0,26	0,26	0,29
C.V. (%)	43,79	80,69	93,69
Médiane	0,58	0,23	0,24

Tableau n°12 : Statistiques des résultats de l'extrait de pâte saturée (dS/m).

Les résultats révèlent que la conductivité électrique des l'extraits de pâte saturée sur l'ensemble des horizons a un niveau faible < 2 dS/m (USSSL 1954).

Les moyennes calculées pour les lectures horizontales et verticales sont respectivement de l'ordre de 0.33 et 0.31 dS/m. Les lectures horizontales se déterminent par une valeur maximale de l'ordre de 1.07 dS/m et une valeur minimale de l'ordre de 0.01dS/m. L'écart type calculé, d'une valeur de 0.26 et un coefficient de variation de 80.96%.

Concernant les lectures verticales, les valeurs maximales et minimales sont respectivement de l'ordre de 1.19 et 0.01 dS/m. De même que les lectures horizontales, les lectures verticales présentent une faible dispersion et on note un écart type de 0.29 et un coefficient de variation de l'ordre de 93.69%.

Ces coefficients indiquent une variabilité spatiale élevée d'où la nécessité d'une étude spatiale afin de faire ressortir les différentes zones représentant les différentes salinités du sol.

IV. Mesures électromagnétiques

Les lectures électromagnétiques effectuées sur terrain sont au nombre de 651, la mesure a été effectuée pour le mode horizontale à 1m de profondeur et pour le mode verticale à 2m de profondeur (Annexe 05).

Les moyennes calculées pour les lectures horizontales et verticales sont respectivement de l'ordre de 0.25 et 0.35 dS/m. Les lectures horizontales se déterminent par une valeur maximale de l'ordre de 1.10 dS/m et une valeur minimale de l'ordre de 0.0 dS/m. L'écart type calculé, d'une valeur de 0.26 et le coefficient de variation (101.55%) explique une forte dispersion de la variable.

Concernant les lectures verticales, les valeurs maximales et minimales sont respectivement de l'ordre de 1.23 et 0.0 dS/m. De même que les lectures horizontales, les lectures verticales présentent une forte dispersion et on note un écart type de 0.26 et un coefficient de variation de l'ordre de 75.98% (Tableau n°13).

	CEa-h	CEa-v
N	651	651
Maximum (dS m ⁻¹ at 25°C)	1,10	1,23
Minimum (dS m ⁻¹ at 25°C)	0,00	0,00
Moyenne (dS m ⁻¹ at 25°C)	0,25	0,35
Ecart Type	0,26	0,26
C.V. (%)	101,55	75,98
Médiane (dS m ⁻¹ at 25°C)	0,16	0,28

Tableau n°13 : Statistiques des résultats des lectures du Géonics EM38

La comparaison entre lectures horizontales et lectures verticales permet une première interprétation des résultats et donc caractériser l'évolution de la salinité pour un profil d'un mètre de profondeur. Lorsque la conductivité apparente en lecture horizontale est supérieure à celle en lecture verticale (**CEa-h > CEa-v** c. à d. **CEa-h/CEa-v >1.1**), on dit que le profil salin est ascendant avec la profondeur et caractérisant une salinité de surface.

Dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque la conductivité apparente en lecture horizontale est inférieure à celle en lecture verticale (**CEa-h < CEa-v** c. à d. **CEa-h /CEa-v <0.9**), on parle d'un profil salin descendant se caractérisant par l'accumulation des sels en profondeur.

Dans le cas où les deux lectures sont équivalentes (**CEa-h = CEa-v** c. à d. **0.9 < CEa-h /CEa-v <1.1**) on parlera d'un profil salin uniforme.

Le tableau n°14 montre que 71% des mesures électromagnétiques effectuées appartiennent à un profil salin uniforme, 25 % appartiennent à un profil ascendant et seulement 4% appartiennent à un profil descendant.

CEa profils (% du total)	
Descendant (CEa-h/CEa-v < 0.9)	4%
Uniforme (0.9 < CEa-h/CEa-v < 1.1)	71%
Ascendant (CEa-h/CEa-v > 1.1)	25%

Tableau n°14 : Profils de la conductivité électromagnétique apparente Cea

La corrélation entre les lectures électromagnétiques horizontales (ECa-h) et celles verticales (ECa-v) permet de confirmer l'uniformité du profil salin. La figure n°28 montre que tous les points de mesures sont distribués autour de l'axe de la première bissectrice. Ceci

signifie que pour une tranche de sol de 1 mètre le gradient de salinité est uniforme pour la plupart des points de mesures.

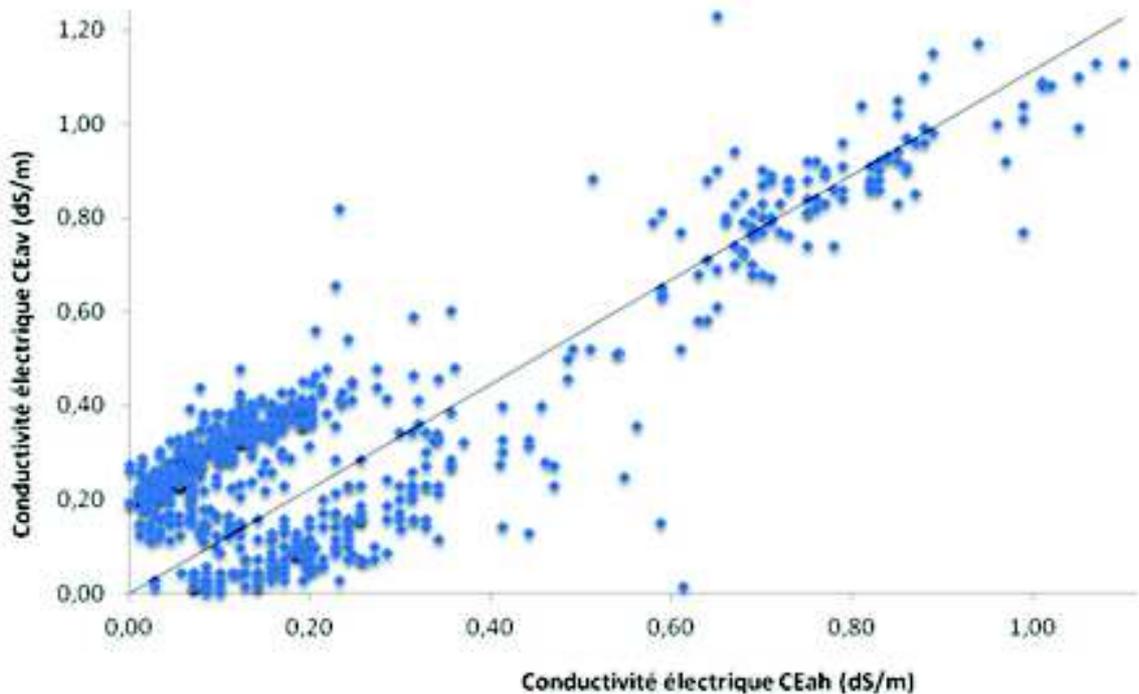


Figure n°29 : Test d'homogénéité du profil salin. Corrélation entre les mesures en mode vertical CEav et celles en mode horizontal CEah.

V. Calibration du Géonics EM38

Les valeurs de CEah mesurées par Géonics EM38 doivent être calibrées par rapport aux conductivités de l'extrait de pâte saturée de sol afin de les convertir en mesure classique de CEE moyennant une équation linéaire simple, ci-dessous, et enfin leur donner une signification pédologique.

Le nombre des échantillons de sol nécessaires pour déterminer cette équation dépend de l'échelle du travail et de la variabilité de la CEa et qui dans notre cas sont au nombre de 59, pour une même profondeur de 1m.

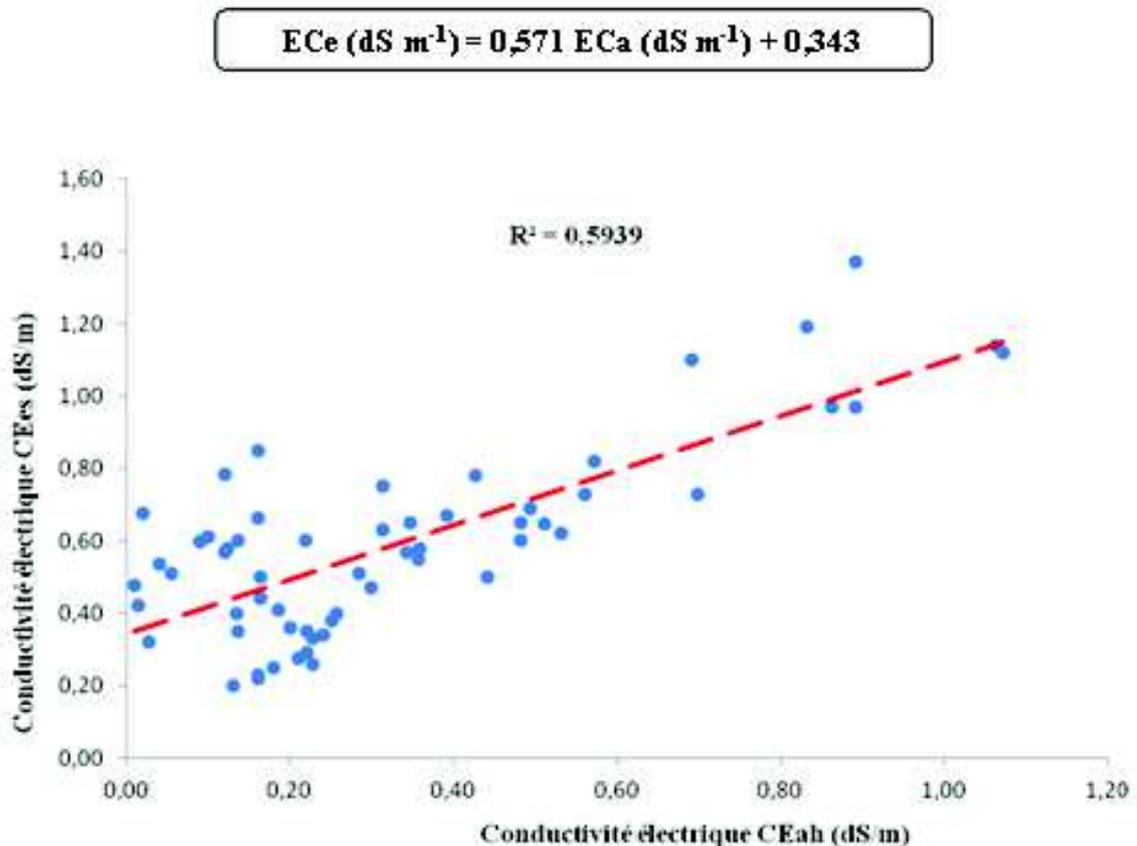


Figure n°30 : Relation entre les conductivités électromagnétiques apparentes horizontales CEah et les conductivités de l'extrait de pâte saturée Cees

L'équation de calibration ci-dessus indique que les mesures de la conductivité électrique du Géonics EM 38 sont représentatives de la conductivité électrique réelle du sol avec un coefficient de corrélation R^2 égale à 0,59 traduisant la bonne corrélation. Dans le graphe de la figure n° 29, la plupart des points sont concentrés au niveau de l'intervalle de salinité de 0,20 à 0,80 pour la CEes et de 0,01 à 0,60 pour les lectures CEah avec des maximums de 1,37 et 1,07 respectivement.

VI. Etude variographique

Une composante initiale de krigeage est l'application d'un variogramme. Ce dernier est un espace méthode statistique de mesure de la rapidité avec laquelle les changements de données spatiales sur une distance.

La détermination du variogramme de surface de la salinité des sols du bassin de Sidi Rached a permis de déceler un phénomène d'anisotropie (Figure n°31).

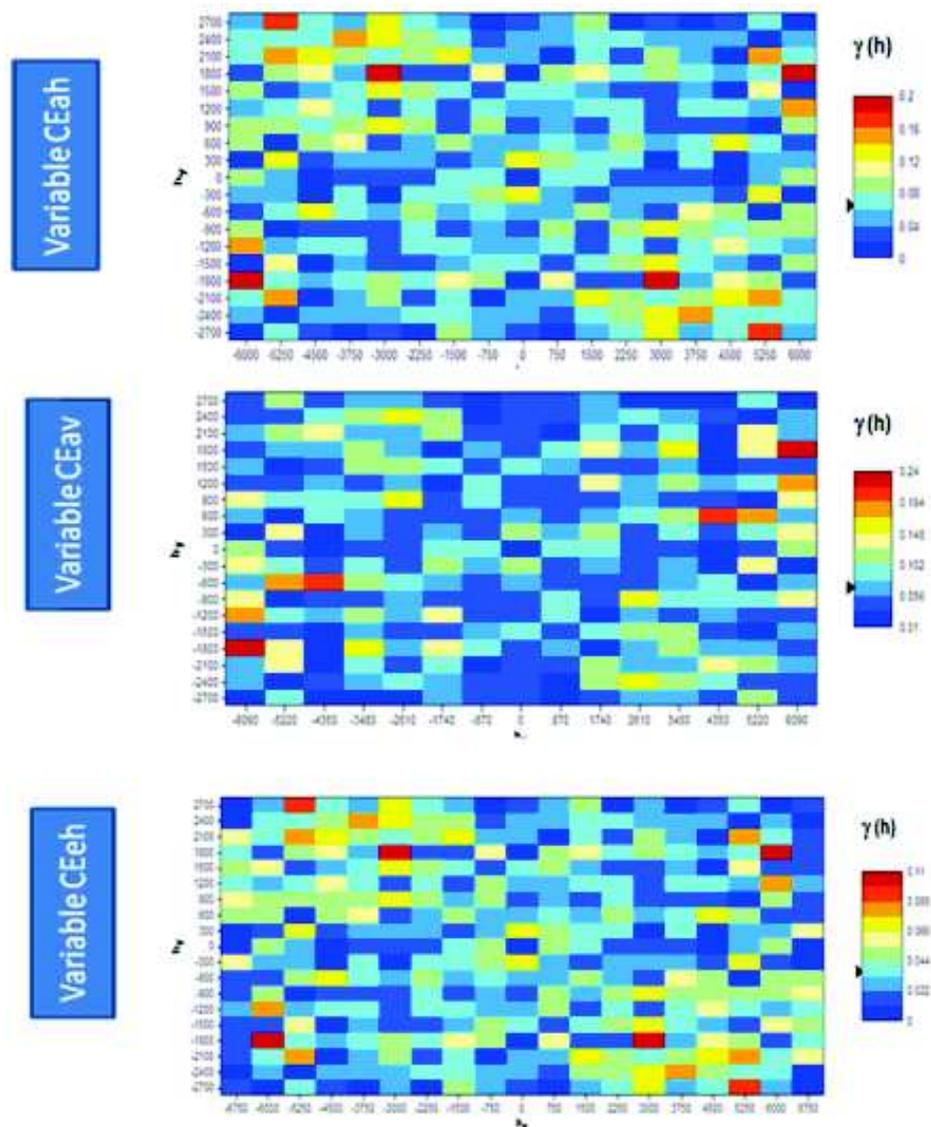


Figure n°31 : Variogramme de surface de la Ceeh

Après avoir établi les variogrammes de surface pour chaque grandeur, il faut rechercher le modèle structural théorique du variogramme qui lui convient le mieux.

Cette modélisation, définit comme l'ajustement du variogramme à des modèles théoriques, est établit en testant différents modèles. Le choix de ce dernier est déterminé par la valeur de l'IGF, indicateur du meilleur ajustement, dont la valeur doit être la plus faible.

Le logiciel VARIOWIN propose quatre modèles (sphérique, exponentiel, gaussien et linéaire) et procède à l'ajustement orienté grâce à l'IGF.

La figure n° 32, représente les variogrammes ajustés pour les conductivités électriques apparentes horizontales et verticales (CEah et CEav) et la conductivité électrique réelle (CEeh).

Les variogrammes expérimentaux des conductivités électrique CEah, CEav et CEeh sont ajustés à:

- Modèle sphérique pour la CEah présentant un palier de 0.0665 et une portée égale à 427 avec un effet pépité nul indiquant l'absence de micro-régionalité et une anisotropie d'un angle de 0°. D'après ce variogramme omnidirectionnel, cette structure spatiale (CEah) montre une auto-corrélation régionale entre différents couples des conductivités électrique.
- Modèle exponentiel pour la CEav présentant un palier de 0,07 et une portée égale à 671 avec un effet pépité non nul de 0.0007 expliquant et présentant une anisotropie d'un angle de 0°
- Modèle exponentiel pour la CEeh présentant un effet de pépité nul indiquant l'absence de microrégionalité, un palier de 0,04 , une portée égale à 732 et une anisotropie d'un angle de 0°.

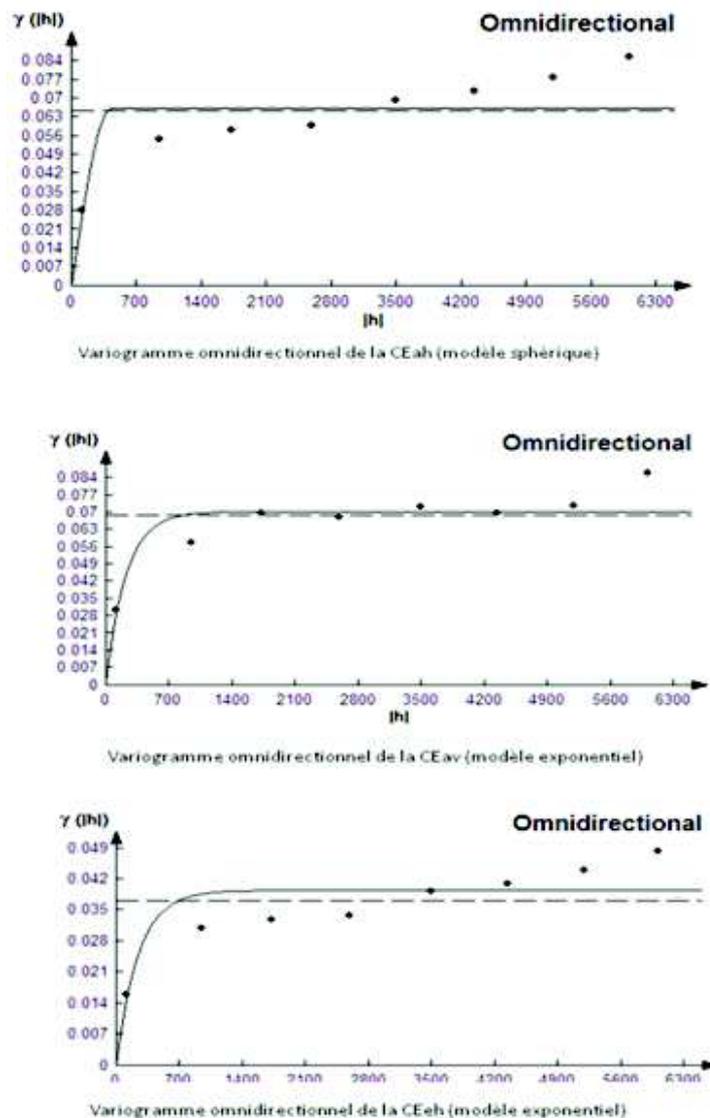


Figure n°32 : Variogrammes omnidirectionnels respectivement de la CEah, CEav et CEeh.

Les caractéristiques des variogrammes (Effet pépité, palier, portée et l'IGF) sont représentées dans le tableau n°15.

CE	Modèle	Effet pépite (Nugget)	Palier (Sill)	Portée (Rang)	IGF
CEah	Sphérique	0	0.0665	427	$3.6195 e^{-4}$
CEav	Exponentiel	0.0007	0.07	671	$3.0156 e^{-4}$
CEeh	Exponentiel	0	0.04	732	$1.8966 e^{-4}$

Tableau n°15 : Paramètres d'ajustement des variogrammes expérimentaux.

Toutes les caractéristiques de ces variogrammes ont été introduites comme données d'entrées dans le krigeage pour l'estimation et par la suite pour l'établissement des cartes.

VII. Description des cartes des conductivités électriques CEah, CEav et CEeh

Après l'établissement de la structure spatiale par le biais du variogramme, on procède à l'interprétation par le krigeage et les cartes d'isovaleurs peuvent être tracées par le logiciel SURFER 7.0.

La cartographie constitue le moyen le plus adapté pour une bonne présentation 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).

a) La carte de la conductivité électrique à une profondeur de 1m, CEah, présente une hétérogénéité de la salinité du sol (Figure n°33).

Les sols non salins d'une CEah < 2 dS/m (USSL 1954) couvrent la totalité de la superficie du bassin versant. La moyenne est de 0,72 dS/m et on note un maximum de 0,94 et un minimum 0,49 ;

Les sols présentant des conductivités électriques comprises entre 0,55 et 0,94 dS/m sont concernés par la prévention contre les risques de la salinité et se situent exactement au Sud du bassin plus exactement dans les zones 1 et 2.

Cette répartition correspond à la présence d'une activité agricole intensive car, pendant la décennie noire qu'à connu l'Algérie, et au niveau du sous bassin versant, l'agriculture n'était pas le premier souci des habitants ; par contre ces dernières années cette région a connu une vague de location des terrains et de ce fait, une intensification agricole afin de rattraper ce retard, engendrant ainsi une mauvaise utilisation des engrais, des pesticides et notamment de l'eau d'irrigation.

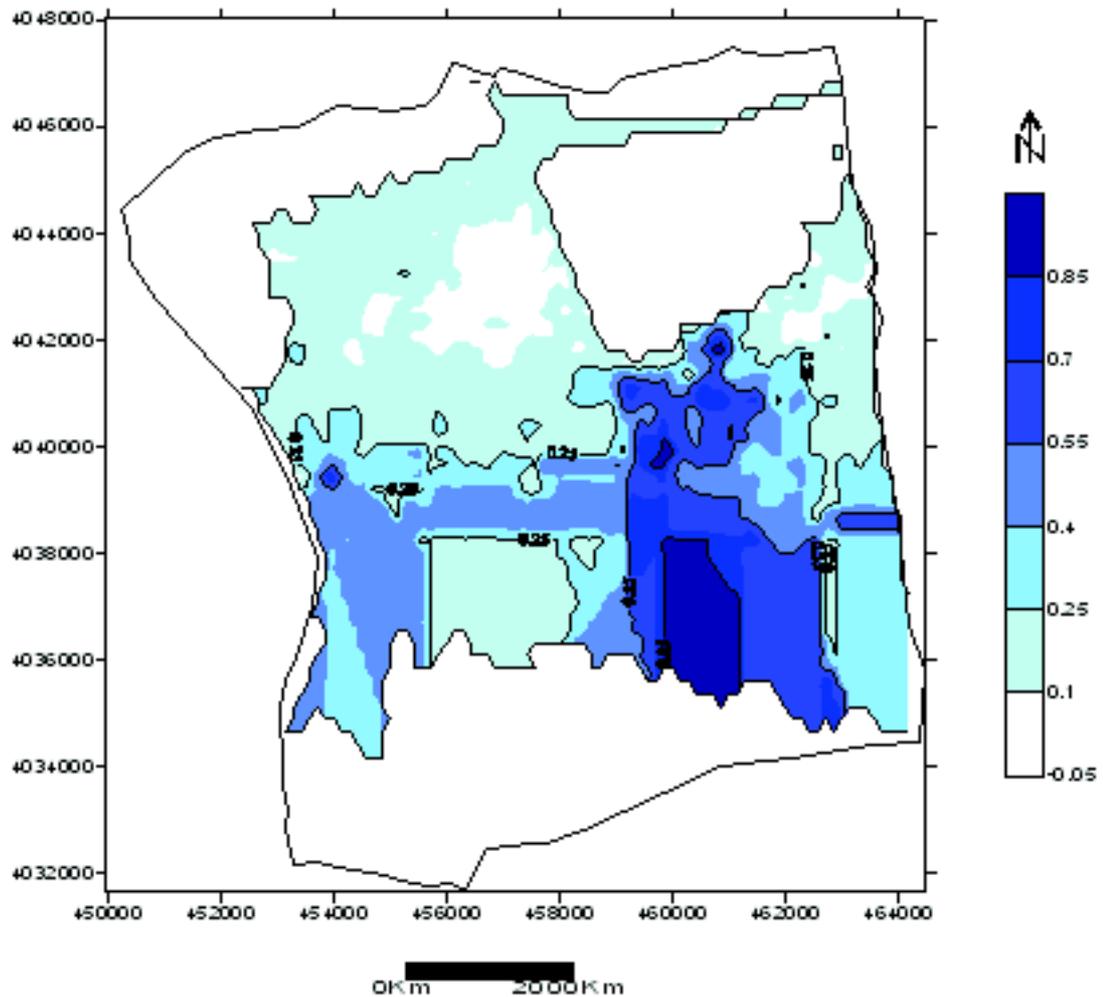


Figure n°33 : Carte krigée de la CEah à une profondeur de 1m au niveau du sous bassin versant de Sidi Rached (2008-2009).

b) La carte de la conductivité électrique à une profondeur de 2m, CEav, présentée ci-dessus, montre une hétérogénéité de la salinité du sol avec des conductivités électrique inférieure à la norme de l'USSL 1954 de 2dS/m (Figure n°34).

Le niveau de la salinité de cette carte est compris en un maximum de 1.23 dS/m et un minimum de 0, couvrant la totalité du bassin, la valeur moyenne est de 0.35 dS/m, indiquant que les sols sont non salins à 2m de profondeur.

Les maximums se situent au Sud-Est du bassin plus exactement dans la zone 1, Ce qui correspond parfaitement à la zone dont il existe l'intensification agricoles et un réseau de drainage naturel peu développé.

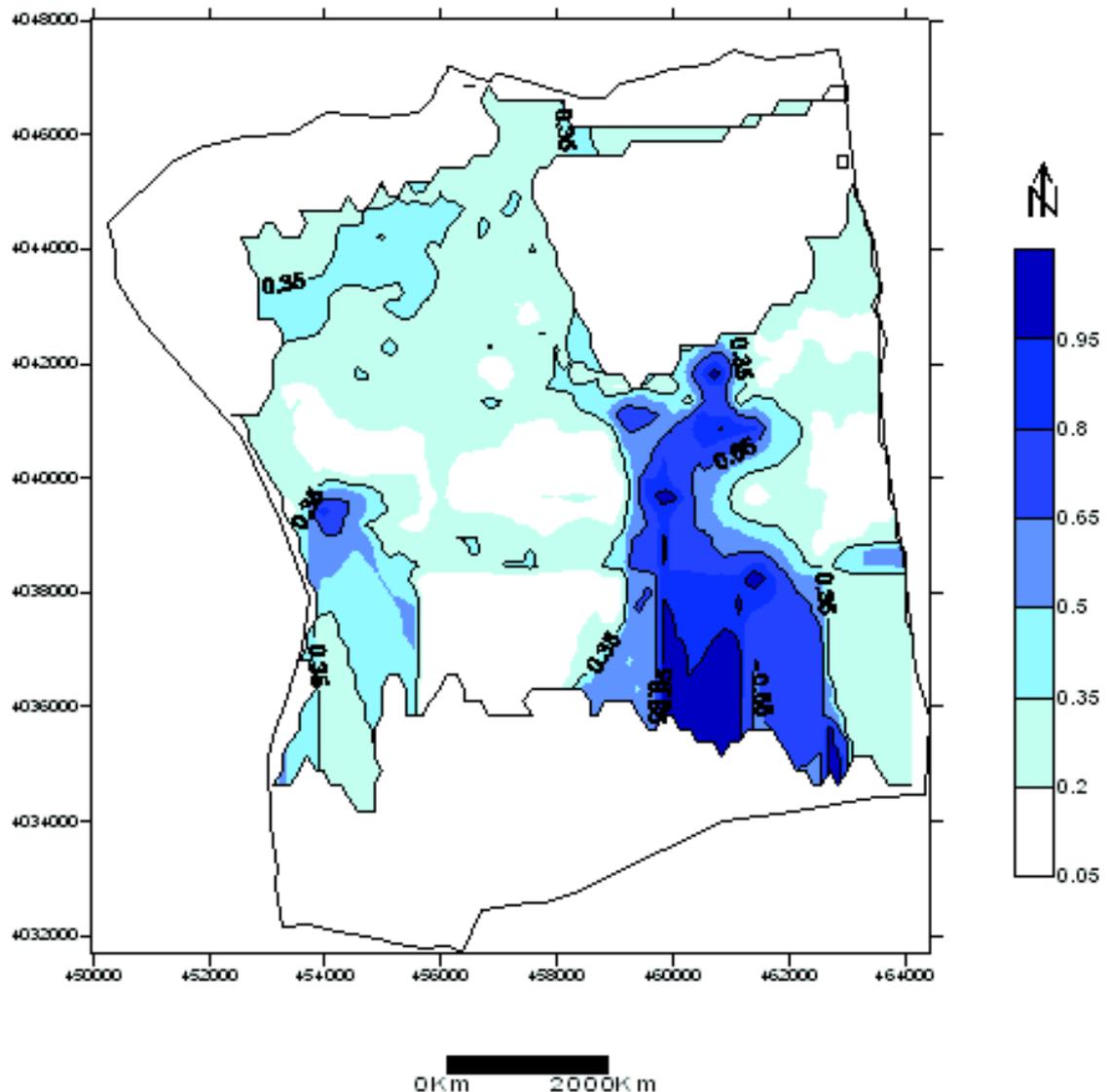


Figure n° 34 : Carte krigée de la CEav à une profondeur de 2m au niveau du sous bassin versant de Sidi Rached (2008-2009).

c) Cette carte indique une distribution divergeant entre une valeur maximale de 1.17 dS/m des conductivités électriques dans les zones 1 et 2 et un minimum 0.34 dS/m présenté dans la zone 3 du bassin versant. On note une moyenne de 0.53 dS/m, couvrant le reste du bassin (Figure n°35).

Les conductivités électriques réelles CEeh montrent aussi que la salinité au niveau du bassin n'atteint pas le seuil de 2dS/m (USSL 1954).

Les maximums compris entre 0.85 et 1 dS/m, se concentre dans la partie avale de la zone 1, et dans une petite partie de la zone 2.

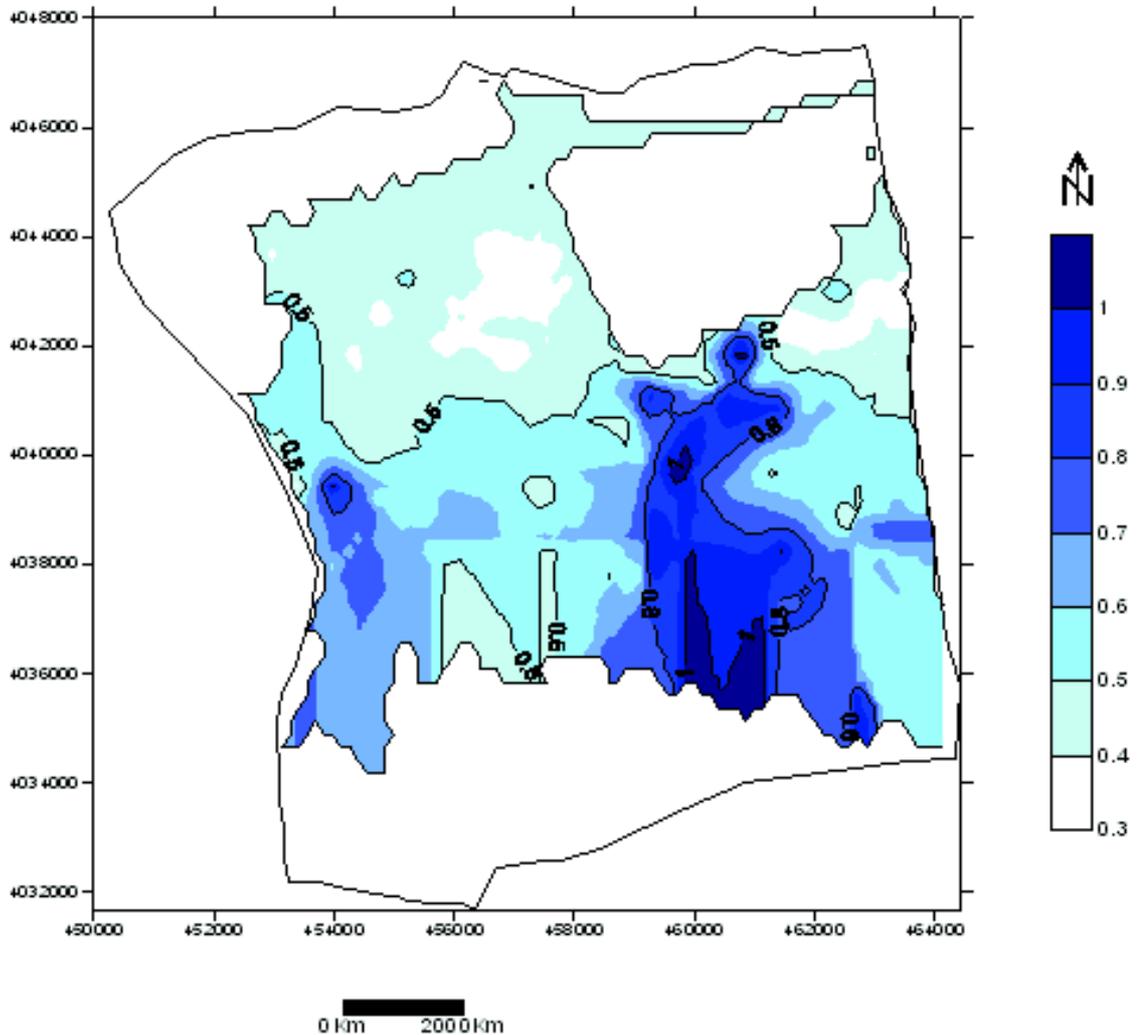


Figure n°35 : Carte krigée de la CEeh à 1m de profondeur au niveau du sous bassin versant de Sidi Rached (2008-2009).

VIII. Discussion

Le but de notre étude est d'établir le suivi et le contrôle des terres irrigables par rapport aux risques de salinité secondaire due à la mauvaise gestion des irrigations, des fertilisations et du drainage notamment dans la région du bassin versant de Sidi Rached, où se présente une importante intensification agricole. Et de fournir à la fin une cartographie de la salinité du sol dans ce bassin versant.

Les résultats de la mesure de la conductivité, par échantillonnage de l'extrait de pâte saturée, présentent une valeur moyenne de l'ordre de 0.59 dS/m et une valeur maximale de l'ordre de 1.37dS/m.

Les résultats de la conductivité apparente sont en moyenne de l'ordre de 0.25dS/m à un (01) mètre de profondeur et de l'ordre de 0.35 dS/m à deux (02) mètre de profondeur.

Les résultats obtenus présentent tous des coefficients de variation (CV%) très élevés, ceci s'explique par la dispersion spatiale des points échantillonnés pour les analyses au laboratoire (CE réelle) et le maillage des lectures électromagnétiques (CE apparente).

La calibration de l'appareil a permis le calcul de la conductivité réelle à partir des lectures électromagnétiques (CE apparente). Les résultats obtenus montrent que la valeur moyenne de la conductivité réelle (CEeh) à un (01) mètre de profondeur est de l'ordre de 0.53 dS/m, avec une valeur maximale de 0.34dS/m et une valeur minimale de 0.19dS/m.

	CEeh (dS/m)
Maximum	1,17
Minimum	0,34
Moyenne	0,53
Ecart type	0,19
CV (%)	36,12
Médiane	0,46

Tableau n° 16 : Statistiques des résultats de la conductivité réelle.

Ces résultats ainsi obtenus présentent des valeurs inférieures à 2 dS/m. ceci correspond, selon USSL 1954, à des sols non salins. Les normes d'interprétation, présentées dans les tableaux n° 17, montrent que les sols du sous bassin versant de Sidi Rached sont non salins.

CE dS/m	Niveau de salinité
0 – 2	Non salin
2 – 4	Légèrement salin
4 – 8	Salin
8 – 16	Très salin
> 16	Extrêmement salin

Tableaux n°17 : Classement de la salinité suivant les de la conductivité électrique

Source : USSL 1954

CE $\mu\text{mols/cm}$	Classe de salinité
< 1000	Non salin
1 000 – 2 000	Peu salin
2 000 – 4 000	Salin
4 000 – 8 000	Très salin

Source : Durand, 1983 « mémento de l'agronome »

Cependant, la cartographie établie montre des zones de concentration où la salinité est plus élevée. Ces points correspondent souvent à des parcelles de cultures maraîchères ou d'arboriculture. Et donc, il y a matière à confirmer que les sols du bassin de Sidi Rached ne présentent pas des risques de salinisation secondaire localement dans des zones bien limitées.

La salinisation secondaire est induite par l'activité humaine, liée aux pratiques agricoles et en particulier à l'irrigation et au drainage. Une telle salinisation peut aboutir à la stérilisation du sol, ce qui se répercute négativement sur les rendements des cultures. Dans le sol, la présence d'éléments minéraux en solution est la source des éléments nutritifs pour les plantes. Cependant, l'augmentation excessive de la quantité de sels dissous apportés par les eaux affecte le développement des plantes et cause une baisse des récoltes.

Selon Djili et al. (2003), l'irrigation par des eaux diversement minéralisées provoque la salinisation des sols, et en particulier dans les horizons de surface. En effet, les résultats montrent que la salinité dans les horizons de surface, peut augmenter considérablement, après plusieurs campagnes d'irrigation. L'intensité de la salinisation est en rapport avec la qualité des eaux d'irrigation utilisées.

Deux campagnes d'analyse des eaux d'irrigation dans notre zone d'étude ont été effectuées durant les années 2008 et 2009. Les valeurs obtenues à partir des échantillons analysés ont été reportées sur le diagramme de Riverside où on remarque que l'ensemble des points d'eau se situe dans quatre classes : C3S1 et C3S2 pour des eaux admissibles pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité et la salinité doit être contrôlée (75% de l'échantillon total). Les classes C4S1 et C4S2 représentent des eaux médiocres fortement minéralisées, susceptibles de convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés (Lounis et al., 2010).

Ghrab et al. (2003), citent que l'utilisation des eaux de faible qualité pour l'irrigation pose le problème d'une dégradation des sols par une accumulation de sels. Cette accumulation est plus-ou-moins importante en fonction de la qualité de l'eau apportée, de la nature du sol, du climat et du mode d'irrigation.

Selon Hartani et al. (2008), la salinité de l'eau d'irrigation est un facteur avéré de la salinisation notamment pendant les années climatiques où le lessivage par les pluies ne peut se produire.

Or, les niveaux de salinité du sol observés sont majoritairement inférieurs à 2 dS/m et l'irrigation dans ces conditions est couramment pratiquée en Algérie ; ils ne constituent pas un danger pour peu qu'un lessivage naturel par les pluies se produise ou qu'une dose soit apportée occasionnellement (Durand, 1983)

Effectivement, les facteurs qui influencent la formation des sols salés sont nombreux. D'après les estimations de l'institut des ressources mondiales, plus de la moitié des terres irriguées de notre planète sont devenues salées et/ou sodique en raison de l'utilisation de méthodes d'irrigation inadaptées, de mauvais systèmes de drainage et de l'utilisation des eaux salées (Dehaan et Taylor, 2002; Van Der Lelij et Poolman, 1989). (Cité dans Bannari et al. 2008)

Selon Lounis 2010, le réseau de drainage de la région de Sidi Rached est défectueux voire non fonctionnel. Les 2/3 du volume d'eau effectivement infiltré vont percoler au-delà de la zone racinaire, le reste va être drainé vers l'exutoire.

Les résultats trouvés de la recharge de la nappe dans le bassin versant, ont montré que le volume qui rejoint la nappe par les pluies chaque année est important, et qui dépasse 30% de la pluie totale tombée. (Saheb, 2009)

L'application d'un modèle hydrosalin CIRFLE par Lounis (2010) pour le calcul du bilan hydrosalin, a montré que le coefficient de concentration de l'évapotranspiration ETCF est très important et contribue à l'augmentation des concentrations de sels en profondeur (qui passe d'une valeur simulée de l'ordre de 1731.5 mg/l à une valeur de 3375.8 mg/l). D'où l'influence du climat sur les volumes d'eau apportés pour l'irrigation. Selon Lahlou et al. (2000), la présence des sels solubles dans l'eau d'irrigation et le pouvoir évaporateur de l'air dans les zones irriguées conduisent souvent à la salinisation des sols irrigués et particulièrement en zones arides et semi-arides.

Dans notre cas, les agriculteurs tendent à régler ce problème par l'élévation de la fréquence et la dose d'irrigation pour lutter contre le déficit hydrique (système gravitaire pour l'arboriculture et aspersion pour la pomme de terre).

Mais en contre partie, plus le volume d'eau est important plus on apporte de sels. En effet, le modèle CIRFLE a permis de calculer une masse de l'ordre de 10500.6 t de sels qui vont percoler en profondeur et un apport de masse de sels de 5654.2 t qui va être lessivé vers l'exutoire.

Le modèle hydrosalin estime, suivant la texture du sol, que la masse de sels déposée dans le sol est plus importante que celle prélevée. En effet, l'irrigation diminue les flux d'eau sans diminuer les flux de sels, elle génère donc un processus de concentration des sels.

Ces phénomènes peuvent être expliqués par la nature hydrogéologique, en effet, nous sommes en présence d'une nappe présentant une bonne transmissivité de $2 \cdot 10^{-2}$ à $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ qui permet de supposer un lessivage important (Saheb, 2009).

Selon ce même modèle (CIRFLE), la majorité des sels apportés sont lessivés au-delà de la zone racinaire. Cette information nous conduit d'une part à se demander s'il faut toujours continuer à irriguer avec cette eau qui est admissible à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels et d'une autre part à se demander si les sols sont bien drainés ou ayant une bonne perméabilité et toujours contrôler la salinité (Lounis, 2010) et éviter les eaux médiocres fortement minéralisées qui paradoxalement sont utilisées pour l'irrigation et peuvent conduire à la salinisation des sols de Sidi Rached.

Conclusion générale

En zone aride et semi aride, une forte demande en eau d'irrigation est enregistrée. De ce fait, l'agriculture doit se contenter, d'une part, d'une quantité de plus en plus faible et, de l'autre, d'une eau de qualité décroissante. De même, lorsque l'agriculture est obligée d'utiliser des eaux de faible qualité, les règles générales de gestion doivent être modifiées. Dans ce cas, la salinité devient un facteur dont il faut tenir compte lors de l'élaboration des relations entre les besoins en eau et la production. Des ajustements des apports doivent être effectués afin de garantir la durabilité des systèmes de culture dans les zones irriguées.

La gestion de la salinité exige en effet la prise en compte des caractéristiques du sol, de la qualité de l'eau d'irrigation et des conditions locales, incluant le climat, les cultures, l'environnement économique, social, politique et culturel, et les systèmes de cultures existants.

A travers cette étude nous avons essayé de mettre en valeur la spatialisation de la conductivité électrique à partir des données de laboratoire et des lectures électromagnétiques par le Géonics EM 38. Deux principaux objectifs ont été tracés à savoir : fournir des solutions clés pour aider à évaluer la salinité du sol par induction électromagnétique et établir la cartographie de la salinité du sol du bassin afin de déduire les risques de salinisation secondaire introduites par l'intensification agricole.

Les mesures et les analyses effectuées au cours de cette étude, ont montré que les sols au niveau du bassin versant de Sidi Rached ont, majoritairement, une salinité inférieure à 2 dS/m, ce qui signifie d'après la classification des sols de USSL, 1954, qu'ils ne sont pas salins et ne présentent pas un risque de salinisation secondaire.

Cette étude montre l'intérêt de la méthode électromagnétique pour la caractérisation des sols salés ; présentant une facilité de manipulation et sans destruction afin de pouvoir établir le suivi de l'évolution de la salinité dans le temps.

Sachant que la salinité est un problème permanent pour certains sols et provoque de graves conséquences à l'échelle de l'agriculture et de l'écosystème, ainsi on doit y apporter une attention constante si on veut maintenir et améliorer leur état. Pour éviter que la salinité se répande et s'intensifie, il faut:

- Maintenir une irrigation avec une eau de bonne qualité ;
- Adopter de méthodes culturales de conservation appropriées (utilisation des variétés tolérantes) ;
- Assurer un contrôle continu pour prévoir toute modification de la qualité eau et sol ;
- Estimer la dose optimum de lessivage (par des essais continus) correspondante aux différents niveaux de salure, en tenant compte des besoins en eau des cultures ainsi que des pertes d'eau par évaporation ;

En conclusion, il y a matière à confirmer que les sols du bassin versant de Sidi Rached ne présentent pas - pour l'instant - des problèmes de salinisation secondaire ; cette dernière est un phénomène qui n'est pas statique dans le temps et dans l'espace. Pour l'éviter, nous suggérons, d'effectuer des études similaires pour assurer le suivi de l'état des sols vis-à-vis de la salinisation.

Références Bibliographiques

- A.A.C en ligne, Agriculture et Agroalimentaire Canada www.agr.gc.ca
- Allaoui A., 2006. Étude comparative de la tolérance de trois porte-greffes d'agrumes à la salinité. Mémoire d'ingénieur, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (Maroc), 144p.
- Amezketta E., 2007. Soil salinity assessment using directed soil sampling from a geophysical survey with electromagnetic technology: a case study. *Journal of Agricultural Research* 2007 5(1), 91-101. Available online at www.inia.es/sjar ISSN: 1695-971X
- ANRH, 1982. Données pluviométriques. Document interne. Alger, Algérie.
- ANRH, 2000. Données pluviométriques. Document interne. Alger, Algérie.
- ANRH, 2005. Données pluviométriques. Document interne. Alger, Algérie.
- Aubert G., 1976. Les sols sodiques en Afrique du Nord. *Ann. I.N.A.*, Alger, 6(1), pp.
- Baillargeon S., 2005. Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire de fin d'études. Université Laval, Québec, 107p.
- Bannari A., Guedon A.M., El-Harti A., Cherkaoui, F.Z. and El-Ghmari, A., 2008. Characterization of slight and moderate saline and sodic soils in irrigated agricultural land using simulated data of ALI (EO-1) sensor. *Journal of soil science and plant analysis*(In press).
- Ben Mechlia N., 2001. Perspectives de Valorisation de l'Eau d'Irrigation dans les Pays du Maghreb Prospects for irrigation water valorisation in aghreb Countries. Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie (INRAT), ressources.ciheam.org
- Benaceur M., Rahmoun C., Sdiri H., Medahi M., Selmi M., 2001. Effet du stress salin sur la germination, la croissance et la production de grains de blé. *Secheresse*, 12 (3): 167-174.
- Benchallal A., Oukil A., Belhadj Aissa A., 2009. Identification et détection, par imagerie satellitaire, de la dégradation des sols par salinité dans la cuvette d'ouargla, sud de l'Algérie., Journée d'animation scientifique (JAS09) de L' AUF Alger Novembre 2009
- Boivin P., 1988. Géostat-PC logiciel conversationnel pour calcul géostatistique, *Bull. GFHN*, 1988, Juin, p. 77-92.
- Boivin P., Brunet D., Job J.O., 1988. Conductivimétrie Electromagnétique et cartographie automatique des sols salés, Une méthode rapide et fiable. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., vol. XXIV, n°1, 39-48
- Boivin P., Brunet D., Job J.O., 1988. Conductivimétrie électromagnétique et et cartographie des sols salés. *Cahier de pédologie ORSTOM.* , vol. XXIV, no 1
- 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

- Bolt G.H., PAGE A.L., 1965. Ion exchange equations based on double layer theory Soil Science. Vol. 99, p: 357-361.
- Bottraud J.C., Bornand M. et Servat E., 1984. Mesures de résistivité appliquée à la cartographie en pédologie. Science du sol, 4, pp 276-294.
- Bouarfa S., 2003. Génie des équipements et services pour l'eau et les déchets Cemagref - Groupement de Montpellier. France. sami.bouarfa@cemagref.fr
- Bourennane H., King D., le Parco R., Isambert M. et Tabbagh A., 1998. Three-dimensional analysis of soils and materials by electrical resistivity survey. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 3, pp 5-23.
- Bower C.A., 1959. Cation exchange equilibrium in soil s affected by sodium salts. Soil Sci. 88, p. 32-35.
- Bruch D.J., Knotters M., Van Dooremolen W. A., Van Kermebeek P. et Van Seeters R.J.M., 1992. The use of electromagnetic measurements of apparent soil electrical conductivity to predict the boulder clay depth. Geoderma, 55, pp. 79-93
- Buringh P., 1960. Soil and soil conditions in Iraq. Ministry of Agriculture, 322 p., Bagdad.
- Cameron D.R., De Jong E., Read D.W.L., Oosterveld M., 1981. Mapping salinity using resistivity and electromagnetic inductive techniques. Can. J. Soil Sci.; 61(1):67-78.
- Chéry P., Dabas M., Bruand A., Voltz M., 1996. Epaisseur de la couverture de sol et prospection géophysique par des méthodes électriques. Etude de cas en petite Beauce. Géologue, 109, pp. 17-23.
- Cheverry C., 1995. Plant behaviour in saline environment. Action eau N°4, Séance spécialisée du 22 mars 1995; Ed. Acad. agro, Paris, France, 49 pages.
- Cheverry Cl., 1972. Exemple d'application des travaux de 1 "U.S. S a l i n i t y
- Corwin D. L., Lesch S. M., 2003. Using the Dual-Pathway Parallel Conductance Model to Determine How Different Soil Properties Influence Conductivity Survey Data. Agronomy Journal 95:365-379.
- Corwin D.L., Rhoades J.D., 1982. An improved technique for determining soil electrical conductivity—Depth relations from above-ground electromagnetic measurements. Soil Sci. Soc. Am. J. 46(4):517-520.
- Corwin D.L., Rhoades J.D., 1984. Measurements of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction. Soil Sci. Soc. Am. J., 48(1):288-291.
- Corwin D.L., Rhoades J.D., 1990. Establishing soil electrical conductivity-depth relations form electromagnetic induction measurements. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 21, 871-901.
- Corwin D.L., Rhoades J.D., 1990. Establishing soil electrical conductivity-depth relations form electromagnetic induction measurements. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 21,871-901
- Corwin, D.L., 2005. Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. Comput. Electron. Agric. 46:1–10.
- CRUESI, 1970. Recherche et formation en matière d ' irrigation avec des eaux salées: 1962-1969. Rapport Tech. CRUESI, Tunis/UNESCO, Paris.

- Dabas D. et Cassassoles X., 2002. Caractérisation tridimensionnelle de la variabilité des sols, application à la gestion des vignobles (système arp), Réunion de Lien de la Vigne Paris.
- Dabas M., Hesse A., Jolivet A. et Tabbagh A., 1989. Intérêt de la cartographie de la résistivité électrique pour la connaissance du sol à grande échelle. *Science du sol*, 27, pp. 65-68.
- Daoud Y et Halitim A. (1994). Irrigation et Salinisation au Sahara Algérien. *Sécheresse*. 5, 3: 151-160.
- Davis E.O., Bryan H., 1910. The electrical bridge for the determination of soluble salts in soils. U.S. Dept. Agr., Bur. Soils Bu1.n° 61, 36 pp.
- De Jong, E., Ballantyne, A.K.; Cameron, D.R. Read, O. W. L., 1979. Measurement of apparent electrical conductivity of soils by electromagnetic induction probe to aid salinity surveys. *Soil Sci. Am. J.*, 43, 810-812.
- Delhomme J.P., 1976. Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de doc. ing., ENSMP Fontainebleau, 130p
- Djili K., Daoud Y., Gaouar, A et Beldjoudi, Z. (2003). La salinisation secondaire des sols au Sahara. Conséquences sur la durabilité de l'agriculture dans les nouveaux périmètres de mise en valeur. *Sécheresse*. 4, 14 : 241- 246.
- Dossb M., 1980. Géochimie des sols sales et des eaux d'irrigation. Aménagement de la Basse Vallée de l'Euphrate en Syrie. Thèse DOC., hg., Univ., Paul Sabatier, Toulouse, 191 p.
- Droubi A., 1976. Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Thèse Doct. Ing. Strasbourg et Mém. Sci. Géol., 46, 177 p.
- Droubi A., Cheverry Cl. Fritz B. et Tardy Y., 1976b. Géochimie des eaux et des sels dans les sols des polders du lac Tchad : application d'un modèle thermodynamique de simulation de l'évaporation. *Chemical Geology*, 17,p. 165-177.
- Droubi A., Fritz B. et Tardy Y., 1976a. Equilibres entre minéraux et solutions. Programmes de calcul appliqués à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. *Cah. ORSTOM, sdr. Pédol.*, XIV, P. 13-38.
- Durand J. H., 1958. Les sols irrigables. Etude pédologique. S.E.S., Alger, 198 p.
- Durand J.H., 1983. Les sols irrigables, Techniques vivantes. Pesse, Univ. France., 339
- Dutuit R., Pourrat Y. et Dutuit J.M. (1994). La notion de stress de la cellule à l'écosystème. *Sécheresse* 1, 5 : 23 - 31.
- F.A.O., 1972. La salinité. Doc. FAO. N°7, Rome, 272p.
- Felkou M., Khechana I., 1998. Etude comparative entre les méthodes de géophysique et les méthodes pédologiques usuelles pour la détermination de certaines propriétés du sol. Mém. Ing. Agr. INA Alger, 44p
- Gascuel-odoux C., 1987. Variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol, méthode et résultats; cas d'une seule variable : revue bibliographique. *Agronomie*, 7(1), pp61-71.
- Gascuel-odoux C., Gyon D., Moreau p., 1996. Elément de géostatistique. Acte de l'école de chercheur INRA en Bioclimatologie, le Croisic, pp. 335-358.

- Geonics Limited, 1999. EM38 Ground conductivity meter operating manual. Geonics Limited, Ontario, Canada.
- Gherbi H., 2009. Cartographie de la salinité par la méthode du Géonics EMR38 du bassin versant de Sidi Rached. Mémoire d'ingénieur, El-Harrach (Alger), Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 41 p.
- Gratton Y., 2002. Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau-Terre-Environnement, Québec, Canada.
- GUESSOUM A., 2001 - L'effet de l'irrigation sur la salinité du sol dans la région de Saada - Biskra., Thèse ing, Agro, Univ Batna., 50 P.
- HALITIM A. et DAOUD Y., 1994 . Sécheresse., Revue n° 03, V : 05 Septembre 94., 151 P.
- Halitim A., 1985. Contribution à l'étude des sols des régions arides (Hautes Plaines Steppiques D'Algérie). Morphologie distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Rennes, 383p
- Hartani T., 2008. Stratégies de gestion individuelle de la salinité dans le périmètre irrigué du Bas Cheliff : cas du périmètre de Ouarizane. Actes du troisième atelier régional du projet Sirma. Tunisie.
- Hendrickx J.M.H., Baerends B., Raza Z.I., Sadig M., Akram Chaudhry M., 1992. Soil salinity assessment by electromagnetic induction of irrigated land. Soil Sci. Soc. Am. J. 56 (6): 1933-1941.
- Hendrickx, J.M.H., Kachanoski R.G., 2002. Indirect measurement of solute concentration : Nonintrusive electromagnetic induction. p. 1297–1306. In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- Herrero et Aragüés, 1988. Suelos afectados por salinidad en Aragon . Revista « Surcos de Aragon », n°9, pp. 5-10
- IDDIR M. A., 2006. Evaluation de la salinité par induction électromagnétique: Exemple d'une parcelle cultivée de la plaine de la Macta (Wilaya de Mascara). Thèse Magister. INA Alger, 110 p.
- ILRI, 1963. Reclamation of salt affected soils in Iraq. Dielemen ed., Wageningen, Pays Bas, 176 p.
- Institut National des sols, de l'Irrigation et du Drainage « INSID », 2008. Sols salins en Algérie.
- IPTRID, 2006. Extension de la salinisation et Stratégies de prévention et réhabilitation Thèse d'Etat de l'Université d'Alger Conférence électronique sur la salinisation, IPTRID (Programme International pour la Technologie et la Recherche en Irrigation et Drainage), FAO, CISEAU : Etude des sols des Plaines du Chélif., 582p
- Job J.O., Loyer J .Y., Ailoul M., 1987. Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. Cah . ORSTOM, sér.pédol.,v.23, n °2,pp.123-131.
- Johnston M.A., Savage M.J., Moolman J.H., du Plessis H.M., 1997. Evaluation of calibration methods for interpreting soil salinity from electromagnetic induction measurements. Soil Sci. Soc. Am. J., 61, 1627-1633

- Johnston M.A., Savage M.J., Moolman J.H., du Plessis H.M., 1997. Evaluation of calibration methods for interpreting soil salinity from electromagnetic induction measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 1627-1633.
- Journel A.G., 1977. Géostatistique minière. Centre de géostatistique. Ecole des mines, Fontainbleau, Tome 1 et 2, 737 p.
- Kenfaoui A., 1997. La salinité des eaux d'irrigation. Synthèse bibliographique réalisée par les élèves ingénieurs de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts de Montpellier. kenfaoui@engref.fr
- Kovda V.A., 1937. Les sols salés et alcalins. Academie des Sciences de L'URSS (en Russe), Vol. 37, no 3, p. 253-266.
- Krige, D.G., 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *J. of Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa*, 52, 119-139.
- Laboratory" 1963-1968 sur l'alcalinisation de sols soumis à l'action des eaux bicarbonatées. *Cah. ORSTOM, sér. PédoZ.*, X, p. 193-203
- Laborde J.P., 1989. Méthodes d'interpolation, géostatistique et cartographie automatique à l'usage des géographe et de quelque autres; stage DEA Nice, 21p
- Lesh S.M., Rhoades J.D., Lund L.J., Corwin D.L., 1992. Mapping soil salinity using calibrated electromagnetic measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56(2):540-548.
- Lesh S.M., Strauss D.J., Rhoades J.D., 1995. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques: I. Statistical prediction models: A comparison of multiple linear regression and cokriging. *Water Resour. Res.* 31 (1): PP. 373-386.
- Lounis Amel, 2010. Diagnostic de la pollution des eaux d'origine agricole, cas du bassin de Sidi Rached (Tipaza). Mémoire de magistère, El-Harrach (Alger), Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 138p.
- Maguy D., 2007. Effet des contraintes abiotiques en forêt marécageuse, salinité et inondation, sur le fonctionnement hydrique, azoté, et carboné du *Pterocarpus officinalis* (Fabacée). Activités de recherche, MCF UFR SEN, laboratoire de biologie et physiologie végétale, maguy.dulormne@univ-ag.fr intégrée.
- Mashali, A., Suarez, D.L Nabhan H. & Rabindra R., 2005. Integrated management for sustainable use of salt-affected soils. Rome: FAO Soils Bulletin, now printing.
- Matheron G., 1963a. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58:1246-1266.
- Matheron G., 1963b. Traité de géostatistique appliquée, II : Le Krigeage. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, No.24. Editions B. R. G. M., Paris.
- Matheron G., 1965. Les variables régionalisées et leur estimation. Une application de la théorie des fonctions aléatoire aux sciences de la nature. Masson., 305p.
- Matheron, G., 1962. Trait de géostatistique appliquée, Tome I. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, No.14. Editions Technip, Paris.
- Mc Neil, J.D., 1986. Geonics EM38 ground conductivity meter operating instructions and survey interpretation techniques. Technical Note TN-21 GoneicsLtd., Canada.
- McKenzie R.C., Chomistek W., Clark N.F., 1989. Conversion of electromagnetic inductance readings to saturated paste extract values in soils for different temperature, texture, and moisture conditions. *Can. J. Soil Sci.*, 69, 25-32.

- McNeill J.D., 1980. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Tech. Note TN-6. Geonics Limited, Mississauga, ON, Canada.
- Mezni M., Albouchi A., Bizid E. et Hamza M., 2002. Effet de la salinité des eaux d'irrigation sur la nutrition minérale chez trois variétés de luzerne pérenne (*Medicago sativa*). *Agro.*, 22, 283–291.
- Michot M.D., 2003. Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire. Thèse de doctorat de l'université de Paris 6, 394p.
- Minerals and Soils: the contribution of Minerals and Aqueous Carbonate to pH Buffering. *Soil Sci., Soc., Amer., Proc*, Vol. 38, p: 55-65.
- Montoroi J.P., 1997. Conductivité électrique de la solution du sol et d'extraits aqueux de sol. Application à un sol sulfaté acide salé de Basse-Casamance (Sénégal). *Etude et Gestion des Sols*, 4 (4), 279-298.
- Montoroi J.P., 1999. Estimation quantitative de la salinité d'un bas-fond par conductivimétrie électromagnétique : application aux sols salés de Basse-Casamance (Sénégal). In : "Actes du 2ème colloque de géophysique des sols et des formations superficielles, GEOFCAN, Orléans, 21-22 septembre 1999. Résumés étendus", BRGM, Orléans, 219-224.
- Munns R., Richard A.J., Lauchli A., 2006. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 57, No. 5, pp. 1025–1043.
- Rhoades J.D., 1992. Instrumental field methods of salinity appraisal. In G.C. Topp et al. (ed.) *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*. SSSA Spec. Publ. 30, SSSA, Madison, WI, 231-248.
- Rhoades J.D., Chanduvi F., 1999. Soil salinity assessment methods and interpretation of electrical conductivity measurements. ISSN 0254-5284, Irrigation and drainage paper 57, FAO.
- Rhoades J.D., Corwin D.L., 1981. Determining soil electrical conductivity—Depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45(1):255-260.
- Rhoades J.D., Ingvalson R.D., 1971. Determining Salinity in Fields Soils with Soil Resistance Measurements. *Soil Sci., Soc., Am., Proc.*, Vol. 35, p: 54-60.
- Rhoades J.D., Vanschilfgaarde J., 1976. An electrical conductivity probe for determination soil salinity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 647-651.
- 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.*
- Rieu M. et Cheverry Cl., 1976. Mise au point bibliographique sur quelques recherches récentes en matière de sols salés. *Cah. ORSTOM, Sér. PédoZ.*, X I V, p. 39-61.
- Robain H., Descloitres M., Ritz M., Atangana Q.Y., 1996. A multiscale electric Survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. *Applied geophysics.*, 34, pp.
- Rossi, J. S., et al, 1995. Motivational readiness to control weight. *Handbook of Assessment Methods for Eating Behaviors and Weight-Related Problems:*

- Measurement, Theory, and Research. D. B. Allison. Thousand Oaks, CA, Sage: 387-430.
- Saidi J., 2004. Influence de la phase saline sur les propriétés physiques des matériaux argileux du bas Cheliff. Thèse de Doctorat d'Etat en Science Agronomiques, Spécialité : Science du Sol. 181p.
- Slavich, P.G., Petterson. G.H., 1990. Estimating average rootzone salinity from electromagnetic induction (EM-38) measurements. *Aust. J. Soil Res.* 28(3):453–463. *Soc. Am. J.* 53(2):433–439.
- Sposito G., Mattigod S.V., 1977. On the Chemical Foundation of the Sodium Adsorption Ratio. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 41, p: 323-329
- Stogryn T., 1971. Equations for calculating the dielectric constant of saline water. *IEEE Trans Microwave theory Tech* 19 : 733-736.
- Szabolcs I., 1994. Soils and salinisation. In *Handbook of Plant and Crop Stress*. Ed. M Pessarakali. pp. 3–11. Marcel Dekker, New York.
- Tardy Y., Gac J.Y., 1979. Contrôle de la composition chimique des solutions par la précipitation des mméraux dans les sols. *Bulletin A.F.E.S.*, p: 107-123.
- Triantafilis J., Laslet G.M., McBratney A.B., 2000. Calibrating an electromagnetic Induction Instrument to Measure Salinity in Soil under Irrigation Cotton. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64 (6): 1009-1017
- Truesdell A.H., Jones B.E., 1974. *Wateq: a Computer Program for Calculating Chemical Equilibria of Natural Waters*. J., Res., Geol., Survey, Vol. 2, no 2, p: 233-248.
- U. S. Salinity Laboratory Staff, 1954. Diagnostic and improvement of saline and alkali soils
- U.S.D.A. Hardbook, n 60, 160p.
- USDA en ligne. The United States Department of Agriculture website provides suitable global information about agricultural issues. Available en ligne at: <http://www.usad.gov>.
- Van bremen N., Wielemaker W.G., 1974. Buffer Intensities and Equilibrium pH of
- Voltz M., 1986. Variabilité spatiale des propriétés physiques du sol en milieu alluvial. Thèse doc. Ing, ENSA Montpellier, 220p
- Wade M.A., 1998. Cartographie de la salinité dans la zone de Ngnith (Delta du fleuve Sénégal), Utilisation du conductivimètre électromagnétique EM-38. Rapport de stage Ingénieur. Université Dakar, 27p.
- Webster R., Burgess T.M., 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. in: B. A. Stewart. *Advances in soil science*, Vol. 3. Springer Verlag, 1-70.
- wikipedia en ligne : fr.wikipedia.org/wiki/salinisation
- Williams B.G., Baker G.G., 1982. An Electromagnetic Induction technique for Reconnaissance Surveys of Soil Salinity Hazards. *Austr., J., Soil Res.*, no 20, p: 107-108
- Williams B.G., Hoey D., 1987. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability in the salt and clay content of soils. *Austr. J. Soil Res.*, 25, 21-27.

- Wollenhaupt N.C., Richardson J.L., Foss J.E., Doll E.C., 1986. A rapid method for estimating weighted soil salinity from apparent soil electrical conductivity measured with an aboveground electromagnetic induction meter. *Can. J. Soil Sci.*, 66, 315-321.
- Wollenhaupt N.C., Richardson J.L., Foss J.E., Doll E.C., 1986. A rapid method for estimating weighted soil salinity from apparent soil electrical conductivity measured with an aboveground electromagnetic induction meter. *Can. J. Soil Sci.*, 66, 315-321.
- Wraith, J.M., D. Or., 1999. Temperature effects on time domain reflectometry measurement of soil bulk dielectric constant: experimental evidence and hypothesis development. *Water Resour. Res.* 35:361#369.

Table de correction de CE A 25 °C									
CE(25°C) = CE(t) * ft									
Temp.	Factor	Temp.	Factor	Temp.	Factor	Temp.	Factor	Temp.	Factor
°C	Ft	°C	ft	°C	ft	°C	ft	°C	ft
0,100	1,863	5,100	1,609	10,100	1,407	15,100	1,243	20,100	1,109
0,200	1,858	5,200	1,605	10,200	1,403	15,200	1,240	20,200	1,106
0,300	1,852	5,300	1,600	10,300	1,400	15,300	1,237	20,300	1,104
0,400	1,846	5,400	1,596	10,400	1,396	15,400	1,234	20,400	1,102
0,500	1,840	5,500	1,592	10,500	1,393	15,500	1,231	20,500	1,099
0,600	1,835	5,600	1,587	10,600	1,389	15,600	1,228	20,600	1,097
0,700	1,829	5,700	1,583	10,700	1,385	15,700	1,225	20,700	1,094
0,800	1,824	5,800	1,578	10,800	1,382	15,800	1,222	20,800	1,092
0,900	1,818	5,900	1,574	10,900	1,378	15,900	1,220	20,900	1,090
1,000	1,813	6,000	1,570	11,000	1,375	16,000	1,217	21,000	1,087
1,100	1,807	6,100	1,565	11,100	1,371	16,100	1,214	21,100	1,085
1,200	1,802	6,200	1,561	11,200	1,368	16,200	1,211	21,200	1,083
1,300	1,796	6,300	1,557	11,300	1,364	16,300	1,208	21,300	1,080
1,400	1,791	6,400	1,553	11,400	1,361	16,400	1,205	21,400	1,078
1,500	1,786	6,500	1,548	11,500	1,358	16,500	1,203	21,500	1,076
1,600	1,780	6,600	1,544	11,600	1,354	16,600	1,200	21,600	1,073
1,700	1,775	6,700	1,540	11,700	1,351	16,700	1,197	21,700	1,071
1,800	1,770	6,800	1,536	11,800	1,347	16,800	1,194	21,800	1,069
1,900	1,764	6,900	1,532	11,900	1,344	16,900	1,192	21,900	1,067
2,000	1,759	7,000	1,527	12,000	1,341	17,000	1,189	22,000	1,064
2,100	1,754	7,100	1,523	12,100	1,337	17,100	1,186	22,100	1,062
2,200	1,749	7,200	1,519	12,200	1,334	17,200	1,183	22,200	1,060
2,300	1,744	7,300	1,515	12,300	1,331	17,300	1,181	22,300	1,058
2,400	1,739	7,400	1,511	12,400	1,327	17,400	1,178	22,400	1,055
2,500	1,734	7,500	1,507	12,500	1,324	17,500	1,175	22,500	1,053
2,600	1,729	7,600	1,503	12,600	1,321	17,600	1,173	22,600	1,051
2,700	1,723	7,700	1,499	12,700	1,317	17,700	1,170	22,700	1,049
2,800	1,718	7,800	1,495	12,800	1,314	17,800	1,167	22,800	1,047
2,900	1,713	7,900	1,491	12,900	1,311	17,900	1,165	22,900	1,044
3,000	1,709	8,000	1,487	13,000	1,308	18,000	1,162	23,000	1,042
3,100	1,704	8,100	1,483	13,100	1,304	18,100	1,159	23,100	1,040
3,200	1,699	8,200	1,479	13,200	1,301	18,200	1,157	23,200	1,038
3,300	1,694	8,300	1,475	13,300	1,298	18,300	1,154	23,300	1,036
3,400	1,689	8,400	1,471	13,400	1,295	18,400	1,151	23,400	1,033
3,500	1,684	8,500	1,467	13,500	1,292	18,500	1,149	23,500	1,031
3,600	1,679	8,600	1,463	13,600	1,289	18,600	1,146	23,600	1,029
3,700	1,674	8,700	1,459	13,700	1,285	18,700	1,144	23,700	1,027
3,800	1,670	8,800	1,456	13,800	1,282	18,800	1,141	23,800	1,025
3,900	1,665	8,900	1,452	13,900	1,279	18,900	1,139	23,900	1,023
4,000	1,660	9,000	1,448	14,000	1,276	19,000	1,136	24,000	1,021
4,100	1,655	9,100	1,444	14,100	1,273	19,100	1,134	24,100	1,019
4,400	1,641	9,400	1,433	14,400	1,264	19,400	1,126	24,400	1,012
4,500	1,637	9,500	1,429	14,500	1,261	19,500	1,124	24,500	1,010
4,600	1,632	9,600	1,425	14,600	1,258	19,600	1,121	24,600	1,008
4,700	1,628	9,700	1,422	14,700	1,255	19,700	1,119	24,700	1,006
4,800	1,623	9,800	1,418	14,800	1,252	19,800	1,116	24,800	1,004
4,900	1,618	9,900	1,414	14,900	1,249	19,900	1,114	24,900	1,002
5,000	1,614	10,000	1,411	15,000	1,246	20,000	1,111	25,000	1,000
25,100	0,998	30,100	0,905	35,100	0,827	40,100	0,762	45,100	0,704
25,200	0,996	30,200	0,903	35,200	0,826	40,200	0,760	45,200	0,703
25,300	0,994	30,300	0,902	35,300	0,824	40,300	0,759	45,300	0,701
25,400	0,992	30,400	0,900	35,400	0,823	40,400	0,758	45,400	0,700
25,500	0,990	30,500	0,898	35,500	0,822	40,500	0,757	45,500	0,699

Points d'échantillonnage pour l'extrait de pâte saturée

POINTS	EMI Hor	EMI Ver	CEes
1	0,53	0,58	0,62
2	1,07	1,13	1,12
3	0,83	0,81	1,19
4	0,86	1,19	0,97
5	0,89	1,19	0,97
6	0,89	1,00	1,37
7	0,69	0,73	1,10
8	1,06	0,91	1,14
9	0,44	0,39	0,50
10	0,22	0,16	0,35
11	0,24	0,32	0,34
12	0,13	0,16	0,20
13	0,22	0,33	0,29
14	0,21	0,28	0,28
15	0,20	0,31	0,36
16	0,25	0,34	0,38
17	0,18	0,31	0,25
18	0,16	0,17	0,22
19	0,16	0,23	0,23
20	0,16	0,08	0,66
21	0,16	0,02	0,85
22	0,51	0,28	0,65
23	0,12	0,10	0,57
24	0,12	0,04	0,79
25	0,01	0,02	0,48
26	0,09	0,01	0,60
27	0,10	0,02	0,61
28	0,04	0,07	0,54
29	0,02	0,11	0,68
30	0,31	0,23	0,63
31	0,23	0,33	0,33
32	0,34	0,46	0,57
33	0,19	0,23	0,41
34	0,31	0,47	0,75
35	0,30	0,40	0,47
36	0,29	0,44	0,51
37	0,36	0,48	0,55
38	0,26	0,44	0,40
39	0,23	0,24	0,26
40	0,22	0,11	0,60
41	0,03	0,15	0,32
42	0,14	0,03	0,35
43	0,70	0,38	0,73
44	0,16	0,14	0,50
45	0,16	0,05	0,44
46	0,01	0,03	0,42
47	0,12	0,01	0,58
48	0,14	0,03	0,60
49	0,05	0,10	0,51
50	0,36	0,19	0,58
51	0,48	0,26	0,60
52	0,13	0,26	0,4
53	0,57	0,30	0,82
54	0,35	0,16	0,65
55	0,39	0,20	0,67
56	0,43	0,21	0,78

Annexe 05

Points de lectures électromagnétiques par le Géonics EM38 après calibration :

Points	X	Y	Eca-h	Eca-v	Ece-h
1	459274,96	4041534,22	0,08208	0,15048	0,40464208
2	459274,96	4041539,22	0,01368	0,24624	0,35327368
3	459274,96	4041544,23	0,09576	0,23256	0,41491576
4	459274,96	4041549,22	0,09576	0,12312	0,41491576
5	459921,75	4041824,8	0,04104	0,16416	0,37382104
6	459921,75	4041829,79	0,15048	0,21888	0,45601048
7	459921,75	4041834,79	0,31464	0,46512	0,57929464
8	458867,76	4041962,76	0,2736	0,43776	0,5484736
9	458867,76	4041967,76	0,35568	0,60192	0,61011568
10	458867,76	4041972,75	0,31464	0,58824	0,57929464
11	458872,75	4041972,75	0,23256	0,8202	0,51765256
12	458872,75	4041967,76	0,2736	0,4788	0,5484736
13	458872,75	4041962,76	0,12312	0,42408	0,43546312
14	459926,75	4041834,79	0,2052	0,56088	0,4971052
15	459926,75	4041829,79	0,04104	0,23256	0,37382104
16	459926,75	4041824,8	0,05472	0,23256	0,38409472
17	459279,96	4041549,22	0,09576	0,35568	0,41491576
18	459279,96	4041544,23	0,15048	0,342	0,45601048
19	459279,96	4041539,22	0,19152	0,45144	0,48683152
20	459279,96	4041534,22	0,05472	0,32832	0,38409472
21	459284,96	4041534,22	0,09576	0,38304	0,41491576
22	459284,96	4041539,22	0,21888	0,4788	0,50737888
23	459284,96	4041544,23	0,08208	0,36936	0,40464208
24	459284,96	4041549,22	0,05472	0,31464	0,38409472
25	461346,55	4041956,03	0,04104	0,2052	0,37382104
26	461346,55	4041961,03	0,1368	0,38304	0,4457368
27	461346,55	4041966,03	0,08208	0,1368	0,40464208
28	460264,18	4042304,43	0,02736	0,2052	0,36354736
29	460264,18	4042309,43	0,10944	0,1368	0,42518944
30	460264,18	4042314,43	0,0684	0,30096	0,3943684
31	460269,19	4042314,43	0,12312	0,4104	0,43546312
32	460269,19	4042309,43	0,08208	0,10944	0,40464208
33	460269,19	4042304,43	0,17784	0,08208	0,47655784
34	461351,55	4041966,03	0,04104	0,23256	0,37382104
35	461351,55	4041961,03	0,0684	0,16416	0,3943684
36	461351,55	4041956,03	0,08208	0,15048	0,40464208
37	460239,52	4041361,74	0,21888	0,38304	0,50737888
38	460239,52	4041356,75	0,09576	0,09576	0,41491576
39	460239,52	4041351,74	0,0684	0,31464	0,3943684
40	460239,52	4041346,74	0,05472	0,30096	0,38409472
41	460244,51	4041346,74	0,12312	0,38304	0,43546312
42	460244,51	4041351,74	0	0,25992	0,343
43	460244,51	4041356,75	0,01368	0,2052	0,35327368
44	460244,51	4041361,74	0,12312	0,15048	0,43546312
45	461356,55	4041956,03	0,2052	0,09576	0,4971052
46	461356,55	4041961,03	0,12312	0,15048	0,43546312
47	461356,55	4041966,03	0,02736	0,25992	0,36354736
48	460274,18	4042304,43	0,0684	0,23256	0,3943684
49	460274,18	4042309,43	0,08208	0,38304	0,40464208
50	460274,18	4042314,43	0,0684	0,17784	0,3943684
51	461513,75	4042606,38	0,01368	0,28728	0,35327368
52	461513,75	4042601,38	0,10944	0,1368	0,42518944
53	461513,75	4042596,38	0,10944	0,16416	0,42518944
54	462281,29	4042191	0,09576	0,16416	0,41491576
55	462281,29	4042186	0,02736	0,16416	0,36354736
56	462281,29	4042181	0,09576	0,24624	0,41491576

